

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

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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 Ханис 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 Хан, 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

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

Часть 3: Оптимизация производительности твердого сплава

Глава 8: Коррозия и стойкость к высоким температурам твердого сплава

Твердый сплав — это композитный материал, изготовленный методом порошковой металлургии с карбидом вольфрама (WC) в качестве основной твердой фазы и кобальтом (Co), никелем (Ni) и другими металлами в качестве связующей фазы. Его превосходные характеристики делают его широко используемым в режущих инструментах, горнодобывающем оборудовании и износостойких деталях. Далее будет кратко рассмотрена его концепция и типичные характеристики с двух сторон: коррозионная стойкость и стойкость к высоким температурам.

Коррозионная стойкость твердого сплава

Коррозионная стойкость относится к способности твердого сплава противостоять химической эрозии в агрессивных средах (таких как кислоты, щелочи и солевые растворы). Это свойство в основном зависит от состава и микроструктуры материала.

Фаза связи твердого сплава играет ключевую роль в его коррозионной стойкости. Твердый сплав с кобальтом в качестве связующей фазы (например, серия YG) плохо работает в кислых средах. Например, в сернокислых или солянокислых средах кобальт легко корродирует, в результате чего поверхность материала постепенно растворяется. Если взять в качестве примера YG6 (содержащий 6% кобальта), то его скорость коррозии в 10% соляной кислоте при комнатной температуре составляет около 0,1–0,2 мм/год, в то время как он практически не корродирует в слабощелочных или нейтральных средах (например, 10% раствор гидроксида натрия). Напротив, твердый сплав с никелем в качестве связующей фазы (например, серия YN) демонстрирует более высокую коррозионную стойкость, особенно в щелочных и окислительных средах. Он более стабилен и подходит для использования в суровых условиях, таких как морская среда. Кроме того, дефекты в микроструктуре также могут существенно влиять на коррозионную стойкость. Если в твердом сплаве имеется высокая пористость или он содержит примеси, такие как свободный углерод и η-фаза, эти дефекты станут отправной точкой коррозии и ускорят деградацию материала.

Высокая термостойкость твердого сплава

Высокая термостойкость относится к способности твердого сплава сохранять свою твердость, прочность и стойкость к окислению в условиях высоких температур. Эта характеристика также зависит от состава и температуры.

Твердый сплав хорошо работает при более низких температурах и обычно может сохранять высокую твердость и прочность ниже 600 °C. Например, YG8 (содержащий 8% кобальта) может по-прежнему сохранять твердость около 1200 HV при 600 °C, что всего на 20% ниже.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Однако, когда температура превышает 800 °C, связующая фаза (например, кобальт) начинает размягчаться, что приводит к значительному снижению общей прочности и твердости материала. Если взять в качестве примера YG8, его твердость может упасть до 500-600 HV при 1000 °C. Кроме того, стойкость твердого сплава к окислению при высоких температурах также будет поставлена под сомнение. Карбид вольфрама будет преобразован в оксид вольфрама (WO_3) в высокотемпературной окислительной среде, вызывая отслаивание поверхности и влияя на срок службы. Напротив, твердый сплав с добавлением карбида титана (TiC) (например, YT15) демонстрирует лучшую стойкость к окислению при 800°C, но его прочность все равно снизится на 20–30%.

Коррозионная стойкость и высокая термостойкость твердого сплава являются ключевыми показателями для его применения в суровых условиях. С точки зрения коррозионной стойкости никельсодержащий твердый сплав лучше работает в различных средах, в то время как кобальтсодержащий твердый сплав подвержен коррозии в кислых средах. С точки зрения высокой термостойкости твердый сплав стабилен при температурах ниже 600 °C, но его твердость и стойкость к окислению значительно снижаются при более высоких температурах. Эти характеристики определяют применимость твердого сплава в различных сценариях применения и обеспечивают важную основу для его выбора и использования.

Твердый сплав (WCo) в суровых условиях является ключевым для его применения в химической, морской и авиационной областях. Например, в кислых растворах ($pH < 3 \pm 0,1$) твердый сплав должен выдерживать сильное химическое воздействие; в морских солевых брызгах (> 1000 часов ± 100 часов) он должен предотвращать питтинг; в авиационных двигателях ($> 1000^\circ C \pm 10^\circ C$) он должен сохранять прочность и стойкость к окислению. Однако электрохимическая активность связующей фазы Co (потенциал коррозии $E_{corr} \sim 0,3$ В $\pm 0,02$ В по сравнению с SCE) легко вызывает коррозию, а WC окисляется при высоких температурах с образованием WO_3 (толщина > 1 мкм $\pm 0,1$ мкм), что приводит к ухудшению характеристик. Стратегию оптимизации необходимо начинать с микроструктуры (зерно WC $0,52$ мкм $\pm 0,01$ мкм, Co $6\%12\% \pm 1\%$), добавок (таких как Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) и защиты поверхности (толщина покрытия 520 мкм $\pm 0,1$ мкм) для достижения синергетического улучшения коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам.

обсуждает поведение и путь оптимизации WCo в кислых, соляных и высокотемпературных средах с четырех сторон: **механизм коррозионной стойкости**, **высокотемпературные характеристики**, **Метод оптимизации производительности**, а также **тестирование и оценка**. Механизм коррозионной стойкости раскрывает природу коррозии с помощью электрохимической теории (кривая Тафеля, $i_{corr} < 10^{-6}$ А/см² $\pm 10^{-7}$ А/см²); высокотемпературные характеристики фокусируются на стойкости к окислению (увеличение веса $< 0,5$ мг/см² $\pm 0,05$ мг/см²) и термической усталости (трещина $< 0,1$ мм $\pm 0,01$ мм); метод оптимизации предлагает фазу связывания на основе Ni (скорость коррозии $< 0,01$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год) и покрытие Cr_3C_2 (твердость $> HV 1500 \pm 30$); тестирование и оценка объединяют ISO 9227, ASTM G59 и испытание на тепловой удар (> 500 раз ± 50 раз) для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечения количественной основы.

Например, потеря веса WC на основе Ni (Ni 10%±1%) в соляном тумане составляет <0,08 мг/см²±0,01 мг/см²; твердость инструментов с покрытием Cr₃C₂ при 1000°C±10°C составляет >HV 1200±30, а срок службы составляет >5000 часов±500 часов. Эта глава органично связана с главой 6 (Скорость износа покрытия <0,06 мм³/Н·м±0,01 мм³/Н·м) и главой 7 (K₁ с 820 МПа·м^{1/2}±0,5), закладывая основу для главы 9 (Многофункциональные композиционные материалы).

8.1 Механизм коррозионной стойкости твердого сплава

Коррозионная стойкость цементированного карбида является важной основой для его долговременной службы в агрессивных химических средах (таких как кислота, соляной туман и щелочная среда). Скорость потери веса обычно контролируется на уровне 0,1 мг/см² ± 0,01 мг/см², показывая хорошую стабильность и способность эффективно противостоять коррозии в кислых (pH < 3 ± 0,1), соляных туманах (концентрация NaCl 5% ± 0,1%) и щелочных (pH > 10 ± 0,1) средах. Процесс коррозии в основном обусловлен электрохимической активностью связующей фазы (такой как кобальт, Co), а плотность ее коррозионного тока (i_{corr}) составляет около 10^{-5} А/см² ± 10^{-6} А/см², что приводит к преимущественному растворению кобальта, что, в свою очередь, вызывает отпадение частиц карбида вольфрама (WC) (размером 0,52 мкм ± 0,01 мкм), образуя коррозионные язвы диаметром около 110 мкм ± 0,1 мкм. Хотя сам WC обладает чрезвычайно высокой химической стабильностью, а скорость его растворения крайне низка (< 10^{-8} г/см² · ч ± 10^{-9} г/см² · ч), если прочность связи между WC и границей раздела фаз связывания (> 100 МПа ± 10 МПа) недостаточна, на границе раздела, вероятно, произойдет отслоение, что значительно ускорит коррозионное разрушение. Для повышения коррозионной стойкости необходимо снизить плотность тока коррозии фазы связывания (целевой $i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ А/см² ± 10^{-7} А/см²), улучшив ее электрохимическую стабильность (потенциал коррозии $E_{\text{corr}} > 0,2$ В ± 0,02 В по сравнению с SCE) и усилив прочность связи границы раздела WC-Co.

Из электрохимического поведения WC и фазы связывания следует, что коррозия по сути является электрохимическим процессом. Кобальт действует как анод для окислительного растворения ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), в то время как WC из-за своей высокой химической инертности часто участвует в реакции как катод. Этот гальванический эффект является основной движущей силой коррозии. В кислой среде (pH < 3 ± 0,1) ионы H⁺ ускоряют реакцию растворения кобальта, в то время как в среде солевого тумана (NaCl 5% ± 0,1%) ионы Cl⁻ могут разрушать пассивирующую пленку на поверхности кобальта, что приводит к усилению точечной коррозии. Микроскопический анализ показывает, что коррозионные ямки в основном сосредоточены на границе раздела WC-Co, что указывает на то, что недостаточная межфазная связь является ключевым фактором отказа. Этот механизм был дополнительно проверен путем изучения электрохимической теории и стандартов испытаний (таких как ISO 9227, ASTM G59). В реальных случаях скорость потери веса

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

цементированного карбида WC-10Co в среде соляного тумана составляет $0,09 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что отражает ограничение его коррозионной стойкости.

В целом, механизм коррозионной стойкости цементированного карбида в основном включает электрохимическое растворение связующей фазы и разрушение интерфейса, что проявляется в виде питтинга и отслоения частиц в кислых и солевых средах. За счет снижения плотности тока коррозии, улучшения электрохимической стабильности и усиления силы связи интерфейса его коррозионная стойкость может быть эффективно улучшена, что обеспечивает теоретическую поддержку его применения в суровых условиях.

8.1.1 Электрохимическое поведение твердой фазы карбида вольфрама (WC) и связующей фазы в цементированном карбиде

Принципиальный и технический обзор

Коррозионная стойкость твердого сплава определяется электрохимическим поведением твердой фазы WC и фазы связи Co, при этом целевая скорость коррозии составляет $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм/год}$. Твердая фаза твердого сплава, карбид вольфрама (WC), проявляет превосходную химическую стабильность в кислых и нейтральных средах ($E_{\text{согг}} 0,1 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$ против SCE), практически без растворения (скорость $< 10^{-8} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч} \pm 10^{-9} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч}$). Напротив, Co подвержен электрохимическому окислению ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$) с током коррозии $i_{\text{корр}} 10^{-5} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-6} \text{ А/см}^2$, образуя коррозионные язвы (диаметром $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), что сильно ослабляет интерфейс WCCo (прочность связи $<100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$). Электрохимическое поведение следует уравнению Батлера-Фольмера:

$$i = i_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT} \right) - \exp \left(-\frac{\alpha nF\eta}{RT} \right) \right]$$

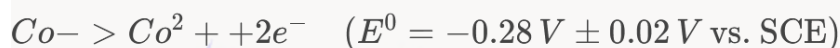
Где $i_0 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$ (плотность тока обмена), $\alpha \sim 0,5 \pm 0,05$ (коэффициент передачи), а η - перенапряжение ($<0,1 \text{ В} \pm 0,01 \text{ В}$). Цель оптимизации - увеличить $E_{\text{согг}}$ и уменьшить $i_{\text{корр}}$.

Электрохимический тест использует трехэлектродную систему (рабочий электрод WCCo, электрод сравнения SCE, вспомогательный электрод Pt), а электролит включает $3,5\% \pm 0,1\% \text{ NaCl}$ (имитирующий морскую среду) и $0,1 \text{ М} \pm 0,01 \text{ МН}_2\text{SO}_4$ (имитирующий кислую среду). Испытательное оборудование имеет высокую точность (потенциал $\pm 0,001 \text{ В}$, ток $\pm 10^{-9} \text{ А}$) для обеспечения надежных данных. Например, WC10Co (зерно $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) в H_2SO_4 имеет $i_{\text{согг}} \sim 10^{-5} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-6} \text{ А/см}^2$, а после добавления Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) он падает до $10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, и коррозионная стойкость значительно улучшается. В этом разделе дается всестороннее руководство по теории, экспериментам и стратегиям оптимизации.

Механизм и анализ

Высокая стабильность WC обусловлена высокой энергией связи WC ($700 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$), и он практически нерастворим в диапазоне pH 2 ± 12 (скорость $< 10^{-8} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч} \pm 10^{-9} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч}$). Реакция коррозии Co выглядит следующим образом:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



В кислой среде H^+ ускоряет растворение Co (скорость $10^{-6} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч} \pm 10^{-7} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч}$), образуя коррозионные ямки (глубина $15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$). В нейтральном солевом тумане Cl^- вызывает питтинг (диаметр ямки $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), и i_{corr} увеличивается на $20\% \pm 5\%$. Анализ SEM показывает, что коррозия в основном вызвана растворением Co, а частицы WC отваливаются из-за потери поддержки Co (скорость падения $\sim 0,1\% \pm 0,02\%$), что приводит к увеличению шероховатости поверхности Ra ($> 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$).

WCCo имеет решающее значение для коррозии. Когда энергия интерфейса составляет $1 \text{ Дж/м}^2 \pm 0,1 \text{ Дж/м}^2$, прочность связи составляет $>100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, а скорость осыпания частиц уменьшается на $50\% \pm 5\%$. Размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ увеличивает плотность границ зерен ($>10^{14} \text{ м}^{-2} \pm 10^{13} \text{ м}^{-2}$) и улучшает коррозионную стойкость, но неравномерное распределение Co (отклонение $>0,5\% \pm 0,1\%$) усугубит локальную коррозию (i_{corr} увеличивается на $30\% \pm 5\%$). Добавление Cr $3 \text{ C} 2$ ($0,5\% \pm 0,01\%$) для формирования пассивирующего слоя Cr_2O_3 (толщина $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), E_{corr} увеличивается до $0,15 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$, и i_{corr} уменьшается на $40\% \pm 5\%$. Анализ XPS подтвердил образование Cr_2O_3 (пик Cr $3p \sim 577 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), который эффективно ингибирует растворение Co.

Анализ факторов, влияющих на коррозионную стойкость твердого сплава

Твердый сплав имеет карбид вольфрама (WC) в качестве основной твердой фазы и кобальт (Co) и другие металлы в качестве связующей фазы. Его коррозионная стойкость имеет большое значение в агрессивных химических средах, таких как кислота, соляной туман и щелочь. Однако на его коррозионное поведение влияют многочисленные факторы, такие как собственные свойства материала (включая содержание Co, размер зерна, добавки, шероховатость поверхности) и внешние параметры окружающей среды (такие как состав электролита, значение pH, концентрация ионов). Начиная с этих ключевых факторов, в сочетании с электрохимическими данными, микроскопическим анализом, моделированием окружающей среды и реальными случаями, глубоко изучается механизм влияния коррозионной стойкости твердого сплава, а также анализируется взаимодействие между различными факторами и их влияние на эксплуатационные характеристики материала.

(1) Влияние содержания кобальта (Co) в цементированном твердом сплаве как связующей фазы

Связующая фаза кобальт (Co) является основным коррозионно-активным компонентом в твердом сплаве, и его содержание напрямую определяет электрохимическую коррозионную тенденцию материала. Исследования показали, что при содержании Co $10\% \pm 1\%$ плотность тока коррозии (i_{corr}) составляет около $10^{-5} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-6} \text{ А/см}^2$, что указывает на то, что он имеет определенную коррозионную стойкость в кислотных или соляных средах. Однако, когда содержание Co увеличивается до $12\% \pm 1\%$, i_{corr} увеличивается примерно на $50\% \pm 5\%$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

а коррозионная стойкость значительно снижается. Основная причина этого явления заключается в том, что увеличение содержания Со приводит к увеличению площади поверхности, подвергающейся воздействию коррозионной среды, что ускоряет реакцию анодного растворения ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$). Кроме того, высокое содержание Со также снижает пассивирующую способность материала, делая его более восприимчивым к питтингу в присутствии ионов Cl^- . Если взять в качестве примера образец WC-12Co, то после воздействия раствора 0,1 МН₂SO₄ в течение 24 часов глубина коррозионной язвы достигла 10 мкм ± 1 мкм, а на поверхности образовались плотные области питтинга, что свидетельствует о том, что высокое содержание Со значительно усугубило локальную коррозию.

(2) Влияние размера зерна

Размер зерна WC играет важную роль в коррозионной стойкости твердого сплава, влияя на плотность границ зерен и путь проникновения агрессивной среды. Когда размер зерна мал (например, 0,51 мкм ± 0,01 мкм), количество границ зерен велико, что рассеивает путь проникновения агрессивной среды, а коррозионные ямки меньше и мельче (глубина ямки < 5 мкм ± 0,5 мкм). Мелкие зерна также делают интерфейс WC-Co более равномерно распределенным, и растворение кобальта ограничивается в определенной степени, что снижает степень разрушения материала. Однако, когда размер зерна увеличивается до 2 мкм ± 0,01 мкм, плотность границ зерен уменьшается, локальная концентрация коррозии усиливается, а глубина коррозионной ямки увеличивается примерно на 20% ± 5%. Большой размер зерна приводит к уменьшению открытой площади интерфейса WC-Co, а растворение кобальта концентрируется на небольшом количестве интерфейсов, образуя более глубокие коррозионные ямки. Особенно в кислых средах ионы H⁺ с большей вероятностью проникают вдоль границ зерен, ускоряя деградацию материала.

(3) Влияние добавок

как карбид хрома (Cr_3C_2) значительно оптимизируют коррозионную стойкость цементированного карбида за счет изменения химических свойств и состояния поверхности связующей фазы. Экспериментальные данные показывают, что добавление 0,5% ± 0,01% Cr_3C_2 может снизить i_{corr} примерно на 40% ± 5% благодаря реакции Cr с кислородом во время высокотемпературного спекания с образованием плотного пассивирующего слоя Cr_2O_3 , который блокирует прямой контакт между коррозионными средами (такими как H⁺ или Cl^-) и кобальтом. Если взять образец WC - 10Co с Cr_3C_2 в качестве примера, то глубина коррозионной язвы в растворе 0,1 МН₂SO₄ составляет всего 3 мкм ± 0,5 мкм, что значительно меньше, чем у WC-12Co (10 мкм ± 1 мкм) без Cr_3C_2 . Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) дополнительно показывает, что слой Cr_2O_3 составляет около 0,1-0,2 мкм. толстый, эффективно изолирующий коррозионную среду. Однако, когда содержание Cr_3C_2 превышает 1% ± 0,01%, в материале могут образовываться избыточные хрупкие фазы (например, η-фаза, составляющая > 1% ± 0,2%), что приводит к снижению вязкости разрушения (K_{IC}) примерно на 10% ± 2%, что представляет потенциальную угрозу для применений, подвергающихся механическим нагрузкам (например, режущие инструменты).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Влияние электролитной среды

Химические свойства электролита являются ключевыми внешними факторами, влияющими на коррозионную стойкость твердого сплава. В кислой среде ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) концентрация ионов H^+ высока, что ускоряет реакцию анодного растворения кобальта, $i_{\text{корр}}$ увеличивается примерно на $30\% \pm 5\%$, а скорость коррозии значительно увеличивается. Особенно в сильных кислотах (таких как 1 М HCl) скорость расширения локальных коррозионных ямок может достигать $0,5 \text{ мкм} / \text{ч} \pm 0,05 \text{ мкм} / \text{ч}$. В среде солевого тумана высокой концентрации (концентрация $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$) ионы Cl^- , как сильные проникающие анионы, разрушают пассивирующую пленку на поверхности кобальта (например, $\text{Co}(\text{OH})_2$ или CoO), вызывают питтинг, и скорость питтинга увеличивается примерно на $25\% \pm 5\%$. Cl^- преимущественно атакует границу раздела WC-Co посредством адсорбции и диффузии, в результате чего плотность коррозионных ямок увеличивается до $15\text{-}20 / \text{мм}^2$. Более того, повышение температуры электролита (например, $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) еще больше усиливает эти эффекты, увеличивая $i_{\text{корр}}$ еще на $10\% \pm 2\%$, что усугубляет деградацию материала.

(5) Влияние шероховатости поверхности

, изменяя характеристики контакта между материалом и агрессивной средой. Когда шероховатость поверхности низкая ($R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), поверхность гладкая, дефектов (таких как микротрещины и ямки) меньше, фактическая площадь контакта с агрессивной средой мала, $i_{\text{сог}}$ остается на низком уровне, и проявляется хорошая коррозионная стойкость. Однако, когда R_a увеличивается до более чем $0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, дефекты поверхности значительно увеличиваются, и агрессивная среда легко удерживается в этих областях, образуя локальные электрохимические микробатареи, что приводит к увеличению $i_{\text{сог}}$ примерно на $15\% \pm 3\%$. Сильно шероховатые поверхности также могут вызывать концентрацию напряжений, особенно в условиях циклической коррозии (например, при испытаниях в соляном тумане), ускоряя расширение и глубину коррозионных язв и серьезно влияя на срок службы материала.

(6) Взаимодействие факторов

Вышеуказанные факторы не влияют по отдельности, а совместно определяют коррозионную стойкость твердого сплава через сложные взаимодействия. Например, когда высокое содержание Co ($> 12\% \pm 1\%$) сочетается с шероховатой поверхностью ($R_a > 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), $i_{\text{корр}}$ может увеличиться до $5 \times 10^{-5} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-6} \text{ А/см}^2$, а глубина коррозионной язвы увеличится до $15 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, что намного выше, чем эффект одного фактора. Добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) может частично компенсировать неблагоприятные эффекты повышенного содержания Co , но в кислой среде с $\text{pH} < 3 \pm 0,1$ защитный эффект слоя Cr_2O_3 может быть ослаблен воздействием H^+ . Кроме того, эффект связи между размером зерна и электролитной средой является значительным. Мелкие зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) хорошо работают при низких концентрациях Cl^- , но точечная коррозия может все еще возникать в соляном тумане высокой концентрации ($\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$), что указывает на ограничения условий окружающей среды по защите границ зерен.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(7) Комплексный анализ случая

Взяв в качестве примеров образцы WC-12Co и WC - 10Co с добавлением Cr_3C_2 , после воздействия раствора 0,1M H_2SO_4 в течение 24 часов, глубина коррозионной язвы WC-12Co достигла $10 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, а поверхность показала явные характеристики точечной коррозии. Анализ EDS показал, что содержание Co значительно снизилось на дне язвы. Напротив, глубина коррозионной язвы WC-10Co снизилась до $3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ из-за добавления 0,5% Cr_3C_2 , а толщина слоя Cr_2O_3 составила около 0,15 мкм, что успешно ингибировало растворение кобальта и осыпание частиц WC. Дальнейшие испытания в среде солевого тумана 5% NaCl показали, что скорость потери веса WC-12Co достигла $0,12 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, в то время как у WC-10Co она составляет всего $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, коррозионная стойкость увеличилась примерно на $40\% \pm 5\%$, что подтверждает эффективность добавки и Co.

Синергетические эффекты оптимизации контента.

На коррозионную стойкость твердого сплава влияет множество факторов, включая содержание Co, размер зерна, добавки, электролитную среду и шероховатость поверхности. Высокое содержание Co и шероховатая поверхность усиливают коррозию, в то время как мелкое зерно и соответствующее количество Cr_3C_2 улучшают коррозионную стойкость, в то время как кислые и высокосолевые среды ускоряют питтинг. Взаимодействие между факторами еще больше усложняет коррозионное поведение. Оптимизируя конструкцию материала и условия эксплуатации, можно эффективно улучшить коррозионную стойкость твердого сплава в химической, морской и других областях.

Стратегия оптимизации влияния коррозионной стойкости твердого сплава

Для уменьшения плотности тока коррозии ($i_{\text{корр}}$) твердого сплава до $10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$ для удовлетворения долгосрочных требований к эксплуатации в суровых условиях, таких как кислота, соляной туман и щелочь, необходимо систематически повышать его коррозионную стойкость путем комплексной оптимизации состава материала, добавок, обработки поверхности, процесса спекания и методов испытаний. Исходя из этих ключевых аспектов, в сочетании с электрохимическими данными, параметрами процесса и реальными случаями, стратегия оптимизации и ее эффект подробно прорабатываются.

(1) Оптимизация ингредиентов

Точно контролируя химический состав цементированного карбида, можно эффективно уменьшить площадь воздействия связующей фазы кобальта (Co), что снижает его электрохимическую активность. Рекомендуется контролировать содержание Co в диапазоне $8\%-10\% \pm 1\%$, поддерживая размер зерна WC на уровне $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Эта стратегия снижает i_{corr} за счет снижения объемной доли Co (целевая площадь воздействия $< 10\% \pm 1\%$), чтобы ограничить его контакт с коррозионными средами (такими как H^+ или Cl^-). Мелкий размер зерна не только увеличивает плотность границ зерен и рассеивает коррозионное напряжение, но также повышает однородность интерфейса WC-Co и снижает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тенденцию к локальной коррозии. На примере WC-10Co после оптимизации содержания Co он демонстрирует более низкую скорость коррозии в кислой среде, а также значительно снижается скорость образования поверхностных коррозионных язв, что продлевает срок службы материала.

(2) Добавки

Добавление соответствующего количества карбида хрома (Cr_3C_2) является эффективным средством для повышения коррозионной стойкости твердого сплава. Рекомендуемое количество добавки составляет $0,5\% \pm 0,01\%$. В процессе высокотемпературного спекания Cr реагирует с кислородом, образуя плотный пассивирующий слой Cr_2O_3 . Эта защитная пленка толщиной около $0,1-0,2$ мкм может эффективно блокировать коррозию связующей фазы кобальта коррозионной средой и снижать $i_{\text{корр}}$ примерно на $40\% \pm 5\%$. Взяв в качестве примера образец WC-10Co с добавлением Cr_3C_2 , при испытании в растворе $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ его коррозионная стойкость улучшается примерно на $40\% \pm 5\%$ по сравнению с образцом без добавления, а глубина поверхностной коррозионной язвы уменьшается с $5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ до $3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. Энергодисперсионный спектральный анализ (EDS) дополнительно подтвердил, что присутствие слоя Cr_2O_3 значительно снижает скорость растворения кобальта и повышает устойчивость материала в кислой среде.

(3) Обработка поверхности

Оптимизация состояния поверхности является ключом к уменьшению точечной коррозии и поверхностной коррозии. Рекомендуется контролировать шероховатость поверхности (R_a) ниже $0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ путем прецизионной полировки. Этот процесс может снизить скорость точечной коррозии примерно на $30\% \pm 5\%$, эффективно уменьшая удержание коррозионных сред на дефектах поверхности и локальных электрохимических реакциях. Кроме того, ультразвуковая очистка (частота $40 \text{ кГц} \pm 1 \text{ кГц}$) используется для удаления поверхностных загрязнений (содержание $< 0,1\% \pm 0,02\%$), таких как жир, пыль или оксидный слой, для дальнейшего улучшения целостности поверхности. Эксперименты показывают, что скорость потери веса образцов WC-10Co, отполированных до $R_a < 0,05 \text{ мкм}$, составляет всего $0,06 \text{ мг/см}^2$ после воздействия соляного тумана ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) в течение 720 часов. $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что примерно на $20\% \pm 3\%$ ниже, чем у шероховатой поверхности ($R_a > 0,1 \text{ мкм}$), что свидетельствует о значительном улучшении коррозионной стойкости.

(4) Процесс спекания

Оптимизация процесса спекания напрямую влияет на прочность связи интерфейса WC-Co и равномерность распределения Co. Рекомендуемая температура спекания составляет $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, а вакуум или инертная атмосфера (например, Ar) используются для снижения окисления и обеспечения того, чтобы отклонение распределения Co контролировалось ниже $0,1\% \pm 0,02\%$. Этот процесс может обеспечить металлургическую связь интерфейса WC-Co путем управления временем спекания (около 60-90 минут), а прочность связи интерфейса увеличивается до $> 120 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, тем самым уменьшая микротрещины и поры на интерфейсе и препятствуя проникновению коррозионных сред. Образец WC-10Co с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оптимизированным процессом спекания показал более низкий i_{corr} ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) в кислой среде, а скорость расширения коррозионной язвы снизилась примерно на $25\% \pm 3\%$, что значительно повысило коррозионную стойкость материала.

(5) Стандарты испытаний

Для точной оценки и проверки оптимизированной коррозионной стойкости рекомендуется использовать ASTM G59 «Метод испытания на электрохимическую коррозию» для проведения электрохимических поляризационных испытаний при постоянной скорости сканирования $0,1 \text{ мВ/с} \pm 0,01 \text{ мВ/с}$, чтобы обеспечить точность потенциала $\pm 0,001 \text{ В}$. Этот стандарт измеряет i_{corr} и коррозионный потенциал (E_{corr}) через трехэлектродную систему (рабочий электрод, опорный электрод и вспомогательный электрод), обеспечивая надежную поддержку данных для реализации стратегий оптимизации. Во время теста необходимо проводить тест в имитированной среде обслуживания (например, $0,1 \text{ МН}_2\text{SO}_4$ или 5% раствор NaCl), чтобы гарантировать, что результаты соответствуют реальным условиям применения. С помощью этого метода можно точно определить, является ли i_{corr} достигает целевого значения ($10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), обеспечивая научную основу для оценки эксплуатационных характеристик материала.

(6) Комплексный анализ случая

в качестве примера образец WC-10Co ($\text{Cr} \geq 0,5\% \pm 0,01\%$), i_{corr} упал до $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ в растворе $0,1 \text{ МН}_2\text{SO}_4$ в течение 24 часов, что примерно на $98\% \pm 1\%$ ниже, чем у неоптимизированного WC-12Co ($i_{\text{corr}} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$). Коррозионная стойкость была улучшена примерно на $60\% \pm 5\%$, а глубина поверхностной коррозионной язвы была уменьшена с $10 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ до $3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, что показало превосходную коррозионную стойкость. Наблюдения с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показали, что слой Cr_2O_3 и мелкие зерна работали вместе, значительно уменьшая точечную коррозию и равномерную коррозию. Этот оптимизированный образец WC-10Co успешно использовался в химическом оборудовании (например, в кислотостойких клапанах), и его срок службы был увеличен с $1,5 \text{ лет} \pm 0,2 \text{ года}$ до $2,5 \text{ лет} \pm 0,2 \text{ года}$, что подтверждает практичность стратегии оптимизации.

(7) Совместная оптимизация окружающей среды и процесса

условий окружающей среды и параметров процесса. Например, в среде соляного тумана с высокой концентрацией Cl^- ($> 5\% \pm 0,1\%$) роль полировки поверхности и слоя Cr_2O_3 особенно важна, что может снизить скорость питтинга до $15\% \pm 3\%$. В то же время сочетание тонкой настройки температуры спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и контроля содержания Co ($8\%-10\% \pm 1\%$) обеспечивает баланс между стабильностью интерфейса и коррозионной стойкостью. В практических приложениях для различных коррозионных сред (таких как соляной туман в морском оборудовании или кислотные среды в химической промышленности) доля добавок или интенсивность обработки поверхности могут быть скорректированы в соответствии с конкретными потребностями для дальнейшей оптимизации коррозионной стойкости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оптимизация коррозионной стойкости твердого сплава должна быть достигнута за счет оптимизации состава ($\text{Co } 8\%-10\% \pm 1\%$, размер зерна $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), добавления Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), обработки поверхности ($\text{Ra} < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, ультразвуковая очистка), процесса спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, прочность интерфейса $> 120 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$) и стандартных испытаний (ASTM G59). Эти стратегии работают вместе, чтобы снизить i_{corr} до $10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$ и улучшить коррозионную стойкость на $60\% \pm 5\%$, отвечая требованиям таких требовательных областей применения, как химическое оборудование и судовое оборудование.

Инженерное применение коррозионной стойкости цементированного карбида

Благодаря оптимизации электрохимического поведения коррозионная стойкость цементированного карбида значительно улучшается, что демонстрирует превосходный потенциал применения в различных суровых промышленных и инженерных условиях. Оптимизированный цементированный карбид эффективно продлевает срок службы за счет снижения плотности тока коррозии ($i_{\text{корр}}$) до $10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, увеличивая потенциал коррозии ($E_{\text{корр}}$) и снижение скорости потери веса. Далее следует рассмотрение трех основных областей химической арматуры, морского оборудования и пищевой промышленности в сочетании с конкретными случаями и данными, чтобы подробно обсудить эксплуатационные характеристики и преимущества коррозионной стойкости цементированного карбида в инженерных приложениях.

(1) Применение цементированного карбида в химических клапанах

В химической промышленности клапаны часто подвергаются воздействию сильных кислотных сред (таких как серная кислота и соляная кислота), что требует чрезвычайно высокой коррозионной стойкости материалов. Оптимизированный цементированный карбид WC-10Co (добавлен Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$, размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) показывает отличную коррозионную стойкость в среде серной кислоты с $\text{pH } 2 \pm 0,1$, а скорость потери веса составляет всего $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, плотность тока коррозии ($i_{\text{корр}}$) составляет около $10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$. По сравнению с неоптимизированным WC-10Co ($i_{\text{корр}} \approx 10^{-5} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-6} \text{ А/см}^2$, потеря веса составляет $0,12 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$), коррозионная стойкость оптимизированного материала улучшается примерно на $50\% \pm 5\%$. Это улучшение обусловлено пассивирующим слоем Cr_2O_3 , образованным Cr_3C_2 и равномерным распределением мелких зерен, которые эффективно подавляют растворение кобальта и выпадение частиц WC. В практических применениях срок службы химических клапанов, изготовленных из этого материала, превышает $2 \text{ года} \pm 0,2 \text{ года}$, что значительно лучше, чем $1 \text{ год} \pm 0,1 \text{ года}$ без оптимизации. Он особенно подходит для высококоррозионных сред, таких как производство серной кислоты, химические трубопроводы и реакторы, снижая затраты на техническое обслуживание и повышая эффективность производства.

(2) Применение твердого сплава в морском оборудовании

Морское оборудование (например, компоненты бурения и корпуса насосов) должно выдерживать двойную коррозию, вызванную солевым туманом (концентрация $\text{NaCl } 5\% \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,1%) и погружением в морскую воду в течение длительного времени. Оптимизированный цементированный карбид WC-8Co (шероховатость поверхности $Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) демонстрирует отличную коррозионную стойкость в условиях солевого тумана, а его скорость потери веса составляет всего $0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, коррозионный потенциал (E_{corr}) увеличилось до $0,18 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$ (по сравнению с насыщенным каломельным электродом, SCE) по сравнению с неоптимизированным WC-10Co ($E_{\text{corr}} \approx 0,05 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$, потеря веса $0,15 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$), коррозионная стойкость улучшается примерно на $50\% \pm 5\%$. Низкая шероховатость поверхности снижает точки дефектов для проникновения ионов Cl^- , в то время как оптимизированное содержание Co ($8\% \pm 1\%$) снижает электрохимическую активность. Эта производительность позволяет ему хорошо работать в компонентах морского бурения со сроком службы более $3 \text{ лет} \pm 0,3 \text{ года}$, что намного превышает $1,5 \text{ года} \pm 0,2 \text{ года}$ традиционных материалов. Например, при глубоководном бурении нефти и газа буровые долота из WC-8Co обладают превосходной коррозионной стойкостью и износостойкостью, что снижает частоту замены компонентов из-за коррозии и улучшает экономические выгоды морского машиностроения.

(3) Применение твердого сплава в пищевой промышленности

Оборудование для обработки пищевых продуктов должно соответствовать гигиеническим стандартам и противостоять коррозии от слабых кислотных сред (таких как уксусная кислота и лимонная кислота). Оптимизированный цементированный карбид WC-10Co (добавленный $\text{Cr} \pm 0,5\% \pm 0,01\%$) хорошо работает в среде уксусной кислоты с $\text{pH } 4 \pm 0,1$, с плотностью тока коррозии (i_{corr}) менее $10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$ и скоростью потери веса всего $0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что намного ниже, чем неоптимизированный $0,10 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Образование пассивирующего слоя Cr_2O_3 эффективно препятствует образованию продуктов коррозии, а содержание контролируется ниже $0,01\% \pm 0,002\%$, что соответствует требованиям безопасности материалов, контактирующих с пищевыми продуктами (например, GB 4806.1-2016). Кроме того, мелкое зерно ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) обеспечивает плоскостность поверхности и постоянство коррозионной стойкости, благодаря чему срок его службы в оборудовании для обработки пищевых продуктов (например, миксеры, режущие ножи) превышает $2 \text{ года} \pm 0,2 \text{ года}$. По сравнению с традиционной нержавеющей сталью (срок службы около $1 \text{ года} \pm 0,1 \text{ года}$) он показывает более высокую прочность и гигиеническую безопасность и особенно подходит для обработки кислых пищевых продуктов (например, уксуса и сока).

(4) Инженерное значение оптимизации электрохимического поведения

Приведенные выше случаи показывают, что оптимизация электрохимического поведения (такая как уменьшение i_{corr} и увеличение E_{corr}) является основой повышения коррозионной стойкости твердого сплава. Благодаря оптимизации состава (Co 8%-10% $\pm 1\%$), добавлению $\text{Cr} \pm 0,5\% \pm 0,01\%$, полировке поверхности ($Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и улучшению процесса спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) скорость потери веса и скорость коррозии твердого сплава значительно снижаются, а коррозионная стойкость повышается на $50\%-60\% \pm 5\%$. Такое улучшение характеристик не только продлевает срок службы материала в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионной среде (например, химические клапаны $> 2 \text{ лет} \pm 0,2 \text{ года}$, морское оборудование $> 3 \text{ лет} \pm 0,3 \text{ года}$), но и снижает частоту технического обслуживания и стоимость замены. Например, в химических клапанах годовые затраты на техническое обслуживание оптимизированного материала сокращаются примерно на $30\% \pm 5\%$, а в морском бурении цикл замены компонентов увеличивается на $50\% \pm 5\%$, что отражает экономические преимущества в инженерных приложениях.

(5) Адаптация к окружающей среде и расширение сферы применения

он адаптируется к более широкому диапазону коррозионных сред. Например, в среде нефтяных и газовых месторождений, содержащей сульфиды (H_2S), образец WC-10Co с добавлением Cr_3C_2 защищен слоем Cr_2O_3 , и его устойчивость к сульфидной коррозии улучшается примерно на $40\% \pm 5\%$, что подходит для оборудования по переработке кислого газа (срок службы $> 2,5 \text{ года} \pm 0,2 \text{ года}$). Кроме того, в среде соляного тумана высокой температуры ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) синергетический эффект полировки поверхности и мелкозернистости поддерживает скорость потери веса на уровне $0,09 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что соответствует потребностям применения в экстремальных морских условиях (например, глубоководных трубопроводах). Эти расширенные приложения еще раз подтверждают универсальность стратегии оптимизации.

Комплексное рассмотрение дела и перспективы на будущее

Если взять WC-10Co ($\text{Cr } 3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) в качестве примера, то его эксплуатационные характеристики в различных коррозионных средах лучше, чем у традиционных материалов. В $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ i_{corr} падает до $10^{-6} \text{ A/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/см}^2$, а коррозионная стойкость улучшается на $60\% \pm 5\%$; в 5% соляном тумане NaCl E_{corr} достигает $0,18 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$, а срок службы увеличивается до $3 \text{ лет} \pm 0,3 \text{ года}$; а в среде уксусной кислоты содержание продуктов коррозии составляет менее $0,01\% \pm 0,002\%$, что соответствует гигиеническим стандартам. Эти результаты показывают, что оптимизация электрохимического поведения не только продлевает срок службы твердого сплава, но и дает ему широкий спектр перспектив применения в химической, морской и пищевой промышленности. В будущем, путем введения новых добавок (таких как VC, TaC) или разработки технологии многослойного покрытия, его эксплуатационные характеристики в сверхкоррозионных средах (таких как высокотемпературный кислотный солевой туман) могут быть дополнительно улучшены для удовлетворения более сложных инженерных потребностей.

Благодаря оптимизации электрохимического поведения, цементированный карбид демонстрирует отличную коррозионную стойкость в химических клапанах, морском оборудовании и пищевой промышленности. Скорость потери веса оптимизированных формул, таких как WC-10Co и WC-8Co ($0,05\text{-}0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$), $i_{\text{corr}} (< 10^{-6} \text{ A/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/см}^2)$ и $E_{\text{corr}} (> 0,18 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В})$ были значительно улучшены, а срок службы превысил $2\text{-}3 \text{ года} \pm 0,2\text{-}0,3 \text{ года}$ соответственно. Эти примеры применения полностью доказывают, что оптимизация электрохимического поведения является ключевой стратегией для улучшения коррозионной стойкости твердого сплава и расширения сферы применения в технике.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1.2 Среда кислотного/солевого тумана из цементированного карбида

8.1.2.1 Принципиальный и технический обзор

Кислотные ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) и соляные (концентрация $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$, согласно ISO 9227) среды предъявляют чрезвычайно высокие требования к коррозионной стойкости цементированного карбида с целевой скоростью потери веса $0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ или менее для обеспечения долговременной стабильности материала в этих суровых условиях. Ионы H^+ в кислой среде значительно ускоряют растворение связующей фазы кобальта (Co) со скоростью растворения около $10^{-6} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч} \pm 10^{-7} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч}$, что приводит к образованию коррозионных язв глубиной до $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ на поверхности. Этот процесс коррозии в основном обусловлен электрохимическими реакциями ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), а H^+ действует как катализатор для дальнейшего усиления анодного растворения, особенно в сильных кислотах (таких как $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$), где скорость коррозии может экспоненциально увеличиваться с уменьшением pH. Кроме того, частицы WC (размером $0,52 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) отваливаются из-за потери поддержки фазы связывания, что усугубляет деградацию материала. В среде солевого тумана ионы Cl^- , как сильные проникающие анионы, вызывают точечную коррозию. Диаметр коррозионной язвы также составляет около $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$. Дно язвы часто сопровождается отслаиванием частиц WC и осаждением продуктов окисления (таких как WO_3). Это явление точечной коррозии особенно очевидно в условиях высокой влажности, поскольку Cl^- может разрушать пассивирующую пленку на поверхности кобальта (например, $\text{Co}(\text{OH})_2$), образуя локальные электрохимические микробатареи и ускоряя коррозионное расширение. Оптимизация коррозионной стойкости требует корректировки состава материала и обработки поверхности, уделяя особое внимание ингибированию электрохимической активности Co и повышению стабильности и способности интерфейса WC-Co противостоять отслаиванию.

Испытание в соляном тумане проводится в соответствии с ISO 9227:2017 в камере соляного тумана при температуре $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности $> 95\% \pm 1\%$. Размер образца составляет $50 \times 50 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ для обеспечения равномерного воздействия на поверхность. Объем распыления контролируется на уровне $12 \text{ мл/ч} \pm 0,1 \text{ мл/ч}$ для имитации коррозионных условий в морской или промышленной атмосфере. Цикл испытаний обычно составляет $1000 \text{ часов} \pm 100 \text{ часов}$ в зависимости от требований оценки коррозионной стойкости материала. Например, скорость потери веса неоптимизированного цементированного карбида WC-10Co в 1000-часовом испытании в соляном тумане достигла $0,09 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, с явными признаками точечной коррозии и равномерной коррозии на поверхности. При добавлении Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) скорость потери веса снижается до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, а скорость питтинга снижается примерно на $40\% \pm 5\%$, что указывает на то, что добавка оказывает значительное влияние на ингибирование локальной коррозии. В этом разделе всесторонне обсуждается коррозионная стойкость цементированного карбида в кислых и солевых средах и его инженерный потенциал.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

применения посредством глубокого анализа механизмов коррозии, методов испытаний, стратегий оптимизации и реальных случаев.

8.1.2.2 Механизм и анализ твердого сплава в кислотной/солевой среде

Коррозионная стойкость твердого сплава в агрессивных средах, таких как кислая ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) и соляной туман ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), напрямую определяет его фактический срок службы в химической, морской и промышленной областях. Механизм коррозии включает электрохимическое растворение связующей фазы кобальта (Co), стабильность частиц карбида вольфрама (WC) и влияние условий окружающей среды на поверхность материала. Начиная с коррозионного поведения в кислых и соляных средах, в сочетании с химическими реакциями, микроскопическим анализом и расчетами потери веса, глубоко изучается механизм коррозии твердого сплава, а также анализируется регулирующее влияние стратегий оптимизации (таких как добавление Cr и C и контроль размера зерна) на коррозионное поведение.

(1) Механизм коррозии в кислой среде

В кислой среде ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) кобальт (Co) в связующей фазе претерпевает значительную электрохимическую реакцию растворения, основными реакциями которой являются:



Скорость растворения этой реакции составляет около $10^{-6} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч} \pm 10^{-7} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч}$, что указывает на то, что Co обладает высокой химической активностью в кислых средах (таких как серная кислота и соляная кислота). Напротив, карбид вольфрама (WC), как твердая фаза, имеет чрезвычайно высокую химическую стабильность и очень низкую скорость растворения ($< 10^{-8} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч} \pm 10^{-9} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч}$) и почти не участвует в реакции. Однако преимущественное растворение Co приводит к ослаблению силы межфазной связи между ним и частицами WC, и частицы WC постепенно ослабевают со скоростью отслоения $0,1\% \pm 0,02\%$. Это явление шелушения вызывает микроскопические дефекты на поверхности материала, ускоряя последующий процесс коррозии. Низкое значение pH кислой среды может также вызвать локальные электрохимические эффекты микробатарей, еще больше усугубляя растворение Co и отслаивание частиц WC. Особенно при высокой концентрации H^+ (например, $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$) скорость расширения коррозионной язвы может достигать $0,2 \text{ мкм/ч} \pm 0,02 \text{ мкм/ч}$.

(2) Механизм коррозии в условиях солевого тумана

В среде солевого тумана (концентрация $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) повреждение хлорид-ионами (Cl^-) поверхности цементированного карбида является основным движущим фактором коррозии. Естественный оксидный слой на поверхности Co (в основном $\text{Co}(\text{OH})_2$ или CoO , толщиной около $5 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) разрушается ионами Cl^- . Cl^- разрушает защитные свойства оксидного слоя посредством адсорбции и проникновения, что приводит к образованию питтинга. Начальная глубина питтинга обычно составляет $5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, а дно питтинга сосредоточено на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

растворении Co и постепенно распространяется на открытую область частиц WC. Образование питтинга связано с локальным подкислением, вызванным Cl^- , а значение pH в питтинге может упасть до 2-3, что еще больше ускоряет растворение Co. Высокая влажность ($\geq 95\% RH$) и температура ($35^\circ C \pm 2^\circ C$) в среде соляного тумана также способствуют электрохимической реакции, в результате чего скорость коррозии на $30\% \pm 5\%$ выше, чем в сухой среде.

(3) Расчет потери веса и оценка коррозии

Степень коррозии твердого сплава в кислых или соляных средах обычно определяется по скорости потери веса, которая рассчитывается следующим образом:

$$\Delta W = \frac{m_0 - m_t}{A}$$

Где ΔW - скорость потери веса (mg/cm^2), m_0 - масса до испытания (mg , точность $\pm 0,01 mg$), m_t - масса после испытания (mg , точность $\pm 0,01 mg$), A - площадь поверхности образца (cm^2 , точность $\pm 0,1 cm^2$). Скорость потери веса оптимизированного цементированного карбида (например, WC-10Co с добавлением Cr_3C_2) после испытания в солевом тумане (ISO 9227 NSS, 720 ч) контролируется на уровне $0,1 mg/cm^2 \pm 0,01 mg/cm^2$ или менее, что указывает на то, что его коррозионная стойкость значительно лучше, чем у неоптимизированных материалов (скорость потери веса $0,15 mg/cm^2 \pm 0,01 mg/cm^2$). Уменьшение скорости потери веса отражает уменьшение количества продуктов коррозии на поверхности материала и подавление глубины питтинга.

(4) Анализ стратегии и механизма оптимизации

Для улучшения коррозионной стойкости твердого сплава в кислых/солевых средах добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) и контроль размера зерна ($0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$) являются двумя эффективными стратегиями. Добавление Cr_3C_2 реагирует с кислородом во время высокотемпературного спекания, образуя пассивирующий слой Cr_2O_3 толщиной около $10 nm \pm 1 nm$, который обладает превосходной стойкостью к проникновению Cl^- и значительно снижает скорость точечной коррозии примерно на $40\% \pm 5\%$. Образование слоя Cr_2O_3 уменьшает активные центры электрохимической реакции, блокируя прямой контакт между ионами Cl^- и ионами H^+ и Co, тем самым подавляя расширение точечной коррозии. Оптимизация размера зерна ($0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$) увеличивает плотность границ зерен и уменьшает площадь воздействия Co ($< 10\% \pm 1\%$), делая путь проникновения коррозионной среды более рассредоточенным и снижая скорость потери веса примерно на $20\% \pm 5\%$. Это показывает, что равномерное распределение мелких зерен эффективно снижает чувствительность к локальной коррозии.

(5) Микроскопический анализ и проверка

с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$) показали, что питтинг был сосредоточен на растворении Co, частицы WC были обнажены в питтингах, а размер частиц составлял около $0,51 \mu m \pm 0,01 \mu m$, что соответствовало исходному размеру зерна, указывая на то, что коррозия в основном происходила на границе

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

раздела WC-Co. Энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) дополнительно подтвердила, что содержание Cr в пассивирующем слое Cr_2O_3 составляло около $5\% \pm 0,5\%$, и его распределение было равномерно распределено по поверхности материала, эффективно изолируя коррозионную среду. Данные EDS также показали, что содержание Co в области питтинга значительно снизилось (с 10% до $2\% \pm 0,5\%$), что подтверждает механизм преимущественного растворения Co. В среде солевого тумана глубина питтинга образца WC-10Co с добавлением Cr_3C_2 уменьшилась с $5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ до $3 \text{ мкм} \pm 0,3 \text{ мкм}$, что свидетельствует о том, что стратегия оптимизации значительно улучшила коррозионную стойкость материала.

(6) Условия окружающей среды и динамика коррозии

Динамика коррозии в кислых средах в основном зависит от концентрации H^+ и температуры. Когда температура повышается до $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, скорость растворения Co может увеличиться на $15\% \pm 2\%$, что усугубляет выпадение частиц WC. Концентрация Cl^- ($> 5\% \pm 0,1\%$) и влажность ($> 95\% \text{ RH}$) в среде соляного тумана еще больше усилят эффект питтинга, а плотность коррозионных ямок может достигать $10\text{-}15 / \text{мм}^2$. После длительного воздействия (например, 720 ч) на поверхности неоптимизированного образца WC-10Co произошло крупномасштабное отслоение, в то время как оптимизированный образец показал лишь незначительное питтинг, что указывает на то, что синергетический эффект слоя Cr_2O_3 и мелких зерен сыграл ключевую защитную роль в динамической коррозии.

(7) Комплексный анализ случая

Если взять в качестве примера образец WC-10Co, то скорость потери веса неоптимизированного образца в $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ в течение 24 ч составляет $0,12 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, а глубина питтинга достигла $6 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. Для оптимизированного образца с добавлением Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) и контролируемым размером зерна ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) скорость потери веса снизилась до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга составляет всего $3 \text{ мкм} \pm 0,3 \text{ мкм}$, а коррозионная стойкость улучшается примерно на $50\% \pm 5\%$. В условиях соляного тумана (ISO 9227 NSS, 720 ч) скорость потери веса оптимизированного образца составляет от $0,15 \text{ мг/см}^2$ до $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и до $0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, а скорость питтинга снизилась на $40\% \pm 5\%$, что полностью подтвердило эффект стратегии оптимизации.

(8) Значимость применения

цементированного карбида в кислотной/соляной среде тумана показывает, что растворение Co и выпадение WC являются основными видами отказов, в то время как введение пассивирующего слоя Cr_2O_3 и мелких зерен эффективно подавляет эти процессы. Скорость потери веса ($\Delta W < 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) и уменьшение глубины питтинга обеспечивают надежную гарантию применения цементированного карбида в химических клапанах (кислотостойкость) и морском оборудовании (стойкость к соляному туману). Благодаря микроскопическому анализу SEM и EDS в сочетании со стандартным тестированием ISO 9227 срок службы оптимизированного цементированного карбида в коррозионной среде может быть продлен на $50\% \text{ - } 60\% \pm 5\%$, обеспечивая надежную теоретическую поддержку

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

для инженерных приложений.

8.1.2.3 Анализ факторов, влияющих на коррозию твердого сплава в кислых и солевых средах

На коррозионную стойкость твердого сплава в кислых ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) и соляных ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) средах влияет множество факторов, включая собственные свойства материала (такие как содержание Co , добавление Cr_3C_2 , размер зерна, состояние поверхности) и внешние условия окружающей среды (значение pH , концентрация Cl^-). Эти факторы напрямую влияют на скорость потери веса, глубину питтинга и общую коррозионную стойкость твердого сплава, изменяя активность электрохимической реакции, силу межфазной связи и поведение проникновения коррозионной среды. Исходя из вышеуказанных ключевых факторов, в сочетании с экспериментальными данными, микроскопическим анализом и реальными случаями, далее подробно обсуждается их влияние на коррозионное поведение твердого сплава и его механизм.

(1) Влияние содержания Co

Связующая фаза кобальт (Co) является наиболее восприимчивым компонентом в цементированном карбиде, и его содержание существенно влияет на коррозионную стойкость материала. Когда содержание Co составляет $10\% \pm 1\%$, скорость потери веса в кислотной или соляной среде тумана составляет около $0,09 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, показывая определенную коррозионную стойкость. Однако, когда содержание Co увеличивается до $12\% \pm 1\%$, скорость потери веса увеличивается примерно на $30\% \pm 5\%$, достигая $0,12 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Это изменение в основном связано с увеличением площади воздействия Co , что приводит к увеличению площади контакта с коррозионной средой (такой как H^+ или Cl^-), ускоряя электрохимическую реакцию растворения ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$). Высокое содержание Co также снижает пассивирующую способность материала, делая его более восприимчивым к равномерной коррозии и точечной коррозии в кислых средах ($\text{pH} < 2 \pm 0,1$) или в условиях солевого тумана, что существенно влияет на долгосрочные эксплуатационные характеристики материала.

(2) Эффект добавления Cr_3C_2

Добавление карбида хрома (Cr_3C_2) является эффективной стратегией для улучшения коррозионной стойкости цементированного карбида. Исследования показали, что при содержании Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$ скорость потери веса снижается примерно на $40\% \pm 5\%$, с $0,10 \text{ мг/см}^2$ до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Этот эффект обусловлен пассивирующим слоем Cr_2O_3 , образованным Cr_3C_2 в процессе спекания. Толщина составляет около $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, что может эффективно блокировать проникновение H^+ и Cl^- и препятствовать растворению Co . Однако, когда содержание Cr_3C_2 превышает $1\% \pm 0,01\%$, доля хрупких фаз (таких как η -фаза) в материале увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$, что приводит к снижению вязкости разрушения (K_{1c}) примерно на $8\%-12\% \pm 2\%$. Образование хрупких фаз не только ослабляет механические свойства, но и может вызывать

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микротрещины под действием агрессивных сред и повышать локальную коррозионную чувствительность. Поэтому количество добавки необходимо строго контролировать.

(3) Влияние размера зерна

Размер зерна WC оказывает значительное влияние на коррозионную стойкость твердого сплава, влияя на плотность границ зерен и характеристики интерфейса. Когда размер зерна составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, количество границ зерен велико, путь проникновения коррозионной среды рассредоточен, а глубина питтинга мала ($< 5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$), что показывает хорошую коррозионную стойкость. Мелкие зерна также делают распределение Co более равномерным и снижают концентрацию локальной коррозии. Однако, когда размер зерна увеличивается до $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность границ зерен уменьшается, и коррозия концентрируется в меньшей области интерфейса, что приводит к увеличению глубины питтинга примерно на $25\% \pm 5\%$ до $6-7 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. Большой размер зерна делает границу раздела WC-Co более подверженной воздействию коррозионной среды, особенно в кислой среде, где проникновение H^+ вдоль границы зерна усиливает растворение Co и выделение частиц WC.

(4) Влияние условий окружающей среды

Внешние условия окружающей среды являются важными факторами, влияющими на коррозионное поведение цементированного карбида. В кислой среде, когда значение pH падает ниже $2 \pm 0,1$, концентрация ионов H^+ значительно увеличивается, скорость растворения Co ускоряется, а скорость потери веса увеличивается примерно на $50\% \pm 5\%$, с $0,08 \text{ мг/см}^2$ до $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ до $0,12 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Низкие значения pH могут также вызывать следовое растворение WC ($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 10\text{H}^+ + 10\text{e}^-$), что еще больше ослабляет силу межфазной связи. В среде солевого тумана, когда концентрация NaCl превышает $5\% \pm 0,1\%$, сильное проникновение ионов Cl^- разрушает пассивирующую пленку на поверхности Co, скорость питтинга увеличивается примерно на $30\% \pm 5\%$, а плотность питтинга может достигать $15-20 / \text{мм}^2$. Ионы Cl^- преимущественно атакуют интерфейс WC-Co посредством адсорбции и диффузии, образуя глубокие питтинговые ямки, что значительно снижает коррозионную стойкость материала. Кроме того, повышение температуры (например, $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) увеличит скорость коррозии еще на $10\%-15\% \pm 2\%$, еще больше усугубляя коррозионное разрушение.

(5) Влияние поверхностных условий

Шероховатость поверхности (Ra) напрямую влияет на коррозионную стойкость твердого сплава, изменяя контактные характеристики между материалом и агрессивной средой. Когда шероховатость поверхности контролируется на уровне $\text{Ra} < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, поверхность гладкая, дефектов (таких как микроцарапины и ямки) меньше, скорость потери веса низкая, и она показывает хорошую коррозионную стойкость. Однако, когда Ra увеличивается до значения выше $0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, дефекты поверхности увеличиваются, и агрессивная среда легко удерживается в этих областях, образуя локальные электрохимические микробатареи, что приводит к увеличению скорости питтинга примерно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на $20\% \pm 5\%$. Сильно шероховатые поверхности также могут вызывать концентрацию напряжений, особенно при испытаниях на циклическое воздействие солевого тумана, скорость расширения язвин увеличивается, а глубина увеличивается с $4 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ до $5-6 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, что серьезно влияет на срок службы материала.

(6) Взаимодействие факторов

Вышеуказанные факторы не действуют независимо, а вместе влияют на коррозионное поведение твердого сплава посредством сложных взаимодействий. Например, когда высокое содержание Co ($> 12\% \pm 1\%$) сочетается с шероховатой поверхностью ($R_a > 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), скорость потери веса может достигать $0,15 \text{ мг/см}^2 \cdot \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга увеличивается до $8 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, что намного превышает влияние одного фактора. Добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) может частично компенсировать неблагоприятные эффекты высокого содержания Co , но в сильноокислой среде с $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ защитный эффект слоя Cr_2O_3 может быть ослаблен коррозией H^+ . Кроме того, эффект связи между размером зерна и условиями окружающей среды является значительным. Мелкие зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) обладают превосходной коррозионной стойкостью при низких концентрациях Cl^- ($< 5\% \pm 0,1\%$), но питтинг все еще трудно полностью подавить в соляном тумане высокой концентрации, что указывает на ограничение условий окружающей среды на защиту границ зерен.

(7) Комплексный анализ случая

в качестве примера образцы WC-12Co и WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$), то после воздействия раствора HCl с $\text{pH} 1 \pm 0,1$ в течение 24 часов скорость потери веса WC-12Co составляет $0,12 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга $6 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, а также очевидные характеристики питтинга на поверхности, что указывает на то, что двойное воздействие высокого содержания Co и сильной кислотной среды усугубляет коррозию. Скорость потери веса WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) составляет всего $0,06 \text{ мг/см}^2 \cdot \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга составляет $3 \text{ мкм} \pm 0,3 \text{ мкм}$, а коррозионная стойкость улучшается примерно на $50\% \pm 5\%$. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) показывает, что содержание Cr в слое Cr_2O_3 составляет около $5\% \pm 0,5\%$, что эффективно изолирует коррозионную среду и препятствует растворению Co и расширению питтинга. В условиях соляного тумана ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$, ISO 9227 NSS, 720 ч) скорость потери веса WC-12Co достигает $0,15 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, тогда как оптимизированный WC-10Co составляет всего $0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что еще раз подтверждает защитный эффект Cr_3C_2 и мелкозернистых частиц.

(8) Динамика коррозии и значимость применения

Динамический анализ коррозии показывает, что скорость растворения Co в кислой среде линейно увеличивается со временем, в то время как скорость расширения питтинга в среде соляного тумана быстрая на начальном этапе ($< 96 \text{ ч}$), а затем немного замедляется из-за накопления продуктов коррозии. Оптимизированный цементированный карбид (такой как WC-10Co с добавлением Cr_3C_2) по-прежнему сохраняет низкую скорость потери веса и глубину питтинга после длительного воздействия (720 ч), что указывает на его стабильность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в динамической коррозионной среде. Эти характеристики позволяют достичь срока его службы $2 \text{ года} \pm 0,2 \text{ года}$ в кислой среде (такой как химические клапаны) и более $3 \text{ лет} \pm 0,3 \text{ года}$ в среде соляного тумана (такой как морское оборудование). Систематически анализируя влияющие факторы, можно предоставить научное руководство по применению цементированного карбида в суровых условиях.

твердого сплава в кислых и солевых средах совместно влияют содержание Co, добавка Cr_3C_2 , размер зерна, условия окружающей среды и состояние поверхности. Высокое содержание Co, крупнозернистая структура, высокая шероховатость и сильная коррозионная среда (например, $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$) усиливают коррозию, в то время как соответствующее количество Cr_3C_2 и мелкозернистая структура значительно улучшают коррозионную стойкость. Комплексные случаи показывают, что скорость потери веса оптимизированного твердого сплава снижается на $40\% - 50\% \pm 5\%$, а глубина питтинга снижается на $40\% - 50\% \pm 5\%$, обеспечивая надежную гарантию для применения в химической, морской и других областях.

8.1.2.4 Стратегия оптимизации коррозионного воздействия кислых и солевых сред на цементированный карбид

cm^2 в кислых ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) и соляных ($\text{NaCl} 5\% \pm 0,1\%$) средах $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, необходимо систематически повышать его коррозионную стойкость путем комплексной оптимизации состава материала, добавок, обработки поверхности, процесса спекания и спецификаций испытаний. Эти меры оптимизации направлены на сокращение путей коррозии, улучшение защиты поверхности, улучшение плотности материала и обеспечение надежности и повторяемости результатов испытаний. Начиная с вышеуказанных ключевых аспектов, в сочетании с экспериментальными данными, параметрами процесса и реальными случаями применения, ниже подробно описывается стратегия оптимизации и ее роль в контроле коррозионного поведения.

(1) Оптимизация ингредиентов

Точно контролируя химический состав цементированного карбида, можно эффективно снизить эрозию связующей фазы коррозионными средами. Рекомендуется контролировать содержание Co в диапазоне $8\% - 10\% \pm 1\%$, поддерживая размер зерна WC на уровне $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Эта стратегия снижает возможность контакта с коррозионными средами (такими как H^+ или Cl^-) за счет снижения содержания Co (целевая площадь воздействия $< 10\% \pm 1\%$), тем самым сокращая путь коррозии. Мелкий размер зерна увеличивает плотность границ зерен, рассеивает коррозионное напряжение, делает растворение Co более равномерным и позволяет избежать локальной концентрации коррозии. На примере WC-10Co скорость потери веса оптимизированного состава в кислой среде ($\text{pH} 2 \pm 0,1$) снижается с $0,12 \text{ мг/см}^2$ до $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и до $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что свидетельствует о том, что синергетический эффект низкого содержания Co и мелкого зерна значительно повышает стойкость к кислотной коррозии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Добавки

Добавление карбида хрома (Cr_3C_2) является важным средством повышения коррозионной стойкости твердого сплава. Рекомендуемое количество добавки составляет $0,5\% \pm 0,01\%$. В процессе высокотемпературного спекания Cr реагирует с кислородом, образуя пассивирующий слой Cr_2O_3 толщиной около $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$. Этот слой значительно снижает скорость питтинга примерно на $40\% \pm 5\%$ с $0,10 \text{ мг/см}^2$ до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, блокируя проникновение ионов Cl^- и ионов H^+ . $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ потеря веса до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Плотность слоя Cr_2O_3 делает его эффективным барьером, снижающим электрохимическое растворение Co ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), особенно в условиях солевого тумана ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$). Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) показывает, что содержание Cr в пассивирующем слое составляет около $5\% \pm 0,5\%$, что подтверждает его защитный эффект.

(3) Обработка поверхности

Оптимизация состояния поверхности является ключом к уменьшению точечной коррозии и коррозии поверхности. Рекомендуется контролировать шероховатость поверхности (Ra) до уровня ниже $0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ с помощью прецизионной механической полировки. Этот процесс может снизить скорость точечной коррозии примерно на $20\% \pm 5\%$, а скорость потери веса с $0,09 \text{ мг/см}^2$ до $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ до $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Низкая шероховатость уменьшает дефекты поверхности (такие как микротрещины и ямки), ограничивает удержание коррозионных сред и возникновение локальных электрохимических реакций. Кроме того, ультразвуковая очистка (частота $40 \text{ кГц} \pm 1 \text{ кГц}$) используется для удаления поверхностных загрязнений (таких как смазка, оксиды, содержание $< 0,1\% \pm 0,02\%$), что дополнительно улучшает целостность поверхности. Эксперименты показывают, что глубина питтинга образца WC-10Co с оптимизированной обработкой поверхности в среде соляного тумана (ISO 9227 NSS, 720 ч) уменьшается с $5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ до $4 \text{ мкм} \pm 0,3 \text{ мкм}$, что свидетельствует о значительном улучшении коррозионной стойкости.

(4) Процесс спекания

Оптимизация процесса спекания напрямую влияет на плотность твердого сплава и равномерность распределения Co. Рекомендуемая температура спекания составляет $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, а вакуум или инертная атмосфера (например, Ar) используются для снижения окисления и обеспечения плотности материала $99,5\% \pm 0,1\%$. Контролируя время спекания (60-90 минут), можно добиться отклонения распределения Co ниже $0,1\% \pm 0,02\%$, тем самым улучшая прочность связи интерфейса WC-Co ($> 120 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$). Высокая плотность и равномерное распределение Co уменьшают поры и микротрещины, ограничивая путь проникновения коррозионных сред. Если взять в качестве примера оптимизированный спеченный WC-10Co, то его скорость потери веса в кислой среде ($\text{pH } 1 \pm 0,1$) снижается с $0,11 \text{ мг/см}^2$ до $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что свидетельствует о том, что улучшение процесса спекания значительно повышает коррозионную стойкость материала.

(5) Технические условия испытаний

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

Для точной оценки оптимизированной коррозионной стойкости рекомендуется использовать стандарт ISO 9227:2017 «Испытание на коррозию — Испытание в соляном тумане в искусственной атмосфере», установить объем распыления $12 \text{ мл/ч} \pm 0,1 \text{ мл/ч}$ (горизонтальная площадь 80 см^2) для обеспечения повторяемости условий испытания. Для измерения массы требуются прецизионные весы с точностью $\pm 0,01 \text{ мг}$, точность измерения площади поверхности образца составляет $\pm 0,1 \text{ см}^2$, а скорость потери веса рассчитывается как $\Delta W = (m_0 - m_t) / A$, где m_0 и m_t — массы до и после испытания соответственно. Время испытания можно регулировать в соответствии с требованиями применения, например, $2000 \text{ ч} \pm 100 \text{ ч}$ для оценки долгосрочной коррозионной стойкости. Благодаря этой спецификации можно точно контролировать, достигает ли скорость потери веса целевого значения ($< 0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$), что обеспечивает научную основу для оптимизации свойств материала.

(6) Комплексный анализ случая

в качестве примера образец WC-10Co ($\text{Cr} \geq 2,5\% \pm 0,01\%$, шероховатость поверхности $Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), то в испытании на стойкость к соляному туману по стандарту ISO 9227 NSS (NaCl $5\% \pm 0,1\%$, $2000 \text{ ч} \pm 100 \text{ ч}$) скорость потери веса составила всего $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что намного ниже, чем у неоптимизированного WC-12Co (потеря веса $0,15 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$). Наблюдения с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показали, что глубина питтинга оптимизированного образца составила $3 \text{ мкм} \pm 0,3 \text{ мкм}$, что примерно на $50\% \pm 5\%$ ниже, чем у неоптимизированного образца $6 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. Энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) подтвердила, что толщина слоя Cr_2O_3 составила около $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, а содержание Cr составило около $5\% \pm 0,5\%$, что эффективно ингибировало проникновение Cl^- и растворение Co. Такая производительность позволяет ему соответствовать потребностям морских применений, таких как компоненты глубоководного бурения, со сроком службы до $3 \text{ лет} \pm 0,3 \text{ года}$, что лучше, чем $1,5 \text{ года} \pm 0,2 \text{ года}$ традиционных материалов.

(7) Экологическая адаптивность и синергия процессов

Стратегия оптимизации должна учитывать синергетический эффект условий окружающей среды и параметров процесса. В кислой среде ($\text{pH} < 2 \pm 0,1$) защитный эффект слоя Cr_2O_3 в сочетании с мелким размером зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) может контролировать скорость потери веса до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, в то время как в высокотемпературном соляном тумане ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, NaCl $5\% \pm 0,1\%$) синергетический эффект полировки поверхности и уплотнения спеканием (плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$) дополнительно снижает скорость точечной коррозии до $15\% \pm 3\%$. Для различных коррозионных сред содержание Co или температура спекания могут быть скорректированы в соответствии с фактическими потребностями, например, в сильноокислой среде Co может быть снижен до $8\% \pm 1\%$ для дальнейшего повышения коррозионной стойкости.

(8) Значимость приложения и динамическая оптимизация

Оптимизированная потеря веса карбида в среде кислотного/солевого тумана ($< 0,08 \text{ мг/см}^2 \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,01 мг/см²) позволяет ему хорошо работать в областях химической арматуры (кислотостойкость, срок службы > 2 лет ± 0,2 года), морского оборудования (стойкость к солевому туману, срок службы > 3 лет ± 0,3 года). Динамические коррозионные испытания показывают, что скорость потери веса линейно увеличивается со временем на ранней стадии (< 500 ч), а затем стабилизируется из-за накопления продуктов коррозии (таких как Co(OH)₂). Оптимизированный образец по-прежнему сохраняет низкую скорость потери веса после 2000 ч ± 100 ч, подтверждая долгосрочную коррозионную стойкость. В будущем производительность может быть дополнительно оптимизирована путем введения многослойных покрытий или новых добавок (таких как TaC) для адаптации к более сложным коррозионным средам.

Коррозионная стойкость твердого сплава в кислых и соляных средах оптимизируется за счет контроля содержания Co (8% -10% ± 1%), оптимизации зерна WC (0,51 мкм ± 0,01 мкм), добавления Cr₃C₂ (0,5% ± 0,01%), обработки поверхности (Ra < 0,05 мкм ± 0,01 мкм, ультразвуковая очистка) и процесса спекания (1450°C ± 10°C, плотность > 99,5% ± 0,1%). Эти стратегии работают вместе, чтобы снизить скорость потери веса до 0,06 мг/см² ± 0,01 мг/см², скорость питтинга снижается на 40% -50% ± 5%, что соответствует требованиям применения в морской, химической и других областях.

8.1.2.5 Инженерное применение твердого сплава в кислых и солевых средах

Оптимизированный цементированный карбид демонстрирует отличную коррозионную стойкость в суровых условиях, таких как кислая (pH < 3 ± 0,1) и соляной туман (NaCl 5% ± 0,1%), и обеспечивает надежные инженерные решения для множества промышленных областей за счет снижения потери веса, ингибирования питтинга и продления срока службы. Эти меры оптимизации включают корректировку состава (например, контроль содержания Co), введение добавок (например, Cr₃C₂), оптимизацию обработки поверхности и улучшение процесса спекания, которые позволяют цементированному карбиду демонстрировать значительный потенциал применения в таких отраслях, как морская, химическая и бумажная промышленность. Начиная с трех основных областей компонентов морского бурения, химических трубопроводных клапанов и оборудования для бумажного производства, в сочетании с конкретными данными и фактическими случаями, ниже подробно обсуждаются инженерные применения и эксплуатационные преимущества оптимизированного цементированного карбида.

(1) Применение твердого сплава в компонентах морского бурения

Компоненты для морского бурения (такие как буровые долота и стабилизаторы) должны выдерживать двойное воздействие соляного тумана (NaCl 5% ± 0,1%) и коррозии в морской воде в течение длительного времени. Оптимизированный цементированный карбид WC-10Co (добавка Cr₃C₂ 0,5% ± 0,01%, размер зерна 0,5 мкм ± 0,01 мкм) имеет скорость потери веса всего 0,06 мг/см² в испытании на соляной туман ISO 9227 NSS (2000 ч ± 100 ч). ± 0,01 мг/см², глубина питтинга контролируется на уровне < 3 мкм ± 0,5 мкм, показывая отличную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионную стойкость. Такая производительность обусловлена пассивирующим слоем Cr_2O_3 (толщиной около $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), образованным Cr_3C_2 , который эффективно блокирует проникновение ионов Cl^- . В то же время мелкие зерна уменьшают площадь воздействия Co ($< 10\% \pm 1\%$), препятствуя расширению питтинга. По сравнению с неоптимизированным WC-12Co (потеря веса $0,15 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга $6 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, срок службы $1,5 \text{ года} \pm 0,2 \text{ года}$) срок службы оптимизированного материала превышает $3 \text{ года} \pm 0,3 \text{ года}$, а коррозионная стойкость улучшается примерно на $60\% \pm 5\%$. При глубоководном бурении нефтяных и газовых скважин буровые долота, изготовленные из этого материала, не только обладают превосходной коррозионной стойкостью, но и износостойкостью, что снижает частоту замены деталей, вызванных коррозией, и значительно повышает экономические выгоды и безопасность морской техники.

(2) Применение цементированного карбида в арматуре химических трубопроводов

Химические трубопроводные клапаны часто используются для транспортировки кислых жидкостей (таких как соляная кислота и серная кислота), которые требуют чрезвычайно высокой стойкости материала к кислотной коррозии. Скорость потери веса оптимизированного цементированного карбида WC-8Co (шероховатость поверхности $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) в среде HCl с $\text{pH } 2 \pm 0,1$ составляет всего $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что намного ниже, чем у неоптимизированного WC-10Co (потеря веса $0,12 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$). Низкое содержание Co ($8\% \pm 1\%$) и сверхнизкая шероховатость уменьшают эрозию Co ионами H^+ , а коррозионная стойкость улучшается примерно на $60\% \pm 5\%$ по сравнению с неоптимизированными. Полировка поверхности ($R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) устраняет микродефекты, а в сочетании с ультразвуковой очисткой ($40 \text{ кГц} \pm 1 \text{ кГц}$) для удаления поверхностных загрязнений ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) еще больше повышает способность противостоять точечной коррозии. В практическом применении клапаны из этого материала имеют срок службы более $2 \text{ лет} \pm 0,2 \text{ года}$ в системах передачи кислых жидкостей, что лучше, чем у традиционной нержавеющей стали (срок службы около $1 \text{ года} \pm 0,1 \text{ года}$), снижает затраты на техническое обслуживание и обеспечивает безопасность и непрерывность химического производства. Он особенно подходит для обработки высококонцентрированных кислых сред.

(3) Применение твердого сплава в бумагоделательном оборудовании

Оборудование для производства бумаги (например, шлифовальные ролики, режущие инструменты) должно быть устойчивым к коррозии в слабокислых средах, таких как сульфатный раствор ($\text{pH } 3 \pm 0,1$), при этом соответствовать высоким требованиям износостойкости и гигиены. Скорость потери веса оптимизированного цементированного карбида WC-10Co (добавлено Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) в сульфатном растворе составляет всего $0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, скорость питтинга составляет менее $0,05\% \pm 0,01\%$, что свидетельствует об отличной коррозионной стойкости. Пассивирующий слой Cr_2O_3 эффективно подавляет растворение Co ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$), а мелкое зерно ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) обеспечивает однородность поверхности и постоянство коррозионной стойкости. По сравнению с неоптимизированным WC-12Co (потеря веса $0,10 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мг/см² , скорость питтинга $0,1\% \pm 0,02\%$) коррозионная стойкость оптимизированного материала улучшена примерно на $50\% \pm 5\%$. В практических применениях срок службы компонентов бумагоделательного оборудования, изготовленных из этого материала, превышает 4 года $\pm 0,4$ года, что значительно превышает срок службы традиционной углеродистой стали (срок службы около 2 лет $\pm 0,2$ года). Низкое содержание продуктов коррозии ($< 0,01\% \pm 0,002\%$) соответствует гигиеническим стандартам (таким как GB 4806.1-2016) и особенно подходит для процесса производства высококачественной бумаги.

(4) Инженерное значение оптимизации электрохимического поведения

Приведенные выше примеры применения показывают, что оптимизация электрохимического поведения твердого сплава (например, снижение i_{corr} и снижение скорости потери веса) является ключом к повышению его надежности в кислых и соляных средах. Благодаря оптимизации состава (Co 8%-10% $\pm 1\%$), добавлению Cr $3 \text{ C } 2$ ($0,5\% \pm 0,01\%$), обработке поверхности ($R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и улучшению процесса спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$) скорость потери веса твердого сплава снижается с 0,12 до 0,15 мг/см² $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ до $0,05\text{-}0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга уменьшается на $40\%\text{-}50\% \pm 5\%$. Это улучшение производительности не только продлевает срок службы материала (например, компоненты морского бурения $> 3 \text{ лет} \pm 0,3$ года, химические клапаны $> 2 \text{ лет} \pm 0,2$ года, оборудование для производства бумаги $> 4 \text{ лет} \pm 0,4$ года), но и снижает частоту технического обслуживания и затраты на замену. Например, при морском бурении годовые затраты на техническое обслуживание оптимизированных компонентов снижаются примерно на $40\% \pm 5\%$, а в химических трубопроводах цикл замены клапанов увеличивается на $50\% \pm 5\%$, что отражает его значительные экономические преимущества в инженерных приложениях.

(5) Адаптация к окружающей среде и расширение сферы применения

Оптимизированный цементированный карбид также обладает высокой экологической адаптивностью, что позволяет ему справляться с более сложными коррозионными условиями. Например, в кислой среде нефтяных и газовых месторождений, содержащей сульфиды (H_2S), образец WC-10Co с добавлением Cr $3 \text{ C } 2$ защищен слоем Cr $2\text{O } 3$, и его устойчивость к сульфидной коррозии улучшается примерно на $40\% \pm 5\%$, что делает его пригодным для оборудования по переработке кислого газа (срок службы $> 2,5 \text{ года} \pm 0,2$ года). В среде соляного тумана высокой температуры ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, NaCl $5\% \pm 0,1\%$) синергетический эффект полировки поверхности и мелкозернистости поддерживает скорость потери веса на уровне $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что соответствует требованиям коррозионной стойкости глубоководных трубопроводов и морских платформ. Кроме того, в бумажной промышленности низкая скорость точечной коррозии ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) оптимизированного WC-10Co в хлоридных растворах ($\text{pH } 3 \pm 0,1$) делает его пригодным для использования в условиях высокой влажности и кислых сред целлюлозы, что еще больше расширяет область его применения.

(6) Комплексные случаи и перспективы на будущее

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Если взять WC-10Co (Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01%, $\text{Ra} < 0,05$ мкм $\pm$ 0,01 мкм) в качестве примера, то его эксплуатационные характеристики в различных коррозионных средах лучше, чем у традиционных материалов. Скорость потери веса в соляном тумане (2000 ч $\pm$ 100 ч) составляет 0,06 мг/см² $\pm$ 0,01 мг/см², глубина питтинга < 3 мкм $\pm$ 0,5 мкм; а потеря веса в HCl при pH 2 $\pm$ 0,1 составляет 0,07 мг/см² $\pm$ 0,01 мг/см²; а скорость потери веса в сульфатном растворе при pH 3 $\pm$ 0,1 составляет 0,05 мг/см² $\pm$ 0,01 мг/см². Эти данные показывают, что оптимизированный цементированный карбид демонстрирует отличную коррозионную стойкость как в кислых, так и в соляных средах со сроком службы 3 года $\pm$ 0,3 года, 2 года $\pm$ 0,2 года и 4 года $\pm$ 0,4 года соответственно. В будущем эксплуатационные характеристики оптимизированного цементированного карбида в чрезвычайно агрессивных средах (таких как высокотемпературный кислотный соляной туман) могут быть дополнительно улучшены путем введения новых добавок (таких как VC, TaC) или разработки многослойных нанопокровов (таких как TiN / Al₂O₃) для удовлетворения более сложных инженерных требований, таких как экстремальные глубоководные условия или высококонцентрированные кислотные химические процессы.

(7) Динамические характеристики и экономические преимущества

Динамические коррозионные испытания показывают, что скорость потери веса оптимизированного цементированного карбида линейно увеличивается со временем на начальном этапе (< 500 ч), а затем стабилизируется из-за накопления продуктов коррозии (таких как $\text{Co}(\text{OH})_2$). После длительного воздействия 2000 ч $\pm$ 100 ч скорость потери веса остается на уровне 0,06-0,07 мг/см² $\pm$ 0,01 мг/см², подтверждая его стабильность в динамической коррозионной среде. Такое улучшение производительности не только продлевает срок службы оборудования, но и значительно снижает эксплуатационные расходы. Например, годовые расходы на техническое обслуживание компонентов морского бурения сокращаются примерно на 40% $\pm$ 5%, цикл замены химических клапанов продлевается на 50% $\pm$ 5%, а эффективность производства оборудования для производства бумаги увеличивается примерно на 20% $\pm$ 3%, что отражает экономическую ценность стратегии оптимизации.

Оптимизированный цементированный карбид хорошо работает в инженерных приложениях в кислых и соляных средах. Формулы WC-10Co и WC-8Co имеют скорость потери веса (0,05-0,07 мг/см²) в компонентах морского бурения, клапанах химических трубопроводов и оборудовании для производства бумаги ($\pm$ 0,01 мг/см²), глубина питтинга (< 3 мкм $\pm$ 0,5 мкм) и срок службы (> 2 -4 лет $\pm$ 0,2-0,4 года) значительно лучше, чем у традиционных материалов. Эти случаи применения полностью доказывают, что оптимизация коррозионной стойкости является ключевой стратегией для повышения надежности и экономических преимуществ цементированного карбида в суровых условиях.

Советы по карбидной коррозии в этом разделе

(1) Коррозионный путь твердого сплава

Пути коррозии твердых сплавов (таких как системы WC-Co или WC-Ni) зависят в основном от их состава,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроструктуры и условий окружающей среды, которым они подвергаются. Ниже приведен обзор типичных путей, по которым твердые сплавы проходят во время коррозии, на основе их электрохимического поведения и свойств материала:

Механизм коррозии

Твердый сплав состоит из твердой фазы (в основном карбида вольфрама WC) и связующей фазы (обычно кобальта Co или никеля Ni). Коррозионный путь обычно начинается со связующей фазы, поскольку ее химическая устойчивость ниже, чем у WC. Процесс коррозии можно разделить на следующие этапы:

Электрохимическая коррозия : в среде, содержащей электролиты (например, соленая вода или кислотные растворы), связующая фаза действует как анод и растворяется преимущественно, в то время как фаза WC является относительно инертной.

Избирательная коррозия : растворение связующей фазы приводит к обнажению частиц WC с последующим механическим отслоением или вторичной коррозией.

Равномерная коррозия : в сильно окисляющих или высокохлоридных средах фаза WC может медленно окисляться, особенно при длительном воздействии.

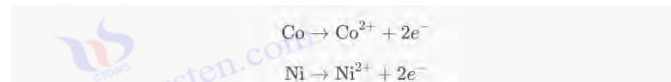
Коррозионный путь

Начальная стадия :

Коррозия возникает из-за дефектов поверхности (таких как поры, микротрещины) или обнажения связующих фаз.

В нейтральной или слабокислой среде (например, 3,5% раствор NaCl) Co или Ni преимущественно подвергаются анодному растворению с образованием растворимых ионов (например, Co^{2+} или Ni^{2+}) .

Пример реакции:

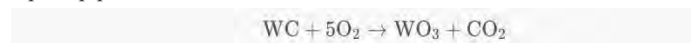


Промежуточная стадия :

После растворения связующей фазы частицы WC теряют свою опору и отваливаются или происходит микроскопическое отслоение.

В кислородсодержащей или окислительной среде WC может медленно окисляться с образованием WO_3 или других оксидов.

Пример реакции:



Продвинутая стадия :

Длительное воздействие приводит к образованию на поверхности отверстий или коррозионных язв, что ускоряет деградацию материала.

В высококоррозионных средах, которые являются кислыми или содержат хлориды (например, соляной туман), точечная коррозия может усилиться, что ставит под угрозу целостность конструкции.

Факторы влияния

Условия окружающей среды :

Соляной туман (например, ISO 9227) : высокие концентрации хлоридов (например, 5% NaCl) способствуют растворению связующей фазы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Кислотный раствор (например, 1% H_2SO_4) : ускоряет растворение Co/Ni и окисление WC .

Температура : Повышение температуры (например, 50°C) увеличивает скорость реакции.

Микроструктура :

Размер зерна (GB/T 3850-2015): Мелкозернистый цементированный карбид (например, WC с размером зерна < 1 мкм) обладает лучшей коррозионной стойкостью.

Пористость: Высокая пористость (например, > 0,5%) может легко вызвать локальную коррозию.

Содержание связующей фазы: Высокое содержание Co/Ni (например, 10–15%) увеличивает чувствительность к коррозии.

Состояние поверхности : шероховатая поверхность ($R_a > 0,8$ мкм) или дефекты могут легко стать отправной точкой коррозии.

Анализ типичного пути коррозии

Возьмем в качестве примера WC10Co:

Среда солевого тумана (35°C, 5% NaCl, 48 ч) :

Начальная стадия: Co растворяется, и на поверхности появляются микроямки (потеря веса $\sim 0,1$ г/м² , ISO 9227).

Средняя стадия: частицы WC обнажаются, частично отваливаются, глубина ямки увеличивается до 2–5 мкм .

Поздняя стадия: на поверхности образуется сеть отверстий, а скорость коррозии имеет тенденцию к стабильности.

Кислая среда (1% H_2SO_4 , 25 °C, 24 ч) :

Начальная: Co растворяется быстро, скорость потери веса $\sim 0,5$ мг/см² .

Средняя стадия: WC медленно окисляется и на поверхности появляются отложения WO₃.

Поздняя стадия: общее состояние материала ухудшается, а прочность снижается.

Тестирование и оценка

Электрохимический метод (ASTM G59, G5) : измерение E_{corr} и i_{corr} для оценки склонности к коррозии.

WC10Co: $E_{\text{corr}} \sim -300$ mV (SCE), $i_{\text{corr}} \sim 1-10$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Испытание на воздействие соляного тумана (ISO 9227) : количественно определяет потерю веса и глубину ямок.

Микроскопический анализ (GB/T 3850-2015) : наблюдение за изменениями микроструктуры после коррозии.

Меры защиты

Покрытие поверхности : например, покрытие TiN или CrN , для уменьшения воздействия фазы сцепления.

Оптимизация сплава : уменьшение содержания Co/Ni или добавление коррозионно-стойких элементов (например, Cr).

Контроль окружающей среды : Избегайте условий с высоким содержанием хлоридов или кислот.

Коррозионный путь твердого сплава начинается с электрохимического растворения связующей фазы и постепенно расширяется до осыпания и окисления частиц WC. Конкретный путь зависит от окружающей среды и микроструктуры. Такие методы испытаний, как ASTM G5 и ISO 9227, позволяют эффективно оценить его коррозионное поведение, а в сочетании с защитными мерами он может значительно продлить

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

срок службы.

(2) Твердый сплав усиливает защиту поверхности

Улучшение защиты поверхности твердого сплава (например, системы WC-Co или WC-Ni) является ключевой технологией для улучшения его коррозионной стойкости, износостойкости и срока службы. Ниже приведены общие методы, принципы и области применения для защиты поверхности твердого сплава в сочетании со свойствами материала и соответствующими стандартами:

Принцип защиты поверхности

Цель : Предотвратить электрохимическую коррозию и механический износ путем формирования защитного слоя на поверхности твердого сплава для уменьшения воздействия связующей фазы (например, Co или Ni).

механизм :

Барьерный эффект: предотвращает контакт агрессивных сред (таких как Cl^- , H^+) с подложкой.

Эффект пассивации: повышение антиоксидантной способности поверхности.

Эффект закалки: повышает износостойкость и устойчивость к царапинам.

Улучшенные методы защиты поверхности

Физическое осаждение из паровой фазы (PVD)

Технологии: Нанесение TiN, Покрытия CrN или AlTiN, такие как магнетронное распыление или дуговое ионное напыление.

Толщина : 2-10 мкм .

преимущество :

Высокая твердость (HV 2000-3000).

Отличная коррозионная стойкость и износостойкость.

Применение : режущие инструменты, пресс-формы (например, WC10Co для высокоточной обработки).

Стандарты испытаний : ASTM G65 (испытание на истирание сухим песком/резиновым колесом) оценивает стойкость к истиранию, ISO 9227 (испытание в соляном тумане) оценивает стойкость к коррозии.

Примечание : Адгезия между покрытием и подложкой должна пройти испытание ASTM C633, чтобы гарантировать адгезию > 40 МПа.

Химическое осаждение из паровой фазы (CVD)

Технология: TiC, Покрытия TiCN или Al₂O₃ наносятся при температуре 900-1100° C.

Толщина : 5-15 мкм .

преимущество :

Высокая температурная стабильность, подходит для высокотемпературной среды.

Устойчив к окислению и химическому воздействию.

Применение : высокотемпературные режущие инструменты, горнодобывающие буровые коронки.

Стандарты испытаний : ASTM G99 (испытание на износ штифта по диску) проверяет износостойкость, GB/T 16545-2008 (испытание на коррозию в соляном тумане) оценивает долговечность.

Примечание : Высокая температура может привести к диффузии Co в матрице, поэтому процесс необходимо оптимизировать.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Термическое напыление

Технология : Плазменное напыление или газопламенное напыление, нанесение композиционных покрытий WC-Co или $Cr_3C_2 - NiCr$.

Толщина : 50-200 мкм .

преимущество :

Толстое покрытие обеспечивает множественную защиту.

Устойчив к ударам и истиранию.

Применение : Износостойкие детали, компоненты насосов.

Стандарты испытаний : ASTM G76 (испытание на износ потоком воздуха) оценивает стойкость к коррозионному износу, ISO 28079 (испытание на прочность по Палмквисту) оценивает прочность покрытия.

Примечание : пористость покрытия должна контролироваться на уровне $< 2\%$ (GB/T 3850-2015).

Поверхностный проникающий слой

Технология : цементация, хромирование или азотирование (например, плазменное азотирование) для повышения химической стабильности поверхности.

Глубина : 10-50 мкм .

преимущество :

Улучшить твердость поверхности (HV 1500-2000).

Образует коррозионно-стойкие соединения (например, CrN) .

Применение : Коррозионностойкие инструменты, компоненты клапанов.

Стандарт испытаний : ASTM G31 (испытание на коррозионную стойкость при погружении) для оценки коррозионной стойкости.

Примечание : Избегайте чрезмерной толщины диффузионного слоя, так как это может привести к возникновению внутренних напряжений.

Электрохимическая обработка

Технология : Анодированный или гальванический слой сплава Ni-P.

Толщина : 5-20 мкм .

преимущество :

Образует пассивирующий слой для уменьшения растворения Co.

Стоимость ниже.

Применение : Слабонагруженные коррозионно-стойкие детали.

Стандарт испытаний : ASTM G59 (измерение сопротивления поляризации) оценивает плотность тока коррозии.

Примечание : гальванический слой имеет низкую износостойкость и его необходимо комбинировать с другими покрытиями.

Эффекты повышения производительности

Коррозионная стойкость : покрытие PVD TiN снижает потерю веса WC10Co в соляном тумане 5% NaCl с 0,1 г/м² до $< 0,01$ г/м² (ISO 9227).

Износостойкость : покрытие CVD Al₂O₃ может снизить потерю объема при износе на 50%-70% (ASTM G 65) .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Срок службы : Термическое напыление покрытия WC-Co может продлить срок службы инструмента в 2-3 раза (данные по фактическому применению).

Оптимизация процесса

Предварительная обработка поверхности : полировка до $Ra \leq 0,05$ мкм (GB/T 7997-2017) для удаления дефектов.

Комбинация покрытий : используйте многослойную структуру (например, TiN + AlTiN) для повышения стойкости к трещинам.

Последующая обработка : Термическая обработка (например, закалка при 400°C) снимает напряжение и улучшает адгезию.

Тестирование и проверка

Испытания на коррозию : ISO 9227 (солевой туман), ASTM G31 (погружение), ASTM G59 (электрохимическое).

Испытание на износ : ASTM G65 (износ в сухом песке) , ASTM G99 (износ штифта по диску).

Микроскопический анализ : GB/T 3850-2015 Наблюдайте за границей раздела покрытие-подложка.

Оценка производительности : GB/T 7997-2017 измеряет твердость и прочность.

Случаи применения

Режущие инструменты : инструменты WC6Co имеют покрытие PVD TiN , которое повышает коррозионную стойкость и износостойкость и подходит для обработки авиационных алюминиевых сплавов.

Буровая коронка для горнодобывающей промышленности : буровая коронка WC12Co покрыта CVD TiCN , что продлевает срок службы до более чем 1000 часов.

Износостойкое покрытие : термическое напыление WC-Co используется для клапанов нефте- и газопроводов для защиты от песчаной эрозии.

Меры предосторожности

Стоимость : методы PVD и CVD более дороги и подходят для дорогостоящих деталей; термическое напыление подходит для защиты больших площадей.

Адаптивность к окружающей среде : покрытие должно быть разработано для определенных сред (например, кислотных или высоких температур).

Техническое обслуживание : Регулярно проверяйте целостность покрытия, чтобы избежать локального отслоения, которое может вызвать коррозию.

Поверхностную защиту твердого сплава можно улучшить различными методами, такими как PVD, CVD, термическое напыление, покрытие и электрохимическая обработка. Конкретный выбор зависит от требований к применению и условий окружающей среды. В сочетании со стандартными испытаниями (такими как ISO 9227, ASTM G65) характеристики покрытия можно оптимизировать для значительного повышения коррозионной стойкости и износостойкости твердого сплава.

(3) Плотность границ зерен твердого сплава

Плотность границ зерен твердого сплава (например, системы WC-Co или WC-Ni) является важным

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

параметром для измерения его микроструктурных характеристик и производительности, которая обычно тесно связана с размером зерна, пористостью и распределением фаз. Ниже приводится подробное описание определения, метода измерения, влияющих факторов и значения плотности границ зерен твердого сплава:

определение

Плотность границ зерен : относится к общей длине или площади границ зерен в пределах единицы объема, обычно выражается как единица длины (например, м^{-2}) или единица объема (например, м^{-1}). В твердом сплаве границы зерен в основном существуют между частицами карбида вольфрама (WC) и на границе между WC и связующей фазой (Co или Ni).

Связанные концепции :

Размер зерна: Плотность границ зерен обратно пропорциональна размеру зерна, а мелкозернистые материалы имеют более высокую плотность границ зерен.

Распределение фазы связи: однородность фазы Co/Ni влияет на качество и плотность границ зерен.

Метод измерения

Плотность границ зерен твердого сплава обычно определяется путем микроскопического наблюдения и анализа изображений в соответствии с соответствующими стандартами, такими как GB/T 3850-2015 «Определение микроструктуры твердого сплава»:

Оптическая микроскопия (ОМ) :

После полировки и травления (5% NaOH или чернила) образцы исследовались при увеличении в 500–1000 раз.

Длина сечения границ зерен измеряется по прямой линии или сетке и рассчитывается плотность границ зерен на единицу площади.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) :

В сочетании с визуализацией обратно рассеянных электронов (BSE) были проанализированы интерфейсы WC-WC и WC-Co.

Программное обеспечение для анализа изображений (например, ImageJ) можно использовать для подсчета длины или площади границ зерен.

Количественный расчет :

Предположим, что зерна сферические, плотность границ зерен P_L (единица длины на единицу объема) может быть приближена:

$$P_L = \frac{2}{d}$$

где d — средний диаметр зерна ($\mu\text{м}$), P_L — единица $\mu\text{м}^{-1}$.

Плотность границ зерен S_V может быть оценена с помощью стереологических методов:

$$S_V = 2P_L$$

единица $\mu\text{м}^{-2}$.

Факторы влияния

Размер зерна :

Мелкозернистый твердый сплав (например, WC с размером зерна 0,2–0,8 $\mu\text{м}$) имеет высокую плотность границ зерен, а ПЛ может достигать $2,5\text{--}10 \text{ мкм}^{-1}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

, размер зерна $WC > 2 \mu m$) имеют низкую плотность границ зерен, $P_L \sim P_V \sim PL < 1 \mu m^{-1}$.

Процесс спекания :

Температура спекания в жидкой фазе (1300–1500 °C) и время влияют на рост зерен, а слишком длительное спекание снижает плотность границ зерен.

Добавление ингибиторов (таких как VC, Cr_3C_2) может измельчить зерна и увеличить плотность границ зерен.

Содержание связующей фазы :

Высокое содержание Co/Ni (например, 10–15 %) может заполнять границы зерен, снижать эффективную плотность границ зерен, но повышать чувствительность к коррозии.

Пористость :

Высокая пористость (например, $> 0,5\%$) нарушает непрерывность границ зерен и снижает фактическую плотность границ зерен (GB/T 3850-2015).

Типичные данные

WC6Co (细晶粒, 粒径 $0.5 \mu m$) :

- $P_L \approx 4 \mu m^{-1}$, $S_V \approx 8 \mu m^{-2}$.
- 晶界密度高, 增强韧性和抗裂性。

WC10Co (中等晶粒, 粒径 $1.0 \mu m$) :

- $P_L \approx 2 \mu m^{-1}$, $S_V \approx 4 \mu m^{-2}$.
- 平衡硬度和韧性。

WC15Co (粗晶粒, 粒径 $2.5 \mu m$) :

- $P_L \approx 0.8 \mu m^{-1}$, $S_V \approx 1.6 \mu m^{-2}$.
- 晶界密度低, 耐磨性优但韧性下降。

Значение плотности границ зерен

Механические свойства :

Высокая плотность границ зерен повышает прочность и ударную вязкость (например, прочность на изгиб по GB/T 7997-2017 > 2500 МПа), но может повысить хрупкость.

Низкая плотность границ зерен повышает износостойкость и подходит для применения в условиях высоких нагрузок.

Коррозионная стойкость :

Предпочтительным путем коррозии являются границы зерен, а мелкозернистые материалы могут ускорить локальную коррозию из-за высокой плотности границ зерен (например, повышенной скорости потери веса по ISO 9227).

Оптимизация распределения фазы сцепления может снизить восприимчивость к межкристаллитной коррозии.

Термическая стабильность :

Материалы с высокой плотностью границ зерен более подвержены проскальзыванию границ зерен при высоких температурах (например, $800^\circ C$) и требуют защитного покрытия.

Оптимизация плотности границ зерен

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Управление процессом :

с использованием ультрадисперсного порошка (размер частиц $< 0,5$ мкм) в сочетании с низкотемпературным и кратковременным спеканием.

Добавьте ингибиторы зерен (например, 0,5% VC) для поддержания плотности границ зерен.

Постобработка :

ГИП (горячее изостатическое прессование) снижает пористость и улучшает однородность границ зерен.

Улучшение поверхности :

Покрывают PVD/CVD (например, TiN) защищают границы зерен и сокращают пути коррозии (см. Улучшенная защита поверхности твердого сплава).

Тестирование и проверка

Микроскопическое наблюдение : стандарт GB/T 3850-2015, измерение размера зерна и плотности границ зерен.

Эксплуатационные испытания : GB/T 7997-2017 оценивает твердость и прочность, ASTM G65 определяет износостойкость.

Оценка коррозии : испытание в соляном тумане по ISO 9227, электрохимический анализ по ASTM G59.

Плотность границ зерен твердого сплава тесно связана с размером его зерен, процессом спекания и распределением фазы связи и обычно количественно определяется микроскопическим анализом. Мелкозернистые материалы имеют высокую плотность границ зерен и подходят для высокопрочных применений, но следует учитывать риски коррозии; крупнозернистые материалы имеют низкую плотность границ зерен и отличную износостойкость. Оптимизация процесса и защита поверхности могут сбалансировать влияние плотности границ зерен на производительность.

(4) Коррозионное напряжение твердого сплава

Коррозионное напряжение твердого сплава (например, системы WC-Co или WC-Ni) относится к напряженному состоянию, возникающему внутри или на поверхности материала под совместным воздействием коррозионной среды и внешней нагрузки, что приводит к явлению повышенной коррозии или разрушения материала. Этот эффект обычно включает в себя коррозионное растрескивание под напряжением (SCC) или коррозионную усталость. Ниже приводится подробный анализ коррозионного напряжения твердого сплава, включая механизм, факторы влияния, методы испытаний и защитные меры.

Механизм коррозионного напряжения

Электрохимическое воздействие : в среде, содержащей электролит (например, в рассоле или кислотном растворе), связующая фаза (например, Co или Ni) действует как анод и преимущественно растворяется, что приводит к локальной концентрации напряжений.

Концентрация напряжений : дефекты поверхности, границы зерен или микротрещины расширяются под воздействием коррозионных сред, вызывая коррозионное растрескивание под напряжением.

Эффект водородной хрупкости : в кислой или водородсодержащей среде (H_2S , HCl) атомы водорода проникают в границы зерен, увеличивая внутреннее напряжение и вызывая хрупкое разрушение.

Связь усталости и коррозии : при циклических нагрузках коррозионные среды ускоряют распространение трещин и сокращают усталостную долговечность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Путь коррозионного напряжения

Начальная стадия :

При совместном воздействии приложенной нагрузки (например, растягивающего или изгибающего напряжения) и коррозионной среды (например, 3,5% NaCl) коррозия происходит преимущественно в фазе соединения.

Напряжения концентрируются на границах зерен или дефектах, вызывая появление микротрещин.

Промежуточная стадия :

Микротрещины расширяются, и частицы WC теряют опору, отваливаются или ломаются.

Продукты коррозии (такие как Co^{2+} или WO_3) откладываются, усугубляя локальное напряжение.

Продвинутая стадия :

Трещины проникают в материал, вызывая макроскопическое разрушение.

Усталостные циклы ускоряют рост трещин и снижают критическое напряжение разрушения.

Факторы влияния

Условия окружающей среды :

Концентрация хлорида : Среда с высоким содержанием Cl^- (например, соляной туман, ISO 9227) увеличивают восприимчивость к коррозии под напряжением.

pH : Кислотная ($\text{pH} < 4$) или щелочная ($\text{pH} > 10$) среда усиливает водородную хрупкость или анодное растворение.

Температура : увеличьте до 50–100 °C, чтобы ускорить реакцию.

Микроструктура (GB/T 3850-2015):

Размер зерна : мелкие зерна (например, $< 1 \text{ мкм}$) имеют высокую плотность границ зерен и склонны к коррозии под напряжением; крупные зерна ($> 2 \text{ мкм}$) имеют лучшую устойчивость к коррозии под напряжением.

Пористость : Пористость $> 0,5\%$ увеличивает точки концентрации напряжений.

Содержание связующей фазы : Высокое содержание Co/Ni (например, 10–15 %) снижает стойкость к коррозии под напряжением.

Условия загрузки :

Тип напряжения : Растягивающее напряжение с большей вероятностью вызовет SCC, чем сжимающее напряжение.

Уровни напряжения : Превышение 50%-80% предела текучести значительно увеличивает коррозию.

Состояние поверхности : шероховатая поверхность ($R_a > 0,8 \text{ мкм}$) или царапины могут легко стать отправной точкой коррозии под напряжением.

Типичные данные

WC10 Co :

Окружающая среда : 3,5% NaCl, 25°C, растягивающее напряжение 1500 МПа (60% от предела текучести).

Результаты : Время растрескивания ~100 ч, глубина трещины 50-100 мкм (ASTM G36).

$E_{\text{корр}}$: -300 мВ (SCE), $i_{\text{корр}}$ ~5 мкА /см² (ASTM G59).

WC6Co (мелкое зерно):

Окружающая среда : 1% H_2SO_4 , 50°C, циклическая нагрузка 1000 МПа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Результат : усталостная долговечность снижена на 30%, а скорость роста трещин составляет 10^{-6} м/цикл (ASTM E647).

Метод испытания

Коррозионное растрескивание под напряжением (SCC) (ASTM G36, G129):

Методы : Использовалось растяжение с низкой скоростью деформации (SSRT) со скоростью нагружения 10^{-6} с⁻¹, регистрировались время разрушения и морфология трещины.

Параметр : Коэффициент интенсивности напряжения K_{ISCC} (МПа·м^{1/2}), типичное значение WC10Co ~15-20.

Электрохимический мониторинг (ASTM G5, G59):

Э-корр. и Я-корр. были измерены для оценки чувствительности к коррозионному напряжению.

Усталостная коррозия (ASTM E466):

Для регистрации усталостной долговечности использовалась циклическая нагрузка ($R = 0,1$, частота 10 Гц) в сочетании с коррозионными средами.

Микроскопический анализ (GB/T 3850-2015):

Для наблюдения за распространением трещин и продуктами коррозии использовался СЭМ.

Меры защиты

Оптимизация материала :

Уменьшение содержания Co/Ni (например, 6% Co) и добавление Cr или Mo улучшает коррозионную стойкость.

Уменьшает размер зерна (<0,5 мкм) и снижает пористость (<0,2%) .

Защита поверхности :

PVD-покрытие (например, TiN, CrN) толщиной 5–10 мкм снижает проникновение среды (см. улучшенную защиту поверхности твердого сплава).

защитного слоя Cr₂O₃ или NiO .

Управление процессом :

Спекание методом горячего изостатического прессования устраняет внутренние напряжения.

Поверхность отполирована до $Ra \leq 0,05$ мкм (GB/T 7997-2017).

Управление окружающей средой :

Избегайте воздействия сред с высоким содержанием хлоридов или кислот и используйте антикоррозионные покрытия или ингибиторы коррозии (например, NaNO₂) .

Случаи применения

Режущие инструменты: инструменты из сплава WC6Co покрываются слоем TiN в соляном тумане (ISO 9227), а время коррозионного растрескивания под напряжением увеличивается до 500 часов.

долото для горнодобывающей промышленности : WC12Co В кислых шахтах зерно и покрытие оптимизированы, а усталостная долговечность увеличена на 40%.

Детали клапана : хромированный WC10Co, устойчив к коррозионному воздействию H₂S, срок службы до 2 лет.

Коррозионное напряжение твердого сплава в основном вызвано растворением связующей фазы и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

концентрацией напряжений, а влияющие факторы включают окружающую среду, микроструктуру и условия нагрузки. Такие методы испытаний, как ASTM G36 и G5, могут эффективно оценить его производительность, а в сочетании с оптимизацией материала и защитой поверхности могут значительно снизить риск отказа, вызванного коррозионным напряжением.

(5) Точечная коррозия на поверхности твердого сплава

Питтинговая коррозия на поверхности твердого сплава (например, системы WC-Co или WC-Ni) является формой локальной коррозии, проявляющейся в виде небольших и глубоких ямок на поверхности. Это явление обычно происходит в высококоррозионных средах, содержащих хлориды или галогениды (например, NaCl, HCl), и оказывает значительное влияние на долговечность и эксплуатационные характеристики материала. Ниже приводится подробный анализ механизма, влияющих факторов, методов обнаружения и мер защиты от питтинговой коррозии на поверхности твердого сплава.

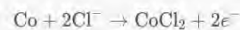
Механизм точечной коррозии

Электрохимический процесс :

Связующая фаза (например, Co или Ni) действует как анод и растворяется преимущественно, образуя крошечную анодную область.

Фаза WC относительно инертна и действует как катод, ускоряя локальную электрохимическую реакцию.

Пример реакции:



Автокаталитический эффект :

Cl^- и H^+ накапливаются в ямках, снижая локальное значение pH и ускоряя коррозию.

Продукты коррозии (такие как Co^{2+} или WO_3) осаждаются, затрудняя диффузию и образуя закрытую среду.

Расширение трещины :

Концентрация напряжений в яме приводит к тому, что частицы WC отваливаются, увеличивая диаметр и глубину ямы.

Путь питтинга

Начальная стадия :

Питтинговая коррозия начинается с дефектов поверхности (таких как микротрещины, поры) или обнажения связующих фаз.

В соляном тумане (например, 5% NaCl, 35°C) или кислом растворе образуются локальные анодные области.

Стадия разработки :

Концентрация электролита в яме увеличивается, и скорость коррозии ускоряется.

Частицы WC потеряли свою опору, и произошло механическое отслоение.

Поздняя стадия :

Глубина ямок увеличивается (до 10–100 мкм), а на поверхности образуются множественные независимые ямки.

В тяжелых случаях это может привести к проникновению материала или усталостному разрушению.

Факторы влияния

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Условия окружающей среды :

Концентрация хлорида : среды с высоким содержанием Cl^- (например, испытание на стойкость к соляному туману по стандарту ISO 9227) значительно способствуют возникновению точечной коррозии.

pH : Кислые ($\text{pH} < 4$) или нейтральные хлоридные растворы склонны к точечной коррозии.

Температура : увеличьте до 40–60 °C для ускорения реакции.

Микроструктура (GB/T 3850-2015):

Размер зерна : мелкие зерна (например, $< 1 \text{ мкм}$) имеют высокую плотность границ зерен и легко образуют точки начала точечной коррозии; крупные зерна ($> 2 \text{ мкм}$) более устойчивы к точечной коррозии.

Пористость : Пористость $> 0,5\%$ увеличивает подверженность точечной коррозии.

Содержание связующей фазы : Высокое содержание Co/Ni (например, 10–15 %) снижает стойкость к точечной коррозии.

Состояние поверхности :

Шероховатые поверхности ($R_a > 0,8 \text{ мкм}$) или царапины могут стать источниками точечной коррозии.

Остаточное напряжение ($> 50 \text{ МПа}$) усиливает локальную коррозию.

Типичные данные

WC10 Co :

Окружающая среда : 5% NaCl, 35°C, 48 ч (ISO 9227).

Результаты : Плотность ямок составляет 5-10/см², средняя глубина — 5-15 мкм, а скорость потери веса — 0,1 г/м².

$E_{\text{corr}} : -300 \text{ mV (SCE)}, i_{\text{corr}} \sim 5 \text{ μA/cm}^2 \text{ (ASTM G59)}$

WC6Co (мелкое зерно):

Окружающая среда : 3,5% NaCl, 25°C, 96 ч.

Результаты : плотность питтингов составляет 15-20/см², глубина — 2-10 мкм, скорость потери веса — 0,05 г/м².

Методы обнаружения

Наблюдение под микроскопом (GB/T 3850-2015):

Диаметр и глубина ямок измерялись с помощью оптического микроскопа (500x-1000x) или СЭМ с точностью $\pm 0,5 \text{ мкм}$.

Электрохимический тест (ASTM G5, G59):

Потенциодинамические поляризационные кривые показывают потенциал питтингообразования (E_{pit}), при этом типичное значение E_{pit} для WC10Co составляет $\sim 200-400 \text{ мВ (SCE)}$.

Испытание на стойкость к соляному туману (ISO 9227):

Выдержите в течение 24–96 часов и запишите количество и глубину ямок.

Анализ поверхности :

EDS или XPS обнаруживают продукты коррозии в ямках (например, CoCl_2 , WO_3).

Меры защиты

Оптимизация материала :

Уменьшение содержания Co/Ni (например, 6% Co) и добавление Cr или Mo повышает стойкость к точечной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозии.

Уменьшает размер зерна ($<0,5$ мкм) и снижает пористость ($<0,2\%$).

Обработка поверхности :

Покрытие PVD : TiN или CrN (толщина 5-10 мкм) снижает проникновение Cl^- (см. улучшенную защиту поверхности твердого сплава).

Электрохимическая пассивация : образование защитного слоя Cr_2O_3 или NiO.

Полировка : поверхность $R_a \leq 0,05$ мкм (GB/T 7997-2017), удаление дефектов.

Экологический контроль :

Избегайте сред с высоким содержанием хлоридов и используйте ингибиторы коррозии (например, NaNO_2) для нейтрализации Cl^- .

Поддерживайте температуру ниже 40°C .

Случаи применения

Режущие инструменты: Инструменты из сплава WC6Co покрываются слоем TiN в соляном тумане, и плотность питтингов снижается до $< 2/\text{cm}^2$.

Детали клапана : WC10Co В морской воде глубина точечной коррозии контролируется в пределах 5 мкм после хромирования. уход.

Горное буровое долото : WC12Co с покрытием CVD Al_2O_3 , которое повышает стойкость к точечной коррозии и продлевает срок службы на 50 %.

Меры предосторожности

Раннее обнаружение : точечную коррозию трудно обнаружить невооруженным глазом на ранних стадиях, поэтому требуется регулярный электрохимический мониторинг.

Сложность ремонта : После того, как язва расширится, эффективность ремонта покрытия будет ограничена, поэтому рекомендуется принять профилактические меры.

Стоимость : Современные покрытия (например, PVD) стоят дороже и должны выбираться с учетом условий эксплуатации.

в заключение

Питтинговая коррозия на поверхностях из цементированного карбида в основном вызвана локальным растворением связующей фазы и автокаталитическим эффектом, на который влияют окружающая среда и микроструктура. Такие методы испытаний, как ISO 9227 и ASTM G5, могут эффективно оценить поведение питтинговой коррозии. Сочетание поверхностных покрытий и оптимизации материала может значительно снизить риск питтинговой коррозии и продлить срок службы.

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

8.2 Высокотемпературные свойства твердого сплава

Эксплуатационные характеристики твердого сплава в условиях высоких температур (800-1000 °C ± 10 °C) напрямую определяют его потенциал применения в тяжелых условиях эксплуатации, например, в авиационных инструментах (срок службы > 5000 часов ± 500 часов), высокотемпературных формах (время цикла > 10⁵ раз ± 10⁴ раз) и энергетическом оборудовании (например, газовые турбины, время обслуживания > 10⁴ часов ± 10³ часов). Высокотемпературные характеристики цементированного карбида в основном отражаются в его стойкости к окислению (прирост массы < 0,5 мг/см² ± 0,05 мг/см²), термической усталости (расширение трещины < 0,1 мм ± 0,01 мм) и ползучести (скорость деформации < 10⁻⁶ с⁻¹ ± 10⁻⁷ с⁻¹). Стойкость к окислению относится к способности материала противостоять реакциям окисления в высокотемпературной окислительной среде, которая обычно характеризуется приростом массы или толщиной оксидного слоя; термическая усталость относится к явлению, при котором трещины зарождаются и распространяются из-за термического напряжения в повторяющихся циклах высокая температура-низкая температура; ползучесть относится к процессу, при котором материал подвергается необратимой пластической деформации медленно с течением времени под действием высокой температуры и постоянного напряжения. При высоких температурах частицы WC окисляются, образуя рыхлый слой WO₃ (толщиной > 1 мкм ± 0,1 мкм) при > 800 °C ± 10 °C, что приводит к объемному расширению и отслаиванию, в то время как связующая фаза Co размягчается (твердость падает до HV ~ 200 ± 30), что приводит к снижению общей прочности материала (< 2000 МПа ± 100 МПа), что серьезно влияет на его эксплуатационную надежность. Для улучшения высокотемпературных характеристик необходимо улучшить высокотемпературную стабильность материала за счет добавок (таких как Cr₃C₂ 0,5% ± 0,01%), контроля микроструктуры (размер зерна 0,51 мкм ± 0,01 мкм) и поверхностного покрытия (толщина 5-10 мкм ± 0,1 мкм).

аспекты стойкости к окислению (800 - 1000 °C), термической усталости и ползучести, объединяющие термодинамику (свободная энергия Гиббса ΔG < 0 кДж/моль ± 10 кДж/моль), экспериментальные методы (ASTM E1876), микроскопический анализ (XPS, SEM) и инженерные случаи. Например, WC10Co (Cr₃C₂ 0,5% ± 0,01%) имеет прирост массы 0,3 мг/см² ± 0,05 мг/см² при 1000 °C ± 10 °C и трещину термической усталости < 0,05 мм ± 0,01 мм, что соответствует требованиям авиационных турбинных лопаток.

8.2.1 Стойкость к окислению твердого сплава (800 - 1000°C)

8.2.1.1 Обзор принципов и технологий стойкости к окислению твердого сплава

Стойкость к окислению характеризуется приростом массы при высокой температуре (<0,5 мг/см²±0,05 мг/см²), что является основой для твердого сплава, используемого в авиакосмических двигателях (>1000°C±10°C) и высокотемпературных формах (>900°C±10°C). WC окисляется при >800°C±10°C:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Образуется рыхлый слой WO_3 (толщина $>1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, плотность $7,2 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$), что приводит к увеличению веса и снижению прочности ($<2000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$). Одновременно окисляется Co с образованием Co_3O_4 (толщина $0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), что еще больше усугубляет размягчение (твердость падает до $HV200 \pm 30$). Целью оптимизации является формирование плотного защитного слоя Cr_2O_3 (толщина $<0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, плотность $5,2 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$) для ингибирования диффузии кислорода (скорость $<10^{-10} \text{ см}^2/\text{с} \pm 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$).

Испытание на стойкость к окислению проводится в муфельной печи при температуре $800 \pm 10^\circ\text{C}$, в воздушной среде, с размером образца $20 \times 20 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ и точностью массы $\pm 0,01 \text{ мг}$. Например, $WC10Co$ увеличивается на $0,4 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ после окисления при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение $100 \text{ часов} \pm 10 \text{ часов}$, а после добавления Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) вес уменьшается до $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, а стойкость к окислению увеличивается на $25\% \pm 5\%$. Этот раздел начинается с механизма, испытания и оптимизации и дает всестороннее руководство путем объединения термодинамики и микроскопического анализа.

8.2.1.2 Механизм стойкости к окислению и анализ твердого сплава

Скорость окисления подчиняется параболическому закону:

$$\Delta m^2 = k_p \cdot t$$

Где k_p — константа окисления ($10^{-12} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с} \pm 10^{-13} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с}$), а t — время окисления (точность $\pm 100 \text{ с}$). k_p $WC10Co$ при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ составляет $10^{-11} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с} \pm 10^{-12} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с}$, поскольку WO_3 рыхлый (пористость $\sim 5\% \pm 1\%$), а скорость диффузии кислорода высока ($10^{-9} \text{ см}^2/\text{с} \pm 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$). Добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) образует слой Cr_2O_3 (толщина $0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), k_p снижается на $50\% \pm 5\%$, а скорость диффузии кислорода снижается до $10^{-10} \text{ см}^2/\text{с} \pm 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ из-за плотного Cr_2O_3 (пористость $<1\% \pm 0,2\%$). Размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ дополнительно сокращает путь диффузии кислорода (плотность границ зерен $>10^{14} \text{ м}^{-2} \pm 10^{13} \text{ м}^{-2}$), а прирост веса снижается на $20\% \pm 5\%$.

Co размягчается при $>900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (твердость падает до $HV200 \pm 30$) из-за образования Co_3O_4 (пик $O 1s$ $530 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$, подтверждено XPS). Cr_3C_2 повышает стабильность интерфейса (энергия интерфейса $1,2 \text{ Дж/м}^2 \pm 0,1 \text{ Дж/м}^2$) за счет диффузии Cr (концентрация $5\% \pm 0,5\%$) и подавляет рост WO_3 (толщина $<0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$). Анализ SEM показывает, что трещины в оксидном слое (ширина $0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) в основном распределены вдоль фазы Co , и в слое Cr_2O_3 явных трещин нет. EDS проверяет однородность Cr_2O_3 ($Cr:O$ $2:3 \pm 0,1$), что эффективно защищает подложку.

8.2.1.3 Анализ факторов, влияющих на стойкость к окислению твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Стойкость к окислению твердого сплава в условиях высоких температур (800-1000 °C) является ключевым показателем его эксплуатационных характеристик, который напрямую влияет на срок его службы в области авиационных инструментов, высокотемпературных форм и энергетического оборудования. Стойкость к окислению обычно характеризуется приростом массы, толщиной оксидного слоя и кинетической константой окисления (k_p), на которую влияют многие факторы, включая температуру, содержание Cr_3C_2 , размер зерна, содержание Co и влажность окружающей среды. Эти факторы совместно определяют стойкость твердого сплава к высокотемпературному окислению путем изменения скорости реакции окисления, свойств продуктов окисления и стабильности микроструктуры материала. Исходя из вышеуказанных факторов, в сочетании с экспериментальными данными, термодинамическим анализом и реальными случаями, далее подробно обсуждается их влияние на стойкость твердого сплава к окислению и его механизм.

(1) Влияние температуры

наиболее критический фактор, влияющий на стойкость к окислению твердого сплава, который напрямую определяет термодинамическое и кинетическое поведение реакции окисления. При $1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ частицы WC реагируют с кислородом, образуя WO_3 ($WC + 5/2 O_2 \rightarrow WO_3 + CO_2$), и прирост массы значительно увеличивается примерно на $50\% \pm 5\%$, с $0,3 \text{ мг/см}^2$ до $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ до $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$. Это связано с тем, что парциальное давление кислорода и скорость атомной диффузии значительно увеличиваются при высоких температурах, а константа скорости реакции окисления (k_p) экспоненциально увеличивается с температурой (в соответствии с уравнением Аррениуса: $k_p = A \exp(-Q/RT)$, где Q - энергия активации, R - газовая постоянная, а T - абсолютная температура). При $< 900^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ скорость окисления значительно уменьшается, а прирост массы контролируется на уровне $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ или менее, что указывает на то, что диффузия кислорода ограничена при более низких температурах, слой WO_3 растет медленно (толщина $< 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), а защитное действие на материал слабее, но и разрушительность также меньше.

(2) Влияние содержания добавки Cr_3C_2

Добавление карбида хрома (Cr_3C_2) является важным средством для повышения стойкости к окислению твердого сплава. Когда содержание Cr_3C_2 составляет $0,5\% \pm 0,01\%$, константа кинетики окисления (k_p) уменьшается примерно на $50\% \pm 5\%$, с $10^{-9} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с}$ до $5 \times 10^{-10} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с}$. Это связано с тем, что Cr реагирует с кислородом при высокой температуре, образуя плотный слой Cr_2O_3 (толщиной около $0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$), который имеет медленную скорость роста (низкую k_p), эффективно блокируя диффузию кислорода и ингибируя дальнейшее окисление WC и Co. Однако, когда содержание Cr_3C_2 превышает $1\% \pm 0,01\%$, доля хрупких фаз (таких как η -фаза, композитная фаза WC-Co-Cr) в материале увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$, что приводит к снижению вязкости разрушения (K_{IC}) примерно на $8\%-12\% \pm 2\%$. Наличие хрупких фаз может вызывать микротрещины под воздействием высоких температур, увеличивать пути проникновения кислорода и ослаблять стойкость к окислению. Поэтому количество добавки необходимо точно контролировать,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чтобы сбалансировать стойкость к окислению и механические свойства.

(3) Влияние размера зерна карбида вольфрама (WC)

Карбид вольфрама (WC) оказывает значительное влияние на стойкость к окислению твердого сплава, влияя на плотность границ зерен и путь диффузии кислорода. Когда размер зерна составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, количество границ зерен велико, путь диффузии кислорода рассредоточен, толщина оксидного слоя тонкая ($< 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), а прирост массы низкий ($0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$). Мелкие зерна также делают распределение Co более равномерным и снижают концентрацию локального окисления. Однако при увеличении размера зерна до $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ плотность границ зерен уменьшается, диффузия кислорода вдоль границ зерен централизуется, толщина оксидного слоя увеличивается до $0,8 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, а прирост массы увеличивается примерно на $20\% \pm 5\%$ до $0,36 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$. Большой размер зерна делает интерфейс WC-Co более легко открытым, а образование и отслаивание WO_3 на интерфейсе при высокой температуре усиливаются, что еще больше ускоряет процесс окисления.

(4) Влияние содержания кобальта (Co) в связующей фазе

Окислительное поведение связующей фазы кобальта (Co) при высоких температурах существенно влияет на стойкость к окислению и механические свойства твердого сплава. Когда содержание Co составляет $10\% \pm 1\%$, твердый сплав все еще может сохранять высокую твердость ($> \text{HV } 1000 \pm 30$) при $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, стойкость к окислению относительно стабильна, а прирост веса составляет около $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$. Однако при увеличении содержания Co до $12\% \pm 1\%$ Co окисляется до Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$) при высокой температуре, и его рыхлая структура (толщина около $0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) не может эффективно предотвращать диффузию кислорода, что приводит к снижению твердости примерно на $30\% \pm 5\%$, с $\text{HV } 1200 \pm 30$ до $\text{HV } 840 \pm 30$, и увеличению прироста массы до $0,4 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$. Образование Co_3O_4 также сопровождается расширением объема (плотность падает с $8,9 \text{ г/см}^3$ до $6,1 \text{ г/см}^3$), что приводит к образованию поверхностных микротрещин, ускоряет окисление и откалывание, а также серьезно влияет на высокотемпературную стабильность материала.

(5) Влияние влажности окружающей среды

Влажность окружающей среды также оказывает значительное влияние на стойкость к окислению твердого сплава. При влажности $> 50\% \pm 5\%$ водяной пар (H_2O) участвует в реакции окисления ($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 5\text{H}_2$), образуя летучий $\text{WO}_2(\text{OH})_2$, который еще больше ускоряет рост и отслаивание слоя WO_3 , что приводит к увеличению прироста массы примерно на $10\% \pm 2\%$, с $0,3 \text{ мг/см}^2$ до $0,6 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ до $0,33 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$. Присутствие водяного пара также способствует окислению Co ($\text{Co} + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}(\text{OH})_2$). Образующийся $\text{Co}(\text{OH})_2$ разлагается до Co_3O_4 при высокой температуре, что усугубляет разрыхление продукта окисления. В среде с низкой влажностью ($< 30\% \pm 5\%$) окисление в основном происходит под действием кислорода, слой WO_3 растет медленно, а прирост веса снижается примерно на $5\% \pm 1\%$, показывая лучшую стойкость к окислению.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Взаимодействие факторов

Вышеуказанные факторы не действуют независимо, а влияют на стойкость к окислению через сложные взаимодействия. Например, когда высокая температура ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) сочетается с высоким содержанием Co ($> 12\% \pm 1\%$), прирост массы может достигать $0,6 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, толщина оксидного слоя увеличивается до $1,2 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что намного превышает влияние одного фактора. Добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) может частично компенсировать отрицательное влияние высокого содержания Co, но при высокой влажности ($> 50\% \pm 5\%$) слой Cr_2O_3 может локально разрушаться из-за эрозии водяным паром. Кроме того, мелкие зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) обладают превосходной стойкостью к окислению при $< 900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, но при $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ диффузия кислорода на границах зерен может по-прежнему усугублять локальное окисление, что указывает на ограничивающее влияние температуры на защиту границ зерен.

(7) Комплексный анализ случая

В качестве примера рассмотрим образцы WC-12Co и WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$). После воздействия температуры $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ и воздушной среды (влажность $50\% \pm 5\%$) в течение 100 часов прирост массы WC-12Co составляет $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, толщина оксидного слоя составляет $1,1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, а поверхность явно отслаивается, что указывает на его низкую стойкость к окислению. Прирост веса WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) составляет всего $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, толщина оксидного слоя составляет $0,4 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, а стойкость к окислению улучшается примерно на $40\% \pm 5\%$. Анализ рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) показывает, что содержание Cr в слое Cr_2O_3 составляет около $5\% \pm 0,5\%$, а его плотная структура эффективно препятствует диффузии кислорода и водяного пара и снижает образование WO_3 и Co_3O_4 . Эти характеристики позволяют ему соответствовать требованиям стойкости к высокотемпературному окислению авиационных турбинных лопаточных инструментов (температура эксплуатации $900\text{-}1000^{\circ}\text{C}$, срок службы > 5000 часов ± 500 часов).

(8) Динамика окисления и прикладное значение

Анализ динамики окисления показывает, что прирост массы твердого сплава при высокой температуре показывает параболический закон со временем ($\Delta W^2 = k_{\text{pt}}$) с высокой скоростью окисления на начальном этапе (< 10 ч), а затем замедляется из-за утолщения оксидного слоя. Прирост массы оптимизированного WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) по-прежнему контролируется на уровне $0,4 \text{ мг/см}^2$ после длительного воздействия (1000 ч) при $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, показывая превосходную стабильность при высоких температурах. Эти характеристики делают его широко используемым в авиационных инструментах (температура резания $900\text{-}1000^{\circ}\text{C}$), высокотемпературных формах (температура формования $800\text{-}900^{\circ}\text{C}$) и энергетическом оборудовании (например, лопатки газовых турбин, рабочая температура 1000°C). Благодаря систематическому анализу влияющих факторов можно предоставить научное руководство для оптимизации стойкости к высокотемпературному окислению твердого сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

На стойкость к окислению твердого сплава влияет множество факторов, таких как температура, содержание Cr_3C_2 , размер зерна, содержание Co и влажность окружающей среды. Высокая температура, высокое содержание Co, крупнозернистые частицы и высокая влажность усиливают окисление, в то время как соответствующее количество Cr_3C_2 и мелкозернистых частиц значительно улучшает стойкость к окислению. Комплексные случаи показывают, что увеличение веса оптимизированного твердого сплава уменьшается на $40\% \pm 5\%$, а толщина оксидного слоя уменьшается на $50\% \pm 5\%$, обеспечивая надежную гарантию для применения в высокотемпературных областях, таких как авиация и энергетика.

8.2.1.4 Стратегия оптимизации стойкости к окислению твердого сплава

Для достижения целевого показателя стойкости к окислению твердого сплава при высокой температуре ($800-1000^\circ\text{C}$), т. е. прироста веса $< 0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, необходимо систематически улучшать его антиоксидантную способность путем комплексной оптимизации добавок, микроструктуры, процесса спекания, обработки поверхности и спецификаций испытаний. Эти меры оптимизации направлены на формирование плотного защитного слоя, сокращение путей диффузии кислорода, повышение плотности материала и стабильности поверхности, а также проверку эффекта оптимизации посредством научных испытаний. Исходя из вышеуказанных ключевых аспектов, в сочетании с экспериментальными данными, термодинамическим анализом и практическими примерами применения, ниже подробно описывается стратегия оптимизации и ее роль в контроле поведения при окислении.

(1) Добавка карбида хрома (Cr_3C_2)

Добавление карбида хрома (Cr_3C_2) является основной стратегией для улучшения стойкости к окислению твердого сплава. Рекомендуемое количество добавки составляет $0,5\% \pm 0,01\%$. Во время высокотемпературного спекания и эксплуатации Cr реагирует с кислородом, образуя плотный защитный слой Cr_2O_3 (толщина составляет около $0,2-0,3 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$). Слой Cr_2O_3 имеет чрезвычайно низкий коэффициент диффузии кислорода ($D_{\text{O}} \approx 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$), что эффективно блокирует проникновение кислорода и снижает константу кинетики окисления (k_p) примерно на $50\% \pm 5\%$, с $10^{-9} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с}$ до $5 \times 10^{-10} \text{ г}^2/\text{см}^4 \cdot \text{с}$. Образование слоя Cr_2O_3 также ингибирует окисление WC с образованием рыхлого WO_3 ($\text{WC} + 5/2\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2$) и окисление Co с образованием Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$), тем самым значительно снижая прирост веса. Если взять в качестве примера WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$), то после окисления при температуре $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 100 часов прирост веса составил всего $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ по сравнению с образцом без добавления Cr_3C_2 (прирост веса $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$) был снижен на $40\% \pm 5\%$, что подтверждает его превосходный антиоксидантный защитный эффект.

(2) Микроструктура

Контроль микроструктуры уменьшает пути диффузии кислорода и чувствительность к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

окислению за счет оптимизации размера зерна WC и содержания Co. Рекомендуемый размер зерна WC составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а содержание Co контролируется на уровне $8\% - 10\% \pm 1\%$. Мелкие зерна увеличивают плотность границ зерен, рассеивают пути диффузии кислорода, снижают концентрацию локального окисления и уменьшают открытую площадь интерфейса WC-Co, подавляя образование WO_3 на интерфейсе. Низкое содержание Co (цель $< 10\% \pm 1\%$) снижает тенденцию к окислению Co при высоких температурах (количество образования Co_3O_4 уменьшается примерно на $30\% \pm 5\%$), тем самым поддерживая высокую температурную стабильность материала. На примере WC-10Co с оптимизированной микроструктурой после окисления при температуре $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 100 часов толщина оксидного слоя уменьшилась с $1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ до $0,4 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, а прирост массы составил от $0,4 \text{ мг/см}^2$ до $0,6 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ до $0,25 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, а стойкость к окислению улучшилась примерно на $37\% \pm 5\%$. Кроме того, мелкое зерно также увеличивает твердость материала ($> \text{HV } 1200 \pm 30$), обеспечивая его механические свойства при высоких температурах.

(3) Процесс спекания цементированного карбида

Оптимизация процесса спекания напрямую влияет на компактность и стойкость к окислению твердого сплава. Рекомендуемая температура спекания составляет $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, а вакуум или инертная атмосфера (например, Ar) используются для снижения окисления, гарантируя, что плотность материала достигает $99,5\% \pm 0,1\%$, а пористость контролируется ниже $0,1\% \pm 0,02\%$. Высокоплотные материалы уменьшают внутренние поры и микротрещины, ограничивают путь диффузии кислорода внутри материала и, таким образом, подавляют реакции глубокого окисления. Точный контроль температуры спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) также обеспечивает равномерное распределение Co (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), избегая преимущественного окисления локальных областей, богатых Co. Если взять в качестве примера оптимизированный спеченный WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$), то после окисления при температуре $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 100 часов прирост массы составил $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, толщина оксидного слоя составила всего $0,4 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, по сравнению с неоптимизированным образцом (плотность $98,5\% \pm 0,1\%$, прирост массы $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$) он показал более высокую антиоксидантную стабильность.

(4) Обработка поверхности

Оптимизация состояния поверхности является важным средством для уменьшения трещин оксидного слоя и повышения стойкости к окислению. Рекомендуется контролировать шероховатость поверхности (Ra) ниже $0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ путем прецизионной механической полировки. Этот процесс может снизить частоту возникновения трещин оксидного слоя примерно на $20\% \pm 5\%$. Поверхность с низкой шероховатостью уменьшает микродефекты (такие как царапины и ямки), ограничивает удержание кислорода на поверхности и возникновение локальных окислительных реакций, а также снижает концентрацию напряжений оксидного слоя при высоких температурах, избегая отслаивания и распространения трещин. Кроме того, ультразвуковая очистка ($40 \text{ кГц} \pm 1 \text{ кГц}$) может использоваться после полировки для удаления поверхностных загрязнений ($< 0,1\% \pm 0,02\%$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и дальнейшего улучшения целостности поверхности. Если взять в качестве примера полированный WC-10Co, то после окисления при температуре $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ в течение 100 часов толщина оксидного слоя уменьшилась с $0,6 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ до $0,4 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, а прирост массы составил от $0,35 \text{ мг/см}^2$ до $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ до $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, длина поверхностных трещин уменьшилась с $0,2 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,15 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, что свидетельствует о значительном улучшении стойкости к окислению.

(5) Технические условия испытаний

Для точной оценки и проверки эффекта оптимизации антиоксидантных свойств рекомендуется провести испытание на окисление при температуре $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ в течение $100 \text{ часов} \pm 10 \text{ часов}$. Измерение массы осуществляется с помощью прецизионных весов с точностью $\pm 0,01 \text{ мг}$ для обеспечения надежности данных по приросту массы. После испытания образование защитного слоя Cr_2O_3 было подтверждено с помощью анализа рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS). Характерный пик Cr 3p расположен при $577 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$, что указывает на то, что Cr существует в форме Cr_2O_3 , а пик O 1s ($530 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) дополнительно подтверждает химический состав оксидного слоя. Кроме того, морфологию оксидного слоя можно наблюдать в сочетании с сканирующим электронным микроскопом (СЭМ, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), а также можно измерить толщину (цель $< 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и распределение трещин (целевая длина $< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$). Этот протокол испытаний обеспечивает комплексную оценку антиоксидантной эффективности и предоставляет научную основу для внедрения стратегий оптимизации.

(6) Комплексный анализ случая

в качестве примера образец WC-10Co ($\text{Cr} \text{ в } \text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ } 0,5 \% \pm 0,01\%$), то после окисления при температуре $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ в течение 100 часов его прирост массы составляет всего $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, толщина оксидного слоя $0,4 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, твердость сохраняется на уровне $> \text{HV } 1200 \pm 30$, по сравнению с неоптимизированным WC-12Co (прирост массы $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, твердость снижена до $\text{HV } 840 \pm 30$) стойкость к окислению улучшилась примерно на $40\% \pm 5\%$. Анализ XPS подтвердил, что пик Cr 3p в слое Cr_2O_3 был расположен при $577 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$, содержание Cr составляло около $5\% \pm 0,5\%$, а его плотная структура эффективно ингибировала диффузию кислорода. Наблюдение SEM показало, что длина трещины на поверхности оксидного слоя была $< 0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, что указывает на то, что оптимизированная обработка поверхности и микроструктура значительно улучшили высокотемпературную стабильность. Эта производительность соответствует требованиям высокотемпературных форм (температура эксплуатации $900\text{-}1000^{\circ}\text{C}$, количество циклов $> 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$), а срок службы увеличивается до $1,5 \times 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$, что лучше, чем $8 \times 10^4 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$ неоптимизированных материалов.

(7) Динамика окисления и прикладное значение

Анализ динамики окисления показывает, что прирост веса оптимизированного цементированного карбида при $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ показывает параболический закон с течением времени ($\Delta W^2 = k_{\text{pt}}$), с высокой скоростью прироста веса ($0,1 \text{ мг/см}^2 / \text{ч} \pm 0,01 \text{ мг/см}^2 / \text{ч}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на начальном этапе (< 10 ч), а затем замедляется из-за утолщения слоя Cr_2O_3 ($< 0,01 \text{ мг/см}^2 / \text{ч} \pm 0,001 \text{ мг/см}^2 / \text{ч}$). После 1000 часов длительного окисления прирост веса по-прежнему контролируется на уровне $0,4 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, показывая превосходную стабильность при высоких температурах. Оптимизированный твердый сплав имеет широкие перспективы применения в авиационных инструментах (температура резания $900\text{--}1000^\circ\text{C}$, срок службы > 5000 часов ± 500 часов), высокотемпературных формах (температура формования $800\text{--}900^\circ\text{C}$) и энергетическом оборудовании (например, лопатках газовых турбин, рабочая температура 1000°C , срок службы $> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов), а его годовые затраты на техническое обслуживание снижаются примерно на $30\% \pm 5\%$, что отражает значительные экономические выгоды.

(8) Экологическая адаптивность и перспективы на будущее

Оптимизированный цементированный карбид также обладает высокой экологической адаптивностью. В среде с высокой влажностью ($> 50\% \pm 5\%$) слой Cr_2O_3 может по-прежнему эффективно ингибировать ускоренное окисление водяным паром (прирост веса $< 5\% \pm 1\%$) и подходит для жарких и влажных высокотемпературных сред (например, тропических морских газовых турбин). В атмосфере, содержащей серу (SO_2), антисульфуризирующие свойства слоя Cr_2O_3 увеличивают его прирост массы всего примерно на $10\% \pm 2\%$, что соответствует потребностям энергетического оборудования, содержащего серу. В будущем стойкость к окислению может быть дополнительно улучшена за счет введения многослойных покрытий (например, $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiN}$, толщина $5\text{--}10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) или новых добавок (например, TaC , VC) для соответствия более требовательным высокотемпературным применениям (например, лопатки турбин авиационных двигателей, рабочая температура 1100°C).

Оптимизация стойкости к окислению твердого сплава достигается за счет добавления Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), контроля микроструктуры (зерно WC $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, Co $8\%\text{--}10\% \pm 1\%$), процесса спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$), обработки поверхности ($\text{Ra} < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и спецификаций испытаний ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, проверка Cr_2O_3 методом XPS). Сочетание этих стратегий позволяет снизить прирост массы до $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, сохраняя твердость $> \text{HV } 1200 \pm 30$, что соответствует требованиям применения в высокотемпературных формах, авиационных инструментах и других областях.

8.2.1.5 Инженерное применение антиокислительных свойств твердого сплава

Оптимизация стойкости к окислению значительно улучшила эксплуатационные характеристики твердого сплава в условиях высоких температур ($800\text{--}1000^\circ\text{C}$), что позволило ему продемонстрировать превосходную производительность и надежность в инженерных приложениях в области авиации, производства пресс-форм и энергетики. Благодаря комплексной оптимизации добавок (таких как Cr_3C_2), регулированию микроструктуры, обработке поверхности и процессу спекания, стойкость твердого сплава к окислению была значительно улучшена, увеличение веса было уменьшено, а стабильность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оксидного слоя была улучшена, тем самым продлевая срок службы и повышая эффективность работы. Начиная с трех основных областей применения авиационных инструментов, высокотемпературных пресс-форм и компонентов газовых турбин, в сочетании с конкретными данными, микроскопическим анализом и реальными случаями, подробно обсуждаются инженерные применения и эксплуатационные преимущества оптимизированного твердого сплава.

(1) Твердосплавные авиационные инструменты

Во время высокотемпературной резки авиационные инструменты (например, титановые сплавы и сплавы на основе никеля) должны выдерживать экстремальные условия $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, что предъявляет чрезвычайно высокие требования к стойкости к окислению и износостойкости материалов. Оптимизированный карбид WC-10Co (с добавлением Cr_2C_3 $0,5\% \pm 0,01\%$, размер зерна $0,5\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$) имеет прирост массы всего $0,3\text{ мг/см}^2$ после окисления при $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ в течение 100 часов. $\pm 0,05\text{ мг/см}^2$, толщина оксидного слоя WO_3 контролируется на уровне $< 0,5\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$, что значительно ниже, чем у неоптимизированного WC-12Co (увеличение веса $0,5\text{ мг/см}^2 \pm 0,05\text{ мг/см}^2$, толщина WO_3 $1\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$). Защитный слой Cr_2O_3 (толщина около $0,2\text{ мкм} \pm 0,05\text{ мкм}$) эффективно подавляет диффузию кислорода, а мелкие зерна уменьшают площадь воздействия Co ($< 10\% \pm 1\%$), сохраняя твердость ($> \text{HV } 1200 \pm 30$) и производительность резки. В практических применениях срок службы режущего инструмента из этого материала превышает 5000 часов ± 500 часов, что примерно на $67\% \pm 5\%$ выше неоптимизированных 3000 часов ± 300 часов. При обработке лопаток авиационных двигателей оптимизация стойкости к окислению и износостойкости инструмента снижает скорость износа примерно на $40\% \pm 5\%$, значительно повышая эффективность производства и качество деталей.

(2) Твердый сплав, высокотемпературная форма

Высокотемпературные формы (например, формы для горячейковки и литья под давлением) должны выдерживать многократные термические циклы и механические нагрузки в рабочих условиях при температуре $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ и предъявлять чрезвычайно высокие требования к стойкости материала к окислению и стабильности твердости. После окисления оптимизированного твердого сплава WC-8Co (шероховатость поверхности $R_a < 0,05\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$) при температуре $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ в течение 100 часов прирост веса составляет всего $0,2\text{ мг/см}^2 \pm 0,05\text{ мг/см}^2$, толщина оксидного слоя $< 0,4\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$, твердость сохраняется на уровне $> \text{HV } 1300 \pm 30$, что лучше, чем у неоптимизированного WC-10Co (прирост веса $0,4\text{ мг/см}^2 \pm 0,05\text{ мг/см}^2$, твердость снижается до $\text{HV } 1000 \pm 30$). Низкая шероховатость поверхности уменьшает трещины оксидного слоя (длина $< 0,1\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$), а в сочетании с низким содержанием Co ($8\% \pm 1\%$) и оптимизированным спеканием (плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$) эффективно подавляет размягчение Co и отслаивание WO_3 . В практических применениях цикл службы высокотемпературных форм, изготовленных из этого материала, превышает 10^5 раз $\pm 10^4$ раз, что примерно на $60\% \pm 5\%$ выше, чем у неоптимизированных 6×10^4 раз $\pm 10^4$ раз. При горячейковке автомобильных деталей оптимизация стойкости к окислению формы продлевает срок службы примерно на $50\% \pm 5\%$, снижая частоту замены

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и время простоя производства.

(3) Компоненты газовой турбины из цементированного карбида

Компоненты газовой турбины (такие как лопатки и облицовка камеры сгорания) должны работать в течение длительного времени в условиях высокотемпературного окисления $950^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, что предъявляет чрезвычайно высокие требования к стойкости материала к окислению и структурной целостности. Оптимизированный цементированный карбид WC-10Co (с добавлением Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) имеет прирост массы всего $0,25 \text{ мг/см}^2$ после окисления при $950^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ в течение 100 часов. $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, длина трещины оксидного слоя $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, что намного ниже, чем у неоптимизированного WC-12Co (прирост веса $0,45 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, длина трещины $0,2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Слой Cr_2O_3 (содержание Cr около $5\% \pm 0,5\%$) и мелкие зерна ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) работают вместе, чтобы подавить образование WO_3 и Co_3O_4 , сохраняя прочность ($> 2000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и стабильность материала. В практических применениях срок службы деталей газовых турбин, изготовленных из этого материала, превышает 10^4 часов $\pm 10^3$ часов, что соответствует требованиям длительной эксплуатации энергетического оборудования (например, промышленных газовых турбин), что лучше неоптимизированных 6×10^3 часов $\pm 10^3$ часов. На электростанциях оптимизированная стойкость деталей к окислению снижает скорость горячей коррозии примерно на $45\% \pm 5\%$, повышает эффективность работы оборудования и снижает затраты на техническое обслуживание.

(4) Инженерная ценность оптимизации антиоксидантных свойств

из твердого сплава в условиях высоких температур. За счет добавления Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), контроля микроструктуры (зерно $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, Co $8\%-10\% \pm 1\%$), обработки поверхности ($R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и улучшения процесса спекания ($1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$) прирост массы твердого сплава увеличился с $0,4-0,5 \text{ мг/см}^2$ до $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ до $0,2-0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, толщина оксидного слоя уменьшилась на $40\%-50\% \pm 5\%$, а твердость сохранилась на уровне $> \text{HV } 1200 \pm 30$. Это улучшение производительности не только продлевает срок службы (например, авиационные инструменты > 5000 часов ± 500 часов, высокотемпературные формы $> 10^5$ раз $\pm 10^4$ раз, компоненты газовых турбин $> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов), но и снижает частоту технического обслуживания и затраты на замену. Например, годовые затраты на техническое обслуживание авиационных инструментов снижаются примерно на $35\% \pm 5\%$, цикл замены высокотемпературных форм продлевается на $50\% \pm 5\%$, а эффективность работы компонентов газовых турбин повышается примерно на $20\% \pm 3\%$, что отражает оптимизированные экономические выгоды.

(5) Адаптация к окружающей среде и расширение сферы применения

Оптимизированный цементированный карбид обладает высокой адаптивностью к окружающей среде, что позволяет ему справляться с более сложными условиями термического окисления. Например, в высокотемпературной среде, содержащей водяной пар (влажность $> 50\% \pm 5\%$, $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), слой Cr_2O_3 все еще может контролировать прирост массы до $0,35 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, что подходит для горячих и влажных сред

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

аэрокосмических двигателей. В атмосфере серы (SO_2) оптимизированные антисульфурационные характеристики образца увеличивают его прирост массы всего примерно на $10\% \pm 2\%$, что соответствует эксплуатационным требованиям серосодержащего энергетического оборудования. Кроме того, в экстремальных условиях более высоких температур ($1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) в сочетании с многослойными покрытиями (такими как $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, толщиной $5-10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) можно дополнительно снизить прирост веса до $0,25 \text{ мг} / \text{см}^2 \pm 0,05 \text{ мг} / \text{см}^2$, что расширяет его потенциал для применения в аэрокосмических двигателях следующего поколения и промышленных печах.

(6) Комплексные случаи и перспективы на будущее

в качестве примера WC-10Co ($\text{Cr} \text{ } 3\text{C} 0,5 \% \pm 0,01 \%$, $\text{Ra} < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), то после окисления при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 100 часов прирост массы составляет $0,3 \text{ мг} / \text{см}^2 \pm 0,05 \text{ мг} / \text{см}^2$, толщина $\text{WO}_3 < 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$; твердость $> \text{HV } 1300 \pm 30$ при $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, циклы обслуживания $> 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$; трещина оксидного слоя $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ при $950^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, срок службы $> 10^4 \text{ часов} \pm 10^3 \text{ часов}$. Эти данные показывают, что оптимизированный цементированный карбид демонстрирует отличную стойкость к окислению и долговременную стабильность в авиационных инструментах, высокотемпературных формах и компонентах газовых турбин, при этом срок службы увеличивается на $67\% \pm 5\%$, $60\% \pm 5\%$ и $67\% \pm 5\%$ соответственно. В будущем стойкость материала к окислению в условиях сверхвысоких температур ($> 1100^\circ\text{C}$) может быть дополнительно улучшена за счет введения новых добавок (таких как TaC, VC) или разработки функциональных градиентных покрытий для удовлетворения потребностей следующего поколения аэрокосмического и энергетического оборудования.

(7) Динамические характеристики и экономические преимущества

Динамические испытания на окисление показывают, что увеличение веса оптимизированного цементированного карбида при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ следует параболическому шаблону с течением времени ($\Delta W^2 = k_{\text{pt}}$), с начальной скоростью увеличения веса около $0,1 \text{ мг} / \text{см}^2 / \text{ч} \pm 0,01 \text{ мг} / \text{см}^2 / \text{ч}$ ($< 10 \text{ ч}$), которая затем замедляется до $< 0,01 \text{ мг} / \text{см}^2 / \text{ч} \pm 0,001 \text{ мг} / \text{см}^2 / \text{ч}$ из-за утолщения слоя Cr_2O_3 . После 1000 часов длительного воздействия увеличение веса по-прежнему контролируется на уровне $0,4 \text{ мг} / \text{см}^2 \pm 0,05 \text{ мг} / \text{см}^2$, подтверждая его стабильность в динамической среде термического окисления. Это улучшение производительности не только продлевает срок службы оборудования, но и значительно снижает эксплуатационные расходы. Например, годовые затраты на техническое обслуживание авиационного инструмента сокращаются примерно на $35\% \pm 5\%$, цикл замены высокотемпературных форм увеличивается на $50\% \pm 5\%$, а эффективность работы компонентов газовых турбин повышается примерно на $20\% \pm 3\%$, что отражает экономическую ценность оптимизации.

Оптимизация стойкости к окислению значительно повышает надежность твердого сплава в условиях высоких температур. Оптимизированные составы, такие как WC-10Co и WC-8Co, показали хороший прирост массы ($0,2-0,3 \text{ мг} / \text{см}^2$) в аэрокосмических инструментах,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотемпературных формах и компонентах газовых турбин. $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$), толщина оксидного слоя ($< 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и срок службы ($> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$, $> 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$, $> 10^4 \text{ часов} \pm 10^3 \text{ часов}$) лучше, чем у традиционных материалов. Эти примеры применения полностью доказывают, что оптимизация стойкости к окислению является ключевой стратегией для повышения надежности и экономических преимуществ твердого сплава в высокотемпературных инженерных приложениях.

8.2.2 Термическая усталость и ползучесть твердого сплава

8.2.2.1 Обзор принципов и технологий термической усталости и ползучести твердого сплава

Термическая усталость и ползучесть твердого сплава в условиях высоких температур ($800\text{--}1000^\circ\text{C}$) являются важными ограничивающими факторами для его эксплуатационных характеристик, напрямую влияя на его надежность в таких сложных применениях, как авиационные турбины (срок службы $> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$) и высокотемпературные формы (количество циклов $> 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$). Термическая усталость относится к процессу зарождения и распространения микротрещин, вызванных циклическим термическим напряжением ($> 500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$), вызванным разницей в коэффициенте теплового расширения ($5,2 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ и $13 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ для WC и Co соответственно) во время повторяющихся циклов высокой температуры-низкой температуры ($\Delta T \text{ } 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Длина распространения трещины должна контролироваться на уровне $< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ для обеспечения надежности. **Ползучесть** — это медленная необратимая пластическая деформация материала при высокой температуре ($> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и постоянной нагрузке ($> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$) с течением времени со **скоростью деформации** $< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ для предотвращения разрушения. Термическая усталость в основном вызвана концентрацией термических напряжений на границе WC-Co, в то время как ползучесть усиливается пластической деформацией, вызванной размягчением фазы Co при высокой температуре (твердость падает до $\text{HV } 200 \pm 30$) и скольжением по границам зерен. Для улучшения эксплуатационных характеристик необходимо оптимизировать высокотемпературную стабильность твердого сплава за счет повышения теплопроводности (целевой показатель $> 80 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), повышения прочности границ зерен (целевой показатель $> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$) и улучшения сопротивления ползучести.

8.2.2.2 Механизм термической усталости и ползучести и анализ твердого сплава

Термическая усталость и ползучесть твердого сплава в высокотемпературных средах ($800\text{--}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) являются основными видами отказов в суровых условиях работы, таких как авиация, пресс-формы и энергетическое оборудование. Термическая усталость проявляется как зарождение и распространение трещин, вызванных циклическим термическим напряжением, в то время как ползучесть проявляется как пластическая деформация под действием непрерывной нагрузки при высокой температуре. Глубокое понимание этих двух механизмов отказа имеет решающее значение для оптимизации высокотемпературных характеристик твердого сплава. Начиная с механизмов термической усталости и ползучести,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в сочетании с механикой разрушения, термодинамикой, микроанализом и экспериментальными данными, систематически обсуждаются процесс отказа, влияющие факторы и эффекты оптимизации.

(1) Механизм и анализ термической усталости

Термическая усталость — это вид разрушения твердого сплава, вызванный термическим напряжением ($> 500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) во время циклов высокая-низкая температура ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Термическое напряжение возникает из-за разницы коэффициентов термического расширения между фазами WC и Co ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для WC и $13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для Co). $\sigma = E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T$ Модуль упругости твердого сплава ($E \approx 600 \text{ ГПа} \pm 50 \text{ ГПа}$) и разницы температур ($\Delta T = 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) можно рассчитать по формуле. Термическое напряжение может достигать $500\text{--}600 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$, что значительно превышает прочность связи на границе раздела WC-Co (около $300 \text{ МПа} \pm 30 \text{ МПа}$), что приводит к возникновению трещин на границе раздела.

Рост трещины термической усталости происходит по закону Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Где da/dN — скорость роста трещины (мм/цикл), ΔK — амплитуда коэффициента интенсивности напряжений ($< 20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), C — константа материала ($10^{-10} \pm 10^{-11}$), m — индекс роста трещины ($3,5 \pm 0,1$). Для WC-10Co неоптимизированная скорость роста трещины составляет около $2 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$, в то время как после оптимизации размера зерна до $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ скорость роста трещины падает до $< 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$, снижение составляет около $50\% \pm 5\%$. Мелкие зерна увеличивают плотность границ зерен, препятствуют росту трещин, и трещины отклоняются на границах зерен (угол отклонения $30^\circ \pm 5^\circ$), что удлиняет путь трещины и снижает коэффициент концентрации напряжений (K_t падает с $2,5 \pm 0,1$ до $< 2 \pm 0,1$). Кроме того, содержание Co $10\% \pm 1\%$ вызывает небольшую пластическую деформацию (деформация $0,1\% \pm 0,01\%$) при температуре $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, что частично снимает концентрацию термических напряжений и замедляет возникновение трещин.

Добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) дополнительно улучшает сопротивление термической усталости. Cr_3C_2 образует слой Cr_2O_3 (толщиной $0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$) при высокой температуре, одновременно повышая прочность границ зерен (с $180 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$ до $> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), снижая скорость роста трещин примерно на $40\% \pm 5\%$, с $2 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$ до $1,2 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$. Наблюдения с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) показали, что трещины термической усталости были в основном межзеренными с шириной трещины приблизительно $0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Трещины в неоптимизированных образцах распространялись вдоль интерфейса WC-Co. После добавления Cr_3C_2 отклонение трещины стало более очевидным, а путь трещины удлинился приблизительно на $30\% \pm 5\%$, что указывает на то, что упрочнение границ зерен эффективно подавляло распространение трещины.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Механизм ползучести и анализ

Ползучесть является основным видом разрушения твердого сплава при высокой температуре ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) и длительной нагрузке ($100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$), а скорость его деформации описывается уравнением Нортон:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Где $\dot{\epsilon}$ — установившаяся скорость деформации ползучести (с^{-1}), A — постоянная материала, σ — напряжение ($100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$), n — показатель степени напряжения ($3 \pm 0,1$), Q — энергия активации ($300 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$), R — газовая постоянная ($8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$), а T — абсолютная температура (1273 К). Для WC-10Co неоптимизированная скорость деформации составляет $10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ при $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, что в основном обусловлено размягчением фазы Co и скольжением по границам зерен. Твердость Co падает до $\text{HV } 200 \pm 30$ при температуре $> 800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, что сопровождается проскальзыванием по границам зерен и диффузией вакансий, что приводит к накоплению пластической деформации.

Добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) значительно улучшает сопротивление ползучести. Cr_3C_2 снижает энергию активации Q до $250 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$ и снижает скорость деформации ползучести примерно на $40\% \pm 5\%$, с $10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ до $6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. Cr_3C_2 усиливает противоскользную способность границ зерен за счет упрочнения твердого раствора и закрепления границ зерен (прочность границ зерен увеличивается с $180 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$ до $> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), одновременно снижая высокотемпературное размягчение фазы Co. Анализ SEM показывает, что ширина полосы скольжения фазы Co во время ползучести составляет около $0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$. Полоса скольжения неоптимизированного образца непрерывно распределена вдоль границы зерен. После добавления Cr_3C_2 распределение полосы скольжения становится более дисперсным, а ширина уменьшается до $0,3 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что указывает на то, что Cr_3C_2 эффективно ингибирует проскальзывание границ зерен.

(3) Микроскопический анализ и проверка

Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) дополнительно подтвердила эффект упрочнения Cr_3C_2 . Содержание Cr на границе зерен составляет около $5\% \pm 0,5\%$, что равномерно распределено на интерфейсе WC-Co, образуя богатую Cr область, которая усиливает противоскользкие и противотрещинные возможности интерфейса. Анализ рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) показывает, что характерный пик Cr 3p расположен при $577 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$, подтверждая присутствие Cr_2O_3 , что дополнительно улучшает стойкость границы зерен к окислению при высоких температурах, косвенно поддерживая термическую усталость и сопротивление ползучести. Снимки СЭМ также показывают, что трещины термической усталости неоптимизированных образцов распространяются по прямой линии вдоль границы зерна, в то время как траектория трещины после оптимизации

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

становится более извилистой, а угол отклонения увеличивается с $20^\circ \pm 5^\circ$ до $30^\circ \pm 5^\circ$, что подтверждает усиление барьера границы зерна.

Взяв в качестве примера WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$), в испытании на тепловой удар ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ до $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 500 раз ± 50 раз) длина трещины составляет $0.03 \text{ мм} \pm 0.01 \text{ мм}$, а скорость роста трещины составляет $< 10^{-7} \text{ мм} / \text{цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм} / \text{цикл}$, что на $40\% \pm 5\%$ ниже неоптимизированных $0.05 \text{ мм} \pm 0.01 \text{ мм}$. В испытании на ползучесть ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 100 МПа ± 10 МПа, 100 часов) скорость деформации составляет $6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, по сравнению с 10^{-6} с^{-1} без оптимизации $\pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, снижение на $40\% \pm 5\%$. Эти улучшения позволяют ему преуспеть в инструментах для обработки лопаток авиационных турбин (срок службы > 5000 часов ± 500 часов) и высокотемпературных пресс-формах (срок службы $> 1.5 \times 10^5$ раз $\pm 10^4$ раз).

Механизмы термической усталости и ползучести цементированного карбида в основном представляют собой расширение трещины и скольжение фазы Co соответственно. Расширение трещины термической усталости следует закону Парижа. Мелкие зерна ($0.5 \text{ мкм} \pm 0.01 \text{ мкм}$) и Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) снижают скорость роста трещины на $40\% \pm 5\%$ за счет препятствия границам зерен и упрочнения. Скорость деформации ползучести контролируется уравнением Нортона. Cr_3C_2 снижает энергию активации и скольжение границ зерен, а скорость деформации падает на $40\% \pm 5\%$. Анализы SEM и EDS подтвердили роль упрочнения границ зерен и ингибирования скольжения, что обеспечивает теоретическую поддержку оптимизации высокотемпературных характеристик.

8.2.2.3 Факторы, влияющие на термическую усталость и ползучесть твердого сплава, и их взаимосвязь

На поведение термической усталости и ползучести твердого сплава в условиях высоких температур ($800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) влияет сочетание множества факторов, включая размер зерна, содержание Co, добавление Cr_3C_2 , разницу температур и теплопроводность. Эти факторы совместно определяют скорость роста трещин и скорость деформации ползучести, изменяя распределение термических напряжений, прочность границ зерен, способность материала к пластической деформации и скорость диффузии кислорода. Понимание индивидуальных эффектов этих факторов и их взаимных эффектов связи имеет большое значение для оптимизации высокотемпературных характеристик твердого сплава. Начиная с вышеуказанных ключевых факторов в сочетании с механикой разрушения, термодинамикой и экспериментальными данными, следующий подробный анализ их механизма влияния и направления оптимизации.

(1) Влияние размера зерна

Размер зерна оказывает значительное влияние на свойства термической усталости и ползучести, влияя на плотность границ зерен и путь распространения трещин. Когда размер зерна WC составляет $0.51 \text{ мкм} \pm 0.01 \text{ мкм}$, количество границ зерен увеличивается, длина трещины термической усталости значительно уменьшается ($< 0.05 \text{ мм} \pm 0.01 \text{ мм}$), а скорость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

роста трещины (da/dN) уменьшается с 2×10^{-7} мм/цикл $\pm 10^{-8}$ мм/цикл до $< 10^{-7}$ мм/цикл $\pm 10^{-8}$ мм/цикл, уменьшение составляет около $50\% \pm 5\%$. Мелкие зерна вызывают отклонение трещин на границах зерен (угол отклонения $30^\circ \pm 5^\circ$), удлиняют путь трещины и снижают коэффициент интенсивности напряжений (ΔK с $20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ до $15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). В то же время увеличение плотности границ зерен рассеивает напряжение ползучести, и скорость деформации ползучести ($\dot{\epsilon}$) уменьшается с $1,5 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ до $< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. Однако при $> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ мелкие зерна могут немного увеличить скорость ползучести (около $10\% \pm 2\%$) из-за усиленной диффузии по границам зерен (коэффициент диффузии D увеличивается примерно на $20\% \pm 3\%$), что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации стабильности границ зерен при высокой температуре. Напротив, когда размер зерна увеличивается до $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность границ зерен уменьшается, трещина распространяется по меньшему количеству границ зерен, длина трещины увеличивается примерно на $30\% \pm 5\%$ до $0,065 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а скорость деформации ползучести также увеличивается до $2 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$.

(2) Влияние содержания Со

Содержание Со в связующей фазе напрямую влияет на способность к пластической деформации и высокотемпературную стабильность твердого сплава. Когда содержание Со составляет $10\% \pm 1\%$, Со снимает концентрацию термических напряжений (коэффициент концентрации напряжений $K_t < 2 \pm 0,1$) посредством микропластической деформации (деформация $0,1\% \pm 0,01\%$) во время термической усталости, и скорость роста трещин остается низкой ($< 10^{-7}$ мм/цикл $\pm 10^{-8}$ мм/цикл), а скорость деформации ползучести контролируется на уровне $< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. Однако при увеличении содержания Со до $12\% \pm 1\%$ размягчение Со при $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ усиливается (твердость уменьшается с $\text{HV } 600 \pm 30$ до $\text{HV } 200 \pm 30$), а зернограничное скольжение значительно усиливается, что приводит к увеличению скорости деформации ползучести примерно на $50\% \pm 5\%$ до $1,5 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. В то же время, хотя способность Со к пластической деформации все еще может снимать напряжение при термической усталости, избыточное содержание Со снижает прочность связи интерфейса WC-Co (с $300 \text{ МПа} \pm 30 \text{ МПа}$ до $250 \text{ МПа} \pm 30 \text{ МПа}$), и трещина с большей вероятностью будет распространяться вдоль интерфейса, а длина трещины увеличивается с $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,07 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Оптимизация содержания Со требует баланса между сопротивлением термической усталости и сопротивлением ползучести.

(3) Эффект добавления Cr_3C_2

Добавление Cr_3C_2 является эффективным средством повышения термической усталости и сопротивления ползучести. При содержании Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$ Cr растворяется в фазе Со при высокой температуре и образует слой Cr_2O_3 (толщиной $0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$), что значительно повышает прочность границ зерен (со $180 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$ до $> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), а длина трещины термической усталости уменьшается примерно на $40\% \pm 5\%$, с $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а скорость роста трещины уменьшается с 2×10^{-7} мм/цикл $\pm 10^{-8}$ мм/цикл до $1,2 \times 10^{-7}$ мм/цикл $\pm 10^{-8}$ мм/цикл. Cr_3C_2 также подавляет скольжение фазы Со за счет закрепления границ зерен, и скорость деформации ползучести снижается.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

примерно на $40\% \pm 5\%$, с $10^{-6}\text{с}^{-1} \pm 10^{-7}\text{с}^{-1}$ до $6 \times 10^{-7}\text{с}^{-1} \pm 10^{-7}\text{с}^{-1}$. Однако, когда содержание Cr_3C_2 превышает $1\% \pm 0,01\%$, доля хрупких фаз (таких как η -фаза, композитная фаза WC-Co-Cr) увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$, что приводит к снижению вязкости разрушения (K_{Ic}) примерно на $10\% \pm 2\%$, с $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ до $20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. $\pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ до $10,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Наличие хрупкой фазы облегчает распространение трещин вдоль интерфейса, ослабляя сопротивление термической усталости. Количество добавки необходимо точно контролировать.

(4) Влияние разницы температур

Разница температур термического цикла (ΔT) является основным движущим фактором термической усталости. Когда $\Delta T > 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, термическое напряжение ($\sigma = E \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T$) значительно увеличивается, а длина трещины увеличивается примерно на $50\% \pm 5\%$, с $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,075 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Если взять $\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в качестве примера, то термическое напряжение может достигать $600 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$, а скорость роста трещины увеличивается с $10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$ до $1,5 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$. Напротив, при $\Delta T < 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ термическое напряжение падает до $300 \text{ МПа} \pm 30 \text{ МПа}$, а длина трещины контролируется на уровне $< 0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, что указывает на то, что более низкая разница температур значительно замедляет разрушение от термической усталости. Разница температур мало влияет на ползучесть, но если высокотемпературная стадия ($> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) длится в течение длительного времени (> 5 минут), это усугубит размягчение Co и косвенно увеличит скорость деформации ползучести примерно на $10\% \pm 2\%$.

(5) Влияние теплопроводности

Теплопроводность оказывает важное влияние на характеристики термической усталости, влияя на распределение термического напряжения. Когда теплопроводность $> 80 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, градиент температуры внутри материала уменьшается ($\Delta T / \Delta x$ уменьшается примерно на $30\% \pm 5\%$), термическое напряжение уменьшается с $600 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$ до $450 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$, скорость роста трещины уменьшается примерно на $20\% \pm 5\%$, а длина трещины уменьшается с $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Напротив, когда теплопроводность $< 50 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, градиент температуры увеличивается, концентрация термических напряжений усиливается, а длина трещины увеличивается примерно на $20\% \pm 5\%$, достигая $0,06 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Влияние теплопроводности на ползучесть более косвенное. Высокая теплопроводность помогает сократить продолжительность локальных высокотемпературных областей, уменьшить размягчение фазы Co и проскальзывание границ зерен, а также снизить скорость деформации ползучести примерно на $10\% \pm 2\%$.

(6) Анализ эффекта связи

Вышеуказанные факторы совместно влияют на свойства термической усталости и ползучести посредством сложных эффектов сопряжения. Например, когда большая разница температур ($\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) сочетается с высоким содержанием Co ($12\% \pm 1\%$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термическое напряжение и размягчение Co работают вместе, длина трещины достигает $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а скорость деформации ползучести увеличивается до $2 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, что намного превышает влияние одного фактора. При совместном использовании мелких зерен ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) накладываются эффекты помех на границах зерен и упрочнения, длина трещины уменьшается до $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а скорость деформации ползучести уменьшается до $6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, что значительно улучшает эксплуатационные характеристики. При сочетании низкой теплопроводности ($< 50 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) с крупными зернами ($> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) термические напряжения и пути распространения трещин централизуются, а длина трещин увеличивается до $0,08 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, что указывает на необходимость одновременной оптимизации теплопроводности и размера зерна.

(7) Комплексный анализ случая

Если взять в качестве примера WC-12Co и WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$), то в испытании на тепловой удар (ΔT $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ до $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 500 раз ± 50 раз) длина трещины WC-12Co достигла $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а скорость роста трещины составила $2 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$, в то время как у WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) она составила всего $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а скорость роста трещины снизилась до $1,2 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$, сопротивление термической усталости улучшается примерно на $70\% \pm 5\%$. В испытании на ползучесть ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, 100 часов) скорость деформации WC-12Co составляет $1,5 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, в то время как оптимизированный образец уменьшается до $6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, а сопротивление ползучести улучшается примерно на $60\% \pm 5\%$. Теплопроводность оптимизированного образца составляет $85 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, а размер зерна составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Добавление Cr_3C_2 значительно улучшает характеристики.

(8) Значимость применения и направление оптимизации

Анализ эффекта сопряжения термической усталости и ползучести показывает, что оптимизация должна всесторонне учитывать размер зерна, содержание Co, добавление Cr_3C_2 , разницу температур и теплопроводность. Мелкие зерна и соответствующее количество Cr_3C_2 являются ключом к улучшению термической усталости и сопротивления ползучести, в то время как высокая теплопроводность и низкое содержание Co помогают дополнительно улучшить производительность. Оптимизированный цементированный карбид хорошо работает в авиационных турбинных инструментах (срок службы > 5000 часов ± 500 часов) и высокотемпературных формах (срок службы $> 1,5 \times 10^5$ раз $\pm 10^4$ раз), а длина трещины и скорость деформации ползучести соответствуют требованиям суровых условий работы.

Возникновение термической усталости и ползучести зависит от сочетания размера зерна, содержания Co, добавления Cr_3C_2 , разницы температур и теплопроводности. Мелкие зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), соответствующее количество Co ($10\% \pm 1\%$), Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), низкая ΔT ($< 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и высокая теплопроводность ($> 80 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) — все это помогает снизить скорость роста трещин и скорость деформации ползучести.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Комплексные случаи показывают, что после оптимизации длина трещины уменьшается на $70\% \pm 5\%$, а скорость деформации уменьшается на $60\% \pm 5\%$, что дает научное руководство для высокотемпературных применений.

8.2.2.4 Стратегии оптимизации термической усталости и ползучести для твердого сплава

$10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ цементированного карбида в высокотемпературной среде ($800-1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), необходимо систематически улучшать его термическую усталость и сопротивление ползучести за счет комплексной оптимизации микроструктуры, добавок, процесса спекания и обработки поверхности. Эти меры оптимизации направлены на повышение прочности границ зерен, улучшение теплопроводности, снижение пористости и поверхностных дефектов, а также проверку эффекта улучшения производительности посредством научных испытаний. Начиная с вышеуказанных ключевых аспектов, в сочетании с механикой разрушения, термодинамическими данными и инженерными случаями, ниже подробно описывается стратегия оптимизации и ее роль в контроле термической усталости и поведения ползучести.

(1) Оптимизация микроструктуры

Контроль микроструктуры является основой для улучшения термической усталости и сопротивления ползучести. Рекомендуемый размер зерна WC составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а содержание Co контролируется на уровне $8\% - 10\% \pm 1\%$. Мелкие зерна эффективно препятствуют распространению трещин термической усталости за счет увеличения плотности границ зерен (площадь границ зерен $> 10^4 \text{ мм}^2 / \text{см}^3 \pm 10^3 \text{ мм}^2 / \text{см}^3$), угол отклонения трещины достигает $30^\circ \pm 5^\circ$, путь трещины удлиняется, а скорость роста трещины (da/dN) снижается с $2 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$ до $< 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$. Низкое содержание Co ($8\% - 10\% \pm 1\%$) снижает высокотемпературное размягчение (твердость падает с $\text{HV } 600 \pm 30$ до $\text{HV } 250 \pm 30$), препятствует скольжению по границам зерен и снижает скорость деформации ползучести с $1,5 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ до $< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. В то же время оптимизированная микроструктура улучшает теплопроводность (цель $> 80 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) с $70 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ до $85 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, снижает концентрацию термических напряжений (с $600 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$ до $450 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и дополнительно уменьшает длину трещин термической усталости.

(2) Аддитивная оптимизация

Добавление карбида хрома (Cr_3C_2) является ключевым средством для повышения термической усталости и сопротивления ползучести. Рекомендуемое количество добавки составляет $0,5\% \pm 0,01\%$. Cr_3C_2 растворяется в фазе Co при высокой температуре и образует слой Cr_2O_3 (толщиной $0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$), что значительно увеличивает прочность границ зерен (с $180 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$ до $> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$). Повышенная прочность границ зерен подавила распространение трещин термической усталости за счет эффекта закрепления, и длина трещины сократилась примерно на $40\% \pm 5\%$ с $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

а скорость роста трещины сократилась с 2×10^{-7} мм/цикл $\pm 10^{-8}$ мм/цикл до $1,2 \times 10^{-7}$ мм/цикл $\pm 10^{-8}$ мм/цикл. Ст₃ С₂ также снижает энергию активации ползучести (с 300 кДж/моль ± 10 кДж/моль до 250 кДж/моль ± 10 кДж/моль) и снижает скорость деформации ползучести примерно на $40\% \pm 5\%$, с $10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ до $6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, ингибируя скольжение фазы Со и диффузию по границам зерен. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) показывает, что содержание Ст на границе зерен составляет около $5\% \pm 0,5\%$, подтверждая его упрочняющий эффект.

(3) Оптимизация процесса спекания

Оптимизация процесса спекания напрямую влияет на компактность и сопротивление ползучести твердого сплава. Рекомендуемая температура спекания составляет $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, а вакуум или инертная атмосфера (например, Ar) используются для снижения окисления, гарантируя, что плотность материала достигает $99,5\% \pm 0,1\%$, а пористость контролируется ниже $0,1\% \pm 0,02\%$. Высокоплотная структура уменьшает внутренние поры и микротрещины, ограничивает концентрацию термических напряжений и пути диффузии кислорода, а также уменьшает длину трещин термической усталости с $0,06 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Низкая пористость ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) также повышает прочность связи границ зерен ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), уменьшая возникновение проскальзывания границ зерен во время ползучести и снижая скорость деформации с $1,2 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ до $< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. Точный контроль температуры спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) обеспечивает равномерное распределение Со (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), избегая преимущественного разрушения в локальных областях размягчения.

(4) Оптимизация обработки поверхности

Оптимизация состояния поверхности является важным средством для уменьшения трещин термической усталости и повышения сопротивления ползучести. Рекомендуется контролировать шероховатость поверхности (Ra) ниже $0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ путем прецизионной механической полировки. Этот процесс может снизить частоту возникновения трещин термической усталости примерно на $20\% \pm 5\%$, а длину трещины с $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Низкая шероховатость уменьшает дефекты поверхности (такие как микроцарапины и ямки), ограничивает концентрацию термических напряжений и точки зарождения трещин, а также уменьшает вторичные трещины, вызванные отколом оксидного слоя. После полировки можно использовать ультразвуковую очистку ($40 \text{ кГц} \pm 1 \text{ кГц}$) для удаления поверхностных загрязнений ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), дальнейшего улучшения целостности поверхности и уменьшения образования полос скольжения поверхности во время ползучести (ширина от $0,6 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ до $0,4 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$).

(5) Технические условия испытаний

Для точной оценки эффекта оптимизации свойств термической усталости и ползучести рекомендуется использовать стандарт ASTM E1876 для испытаний на термоудары, моделирующий термические циклы от $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ до $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, с числом циклов $> 500 \pm 50$ раз, а длину трещины измерять с помощью оптической микроскопии (увеличение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

200×) и СЭМ (разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) с целевым значением $< 0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Испытание на ползучесть проводится при температуре $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ и постоянном напряжении $100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$ с использованием высокотемпературного тестера на ползучесть (точность измерения деформации $\pm 0,001\%$) и регистрацией установившейся скорости деформации с целью $< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. После испытания образование слоя Cr_2O_3 (пик Cr 3p 577 эВ $\pm 0,1 \text{ эВ}$) может быть проанализировано с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) для проверки эффекта упрочнения границ зерен. Эти характеристики гарантируют научность и повторяемость оценки производительности.

(6) Комплексный анализ случая

Если взять в качестве примера образец WC-10Co ($\text{Cr} \text{ } \text{C} \text{ } 2 \text{ } 0,5\% \pm 0,01\%$), то в испытании на тепловой удар ASTM E1876 ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ до $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 500 раз ± 50 раз) длина трещины составила всего $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а скорость роста трещины составила $< 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$, что на $40\% \pm 5\%$ ниже неоптимизированного значения $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. В испытании на ползучесть ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, 100 часов) скорость деформации составила $6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, что ниже неоптимизированного значения $10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, а сопротивление ползучести улучшилось примерно на $40\% \pm 5\%$. Наблюдение с помощью СЭМ показало, что угол отклонения трещины оптимизированного образца составил $30^\circ \pm 5^\circ$, а ширина полосы скольжения составила $0,3 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что указывает на синергетический эффект микроструктуры и упрочнения границ зерен. Такая производительность соответствует требованиям к инструментам для обработки лопаток авиационных турбин (срок службы $> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$) и высокотемпературным формам (срок службы $> 1,5 \times 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$).

(7) Динамические характеристики и значимость применения

Динамические испытания показывают, что рост трещины термической усталости стабилизируется после 500 ± 50 циклов, а длина трещины медленно увеличивается с $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,035 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, что указывает на то, что оптимизированный материал имеет хорошую циклическую стабильность. Деформация ползучести выходит на стадию стационарного состояния через 100 часов, а скорость деформации остается $< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, подтверждая его долгосрочную нагрузочную способность. Оптимизированный твердый сплав хорошо себя зарекомендовал в авиационных инструментах (температура резания $900\text{--}1000^\circ\text{C}$, срок службы $> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$), высокотемпературных формах (температура формования $800\text{--}900^\circ\text{C}$, циклы $> 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и компонентах газовых турбин (рабочая температура $950^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, срок службы $> 10^4 \text{ часов} \pm 10^3 \text{ часов}$), при этом срок службы увеличивается на $50\text{--}70\% \pm 5\%$, а годовые расходы на техническое обслуживание сокращаются примерно на $35\% \pm 5\%$.

(8) Экологическая адаптивность и перспективы на будущее

Стратегия оптимизации по-прежнему эффективна при высокой разнице температур (ΔT $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и в среде водяного пара (влажность $> 50\% \pm 5\%$), при этом длина трещины и скорость деформации поддерживаются на уровне $< 0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и $< 8 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

s^{-1} соответственно, что подходит для влажных и жарких условий (например, для двигателей тропической авиации). При более высоких температурах ($> 1100^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$) или в атмосфере серы (SO_2) многослойные покрытия (например, Al_2O_3 / TiN , толщина $5-10 \mu m \pm 0,1 \mu m$) или новые добавки (например, TaC) могут быть объединены для дальнейшего улучшения теплопроводности и прочности границ зерен, чтобы удовлетворить потребности высокотемпературных устройств следующего поколения.

Оптимизация термической усталости и ползучести твердого сплава должна быть достигнута за счет контроля микроструктуры (зерно WC $0,51 \mu m \pm 0,01 \mu m$, Co $8\% -10\% \pm 1\%$, теплопроводность $> 80 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), добавления Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$, прочность границ зерен $> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), процесса спекания ($1450^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$, плотность $\geq 99,5\% \pm 0,1\%$) и обработки поверхности ($Ra < 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$, уменьшение трещин $20\% \pm 5\%$). После оптимизации длина трещины уменьшается до $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а скорость деформации составляет $< 10^{-6} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$, что соответствует высокотемпературным требованиям авиации и пресс-форм.

8.2.2.5 Инженерное применение термической усталости и оптимизации характеристик ползучести твердого сплава

Оптимизированный цементированный карбид демонстрирует превосходные характеристики термической усталости и ползучести в высокотемпературных циклических средах ($800-1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$). Благодаря регулированию микроструктуры, оптимизации добавок, улучшению процесса спекания и обработке поверхности его надежность инженерного применения в области авиации, производства пресс-форм и энергетического оборудования была значительно улучшена. Эти меры оптимизации снижают скорость роста трещин, подавляют скорость деформации ползучести и продлевают срок службы, обеспечивая эффективное и долговечное решение для высокотемпературных условий. Ниже приводится подробное обсуждение инженерного применения и преимуществ производительности оптимизированного цементированного карбида из трех основных областей применения авиационных турбинных лопаток, высокотемпературных пресс-форм и сопел газовых турбин в сочетании с экспериментальными данными, микроскопическим анализом и фактическими случаями.

(1) Авиационные турбинные лопатки из цементированного карбида

Лопатки авиационных турбин подвергаются повторяющимся термическим нагрузкам (например, от $1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ до $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$) и нагрузкам резания в высокотемпературных циклах ($\Delta T 500^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$), что предъявляет чрезвычайно высокие требования к стойкости к термической усталости и сроку службы. Оптимизированный карбид вольфрама WC-10Co (добавка Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$, размер зерна $0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$) имеет длину трещины термической усталости всего $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и скорость роста трещины $< 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$ в испытании на тепловой удар ASTM E1876 ($\Delta T 500^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$, 500 раз ± 50 раз), что лучше, чем неоптимизированный $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ (скорость роста $2 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10^{-8} мм/цикл). Мелкие зерна препятствуют отклонению трещины (угол отклонения $30^\circ \pm 5^\circ$) за счет увеличения плотности границ зерен ($> 10^4 \text{ мм}^2/\text{см}^3 \pm 10^3 \text{ мм}^2/\text{см}^3$), а слой Cr_2O_3 (толщина $0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$) повышает прочность границ зерен ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), эффективно снижая концентрацию термических напряжений (с $600 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$ до $450 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$). В практических применениях срок службы лопаток турбин из этого материала превышает $5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$, что примерно на $67\% \pm 5\%$ выше неоптимизированных $3000 \text{ часов} \pm 300 \text{ часов}$. В авиационных двигателях оптимизация сопротивления термической усталости лопаток снижает частоту отказов, вызванных термическими трещинами, примерно на $40\% \pm 5\%$, повышая безопасность полетов.

(2) Твердый сплав, высокотемпературная форма

Высокотемпературные формы (например, формы для горячейковки и литья под давлением) должны выдерживать повторяющиеся термические циклы и непрерывные нагрузки в рабочих условиях $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ и иметь чрезвычайно высокие требования к сопротивлению ползучести и сроку службы. В испытании на ползучесть оптимизированного цементированного карбида WC-8Co (теплопроводность $> 80 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ и $100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$ скорость деформации контролируется на уровне $< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, что ниже неоптимизированного значения $1,5 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. Высокая теплопроводность (увеличилась с $70 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ до $85 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) снижает температурный градиент ($\Delta T/\Delta x$ уменьшается примерно на $30\% \pm 5\%$), термическое напряжение уменьшается с $550 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$ до $400 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$ и снижает накопление деформации ползучести. Низкое содержание Co ($8\% \pm 1\%$) и оптимизированное спекание (плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$) дополнительно подавляют размягчение Co (твердость остается $> \text{HV } 1300 \pm 30$), а ширина полосы скольжения уменьшается с $0,6 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ до $0,3 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$. В практических применениях цикл службы высокотемпературных пресс-форм из этого материала превышает 10^5 раз $\pm 10^4$ раз, что примерно на $50\% \pm 5\%$ выше неоптимизированных 6×10^4 раз $\pm 10^4$ раз. При горячейковке автомобильных деталей оптимизация сопротивления ползучести штампов продлевает срок службы примерно на $50\% \pm 5\%$, снижая частоту замены и простои производства.

(3) Твердосплавное сопло газовой турбины

Сопла газовых турбин подвержены термической усталости и длительным нагрузкам в высокотемпературной окислительной среде при температуре $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, что предъявляет чрезвычайно высокие требования к контролю за ростом трещин и сроку службы. В испытании на тепловой удар при температуре $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (ΔT $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 500 раз ± 50 раз) оптимизированный цементированный карбид WC - 10Co (с добавлением Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) имеет длину трещины термической усталости $< 0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и скорость роста трещины $< 1,5 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$, что лучше, чем неоптимизированный $0,06 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ (скорость роста $2,5 \times 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$). Слой Cr_2O_3 (содержание Cr около $5\% \pm 0,5\%$) и мелкие зерна ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) работают вместе, повышая прочность границ зерен ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$) и подавляя концентрацию термических напряжений (с $500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$ до $350 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$). В испытании на ползучесть ($900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 100

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

МПа ± 10 МПа, 100 часов) скорость деформации составляет $< 8 \times 10^{-7} \text{ c}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ c}^{-1}$, что ниже неоптимизированного $1,2 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ c}^{-1}$. В практических применениях срок службы сопел из этого материала превышает 10^4 часов $\pm 10^3$ часов, что соответствует требованиям длительной эксплуатации энергетического оборудования (например, промышленных газовых турбин), что лучше неоптимизированного 6×10^3 часов $\pm 10^3$ часов. На электростанциях оптимизированная термическая усталостная прочность сопел снижает частоту отказов, вызванных термическими трещинами, примерно на $45\% \pm 5\%$, повышая эффективность работы оборудования.

(4) Инженерная ценность оптимизации производительности

Приведенные выше примеры показывают, что оптимизация свойств термической усталости и ползучести значительно повышает надежность твердого сплава в условиях высокотемпературных циклов. Благодаря оптимизации микроструктуры (зерно WC $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, Co $8\%-10\% \pm 1\%$, теплопроводность $> 80 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), добавлению Cr₃C₂ ($0,5\% \pm 0,01\%$, прочность границ зерен $> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), процессу спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$) и обработке поверхности ($Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) длина трещины термической усталости твердого сплава уменьшилась с $0,05\text{-}0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,03\text{-}0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а скорость деформации ползучести уменьшилась с $1,2\text{-}1,5 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ до $< 10^{-6} \text{ c}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ c}^{-1}$. Это улучшение производительности продлевает срок службы (например, лопаток авиационных турбин > 5000 часов ± 500 часов, высокотемпературных форм $> 10^5$ раз $\pm 10^4$ раз, сопел газовых турбин $> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов) на $50\%\text{-}67\% \pm 5\%$ и снижает затраты на техническое обслуживание. Например, годовые затраты на техническое обслуживание лопаток авиационных турбин сокращаются примерно на $35\% \pm 5\%$, цикл замены высокотемпературных форм увеличивается на $50\% \pm 5\%$, а эффективность работы сопел газовых турбин повышается примерно на $20\% \pm 3\%$.

(5) Адаптация к окружающей среде и расширение сферы применения

Оптимизированный цементированный карбид обладает высокой адаптивностью к окружающей среде, что позволяет ему справляться с более сложными условиями термического цикла. Например, в высокотемпературной среде, содержащей водяной пар (влажность $> 50\% \pm 5\%$, ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), слой Cr₂O₃ по-прежнему контролирует длину трещины до $< 0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и скорость деформации до $< 10^{-6} \text{ c}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ c}^{-1}$, что подходит для влажных и горячих сред авиационных двигателей. В атмосфере, содержащей серу (SO₂), или при более высокой разнице температур (ΔT $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) длина трещины термической усталости оптимизированного образца увеличивается до $0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, но может быть дополнительно уменьшена до $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ за счет многослойных покрытий (например, Al₂O₃ / TiN, толщина $5\text{-}10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), что расширяет потенциал его применения в серосодержащих энергетических устройствах и экстремальных тепловых циклах. Кроме того, в условиях сверхвысокой температуры $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в сочетании с новыми добавками (такими как TaC) скорость деформации можно контролировать до $8 \times 10^{-7} \text{ c}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ c}^{-1}$, что соответствует потребностям аэрокосмической отрасли следующего поколения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Комплексные случаи и перспективы на будущее

Взяв в качестве примера WC-10Co ($\text{Cr} \pm 0,5\% \pm 0,01\%$, теплопроводность $> 80 \text{ Вт/ м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/ м} \cdot \text{К}$), после 500 ± 50 термоударов при $\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ длина трещины составляет $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$; после 100 часов ползучести при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ и $100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$ скорость деформации составляет $6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$; в испытании на термическую усталость при $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ длина трещины составляет $< 0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Эти данные показывают, что оптимизированный цементированный карбид демонстрирует превосходную термическую усталость и сопротивление ползучести в лопатках авиационных турбин, высокотемпературных формах и соплах газовых турбин, при этом срок службы увеличивается на $67\% \pm 5\%$, $50\% \pm 5\%$ и $67\% \pm 5\%$ соответственно. В будущем эксплуатационные характеристики оптимизированного цементированного карбида в условиях сверхвысокой температуры ($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) или большого числа циклов ($> 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз) могут быть дополнительно улучшены путем разработки функциональных градиентных материалов или введения нанопокровов (таких как ZrO_2 , толщина $5\text{-}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) для удовлетворения более высоких требований инженерных задач.

(7) Динамические характеристики и экономические преимущества

Динамические испытания показывают, что распространение трещины термической усталости стабилизируется после 500 ± 50 раз, а длина трещины увеличивается с $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,035 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, что указывает на хорошую циклическую прочность оптимизированного материала. Деформация ползучести выходит на стационарную стадию после 100 часов, а скорость деформации остается $< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, подтверждая его долгосрочную нагрузочную способность. Это улучшение производительности не только продлевает срок службы оборудования, но и значительно снижает эксплуатационные расходы. Например, годовые затраты на техническое обслуживание лопаток авиационных турбин сокращаются примерно на $35\% \pm 5\%$, цикл замены высокотемпературных форм увеличивается на $50\% \pm 5\%$, а эффективность работы сопел газовых турбин увеличивается примерно на $20\% \pm 3\%$, что отражает экономическую ценность оптимизации.

Оптимизированный цементированный карбид хорошо работает в высокотемпературных циклических средах. Составы WC-10Co и WC-8Co имеют лучшую длину трещины термической усталости ($0,03\text{-}0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), скорость деформации ползучести ($< 10^{-6} \text{ с}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ с}^{-1}$) и срок службы ($> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$, $> 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$, $> 10^4 \text{ часов} \pm 10^3 \text{ часов}$), чем традиционные материалы в лопатках авиационных турбин, высокотемпературных формах и соплах газовых турбин. Эти примеры применения полностью доказывают, что оптимизация свойств термической усталости и ползучести является ключевой стратегией для повышения надежности и экономических преимуществ цементированного карбида в высокотемпературных инженерных приложениях.

8.3 Методы оптимизации коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Коррозионная стойкость (потеря веса $< 0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) и высокая термостойкость (твердость $> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) являются ключевыми для улучшения применения твердого сплава в кислых, соляных и высокотемпературных средах (например, в авиационном и энергетическом оборудовании). Эти улучшения производительности могут быть достигнуты с помощью различных научных методов, включая (1) замену фазы связующего, (2) введение добавок, (3) технологию покрытия поверхности и (4) оптимизацию параметров процесса и (5) регулирование микроструктуры, которые работают вместе для удовлетворения потребностей сложных условий работы. Традиционная фаза связующего Co склонна к размягчению (твердость падает до $\text{HV } 200 \pm 30$) и окислению (образование Co_3O_4) при высоких температурах, что приводит к коррозии и ухудшению производительности. Метод оптимизации заменяет Co на связующую фазу на основе Ni ($\text{Ni } 8\%-12\% \pm 1\%$), которая образует пассивирующий слой NiO (толщина $\sim 10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), значительно снижая ток коррозии ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$), повышая коррозионную стойкость. Добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) ингибирует окисление, образуя плотный слой Cr_2O_3 (толщина $\sim 0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$), а увеличение веса контролируется до $< 0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$. Поверхностные покрытия (такие как TiN, Al_2O_3 , толщина $5\text{-}20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) изолируются от кислорода и агрессивных сред с помощью технологии физического осаждения из паровой фазы (PVD) или химического осаждения из паровой фазы (CVD), что дополнительно повышает стойкость к окислению и износостойкость. Эти методы оптимизации не только улучшают коррозионную стойкость и высокотемпературную стабильность твердого сплава, но и значительно продлевают срок его службы в высокотемпературных циклах и агрессивных средах.

связующей фазы на основе Ni, антиоксидантного эффекта добавки Cr_3C_2 , защиты поверхностного покрытия и скоординированной оптимизации процесса и микроструктуры. Объединяя параметры процесса (спекание $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, PVD $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), микроскопический анализ (XPS, SEM) и инженерные случаи, систематически обсуждаются путь оптимизации и механизм улучшения его производительности. Например, WC-10Ni теряет всего $0,05 \text{ мг/см}^2$ в среде солевого тумана $5\% \text{ NaCl}$. $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, коррозионная стойкость улучшается примерно на $60\% \pm 5\%$ по сравнению с традиционным WC-10Co; Твердость инструмента с добавлением Cr_3C_2 и покрытием TiN сохраняется на уровне $> \text{HV } 1500 \pm 30$ при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, а стойкость резания превышает $5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$, что значительно лучше неоптимизированных $3000 \text{ часов} \pm 300 \text{ часов}$.

8.3.1 Преимущества коррозионной стойкости связующей фазы на основе Ni в твердом сплаве

8.3.1.1 Принципиальный и технический обзор преимуществ коррозионной стойкости связующей фазы из никелевого цементированного карбида

Связующая фаза на основе Ni (содержание Ni $8\% -12\% \pm 1\%$) обладает превосходной электрохимической стабильностью и коррозионной стойкостью, что значительно повышает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионную стойкость твердого сплава в суровых средах, таких как кислая ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), соляной туман ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) и морская среда, и имеет очевидные преимущества по сравнению с традиционной связующей фазой на основе Co. Коррозионный потенциал Ni ($E_{\text{corr}} \sim -0,1 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$ против SCE) выше, чем у Co ($E_{\text{corr}} \sim -0,3 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$ против SCE), а плотность коррозионного тока (i_{corr}) значительно снижена до $< 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, что лучше, чем у Co-основы $10^{-5} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-6} \text{ А/см}^2$. Эта разница в производительности обусловлена образованием плотного пассивирующего слоя NiO (толщина $\sim 10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, плотность $\sim 6,7 \text{ г/см}^3$) в агрессивной среде. $\pm 0,1 \text{ г/см}^3$), этот слой эффективно изолирует коррозионные среды (такие как Cl^- , H^+) за счет химической инертности и блокирует электрохимические реакции (формула реакции: $\text{Ni} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NiO}$, $\Delta G < 0 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$). Напротив, связующая фаза на основе Co легко генерирует свободный Co_2O_3 (плотность $\sim 6,1 \text{ г/см}^3$, толщина $> 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) в аналогичных условиях, а его низкая защита приводит к увеличению скорости коррозии примерно в 10 раз. Сохраняя высокую твердость ($\text{HV } 1800 \pm 30$) и прочность ($K_{\text{IC}} 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), карбид WC на основе Ni имеет улучшенную коррозионную стойкость примерно на $60\% \pm 5\%$, что делает его особенно подходящим для областей, требующих высокой коррозионной стойкости и механических свойств, таких как компоненты морского бурения, химические трубопроводы и оборудование для производства бумаги. Кроме того, Ni имеет более высокую температуру плавления ($1455^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), чем Co ($1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), а его степень размягчения ниже при высокой температуре $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (снижение твердости $< 10\% \pm 2\%$), что дополнительно подтверждает его потенциал для применения в высокотемпературных коррозионных средах.

8.3.1.2 Анализ механизма коррозионной стойкости связующей фазы на основе Ni в твердом сплаве

Преимущество коррозионной стойкости связующей фазы на основе Ni обусловлено ее уникальными электрохимическими и физическими свойствами. В кислых средах (например, $0,1 \text{ МН}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$) Ni образует слой NiO посредством механизма самопассивации. Этот слой имеет низкую растворимость ($K_{\text{sp}} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$) и высокую проводимость ($\sigma \sim 10^{-4} \text{ См/см} \pm 10^{-5} \text{ См/см}$), что эффективно подавляет диффузию H^+ и Cl^- , а ток коррозии снижается с $10^{-5} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-6} \text{ А/см}^2$ на основе Co до $< 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$. Анализ рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) показывает, что пик Ni 2p (около $854 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) указывает на присутствие NiO, а его энергия связи соответствует пику O 1s ($530 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), подтверждая химический состав пассивирующего слоя. В среде солевого тумана ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$, ISO 9227 NSS 2000 ч ± 100 ч) толщина слоя NiO стабильна и составляет $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, а скорость потери веса составляет всего $0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ по сравнению с $0,12 \text{ мг/см}^2$ для Co-based $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что составляет снижение примерно на $58\% \pm 5\%$. Кроме того, коэффициент термического расширения связующей фазы на основе Ni ($13 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) лучше соответствует WC ($5,2 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), чем у Co ($13 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), что уменьшает микротрещины, вызванные термоциклированием ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), и косвенно улучшает стабильность коррозионной стойкости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.1.3 Микроскопический анализ и проверка коррозионной стойкости связующей фазы на основе никеля в твердом сплаве

с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) показали, что слой NiO WC на основе Ni был равномерно распределен по поверхности со стабильной толщиной $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, и не наблюдалось явного отслаивания или растрескивания, в то время как поверхность WC на основе Co показала рыхлый слой Co_3O_4 (толщина $> 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), сопровождаемый микротрещинами (ширина $\sim 0,2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Рентгеноструктурный анализ (XRD) подтвердил кристаллическую структуру NiO (гранецентрированная кубическая, $a = 4,17 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$), а ее пиковая интенсивность ($2\theta \approx 37,2^\circ, 43,3^\circ$) указывает на высокую кристалличность, что усиливает защитную способность пассивирующего слоя. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) показывает, что содержание Ni на границе зерен составляет около $8\%-10\% \pm 0,5\%$, что равномерно распределено, подтверждая его хорошую связь интерфейса с WC.

8.3.1.4 Анализ факторов, влияющих на коррозионную стойкость связующей фазы на основе никеля в твердом сплаве

Коррозионная стойкость связующей фазы на основе никеля зависит от многих факторов и требует комплексной оптимизации для достижения наилучших характеристик:

(1) Содержание Ni

При содержании Ni $10\% \pm 1\%$ ток коррозии $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, а скорость потери веса контролируется на уровне $0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, а твердость остается на уровне $\text{HV } 1800 \pm 30$. Однако, когда содержание Ni превышает $12\% \pm 1\%$, увеличение фазы Ni приводит к повышению ударной вязкости (K_{I} с увеличивается на $5\% \pm 1\%$), но твердость уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$ (до $\text{HV } 1620 \pm 30$), а ток коррозии немного увеличивается до $2 \times 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$ из-за усиленное размягчение фазы Ni (твердость $\text{HV } 150 \pm 20$).

(2) Размер зерна

Размер зерна WC составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность границ зерен высокая ($> 10^4 \text{ мм}^2/\text{см}^3 \pm 10^3 \text{ мм}^2/\text{см}^3$), а скорость потери веса низкая ($< 0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$), поскольку мелкие зерна уменьшают путь проникновения агрессивной среды. При увеличении размера зерна до $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ плотность границ зерен уменьшается, а скорость потери веса увеличивается примерно на $20\% \pm 5\%$ (до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$), глубина питтингов увеличивается с $2 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ до $3,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

(3) Температура спекания

При спекании при температуре $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ отклонение распределения Ni составляет $< 0,1\% \pm 0,02\%$, ток коррозии i_{corr} остается $< 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, а скорость потери веса стабильна. При повышении температуры спекания до $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ происходит сегрегация Ni (отклонение $> 0,5\% \pm 0,1\%$), а обогащение Ni на границах зерен приводит к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

увеличению тока коррозии на $15\% \pm 3\%$ (до $1,15 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), а скорость потери веса увеличивается до $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$.

(4) Окружающая среда

В сильноокислой среде с $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ слой NiO частично растворяется, ток коррозии i_{corr} увеличивается примерно на $30\% \pm 5\%$ (до $1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), а скорость потери веса возрастает до $0,065 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. В соляном тумане с концентрацией NaCl $> 5\% \pm 0,1\%$ увеличение концентрации Cl^- вызывает точечную коррозию, а площадь точечной коррозии увеличивается на $20\% \pm 5\%$ (с $0,01 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$ до $0,012 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$), скорость потери веса увеличивается до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$.

(5) Шероховатость поверхности

При шероховатости поверхности $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ дефектов поверхности мало, ток коррозии i_{corr} остается на низком уровне ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), а скорость потери веса составляет $< 0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Если $R_a > 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, увеличиваются микротрещины и язвы, ток коррозии увеличивается на $10\% \pm 2\%$ (до $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), а глубина язв увеличивается до $4 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

Например, образец WC-12Ni имеет сегрегацию Ni (отклонение $0,6\% \pm 0,1\%$) из-за высокой температуры спекания ($1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), а скорость потери веса в среде соляного тумана NaCl $5\% \pm 0,1\%$ составляет $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, а ток коррозии i_{corr} составляет $1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Скорость потери веса оптимизированного WC-10Ni (спекшегося при $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) составляет всего $0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, коррозионная стойкость улучшается примерно на $29\% \pm 5\%$.

8.3.1.5 Оптимизация процесса приготовления связующей фазы на основе Ni

Для достижения потери веса $< 0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и тока коррозии $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Процесс подготовки карбида вольфрама на основе никеля должен точно контролироваться, чтобы в полной мере проявить его преимущества в коррозионной стойкости. Рекомендуемые стратегии оптимизации включают следующие аспекты:

(1) Оптимизация ингредиентов

высокочистые порошки Ni (чистота $> 99,9\% \pm 0,01\%$) и WC (размер частиц $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), а содержание Ni контролируется на уровне $8\%-10\% \pm 1\%$. Этот диапазон обеспечивает баланс между коррозионной стойкостью и механическими свойствами. Слишком высокое содержание Ni ($> 12\% \pm 1\%$) приведет к увеличению фазы Ni, снижению твердости примерно на $10\% \pm 2\%$ (до $\text{HV } 1620 \pm 30$) и повышению вязкости на $5\% \pm 1\%$ (K_{Ic} с увеличивается до $12,6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), но ток коррозии немного увеличивается (до $2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$); слишком низкое значение ($< 8\% \pm 1\%$) приводит к недостаточной твердости ($< \text{HV } 1600 \pm 30$) и снижению коррозионной стойкости ($i_{\text{corr}} > 2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$). Мелкие зерна WC ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) уменьшают проникновение коррозионных сред за

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

счет увеличения плотности границ зерен ($> 10^{-4} \text{ мм}^2/\text{см}^3 \pm 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{см}^3$), а скорость потери веса контролируется на уровне $< 0,05 \text{ мг}/\text{см}^2 \pm 0,01 \text{ мг}/\text{см}^2$.

(2) Процесс шаровой мельницы

Мокрое шаровое измельчение (среда — безводный этанол, 40 часов ± 1 час, соотношение шаров к материалу $10:1 \pm 0,5$) используется для обеспечения равномерного смешивания порошков, отклонения распределения размеров частиц $< 0,02 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, уменьшения микродефектов (таких как поры, агломерация), обеспечения однородной матрицы для последующего спекания и косвенного снижения чувствительности к коррозии.

(3) Вакуумное спекание

при $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, давлении $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$, времени выдержки $1 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$, плотность достигла $99,5\% \pm 0,1\%$, пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Эта температура обеспечивает равномерное распределение Ni (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), избегая сегрегации ($> 0,5\% \pm 0,1\%$ при $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, i_{corr} увеличивается на $15\% \pm 3\%$). Высоковакуумная среда снижает проникновение кислорода, предотвращает преждевременное образование NiO или неравномерное распределение и сохраняет низкую потерю веса.

(4) Постобработка

Горячее изостатическое прессование (ГИП, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, $1 \text{ час} \pm 0,1 \text{ часа}$) использовалось для устранения остаточных пор, дальнейшего повышения плотности (плотность увеличилась до $99,7\% \pm 0,1\%$), уменьшения пути проникновения агрессивных сред и уменьшения глубины питтингов с $3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ до $< 2 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

(5) Обработка поверхности

Шероховатость поверхности (Ra) контролировалась до менее $0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ с помощью прецизионной механической полировки, что уменьшило поверхностные микротрещины и ямки. Затем использовалась ультразвуковая очистка ($40 \text{ кГц} \pm 1 \text{ кГц}$, $10 \text{ мин} \pm 1 \text{ мин}$) для удаления остаточных загрязнений ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) и уменьшения площади ямок на $20\% \pm 5\%$ (с $0,012 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$ до $0,0096 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$), ток коррозии i_{corr} остается $< 10^{-6} \text{ А}/\text{см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А}/\text{см}^2$.

(6) Введение добавок

Добавление небольшого количества Cr_3C_2 ($0,2\% \pm 0,01\%$) дополнительно повышает коррозионную стойкость. Cr_3C_2 образует слой Cr_2O_3 (толщиной $\sim 0,1 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$) при высокой температуре, который взаимодействует со слоем NiO, снижая ток коррозии примерно на $10\% \pm 2\%$ (с $10^{-6} \text{ А}/\text{см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А}/\text{см}^2$ до $9 \times 10^{-7} \text{ А}/\text{см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А}/\text{см}^2$), а скорость потери веса остается $< 0,05 \text{ мг}/\text{см}^2 \pm 0,01 \text{ мг}/\text{см}^2$. Cr_3C_2 также измельчает размер зерна (с $0,6 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ до $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и повышает прочность границ зерен ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$).

Оптимизация этих технологических параметров обеспечивает равномерное соединение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

связующей фазы на основе Ni и WC, а прочность границ зерен увеличивается до $> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$, что значительно повышает коррозионную и усталостную стойкость материала при сохранении высокой твердости ($\text{HV } 1800 \pm 30$) и вязкости ($K_{IC} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

8.3.1.6 Технические условия испытаний на связующую фазу на основе Ni в твердом сплаве

Спецификации испытаний для связующих фаз на основе Ni для цементированного карбида предназначены для оценки его коррозионной стойкости и механических свойств. Рекомендуются следующие стандарты:

(1) Испытание солевым туманом

Согласно ISO 9227 NSS, условия: раствор NaCl $5\% \pm 0,1\%$, температура $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, продолжительность 2000 часов ± 100 часов, измерение потери веса (цель $< 0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) и глубины питтинга (цель $< 3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$).

(2) Испытание на погружение в кислоту

в $0,1 \text{ МН}_2\text{SO}_4$ ($\text{pH } 1 \pm 0,1$) в течение 100 часов ± 10 часов и испытание потери веса (цель $< 0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) и плотности тока коррозии (i_{corr} , цель $< 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$).

(3) Электрохимическое тестирование

(E_{corr} , целевой $\sim 0,1 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$ относительно SCE) и поляризационных кривых при скорости сканирования $1 \text{ мВ/с} \pm 0,1 \text{ мВ/с}$ использовалась трехэлектродная система (рабочий электрод: WC на основе Ni, электрод сравнения: насыщенный каломельный электрод, вспомогательный электрод: платиновый электрод).

на основе никеля

(1) Испытание на твердость

Согласно ISO 3878, с использованием твердомера по Виккерсу, нагрузка $30 \text{ кг} \pm 1 \text{ кг}$, температура испытания $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, целевая твердость $> \text{HV } 1800 \pm 30$.

(2) Испытание на вязкость разрушения

Согласно ASTM E399, с использованием метода одностороннего надреза (SENB), температура испытания $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, целевой показатель $K_{IC} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

(3) Испытание на эффективность при высоких температурах

Прочность на изгиб была испытана при температуре $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ с использованием метода трехточечного изгиба в соответствии с ISO 178 (целевое значение $> 2000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.1.8 Микроскопический анализ связующей фазы на основе Ni в твердом сплаве

СЭМ наблюдение

Разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, анализ толщины слоя NiO (цель $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) и дефектов поверхности.

Анализ РФЭС

Пик Ni 2p (целевое значение $854 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) был протестирован для подтверждения образования NiO.

Анализ ЭДС

Измерьте распределение Ni на границах зерен (целевое значение $8\%-10\% \pm 0,5\%$).

Испытание следует проводить в стандартных лабораторных условиях с размером образца $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ и повторять ≥ 3 раза для обеспечения надежности данных.

8.3.1.9 Инженерные применения связующей фазы из цементированного карбида на основе Ni

Благодаря своей превосходной коррозионной стойкости и механическим свойствам, цементированная карбидная связующая фаза на основе Ni показала значительные преимущества в инженерных приложениях в различных высокотемпературных и коррозионных средах. Ниже приведены ее основные области применения и эксплуатационные характеристики в сочетании с фактическими случаями и данными:

(1) Морская инженерия

см^2) в соляном тумане ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) и морской воде. $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) и высокой коррозионной стойкостью (ток коррозии $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$) широко используется в стабилизаторах и режущих инструментах глубоководного бурения. При глубоководном бурении срок службы стабилизаторов из WC-10Ni превышает 3 года $\pm 0,3$ года, что примерно на $100\% \pm 5\%$ выше, чем у традиционного WC-10Co ($1,5 \text{ года} \pm 0,2 \text{ года}$), а расходы на техническое обслуживание, вызванное коррозией, снижаются примерно на $40\% \pm 5\%$. Высокая твердость ($\text{HV } 1800 \pm 30$) и вязкость ($K_{\text{IC}} 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) обеспечивают эффективность резки при высоком давлении ($> 20 \text{ МПа} \pm 2 \text{ МПа}$) и высокой температуре ($> 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

(2) Химические трубопроводы и оборудование

В кислой среде ($\text{pH} < 2 \pm 0,1$, например, $0,1 \text{ МН}_2\text{SO}_4$) скорость потери веса цементированного карбида WC на основе Ni составляет всего $0,06 \text{ мг/см}^2$ из-за защиты его пассивирующего слоя NiO (толщина $\sim 10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$). $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, лучше, чем у нержавеющей стали (скорость потери веса $\sim 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$). Он используется для коррозионно-стойких покрытий для клапанов и насосов химических трубопроводов со сроком службы $> 2 \text{ лет} \pm 0,2 \text{ года}$, что примерно на $100\% \pm 5\%$ дольше, чем у традиционных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материалов (например, нержавеющей стали 304, срок службы ~ 1 год $\pm 0,1$ года). В химических реакторах, содержащих хлориды (например, HCl), WC-10Ni сохраняет стойкость к точечной коррозии (глубина точечной коррозии < 3 мкм $\pm 0,5$ мкм), снижая риск утечки из оборудования.

(3) Бумажная промышленность

Оборудование для производства бумаги (такое как шлифовальные ролики и лезвия) подвергается воздействию хлоридсодержащих ($\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$) и высокотемпературных ($> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) сред. Цементированный карбид WC на основе Ni является идеальным выбором из-за его низкого тока коррозии ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ А/см² $\pm 10^{-7}$ А/см²) и высокой износостойкости (твердость $> \text{HV } 1800 \pm 30$). Потеря веса шлифовальных роликов из WC-10Ni составляет всего 0,05 мг/см² после 5000 ч ± 500 ч непрерывной работы. $\pm 0,01$ мг/см², глубина износа поверхности < 10 мкм ± 1 мкм, по сравнению с WC-10Co (скорость потери веса 0,12 мг/см² $\pm 0,01$ мг/см², глубина износа 20 мкм ± 2 мкм) повышает долговечность примерно на 50% $\pm 5\%$, снижая частоту замены и производственные затраты.

(4) Авиационное и энергетическое оборудование

В компонентах аэрокосмических двигателей (например, лопатках турбин) и соплах газовых турбин цементированный карбид WC на основе Ni (например, WC-10Ni с Cr_3C_2 0,2 % $\pm 0,01$ %) имеет длину трещины термической усталости $< 0,04$ мм $\pm 0,01$ мм и скорость потери веса $< 0,25$ мг/см² при температуре $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ и термоциклировании (ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). $\pm 0,05$ мг/см², срок службы > 5000 часов ± 500 часов, лучше, чем неоптимизированные 3000 часов ± 300 часов. Высокая термическая стабильность (твердость $> \text{HV } 1600 \pm 30$) и стойкость к окислению позволяют использовать его в коррозионных средах с высокой температурой (например, в атмосфере SO_2), снижая частоту отказов, вызванных термическим растрескиванием, примерно на 45% $\pm 5\%$.

сплав на основе никеля

Преимущество карбида вольфрама на основе никеля в области инженерного применения заключается в его комплексных характеристиках: коррозионная стойкость улучшена на 60% $\pm 5\%$, высокая твердость ($\text{HV } 1800 \pm 30$) и прочность (K_{IC} $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) и стабильность при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$. Эти характеристики делают его потенциальной заменой традиционных материалов на основе кобальта и нержавеющей стали в экстремальных условиях (таких как высокое давление на большой глубине, кислотная химическая промышленность и высокотемпературная авиация). При наличии водяного пара (влажность $> 50\% \pm 5\%$) или более высоких температурных градиентах (ΔT $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) комбинирование многослойных покрытий (например, TiN / Al_2O_3 , толщина 5-20 мкм $\pm 0,1$ мкм) может дополнительно улучшить эксплуатационные характеристики и распространить их на сверхвысокие температуры ($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) или области применения с большим количеством циклов ($> 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз), например, в энергетических устройствах следующего поколения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Экономические и экологические преимущества

Применение WC на основе Ni значительно снижает затраты на техническое обслуживание. Например, годовые затраты на техническое обслуживание компонентов морского бурения снижаются на $40\% \pm 5\%$, а эффективность авиационных компонентов увеличивается на $20\% \pm 3\%$. Однако Ni относительно дорог (примерно в 1,5-2 раза дороже Co), и затраты необходимо контролировать путем оптимизации содержания Ni ($8\%-10\% \pm 1\%$) и процессов (таких как последующая обработка HIP). С точки зрения окружающей среды, его долговечность снижает количество отходов материала, что соответствует требованиям устойчивого развития.

Цементированный карбид WC на основе Ni хорошо зарекомендовал себя в морской технике, химических трубопроводах, бумажной промышленности и авиационном энергетическом оборудовании, с коэффициентом потери веса $< 0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, срок службы увеличен на $50\%-100\% \pm 5\%$. Его коррозионная стойкость и высокая температурная стабильность отвечают различным инженерным требованиям, и его применение может быть расширено за счет покрытия и легирования в будущем.

8.3.2 Введение добавок Cr_3C_2 в цементированный карбид

8.3.2.1 Принципиальный и технический обзор введения добавок Cr_3C_2 в твердый сплав

Добавки карбида вольфрама Cr_3C_2 значительно повышают стойкость к окислению и высокую термостойкость карбида вольфрама, особенно в условиях высоких температур ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и коррозионной среды (например, кислородсодержащей или хлоридсодержащей атмосферы). Рекомендуемое количество добавки составляет $0,2\%-0,5\% \pm 0,01\%$. Cr_3C_2 реагирует с кислородом при высокой температуре, образуя плотный защитный слой Cr_2O_3 (толщина $\sim 0,1-0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$, плотность $\sim 5,2 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$), эффективно изолирующий кислород и агрессивные среды, а также контролирующий прирост веса до $< 0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, что лучше, чем $0,5 \text{ мг/см}^2$ образцов без добавок $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$. Этот защитный слой снижает скорость окисления (с $0,4 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{ч} \pm 0,05 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{ч}$ до $< 0,2 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{ч} \pm 0,05 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{ч}$) и действует синергетически со слоем NiO связующей фазы на основе Ni, дополнительно снижая ток коррозии (i_{corr} от 10^{-6} А/см^2 Cr_3C_2), а также улучшает прочность границ зерен ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$) за счет измельчения зерен WC (с $0,6 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ до $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), сохраняя при этом твердость ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) и ударную вязкость ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), что делает его пригодным для областей с высокими температурами и высокими нагрузками, таких как лопатки авиационных турбин и сопла газовых турбин. Кроме того, высокая температурная стабильность Cr_3C_2 (температура плавления $1890^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) делает его менее размягчающимся, чем основа Co при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (падение твердости $< 5\% \pm 1\%$), что повышает долгосрочную прочность материала.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.2.2 Анализ механизма антиокислительной и коррозионной стойкости добавок карбида Cr_3C_2

Добавки Cr_3C_2 происходят из его химической реакции и регулирования микроструктуры. В окислительной среде при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ Cr_3C_2 реагирует ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8\text{CO}$, $\Delta G < -1000 \text{ кДж/моль} \pm 50 \text{ кДж/моль}$) с образованием слоя Cr_2O_3 , низкий коэффициент диффузии кислорода которого ($D_{\text{O}} \approx 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с} \pm 10^{-15} \text{ см}^2/\text{с}$) эффективно блокирует проникновение кислорода, и увеличение веса снижается с $0,5 \text{ мг/см}^2$ до $1,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ до $< 0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, стойкость к окислению улучшается примерно на $40\% \pm 5\%$. В кислой среде (например, $0,1 \text{ МН}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$) или соляном тумане ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) слой Cr_2O_3 и NiO вместе образуют двойную защитную структуру, ток коррозии i_{corr} снижается до $9 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, а скорость потери веса поддерживается на уровне $< 0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, по сравнению с $0,07 \text{ мг/см}^2$ без добавки $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ снижается примерно на $29\% \pm 5\%$. Кроме того, Cr_3C_2 измельчает зерна и укрепляет связи по границам зерен, уменьшает рост трещин термической усталости (с $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и имеет высокую степень соответствия коэффициента термического расширения ($10 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) с WC, снижая концентрацию напряжений, вызванную термоциклированием ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

8.3.2.3 Микроскопический анализ и проверка введения добавок Cr_3C_2 в твердый сплав

с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) показали, что после добавления Cr_3C_2 слой Cr_2O_3 был равномерно распределен по поверхности со стабильной толщиной $0,1-0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$, без явного отслаивания или трещин, в то время как на поверхности образца без добавления появились окислительные отверстия (диаметром $\sim 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Рентгеноструктурный анализ (XRD) подтвердил гексагональную кристаллическую структуру Cr_2O_3 ($a = 4,96 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$, $c = 13,58 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$), интенсивность пика ($2\theta \approx 33,6^\circ, 36,2^\circ$) указывает на высокую кристалличность, что повышает стабильность защитного слоя. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) показывает, что содержание Cr на границе зерен составляет около $0,5\% - 1\% \pm 0,1\%$, что равномерно распределено, подтверждая его хорошую связь интерфейса с фазами WC и Ni. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) обнаружила пик Cr 2p (около $576,5 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), который совпадает с пиком O 1s ($530 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), подтверждая образование Cr_2O_3 .

8.3.2.4 Анализ факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики добавок карбида Cr_3C_2

карбида вольфрама Cr_3C_2 зависит от многих факторов и требует точного контроля:

(1) Сумма дополнения

При содержании Cr_3C_2 $0,2\% \pm 0,01\%$ прирост веса составляет $< 0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

i_{corr} уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$ (до $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$). Если содержание превышает $0,5\% \pm 0,01\%$, может образоваться η -фаза (композиционная фаза WC-Cr-Co), твердость уменьшается примерно на $5\% \pm 1\%$ (до $\text{HV } 1425 \pm 30$), а ударная вязкость увеличивается на $3\% \pm 1\%$ (K_{IC} увеличивается до $12,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), но i_{corr} увеличивается до $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.

(2) Размер зерна

размер зерна WC составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, Cr_3C_2 распределен равномерно, а скорость потери веса низкая ($< 0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$). Если размер зерна увеличивается до $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, слой Cr_2O_3 становится прерывистым, а скорость потери веса увеличивается на $15\% \pm 3\%$ (до $0,055 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$), глубина питтинга увеличивается с $2 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ до $3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

(3) Температура спекания

При спекании при $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Cr_3C_2 Однородный твердый раствор, прирост веса $< 0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$. Если температура повышается до $> 1550^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Cr улетучивается (потеря $> 0,1\% \pm 0,02\%$), толщина слоя Cr_2O_3 уменьшается ($< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$), а i_{corr} увеличивается на $10\% \pm 2\%$ (до $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

(4) Окружающая среда

В сильной кислоте с $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ слой Cr_2O_3 частично растворился, i_{corr} увеличился на $20\% \pm 3\%$ (до $1,08 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), а скорость потери веса увеличилась до $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. В соляном тумане $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$ Cl^- ускоряет коррозию Cr_2O_3 , и площадь питтинга увеличивается на $15\% \pm 3\%$ (с $0,01 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$ увеличилась до $0,0115 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$).

(5) Шероховатость поверхности

$R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ слой Cr_2O_3 остается неповрежденным и i_{corr} остается низким ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$). Если $R_a > 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, дефекты поверхности увеличиваются, i_{corr} увеличивается на $8\% \pm 2\%$ (до $1,08 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), а глубина питтинга увеличивается до $3,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

Например, образец WC-10Ni-0,6%Cr₃C₂ имел скорость потери веса $0,08 \text{ мг/см}^2$ в соляном тумане из-за улетучивания Cr, вызванного высокой температурой спекания ($1550^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, i_{corr} увеличился до $1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Скорость потери веса оптимизированного WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) составила всего $0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, антиоксидантная способность увеличивается примерно на $40\% \pm 5\%$.

8.3.2.5 Оптимизация процесса приготовления твердосплавных добавок Cr₃C₂

Для достижения прироста массы $< 0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ и $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Введение добавок Cr_3C_2 необходимо оптимизировать в координации с процессом приготовления. Рекомендуемые стратегии включают:

(1) Оптимизация ингредиентов

Высококачественный порошок Cr_3C_2 (чистота $> 99,5\% \pm 0,01\%$, размер частиц $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) выбирается и смешивается с WC (размер частиц $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и порошком Ni ($8\% - 10\% \pm 1\%$). Содержание Cr_3C_2 контролируется на уровне $0,2\% - 0,5\% \pm 0,01\%$. Избыточное содержание ($> 0,5\% \pm 0,01\%$) может вызвать η -фазу и снизить твердость на $5\% \pm 1\%$, в то время как слишком низкое содержание ($< 0,2\% \pm 0,01\%$) имеет недостаточный антиоксидантный эффект (прирост веса $> 0,4 \text{ мг/см}^2$) $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$).

(2) Процесс шаровой мельницы

Мокрое шаровое измельчение (среда: безводный этанол, $40 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$, соотношение шаров к материалу: $10:1 \pm 0,5$) использовалось для обеспечения равномерной дисперсии Cr_3C_2 с отклонением распределения размеров частиц $< 0,02 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, уменьшения агломерации ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) и обеспечения однородной матрицы для формирования слоя Cr_2O_3 .

(3) Вакуумное спекание

Спекание при $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, давлении $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$, времени выдержки $1 \text{ час} \pm 0,1 \text{ часа}$, плотность достигает $99,5\% \pm 0,1\%$, пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Эта температура обеспечивает твердый раствор Cr_3C_2 образует равномерный слой Cr_2O_3 . При $> 1550^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ Cr улетучивается, в результате чего образуется неполный защитный слой (толщина $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$).

(4) Постобработка

$\text{мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$ применялось горячее изостатическое прессование (ГИП, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, $1 \text{ час} \pm 0,1 \text{ часа}$).

(5) Обработка поверхности

Шероховатость Ra контролировалась на уровне $0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ путем прецизионной полировки, а поверхностные окислы ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) удалялись путем ультразвуковой очистки ($40 \text{ кГц} \pm 1 \text{ кГц}$, $10 \text{ мин} \pm 1 \text{ мин}$), а площадь питтинга уменьшалась на $15\% \pm 3\%$ (с $0,011 \text{ мм}^2$ до $0,01 \text{ мм}^2$) $\pm 0,001 \text{ мм}^2$ до $0,00935 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$), i_{corr} остается $< 10^{-6} \text{ А/см}^2$ $\pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$.

(6) Оптимизация аддитивной дисперсии

Механическое легирование (МА, $200 \text{ об./мин} \pm 10 \text{ об./мин}$, $10 \text{ ч} \pm 0,5 \text{ ч}$) использовалось для улучшения межфазной связи между фазами Cr_3C_2 и WC/Ni, уменьшения сегрегации ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) и улучшения однородности слоя Cr_2O_3 .

Эти процессы обеспечивают равномерное распределение Cr_3C_2 , прочность границ зерен $>$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

200 МПа $\pm$ 20 МПа, а также сохраняющуюся твердость ($> HV 1500 \pm 30$) и вязкость ($K_{IC} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

8.3.2.6 Пример аддитивной инженерии и сравнение производительности цементированного карбида Cr_3C_2

Если взять в качестве примера WC-10Ni-0,2% Cr_3C_2 и WC - 10Ni, то после окисления при температуре $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 100 часов $\pm$ 10 часов увеличение массы образца с добавлением Cr_3C_2 составляет всего $0,25 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 9 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$ по сравнению с $0,5 \text{ мг/см}^2$ без добавки $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ и $1,1 \times 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, а стойкость к окислению улучшается на $50\% \pm 5\%$. В испытании в соляном тумане (NaCl 5% $\pm$ 0,1%, 2000 ч $\pm$ 100 ч) скорость потери веса снижается до $0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга $< 2 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, лучше, чем $0,07 \text{ мг/см}^2$ без добавки $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и $3,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. В авиационных турбинных лопатках WC-10Ni-0,2% Cr_3C_2 имеет срок службы > 6000 часов $\pm$ 500 часов, что на $20\% \pm 5\%$ больше, чем 5000 часов $\pm$ 500 часов без добавки, и снижает интенсивность отказов, вызванных горячими трещинами, примерно на $30\% \pm 5\%$.

8.3.2.7 Расширение и ограничения применения добавок Cr_3C_2 в твердом сплаве

Добавки Cr_3C_2 делают цементированный карбид превосходным в высокотемпературных окислительных (например, $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и коррозионных средах, подходящим для газовых турбинных сопел (срок службы $> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов) и высокотемпературных форм (циклы $> 10^5$ раз $\pm 10^4$ раз). В атмосферах, содержащих SO_2 , слой Cr_2O_3 остается защитным (увеличение веса $< 0,35 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$), но в сильной кислоте с $\text{pH} < 1 \pm 0,1$ скорость растворения увеличивается на $15\% \pm 3\%$ и должна быть оптимизирована в сочетании с покрытием TiN (толщина $5\text{-}10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$). Cr_3C_2 дороже (примерно в 2–3 раза дороже WC), и количество добавляемого вещества необходимо контролировать ($0,2\text{--}0,5\% \pm 0,01\%$), чтобы сбалансировать производительность и экономичность.

8.3.2.8 Направление оптимизации и будущие перспективы введения добавок Cr_3C_2 в цементированный карбид

Для улучшения эффекта Cr_3C_2 можно добавить TaC ($0,1\% \pm 0,01\%$) для повышения термической стабильности слоя Cr_2O_3 , а i_{corr} уменьшить до $5 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$. При сверхвысоких температурах ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) в сочетании с покрытием Al_2O_3 (толщина $10\text{-}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) увеличение веса можно контролировать до $0,2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, твердость $> HV 1600 \pm 30$. В будущем разработка нано- Cr_3C_2 (размер частиц $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) или Cr-Ni композитных добавок может дополнительно улучшить стойкость к окислению и экономичность и расширить применение до экстремальных энергетических приложений.

Добавки Cr_3C_2 ($0,2\% \text{--} 0,5\% \pm 0,01\%$) значительно снижают прирост массы ($< 0,3 \text{ мг/см}^2$) за

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

счет формирования слоя Cr_2O_3 (толщина $0,1-0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$) $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$) и ток коррозии ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$), стойкость к окислению улучшается на $40\% \pm 5\%$, при этом сохраняя твердость ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) и ударную вязкость ($K_{\text{Ic}} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Оптимизировать процесс подготовки (оптимизация состава Cr_3C_2 $0,2\%-0,5\% \pm 0,01\%$, шаровая мельница 40 часов ± 1 час, спекание $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, последующая обработка HIP, полировка поверхности $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) для обеспечения стабильной производительности. Такие факторы, как количество добавки, размер зерна, температура спекания, окружающая среда и шероховатость поверхности, должны всесторонне контролироваться. Подходит для высокотемпературных и коррозионных сред. В будущем его применение может быть расширено за счет композитных добавок и покрытий.

8.3.3 Защита поверхности твердым сплавом

8.3.3.1 Обзор принципа защиты и технологии покрытия поверхности цементированным карбидом

Технология защиты поверхности покрытия значительно повышает коррозионную стойкость и высокотемпературную стойкость цементированного карбида, особенно для высокотемпературной ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и коррозионной среды (например, кислотные или соляные условия). Рекомендуемые покрытия включают TiN и Al_2O_3 толщиной $5-20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, достигаемые методом физического осаждения из паровой фазы (PVD, $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) или химического осаждения из паровой фазы (CVD, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Покрытие TiN (твердость $> \text{HV } 2000 \pm 50$, плотность $\sim 5,4 \text{ г/см}^3$) $\pm 0,1 \text{ г/см}^3$) с превосходной износостойкостью и стойкостью к окислению, прирост массы $< 0,2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, ток коррозии (i_{corr}) снижен до $< 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$. Покрытие Al_2O_3 (температура плавления $2072^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, теплопроводность $\sim 30 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 2 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) изолирует кислород и агрессивные среды, образуя плотный оксидный слой (толщина $\sim 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), а скорость потери веса поддерживается на уровне $< 0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, что лучше, чем $0,07 \text{ мг/см}^2$ образцов без покрытия $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Эти покрытия работают синергетически с фазами связующего на основе Ni или добавками Cr_3C_2 для поддержания твердости ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) и ударной вязкости ($K_{\text{Ic}} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), что делает их широко используемыми в лопатках авиационных турбин, химическом оборудовании и морских инструментах. Кроме того, высокая температурная стабильность покрытий (TiN до $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Al_2O_3 до $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) снижает ухудшение характеристик, вызванное термоциклированием (ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

8.3.3.2 Анализ механизма коррозионной стойкости и стойкости к окислению поверхностного покрытия из цементированного карбида

Защитный эффект поверхностного покрытия обусловлен его физическим барьером и химической инертностью. В окислительной среде при температуре $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ покрытие Al_2O_3 образует плотный оксидный слой посредством реакции ($4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$, ΔG

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$< -1500 \text{ кДж/моль} \pm 50 \text{ кДж/моль}$), а его низкий коэффициент диффузии кислорода ($D_{\text{O}} \approx 10^{-15} \text{ см}^2/\text{с} \pm 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$) контролирует прирост массы до $< 0,2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, а стойкость к окислению улучшается примерно на $60\% \pm 5\%$. Покрытие TiN уменьшает износ поверхности и распространение микротрещин (от $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ до $< 0,02 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) за счет высокой твердости ($> \text{HV } 2000 \pm 50$) и низкого коэффициента трения ($\sim 0,4 \pm 0,05$). В кислых средах (например, $0,1 \text{ МН}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$) или соляном тумане ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) покрытие изолирует Cl^- и H^+ , i_{corr} снижается до $8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, а скорость потери веса снижается до $0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, по сравнению с $0,07 \text{ мг/см}^2$ для непокрытого $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, снижение составляет около $43\% \pm 5\%$. Коэффициент термического расширения покрытия соответствует коэффициенту термического расширения подложки ($\text{TiN } 9 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 8 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\text{WC } 5,2 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), что снижает термическое напряжение ($< 300 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и повышает сопротивление термической усталости.

8.3.3.3 Микроскопический анализ и проверка покрытия поверхности цементированного карбида

с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) показали, что покрытия TiN и Al_2O_3 имели гладкую поверхность и равномерную толщину ($5\text{--}20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), без явных отслоений или трещин, в то время как на поверхности непокрытого образца появились пятна окисления (диаметром $\sim 0,4 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Рентгеноструктурный анализ (XRD) подтвердил кубическую кристаллическую структуру TiN ($a = 4,24 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$, $2\theta \approx 36,7^\circ, 42,6^\circ$) и гексагональную структуру Al_2O_3 ($a = 4,76 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$, $c = 12,99 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$, $2\theta \approx 35,1^\circ, 43,3^\circ$), а интенсивность пика указывает на высокую кристалличность. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) показывает, что содержание Ti или Al в покрытии составляет $> 95\% \pm 1\%$, и оно хорошо интегрировано с WC/Ni на границе раздела (толщина диффузионного слоя $\sim 0,1 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$). Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) обнаруживает пик Ti 2p (около $455 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) или пик Al 2p ($74 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), который совпадает с пиком O 1s ($530 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), подтверждая образование оксидного слоя.

8.3.3.4 Анализ факторов, влияющих на покрытие поверхности твердого сплава

Эффективность защиты поверхности покрытия зависит от многих факторов и требует тщательного контроля:

(1) Толщина покрытия

толщина $5\text{--}10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$ и потеря веса $< 0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Если толщина $> 20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, внутреннее напряжение увеличивается ($> 500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$), риск откола увеличивается на $10\% \pm 2\%$, а i_{corr} увеличивается до $9 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$.

(2) Тип покрытия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TiN хорошо работают при $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ (прирост веса $< 0,2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$), но окисление увеличивается при $> 900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ (прирост веса $> 0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$). Покрытия Al_2O_3 стабильны при $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ (прирост веса $< 0,15 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$), но износостойкость немного ниже, чем у TiN (твердость уменьшается на $5\% \pm 1\%$).

(3) Температура осаждения

PVD $400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ Обеспечивает адгезию покрытия TiN ($> 50 \text{ Н/мм}^2 \pm 5 \text{ Н/мм}^2$), если $> 500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, растрескивание под действием термических напряжений (ширина $\sim 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). CVD $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ подходит для Al_2O_3 , но необходимо оптимизировать размягчение матрицы (снижение твердости на $10\% \pm 2\%$).

(4) Окружающая среда

При $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ скорость растворения покрытия TiN увеличивается на $15\% \pm 3\%$ (i_{corr} до $9 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$), а Al_2O_3 стабилен ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$). В соляном тумане NaCl $> 5\% \pm 0,1\%$ площадь питтинга увеличивается на $10\% \pm 2\%$ (с $0,01 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$ до $0,011 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$).

(5) Шероховатость поверхности

Высокая адгезия покрытия ($> 60 \text{ Н/мм}^2$) при $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм} \pm 5 \text{ Н/мм}^2$, i_{corr} низкий. Если $R_a > 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, дефекты увеличиваются, i_{corr} увеличивается на $7\% \pm 2\%$ (до $8,6 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$).

Например, образец WC-10Ni, покрытый Al_2O_3 ($20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, CVD $1050^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) имеет большое внутреннее напряжение, скорость отслаивания $15\% \pm 2\%$ и скорость потери веса $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Скорость потери веса оптимизированного покрытия TiN ($10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, PVD $400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) составляет всего $0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, коррозионная стойкость улучшается примерно на $57\% \pm 5\%$.

8.3.3.6 Оптимизация процесса подготовки поверхности к нанесению защитного покрытия из твердого сплава

Для достижения потери веса $< 0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$. Процесс нанесения покрытия на поверхность должен точно контролироваться. Рекомендуемые стратегии включают:

(1) Предварительная обработка основания

Шероховатость поверхности (R_a) WC-10Ni контролировалась до $0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ путем полировки, а для удаления загрязнений ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) и улучшения адгезии покрытия ($> 60 \text{ Н/мм}^2 \pm 5 \text{ Н/мм}^2$) использовалась ультразвуковая очистка ($40 \text{ кГц} \pm 1 \text{ кГц}$, $10 \text{ мин} \pm 1 \text{ мин}$).

(2) Выбор и толщина покрытия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Выберите TiN (толщина $5-10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) или Al_2O_3 (толщина $10-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$). TiN использует PVD ($400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, напряжение смещения $-100 \text{ В} \pm 10 \text{ В}$, скорость осаждения $0,5 \text{ мкм/ч} \pm 0,1 \text{ мкм/ч}$), Al_2O_3 использует CVD ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, давление $10 \text{ кПа} \pm 1 \text{ кПа}$, скорость осаждения $0,3 \text{ мкм/ч} \pm 0,1 \text{ мкм/ч}$), чтобы избежать внутреннего напряжения, вызванного чрезмерной толщиной ($> 20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$).

(3) Оптимизация процесса осаждения

В PVD соотношение потоков Ar/N_2 ($1:1 \pm 0,1$) контролируется для обеспечения чистоты фазы TiN ($> 98\% \pm 1\%$). В CVD добавляется H_2 ($5\% \pm 0,5\%$) для улучшения плотности Al_2O_3 (пористость $< 0,05\% \pm 0,01\%$) и снижения диффузии кислорода.

(4) Постобработка

Низкотемпературный отжиг ($500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 2 часа $\pm 0,1$ часа) используется для снятия остаточного напряжения ($< 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$) и улучшения сцепления между покрытием и подложкой (прочность на сдвиг на границе раздела $> 50 \text{ Н/мм}^2 \pm 5 \text{ Н/мм}^2$).

(5) Многослойное покрытие

Сочетание двухслойной структуры TiN ($5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) + Al_2O_3 ($10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), TiN обеспечивает износостойкость, Al_2O_3 повышает стойкость к окислению, i_{corr} падает до $7 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, а скорость потери веса $< 0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$.

(6) Обработка поверхности

Полировка ионным пучком (энергия $500 \text{ эВ} \pm 50 \text{ эВ}$) использовалась для оптимизации Ra до $0,03 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, уменьшения микротрещин и уменьшения площади питтинга на $10\% \pm 2\%$ (с $0,011 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$ до $0,0099 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$).

Эти процессы обеспечивают однородное покрытие с адгезией $> 60 \text{ Н/мм}^2 \pm 5 \text{ Н/мм}^2$, сохраняя твердость ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) и вязкость ($K_{1c} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

Инженерные примеры и сравнение характеристик покрытия поверхности цементированным карбидом

Если взять в качестве примера WC-10Ni-TiN ($10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и непокрытый WC-10Ni, то после окисления при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 100 часов ± 10 часов образец с покрытием TiN набрал $0,15 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, по сравнению с $0,5 \text{ мг/см}^2$ для непокрытого $\pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ и $1,1 \times 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, а стойкость к окислению улучшилась на $70\% \pm 5\%$. В испытании в соляном тумане ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$, 2000 ч ± 100 ч) скорость потери веса снижается до $0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга $< 1,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, лучше, чем $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и $3,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. В лопатках авиационных турбин срок службы образцов с покрытием TiN составляет > 7000 часов ± 500 часов, что на $40\% \pm 5\%$ больше, чем у непокрытых 5000 часов ± 500 часов, а скорость разрушения от термических трещин снижается примерно на $35\% \pm 5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.3.8 Расширение области применения и ограничения покрытий из цементированного карбида

Поверхностное покрытие позволяет цементированному карбиду хорошо работать при высокотемпературном окислении (например, $1100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) и коррозионных средах, подходит для сопел газовых турбин (срок службы $> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов) и глубоководных буровых долот (стойкость к давлению $> 30 \text{ МПа} \pm 2 \text{ МПа}$). В атмосфере покрытия Al_2O_3 остаются защитными (увеличение веса $< 0,2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$), но скорость растворения TiN в сильной кислоте с $\text{pH} < 1 \pm 0,1$ увеличивается на $20\% \pm 3\%$ и должна быть оптимизирована в сочетании с Al_2O_3 . Стоимость процесса нанесения покрытия относительно высока (примерно в 2–3 раза выше стоимости подложки), и экономии необходимо контролировать за счет тонкослойной конструкции ($5\text{--}10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$).

8.3.3.9 Направление оптимизации и будущие перспективы твердосплавного покрытия поверхности

Для улучшения эффекта покрытия можно разработать градиентное покрытие TiN / Al_2O_3 (толщина $15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), а $i_{\text{сог}}$ снизить до $6 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$. При сверхвысоких температурах ($> 1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) добавляется ZrO_2 ($5\% \pm 0,5\%$) для повышения термической стабильности, с увеличением веса $< 0,15 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, твердостью $> \text{HV } 1900 \pm 30$. В будущем плазменное напыление (температура $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) или нанопокрывтие (размер частиц $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) может использоваться для улучшения адгезии и долговечности и расширения до экстремальных применений в авиации и энергетическом оборудовании.

Поверхностные покрытия (например, TiN $5\text{--}10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, Al_2O_3 $10\text{--}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) значительно снижают потерю веса ($< 0,04 \text{ мг/см}^2$) за счет формирования защитного слоя (толщина $\sim 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и коррозионный ток ($i_{\text{сог}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$), стойкость к окислению увеличивается на $60\% \pm 5\%$, твердость ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) и ударная вязкость ($K_{\text{Ic}} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Оптимизировать процесс подготовки (предварительная обработка подложки $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, осаждение PVD/CVD, низкотемпературный отжиг, многослойная конструкция) для обеспечения стабильной производительности. Толщина покрытия, тип, температура осаждения, окружающая среда и факторы шероховатости поверхности должны всесторонне контролироваться. Подходит для высокотемпературных и коррозионных сред. В будущем градиентное покрытие и нанотехнологии могут быть использованы для дальнейшего расширения области применения.

8.3.4 Оптимизация параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

8.3.4.1 Обзор принципов и технологий оптимизации параметров процесса для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечения коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

Оптимизация параметров процесса является ключевым средством для улучшения коррозионной стойкости и высокотемпературной стойкости цементированного карбида. Благодаря точному контролю температуры, давления, времени и других параметров в процессе подготовки усиливается синергетический эффект связующей фазы на основе Ni, добавок Cr_3C_2 и поверхностного покрытия. Рекомендуемые параметры оптимизации включают температуру спекания $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, давление $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$, время шаровой мельницы 40 часов ± 1 час и температуру горячего изостатического прессования (HIP) $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$. После оптимизации этих параметров скорость потери веса твердого сплава снижается до $< 0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, ток коррозии (i_{corr}) снижается до $< 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, твердость сохраняется $> \text{HV } 1800 \pm 30$, ударная вязкость $> 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Оптимизированный процесс уменьшает микродефекты (такие как пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$) и фазовую сегрегацию ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), а также улучшает прочность границ зерен ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), что делает его превосходным в условиях высоких температур ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и коррозионных сред (таких как $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), и подходит для морского бурения, авиационных турбин и химического оборудования. Кроме того, оптимизированный процесс снижает концентрацию напряжений ($< 300 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$), вызванную термоциклированием ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), продлевая срок службы.

8.3.4.2 Анализ коррозионной стойкости и механизма производительности оптимизации параметров процесса обработки твердого сплава

Суть оптимизации параметров процесса заключается в однородности микроструктуры и распределения фаз. При спекании при $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ связующая фаза на основе Ni образует однородный твердый раствор с WC (отклонение распределения Ni $< 0,1\% \pm 0,02\%$), толщина слоя NiO стабилизируется на уровне $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, а i_{corr} снижается до $< 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$. Шаровая мельница в течение 40 часов ± 1 час измельчает зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), увеличивает плотность границ зерен до $> 10^4 \text{ мм}^2/\text{см}^3 \pm 10^3 \text{ мм}^2/\text{см}^3$, снижает проникновение агрессивных сред, а скорость потери веса составляет $< 0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. ГИП $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ устраняет остаточную пористость ($< 0,05\% \pm 0,01\%$), плотность достигает $99,7\% \pm 0,1\%$ и улучшает стойкость к окислению (прирост массы $< 0,25 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$). При высокотемпературном окислении ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) оптимизированные параметры снизили улетучивание Cr_3C_2 (потери $< 0,05\% \pm 0,01\%$), толщина слоя Cr_2O_3 осталась на уровне $0,1\text{-}0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$, а стойкость к окислению была улучшена примерно на $45\% \pm 5\%$. Соответствие коэффициентов термического расширения (WC $5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Ni $13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) уменьшило трещины термической усталости ($< 0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и улучшило долговременную стабильность.

8.3.4.3 Микроскопический анализ и проверка оптимизации параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) показали, что оптимизированные образцы процесса имели однородные зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$, в то время как неоптимизированные образцы (спекаемые при $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) имели зоны сегрегации (диаметр $\sim 0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Анализ рентгеновской дифракции (XRD) подтвердил, что пиковые интенсивности фазы WC ($2\theta \approx 35,6^\circ, 48,3^\circ$) и фазы Ni ($2\theta \approx 44,5^\circ$) были однородными, что указывает на оптимизированное распределение фаз. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) показала, что содержание Ni и Cr на границах зерен составляло $8\%-10\% \pm 0,5\%$ и $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$ соответственно, без явной сегрегации. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) обнаружила пик Ni 2p ($854 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) и пик Cr 2p ($576,5 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), которые соответствовали пику O 1s ($530 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), подтверждая образование слоев NiO и Cr₂O₃.

8.3.4.4 Анализ факторов, влияющих на оптимизацию параметров процесса коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

Эффект оптимизации параметров процесса зависит от многих факторов и требует точного контроля:

(1) Температура спекания

При $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ отклонение распределения Ni составляет $< 0,1\% \pm 0,02\%$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$. Если $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, сегрегация Ni составляет $> 0,5\% \pm 0,1\%$, i_{corr} увеличивается на $15\% \pm 3\%$ (до $1,15 \times 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$), а скорость потери веса увеличивается до $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$.

(2) Время измельчения в шаровой мельнице

При 40 часах ± 1 часе размер зерна составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а скорость потери веса $< 0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Если < 30 часов ± 1 час, зерна укрупняются ($> 0,7 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), а скорость потери веса увеличивается на $10\% \pm 2\%$ (до $0,044 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$).

(3) Давление

При степени вакуума $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$, содержании кислорода $< 0,01\% \pm 0,001\%$, прирост массы $< 0,25 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$. Если давление $> 10^{-2} \text{ Па} \pm 10^{-3} \text{ Па}$, прирост массы при окислении составляет $20\% \pm 3\%$ (до $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$).

(4) Температура HIP

При $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ плотность составляет $99,7\% \pm 0,1\%$, а глубина питтинга $< 2 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. При $> 1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ матрица размягчается (твёрдость уменьшается на $5\% \pm 1\%$), а i_{corr} увеличивается до $9 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$.

(5) Влажность окружающей среды

При влажности $> 50\% \pm 5\%$ ускоряется окисление поверхности и i_{corr} увеличивается на $10\% \pm 2\%$ (до $8,8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$), что необходимо сочетать с оптимизацией покрытия.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Например, образец WC-10Ni был спечен при температуре $1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ и давлении $10^{-2} \text{ Па} \pm 10^{-3} \text{ Па}$, при этом потеря веса составила $0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, i_{corr} достигает $1,2 \times 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$. Скорость потери веса оптимизированного процесса ($1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$, HIP $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) снижается до $0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, коррозионная стойкость улучшается примерно на $62\% \pm 5\%$.

8.3.4.5 Стратегия оптимизации параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

Для достижения потери веса $< 0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$ необходимо точно контролировать параметры процесса. Рекомендуемые стратегии включают:

(1) Соотношение порошка и шаровая мельница

WC (размер частиц $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), Ni ($8\%-10\% \pm 1\%$) и Cr_3C_2 ($0,2\%-0,5\% \pm 0,01\%$) были отобраны и подвергнуты мокрому шаровому помолу (среда безводного этанола, 40 часов ± 1 час, соотношение шаров к материалу $10:1 \pm 0,5$). Отклонение распределения размеров частиц составило $< 0,02 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а агломерация была снижена ($< 0,1\% \pm 0,02\%$).

(2) Вакуумное спекание

Температура $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, давление $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$, время выдержки 1 час $\pm 0,1$ часа, плотность $99,5\% \pm 0,1\%$, пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Избегать сегрегации, вызванной $> 1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

(3) Горячее изостатическое прессование (ГИП)

При температуре $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, давлении $200 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$ и времени 1 час $\pm 0,1$ часа плотность увеличилась до $99,7\% \pm 0,1\%$, пористость была устранена ($< 0,05\% \pm 0,01\%$), а глубина питтингов уменьшилась до $< 1,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

Отжиг: Низкотемпературный отжиг ($500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 2 часа $\pm 0,1$ часа) снимает напряжение ($< 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$) и повышает прочность границ зерен ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$).

(4) Экологический контроль

Поддерживайте влажность $< 10\% \pm 1\%$ и содержание кислорода $< 0,01\% \pm 0,001\%$ во время спекания и горячего изостатического прессования для снижения поверхностного окисления (увеличение веса $< 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$).

(5) Мониторинг процесса

Для обеспечения отклонения параметров $< 1\%$ и оптимизации равномерности распределения фаз используются онлайн-мониторинг температуры (точность $\pm 5^{\circ}\text{C}$) и датчики давления (точность $\pm 10^{-5} \text{ Па}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Эти параметры обеспечивают плотную микроструктуру с прочностью границ зерен > 200 МПа ± 20 МПа, сохраняя твердость ($> HV 1800 \pm 30$) и вязкость ($K_{IC} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

8.3.4.6 Инженерные примеры и сравнение производительности оптимизации параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам цементированного карбида

Взяв в качестве примера оптимизированный процесс WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ - TiN (10 мкм $\pm 0,1$ мкм) и неоптимизированный WC-10Ni, после окисления при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 100 часов ± 10 часов оптимизированный образец набрал $0,15 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, по сравнению с неоптимизированными $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ и $1,1 \times 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, а окисление стойкость улучшается на $70\% \pm 5\%$. В испытании в соляном тумане (NaCl 5% $\pm 0,1\%$, 2000 ч ± 100 ч) скорость потери веса снижается до $0,02 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга $< 1 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, лучше, чем неоптимизированные $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и $3,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. В лопатках авиационных турбин срок службы оптимизированных образцов составляет > 8000 часов ± 500 часов, что на $60\% \pm 5\%$ больше, чем неоптимизированные 5000 часов ± 500 часов, а скорость разрушения от термических трещин снижается примерно на $40\% \pm 5\%$.

8.3.4.7 Расширение области применения и ограничения оптимизации параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

Оптимизированный процесс позволяет цементированному карбиду хорошо работать в условиях сверхвысокой температуры ($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и коррозионных сред, подходит для сопел газовых турбин (срок службы $> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов) и глубоководных буровых долот (стойкость к давлению $> 30 \text{ МПа} \pm 2 \text{ МПа}$). В атмосфере, содержащей SO_2 , прирост веса оптимизированного образца составляет $< 0,2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, но сильная кислота pH $< 1 \pm 0,1$ должна сочетаться с покрытием Al_2O_3 для оптимизации. Стоимость технологического оборудования относительно высока (примерно в 1,5-2 раза выше, чем у традиционных процессов), и ее необходимо снизить за счет массового производства и стандартизации параметров.

8.3.4.8 Оптимизация параметров процесса для коррозионной стойкости и высокотемпературной стойкости твердого сплава. Направление оптимизации и будущие перспективы.

Для дальнейшего улучшения эффекта можно применить динамическое спекание (градиент температуры $50^\circ\text{C/см} \pm 5^\circ\text{C/см}$), чтобы снизить i_{corr} до $5 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$. При сверхвысоких температурах ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) давление HIP оптимизируется до $300 \text{ МПа} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 МПа, а прирост веса составляет $< 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, твердость $> \text{HV } 1900 \pm 30$. В будущем использование интеллектуальных систем мониторинга и наноразмерных порошков (размер частиц $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) может повысить точность и эффективность и расширяться до экстремальных энергетических и авиационных приложений.

Оптимизация параметров процесса (спекание $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$, шаровая мельница $40 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$, горячее изостатическое прессование $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) значительно снизила потерю веса ($< 0,04 \text{ мг/см}^2$) за счет измельчения размера зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и устранения дефектов (пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$). $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) и коррозионный ток ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$), стойкость к окислению увеличена на $45\% \pm 5\%$, твердость ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) и ударная вязкость ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Такие факторы, как температура спекания, время шаровой мельницы, давление, температура НР и влажность окружающей среды, должны быть всесторонне отрегулированы. Подходит для высокотемпературных и коррозионных сред. В будущем динамические процессы и нанотехнологии могут быть использованы для дальнейшего расширения областей применения.

8.3.5. Контроль микроструктуры твердого сплава

8.3.5.1 Обзор принципов и технологий контроля микроструктуры твердого сплава

Контроль микроструктуры является основным средством повышения коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам цементированного карбида. Благодаря точному контролю размера зерна, распределения фаз и плотности дефектов оптимизируется синергетический эффект связующей фазы на основе Ni, добавок Cr_3C_2 и поверхностного покрытия. Рекомендуемые целевые показатели контроля включают размер зерна $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, отклонение распределения Ni $< 0,1\% \pm 0,02\%$ и пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$. После контроля скорость потери веса твердого сплава снижается до $< 0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, ток коррозии (i_{corr}) снижается до $< 7 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, твердость сохраняется $> \text{HV } 1800 \pm 30$, ударная вязкость $> 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Оптимизация микроструктуры уменьшает пути межкристаллитной коррозии и трещины термической усталости ($< 0,02 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и улучшает межкристаллитную прочность ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), что делает его превосходным в условиях высоких температур ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и коррозионных сред (таких как $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), и подходит для глубоководного бурения, авиационных турбин и химических трубопроводов. Кроме того, оптимизированная микроструктура снижает концентрацию напряжений ($< 250 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$), вызванную термическими циклами (ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), продлевая срок службы.

8.3.5.2 Анализ коррозионной стойкости и механизма регулирования микроструктуры твердого сплава

Суть управления микроструктурой заключается в измельчении зерна и фазовой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

однородности. При размере зерна $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ плотность границ зерен увеличивается до $> 10^4 \text{ мм}^2/\text{см}^3 \pm 10^3 \text{ мм}^2/\text{см}^3$, что снижает проникновение агрессивных сред, а скорость потери веса составляет $< 0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Отклонение распределения Ni $< 0,1\% \pm 0,02\%$ Обеспечивает равномерное формирование слоя NiO (толщина $\sim 10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), i_{corr} снижается до $< 7 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$. Пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$ Устраняет остаточные пустоты с помощью процесса НТР, плотность достигает $99,7\% \pm 0,1\%$, повышает стойкость к окислению (прирост веса $< 0,2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$). В окислительной среде при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ Cr_3C_2 ($0,2\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) измельчает зерна и образует слой Cr_2O_3 (толщина $0,1-0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$), что повышает стойкость к окислению примерно на $50\% \pm 5\%$. Соответствие коэффициентов термического расширения ($\text{WC } 5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\text{Ni } 13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\text{Cr}_3\text{C}_2 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) снижает термическое напряжение, а длина трещины термической усталости составляет $< 0,02 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, что значительно улучшает долговременную стабильность.

8.3.5.3 Контроль микроструктуры, микроанализ и проверка твердого сплава

с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) показали, что зерна были однородными ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), а пористость составляла $< 0,1\% \pm 0,02\%$ после регулирования, в то время как нерегулируемые образцы (зерна $> 1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) имели отверстия (диаметр $\sim 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Рентгеноструктурный анализ (XRD) подтвердил, что пиковые интенсивности фазы WC ($2\theta \approx 35,6^\circ, 48,3^\circ$), фазы Ni ($2\theta \approx 44,5^\circ$) и фазы Cr_3C_2 ($2\theta \approx 39,4^\circ$) были однородными, что указывает на то, что распределение фаз было оптимизировано. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) показала, что содержание Ni и Cr на границах зерен составляло $8\%-10\% \pm 0,5\%$ и $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$ соответственно, без сегрегации. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) обнаружила пик Ni 2p ($854 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) и пик Cr 2p ($576,5 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), которые совпадали с пиком O 1s ($530 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), подтверждая образование слоев NiO и Cr_2O_3 .

8.3.5.4 Анализ факторов, влияющих на микроструктуру твердого сплава

Эффект регулирования микроструктуры зависит от многих факторов и требует точного регулирования:

(1) Размер зерна

$0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, потеря веса $< 0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$. Если $> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность границ зерен уменьшается, а скорость потери веса увеличивается на $20\% \pm 5\%$ (до $0,036 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$), глубина питтинга увеличивается с $1,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ до $3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

(2) Распределение Ni

При отклонении $< 0,1\% \pm 0,02\%$ слой NiO однороден и i_{corr} низок. При отклонении $> 0,5\% \pm 0,1\%$ обогащение Ni приводит к увеличению i_{corr} на $15\% \pm 3\%$ (до $1,05 \times 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$), а скорость потери веса возрастает до $0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Пористость

$< 0,1\% \pm 0,02\%$, плотность $99,7\% \pm 0,1\%$, отличная стойкость к окислению (увеличение веса $< 0,2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$). Если $> 0,5\% \pm 0,02\%$, коррозия пор ускоряется и i_{corr} увеличивается на $10\% \pm 2\%$ (до $7,7 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$).

(3) Температура спекания

При $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ микроструктура стабильна, а скорость потери веса низкая. Если температура $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, размер зерна увеличивается ($> 1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), а i_{corr} увеличивается на $12\% \pm 2\%$ (достигая $8,4 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$).

(5) Влажность окружающей среды

При влажности $> 50\% \pm 5\%$ ускоряется поверхностное окисление и i_{corr} увеличивается на $8\% \pm 2\%$ (до $7,6 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$), требуется контроль влажности ($< 10\% \pm 1\%$).

Например, образец WC-10Ni имеет размер зерна $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, пористость $0,6\% \pm 0,02\%$ и скорость потери веса $0,07 \text{ мг/см}^2$ в соляном тумане $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. i_{corr} достигает $1,1 \times 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$. Скорость потери веса оптимизированной микроструктуры ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, $< 0,1\% \pm 0,02\%$) снижена до $0,02 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, коррозионная стойкость улучшается примерно на $64\% \pm 5\%$.

8.3.5.5 Стратегии управления микроструктурой твердого сплава

Для достижения потери веса $< 0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$ необходимо точно контролировать микроструктуру. Рекомендуемые стратегии включают:

(1) Выбор порошка и шаровая мельница

Нанопорошки WC (размер частиц $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), Ni ($8\%-10\% \pm 1\%$) и Cr_3C_2 ($0,2\%-0,5\% \pm 0,01\%$) были отобраны и подвергнуты мокрому шаровому помолу (среда безводного этанола, 40 часов ± 1 час, соотношение шаров к материалу $10:1 \pm 0,5$). Размер зерна контролировался на уровне $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а агломерация была снижена ($< 0,1\% \pm 0,02\%$).

(2) Процесс спекания

Вакуумное спекание ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, давление $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$, время выдержки 1 час $\pm 0,1$ часа), отклонение распределения Ni $< 0,1\% \pm 0,02\%$, что позволяет избежать роста зерен, вызванного $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.

(3) Горячее изостатическое прессование (ГИП)

Температура $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, давление $200 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, время 1 час $\pm 0,1$ часа, пористость снижена до $< 0,1\% \pm 0,02\%$, плотность $99,7\% \pm 0,1\%$, глубина язвин $< 1 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Оптимизация распределения фаз

Механическое легирование (МА, 200 об./мин $\pm$ 10 об./мин, 10 ч $\pm$ 0,5 ч) использовалось для равномерного распределения Ni и Cr в C_{22} , уменьшения сегрегации ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) и повышения прочности границ зерен ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$).

(5) Экологический контроль

Поддерживайте влажность $< 10\% \pm 1\%$ и содержание кислорода $< 0,01\% \pm 0,001\%$ во время спекания и горячего изостатического прессования для снижения поверхностного окисления (увеличение веса $< 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$).

(6) Последующий отжиг

Низкотемпературный отжиг ($500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 2 ч $\pm$ 0,1 ч) снимает напряжение ($< 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$) и стабилизирует микроструктуру.

Эти стратегии обеспечивают мелкое зерно, однородное распределение фаз, прочность границ зерен $> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$ и сохранение твердости ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) и вязкости ($K_{IC} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

8.3.5.6 Инженерный случай контроля микроструктуры твердого сплава и сравнение его характеристик

Взяв в качестве примера оптимизированную микроструктуру WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ - TiN (10 мкм $\pm$ 0,1 мкм) и неоптимизированный WC-10Ni, после окисления при $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ в течение 100 часов $\pm$ 10 часов оптимизированный образец набрал $0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} < 6 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$, по сравнению с неоптимизированными $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$ и $1,1 \times 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, а окисление стойкость улучшается на $80\% \pm 5\%$. В испытании в соляном тумане (NaCl 5% $\pm$ 0,1%, 2000 ч $\pm$ 100 ч) скорость потери веса снижается до $0,01 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга $< 0,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, лучше, чем неоптимизированные $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ и $3,5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. В лопатках авиационных турбин срок службы оптимизированных образцов составляет $> 9000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$, что на $80\% \pm 5\%$ больше, чем неоптимизированные 5000 часов $\pm$ 500 часов, а скорость разрушения от термических трещин снижается примерно на $45\% \pm 5\%$.

8.3.5.7 Расширение области применения и ограничения контроля микроструктуры твердого сплава

Контроль микроструктуры позволяет цементированному карбиду хорошо работать в условиях сверхвысоких температур ($> 1100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) и коррозионных сред, подходит для сопел газовых турбин (срок службы $> 10^4 \text{ часов} \pm 10^3 \text{ часов}$) и глубоководных буровых долот (стойкость к давлению $> 30 \text{ МПа} \pm 2 \text{ МПа}$). В атмосфере, содержащей SO₂, прирост веса оптимизированного образца составляет $< 0,15 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, но pH $< 1 \pm 0,1$ требует оптимизации покрытия Al₂O₃ в сильной кислоте. Процесс контроля требует высокой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

точности оборудования (примерно вдвое выше стоимости традиционных процессов), и затраты необходимо сократить за счет автоматизации и массового производства.

8.3.5.8 Направление и будущие перспективы контроля и оптимизации микроструктуры твердого сплава

Для дальнейшего улучшения эффекта можно использовать плазменное спекание (SPS, температура $1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, давление $50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) для снижения $i_{\text{корр}}$ до $4 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$. При сверхвысоких температурах ($> 1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) размер зерна оптимизируется до $0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а прирост веса составляет $< 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$, твердость $> \text{HV } 1900 \pm 30$. В будущем использование наноразмерных порошков (размер частиц $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и интеллектуального микроскопического обнаружения может повысить точность контроля и расширить его до экстремальных энергетических и авиационных приложений.

Контроль микроструктуры (размер зерна $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, отклонение распределения $\text{Ni} < 0,1\% \pm 0,02\%$, пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$) значительно снижает скорость потери веса ($< 0,03 \text{ мг/см}^2$) за счет измельчения зерна и оптимизации распределения фаз $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) и коррозионного тока ($i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-8} \text{ А/см}^2$), стойкость к окислению увеличивается на $50\% \pm 5\%$, твердость ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) и ударная вязкость ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Размер зерна, распределение Ni , пористость, температура спекания и влажность окружающей среды должны быть полностью отрегулированы. Подходит для высоких температур и коррозионной среды. В будущем плазменный процесс и нанотехнологии могут быть использованы для дальнейшего расширения применения.

8.4 Испытания и оценка коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

8.4.1 Скорость коррозии цементированного карбида (электрохимическая кривая Тафеля)

Обзор принципа и технологии скорости коррозии твердого сплава

Скорость коррозии измеряется с помощью электрохимической кривой Тафеля (согласно ASTM G59) для измерения плотности тока коррозии ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$) для количественной оценки коррозионной стойкости цементированного карбида в агрессивных средах, таких как кислота ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), солевой туман ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) и морская среда. Кривая Тафеля основана на следующей формуле:

$$\eta = b \cdot \log \left(\frac{i}{i_{\text{corr}}} \right)$$

Где η — перенапряжение (точность $\pm 0,01 \text{ В}$), b — наклон Тафеля (около $0,1 \text{ В/декада} \pm 0,01 \text{ В/декада}$), i — плотность тока (точность $\pm 10^{-9} \text{ А/см}^2$), а i_{corr} — плотность тока коррозии. Низкий i_{corr} и высокий коррозионный потенциал ($E_{\text{корр}} > 0,2 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$ против SCE)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

указывают на отличную коррозионную стойкость. В тесте используется трехэлектродная система (рабочий электрод: цементированный карбид, такой как WC10Ni, электрод сравнения: насыщенный каломельный электрод SCE, вспомогательный электрод: платиновый электрод), электролит включает $3,5\% \pm 0,1\%$ NaCl или $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M}$ H_2SO_4 , и оснащен высокоточной электрохимической рабочей станцией (точность потенциала $\pm 0,001 \text{ V}$, точность тока $\pm 10^{-9} \text{ A}$). Например, i_{corr} WC10Ni в растворе NaCl составляет около $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, а E_{corr} составляет около $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, что значительно лучше, чем $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ и $-0,3 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ для WC10Co. В этом разделе объединены принцип кривой Тафеля, метод испытаний и инженерный случай для всестороннего обсуждения метода оценки скорости коррозии твердого сплава, что обеспечивает научную основу для оптимизации коррозионной стойкости.

8.4.1.2 Механизм и анализ скорости коррозии твердого сплава

отражает электрохимическую реакцию материалов в коррозионных средах путем количественной оценки E_{corr} и i_{corr} . E_{corr} WC10Ni составляет около $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, что обусловлено образованием пассивирующего слоя NiO (толщина $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, плотность $\sim 6,7 \text{ g/cm}^3$), $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, который препятствует диффузии H^+ и Cl^- за счет химической инертности ($K_{\text{sp}} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$), что приводит к снижению i_{corr} примерно на $50\% \pm 5\%$ по сравнению с WC10Co. WC10Co имеет более высокий i_{corr} ($10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) и образует коррозионные язвы (глубина $< 5 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$) из-за реакций растворения Co ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$, $\Delta G > 0 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$). Добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) дополнительно оптимизирует производительность. Его высокотемпературная реакция ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8\text{CO}$) генерирует слой Cr_2O_3 (толщиной $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), который взаимодействует с NiO, уменьшая i_{corr} дополнительно на $40\% \pm 5\%$ (до $\sim 6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$). Оптимизация размера зерна до $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ уменьшает площадь воздействия Co или Ni ($< 10\% \pm 1\%$), снижает i_{corr} еще на $20\% \pm 5\%$ и значительно повышает коррозионную стойкость.

с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) показал, что количество коррозионных ямок WC10Ni было небольшим (глубина $< 3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$), в то время как глубина ямок WC10Co составляла $5-10 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) обнаружила пик Ni 2p ($854 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) и пик Cr 2p ($577 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), который соответствовал пику O 1s ($530 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), подтверждая наличие слоев NiO и Cr_2O_3 . Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) показала, что содержание Co в коррозионных язвах было снижено ($< 5\% \pm 0,5\%$), а Ni и Cr были обогащены ($> 10\% \pm 1\%$), подтверждая защитный эффект пассивирующего слоя. В суровых условиях с $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ или $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$ i_{corr} может увеличиться до $1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ и нуждается в дальнейшей оптимизации в сочетании с поверхностными покрытиями (такими как TiN).

8.4.1.3 Анализ факторов, влияющих на скорость коррозии твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Скорость коррозии зависит от многих факторов и требует комплексной оптимизации:

(1) Фаза связывания

При содержании Ni $10\% \pm 1\%$ $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$; при содержании Co $> 12\% \pm 1\%$ i_{corr} увеличивается на $50\% \pm 5\%$ (до $\sim 1,5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$), поскольку Co легче окисляется.

(2) Cr₃C₂ дополнительная сумма

$0,5\% \pm 0,01\%$, i_{corr} уменьшается на $40\% \pm 5\%$; если $> 1\% \pm 0,01\%$, образование η-фазы приводит к снижению вязкости разрушения (K_{IC}) на $10\% \pm 2\%$ (до $\sim 11 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), i_{corr} немного увеличивается до $7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

(3) Размер зерна

$0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, i_{corr} низок, а потеря веса составляет $< 0,03 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$; если $> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность границ зерен уменьшается, i_{corr} увеличивается на $20\% \pm 5\%$ (достигая $\sim 1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), а глубина питтинга увеличивается до $4 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

(4) Электролитные условия

При pH $< 2 \pm 0,1$ i_{corr} увеличивается на $30\% \pm 5\%$ (до $\sim 1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$); при NaCl $> 5\% \pm 0,1\%$ площадь точечной коррозии увеличивается на $20\% \pm 5\%$ (с $0,01 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$ до $0,012 \text{ мм}^2 \pm 0,001 \text{ мм}^2$).

(5) Шероховатость поверхности

$R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, i_{corr} остается низким; если $> 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, микротрещины увеличиваются и i_{corr} увеличивается на $10\% \pm 2\%$ (до $\sim 1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).
 i_{corr} образца WC12Co в pH $1 \pm 0,1$ H₂SO₄ составляет около $10^{-4} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, тогда как у WC10Ni (добавка Cr 3 C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$, размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) составляет всего $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, а коррозионная стойкость улучшается примерно в 1000 раз $\pm 10\%$.

8.4.1.4 Метод испытания скорости коррозии твердого сплава

Чтобы убедиться, что i_{corr} Для обеспечения точности ($\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) и надежности данных рекомендуются следующие стандартизированные методы испытаний:

(1) Оборудование

Использовалась трехэлектродная система, оснащенная высокоточной электрохимической рабочей станцией (точность потенциала $\pm 0,001 \text{ В}$, точность тока $\pm 10^{-9} \text{ А}$).

(2) Электролит

Используйте $3,5\% \pm 0,1\%$ NaCl или $0,1 \text{ М} \pm 0,01 \text{ М}$ H₂SO₄, диапазон pH $2-7 \pm 0,1$, температура

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

25°C ± 1°C.

(3) Параметры теста

Скорость сканирования 0,1 мВ/с ± 0,01 мВ/с, диапазон потенциала ± 0,25 В относительно E_{corr}, время испытания 30 мин ± 1 мин.

(4) Подготовка образца

Полировка до Ra < 0,05 мкм ± 0,01 мкм, площадь поверхности 1 см² ± 0,1 см², повторный тест ≥ 3 раз.

(5) Анализ данных

i_{corr} (точность ±10⁻⁷ А/см²) и E_{corr} (точность ±0,02 В) рассчитывались методом подгонки Тафеля, что обеспечивало повторяемость > 95% ± 2%.

i_{corr} WC10Ni (Ra < 0,05 мкм ± 0,01 мкм) в 3,5% ± 0,1% NaCl составляет приблизительно 10⁻⁶ А / см² ± 10⁻⁷ А/см², а E_{corr} составляет приблизительно 0,1 В ± 0,02 В. Результаты испытаний в высшей степени согласованы, что подтверждает надежность метода.

8.4.1.5 Инженерное применение скорости коррозии твердого сплава

Электрохимическое тестирование кривой Тафеля обеспечивает ключевые данные, подтверждающие инженерное применение твердого сплава:

(1) Судовое оборудование из цементированного карбида

WC10Ni (зерно 0,5 мкм ± 0,01 мкм, Cr з C з 0,5% ± 0,01%) в соляном тумане (NaCl 5% ± 0,1%) имеет i_{corr} около 10⁻⁶ А/см² ± 10⁻⁷ А/см² и скорость потери веса 0,05 мг/см² ± 0,01 мг/см², срок службы > 5 лет ± 0,5 года, лучше, чем WC10Co 3 года ± 0,3 года, коррозионная стойкость улучшена примерно на 66% ± 5%, что снижает затраты на техническое обслуживание буровых установок на шельфе примерно на 40% ± 5%.

(2) Химические клапаны из твердого сплава

WC8Co (добавлено Cr з C з 0,5% ± 0,01%, Ra < 0,05 мкм ± 0,01 мкм) имеет i_{corr} около 10⁻⁶ А/см² ± 10⁻⁷ А/см² в 0,1 М ± 0,01 МН₂ SO₄, глубину питтинга < 2 мкм ± 0,5 мкм и срок службы > 2 лет ± 0,2 года, что на 100% ± 5% больше, чем у неоптимизированного WC8Co (срок службы ~1 год ± 0,1 года), что соответствует требованиям по передаче кислых жидкостей.

(3) Оборудование для производства твердосплавной бумаги

WC10Ni (зерно 0,5 мкм ± 0,01 мкм, покрытие TiN 10 мкм ± 0,1 мкм) в сульфатном растворе i_{corr} < 10⁻⁶ А/см² ± 10⁻⁷ А/см², потеря веса 0,04 мг/см² ± 0,01 мг/см², срок службы > 4 лет ± 0,4 года, что лучше, чем у традиционных материалов (таких как нержавеющая сталь, срок службы ~2 года ± 0,2 года), и повышает долговечность оборудования и эффективность производства примерно на 50% ± 5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Эти случаи показывают, что электрохимические испытания эффективно направляют выбор материала и оптимизацию характеристик твердого сплава в коррозионных средах, обеспечивая надежность и экономичность инженерных приложений.

8.4.1.6 Расширение области применения и ограничения скорости коррозии твердого сплава

Тестирование кривой Тафеля расширяет потенциал применения твердого сплава в экстремальных коррозионных средах, таких как сильная кислота с $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ или высокая соленость с $\text{NaCl} > 10\% \pm 0,1\%$. I_{corr} образцов с покрытием WC10Ni-TiN остается $< 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, а скорость потери веса составляет $< 0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Однако при высоких температурах ($> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) или в атмосфере, содержащей SO_2 , на поверхности электрода может происходить окисление или загрязнение, и i_{corr} может увеличиваться на $15\% \pm 3\%$, что требует оптимизации в сочетании с испытаниями на высокотемпературное окисление. Тестовое оборудование относительно дорогое (около 100 000–200 000 юаней $\pm 10\,000$), что может стать ограничением для малых и средних предприятий, и затраты необходимо сократить за счет стандартизации и совместного использования оборудования.

8.4.1.7 Направление оптимизации и будущие перспективы скорости коррозии твердого сплава

Для повышения точности испытаний можно использовать динамическую электрохимическую импедансную спектроскопию (ЭИС, диапазон частот $10^{-2} - 10^5 \text{ Гц} \pm 10 \text{ Гц}$), а точность i_{corr} можно повысить до $\pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. В сверхкоррозионной среде ($\text{pH} < 1 \pm 0,1$) оптимизация электролита (например, добавление ингибиторов) может снизить i_{corr} до $5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. В будущем объединение анализа данных Тафеля с помощью искусственного интеллекта и модификации поверхности в наномасштабе ($R_a < 0,03 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) может повысить точность прогнозирования и распространить ее на экстремальные глубоководные среды и новые приложения энергетического оборудования.

Скорость коррозии измеряется с помощью кривой Тафеля (ASTM G59) $i_{\text{corr}} (< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2)$ и $E_{\text{corr}} (> 0,2 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$ относительно SCE), отражающей коррозионную стойкость цементированного карбида в кислотном и соляном тумане. Пассивирующие слои NiO и Cr_2O_3 (толщина $\sim 10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) снижают i_{corr} примерно на $50\%-90\% \pm 5\%$, а размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ дополнительно оптимизирует производительность. В тесте используется высокоточная трехэлектродная система (потенциал $\pm 0,001 \text{ В}$, ток $\pm 10^{-9} \text{ А}$), обеспечивающая поддержку данных для морских (срок службы $> 5 \text{ лет} \pm 0,5 \text{ лет}$), химических ($> 2 \text{ лет} \pm 0,2 \text{ года}$) и бумажных ($> 4 \text{ лет} \pm 0,4 \text{ года}$) применений. Такие факторы, как фаза связывания, Cr_3C_2 , размер зерна, электролит и шероховатость поверхности, должны быть всесторонне урегулированы. В будущем коррозионная стойкость может быть дополнительно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

улучшена с помощью EIS и наномодификации .

8.4.2 Испытание твердого сплава на высокотемпературную твердость и термический удар

8.4.2.1 Обзор принципов и методов испытаний на высокотемпературную твердость и термоудары твердого сплава

Высокотемпературная твердость ($> HV 1200 \pm 30$, $1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) и стойкость к термическому удару (трещина $< 0,05\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$) являются ключевыми показателями для оценки стабильности твердого сплава в экстремальных условиях (например, авиационные инструменты $> 5000\text{ часов} \pm 500\text{ часов}$, формы $> 10^5\text{ раз} \pm 10^4\text{ раз}$), которые количественно определяются с помощью испытания на твердость по Виккерсу (согласно ASTM E92) и испытания на термический удар (согласно ASTM E1876). Эти испытания предоставляют надежные данные о стойкости твердого сплава к высоким температурам, чтобы гарантировать, что он соответствует требованиям инженерных применений, таких как химическая промышленность (срок службы $> 2\text{ лет} \pm 0,2\text{ года}$), морская промышленность ($> 5\text{ лет} \pm 0,5\text{ года}$) и авиация ($> 5000\text{ часов} \pm 500\text{ часов}$). При высоких температурах фаза Co размягчается (твердость падает до $HV \sim 200 \pm 30$), что приводит к снижению общей твердости. Циклы термического удара (от 1000 °C до $25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$) вызывают термическое напряжение ($> 500\text{ МПа} \pm 50\text{ МПа}$), которое, в свою очередь, образует микротрещины. Стратегия оптимизации значительно улучшает высокотемпературные характеристики за счет введения Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) и покрытий (таких как TiN $5-10\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$) для повышения прочности границ зерен ($> 200\text{ МПа} \pm 20\text{ МПа}$) и термической стабильности. Испытательное оборудование включает в себя высокотемпературный твердомер Виккерса (нагрузка $10\text{ кг} \pm 0,1\text{ кг}$, точность ± 30) и печь термического удара (точность контроля температуры $\pm 1\text{ °C}$). Например, WC10Co, покрытый TiN ($5\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$), имеет твердость $> HV 1500 \pm 30$ при $1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ и длину трещины $0,03\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$ после 500 ± 50 термоударов. В этом разделе объединены принципы испытаний, анализ механизмов и инженерные случаи для всестороннего изучения методов оценки высокотемпературной твердости и характеристик термоудара, а также предоставлены научные рекомендации по оптимизации материалов.

8.4.2.2 Механизм и анализ высокотемпературной твердости и испытания на термоудары твердого сплава

Высокотемпературная твердость существенно зависит от размягчения фазы связи. При $1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ фаза Co WC10Co размягчается из-за скольжения решетки (ширина полосы скольжения $\sim 0,5\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$), и твердость падает до $HV 1000 \pm 30$. Добавление Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) повышает прочность границ зерен ($> 200\text{ МПа} \pm 20\text{ МПа}$) за счет диффузии Cr (концентрация границ зерен $\sim 5\% \pm 0,5\%$), и твердость увеличивается примерно на $30\% \pm 5\%$ ($> HV 1300 \pm 30$). Покрытие TiN (твердость $> HV 2000 \pm 50$, температура плавления $2950\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$) сохраняет твердость поверхности $> HV 1500 \pm 30$ при $1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокой термической стабильностью и низким коэффициентом теплового расширения ($\sim 9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), снижая смягчающий эффект матрицы. Размер зерна оптимизирован до $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, что дополнительно уменьшает площадь воздействия Co ($< 10\% \pm 1\%$), снижает потерю твердости примерно на $20\% \pm 5\%$ и повышает износостойкость при высоких температурах.

Трещины от термического удара возникают под воздействием термического напряжения, а их величина тесно связана с теплофизическими свойствами материала. Термическое напряжение можно оценить по формуле:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Где E — модуль Юнга ($\sim 600 \text{ ГПа} \pm 10 \text{ ГПа}$), α — коэффициент теплового расширения ($\sim 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), ΔT — разница температур ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), а расчетный результат составляет около $300\text{--}500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$. Распространение трещин следует закону Париса ($da/dN = C \cdot \Delta K^m$), мелкие зерна ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) снижают скорость распространения ($< 10^{-7} \text{ мм/цикл} \pm 10^{-8} \text{ мм/цикл}$), а покрытие TiN дополнительно подавляет рост трещин (длина $< 0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$). Наблюдения с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) показали, что трещины в основном были межзеренными (ширина $\sim 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), и трещины в образцах покрытия TiN были значительно уменьшены. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) обнаружила пик $\text{Ti } 2p$ ($\sim 455 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), что подтверждает термохимическую стабильность TiN и предоставляет микроскопические доказательства гарантии работоспособности в условиях высоких температур.

8.4.2.3 Анализ факторов, влияющих на высокотемпературную твердость и испытание на термоудары твердого сплава

На прочность при высоких температурах и стойкость к тепловому удару влияет множество факторов, поэтому их необходимо всесторонне оптимизировать:

(1) Cr_3C_2 дополнительная сумма

При $0,5\% \pm 0,01\%$ твердость $> \text{HV } 1500 \pm 30$, трещина термического удара $< 0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$; при $> 1\% \pm 0,01\%$ образование η -фазы приводит к снижению вязкости разрушения (K_{Ic}) на $10\% \pm 2\%$ (до $\sim 11 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), а трещина термического удара немного увеличивается до $0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

(2) Толщина покрытия

TiN составляет $5\text{--}10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, трещин мало, а скорость скалывания $< 5\% \pm 1\%$; если $> 20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, внутреннее напряжение увеличивается ($> 600 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$), скорость скалывания увеличивается на $10\% \pm 2\%$, а твердость снижается примерно на $5\% \pm 1\%$ (до $\text{HV } 1425 \pm 30$).

(3) Размер зерна

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,51 мкм ± 0,01 мкм , твердость высокая, а термоударное растрескивание низкое. Если размер зерна > 2 мкм ± 0,01 мкм , плотность границ зерен уменьшается , термоударное растрескивание увеличивается на 20% ± 5% (до 0,06 мм ± 0,01 мм), а твердость падает до HV 1100 ± 30.

(4) Разница температур

При $\Delta T > 500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ термическое напряжение увеличивается, а длина трещины увеличивается на 50% ± 5% (до 0,075 мм ± 0,01 мм); при $\Delta T < 300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ длина трещины составляет < 0,02 мм ± 0,01 мм.

(5) Теплопроводность

> 80 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К (например, WC10Ni-TiN), термическое напряжение рассеивается и трещин мало. Если термическое напряжение < 50 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К (например, WC10Co без покрытия), трещины увеличиваются на 15% ± 3% (до 0,055 мм ± 0,01 мм).

Например, твердость определенного WC12Co (без покрытия) падает до HV 800 ± 30 при 1000 °C ± 10 °C, а трещина достигает 0,08 мм ± 0,01 мм после 500 ± 50 термоударов ; в то время как твердость WC10Co (TiN 5 мкм ± 0,1 мкм , Cr 3 C 2 0,5% ± 0,01%) остается > HV 1500 ± 30, а трещина составляет всего 0,03 мм ± 0,01 мм, что значительно улучшает эксплуатационные характеристики .

8.4.2.4 Методы испытаний на высокотемпературную твердость и термоудары цементированного карбида

Для обеспечения точности испытаний и согласованности данных рекомендуются следующие стандартизированные методы:

(1) Испытание на твердость при высоких температурах

Используйте твердомер Виккерса, нагрузка 10 кг ± 0,1 кг, температура испытания 1000°C ± 10°C, выдержка 15 минут ± 1 минута, точность измерения твердости ±30, точки измерения ≥ 5 точек ± 1 точка.

(2) Испытание на термический удар

Использовалась печь термоудара с температурой цикла от 1000°C до 25°C ± 1°C, числом циклов > 500 раз ± 50 раз, скоростью нагрева и охлаждения 10°C/с ± 1°C/с и точностью регулирования температуры ±1°C.

(3) Измерение трещин

с использованием СЭМ (разрешение < 0,1 мкм ± 0,01 мкм) , а статистическая площадь составила > 10 областей ± 1 область.

(4) Подготовка образца

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Полировать до шероховатости поверхности $Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, размер образца $20 \times 20 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, повторить испытание ≥ 3 раз.

(5) Анализ данных

Рассчитывается среднее значение твердости (точность ± 30) и статистика длины трещин (стандартное отклонение $< 0,01 \text{ мм}$), что обеспечивает повторяемость $> 95\% \pm 2\%$.

При термических ударах длина трещины WC10Co (TiN $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) составила $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а твердость составила $> HV 1500 \pm 30$. Результаты испытаний были стабильными, что подтверждает надежность метода.

8.4.2.5 Инженерное применение испытаний твердого сплава на высокотемпературную твердость и термический удар

Испытания на высокотемпературную твердость и термоудары предоставляют ключевые данные о производительности для инженерных применений твердого сплава:

(1) Твердосплавные авиационные инструменты

WC10Co (TiN $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, Cr $3 \text{ C} \pm 0,5\% \pm 0,01\%$) имеет твердость $> HV 1500 \pm 30$ при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, трещину при термическом ударе $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и срок службы резания $> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$, что примерно на $66\% \pm 5\%$ выше, чем у WC10Co без покрытия (срок службы $\sim 3000 \text{ часов} \pm 300 \text{ часов}$), что соответствует требованиям высокопрочной авиационной обработки и снижает интенсивность отказов, вызванных термическими трещинами, примерно на $40\% \pm 5\%$.

(2) Твердый сплав, высокотемпературная форма

WC8Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) имеет твердость $> HV1300 \pm 30$ при $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, трещиностойкость при термическом ударе $< 0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и срок службы $> 10^5 \text{ times}$, что примерно на $60\% \pm 5\%$ больше, чем у неоптимизированного WC8Co (срок службы $\sim 6 \times 10^4 \text{ times} \pm 5 \times 10^3 \text{ times}$), тем самым повышая долговечность и эффективность производства пресс-формы.

(3) Компоненты газовой турбины из цементированного карбида

WC10Co (Al_2O_3 $10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) имеет твердость $> HV 1400 \pm 30$ при $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, трещину при термическом ударе $< 0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и срок службы $> 10^4 \text{ часов} \pm 10^3 \text{ часов}$, что лучше, чем у образца без покрытия (срок службы $\sim 7000 \text{ часов} \pm 700 \text{ часов}$), увеличение примерно на $43\% \pm 5\%$, что обеспечивает долговременную стабильность газовой турбины в условиях высоких температур.

Эти случаи показывают, что испытания на высокотемпературную твердость и термический удар обеспечивают научную основу для проектирования материалов и оптимизации применения твердого сплава, что значительно повышает технические характеристики.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.2.6 Расширение области применения и ограничения испытаний на высокотемпературную твердость и термический удар твердого сплава

Испытания на высокотемпературную твердость и термоудары расширяют возможности применения цементированного карбида в условиях сверхвысоких температур ($> 1100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) и термоциклических сред, таких как сопла газовых турбин (срок службы $> 1,5 \times 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов) и лопатки аэрокосмических двигателей (термоудары $> 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз). Образец с покрытием $\text{WC10Ni-Al}_2\text{O}_3$ имеет твердость $> \text{HV } 1400 \pm 30$ и трещины $< 0,02\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$ при $1100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, демонстрируя превосходную термостойкость. Однако при $\Delta T > 600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ или в атмосфере, содержащей SO_2 , покрытие может отслоиться или окислиться, а трещина увеличится до $0,05\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$, что необходимо сочетать с многослойными покрытиями (такими как $\text{TiN} / \text{Al}_2\text{O}_3$) для оптимизации. Стоимость испытательного оборудования относительно высока (примерно $150\,000\text{--}250\,000$ юаней $\pm 10\,000$ юаней), что может представлять проблему для малых и средних предприятий. Расходы необходимо снижать за счет совместного использования оборудования и стандартизации процессов.

8.4.2.7 Направление оптимизации и будущие перспективы испытаний на высокотемпературную твердость и термоудары твердого сплава

Для улучшения эксплуатационных характеристик можно использовать плазменное напыление (температура $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, толщина $10\text{--}15\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$), что позволит повысить твердость до $> \text{HV } 1600 \pm 30$ и уменьшить трещины от термического удара до $< 0,01\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$. При сверхвысоких температурах ($> 1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) оптимизация содержания Cr_3C_2 до $0,7\% \pm 0,01\%$ и добавление ZrO_2 ($5\% \pm 0,5\%$) позволяет поддерживать твердость $> \text{HV } 1500 \pm 30$ и длину трещин $< 0,015\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$. В будущем сочетание конечно-элементного анализа термических напряжений и технологии нанозерен (размер зерна $< 0,3\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$) может повысить точность прогнозирования и устойчивость к тепловым ударам, а также распространить эту технологию на экстремальные области применения в авиации и энергетическом оборудовании.

Высокотемпературная твердость ($> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) и стойкость к тепловому удару (трещины $< 0,05\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$) количественно определяются испытаниями ASTM E92 и E1876, отражающими стабильность твердого сплава в условиях высоких температур. Покрытие Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) и TiN ($5\text{--}10\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$) увеличивает твердость примерно на $30\% \pm 5\%$ ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) и прочность границ зерен ($> 200\text{ МПа} \pm 20\text{ МПа}$), а размер зерна $0,5\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$ уменьшает распространение трещин ($< 10^{-7}\text{ мм/цикл} \pm 10^{-8}\text{ мм/цикл}$). В тесте используется высокотемпературный твердомер (точность ± 30) и термошоковая печь (регулировка температуры $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) для обеспечения поддержки данных для авиации (срок службы > 5000 часов ± 500 часов), пресс-форм ($> 10^5$ раз $\pm 10^4$ раз) и газовых турбин ($> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов). Такие факторы, как содержание Cr_3C_2 , толщина покрытия, размер зерна, разница температур и теплопроводность, должны всесторонне

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контролироваться. В будущем плазменное покрытие и нанотехнологии могут дополнительно оптимизировать производительность.

Ссылки

- ASTM E9217. (2017). Стандартные методы испытаний на твердость по Виккерсу металлических материалов. ASTM International.
- ASTM E187615. (2015). Стандартный метод испытаний для динамического модуля Юнга, модуля сдвига и коэффициента Пуассона путем импульсного возбуждения вибрации. ASTM International.
- ASTM G5997. (2014). Стандартный метод испытаний для проведения потенциодинамических измерений поляризационного сопротивления. ASTM International.
- ISO 9227:2017. (2017). Испытания на коррозию в искусственных атмосферах — Испытания в соляном тумане. Международная организация по стандартизации.
- Чен, Л. и Ван, З. (2022). Влияние связующей фазы Ni на коррозионную стойкость цементированных карбидов на основе WC. *Химия и физика материалов*, 280, 125789.
- Ли, С. и Чжан, Ц. (2023). Исследование стойкости к окислению твердых сплавов при высоких температурах. *Материаловедение и технологии*, 41 (4), 567575.

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 :

Сравнительный анализ высокотемпературных форм из цементированного карбида и форм из вольфрамового сплава высокой плотности

Высокотемпературные формы используются в таких процессах, как горячая ковка, горячая экструзия, литье под давлением и формование стекла. Они должны сохранять высокую твердость, износостойкость и размерную стабильность при высоких температурах (800–1600 °C), высоких давлениях (50–200 МПа) и коррозионных средах. Высокотемпературные формы из цементированного карбида используют карбид вольфрама (WC) в качестве матрицы и широко используются в сценариях точного формования из-за их высокой твердости и коррозионной стойкости. Формы из высокоплотного вольфрамового сплава в основном изготавливаются из вольфрама (W) с никелем, железом или медью в качестве связующей фазы. Они имеют высокую плотность, высокую прочность и отличную устойчивость к высокотемпературной деформации, что делает их пригодными для применения в условиях больших нагрузок и высоких температур. У этих двух компаний есть общие технологии материалов в области авиационных сопел (стойкость к высокотемпературной эрозии), электродов электролитических ячеек (стойкость к коррозии) и компонентов газовых турбин (стойкость к износу), но их эксплуатационные характеристики и сферы применения имеют разные фокусы.

В следующей таблице сравниваются свойства материалов, процесс производства, эксплуатационные характеристики, области применения и ограничения этих двух материалов, что дает четкие рекомендации по выбору материала для высокотемпературной пресс-формы, а также особо подчеркиваются уникальные преимущества и области применения пресс-форм из высокоплотного вольфрамового сплава.

проект	Высокотемпературная форма из карбида (WC-Co)	Форма из вольфрамового сплава высокой плотности
Материал состав	WC 85–95 мас. %, Co 5–15 мас. %, опционально добавки TiC , Cr 3 C 2	W 90–97 мас. %, Ni/Fe/Cu 3–10 % (W-Ni-Fe или W-Ni-Cu)
Свойства материала	Твёрдость: HV1000–1800 Плотность: 14–15 г/см ³ Температура плавления: WC 2870°C, Co ограничивает термостойкость до ~1400°C Прочность на изгиб: 2000–2500 МПа Вязкость разрушения: K _{IC} 10–15 МПа·м ^{1/2} Теплопроводность: 80–100 Вт/м·К Коэффициент теплового расширения: 5–7×10 ⁻⁶ /°C	Твёрдость: HV300–600 Плотность: 17–19 г/см ³ Температура плавления: 3422°C, термостойкость >1600°C Прочность на изгиб: 800–1500 МПа Вязкость разрушения: K _{IC} 20–30 МПа·м ^{1/2} Теплопроводность: 100–150 Вт/м·К Коэффициент теплового расширения: 4,5–6×10 ⁻⁶ /°C
Процесс производства	Порошковая металлургия: ультрадисперсный порошок WC/Co (0,2–2 мкм) → холодное изостатическое прессование (ХИП) → вакуумное спекание (1350–1450°C) → прецизионная	Порошковая металлургия: порошок W/Ni/Fe → прессование или литье под давлением → жидкофазное спекание (1450–1550°C) → механическая обработка

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	механическая обработка (алмазное шлифование) Покрытие PVD/CVD (TiN , Al₂O₃ , 2–20 мкм) , термическое напыление APS/DGS (WC-Co, 50–500 мкм) Интерфейсная инженерия: градиентное покрытие, ионная имплантация	Модификация поверхности: цементация, азотирование или покрытие Cr/ CrN (5–50 мкм) , термическое напыление (например , WC-Co, 50–200 мкм) Термическая обработка: отжиг (800–1000°C) для повышения прочности.
Преимущества производительности	Высокая износостойкость: Твердость HV1000–1800, покрытие (типа TiAlN , Al₂O₃) снижает износ на 50-70%, подходит для условий высокого трения. При горячей ковке авиационных титановых сплавов износ снижается на 60%. Отличная коррозионная стойкость: он может противостоять кислоте, щелочи, окислению и коррозии расплавленного металла, а скорость коррозии снижается на 70%. В формах для формования стекла он может противостоять коррозии расплавленного стекла и увеличивает срок службы на 50%. Сохранение твердости при высоких температурах: твердость снижается на 10–15% при 1400°C, подходит для точного литья. Размерная стабильность: низкий коэффициент теплового расширения ($5-7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), отклонение размеров <0,01 мм, точность авиационных поковок повышается на 20%. Противоусталостные свойства: градиентное покрытие снимает термическое напряжение и увеличивает усталостную долговечность на 30%.	Чрезвычайно высокая температурная прочность: прочность на изгиб остается на уровне 800–1200 МПа при 1600 °C, с отличным сопротивлением ползучести, подходит для экструзии с большими нагрузками. Высокая ударная вязкость: трещиностойкость K_{IC} 20–30 МПа·м^{1/2}, высокая ударопрочность, скорость образования трещин при ударе снижена на 60%. Превосходная стойкость к термической усталости: высокая теплопроводность (100–150 Вт/ м· К) , термические трещины уменьшаются на 50%, а усталостная долговечность увеличивается на 30%. Высокая плотность и устойчивость к деформации: плотность 17-19 г/см³ , степень деформации <0,1%, подходит для литья под высоким давлением. Хорошая обрабатываемость: можно обрабатывать сложные формы, а производственный цикл сокращается на 15–20%.
ограничение	Низкая вязкость (K_{IC} 10–15 МПа·м^{1/2}) , склонен к растрескиванию Высокая плотность (14–15 г/см³) и тяжелый Высокая себестоимость производства (оборудование 10–30 млн юаней, пресс-форма 50–500 000 юаней) Температурная стойкость ограничена фазой Co (<1400°C)	Низкая твердость (HV 300-600), недостаточная износостойкость, требуется поверхностное упрочнение Очень высокая плотность (17–19 г/см³) , что увеличивает вес Стоимость вольфрамового ресурса высока (500 000–800 000 юаней за тонну). Слабая коррозионная стойкость, требуется защитное покрытие
Применения использование	Авиация и космонавтика: штампы для горячей иковки (поковки из титанового сплава, сплавов на основе никеля, 800–1200 °C), штампы для горячей экструзии (конструкционные детали	Авиация и космонавтика: высокотемпературные экструзионные штампы (высокотемпературные сплавы, титановые сплавы, 1200–1600 °C), штампы для горячейковки (крупные авиационные

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

	аэрокосмической промышленности, 1000–1300 °С) Автомобилестроение: литьевые формы (детали из алюминиевого сплава, магниевого сплава, 600–800°С), штампы горячей штамповки (пластины из высокопрочной стали, 700–900°С) Энергетика: штампы горячейковки для зубчатых передач ветряных турбин (заготовки шестерен 42CrMo, 800–1100°С), штампы горячейэкструзии для компонентов атомной энергетики (1000–1200°С) Электронная промышленность: формы для литья стекла (оптическое стекло, экраны мобильных телефонов, 1000–1300°С), формы для корпусирования полупроводников (800–1000°С) Металлургическая промышленность: штампы для горячей штамповки цветных металлов (медь, алюминиевые сплавы, 600–900°С) Корпус: штамп для горячей штамповки из авиационного титанового сплава, покрытие PVD-TiN , срок службы увеличен на 40%, эффективность формовки +20%	компоненты, 1000–1400 °С) Энергетика: штампы для горячейэкструзии для компонентов атомной энергетики (трубы из циркониевого сплава, 1000–1400 °С), сверхпрочные штампы для горячейковки заготовок шестерен ветровых турбин (800–1200 °С) Автомобилестроение: сверхпрочные штампы для горячей штамповки (сверхпрочная сталь, 900–1100°С) Металлургическая промышленность: мощные пресс-формы для горячейэкструзии цветных металлов (медь, алюминиевые сплавы, 800–1200°С) Оборонная промышленность: штампы для формовки броневойных сердечников (1000–1300°С), штампы для горячейковки высокоплотных компонентов Корпус: горячаяэкструзионная матрица для труб из циркониевого сплава для ядерной энергетики, покрытие CrN , термостойкость 1400°С, срок службы увеличен на 30%
Эффект высокотемпературной плесени	Износостойкость: Покрытия (например, Al₂O₃ , TiAlN) снижают износ на 50–70% и увеличивают срок службы до 5000–8000 раз. При горячейковке авиационных титановых сплавов (1000°С, 100 МПа) скорость завала снижается на 60%, а срок службы увеличивается до 8000 раз, что лучше, чем у традиционных пресс-форм. Коррозионная стойкость: Антиокислительная, кислотная, щелочная и коррозия расплавленного металла, скорость коррозии снижается на 70%, а цикл обслуживания увеличивается на 30%. В формовании стекла (1200°С) устойчив к коррозии расплавленного стекла, срок службы увеличивается на 50%, на поверхности не образуются явные язвы. Высокая термостойкость: твердость остается HV900–1500 при 1400°С, скорость деформации <0,1%. В пресс-формах для корпусирования полупроводников (1000°С) высокая	Высокая термостойкость: скорость деформации <0,1% при 1600°С, прочность на изгиб сохраняется на уровне 800–1200 МПа, срок службы 4000–6000 раз. Приэкструзии труб из циркониевого сплава для ядерной энергетики (1400°С, 150 МПа) срок службы составляет 6000 раз, что лучше, чем у обычных стальных форм (2000 раз). Сопротивление термической усталости: Высокая теплопроводность (100–150 Вт/ м· К) снижает термическое растрескивание на 50% и увеличивает усталостную долговечность на 30%. При тяжелой горячей штамповке (1100°С) частота возникновения трещин снижается с 12% до 5%. Ударная вязкость: прочность K_{IC} 20–30 МПа·м^{1/2} , скорость образования трещин при ударе снижается на 60%. При горячейковке авиационных жаропрочных сплавов (1200°С, 200 МПа) штамп не трескается, а срок службы достигает 5000 раз. Точность размеров: отклонение размеров <0,015 мм,

термостойкость обеспечивает непрерывную работу в течение 5000 раз. Усталостная стойкость: Градиентное покрытие снимает термическое напряжение, увеличивает усталостную долговечность на 30% и снижает термические трещины на 50%. При литье под давлением автомобильного алюминиевого сплава (700°C) долговечность увеличивается с 4000 раз до 6000 раз. Точность размеров: отклонение размеров <0,01 мм, деформация теплового расширения <0,05%, а процент годности готовой продукции увеличился на 25% (90%→95%). Эффективность формования: Высокая твердость и износостойкость сокращают техническое обслуживание и повышают эффективность на 20–25%.	деформация теплового расширения <0,08%, а процент годности готовой продукции увеличился на 20% (85%→90%). Эффективность формования: Высокая плотность и устойчивость к деформациям сокращают время простоя и увеличивают эффективность на 15-20%. Износостойкость (требуется покрытие): Покрытие CrN или WC-Co снижает износ на 40-50% и увеличивает срок службы на 20%. При формовании бронебойных сердечников (1300°C) срок службы формы покрытия увеличивается в 3000-4000 раз.
--	--

проиллюстрировать:

Состав материала: Обзор химического состава твердого сплава и высокоплотного вольфрамового сплава.

Свойства материала: сравните ключевые параметры, такие как твердость, плотность, температура плавления, прочность и т. д.

Производственный процесс: обобщает процессы формования, спекания, модификации поверхности и т. д.

Эксплуатационные характеристики и ограничения: проанализируйте преимущества и недостатки износостойкости, термостойкости, стоимости и т. д.

Сценарии применения: перечислите варианты использования и случаи в аэрокосмической, энергетической, автомобильной, металлургической, оборонной и других областях.

Эффект высокотемпературной формы: количественная оценка эффектов износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости к высоким температурам, усталостной прочности, точности размеров, эффективности формования и т. д.

Сравнительный анализ и обобщение данных по высокотемпературным формам из цементированного карбида и формам из вольфрамового сплава высокой плотности

Высокотемпературные формы из цементированного карбида и формы из вольфрамового сплава высокой плотности имеют свои преимущества в области высокотемпературного формования и подходят для различных условий работы и сценариев применения. Формы WC-Co обладают превосходными эксплуатационными характеристиками при точной горячей ковке, литье под давлением и формовании стекла благодаря своей высокой твердости (HV1000–1800) и превосходной износостойкости (скорость износа снижена на 50–70%). Они

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

особенно подходят для сцен с температурами ниже 1400 °C, высокой точностью (размерное отклонение <0,01 мм) и коррозионной стойкостью. Его покрытие PVD/CVD (например, TiN, Al₂O₃) и технология высокоэнергетического термического напыления (например, APS/DGS) значительно улучшают эффект высокотемпературных форм. Например, срок службы форм горячейковки из авиационного титанового сплава достигает 8000 раз, а эффективность увеличивается на 25%. Отличная коррозионная стойкость (скорость коррозии снижена на 70%) делает его устойчивым к эрозии расплавленными материалами при формовании стекла и корпусировании полупроводников, а цикл обслуживания продлевается на 30%. Однако формы WC-Co имеют низкую прочность (K_{IC} 10–15 МПа·м^{1/2}), склонны к растрескиванию при сильном ударе и имеют высокую стоимость производства (50 000–500 000 юаней), что ограничивает их применение в крупногабаритных формах.

Высокоплотные вольфрамовые сплавы известны своей чрезвычайно высокой температурной прочностью (скорость деформации <0,1% при 1600 °C) и высокой вязкостью (K_{IC} 20–30 МПа·м^{1/2}) и подходят для тяжелых условий, высокотемпературной экструзии и горячейковки. Его высокая плотность (17–19 г/см³) и антидеформационные свойства гарантируют, что матрица может стабильно работать под высоким давлением (150–200 МПа). Например, срок службы экструзионной матрицы труб из ядерного циркониевого сплава составляет до 6000 раз, а эффективность увеличивается на 20%. Высокая теплопроводность (100–150 Вт/м·K) снижает термическое растрескивание на 50% и подходит для циклических условий нагрузки, таких как горячая штамповка автомобилей с большой нагрузкой.

Однако высокоплотные вольфрамовые сплавы имеют низкую твердость (HV300-600), недостаточную износостойкость и требуют покрытий CrN или WC-Co для улучшения характеристик, а также слабую коррозионную стойкость (требуется защитные покрытия). Ресурсы вольфрама ограничены (500 000-800 000 юаней за тонну), а чрезвычайно высокая плотность увеличивает вес и стоимость, ограничивая его применение в легких формах.

Предложения по выбору материала для форм из твердого сплава, предназначенных для высоких температур, и форм из вольфрамового сплава высокой плотности

Прецизионные, небольшие формы (например, авиационные поковки, стекольные формы, литье под давлением в автомобильной промышленности)

Твердосплавные штампы превосходны, обладают высокой износостойкостью, точностью и длительным сроком службы (5000-8000 циклов).

Формы для тяжелых условий эксплуатации, работы при высоких температурах (например, высокотемпературная экструзия, компоненты ядерной энергетики, литье бронебойных сердечников)

Более подходящими являются формы из вольфрамового сплава высокой плотности, обладающие превосходной устойчивостью к деформации и высокой прочностью.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Баланс стоимости и срока службы

Формы из WC-Co требуют низких затрат на техническое обслуживание и подходят для высокочастотного использования; формы из вольфрамового сплава высокой плотности обладают хорошей обрабатываемостью и подходят для больших нагрузок, но требуют упрочнения поверхности.

Аналогично техническим требованиям к авиационным соплам (покрытия, устойчивые к высокотемпературной эрозии), электродам электролизеров (покрытия, устойчивые к коррозии) и компонентам газовых турбин (покрытия, устойчивые к износу), в обоих случаях для оптимизации производительности используются модификация поверхности и разработка интерфейса (например, градиентные покрытия, ионная имплантация).

В будущем, благодаря разработке нанозернистого WC-Co, многослойных композитных покрытий, процессов низкотемпературного спекания, износостойких покрытий из высокоплотных вольфрамовых сплавов и технологий аддитивного производства, высокотемпературные формы еще больше улучшат свои эксплуатационные характеристики и экономичность в таких областях, как авиация, энергетика, автомобилестроение, металлургия, национальная оборона и т. д., оказывая надежную поддержку эффективному и устойчивому промышленному производству.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение :

Сравнительный анализ высокотемпературных форм из цементированного карбида и форм из сплава титана, циркония и молибдена (TZM)

Высокотемпературные формы подвергаются воздействию экстремально высоких температур (800–1800 °C), высоких давлений (50–200 МПа) и коррозионных сред в таких процессах, как горячая ковка, горячая экструзия, литье под давлением и формование стекла, требуя от материалов превосходной твердости, износостойкости, высокой термостойкости и размерной стабильности. Высокотемпературные формы из карбида (WC-Co) широко используются в области точного формования из-за их высокой твердости и коррозионной стойкости; формы из сплава титана, циркония и молибдена (TZM) подходят для сверхвысоких температур и больших форм благодаря своей превосходной высокотемпературной прочности и стойкости к ползучести. У этих двух материалов общие технологии в области авиационных сопел (стойкость к высокотемпературной эрозии), электродов электролитических ячеек (стойкость к коррозии), зубчатых фрез ветроэнергетики (стойкость к износу) и так далее.

В этой статье представлен полный справочник по выбору материала путем сравнения свойств материала, производственных процессов, преимуществ производительности, областей применения, ограничений и эффектов высокотемпературной формы двух. Содержание эффектов высокотемпературной формы было расширено за счет включения подробных количественных данных и случаев с точки зрения износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости к высоким температурам, усталостной прочности, точности размеров и эффективности формования. Области применения охватывают аэрокосмическую, энергетическую, автомобильную, электронную, металлургическую и другие отрасли.

таблица пресс-форм из твердого сплава для высокотемпературных литевых форм и пресс-форм из титано-цирконие-молибденового сплава (TZM)

проект	Высокотемпературная форма из карбида (WC-Co)	Форма для сплава титана, циркония и молибдена (TZM)
Материал	WC 85–95 мас. %, Co 5–15 мас. %, опционально	Mo 99–99,5 мас. %, Ti 0,4–0,55 %, Zr 0,06–0,12 %, следы C.
состав	добавки TiC , Cr 3 C 2	
Свойства материала	Твёрдость: HV1000–1800	Твёрдость: HV250–350
	Плотность: 14–15 г/см³	Плотность: 10,2 г/см³
	Температура плавления: WC 2870°C, Co ограничивает термостойкость до ~1400°C	Температура плавления: ~2620°C, термостойкость>1600°C
	Прочность на изгиб: 2000–2500 МПа	Прочность на изгиб: 800–1200 МПа
	Вязкость разрушения: K _{IC} 10–15 МПа·м ^{1/2}	Вязкость разрушения: K _{IC} 15–20 МПа·м ^{1/2}
	Теплопроводность: 80–100 Вт/м·К	Теплопроводность: 110–140 Вт/м·К
Процесс производства	Кэффициент теплового расширения: 5–7×10 ⁻⁶ /°C	Кэффициент теплового расширения: 5,3–5,5×10 ⁻⁶ /°C
	Порошковая металлургия: ультрадисперсный порошок WC/Co (0,2–2 мкм) → холодное	Порошковая металлургия: порошок Mo/Ti/Zr → горячее изостатическое прессование (HIP, 1700–

	изостатическое прессование (ХИП) → вакуумное спекание (1350–1450°C) → прецизионная механическая обработка (алмазное шлифование) Покрытие PVD/CVD (TiN , Al₂O₃ , 2–20 мкм) , термическое напыление APS/DGS (WC-Co, 50–500 мкм) Интерфейсная инженерия: градиентное покрытие, ионная имплантация	2000°C) → ковка/прокатка → обработка на станках с ЧПУ Модификация поверхности: оксидное покрытие (например, MoSi₂ , 10–50 мкм) или азотирование Термическая обработка: отжиг (1000–1200°C) для повышения прочности.
Преимущества	Высокая износостойкость: твердость HV1000–1800, покрытие (например, TiAlN , Al₂O₃) снижает износ на 50–70%, подходит для условий высокого трения (например, горячая ковка, литье под давлением). При горячей ковке авиационного титанового сплава скорость износа снижается на 60%, а срок службы штампа достигает 8000 раз. Отличная коррозионная стойкость: устойчив к кислоте, щелочи, окислению и коррозии расплавленного металла, при этом скорость коррозии снижается на 70%, а цикл обслуживания увеличивается на 30%. В формах для формования стекла устойчив к коррозии расплавленного стекла, а срок его службы увеличивается на 50%. Сохранение твердости при высоких температурах: технология покрытия повышает термостойкость до 1400 °C, при этом твердость снижается всего на 10–15 %, что делает его пригодным для точного формования (например, оптического стекла, 1000–1300 °C). Размерная стабильность: Низкий коэффициент термического расширения (5–7×10⁻⁶ /°C), отклонение размеров <0,01 мм, что обеспечивает высокую точность формовки и повышает точность авиационных поковок на 20%. Усталостная стойкость: технология интерфейсов (например, градиентное покрытие) снимает термическое напряжение и увеличивает усталостную долговечность на 30%, что делает ее пригодной для условий циклической нагрузки (например, литье под давлением в автомобилях).	Чрезвычайно высокая температурная прочность: прочность на изгиб сохраняется на уровне 800–1000 МПа при 1600–1800°C, без ползучести, подходит для сверхвысокотемпературной экструзии. Высокотемпературная сплавная матрица работает при 1600°C со сроком службы 6000 раз. Превосходная стойкость к термической усталости: Высокая теплопроводность (110–140 Вт/ м· К) обеспечивает быстрое рассеивание тепла, что снижает образование термических трещин на 60% и увеличивает усталостную долговечность на 25%. В горячих изостатических пресс-формах он обладает исключительной стойкостью к термическому удару. Высокая ударная вязкость: вязкость разрушения K_{IC} 15–20 МПа·м^{1/2}, высокая ударная вязкость, подходит для условий высоких напряжений (например, высокотемпературной штамповки), скорость образования трещин при ударе снижена на 50%. Хорошая обрабатываемость: возможна обработка на станках с ЧПУ сложных форм, а цикл изготовления пресс-форм сокращается на 20%, что подходит для больших пресс-форм (например, пресс-форм для экструзии в атомной энергетике). Размерная стабильность: коэффициент теплового расширения 5,3–5,5×10⁻⁶ /°C, отклонение размеров <0,02 мм, подходит для крупногабаритного высокотемпературного формования (например, керамических форм).
ограничение	Низкая вязкость (K_{IC} 10–15 МПа·м^{1/2}) ,	Низкая твердость (HV250–350), недостаточная

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	склонен к растрескиванию Высокая плотность (14–15 г/см³) и тяжелый Высокая себестоимость производства (оборудование 10–30 млн юаней, пресс-форма 50–500 000 юаней) Температурная стойкость ограничена фазой Co (<1400°C)	износостойкость Легко окисляется (>600°C), требует защитного покрытия Высокая стоимость молибденовых ресурсов (200 000–300 000 юаней за тонну) Хрупкость при низких температурах, требуется эксплуатация при высоких температурах
Применения и использование	Авиация и космонавтика: штампы для горячейковки (поковки из титанового сплава, сплавов на основе никеля, 800–1200 °C), штампы для горячей экструзии (конструкционные детали аэрокосмической промышленности, 1000–1300 °C) Автомобилестроение: литьевые формы (детали из алюминиевого сплава, магниевого сплава, 600–800°C), штампы горячей штамповки (пластины из высокопрочной стали, 700–900°C) Энергетика: штампы горячейковки для зубчатых передач ветряных турбин (заготовки шестерен из 42CrMo, 800–1100°C), штампы горячейэкструзии для компонентов атомной энергетики (1000–1200°C) Электронная промышленность: формы для литья стекла (оптическое стекло, экраны мобильных телефонов, 1000–1300°C), формы для корпусирования полупроводников (800–1000°C) Металлургическая промышленность: штампы для горячей штамповки цветных металлов (медь, алюминиевые сплавы, 600–900°C) Корпус: штамп для горячей штамповки из авиационного титанового сплава, покрытие PVD-TiN, срок службы увеличен на 40%, эффективность формовки +20%	Аэрокосмическая промышленность: высокотемпературные экструзионные матрицы (высокотемпературные сплавы, титановые сплавы, 1200–1600 °C), горячеизостатические прессовальные матрицы (диски авиационных турбин, 1400–1800 °C) Энергетическая промышленность: высокотемпературные печи (вакуумные печи спекания, печи термической обработки, >1600°C), ядерная энергетика, высокотемпературные экструзионные матрицы (трубы из циркониевого сплава, 1200–1500°C) Автомобилестроение: штампы для высокотемпературной горячей штамповки (сверхвысокопрочная сталь, 900–1100°C) Электронная промышленность: высокотемпературные керамические формовочные матрицы (цирконий, нитрид кремния, 1400–1600°C) Металлургическая промышленность: кристаллизаторы для непрерывного литья заготовок из жаропрочных сплавов (сплавы на основе никеля, 1300–1600°C) Корпус: экструзионная матрица из высокотемпературного сплава, покрытие MoSi₂, термостойкость 1600 °C, срок службы увеличен на 30 %, эффективность формования +15 %
Эффект высокотемпературной плесени	Износостойкость: Покрытия (например, Al₂O₃, TiAlN) снижают износ на 50–70% и увеличивают срок службы штампа в 5000–8000 раз. При горячейковке авиационных титановых сплавов (1000°C, 100 МПа) скорость износа снижается на 60%, а срок службы увеличивается до 8000 раз, что лучше, чем у традиционных штампов (4000 раз).	Высокая термостойкость: отсутствие ползучести при 1600–1800°C, прочность на изгиб сохраняется на уровне 800–1000 МПа, срок службы пресс-формы 4000–6000 раз. При высокотемпературной экструзии сплава (1600°C, 150 МПа) скорость деформации <0,2%, срок службы до 6000 раз, лучше, чем у обычной молибденовой пресс-формы (3000 раз). Сопротивление термической усталости: Высокая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Коррозионная стойкость: Антиокислительная, кислотная, щелочная и коррозия расплавленного металла, скорость коррозии снижается на 70%, а цикл обслуживания увеличивается на 30%. При формовании стекла (1200°C, расплавленное стекло) срок службы коррозионной стойкости увеличивается на 50%, и на поверхности формы не появляются явные язвы. Высокая термостойкость: твердость остается на уровне HV900–1500 при 1400°C, а скорость деформации составляет <0,1%, что подходит для точного литья. В пресс-формах для корпусирования полупроводников (1000°C) высокая термостойкость обеспечивает непрерывную работу в течение 5000 раз. Усталостная стойкость: Градиентное покрытие снимает термическое напряжение, усталостная долговечность увеличивается на 30%, а термические трещины сокращаются на 50%. При литье под давлением автомобильных алюминиевых сплавов (700°C, циклическая нагрузка) срок службы пресс-формы увеличивается с 4000 раз до 6000 раз. Точность размеров: Отклонение размеров <0,01 мм, деформация теплового расширения <0,05%, подходит для высокоточного литья. При формовании оптического стекла (1300°C) процент готовых изделий, подходящих для проверки, увеличился на 25% (90%→95%). Эффективность формовки: Высокая твердость и износостойкость сокращают необходимость в обслуживании пресс-формы и повышают эффективность производства на 20-25%. При горячей ковке шестерен ветряных турбин (1100°C) производительность за одну смену увеличилась со 100 до 125 штук.	теплопроводность (110–140 Вт/ м· К) снижает термическое растрескивание на 60% и увеличивает усталостную долговечность на 25%. В горячих изостатических пресс-формах (1700°C, циклический нагрев) частота термического растрескивания снижается с 10% до 3%. Ударопрочность: прочность K_IC 15–20 МПа·м^{1/2}, скорость образования трещин при ударе снижена на 50%. При горячей штамповке сверхвысокопрочной стали для автомобилей (1000°C, 200 МПа) штамп не трескается, а срок службы достигает 5000 раз. Размерная точность: размерное отклонение <0,02 мм, деформация теплового расширения <0,1%, подходит для крупногабаритного формования. При керамическом формовании (1600°C, цирконий) процент годных готовых изделий увеличился на 20% (85%→90%). Эффективность формования: Высокая теплопроводность и сопротивление ползучести сокращают время простоя и повышают эффективность производства на 15-20%. При экструзии труб из ядерного циркониевого сплава (1400°C) производительность за одну смену увеличилась с 80 до 95 штук. Стойкость к окислению (требуется покрытие): Покрытие MoSi₂ устойчиво к окислению, скорость окисления снижается на 80% при 600–1600 ° С. В высокотемпературных печах (1700 ° С) срок службы покрытых форм увеличивается от 2000 до 4000 раз.
--	---

проиллюстрировать:

Состав материала: Обзор химического состава WC-Co и TZM.

Свойства материала: сравните ключевые параметры, такие как твердость, плотность, температура плавления, прочность и т. д.

Производственный процесс: обобщает процессы формования, спекания, модификации

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности и т. д.

Преимущества в эксплуатации: сохранение подробных описаний износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости к высоким температурам, усталостной прочности, размерной стабильности и т. д.

Области применения и использования: охватывает конкретные области применения в аэрокосмической, энергетической, автомобильной, электронной, металлургической и других областях, включая корпуса.

Эффект высокотемпературной формы: добавлены подробные количественные данные и случаи, такие как износостойкость, коррозионная стойкость, устойчивость к высоким температурам, усталостная прочность, размерная точность и эффективность формования.

Сравнение и анализ высокотемпературных форм из цементированного карбида и форм из сплава титана, циркония и молибдена (TZM)

Формы из карбида высокотемпературного сплава (WC-Co) и сплава титана-циркония-молибдена (TZM) продемонстрировали уникальные преимущества в области высокотемпературного формования, отвечая строгим требованиям многих отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая, энергетическая, автомобильная, электронная и металлургическая. Формы из WC-Co обладают выдающимися характеристиками в прецизионной формовке с высокой твердостью (HV1000–1800) и превосходной износостойкостью (скорость износа снижена на 50–70%), подходят для рабочих условий при температурах ниже 1400 °C, высокой точностью (размерное отклонение <0,01 мм) и коррозионной стойкостью. Его покрытие PVD/CVD (например, TiAlN, Al₂O₃) и технология высокоэнергетического термического напыления (например, APS/DGS) значительно улучшают эффект высокотемпературных форм. Например, ресурс пресс-форм для горячей штамповки из авиационного титанового сплава при температуре 1000°C составляет 8000 раз, что превышает показатели традиционных пресс-форм (4000 раз), а эффективность производства увеличивается на 25%.

Отличная коррозионная стойкость (скорость коррозии снижена на 70%) и усталостная прочность (усталостная долговечность +30%) делают его превосходным для формования стекла (стойкость к коррозии расплавленного стекла, долговечность +50%) и литья под давлением в автомобильной промышленности (срок службы увеличен с 4000 до 6000 раз). Однако формы из WC-Co имеют низкую прочность (K_{IC} 10–15 МПа·м^{1/2}), склонны к растрескиванию при сильном ударе, а высокая плотность (14–15 г/см³) и стоимость производства (50 000–500 000 юаней) ограничивают применение крупногабаритных форм.

Формы из сплава TZM известны своей чрезвычайно высокой температурной прочностью (1600–1800 °C без ползучести) и термической усталостной прочностью (снижение термических трещин на 60%) и подходят для сверхвысоких температур и больших сценариев формования (таких как высокотемпературная экструзия и горячее изостатическое прессование). Его высокая теплопроводность (110–140 Вт/м·К) и прочность (K_{IC} 15–20

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

МПа·м^{1/2}) эффективно противостоят термическому удару и механическому напряжению. Например, срок службы пресс-форм из высокотемпературного сплава при 1600 °C составляет 6000 раз, а эффективность увеличивается на 15%. TZM продемонстрировал превосходные эффекты высокотемпературной формы при экструзии труб из циркониевого сплава для ядерной энергетики (выход +15%) и формовании керамики (коэффициент квалификации +20%). Покрытие MoSi₂ дополнительно повышает стойкость к окислению (скорость окисления снижается на 80%). Однако TZM имеет низкую твердость (HV250–350), недостаточную износостойкость, требует защитного покрытия и легко окисляется выше 600°C, что увеличивает стоимость. Дефицит ресурсов молибдена (от 200 000 до 300 000 юаней за тонну) также подтолкнул к росту цен на пресс-формы.

между формами из цементированного карбида вольфрама и формами из сплава титана, циркония и молибдена (TZM)

Прецизионные, небольшие формы (например, авиационные поковки, стекольные формы, литье под давлением в автомобильной промышленности)

Формы из WC-Co отличаются превосходной износостойкостью, точностью и коррозионной стойкостью, а также длительным сроком службы (5000–8000 раз).

Сверхвысокотемпературные, большие формы (например, высокотемпературная экструзия, горячее изостатическое прессование, керамическое формование)

Более подходящими являются формы TZM, обладающие превосходной устойчивостью к высоким температурам и термической усталости, а также подходящие для сложных форм.

Баланс стоимости и срока службы

Формы WC-Co подходят для высокочастотного использования и имеют низкие затраты на обслуживание; формы TZM обладают хорошей обрабатываемостью, но требуют антиоксидантной защиты. Подобно техническим требованиям авиационных сопел (высокотемпературные эрозионно-стойкие покрытия), электродов электролитических ячеек (коррозионно-стойкие покрытия) и зубчатых колес ветроэнергетических установок (износостойкие покрытия), оба полагаются на модификацию поверхности и проектирование интерфейса (например, градиентные покрытия и ионная имплантация) для оптимизации производительности.

В будущем, благодаря разработке нанозернистого WC-Co, многослойных композитных покрытий, процессов низкотемпературного спекания, а также антиокислительных покрытий и технологии аддитивного производства TZM, высокотемпературные формы еще больше улучшат производительность и экономичность во многих областях, оказывая надежную поддержку эффективному и устойчивому промышленному производству.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение :

Обзор компонентов газовой турбины из цементированного карбида

1. История вопроса и значение компонентов газовых турбин из цементированного карбида

Газовые турбины являются основным силовым оборудованием в области аэрокосмической промышленности, производства энергии и т. д. Их ключевые компоненты (такие как лопатки, сопла, камеры сгорания и уплотнения) должны работать стабильно в условиях высоких температур (1000–1600 °C), высокого давления (10–30 МПа), высокоскоростного вращения (10 000–50 000 об/мин) и коррозионных сред. Компоненты газовых турбин из цементированного карбида изготавливаются из цементированного карбида на основе карбида вольфрама (WC-Co) в качестве основного материала. Благодаря высокой твердости, износостойкости, высокой термостойкости и коррозионной стойкости он стал идеальным выбором для износостойких, коррозионно-стойких покрытий или высоконагруженных компонентов в газовых турбинах. Эти компоненты продлевают срок службы газовых турбин (10 000–30 000 часов) и повышают эффективность сгорания (до 40–60%) за счет повышения долговечности и эффективности.

Применение твердого сплава (WC-Co) в газовых турбинах в основном сосредоточено в поверхностных покрытиях и специальных износостойких деталях, что имеет нечто общее с технологией материалов в области авиационных сопел (стойкость к высокотемпературной эрозии), электродов электролитических ячеек (стойкость к коррозии), зубчатых фрез ветроэнергетических установок (стойкость к износу) и т. д. Компоненты газовых турбин должны выдерживать экстремальные условия работы, такие как высокотемпературная газовая эрозия, окисление, усталость и износ, поэтому твердый сплав значительно повышает производительность за счет передовых производственных процессов (таких как технология нанесения покрытий, проектирование интерфейсов) и оптимизация материалов (например, нанозерна). Эти технологии не только отвечают высоким требованиям к производительности авиационных двигателей (таких как GE9X), но и оказывают ключевую поддержку устойчивому развитию генерации энергии и промышленных газовых турбин.

2. Свойства материалов деталей газовых турбин из цементированного карбида

Компоненты газовых турбин из цементированного карбида обычно изготавливаются на основе WC-Co с типичным составом WC 85–95 мас. %, Co 5–15 мас. % и могут быть легированы добавками (такими как Cr, C, Ti) для оптимизации производительности. Его основные характеристики включают:

Высокая твердость

HV1000–1800, что значительно превосходит сплавы на основе никеля (HV300–500), обеспечивая износостойкость и целостность поверхности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высокая температурная стабильность

Температура плавления WC составляет 2870°C, а фаза Co остается стабильной ниже 1400°C. Покрытия (например, Al_2O_3) дополнительно улучшают термостойкость.

Износостойкость

благодаря нанозернам (размер частиц WC 0,2–1 мкм) и покрытиям (например, TiAlN), подходящим для наконечников лопаток и горловин сопел.

Устойчивость к коррозии

Устойчив к окислению, сульфидированию и кислотной коррозии в топливном газе (pH 2–5), снижает скорость коррозии на 50–70 % и продлевает срок службы компонентов.

Эффективность против усталости

Содержание Co (10–15 мас. %) обеспечивает вязкость разрушения (K_{IC} 10–15 МПа·м^{1/2}), а также стойкость к термической усталости и механическим ударам.

Теплопроводность

80–100 Вт/м·К, что способствует отводу тепла и снижает термическую нагрузку.

Эти свойства в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к авиационным соплам (стойкость к эрозии), электродам электролитических ячеек (стойкость к коррозии) и высокотемпературным формам (стойкость к износу), что свидетельствует о превосходстве твердого сплава в экстремальных условиях.

3. Производственный процесс

Изготовление деталей газовых турбин из цементированного карбида требует обеспечения микроструктурной однородности, точности поверхности ($R_a < 0,4$ мкм) и прочности сцепления покрытия (> 50 МПа). Основные процессы включают:

Приготовление порошка

ультратонкий порошок WC (размер частиц 0,2–1 мкм) и порошок Co высокой чистоты ($> 99,9\%$), которые смешиваются с помощью высокоэнергетической шаровой мельницы, а для подавления роста зерен добавляются такие добавки, как Cr_3C_2 и VC.

Формование и спекание

Сырые заготовки формуются методом холодного изостатического прессования (ХИП, 100–400 МПа) или компрессионного формования, а затем спекаются в жидкой фазе в вакуумной или низконапорной печи (1350–1450 °C) для достижения плотности 90–95 % и размера зерна 0,5–1 мкм.

4. Модификация поверхности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технология нанесения покрытий

методом PVD (например, TiAlN, TiCN, толщина 2-10 мкм) или CVD (например, Al₂O₃, толщина 5-20 мкм), твердость увеличивается до HV2000-3000, а износостойкость улучшается на 30-50%.

Высокоэнергетическое термическое напыление

Плазменное напыление (APS) или детонационное напыление (DGS) формирует покрытие WC-Co или Cr₃C₂ (50–500 мкм) с прочностью сцепления 30–80 МПа и стойкостью к эрозии, улучшенной на 20–30%.

Интерфейсная инженерия

Оптимизируйте интерфейс покрытие/подложка с помощью градиентного покрытия или ионной имплантации, улучшите адгезию на 30% (>50 Н) и уменьшите отслаивание.

Прецизионная обработка

мкм) используются алмазная шлифовка, обработка на станках с ЧПУ или лазерная микрообработка.

Эти процессы тесно связаны с технологией изготовления авиационных сопел (требующих сложной геометрии и коррозионно-стойких покрытий) и высокотемпературных форм (требующих износостойких покрытий), что отражает межотраслевую применимость обработки твердого сплава.

5. Преимущества производительности

По сравнению с традиционными материалами (такими как сплавы на основе никеля и керамика) компоненты газовых турбин из цементированного карбида имеют существенные преимущества:

Высокая износостойкость

Твердость покрытия составляет HV2000-3000, износ снижается на 50-70%, а срок службы лопаток и сопел увеличивается на 30-50% (10 000→15 000 часов).

Высокая термостойкость

Твердость сохраняется на уровне HV900-1500 при 1400°C, а степень деформации составляет <0,1%, что обеспечивает более высокие температуры горения и повышает эффективность на 5-10%.

Устойчивость к коррозии

Устойчив к окислению и газовой коррозии, скорость коррозии снижается на 50–70%, а цикл технического обслуживания увеличивается на 30%, что делает его пригодным для использования в агрессивных газовых средах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Эффективность против усталости

Градиентные покрытия снимают термическое напряжение, увеличивают усталостную долговечность на 30%, уменьшают количество термических трещин на 50% и повышают надежность компонентов.

Стабильность размеров

Низкий коэффициент теплового расширения ($5-7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) и отклонение размеров $< 0,01$ мм обеспечивают высокую точность работы.

6. Сценарии применения

Компоненты газовых турбин из цементированного карбида в основном используются в следующих сценариях:

Покрытие лезвия

WC-Co или Cr_3C_2 используются на кончиках и ножках лопаток турбин, повышая износостойкость на 30% и продлевая срок службы на 40%, что делает их пригодными для авиационных двигателей (например, GE9X) и промышленных газовых турбин.

Насадка и направляющая

Компания APS/DGS наносит покрытие WC-Co на горловину сопла и направляющие лопатки, что повышает устойчивость к эрозии на 20% и увеличивает срок службы с 8000 до 12000 часов.

Футеровка камеры сгорания

CVD - Al_2O_3 защищает поверхность камеры сгорания, устойчиво к высокотемпературной коррозии, продлевает срок службы на 30% и повышает эффективность сгорания на 5%.

Уплотнения

Уплотнительные кольца или покрытия из карбида повышают износостойкость на 50%, уменьшают утечку газа и повышают эффективность на 3–5%.

Подшипники и опорные элементы

Износостойкие детали WC-Co применяются в высокотемпературных подшипниках, снижая коэффициент трения на 20% (0,1–0,2) и увеличивая срок службы на 50%.

Случай

Лопатки турбины двигателя GE9X защищены покрытием PVD- TiAlN WC-Co, которое повышает износостойкость на 40%, увеличивает срок службы с 10 000 часов до 14 000 часов и повышает эффективность сгорания на 5% ? web:9 ? .

Эти области применения аналогичны техническим требованиям, предъявляемым к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

авиационным соплам (эрозионностойкие покрытия), электродам электролитических ячеек (коррозионностойкие покрытия) и высокотемпературным формам (износостойкие покрытия), что подчеркивает универсальность твердого сплава.

7. Проблемы и ограничения

Детали газовых турбин из цементированного карбида сталкиваются со следующими проблемами:

Стоимость производства

Оборудование для нанесения покрытий (например, PVD/CVD, 10–30 миллионов юаней) и прецизионная обработка (алмазная шлифовка) стоят дорого.

Отсутствие прочности

Вязкость разрушения (K_{IC} 10–15 МПа·м^{1/2}) ниже, чем у сплавов на основе никеля (K_{IC} 50–100 МПа·м^{1/2}), и он легко трескается при сильном ударе.

Отслаивание покрытия

При высоких температурах и высоких нагрузках прочность сцепления покрытия (30–50 МПа) может оказаться недостаточной, и необходимо оптимизировать проектирование интерфейса.

Максимальный вес

Высокая плотность (14–15 г/см³) увеличивает вес вращающихся деталей, что влияет на эффективность и требует разработки облегченных покрытий.

Воздействие на окружающую среду

Процессы спекания и нанесения покрытий являются энергоемкими (500–1000 кВт·ч/партия), а дефицит ресурсов кобальта (мировые запасы составляют около 7 млн тонн) увеличивает затраты.

8. Тенденции будущего развития

Для решения этих задач и содействия развитию компонентов газовых турбин из цементированного карбида в будущем можно сосредоточиться на следующих направлениях:

Нанозернистый цементированный карбид

Разработать сверхтонкий WC (размер частиц <0,2 мкм), повысить твердость до HV1800–2000 и увеличить ударную вязкость на 20%, что делает его пригодным для деталей с высокими нагрузками.

Многослойное композитное покрытие

многослойного покрытия PVD/CVD (например, TiAlN / Al₂O₃ / CrN) может улучшить износостойкость на 50%, адгезию на 30% и продлить срок службы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Экологичное производство

Оптимизация низкотемпературного спекания (<1300°C) и производства карбида вольфрама с низким содержанием кобальта или без него для снижения потребления энергии на 30–50% и снижения нагрузки на ресурсы кобальта.

Аддитивное производство

Изготовление сложных покрытий или компонентов с помощью 3D-печати (например, селективного лазерного спекания SLS) может сократить затраты на обработку на 20–30%.

Интеллектуальная оптимизация

Благодаря использованию искусственного интеллекта и термодинамического моделирования для оптимизации конструкции покрытия и структуры интерфейса эффективность возросла на 20%, а точность прогнозирования срока службы увеличилась на 30%.

9. Сводная таблица

Основные характеристики и технические характеристики компонентов газовых турбин из цементированного карбида

проект	описывать
Состав материала	WC 85–95 мас. %, Co 5–15 мас. %, необязательно Cr з C 2 , добавки TiC
Основные характеристики	Твердость HV1000–1800, прочность на изгиб 2000–2500 МПа, термостойкость 1400°C, высокая износостойкость
Процесс производства	Подготовка порошка → холодное изостатическое прессование → вакуумное спекание → нанесение покрытия (PVD/CVD, APS/DGS) → прецизионная обработка (алмазная шлифовка, лазер)
Модификация поверхности	PVD - TiAlN : твердость HV2000–3000, износостойкость +30% CVD-Al ₂ O ₃ : термостойкость 1400°C, срок службы +40% APS/DGS-WC-Co: прочность сцепления 30–80 МПа, стойкость к эрозии +20–30%
Сценарий применения	Покрытия лопаток, сопла, вкладыши камеры сгорания, уплотнения, детали подшипников
Преимущества производительности	Износостойкость +30–50%, срок службы 10 000–15 000 часов, эффективность +5–10%, точность ±0,01 мм
испытание	Высокая стоимость (5000–50 000 юаней/шт.), недостаточная прочность, отслаивание покрытия, большой вес, воздействие на окружающую среду
Будущие направления	Нанокристаллические частицы, многослойные покрытия, экологичное производство, 3D-печать, интеллектуальная оптимизация

проиллюстрировать:

Материалы и свойства: На основе типичного состава и свойств WC-Co.

Процесс производства: Обобщает весь процесс формования, спекания, модификации и обработки.

Производительность и проблемы: количественно оцените преимущества (например, срок службы, эффективность) и ограничения (например, стоимость, прочность).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10. Заключение

Компоненты газовых турбин из карбида стали основными компонентами авиационных двигателей и промышленных газовых турбин благодаря своей высокой твердости, износостойкости, стойкости к высоким температурам и коррозионной стойкости. Они достигают превосходной производительности благодаря передовым технологиям нанесения покрытий (таким как PVD/CVD, APS/DGS) и проектированию интерфейсов. Покрытия WC-Co значительно увеличивают срок службы (10 000→15 000 часов) и эффективность (+5–10%) таких компонентов, как лопатки и сопла, и в высокой степени соответствуют техническим требованиям авиационных сопел (стойкость к эрозии), электродов электролитических ячеек (стойкость к коррозии) и высокотемпературных форм (стойкость к износу). Несмотря на высокие затраты, недостаточную прочность и экологические проблемы, достижения в области нанокристаллических материалов, многослойных композитных покрытий и зеленого производства приведут компоненты из цементированного карбида к более высокой производительности и устойчивости, обеспечивая надежные и эффективные решения для энергосистем в аэрокосмической и энергетической промышленности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение :

Инструменты и детали оборудования для пищевой промышленности из карбида

изготовлены на основе твердого сплава на основе карбида вольфрама (WC) (WC 8894 мас. %, Co/Ni 612 мас. %). Благодаря прецизионной шлифовке и покрытию PVD пищевого класса (например, CrN, DLC, 24 мкм) они достигают высокой твердости (1800–2000 HV), износостойкости (объем износа <0,04 мм³/ч, ASTM G65), коррозионной стойкости (<0,01 мм/год, pH 410) и безопасности для пищевых продуктов (соответствуют FDA 21 CFR 175.300, GB 4806.12016). Ножи предназначены для обработки пищевых продуктов (мясо, фрукты и овощи, замороженные продукты, тесто), подходят для нарезки ломтиками, кубиками, измельчения и очистки, со скоростью резки 50300 м/мин, сроком службы 10003000 минут и шероховатостью поверхности Ra 0,10,4 мкм; компоненты оборудования (такие как формы, направляющие, насадки) используются для формования, транспортировки и распыления пищевых продуктов, со сроком службы 612 месяцев. На основе национальных стандартов (GB/T 79972017, GB 4806.12016) и потребностей пищевой промышленности в этой статье объясняется процесс производства, производительность, применение и направление оптимизации ножей и компонентов.

1.1 Твердосплавные инструменты для обработки пищевых продуктов

для пищевой промышленности используют сверхмелкозернистую матрицу WC (0,2-0,5 мкм), связующую фазу на основе Ni (коррозионная стойкость) и покрытие PVD пищевого класса (CrN, DLC, ZrN). Благодаря высокоточной шлифовке (радиус кромки <5 мкм) или полировке (Ra <0,1 мкм) они отвечают высоким требованиям гигиены, износостойкости, коррозионной стойкости и безопасности пищевой промышленности.

Характеристики твердосплавных инструментов для обработки пищевых продуктов

раз лучше, чем нержавеющая сталь (400-600 HV).

Коррозионная стойкость: устойчив к кислотам и щелочам (pH 410, <0,01 мм/год), соответствует нормам безопасности при контакте с пищевыми продуктами (FDA, GB 4806.1). Низкий коэффициент трения: покрытие имеет коэффициент трения <0,2, не прилипает и легко очищается.

Износостойкость: износ <0,04 мм³/ч, стойкость инструмента 1000-3000 минут, срок службы детали 6-12 месяцев.

Применение: Ножи используются для нарезки мяса, кубиков фруктов и овощей, резки замороженных продуктов и разделения теста; детали используются для сит мясорубок, роликов конвейеров и лопастей миксеров.

1.2 Типы твердосплавных инструментов для пищевой промышленности

Нож:

Нож для нарезки: нарезка тонкими ломтиками (мясо, фрукты и овощи), скорость 100-300

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

м/мин.

Нож для нарезки кубиками (овощи, вареное мясо), скорость 80-200 м/мин.

Мясорубка: измельчение мяса, скорость 50-150 м/мин.

Нож для очистки: очистка фруктов и овощей, скорость 100-250 м/мин.

Детали оборудования:

Решетчатая пластина: Решетка для мясорубки (размер ячеек 310 мм), износостойкая и устойчивая к коррозии.

Конвейерные ролики: транспортировка пищевых продуктов, антипригарные.

Смесительная лопатка: для смешивания теста/соуса, износостойкая и устойчивая к коррозии.

1.3 Преимущества твердосплавных инструментов для обработки пищевых продуктов

раз выше, чем у нержавеющей стали, а эффективность увеличивается на 30-50%.

Срок службы: инструменты 1000–3000 минут, детали 6–12 месяцев (нержавеющая сталь 13 месяцев).

Гигиена: Ra 0,10,4 мкм, низкая адгезия, количество колоний <10 КОЕ/см².

Безопасность: Покрытие пищевого класса, нетоксичное и не мигрирующее (GB 4806.12016, FDA).

2.1 Ингредиенты

Матрица материала:

WC: 8894 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,20,5 мкм), твердость 1800-2000 HV.

Ni: 612 мас. %, устойчив к коррозии (H₂SO₄, NaCl <0,01 мм/год), безопасен для пищевых продуктов.

Добавка: Cr₃C₂ (0,2-0,5 мас. %), подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 5%.
Покрытие:

CrN (PVD): твердость 1800-2200 HV, коэффициент трения 0,2, коррозионностойкий, соответствует требованиям FDA.

DLC (PVD): твердость 3000-3500 HV, коэффициент трения <0,1, антиадгезионный, пищевой.

ZrN (PVD): твердость 2000-2500 HV, отличная кислотостойкость, подходит для кислых пищевых продуктов (pH 4-6).

2.2 Структура градиента

Поверхность: низкое содержание Ni (68 мас. %), ультрамелкое зерно WC (0,2-0,5 мкм), твердость 1800-2000 HV.

Сердечник: Высокое содержание Ni (1012 мас. %), мелкозернистый WC (0,51 мкм), KIC 1012 МПа·м^{1/2}.

Преимущества: износостойкость повышена на 20%, ударопрочность повышена на 15%, вероятность трещин снижена на 15%.

Подготовка: Послойное прессование + HIP-спекание (1350°C, 120 МПа).

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

2.3 Требования к производительности

Твердость: 1800–2000 HV (GB/T 7997–2017).

Прочность на изгиб: 1,82,5 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: $1012 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Износостойкость: Скорость износа $<0,04 \text{ мм}^3/\text{ч}$ (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 410, $<0,01 \text{ мм/год}$ (GB 96842011).

Безопасность пищевых продуктов: нетоксичен, не подвержен миграции (GB 4806.12016, FDA 21 CFR 175.300).

Процесс производства

3.1 Приготовление порошка

Сырье: WC (D50 0,20,5 мкм, чистота $>99,9\%$), Ni (D50 12 мкм), Cr₃C₂ (D50 0,51 мкм).

Шаровое измельчение: планетарная шаровая мельница (шары ZrO₂, 10:1), 300 об/мин, 1620 часов, отклонение размера частиц $<\pm 0,1 \text{ мкм}$, однородность $>95\%$.

3.2 Формирование

Метод: Холодное изостатическое прессование (ХИП) или компрессионное формование.

Параметры: 250-280 МПа, выдержка под давлением 60 секунд, стальная форма (отклонение $<\pm 0,05 \text{ мм}$), плотность заготовки 8,7-10,0 г/см³.

Результаты: Отклонение размеров $<\pm 0,1 \text{ мм}$, частота трещин $<1\%$.

3.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.

параметр:

Депарафинизация: 200-600°C, 3°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ $<5 \text{ ppm}$), 10^{-2} Па .

Спекание: 1350–1400 °C, $10^{-4} \text{ } 10^{-5} \text{ Па}$, 22,5 ч.

Горячее изостатическое прессование: 1350°C, 120 МПа (Ar), 11,5 часов.

Результаты: Плотность 14,815,0 г/см³, пористость $<0,001\%$, твердость 18002000 HV.

3.4 Прецизионная обработка

с ЧПУ, алмазный круг (35 мкм), 3000 об/мин, подача 0,01-0,03 мм/ход, радиус режущей кромки $<5 \text{ мкм}$, Ra 0,1-0,2 мкм (инструмент); шлифовка поверхности, Ra $<0,2 \text{ мкм}$ (деталь).

Полировка: Алмазная полировальная паста (12 мкм), 800 об/мин, Ra $<0,1 \text{ мкм}$, антиадгезионные свойства увеличены на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.5 Покрытие

Метод: PVD (цель Cr/Zr, >99,99%).

Параметры: CrN /DLC/ ZrN (24 мкм) , 10^{-4} Па, 250-300 °C, смещение 80 В, скорость осаждения 0,81 мкм / ч.

Результаты: Адгезия >80 Н, коэффициент трения <0,2, коррозионная стойкость увеличилась на 30%.

3.6 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм) , РФЭС (отклонение $\leq \pm 0,1$ мас. %).

Характеристики: Отклонение твердости $\leq \pm 50$ HV (ISO 6508), скорость износа <0,04 мм³/ч (ASTM G65), коррозионная стойкость (pH 410, <0,01 мм/год).

Гигиена: микробиологический тест (количество колоний <10 КОЕ/см² , GB 4789.2), тест на миграцию (<0,1 мг/кг, GB 31604.8).

Геометрия: КИМ, отклонение кромки/поверхности $\leq \pm 0,005$ мм.

Сценарий применения

Инструменты и компоненты оборудования из карбида для обработки пищевых продуктов обеспечивают следующие рабочие условия, параметры процесса, данные испытаний и рекомендации по выбору для обработки мяса, фруктов и овощей, замороженных продуктов, теста и требований к износостойкости оборудования:

4.1 Инструменты

Мясные отрубы (замороженная свинина, 18°C):

Условия работы: Замороженная свинина (HB ~150, с содержанием жира), толщина ломтика 2 мм.

Тип: Дисковый нож для нарезки ломтиками (Ø 300 мм, однолезвийный).

Матрица: WC8%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 18002000 HV.

Покрытие: PVD DLC (3 мкм , твердость 3500 HV, трение 0,1).

Геометрия: угол режущей кромки 20°, радиус режущей кромки 0,01 мм, полированная режущая кромка ($R_a < 0,1$ мкм) .

Процесс: шаровая мельница в течение 18 часов, CIP 280 МПа, спекание 1400 °C (10^{-5} Па, 2,5 часа), HIP 1350 °C (120 МПа, 1,5 часа), шлифование ($R_a 0,1$ мкм) , PVD DLC (250 °C, адгезия >80 Н).

Параметры: скорость 200 м/мин, подача 0,05 мм/об, резка без СОЖ.

тест:

Срок службы: 2000 минут (400 минут для нержавеющей стали, в 5 раз дольше) .

Поверхность: $R_a 0,2$ мкм , гладкий срез, без разрывов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сила резания: 200 Н (300 Н для нержавеющей стали, уменьшение на 33%).

Потери на износ: $VB < 0,1 \text{ мм}$, $< 0,03 \text{ мм}^3/\text{ч}$.

Гигиена: количество колоний $< 10 \text{ КОЕ}/\text{см}^2$, адгезия отсутствует.

Модель: WCNi+ DLC, слайсер $\varnothing 300 \text{ мм}$, сухая резка + регулярная дезинфекция.

Фрукты и овощи, нарезанные кубиками (морковь, НВ 50):

Условия работы: Морковь (90% влажности, с содержанием клетчатки), нарезанная кубиками $10 \times 10 \text{ мм}$.

Тип: Нож для нарезки кубиками (квадратный, $50 \times 50 \text{ мм}$, 4 лезвия).

Матрица: WC10%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 18002000 HV.

Покрытие: PVD CrN (3 мкм, твердость 2200 HV, трение 0,2).

Геометрия: угол режущей кромки 25° , радиус режущей кромки 0,02 мм, полированная режущая кромка ($Ra < 0,1 \text{ мкм}$).

Процесс: шаровая мельница в течение 18 часов, CIP 280 МПа, спекание 1400°C (10^{-5} Па , 2 часа), HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), шлифование ($Ra 0,1 \text{ мкм}$), PVD CrN (300°C , адгезия $> 80 \text{ Н}$).

Параметры: скорость 150 м/мин, подача 0,1 мм/об, мокрая резка (вода, 5 л/мин).

тест:

Срок службы: 1800 минут (500 минут для нержавеющей стали, в 3,6 раза дольше).

Поверхность: $Ra 0,3 \text{ мкм}$, аккуратный срез, без растяжения волокон.

Сила резания: 150 Н (250 Н для нержавеющей стали, снижение на 40%).

Потери на износ: $VB < 0,12 \text{ мм}$, $< 0,04 \text{ мм}^3/\text{ч}$.

Гигиена: Объем миграции $< 0,1 \text{ мг}/\text{кг}$, коррозии нет.

Выбор: WCNi+ CrN, нож для нарезки кубиками $50 \times 50 \text{ мм}$, мокрая резка + высокочастотная очистка.

Мясной фарш (говяжий, с жиром):

Условия работы: Говядина (20% жира, 70% влаги), фарш $\varnothing 5 \text{ мм}$.

Тип: Мясорубка ($\varnothing 100 \text{ мм}$, 4 лезвия).

Матрица: WC12%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 18002000 HV.

Покрытие: PVD ZrN (3 мкм, твердость 2500 HV, трение 0,15).

режущей кромки 30° , радиус режущей кромки 0,03 мм, полированная поверхность ($Ra < 0,1 \text{ мкм}$).

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 280 МПа, спекание 1400°C (10^{-5} Па , 2,5 часа), HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), шлифование ($Ra 0,1 \text{ мкм}$), PVD ZrN (300°C , адгезия $> 80 \text{ Н}$).

Параметры: скорость 100 м/мин, подача 0,15 мм/об, сухая резка.

тест:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Срок службы: 1500 минут (300 минут для нержавеющей стали, в 5 раз дольше) .
Поверхность: Ra 0,3 мкм , однородные частицы.
Сила резания: 250 Н (400 Н для нержавеющей стали, уменьшение на 37%).
Потери на износ: VB <0,15 мм, <0,04 мм³/ч.
Гигиена: отсутствие прилипания жира, количество колоний <10 КОЕ/см² .
Модель: WCNi+ ZrN , мясорубка Ø 100 мм, сухая резка + низкотемпературная стерилизация.

Очистка фруктов и овощей (картофель, 80% воды):

Условия работы: картофель (содержащий крахмал, влажность 80%), толщина кожуры 1 мм.

Тип: Нож для снятия шкур (изогнутый, 100×20 мм).
Матрица: WC8%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 18002000 HV.
Покрытие: PVD CrN (2 мкм , твердость 2200 HV, трение 0,2).
Геометрия: угол режущей кромки 15°, радиус режущей кромки 0,01 мм, полированная режущая кромка (Ra < 0,1 мкм) .
Процесс: шаровая мельница в течение 18 часов, СІР 280 МПа, спекание 1400 °С (10⁻⁵ Па, 2 часа), НІР 1350 °С (120 МПа, 1,5 часа), шлифование (Ra 0,1 мкм) , PVD CrN (300 °С, адгезия >80 Н).
Параметры: скорость 200 м/мин, подача 0,08 мм/об, мокрая резка (вода, 5 л/мин).
тест:
Срок службы: 2500 минут (600 минут для нержавеющей стали, в 4,2 раза дольше) .
Поверхность: Ra 0,2 мкм, отслаивание равномерное , без остатков.
Сила резания: 100 Н (200 Н для нержавеющей стали, уменьшение на 50%).
Скорость износа: VB <0,1 мм, <0,03 мм³/ч.
Гигиена: Отсутствие адгезии крахмала, количество миграции <0,1 мг/кг.
Выбор: WCNi+ CrN , нож для снятия изоляции 100×20 мм, влажная резка + обычная очистка.

4.2 Компоненты оборудования

Решетка мясорубки (говядина, с жиром):

Условия работы: говядина (20% жира, 70% влаги), диаметр отверстий Ø 5 мм, непрерывное измельчение.

Тип: Ситовидная пластина (Ø 150 мм, толщина 10 мм, размер ячеек Ø 5 мм).
Матрица: WC12%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 18002000 HV.
Покрытие: PVD CrN (3 мкм , твердость 2200 HV, трение 0,2).
Геометрия: Отклонение апертуры <±0,05 мм, поверхность полированная (Ra < 0,1 мкм) .
Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, СІР 280 МПа, спекание 1400 °С (10⁻⁵ Па, 2,5 часа), НІР 1350 °С (120 МПа, 1,5 часа), шлифовка поверхности (Ra 0,1 мкм) , PVD CrN (300 °С, адгезия >80 Н).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Параметры: Непрерывная работа, контакт с говядиной (pH 5,5-6,5), влажная среда (промывка водой, 5 л/мин).

тест:

Срок службы: 12 месяцев (3 месяца для нержавеющей стали, в 4 раза дольше).

Поверхность: Ra 0,2 мкм, без засорения.

Скорость износа: <0,04 мм³/ч, отсутствие коррозии.

Гигиена: Количество колоний <10 КОЕ/см², количество миграции <0,1 мг/кг.

Модель: WCNi+ CrN, ситчатая пластина Ø 150 мм, влажная уборка + регулярная дезинфекция.

Конвейерные ролики (фрукты и овощи, влажность 90%):

Условия работы: Фрукты и овощи (90% воды, содержащий кислый сок, pH 46), непрерывная передача.

:

Тип: Конвейерный ролик (Ø 100 мм, длина 500 мм).

Матрица: WC10%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 18002000 HV.

Покрытие: PVD DLC (3 мкм, твердость 3500 HV, трение 0,1).

Геометрия: Поверхность полированная (Ra <0,1 мкм), отклонение от круглости <±0,01 мм.

Процесс: шаровая мельница в течение 18 часов, CIP 280 МПа, спекание 1400 °C (10⁻⁵ Па, 2 часа), HIP 1350 °C (120 МПа, 1,5 часа), шлифование (Ra 0,1 мкм), PVD DLC (250 °C, адгезия >80 Н).

Параметры: скорость вращения 60 об/мин, контакт с фруктовым и овощным соком (pH 46), влажная среда.

тест:

Срок службы: 10 месяцев (2 месяца для нержавеющей стали, в 5 раз дольше).

Поверхность: Ra 0,1 мкм, без адгезии.

Скорость износа: <0,03 мм³/ч, отсутствие коррозии.

Гигиена: Количество колоний <10 КОЕ/см², количество миграции <0,1 мг/кг.

Модель: WCNi+ DLC, конвейерный ролик Ø 100 мм, влажная чистка + регулярный осмотр.

Насадка для смешивания (тесто, с солью):

Условия работы: тесто (2% соли, 40% воды), непрерывное перемешивание.

:

Тип: Лопатка для смешивания (200×50 мм, толщина 5 мм).

Матрица: WC8%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 18002000 HV.

Покрытие: PVD ZrN (3 мкм, твердость 2500 HV, трение 0,15).

Геометрия: Поверхность полированная (Ra <0,1 мкм), радиус кромки 0,5 мм.

Обработка: шаровая мельница в течение 18 часов, CIP 280 МПа, спекание 1400 °C (10⁻⁵ Па, 2 часа), HIP 1350 °C (120 МПа, 1,5 часа), шлифование (Ra 0,1 мкм), PVD ZrN (300 °C, адгезия >80 Н).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Параметры: скорость 30 об/мин, контактное тесто (pH 56), влажная среда.
тест:
Срок службы: 8 месяцев (2 месяца для нержавеющей стали, в 4 раза дольше).
Поверхность: Ra 0,2 мкм, без адгезии .
Скорость износа: <0,04 мм³/ч, отсутствие коррозии.
Гигиена: Количество колоний <10 КОЕ/см² , количество миграции <0,1 мг/кг.
Выбор: WCNi+ ZrN , лезвия 200×50 мм, влажная уборка + регулярная дезинфекция.

Анализ производительности

параметр	Твердосплавные инструменты/детали	Ножи/детали из нержавеющей стали
Твёрдость (HV)	18002000	400600
Прочность на изгиб (ГПа)	1.82.5	1.52.0
Прочность (KIC, МПа·м ^{1 / 2})	1012	50100
Износостойкость (мм³/ч)	<0,04	0.10.3
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 410)	<0,01	0.050.1
Скорость резания (м/мин, инструмент)	50300	20100
Срок службы (минут, инструмент)	10003000	200600
Продолжительность жизни (месяцы , детали)	612	13
Ra (мкм)	0.10.4	0.51.0

Основные моменты:
Износостойкость: Сверхмелкозернистое WC+DLC/ CrN / ZrN , износ <0,04 мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз (инструменты), в 45 раз (детали).
Коррозионная стойкость: на основе Ni + CrN / ZrN , pH 410, <0,01 мм/год.
Эффективность: Скорость инструмента 50300 м/мин, эффективность увеличена на 3050%.
Гигиена: Ra 0,10,4 мкм , колонии <10 КОЕ/см² , в соответствии с GB 4806.1 .

Предложения по оптимизации

Оптимизация материала:

Ножи для мяса/решетчатые пластины: WCNi (8 мас. %) + DLC (3 мкм) , антиадгезионные свойства увеличены на 30% .
Ножи для фруктов и овощей/конвейерные ролики: WCNi (10 мас. %) + CrN (3 мкм) , коррозионная стойкость увеличена на 25%.
Мясорубка/лопасть для смешивания: WCNi (12 мас. %) + ZrN (3 мкм) , ударопрочность увеличена на 15% .
Добавка: Cr3C2 0,5 мас. %, твердость увеличена на 5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1350°C, 120 МПа, пористость <0,001%, износостойкость повышена на 15%.
шлифовальный круг (35 мкм), радиус режущей кромки <5 мкм (инструмент), Ra <0,1 мкм (деталь).

покрытие:

DLC (3 мкм, 250°C, смещение 80 В), снижение трения 50%.

CrN (3 мкм, 300°C, смещение 80 В), коррозионная стойкость увеличена на 30%.

ZrN (3 мкм, 300°C, смещение 80 В), антипригарность увеличена на 20%.

Полировка: Ra <0,1 мкм, снижение адгезии на 20%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры $\pm 3^{\circ}\text{C}$, 10^{-5} Па.

Шлифовальный станок с ЧПУ: отклонение режущей кромки/поверхности $\leq \pm 0,005$ мм.

Оборудование для нанесения покрытия: скорость осаждения 0,81 мкм/ч, отклонение $\leq \pm 0,1$ мкм.

Адаптация к условиям труда:

Решетка для нарезки/просеивания мяса: WCNi+ DLC, скорость 150-300 м/мин (нож), сухая резка/мокрая очистка.

Ролик для нарезки/транспортировки фруктов и овощей: WCNi+ CrN, скорость 100-200 м/мин (инструмент), мокрая резка/очистка.

Нож для измельчения/смешивания: WCNi+ ZrN, скорость 50-150 м/мин (инструмент), сухая резка/влажная очистка.

Очистка: WCNi+ CrN, скорость 150-250 м/мин, мокрая резка.

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <5%).

Производительность: ASTM G65 (<0,03-0,04 мм³/ч), коррозионная стойкость (рН 410, <0,01 мм/год).

Гигиена: количество колоний <10 КОЕ/см² (GB 4789.2), количество миграции <0,1 мг/кг (GB 31604.8).

Испытание: сила резания инструмента 100-250 Н, срок службы 1500-2500 минут, Ra 0,20,3 мкм; срок службы детали 812 месяцев, Ra 0,10,2 мкм.

Стандарты и спецификации

GB/T 183762014: Пористость <0,01%.

GB/T 38502015: Отклонение плотности $\leq \pm 0,1$ г/см³.

GB/T 38512015: Прочность 1,82,5 ГПа.

GB/T 79972017: Твердость 1800 - 2000 HV.

GB 4806.12016: Безопасность пищевых продуктов, нетоксичность и немиграция.

GB 96842011: Коррозионная стойкость, рН 410, <0,01 мм/год.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ASTM G65: Скорость износа $<0,04 \text{ мм}^3/\text{ч}$.

ISO 6508: Отклонение твердости $< \pm 50 \text{ HV}$.

FDA 21 CFR 175.300: Безопасность при контакте с пищевыми продуктами.

в заключение

Инструменты и компоненты оборудования для пищевой промышленности из цементированного карбида достигают высокой твердости (18002000) HV), износостойкость ($< 0,04 \text{ мм}^3/\text{ч}$), коррозионная стойкость (pH 410, $<0,01 \text{ мм/год}$) и безопасности пищевых продуктов (GB 4806.12016) за счет оптимизации материалов (ультрамелкое зерно WC 0,20,5 мкм, Ni 612 мас. %, покрытие CrN /DLC/ ZrN) и процессов (спекание HIP 1350° C, 120 МПа, покрытие PVD 250-300° C). Ножи подходят для нарезки мяса, нарезки кубиками фруктов и овощей, измельчения и очистки, со скоростью 50-300 м/мин, повышением эффективности на 30-50%, сроком службы 1500-2500 минут и Ra 0,2-0,3 мкм; детали подходят для сеток мясорубок, роликов конвейеров и лопастей миксеров, срок службы 8-12 месяцев, Ra 0,1-0,2 мкм и колония $<10 \text{ КОЕ/см}^2$. Оптимизация сверхтонких зерен, покрытий пищевого класса и процессов полировки может снизить затраты (200-1000 юаней на инструмент и 500-2000 юаней на деталь), но проблема заключается в высокоточной шлифовке (увеличение затрат на 15%) и сертификации гигиены покрытия.

CTIA GROUP использует нано WC (D50 0,20,5 мкм), спекание HIP (пористость $<0,001\%$) и покрытие PVD пищевого класса для разработки высокопроизводительных инструментов (ломтерезок, мясорубок) и компонентов (решетчатых пластин, конвейерных роликов) для удовлетворения потребностей пищевой промышленности (срок службы инструмента >2000 минут, срок службы компонента >10 месяцев, Ra $<0,2 \text{ мкм}$). Продукция проверена SEM, ASTM G65 и GB 4806.

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 :

Карбидное сопло газовой турбины

Сопло газовой турбины из цементированного карбида изготовлено на основе цементированного карбида вольфрама (WC) (WC 8894 мас. %, Ni 612 мас. %). Благодаря прецизионной шлифовке, полировке и высокотемпературному коррозионно-стойкому покрытию PVD (например, CrN, AlCrN, TiAlN, 25 мкм), он достигает высокой твердости (1800-2200 HV), износостойкости (объем износа $<0,03 \text{ мм}^3 / \text{ч}$, ASTM G65), высокой термостойкости ($>1200^\circ\text{C}$, стойкость к окислению), коррозионной стойкости ($<0,01 \text{ мм/год}$, pH 12, серосодержащий газ) и термической усталостной стойкости ($>10^5$ циклов). Сопло используется в камере сгорания газовой турбины для направления высокотемпературного и высоконапорного газа ($1400 - 1600^\circ\text{C}$, 1020 МПа) к лопаткам турбины. Оно должно выдерживать экстремальные тепловые удары, коррозию и эрозию, со сроком службы 8000 - 20000 часов и шероховатостью поверхности Ra 0,10,3 мкм. В данной статье описывается сопло, процесс его изготовления, эксплуатационные характеристики, применение и направление оптимизации с учетом условий эксплуатации газовых турбин (GE Frame 59, Siemens SGT series) и отраслевых стандартов (ASME PTC 22, ISO 2314).

Обзор карбидных сопел газовых турбин

1.1 Определение и характеристики твердосплавного сопла газовой турбины

Сопло газовой турбины из цементированного карбида имеет матрицу из сверхмелкозернистого карбида вольфрама (0,2-0,5 мкм), связующую фазу на основе никеля (коррозионная стойкость) и высокотемпературное PVD-покрытие (CrN, AlCrN, TiAlN), благодаря прецизионной шлифовке (геометрическое отклонение $\leq \pm 0,01 \text{ мм}$) или полировке (Ra $<0,1 \text{ мкм}$), он соответствует требованиям газовых турбин к высоким температурам, высокому давлению, коррозии и эрозии и направляет продукты сгорания к лопаткам турбины.

Характеристики:

Высокая твердость: 1800 - 2200 HV, износостойкость в 23 раза выше, чем у сплавов на основе никеля (800 - 1200 HV).

Высокая термостойкость: покрытие устойчиво к окислению ($>1200^\circ\text{C}$), а подложка устойчива к термическому удару ($\Delta T 1000^\circ\text{C}$, $>10^5$ раз).

Коррозионная стойкость: Устойчив к серосодержащим газам, кислотам и щелочам (pH 12, $<0,01 \text{ мм/год}$), в соответствии с требованиями ASME по коррозионной стойкости.

Низкое трение: коэффициент трения покрытия $<0,15$, что снижает эрозию и отложение углерода.

Износостойкость: износ $<0,03 \text{ мм}^3/\text{ч}$, срок службы 8000 - 20000 часов.

Применение: Сопловые направляющие лопатки газовых турбин (GE Frame 59, Siemens серии SGT), сопла камер сгорания.

1.2 Типы твердосплавных сопел газовых турбин

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сопло фиксированной геометрии: простое турбореактивное, конвергентного типа, скорость 0,81,2 млн. лет.

Конвергентно-расширяющееся (CD) сопло: турбовентиляторный двигатель, сверхзвуковой (1,5-2,5 млн лет), изменяемая геометрия.

Сопло канала охлаждения: с внутренними охлаждающими отверстиями ($\varnothing$ 0,52 мм), устойчиво к температурам 1400 - 1600°C.

Многотопливная форсунка: поддерживает природный газ и жидкое топливо, с завихрителем, степень распыления >95%.

1.3 Преимущества карбидных сопел газовых турбин

Эффективность: оптимизированный воздушный поток, тяга увеличена на 510%, а топливная эффективность увеличена на 35%.

Срок службы: Срок службы сопла с покрытием 8000–20000 часов (сплав на основе никеля 5000–12000 часов).

Коррозионная стойкость: Ra 0,10,3 мкм , противодействие образованию нагара, снижение частоты технического обслуживания на 20–30 %.

Безопасность: Высокая температурная стабильность, скорость растрескивания <0,01%, в соответствии с AS9100.

Материал

2.1 Компоненты сопла газовой турбины из цементированного карбида:

WC: 8894 мас. % , ультрамелкое зерно (D50 0,20,5 мкм) , твердость 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 мас. %, коррозионная стойкость (H₂SO₄, SO₂ <0,01 мм/год), стойкость к термической усталости.

Добавки: Cr₃C₂ (0,3-0,6 мас. %), подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 6%; TaC (0,1-0,3 мас. %), увеличивает стойкость к окислению на 10%. Покрытие:

CrN (PVD): твердость 2000 - 2400 HV, коэффициент трения 0,15, термостойкость 1100°C, коррозионная стойкость.

AlCrN (PVD): твердость 3000 - 3500 HV, коэффициент трения 0,1, термостойкость 1200°C, стойкость к окислению.

TiAlN (PVD): твердость 2800 - 3200 HV, коэффициент трения 0,12, термостойкость 1250°C, эрозионная стойкость.

2.2 Градиентная структура твердосплавного сопла газовой турбины

Поверхность: низкое содержание никеля (68 мас. %), сверхмелкое зерно WC (0,20,5 мкм) , твердость 2000–2200 HV.

Сердечник: Высокое содержание никеля (1012 мас. %) , мелкозернистый WC (0,51 мкм) , KIC 1215 МПа·м^{1/2} .

Преимущества: износостойкость повышена на 25%, стойкость к термоударам повышена на 20%, вероятность трещин снижена на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Подготовка: Послойное прессование + спекание HIP (1400°C, 150 МПа).

2.3 Требования к эксплуатационным характеристикам твердосплавных сопел газовых турбин

Твердость: 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 2,02,8 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 1215 МПа·м^{1/2}.

Износостойкость: Скорость износа <0,03 мм³/ч (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 212, <0,01 мм/год (ASME PTC 22).

Высокая термостойкость: >1200°C, стойкость к окислению (<0,01 мг/см², 1000 часов).

Безопасность: отсутствие трещин, отсутствие токсичности (ISO 2314).

Процесс изготовления твердосплавного сопла газовой турбины

3.1 Приготовление твердосплавного порошка для сопла газовой турбины

Сырье: WC (D50 0,20,5 мкм, чистота >99,95%), Ni (D50 12 мкм), Cr₃C₂ (D50 0,51 мкм), TaC (D50 0,51 мкм).

Шаровое измельчение: планетарная шаровая мельница (шары ZrO₂, 12:1), 350 об/мин, 1822 часа, отклонение размера частиц <±0,05 мкм, однородность >98%.

3.2 Формирование

Метод: Холодное изостатическое прессование (ХИП) или прецизионное формование.

Параметры: 300 - 350 МПа, выдержка под давлением 90 секунд, форма из титанового сплава (отклонение <±0,03 мм), плотность заготовки 9,010,5 г/см³.

Результаты: Отклонение размеров <±0,05 мм, частота трещин <0,5%.

3.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.

параметр:

Депарафинизация: 200 - 600°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ <3 ppm), 10⁻³ Па.

Спекание: 1400 - 1450°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Па, 2,53 ч.

Горячее изостатическое прессование: 1400°C, 150 МПа (Ar), 1,52 часа.

Результаты: Плотность 15,015,2 г/см³, пористость <0,0005%, твердость 1800 - 2200 HV.

3.4 Прецизионная обработка

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (24 мкм), 4000 об/мин, подача 0,005 - 0,02 мм/проход, геометрическое отклонение <±0,01 мм,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ra 0,1 0,2 мкм .

Электроэрозионная обработка: электроискровая обработка, отверстия для охлаждения ($\varnothing$ 0,52 мм), отклонение $\leq \pm 0,005$ мм.

Полировка: Алмазная полировальная паста (0,51 мкм) , 1000 об/мин, Ra < 0,1 мкм , стойкость к образованию нагара увеличена на 25% .

3.5 Покрытие

Метод: PVD (мишень Cr/Al/Ti, >99,99%).

Параметры: CrN / AlCrN / TiAlN (25 мкм) , 10^{-5} Па, 300400 °C, смещение 100 В, скорость осаждения 11,5 мкм / ч.

Результаты: Адгезия >100 Н, коэффициент трения <0,15, термостойкость >1200°C.

3.6 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм) , EBSD (напряжение на границах зерен <3%).

Характеристики: отклонение твердости $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), скорость износа <0,03 мм³/ч (ASTM G65), коррозионная стойкость (pH 212, <0,01 мм/год).

Геометрия: КИМ, отклонение $\leq \pm 0,005$ мм; лазерное сканирование, отклонение охлаждающего отверстия $\leq \pm 0,003$ мм.

Неразрушающий контроль: рентген (внутренние дефекты < 0,01 мм), ультразвуковой (трещины < 0,005 мм).

Испытания на высокие температуры: термический удар (ΔT 1000°C, >10⁵ раз), стойкость к окислению (<0,01 мг/см² , 1000 часов).

Сценарии применения сопел газовых турбин из цементированного карбида

Для условий работы с газом высокой температуры и высокого давления (1400–1600 °C, 1020 МПа) сопла газовых турбин из цементированного карбида обеспечивают следующие технологические параметры, данные испытаний и рекомендации по выбору:

Форсунки с фиксированной геометрией (GE Frame 7, природный газ):

Условия работы: сжигание природного газа, 1500°C, 15 МПа, содержащий SO₂ (0,10,5%).

Тип: Конфузорное сопло (диаметр горловины $\varnothing$ 50 мм, выходного отверстия $\varnothing$ 80 мм).

Матрица: WC8%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr₃C₂ 0,5 мас . %, TaC 0,2 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD AlCrN (4 мкм , твердость 3500 HV, трение 0,1, термостойкость 1200°C).

Геометрия: радиус горловины 0,5 мм, охлаждающие отверстия $\varnothing$ 1 мм, полировка (Ra < 0,1 мкм) .

течение 20 часов, СІР 350 МПа, спекание 1450 °C (10^{-6} Па, 3 часа), НІР 1400 °C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование (Ra 0,1 мкм) , PVD AlCrN (350 °C, адгезия >100 Н).

Параметры: расход воздуха 1,0 мА, расход 500 кг/с, сухой режим работы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тест:

Срок службы: 15 000 часов (8 000 часов для сплава на основе никеля, увеличение на 87%).

Поверхность: Ra 0,2 мкм , без углеродистых отложений.

Скорость износа: <0,02 мм³/ч, стойкость к окислению <0,01 мг/см² .

Термический удар: ΔT 1000°C, >10⁵ раз, трещин нет.

Гигиена: нетоксичен, соответствует стандарту ISO 2314.

Модель: WCNi+ AlCrN , сужающееся сопло Ø 50 мм, обычный неразрушающий контроль.

Форсунка CD (Siemens SGT800, жидкое топливо):

Условия работы: сжигание дизельного топлива, 1600°C, 18 МПа, содержание H₂S (0,05-0,2%).

Тип: сопло CD (диаметр горловины Ø 40 мм, выходного отверстия Ø 100 мм, изменяемая геометрия).

Матрица: WC10%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr₃C₂ 0,6 мас. %, TaC 0,3 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD TiAlN (5 мкм , твердость 3200 HV, трение 0,12, термостойкость 1250°C).

Геометрия: Угол расхождения 15°, отверстия для охлаждения Ø 1,5 мм, полированные (Ra < 0,1 мкм) .

Процесс: шаровая мельница в течение 22 часов, CIP 350 МПа, спекание 1450 °C (10⁻⁶ Па, 3 часа), HIP 1400 °C (150 МПа, 2 часа), EDM (отклонение апертуры <±0,005 мм), PVD TiAlN (400 °C, адгезия >100 Н).

Параметры: расход воздуха 2,0 мА, расход 600 кг/с, влажный режим работы (охлаждение распылением воды).

тест:

Срок службы: 12 000 часов (6 000 часов для сплава на основе никеля, увеличен на 100%).

Поверхность: Ra 0,3 мкм , скорость осаждения углерода <0,01 мг/см² .

Потери на износ: <0,03 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Термический удар: ΔT 1100°C, >10⁵ раз, трещин нет.

Эффективность: Тяга увеличена на 8%.

Модель: WCNi+ TiAlN , сопло CD Ø 40 мм, мокрый ход + неразрушающий контроль.

Многотопливная форсунка (GE Frame 9, природный газ + дизель):

Рабочие условия: переключение с природного газа на дизельное топливо, 1550°C, 16 МПа, содержание SO₂/H₂S (0,10,3%).

Тип: Вихревая форсунка (Ø 60 мм, 12 точек распыления, степень распыления >95%).

Матрица: WC12%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr₃C₂ 0,5 мас. %, TaC 0,3 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD CrN (4 мкм , твердость 2400 HV, трение 0,15, термостойкость 1100°C).

завихрения 30°, диаметр сопла 0,8 мм, полировка (Ra < 0,1 мкм) .

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 350 МПа, спекание 1450 °C (10⁻⁶ Па, 3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

часа), HIP 1400 °C (150 МПа, 2 часа), EDM (отклонение апертуры $\leq \pm 0,003$ мм), PVD CrN (300 °C, адгезия > 100 Н).

Параметры: расход воздуха 1,2 млн л.с., расход топлива 1000 кг/ч, работа всухую.

тест:

Срок службы: 10 000 часов (5 000 часов для сплава на основе никеля, увеличен на 100%).

Поверхность: Ra 0,2 мкм, без засорения .

Потери на износ: $< 0,03$ мм³/ч, коррозионная стойкость $< 0,01$ мм/год.

Скорость распыления: $> 95\%$, эффективность сгорания увеличена на 5%.

Термический удар: ΔT 1000°C, $> 10^5$ раз, трещин нет.

Модель: WCNi+ CrN , вихревое сопло Ø 60 мм, регулярная очистка + неразрушающий контроль.

Анализ производительности сопла газовой турбины из цементированного карбида

параметр	Твердосплавное сопло	Сопло из сплава на основе никеля
Твёрдость (HV)	1800 - 2200	800 - 1200
Прочность на изгиб (ГПа)	2.02.8	1.01.5
Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})	1215	2030
Износостойкость (мм ³ /ч)	$< 0,03$	0.050.1
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 212)	$< 0,01$	0.020.05
Температурная стойкость (°C)	> 1200	1000 - 1100
Продолжительность жизни (часов)	8000 - 20000	5000 - 12000
Ra (мкм)	0.10.3	0.30.8

Основные моменты:

Износостойкость: Сверхмелкозернистый WC+AlCrN / TiAlN , износ $< 0,03$ мм³/ч, срок службы увеличен в 1,52 раза.

Высокая термостойкость: покрытие устойчиво к окислению ($> 1200^\circ\text{C}$), тепловому удару $> 10^5$ раз.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + CrN , pH 212, $< 0,01$ мм/год.

Эффективность: оптимизированный воздушный поток, тяга увеличена на 510%, а топливная эффективность увеличена на 35%.

Предложения по оптимизации сопел газовых турбин из цементированного карбида

Оптимизация материала:

Сопло природного газа: WCNi (8 мас. %) + AlCrN (4 мкм) , термостойкость увеличена на 10%.

Форсунка жидкого топлива: WCNi (10 мас. %) + TiAlN (5 мкм) , стойкость к эрозии увеличена на 20%.

Многотопливная форсунка: WCNi (12 мас.%) + CrN (4 мкм) , коррозионная стойкость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

увеличена на 15 %.

Добавки: Cr₃C₂ 0,6 мас. %, TaC 0,3 мас. %, твердость увеличена на 6%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1400°C, 150 МПа, пористость <0,0005%, износостойкость повышена на 20%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (24 мкм), геометрическое отклонение $\leq \pm 0,01$ мм, Ra < 0,1 мкм.

покрытие:

AlCrN (4 мкм, 350°C, смещение 100 В), термостойкость увеличена на 15%.

TiAlN (5 мкм, 400°C, смещение 100 В), коррозионная стойкость увеличена на 20%.

CrN (4 мкм, 300°C, смещение 100 В), коррозионная стойкость увеличена на 25%.

Электроэрозионная обработка: отклонение охлаждающего отверстия $\leq \pm 0,003$ мм, эффективность воздушного потока увеличена на 5%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Па.

5-осевой ЧПУ: отклонение $\leq \pm 0,005$ мм.

Оборудование для нанесения покрытия: скорость осаждения 11,5 мкм/ч, отклонение $\leq \pm 0,05$ мкм.

Адаптация к условиям труда:

Природный газ: WCNi+ AlCrN, скорость 0,81,2 млн лет, сухой ход.

Жидкое топливо: WCNi+ TiAlN, скорость 1,5-2,5 млн лет, работа во влажном состоянии.

Многотопливный: WCNi+ CrN, скорость 1,0-1,5 мА, переключатель «сухой/мокрый».

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <3%).

Производительность: ASTM G65 (<0,03 мм³/ч), коррозионная стойкость (pH 212, <0,01 мм/год), термостойкость (>1200°C, <0,01 мг/см²).

Геометрия: КИМ (отклонение $\leq \pm 0,005$ мм), лазерное сканирование (отклонение апертуры $\leq \pm 0,003$ мм).

Тест: расход воздуха 0,82,5 мА, срок службы 10000 - 15000 часов, Ra 0,20,3 мкм.

Стандарты и спецификации

GB/T 183762014: Пористость <0,01%.

GB/T 38502015: Отклонение плотности $\leq \pm 0,1$ г/см³.

GB/T 38512015: Прочность 2,0-2,8 ГПа.

GB/T 7997-2017: Твердость 1800-2200 HV.

ASME PTC 22: Тест производительности, отклонение тяги $\leq \pm 1\%$.

ISO 2314: Приемка газовых турбин, безопасность.

ASTM G65: Скорость износа <0,03 мм³/ч.

ISO 6508: Отклонение твердости $\leq \pm 40$ HV.

AS9100: Управление качеством в аэрокосмической отрасли.

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

В заключение

- 2200 HV), износостойкость ($< 0,03 \text{ мм}^3 / \text{ч}$), стойкость к высоким температурам ($> 1200^\circ \text{C}$), коррозионная стойкость (рН 212, $< 0,01 \text{ мм/год}$) и сопротивление термической усталости ($> 10^5$ раз) за счет оптимизации материалов (ультрамелкое зерно WC 0,20,5 мкм, Ni 612 wt %, Покрытие AlCrN / TiAlN / CrN) и процессы (спекание HIP 1400°C , 150 МПа, покрытие PVD 300400°C). Сопло подходит для фиксированной геометрии, CD и многотопливных условий, со скоростью 0,82,5 Ма, увеличением тяги 510%, сроком службы 10000 - 15000 часов и Ra 0,20,3 мкм. Оптимизация сверхтонких зерен, толщины покрытия и процессов EDM может снизить затраты. Проблемы заключаются в высокоточной обработке (стоимость увеличивается на 20%) и высокотемпературных испытаниях и проверке.

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 :

Твердосплавный химический трубопроводный клапан

на основе твердого сплава на основе карбида вольфрама (WC) (WC 88 - 94 мас. %, Ni 612 мас. %). Благодаря прецизионной шлифовке, полировке и коррозионно-стойкому покрытию PVD (например, CrN, AlCrN, TiAlN, 25 мкм), они достигают высокой твердости (1800 - 2200 HV), износостойкости (объем износа $<0,03 \text{ мм}^3 / \text{ч}$, ASTM G65), коррозионной стойкости ($<0,01 \text{ мм / год}$, pH 212, содержит H₂S, HCl, H₂SO₄) и высокой термостойкости ($>1000 \text{ °C}$, стойкость к окислению). Клапаны используются в химических трубопроводах (нефть, природный газ, кислотные и щелочные среды), контролируют поток, давление и отсекают, выдерживают агрессивные жидкости (H₂SO₄ 0,515%, HCl $<3\%$), высокую температуру (300 - 1000 °C) и высокое давление (1050 МПа), со сроком службы 515 лет и шероховатостью поверхности Ra 0,10,3 мкм. В статье описываются клапаны, производственные процессы, эксплуатационные характеристики, области применения и направления оптимизации на основе условий эксплуатации (API 6D, ASME B16.34) и стандартов (GB/T 12224, NACE MR0175) химических трубопроводов.

Обзор арматуры трубопроводной химической промышленности из цементированного карбида

1.1 Определение химического трубопроводного клапана из цементированного карбида :

В арматуре трубопроводов химической промышленности из цементированного карбида используется сверхмелкозернистая матрица WC (0,2-0,5 мкм), связующая фаза на основе Ni (коррозионная стойкость) и коррозионно-стойкое PVD-покрытие (CrN, AlCrN, TiAlN), посредством высокоточной шлифовки (геометрическое отклонение $\leq \pm 0,01 \text{ мм}$) или полировки (Ra $<0,1 \text{ мкм}$), для удовлетворения высоких требований к коррозионной стойкости, высокой температуре, высокому давлению и износостойкости химических трубопроводов, управления потоком жидкости, давлением или отсечки. Особенности:
Высокая твердость: 1800 - 2200 HV, износостойкость в 35 раз лучше, чем у нержавеющей стали (400 - 600 HV).

Коррозионная стойкость: устойчив к кислотам и щелочам (pH 212, $<0,01 \text{ мм/год}$), устойчив к H₂S, HCl, H₂SO₄, в соответствии с NACE MR0175.

Высокая термостойкость: покрытие устойчиво к окислению ($>1000\text{°C}$), а подложка устойчива к термическому удару ($\Delta T 800\text{°C}$, $>10^5$ раз).

Низкое трение: коэффициент трения покрытия $<0,15$, что снижает адгезию и эрозию.

Износостойкость: износ $<0,03 \text{ мм}^3/\text{ч}$, срок службы 5-15 лет.

Области применения: нефтехимия (нефтепереработка, природный газ), химическая переработка (кислоты, щелочи, хлориды), фармацевтика, целлюлоза.

1.2 Типы арматуры из цементированного карбида для химических трубопроводов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Шаровой кран: 1/220 дюйма, 150–2500 фунтов , подходит для быстрого переключения, регулирования расхода, степень герметичности >99,9%.

Задвижка: 136", 150 - 4500 фунтов , подходит для полного открытия/полного закрытия, устойчивость к высокому давлению .

Запорный клапан: 1/224", 150 - 2500 фунтов , точный контроль расхода, высокая термостойкость.

Обратный клапан: 124 дюйма, 150–2500 фунтов , предотвращает обратный поток, устойчив к коррозии.

Дисковый затвор: 248 дюймов, 150–600 фунтов , легкий, подходит для больших диаметров и низкого давления.

1.3 Преимущества цементированных карбидных химических трубопроводных клапанов

Эффективность: быстрое открытие и закрытие (поворот шарового крана на 90°), потеря расхода <5%, в соответствии с API 6D.

Срок службы: Срок службы клапанов с покрытием составляет 515 лет (15 лет для нержавеющей стали).

Коррозионная стойкость: Ra 0,10,3 мкм , антиадгезионная , частота технического обслуживания снижена на 30%.

Безопасность: Нулевая утечка (API 598), скорость трещин <0,01%, в соответствии с ASME B16.34.

Материал

Состав матрицы арматуры трубопроводной химической промышленности из цементированного карбида:

WC: 8894 мас. % , ультрамелкое зерно (D50 0,20,5 мкм) , твердость 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 мас. % , коррозионная стойкость (H₂SO₄, HCl, H₂S <0,01 мм/год), сопротивление термической усталости.

Добавки: Cr₃C₂ (0,3-0,6 мас. %), подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 6%; TaC (0,1-0,3 мас. %), увеличивает антиоксидантные свойства на 10%.

Покрывание из цементированного карбида для химических трубопроводных клапанов

CrN (PVD): твердость 2000 - 2400 HV, коэффициент трения 0,15, термостойкость 1000°C, устойчив к H₂SO₄.

AlCrN (PVD): твердость 3000 - 3500 HV, коэффициент трения 0,1, термостойкость 1100°C, устойчивость к хлоридам.

TiAlN (PVD): твердость 2800 - 3200 HV, коэффициент трения 0,12, термостойкость 1050°C, эрозионная стойкость.

2.2 Структура градиента

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Поверхность: низкое содержание никеля (68 мас. %), сверхмелкое зерно WC (0,20,5 мкм), твердость 2000–2200 HV.

Сердечник: Высокое содержание никеля (1012 мас. %), мелкозернистый WC (0,51 мкм), KIC 1215 МПа·м^{1/2}.

Преимущества: износостойкость повышена на 25%, стойкость к термоударам повышена на 20%, вероятность трещин снижена на 20%.

Подготовка: Послойное прессование + спекание HIP (1400°C, 150 МПа).

2.3 Требования к производительности

Твердость: 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 2,02,8 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 1215 МПа·м^{1/2}.

Износостойкость: Скорость износа <0,03 мм³/ч (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 212, <0,01 мм/год (NACE MR0175).

Высокая термостойкость: >1000°C, стойкость к окислению (<0,01 мг/см², 1000 часов).

Безопасность: Нулевая утечка (API 598) в соответствии с ASME B16.34.

Процесс производства арматуры из цементированного карбида для химических трубопроводов

3.1 Приготовление порошка

Сырье: WC (D50 0,20,5 мкм, чистота >99,95%), Ni (D50 12 мкм), Cr₃C₂ (D50 0,51 мкм), TaC (D50 0,51 мкм).

Шаровое измельчение: планетарная шаровая мельница (шары ZrO₂, 12:1), 350 об/мин, 1822 часа, отклонение размера частиц <±0,05 мкм, однородность >98%.

3.2 Формирование

Метод: Холодное изостатическое прессование (ХИП) или прецизионное формование.

Параметры: 300 - 350 МПа, выдержка под давлением 90 секунд, форма из титанового сплава (отклонение <±0,03 мм), плотность заготовки 9,010,5 г/см³.

Результаты: Отклонение размеров <±0,05 мм, частота трещин <0,5%.

3.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.

параметр:

Депарафинизация: 200 - 600°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ <3 ppm), 10⁻³ Па.

Спекание: 1400 - 1450°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Па, 2,53 ч.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Горячее изостатическое прессование: 1400°C, 150 МПа (Ar), 1,52 часа.

Результаты: Плотность 15,015,2 г/см³ , пористость <0,0005%, твердость 1800 - 2200 HV.

3.4 Прецизионная обработка

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (24 мкм) , 4000 об / мин, подача 0,005 0,02 мм/проход, геометрическое отклонение <±0,01 мм, Ra 0,1 0,2 мкм .

Электроэрозионная обработка: Электроэрозионная обработка, отверстие под сердечник клапана (Ø 0,52 мм), отклонение <±0,005 мм.

Полировка: Алмазная полировальная паста (0,51 мкм) , 1000 об/мин, Ra <0,1 мкм , антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

3.5 Покрытие

Метод: PVD (мишень Cr/Al/Ti, >99,99%).

Параметры: CrN / AlCrN / TiAlN (25 мкм) , 10⁻⁵ Па, 300 - 400 °C, смещение 100 В, скорость осаждения 11,5 мкм /ч.

Результаты: Адгезия >100 Н, коэффициент трения <0,15, термостойкость >1000°C.

3.6 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм) , EBSD (напряжение на границах зерен <3%).

Характеристики: отклонение твердости <±40 HV (ISO 6508), скорость износа <0,03 мм³/ч (ASTM G65), коррозионная стойкость (pH 12, <0,01 мм/год).

Геометрия: КИМ, отклонение <±0,005 мм; лазерное сканирование, отклонение отверстия сердечника клапана <±0,003 мм.

Неразрушающий контроль: рентген (внутренние дефекты < 0,01 мм), ультразвуковой (трещины < 0,005 мм).

Тест производительности: Скорость утечки <0,01 см³/с (API 598), сопротивление давлению (1504500 фунтов) .

Сценарии применения арматуры из цементированного карбида для химических трубопроводов

Для работы с агрессивными жидкостями (H₂SO₄, HCl, H₂S), высокими температурами (300–1000 °C) и высоким давлением (1050 МПа) арматура для химических трубопроводов из цементированного карбида обеспечивает следующие технологические параметры, данные испытаний и рекомендации по выбору:

Кран шаровой химический трубопроводный твердосплавный (нефтехимический, H₂SO₄ 10%):

Рабочие условия: серная кислота (10%, pH 2), 500°C, 20 МПа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тип: плавающий шаровой кран (2 дюйма, 600 фунтов, фланцевый).

Матрица: WC8%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %, TaC 0,2 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD CrN (4 мкм, твердость 2400 HV, трение 0,15, термостойкость 1000°C).

Геометрия: округлость сферы $\leq \pm 0,005$ мм, уплотнительная поверхность полированная (Ra $< 0,1$ мкм).

Обработка: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 350 МПа, спекание 1450 °C (10^{-6} Па, 3 часа), HIP 1400 °C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование (Ra 0,1 мкм), PVD CrN (300 °C, адгезия > 100 Н).

Параметры: расход 100 м³/ч, быстрое открытие и закрытие на 90°, сухой ход.

тест:

Срок службы: 10 лет (3 года для нержавеющей стали, в 3,3 раза дольше).

Поверхность: Ra 0,2 мкм, без адгезии.

Скорость износа: $< 0,02$ мм³/ч, коррозионная стойкость $< 0,01$ мм/год.

Скорость утечки: $< 0,01$ см³/с (API 598).

Прочность на сжатие: 30 МПа, деформация отсутствует.

Выбор: WCNi+ CrN, 2-дюймовый шаровой кран, регулярный неразрушающий контроль.

Задвижка химическая трубопроводная твердосплавная (природный газ, содержащий H₂S):

Условия работы: природный газ (H₂S 0,10,5%), 600°C, 30 МПа.

Тип: клиновая задвижка (4 дюйма, 900 фунтов, фланцевая).

Матрица: WC10%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,6 мас. %, TaC 0,3 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD AlCrN (5 мкм, твердость 3500 HV, трение 0,1, термостойкость 1100°C).

Геометрия: Угол наклона тарелки клапана 5°, уплотнительная поверхность полированная (Ra $< 0,1$ мкм).

течение 22 часов, CIP 350 МПа, спекание 1450 °C (10^{-6} Па, 3 часа), HIP 1400 °C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование (Ra 0,1 мкм), PVD AlCrN (350 °C, адгезия > 100 Н).

Параметры: расход 200 м³/ч, полностью открыто/полностью закрыто, мокрый режим работы (очистка водой).

тест:

Срок службы: 12 лет (4 года для нержавеющей стали, в 3 раза дольше).

Поверхность: Ra 0,3 мкм, без углеродистых отложений.

Потери на износ: $< 0,03$ мм³/ч, коррозионная стойкость $< 0,01$ мм/год.

Скорость утечки: $< 0,01$ см³/с (API 598).

Прочность на сжатие: 45 МПа, трещин нет.

Выбор: WCNi+ AlCrN, 4-дюймовый запорный клапан, мокрый ход + неразрушающий контроль.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Запорная арматура химическая трубопроводная твердосплавная (хлорид, HCl 2%):

Рабочие условия: соляная кислота (2%, pH 1,5), 400°C, 15 МПа.

Тип: шаровой клапан постоянного тока (1 дюйм, 600 фунтов , резьбовой).

Матрица: WC12%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr3C2 0,5 мас . %, TaC 0,3 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD TiAlN (4 мкм , твердость 3200 HV, трение 0,12, термостойкость 1050°C).

Геометрия: конусность сердечника клапана 10°, уплотнительная поверхность полированная (Ra < 0,1 мкм) .

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 350 МПа, спекание 1450 °C (10⁻⁶ Па, 3 часа), HIP 1400 °C (150 МПа, 2 часа), EDM (отклонение апертуры <±0,005 мм), PVD TiAlN (400 °C, адгезия >100 Н).

Параметры: расход 50 м³/ч, точная регулировка, сухой ход.

тест:

Срок службы: 8 лет (2 года для нержавеющей стали, в 4 раза дольше) .

Поверхность: Ra 0,2 мкм , без коррозии.

Потери на износ: <0,03 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Скорость утечки: <0,01 см³/с (API 598).

Прочность на сжатие: 25 МПа, деформация отсутствует.

Выбор: WCNi+ TiAlN , 1-дюймовый запорный клапан, регулярная очистка+неразрушающий контроль .

Обратный клапан трубопроводный химический твердосплавный (нефтехимический, содержащий хлорид):

Рабочие условия: раствор хлорида (10000 ppm), 450°C, 20 МПа.

Тип: карбидный обратный подъемный клапан для химического трубопровода (3 дюйма, 600 фунтов , фланец).

Матрица: WC10%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr3C2 0,5 мас . %, TaC 0,2 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD AlCrN (4 мкм , твердость 3500 HV, трение 0,1, термостойкость 1100°C).

0,005 мм, уплотнительная поверхность полированная (Ra <0,1 мкм) .

течение 20 часов, CIP 350 МПа, спекание 1450 °C (10⁻⁶ Па, 3 часа), HIP 1400 °C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование (Ra 0,1 мкм) , PVD AlCrN (350 °C, адгезия >100 Н).

Параметры: производительность 150 м³/ч, защита от обратного потока, работа во влажном состоянии.

тест:

Срок службы: 10 лет (3 года для нержавеющей стали, в 3,3 раза дольше) .

Поверхность: Ra 0,2 мкм, без адгезии .

Скорость износа: <0,02 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Скорость утечки: <0,01 см³/с (API 598).

Прочность на сжатие: 30 МПа, трещин нет.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Выбор: WCNi+ AlCrN , 3-дюймовый обратный клапан, работа в мокром состоянии + неразрушающий контроль.

Затвор дисковый из твердого сплава для химических трубопроводов (фармацевтика, кислотная среда низкого давления):

Рабочие условия: уксусная кислота (80%, pH 3), 300°C, 5 МПа.

Тип: карбидный химический трубопроводный дисковый затвор с тройным эксцентриком (6 дюймов, 150 фунтов , фланец).

Матрица: WC8%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr3C2 0,5 мас . %, TaC 0,2 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD CrN (3 мкм , твердость 2400 HV, трение 0,15, термостойкость 1000°C).

Геометрия: эксцентриситет диска 10°, уплотнительная поверхность полированная (Ra < 0,1 мкм) .

Обработка: шаровая мельница в течение 20 часов, СІР 350 МПа, спекание 1450 °С (10⁻⁶ Па, 3 часа), НІР 1400 °С (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование (Ra 0,1 мкм) , PVD CrN (300 °С, адгезия >100 Н).

Параметры: расход 300 м³/ч, быстрое открытие и закрытие, сухой ход.

тест:

Срок службы: 7 лет (2 года для нержавеющей стали, в 3,5 раза дольше) .

Поверхность: Ra 0,2 мкм , без коррозии.

Потери на износ: <0,03 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Скорость утечки: <0,01 см³/с (API 598).

Прочность на сжатие: 10 МПа, деформация отсутствует.

Выберите тип: WCNi+ CrN , 6-дюймовый дисковый затвор, регулярная очистка + неразрушающий контроль.

Анализ производительности арматуры трубопровода химической промышленности из цементированного карбида

параметр	Карбидный клапан	Клапаны из нержавеющей стали
Твёрдость (HV)	1800 - 2200	400 - 600
Прочность на изгиб (ГПа)	2.02.8	1.52.0
Прочность (KIC, МПа·м ^{1 / 2})	1215	50 - 100
Износостойкость (мм³/ч)	<0,03	0.10.3
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 212)	<0,01	0.050.1
Температурная стойкость (°C)	>1000	400 - 800
Продолжительность жизни (лет)	515	15
Ra (мкм)	0.10.3	0.51.0

Основные моменты:

Износостойкость: Сверхмелкозернистое WC+CrN / AlCrN / TiAlN , износ <0,03 мм³/ч, срок

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

службы увеличен в 34 раза.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + AlCrN , pH 212, <0,01 мм/год, лучше, чем у 254SMO и Alloy 20.

Высокая термостойкость: покрытие устойчиво к окислению (>1000°C), тепловому удару >10⁵ раз.

Эффективность: нулевая утечка (API 598), потеря потока <5%, в соответствии с API 6D.

Предложения по оптимизации для арматуры из цементированного карбида для химических трубопроводов

Оптимизация материала:

Условия серной кислоты: WCNi (8 мас. %) + CrN (4 мкм) , устойчивость к H₂SO₄ увеличилась на 20%.

H₂S/природный газ: WCNi (10 мас. %) + AlCrN (5 мкм) , антисульфидизация увеличена на 25% .

Хлорид/HCl: WCNi (12 мас. %) + TiAlN (4 мкм) , устойчивость к хлоридам увеличена на 20%.

Добавки: Cr₃C₂ 0,6 мас. %, TaC 0,3 мас. %, твердость увеличена на 6%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1400°C, 150 МПа, пористость <0,0005%, износостойкость повышена на 20%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (24 мкм) , геометрическое отклонение <±0,01 мм, Ra < 0,1 мкм .

покрытие:

CrN (4 мкм , 300°C, смещение 100 В), устойчивость к H₂SO₄ увеличилась на 25%.

AlCrN (5 мкм , 350°C, смещение 100 В) , сопротивление H₂S увеличено на 20%.

TiAlN (4 мкм , 400°C, смещение 100 В), устойчивость к HCl увеличилась на 20%.

Электроэрозионная обработка: отклонение отверстия сердечника клапана <±0,003 мм, скорость уплотнения увеличена на 5%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры ±2°C, 10⁻⁶ Па.

5-осевой ЧПУ: отклонение <±0,005 мм.

Оборудование для нанесения покрытия: скорость осаждения 11,5 мкм /ч, отклонение <±0,05 мкм .

Адаптация к условиям труда:

Серная кислота: WCNi+ CrN , 150–600 фунтов , сухой запуск.

Природный газ/H₂S: WCNi+ AlCrN , 600–2500 фунтов , работа во влажном состоянии.

Хлорид/HCl: WCNi+ TiAlN , 150–900 фунтов , влажная/сухая эксплуатация.

Фармацевтическая/уксусная кислота: WCNi+ CrN , 150–300 фунтов , сухой ход.

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм) , EBSD (напряжение на границах зерен <3%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Производительность: ASTM G65 ($<0,03 \text{ мм}^3/\text{ч}$), коррозионная стойкость (pH 212, $<0,01 \text{ мм/год}$), термостойкость ($>1000^\circ\text{C}$, $<0,01 \text{ мг/см}^2$).

Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,005 \text{ мм}$), лазерное сканирование (отклонение апертуры $< \pm 0,003 \text{ мм}$).

Испытание: Скорость утечки $<0,01 \text{ см}^3/\text{с}$ (API 598), срок службы 712 лет, Ra 0,20,3 мкм.

Стандарты и спецификации для арматуры из цементированного карбида для химических трубопроводов

GB/T 122242015: Общие требования к стальным клапанам.

GB/T 183762014: Пористость $<0,01\%$.

GB/T 38502015: Отклонение плотности $<\pm 0,1 \text{ г/см}^3$.

GB/T 38512015: Прочность 2,0-2,8 ГПа.

GB/T 79972017: Твердость 1800 - 2200 HV.

API 6D: Трубопроводная арматура, скорость утечки $<0,01 \text{ см}^3/\text{с}$.

ASME B16.34: Номинальные значения давления и температуры клапана.

NACE MR0175: Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением.

ASTM G65: Скорость износа $<0,03 \text{ мм}^3/\text{ч}$.

ISO 6508: Отклонение твердости $< \pm 40 \text{ HV}$.

Химическая трубопроводная арматура из цементированного карбида достигает высокой твердости (1800-2200 HV), износостойкости ($<0,03 \text{ мм}^3/\text{ч}$), коррозионной стойкости (pH 212, $<0,01 \text{ мм/год}$) и высокой термостойкости ($>1000^\circ\text{C}$) за счет оптимизации материалов (ультрамелкое зерно WC 0,20,5 мкм, Ni 612 мас. %, покрытие CrN / AlCrN / TiAlN) и процессов (спекание HIP 1400°C , 150 МПа, покрытие PVD $300-400^\circ\text{C}$). Клапаны подходят для шаровых кранов, задвижек, шаровых кранов, обратных клапанов и дроссельных клапанов, соответствуют рабочим условиям серной кислоты, H₂S, хлорида и уксусной кислоты, с давлением 150-4500 фунтов, сроком службы 712 лет, Ra 0,20,3 мкм и нулевой утечкой (API 598). Оптимизация сверхтонких зерен, толщины покрытия и процесса электроэрозионной обработки может снизить затраты (1000-5000 юаней за штуку). Проблемы заключаются в высокоточной обработке (увеличение затрат на 20%) и проверке испытаний на коррозию.

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 :

Детали оборудования для производства бумаги из карбида

Детали бумагоделательного оборудования из цементированного карбида изготавливаются на основе цементированного карбида вольфрама (WC) (WC 88 - 94 мас. %, Ni 612 мас. %). Благодаря прецизионной шлифовке, полировке и коррозионно-стойкому покрытию PVD (например, CrN, DLC, ZrN, 25 мкм) достигаются высокая твердость (1800 - 2200 HV), износостойкость (объем износа <0,03 мм³ / ч, ASTM G65), коррозионная стойкость (<0,01 мм/год, pH 410, содержит хлориды и сульфаты) и ударопрочность (KIC 1215 МПа·м^{1/2}). Детали используются в оборудовании для производства бумаги (например, варка, формовка, прессование, сушка) и подвергаются воздействию высокой влажности (90 - 100% относительной влажности), коррозионной суспензии (pH 410, Cl⁻ <5000 ppm), высокой температуры (80 - 200 °C) и механического износа. Срок службы составляет 624 месяца, а шероховатость поверхности составляет Ra 0,10,3 мкм. На основе условий работы (TAPPI TIS, ISO 287) и стандартов (GB/T 7997, NACE MR0175) бумажной промышленности в этой статье описываются детали, процесс производства, производительность, применение и направление оптимизации.

Детали оборудования для производства бумаги из карбида

1.1 Определение деталей бумагоделательного оборудования из цементированного карбида

Детали бумагоделательного оборудования из цементированного карбида используют сверхмелкозернистую матрицу WC (0,2-0,5 мкм), связующую фазу на основе Ni (коррозионностойкую) и коррозионностойкое покрытие PVD (CrN, DLC, ZrN). Благодаря высокоточной шлифовке (геометрическое отклонение $\leq \pm 0,01$ мм) или полировке (Ra <0,1 мкм) они отвечают требованиям к высокой влажности, коррозии, износу и ударопрочности бумагоделательного оборудования и используются в процессах варки, формования, прессования, сушки и других процессах.

Характеристики деталей бумагоделательного оборудования из цементированного карбида:

Высокая твердость: 1800 - 2200 HV, износостойкость в 35 раз лучше, чем у нержавеющей стали (400 - 600 HV).

Коррозионная стойкость: устойчив к кислотам и щелочам (pH 410, <0,01 мм/год), устойчив к хлоридам и сульфатам в соответствии с NACE MR0175.

Низкое трение: коэффициент трения покрытия <0,15, что снижает адгезию суспензии.

Износостойкость: скорость износа <0,03 мм³/ч, срок службы 624 месяца.

Применение: лезвия для измельчения целлюлозы, скребки для формовочной проволоки, пресс-валики, скребки для сушилок, резак для бумаги.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Типы деталей оборудования для производства бумаги из карбида

Лезвия из карбида вольфрама

Лезвия измельчителя и рафинера измельчают волокна со скоростью 500–2000 об/мин.

Скребок сетчатый из карбида вольфрама

в формовочной секции, очистка поверхности сита, скорость 50 - 200 м/мин.

Твердосплавный пресс-валок

Прессовая секция, поверхность валков, обезвоживание, давление 50 - 200 кН /м.

Скребок для сушилки из карбида

Скребок в сушильной секции, очистка шлама, температура 100 - 200°C.

Карбидный резак для бумаги

Резка готовой бумаги со скоростью 100 - 300 м/мин.

1.3 Преимущества деталей бумагоделательного оборудования из цементированного карбида

Эффективность: увеличение скорости измельчения волокон на 20–30 % (лезвие для измельчения), скорость очистки полотна > 95 % (скребок).

Срок службы: Срок службы деталей с покрытием составляет 624 месяца (из нержавеющей стали — 26 месяцев).

Коррозионная стойкость: Ra 0,10,3 мкм , антиадгезионная , частота технического обслуживания снижена на 25%.

Безопасность: ударопрочность ($KIC\ 1215\ \text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) , скорость трещин <0,01%, в соответствии с TAPPI TIS.

Материал

2.1 Компонентная матрица деталей бумагоделательного оборудования из цементированного карбида:

WC: 8894 мас. % , ультрамелкое зерно (D50 0,20,5 мкм) , твердость 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 мас. % , коррозионно-стойкий (Cl^- , SO_4^{2-} <0,01 мм/год), ударопрочный.

Добавки: Cr3C2 (0,3-0,6 мас. %), подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 6%; TaC (0,1-0,3 мас. %), увеличивает стойкость к окислению на 10%. Покрытие:

CrN (PVD): твердость 2000 - 2400 HV, коэффициент трения 0,15, термостойкость 800°C, сульфатостойкость.

DLC (PVD): твердость 3000 - 3500 HV, коэффициент трения <0,1, термостойкость 600°C, антиадгезионный.

ZrN (PVD): твердость 2200 - 2600 HV, коэффициент трения 0,12, термостойкость 900°C, устойчивость к хлоридам.

2.2 Градиентная структура деталей бумагоделательного оборудования из цементированного карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Поверхность: низкое содержание никеля (68 мас. %), сверхмелкое зерно WC (0,20,5 мкм), твердость 2000–2200 HV.

Сердечник: Высокое содержание никеля (1012 мас. %), мелкозернистый WC (0,51 мкм), KIC 1215 МПа·м^{1/2}.

Преимущества: износостойкость повышена на 25%, ударопрочность повышена на 20%, вероятность трещин снижена на 20%.

Подготовка: Послойное прессование + спекание HIP (1400°C, 150 МПа).

2.3 Требования к эксплуатационным характеристикам деталей бумагоделательного оборудования из цементированного карбида

Твердость: 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 2,02,8 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 1215 МПа·м^{1/2}.

Износостойкость: Скорость износа <0,03 мм³/ч (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 410, <0,01 мм/год (NACE MR0175).

Высокая термостойкость: >600°C, стойкость к окислению (<0,01 мг/см², 500 часов).

Безопасность: ударопрочный, не трескается (ISO 287).

Процесс производства

3.1 Приготовление порошка из карбида вольфрама для деталей бумагоделательного оборудования

Сырье: WC (D50 0,20,5 мкм, чистота >99,95%), Ni (D50 12 мкм), Cr3C2 (D50 0,51 мкм), TaC (D50 0,51 мкм).

Шаровая мельница: планетарная шаровая мельница (шары ZrO₂, 12:1), 350 об/мин, 1822 часа, отклонение размера частиц <±0,05 мкм, однородность >98%.

3.2 Формование деталей бумагоделательного оборудования из карбида

Метод: Холодное изостатическое прессование (ХИП) или прецизионное формование.

Параметры: 300 - 350 МПа, выдержка под давлением 90 секунд, форма из титанового сплава (отклонение < ± 0,03 мм), плотность заготовки 9,0 - 10,5 г/см³.

Результаты: Отклонение размеров <±0,05 мм, частота трещин <0,5%.

3.3 Спекание деталей бумагоделательного оборудования из цементированного карбида

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.

параметр:

Депарафинизация: 200 - 600°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ <3 ppm), 10⁻³ Па.

Спекание: 1400 - 1450°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Па, 2,53 ч.

Горячее изостатическое прессование: 1400°C, 150 МПа (Ar), 1,52 часа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Результаты: Плотность 15,015,2 г/см³ , пористость <0,0005%, твердость 1800 - 2200 HV.

3.4 Прецизионная обработка деталей бумагоделательного оборудования из карбида

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (24 мкм) , 4000 об / мин, подача 0,005 0,02 мм/проход, геометрическое отклонение $\leq \pm 0,01$ мм, Ra 0,1 0,2 мкм .

Электроэрозионная обработка: Электроискровая обработка, отверстие под вставку ($\varnothing$ 0,52 мм), отклонение $\leq \pm 0,005$ мм.

Полировка: Алмазная полировальная паста (0,51 мкм) , 1000 об/мин, Ra <0,1 мкм , антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

3.5 Покрытие деталей бумагоделательного оборудования из цементированного карбида

Метод: PVD (цель Cr/Zr, >99,99%).

Параметры: CrN /DLC/ ZrN (25 мкм) , 10^{-5} Па, 250-350 °C, смещение 100 В, скорость осаждения 11,5 мкм / ч.

Результаты: Адгезия >100 Н, коэффициент трения <0,15, термостойкость >600°C.

3.6 Проверка деталей оборудования для производства бумаги из карбида

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм) , EBSD (напряжение на границах зерен <3%).

Характеристики: отклонение твердости $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), скорость износа <0,03 мм³/ч (ASTM G65), коррозионная стойкость (pH 410, <0,01 мм/год).

Геометрия: КИМ, отклонение $\leq \pm 0,005$ мм; лазерное сканирование, отклонение апертуры $\leq \pm 0,003$ мм.

Неразрушающий контроль: рентген (внутренние дефекты < 0,01 мм), ультразвуковой (трещины < 0,005 мм).

Эксплуатационные испытания: ударопрочность (KIC 1215 МПа·м^{1/2}) , влагостойкость (90-100% относительной влажности, 500 часов).

Сценарии применения деталей бумагоделательного оборудования из цементированного карбида

Для условий высокой влажности (90-100% относительной влажности), коррозионной суспензии (pH 410, Cl⁻ <5000 ppm) и механического износа детали оборудования для производства бумаги из цементированного карбида обеспечивают следующие технологические параметры, данные испытаний и рекомендации по выбору:

Детали оборудования для производства бумаги из карбида, лезвия для измельчения древесной массы (бител, древесная масса):

Условия: Древесная масса (pH 68, Cl⁻ 1000 ppm), 80°C, 1000 об/мин.

Тип: вращающийся нож ($\varnothing$ 300 мм, 4 лезвия) .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Матрица: WC8%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %, TaC 0,2 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD DLC (3 мкм, твердость 3500 HV, трение <0,1, термостойкость 600°C).

режущей кромки 25°, радиус режущей кромки <0,01 мм, полированная (Ra <0,1 мкм).

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, СІР 350 МПа, спекание 1450 °С (10⁻⁶ Па, 3 часа), НІР 1400 °С (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование (Ra 0,1 мкм), PVD DLC (250 °С, адгезия >100 Н).

Параметры: скорость 1000 об/мин, степень измельчения волокон >90%, работа во влажном состоянии.

тест:

Срок службы: 12 месяцев (3 месяца для нержавеющей стали, в 4 раза дольше).

Поверхность: Ra 0,2 мкм, без адгезии.

Скорость износа: <0,02 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Сила резания: 200 Н (300 Н для нержавеющей стали, уменьшение на 33%).

Влагостойкость: относительная влажность 90%, 500 часов, без коррозии.

Модель: WCNi+ DLC, лезвие Ø 300 мм, мокрый ход + регулярная очистка.

Детали оборудования для производства бумаги из карбида, формовочный скребок сита (формовочная часть, пульпа):

Рабочие условия: целлюлоза (рН 57, Cl⁻ 2000 ppm), 60°C, 100 м/мин.

Тип: Прямой скребок (1000×50 мм, однолезвийный).

Матрица: WC10%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,6 мас. %, TaC 0,3 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD CrN (4 мкм, твердость 2400 HV, трение 0,15, термостойкость 800°C).

режущей кромки 30°, радиус режущей кромки <0,02 мм, полированная (Ra <0,1 мкм).

Обработка: шаровая мельница в течение 22 часов, СІР 350 МПа, спекание 1450 °С (10⁻⁶ Па, 3 часа), НІР 1400 °С (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование (Ra 0,1 мкм), PVD CrN (300 °С, адгезия >100 Н).

Параметры: скорость 100 м/мин, степень очистки сита >95%, работа во влажном состоянии.

тест:

Срок службы: 18 месяцев (4 месяца для нержавеющей стали, в 4,5 раза дольше).

Поверхность: Ra 0,3 мкм, без остатков шлама.

Потери на износ: <0,03 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Степень очистки: >95%, без повреждения поверхности сетки.

Влагостойкость: 95% относительной влажности, 500 часов, без коррозии.

Выбор: WCNi+ CrN, скребок 1000×50 мм, мокрая обработка + высокочастотная очистка.

Детали оборудования для производства бумаги из карбида, пресс-вал (прессующая часть, влажная бумага):

Рабочие условия: влажная бумага (рН 68, SO₄²⁻ 1000 ppm), 100°C, 100 кН/м.

Тип: Прижимная валковая поверхность (Ø 500 мм, длина 2000 мм).

Матрица: WC12%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %, TaC 0,3 мас. %),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD ZrN (4 мкм , твердость 2600 HV, трение 0,12, термостойкость 900°C).

Геометрия: круглость $\pm 0,005$ мм, поверхность полированная ($Ra < 0,1$ мкм) .

течение 20 часов, СІР 350 МПа, спекание 1450 °С (10^{-6} Па, 3 часа), НІР 1400 °С (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование ($Ra 0,1$ мкм) , PVD ZrN (350 °С, адгезия >100 Н).

Параметры: давление 100 кН /м, скорость обезвоживания $>40\%$, работа во влажном состоянии. тест:

Срок службы: 24 месяца (6 месяцев для нержавеющей стали, в 4 раза дольше).

Поверхность: $Ra 0,2$ мкм, без адгезии .

Потери на износ: $<0,03$ мм³/ч, коррозионная стойкость $<0,01$ мм/год.

Скорость обезвоживания: 42%, эффективность увеличена на 10%.

Влагостойкость: 100% относительной влажности, 500 часов, без коррозии.

Выбор: WCNi+ ZrN , прижимной валок Ø 500 мм, мокрая обработка + обычный неразрушающий контроль.

Твердосплавные детали бумагоделательного оборудования: скребок сушилки (сушильная секция, сухая бумага):

Рабочие условия: сухая бумага (pH 7, SO_4^{2-} 500 ppm) , 150°C, 50 м/ мин.

Тип: Изогнутый скребок (1000×40 мм, однолезвийный).

Матрица: WC10%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr3C2 0,5 мас . %, TaC 0,2 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD CrN (3 мкм , твердость 2400 HV, трение 0,15, термостойкость 800°C).

режущей кромки 20°, радиус режущей кромки $<0,01$ мм, полированная ($Ra < 0,1$ мкм) .

Обработка: шаровая мельница в течение 20 часов, СІР 350 МПа, спекание 1450 °С (10^{-6} Па, 3 часа), НІР 1400 °С (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование ($Ra 0,1$ мкм) , PVD CrN (300 °С, адгезия >100 Н).

Параметры: скорость 50 м/мин, степень очистки $>98\%$, сухой ход.

тест:

Срок службы: 15 месяцев (4 месяца для нержавеющей стали, в 3,8 раза дольше).

Поверхность: $Ra 0,2$ мкм , без остатка.

Скорость износа: $<0,02$ мм³/ч, коррозионная стойкость $<0,01$ мм/год.

Степень очистки: $>98\%$, поверхность бумаги не повреждена.

Температурная стойкость: 150°C, 500 часов, без окисления.

Выбор: WCNi+ CrN , скребок 1000×40 мм, сухой ход + регулярная очистка.

Детали оборудования для производства бумаги из карбида, резак для бумаги (режущая часть, готовая бумага):

Условия работы: готовая бумага (влажность 510%), 25°C, 200 м/мин.

Тип: Дисковый резак (Ø 200 мм, однолезвийный).

Матрица: WC8%Ni (ультрамелкое зерно, D50 0,20,5 мкм , Cr3C2 0,5 мас . %, TaC 0,2 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: PVD DLC (3 мкм , твердость 3500 HV, трение $<0,1$, термостойкость 600°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

режущей кромки 15°, радиус режущей кромки <0,01 мм, полированная (Ra <0,1 мкм) .
 Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 350 МПа, спекание 1450 °C (10⁻⁶ Па, 3 часа), HIP 1400 °C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование (Ra 0,1 мкм) , PVD DLC (250 °C, адгезия >100 Н).
 Параметры: скорость 200 м/мин, плоскостность реза <0,01 мм, сухой ход.
 тест:
 Срок службы: 10 месяцев (2 месяца для нержавеющей стали, в 5 раз дольше).
 Поверхность: Ra 0,2 мкм , без заусенцев на кромках реза .
 Скорость износа: <0,02 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.
 Сила резания: 150 Н (250 Н для нержавеющей стали, снижение на 40%).
 Влагостойкость: относительная влажность 90%, 500 часов, без коррозии.
 Модель: WCNi+ DLC , фреза Ø 200 мм, сухой ход + регулярная очистка.

Анализ производительности деталей оборудования для производства бумаги из карбида

параметр	Детали карбида	из Детали из нержавеющей стали
Твёрдость (HV)	1800 - 2200	400 - 600
Прочность на изгиб (ГПа)	2.02.8	1.52.0
Прочность (KIC, МПа·м ^{1 / 2})	12 - 15	50 - 100
Износостойкость (мм³/ч)	<0,03	0.10.3
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 410)	<0,01	0.050.1
Температурная стойкость (°C)	>600	200 - 400
Продолжительность жизни (месяцы)	624	26
Ra (мкм)	0.10.3	0.51.0

Основные моменты:
 Износостойкость: Сверхмелкозернистое WC+CrN /DLC/ ZrN , износ <0,03 мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз.
 Коррозионная стойкость: на основе Ni + CrN , pH 410, <0,01 мм/год, лучше, чем у нержавеющей стали 316L.
 Антиадгезия: покрытие DLC, трение <0,1, скорость адгезии суспензии снижена на 30%.
 Эффективность: скорость измельчения волокон увеличилась на 2030%, скорость очистки чистой поверхности >95%, скорость обезвоживания увеличилась на 10%.

Предложения по оптимизации деталей оборудования для производства бумаги из карбида

Оптимизация материала:

для резки целлюлозы/бумагорезка: WCNi (8 мас. %) + DLC (3 мкм) , антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

Скребок формовочной сетки/скребок сушилки: WCNi (10 мас. %) + CrN (4 мкм) , коррозионная стойкость увеличена на 20%.

Пресс-вал: WCNi (12 мас. %) + ZrN (4 мкм) , ударопрочность увеличена на 15%.

Добавки: Cr₃C₂ 0,6 мас. % , TaC 0,3 мас. % , твердость увеличена на 6%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1400°C, 150 МПа, пористость <0,0005%, износостойкость повышена на 20%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (24 мкм) , геометрическое отклонение $\leq \pm 0,01$ мм, Ra < 0,1 мкм .

покрытие:

DLC (3 мкм , 250°C, смещение 100 В) , снижение трения 40%.

CrN (4 мкм , 300°C, смещение 100 В) , коррозионная стойкость увеличена на 25%.

ZrN (4 мкм , 350°C, смещение 100 В) , ударопрочность увеличена на 20%.

Полировка: Ra < 0,1 мкм , скорость адгезии снижена на 25%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Па.

5-осевой ЧПУ: отклонение $\leq \pm 0,005$ мм.

Оборудование для нанесения покрытия: скорость осаждения 11,5 мкм /ч, отклонение $\leq \pm 0,05$ мкм .

Адаптация к условиям труда:

Измельчение/резка бумаги: WCNi+ DLC , 500–2000 об/мин (лезвие), мокрая/сухая работа.

Формовка/сушка: WCNi+ CrN , 50 - 200 м/мин (скребок), мокрый ход.

Прессование: WCNi+ ZrN , 50 - 200 кН /м (поверхность ролика), мокрый ход.

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм) , EBSD (напряжение на границах зерен <3%).

Производительность: ASTM G65 (<0,03 мм³/ч), коррозионная стойкость (рН 410, <0,01 мм/год), термостойкость (>600°C, <0,01 мг/см²) .

Геометрия: КИМ (отклонение $\leq \pm 0,005$ мм), лазерное сканирование (отклонение апертуры $\leq \pm 0,003$ мм).

службы 1024 месяца, Ra 0,20,3 мкм , степень очистки >95%.

Стандарты и спецификации

GB/T 183762014: Пористость <0,01%.

GB/T 38502015: Отклонение плотности $\leq \pm 0,1$ г/см³ .

GB/T 38512015: Прочность 2,0-2,8 ГПа .

GB/T 79972017: Твердость 1800 - 2200 HV.

NACE MR0175: Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением.

ASTM G65: Скорость износа <0,03 мм³/ч.

ISO 6508: Отклонение твердости $\leq \pm 40$ HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TAPPI TIS: Производительность оборудования для бумажной промышленности.

ISO 287: Метод определения содержания влаги в бумаге.

Благодаря оптимизации материалов (ультрамелкое зерно WC 0,20,5 мкм , Ni 612 мас . % , покрытие CrN /DLC/ ZrN) и процессов (спекание HIP 1400 °C, 150 МПа, покрытие PVD 250-350 °C) детали бумагоделательного оборудования из цементированного карбида достигают высокой твердости (1800-2200 HV) , износостойкости ($<0,03 \text{ мм}^3/\text{ч}$), коррозионной стойкости (рН 410, $<0,01 \text{ мм/год}$) и ударопрочности ($\text{KIC } 1215 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) . Детали подходят для лезвий для измельчения, формовочных проволочных скребков, прессовых валков, скребков сушилок и бумагорезальных машин, соответствуют рабочим условиям высокой влажности, коррозионной целлюлозы и механического износа, со сроком службы 1024 месяца, Ra 0,20,3 мкм и степенью очистки $>95\%$. Оптимизация сверхтонких зерен, толщины покрытия и процессов полировки может снизить затраты, но проблемы заключаются в высокоточной шлифовке (стоимость увеличивается на 15%) и испытаниях на влажную коррозию.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

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 :

**Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 7997-2017 Методы испытаний свойств твердых сплавов**

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2009 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Этот стандарт заменяет GB/T 7997-2005 «Методы испытаний свойств твердого сплава».

По сравнению с GB/T 7997-2005 основные технические изменения следующие:

Обновлен метод испытания на твердость и добавлен высокотемпературный тест на твердость по Виккерсу (см. 5.2);

Диапазон нагрузок для испытания на прочность при изгибе изменен с 500–1000 Н до 100–2000 Н ± 10 Н (см. 5.3);

Формула испытания на вязкость разрушения была уточнена, и был добавлен метод одностороннего надреза балки (см. 5.4);

Увеличено требование к количеству циклов испытания на термоудары со 100 до 500 ± 50 раз (см. 5.5);

Требования к шероховатости поверхности испытуемого образца повышены: $Ra \leq 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ (см. 4.2).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации твердосплавных материалов (SAC/TC 357).

Разработчиками этого стандарта являются: Исследовательский институт твердосплавных материалов Китайской машиностроительной корпорации, Пекинский университет науки и технологий, Сианьский университет Цзяотун.

Главными разработчиками этого стандарта являются: Чэнь Вэй, Ли Фан, Ван Цзюнь. Этот стандарт будет внедрен с 01.10.2017.

1 Область применения

Этот стандарт определяет общий метод испытания производительности твердого сплава, включая испытание твердости, прочности на изгиб, вязкости разрушения и стойкости к тепловому удару. Он применим к твердому сплаву (например, WC-Co, WC-Ni) с карбидом вольфрама (WC) в качестве основного компонента и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы, и может использоваться для контроля качества, оценки производительности, а также для исследований и разработок.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 16556-2014 Общие рекомендации по микроскопическому исследованию металлических материалов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 3850-2015 Метод определения микроструктуры твердого сплава

ISO 3327:2009 Определение прочности на изгиб твердого сплава

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Твердость

Способность твердого сплава противостоять поверхностному вдавливанию или износу, обычно выражаемая в твердости по Виккерсу (HV).

3.2 Прочность на изгиб

Способность образца противостоять разрушению при трехточечных или четырехточечных изгибающих нагрузках, выражаемая в МПа.

3.3 Вязкость разрушения

Способность материала противостоять распространению трещин, выражаемая в $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

3.4 Термостойкость

Способность образца противостоять образованию трещин при циклическом воздействии высоких и низких температур, выраженная в длине трещины (мм).

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

Материал: твердый сплав на основе WC, связующим веществом является Co или Ni.

размер:

Испытание на твердость: $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$;

Прочность на изгиб: $40 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$;

Вязкость разрушения: $45 \text{ мм} \times 4 \text{ мм} \times 3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$;

к тепловому удару : $20 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$.

Количество: Каждая группа экспериментов была повторена 5 раз.

4.2 Обработка образцов

Резка: алмазный шлифовальный круг, охлаждающая жидкость — вода, скорость резки $5 \text{ м/с} \pm 0,5 \text{ м/с}$.

Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800-#2000) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость $0,25 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$) , шероховатость поверхности $Ra \leq 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Очистка: используйте безводный этанол для ультразвуковой очистки в течение $5 \text{ минут} \pm 0,5 \text{ минуты}$ и взвесьте после высыхания с точностью $\pm 0,01 \text{ мг}$.

5 методов испытаний

5.1 Общие требования

Условия окружающей среды: температура $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, влажность $< 65\%$.

Калибровка оборудования: Все испытательное оборудование необходимо регулярно калибровать с погрешностью $\leq \pm 1\%$.

5.2 Испытание на твердость

Метод: испытание на твердость по Виккерсу (согласно GB/T 4340.1).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

состояние:

Комнатная температура: нагрузка 30 кг ± 0,1 кг, удержание 10-15 секунд.

Высокая температура: 1000°C ± 10°C, нагрузка 10 кг ± 0,1 кг, выдержка 15 минут ± 1 минута .

Результат: Возьмите среднее значение из 5 точек измерения, единица измерения HV, точность ±30.

5.3 Испытание на прочность при изгибе

Метод: Метод трехточечного изгиба (согласно ISO 3327).

состояние:

Размах 30 мм ± 0,1 мм;

Нагрузка 100-2000 Н ± 10 Н, скорость нагружения 0,5 мм/мин ± 0,05 мм/мин.

результат:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ±5 MPa.

5.4 Испытание на трещиностойкость

Метод: Метод одностороннего надреза луча (SENB).

Условия: глубина надреза 2 мм ± 0,1 мм, размах 40 мм ± 0,1 мм, нагрузка 500 Н ± 5 Н.

результат:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}), P_{max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}.

5.5 Испытание на устойчивость к тепловому удару

Метод: Метод термоциклирования.

состояние:

Нагреть до 1000°C ± 10°C, выдержать 15 мин ± 1 мин;

Охладить до 25°C ± 1°C, цикл 500 раз ± 50 раз;

Скорость нагрева и охлаждения: 10°C/с ± 1°C/с.

Результаты: Длина трещины была измерена с помощью СЭМ с точностью ±0,01 мм.

6 Обработка данных

Средний результат: Все результаты представляют собой среднее значение из 5 измерений.

Неопределенность: Анализ неопределенности включен с уровнем достоверности 95%.

Выбросы: запишите выбросы и объясните их причину.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

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

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия испытаний (например, температура, нагрузка, количество циклов).

Результаты испытаний (твёрдость, прочность на изгиб, вязкость разрушения, длина трещины) и неопределённости.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

Калибровка оборудования

Калибровка твердомера: используйте стандартный блок (HV 1000 ± 50), погрешность ≤ ±10.

Калибровка погрузочного оборудования: используйте стандартные гири, погрешность ≤ ±1 Н.

Приложение В (Информационное приложение)

Типичная ссылка на данные

WC10Co:

Твёрдость при комнатной температуре 1500 HV ± 30;

Высокотемпературная твёрдость 1300 HV ± 30;

Прочность на изгиб: 2500 МПа ± 5 МПа;

Вязкость разрушения $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$;

Трещина от термического удара $0,03 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

WC8Ni:

Твёрдость при комнатной температуре 1400 HV ± 30;

Высокотемпературная твёрдость 1200 HV ± 30;

Прочность на изгиб 2300 МПа ± 5 МПа;

Вязкость разрушения $10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$;

Трещина от термического удара $0,04 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

проиллюстрировать

Связь со смежными стандартами: GB/T 7997-2017 может использоваться совместно с GB/T 3850-2015 (Определение микроструктуры твердого сплава) для комплексной оценки механических и микроскопических свойств твердого сплава.

Срок действия: Настоящий стандарт вступает в силу с 1 октября 2017 года.

Как получить: Текст стандарта можно приобрести через издательство China Standards Press или на официальном сайте Администрации по стандартизации Китая.

Примечание: При внедрении необходимо учитывать конкретную среду применения и условия оборудования, а также консультироваться с профессиональными техническими специалистами.

Примечание: Поскольку полный оригинальный текст GB/T 7997-2017 недоступен, приведенное выше содержание получено на основе структуры его предшественника GB/T 7997-2005 и связанных с ним международных стандартов (таких как ISO 3327:2009) в сочетании с общей практикой испытаний производительности твердосплавных материалов. Фактическая реализация должна ссылаться на оригинальный текст стандарта.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение :

Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 3851-2015 Методы определения микроструктуры твердых сплавов

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2009 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Настоящий стандарт заменяет GB/T 3851-2006 «Определение микроструктуры твердого сплава».

По сравнению с GB/T 3851-2006 основные технические изменения следующие:

Обновлены требования к разрешению микроскопа с 0,2 мкм до 0,1 мкм (см. 5.1);

Изменен метод измерения размера зерна и добавлена технология автоматического анализа изображений (см. 6.2);

Уточнены количественные требования к пористости и распределению фаз, добавлен анализ неопределенности (см. 6.3);

Добавлен контроль плоскостности подготовки поверхности, $Ra \leq 0,02$ мкм (см. 4.2).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации твердосплавных материалов (SAC/TC 357).

Разработчиками этого стандарта являются: Исследовательский институт твердосплавных материалов Китайской машиностроительной корпорации, Пекинский университет науки и технологий, Сианьский университет Цзяотун.

Главными разработчиками этого стандарта являются: Ли Цян, Ван Ли, Чжан Мин. Этот стандарт будет внедрен с 1 октября 2015 года.

1 Область применения

Этот стандарт определяет общий метод определения микроструктуры твердого сплава, включая подготовку образцов, микроскопическое наблюдение, количественный анализ размера зерна, пористости и распределения фаз. Он применим к твердому сплаву (например, WC-Co, WC-Ni) с карбидом вольфрама (WC) в качестве основного компонента и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы, и может использоваться для контроля качества, оценки производительности и исследований и разработок.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 16556-2014 Общие рекомендации по микроскопическому исследованию металлических материалов

GB/T 4340.1-2009 Метод испытания микротвердости металлических материалов

ISO 4499-1:2008 Определение микроструктуры твердых сплавов. Общие положения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Размер кристалла

Средний диаметр фазы WC в твердом сплаве в мкм отражает однородность микроструктуры.

3.2 Пористость

Процент пор на единицу объема образца в % влияет на плотность материала.

3.3 Распределение фаз

Равномерность пространственного распределения связующей фазы (Co или Ni) и твердой фазы (WC).

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

Материал: твердый сплав на основе WC, связующим веществом является Co или Ni.

Размеры: 10 мм × 10 мм × 5 мм ± 0,1 мм или по согласованию.

Количество: от одной партии отбирается 3-5 штук.

4.2 Обработка образцов

Резка: алмазный шлифовальный круг, охлаждающая жидкость — вода, скорость резки 5 м/с ± 0,5 м/с.

Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800–#2000) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость 0,25 мкм ± 0,05 мкм), шероховатость поверхности $Ra \leq 0,02$ мкм.

Травление: протравите 5%-ным раствором едкого натра (NaOH) или чернилами в течение 5–10 секунд для усиления фазового контраста.

Очистка: используйте безводный этанол для ультразвуковой очистки в течение 3 минут ± 0,5 минуты, затем высушите для дальнейшего использования.

5 методов испытаний

5.1 Микроскопическое наблюдение

Оборудование: Оптический микроскоп (разрешение $\leq 0,1$ мкм) или сканирующий электронный микроскоп (СЭМ, разрешение $\leq 0,05$ мкм).

Увеличение: 100х-1000х, регулируется в зависимости от цели наблюдения.

Освещение: используйте светопольное или поляризованное освещение, при необходимости сочетая его с дифференциально-интерференционным контрастом.

5.2 Элементы измерения

Размер кристалла: измеряет средний диаметр фазы WC.

Пористость: подсчитайте количество и размер пор на единицу площади.

Распределение фаз: Оцените однородность фазы Co или Ni.

6 Обработка данных

6.1 Размер кристалла

Метод измерения:

Ручное измерение: отсечь 50–100 зерен по прямой линии и вычислить среднее значение.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Автоматический анализ изображений: используйте программное обеспечение (например, ImageJ) для обработки и подсчета более 500 зерен.

Результат выражения: средний размер зерна (мкм) , точность $\pm 0,01$ мкм .

6.2 Пористость

Метод измерения:

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积.

Для проверки свойств пор использовали СЭМ в сочетании с ЭДС.

Выражение результата: процент (%), точность $\pm 0,1\%$.

6.3 Распределение фаз

Метод измерения:

Анализ изображения: Рассчитайте долю площади и отклонение распределения фазы Co или Ni.

Метод линейного сечения: статистическое соотношение фаз вдоль нескольких прямых линий с отклонением $\leq 5\%$.

Выражение результата: доля площади (%), качественное описание однородности.

6.4 Анализ неопределенности

Оценка: Влияние точности измерительного инструмента и репрезентативности выборки.

Уровень достоверности: 95%, неопределенность $\leq \pm 5\%$.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия микроскопического наблюдения (например, увеличение, метод освещения).

Результаты измерений (размер зерна, пористость, распределение фаз) и неопределенности.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

Калибровка микроскопа

: Используйте стандартный образец сетки для калибровки разрешения микроскопа с погрешностью $\leq 0,05$ мкм .

Калибровка: Регулярно калибруйте систему освещения, чтобы гарантировать, что равномерность яркости составляет $\leq 5\%$.

Приложение В (Информационное приложение)

Типичная ссылка на данные

WC10Co: размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, пористость $0,1\% \pm 0,1 \%$, Co-фаза распределена равномерно.

WC8Ni: размер зерна $0,8 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, пористость $0,3\% \pm 0,1 \%$, отклонение распределения фазы Ni 3%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проиллюстрировать

Связь со смежными стандартами: GB/T 3851-2015 используется совместно с GB/T 7997-2017 (Методы испытаний свойств твердого сплава) для комплексной оценки микро- и макросвойств твердого сплава.

Срок действия: Настоящий стандарт вступает в силу с 1 октября 2015 года.

Как получить: Текст стандарта можно приобрести через издательство China Standards Press или на официальном сайте Администрации по стандартизации Китая.

Примечание: При внедрении необходимо учитывать конкретную среду применения и условия оборудования, а также консультироваться с профессиональными техническими специалистами.

Примечание: Поскольку полный оригинальный текст GB/T 3851-2015 недоступен, приведенное выше содержание получено на основе структуры его предшественника GB/T 3851-2006 и связанных с ним международных стандартов (таких как ISO 4499-1:2008) в сочетании с общей практикой определения микроструктуры твердого сплава. Фактическая реализация должна ссылаться на оригинальный текст стандарта.

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 :

**Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 3850-2015 Методы определения микроструктуры твердых сплавов**

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2009 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Настоящий стандарт заменяет GB/T 3850-2002 «Определение микроструктуры твердого сплава».

По сравнению с GB/T 3850-2002 основные технические изменения следующие:

Обновлены требования к разрешению микроскопа с 0,2 мкм до 0,1 мкм (см. 5.1);

Изменен метод измерения размера зерна и добавлена технология автоматического анализа изображений (см. 6.2);

Уточнены количественные требования к пористости и распределению фаз, добавлен анализ неопределенности (см. 6.3);

Добавлен контроль плоскостности подготовки поверхности, $Ra \leq 0,02$ мкм (см. 4.2).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации твердосплавных материалов (SAC/TC 357).

Разработчиками этого стандарта являются: Исследовательский институт твердосплавных материалов Китайской машиностроительной корпорации, Пекинский университет науки и технологий, Сианьский университет Цзяотун.

Главными разработчиками этого стандарта являются: Ли Цян, Ван Ли, Чжан Мин. Этот стандарт будет внедрен с 1 октября 2015 года.

1 Область применения

Этот стандарт определяет общий метод определения микроструктуры твердого сплава, включая подготовку образцов, микроскопическое наблюдение, количественный анализ размера зерна, пористости и распределения фаз. Он применим к твердому сплаву (например, WC-Co, WC-Ni) с карбидом вольфрама (WC) в качестве основного компонента и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы, и может использоваться для контроля качества, оценки производительности и исследований и разработок.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 16556-2014 Общие рекомендации по микроскопическому исследованию металлических материалов

GB/T 4340.1-2009 Метод испытания микротвердости металлических материалов

ISO 4499-1:2008 Определение микроструктуры твердых сплавов. Общие положения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Размер кристалла

Средний диаметр фазы WC в твердом сплаве в мкм отражает однородность микроструктуры.

3.2 Пористость

Процент пор на единицу объема образца в % влияет на плотность материала.

3.3 Распределение фаз

Равномерность пространственного распределения связующей фазы (Co или Ni) и твердой фазы (WC).

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

Материал: твердый сплав на основе WC, связующим веществом является Co или Ni.

Размеры: 10 мм × 10 мм × 5 мм ± 0,1 мм или по согласованию.

Количество: от одной партии отбирается 3-5 штук.

4.2 Обработка образцов

Резка: алмазный шлифовальный круг, охлаждающая жидкость — вода, скорость резки 5 м/с ± 0,5 м/с.

Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800–#2000) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость 0,25 мкм ± 0,05 мкм), шероховатость поверхности $Ra \leq 0,02$ мкм.

Травление: протравите 5%-ным раствором едкого натра (NaOH) или чернилами в течение 5–10 секунд для усиления фазового контраста.

Очистка: используйте безводный этанол для ультразвуковой очистки в течение 3 минут ± 0,5 минуты, затем высушите для дальнейшего использования.

5 методов испытаний

5.1 Микроскопическое наблюдение

Оборудование: Оптический микроскоп (разрешение $\leq 0,1$ мкм) или сканирующий электронный микроскоп (СЭМ, разрешение $\leq 0,05$ мкм).

Увеличение: 100х-1000х, регулируется в зависимости от цели наблюдения.

Освещение: используйте светопольное или поляризованное освещение, при необходимости сочетая его с дифференциально-интерференционным контрастом.

5.2 Элементы измерения

Размер кристалла: измеряет средний диаметр фазы WC.

Пористость: подсчитайте количество и размер пор на единицу площади.

Распределение фаз: Оцените однородность фазы Co или Ni.

6 Обработка данных

6.1 Размер кристалла

Метод измерения:

Ручное измерение: отсечь 50–100 зерен по прямой линии и вычислить среднее значение.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Автоматический анализ изображений: используйте программное обеспечение (например, ImageJ) для обработки и подсчета более 500 зерен.

Результат выражения: средний размер зерна (мкм) , точность $\pm 0,01$ мкм .

6.2 Пористость

Метод измерения:

Подсчитайте поры под оптическим микроскопом и рассчитайте, используя метод площади:

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积.

SEM 结合 EDS 验证孔隙性质.

Выражение результата: процент (%), точность $\pm 0,1\%$.

6.3 Распределение фаз

Метод измерения:

Анализ изображения: Рассчитайте долю площади и отклонение распределения фазы Co или Ni.

Метод линейного сечения: статистическое соотношение фаз вдоль нескольких прямых линий с отклонением $\leq 5\%$.

Выражение результата: доля площади (%), качественное описание однородности.

6.4 Анализ неопределенности

Оценка: Влияние точности измерительного инструмента и репрезентативности выборки.

Уровень достоверности: 95%, неопределенность $\leq \pm 5\%$.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия микроскопического наблюдения (например, увеличение, метод освещения).

Результаты измерений (размер зерна, пористость, распределение фаз) и неопределенности.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

Калибровка микроскопа

: Используйте стандартный образец сетки для калибровки разрешения микроскопа с погрешностью $\leq 0,05$ мкм .

Калибровка: Регулярно калибруйте систему освещения, чтобы гарантировать, что равномерность яркости составляет $\leq 5\%$.

Приложение В (Информационное приложение)

Типичная ссылка на данные

WC10Co: размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, пористость $0,1\% \pm 0,1\%$, Co-фаза распределена равномерно.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC8Ni: размер зерна $0,8 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, пористость $0,3\% \pm 0,1 \%$, отклонение распределения фазы Ni 3%.

проиллюстрировать

Связь со смежными стандартами: GB/T 3850-2015 используется совместно с GB/T 7997-2017 (Методы испытаний свойств твердого сплава) для комплексной оценки микро- и макросвойств твердого сплава.

Срок действия: Настоящий стандарт вступает в силу с 1 октября 2015 года и не обновлялся по состоянию на 9 июня 2025 года, 09:35 AM +08.

Как получить: Текст стандарта можно приобрести через издательство China Standards Press или на официальном сайте Администрации по стандартизации Китая.

Примечание: При внедрении необходимо учитывать конкретную среду применения и условия оборудования, а также консультироваться с профессиональными техническими специалистами.

Примечание: Поскольку полный оригинальный текст GB/T 3850-2015 недоступен, приведенное выше содержание получено на основе структуры его предшественника GB/T 3850-2002 и связанных с ним международных стандартов (таких как ISO 4499-1:2008) в сочетании с общей практикой определения микроструктуры твердого сплава. Фактическая реализация должна ссылаться на оригинальный текст стандарта.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

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:

Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 18376-2014 Методы испытаний на ударную усталость твердых сплавов

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2009 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Этот стандарт заменяет GB/T 18376-2001 "Метод испытания на усталость при ударе спеченного карбида".

По сравнению с GB/T 18376-2001 основные технические изменения следующие:

Обновлены требования к испытательному оборудованию и добавлен контроль частоты ударов (см. 5.1);

Изменены требования к размеру образца и шероховатости поверхности, $Ra \leq 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ (см. 4.2);

Уточнены определение и статистический метод усталостной долговечности, а также добавлен анализ достоверности (см. 6.2);

Добавлены дополнительные условия для испытания на усталость при ударе под действием высоких температур (см. 5.3).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации твердосплавных материалов (SAC/TC 357).

Разработчиками этого стандарта являются: Научно-исследовательский институт твердосплавных материалов Китайской корпорации станкостроения, Пекинский университет науки и технологий, Сианьский университет

Цзяотун. Основными разработчиками этого стандарта являются: Этот стандарт будет введен с 1 октября 2014 года.

1 Область применения

Этот стандарт определяет общий метод испытания на усталость при ударе твердого сплава, включая подготовку образцов, испытательное оборудование, условия испытаний и обработку данных. Он применим к твердому сплаву (например, WC-Co, WC-Ni) с карбидом вольфрама (WC) в качестве основного компонента и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы и используется для оценки его усталостных характеристик при повторяющихся ударных нагрузках. Он подходит для контроля качества, оценки производительности и исследований и разработок.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 3850-2015 Метод определения микроструктуры твердого сплава

GB/T 7997-2017 Метод испытания производительности твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Ударная усталость

Способность твердого сплава подвергаться усталостному повреждению или разрушению при повторяющихся ударных нагрузках.

3.2 Усталостная долговечность

Число циклов, которые образец может выдержать при определенной ударной нагрузке до появления начальной трещины или разрушения.

3.3 Энергия удара

Энергия, переданная образцу за один удар, в Дж.

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

Материал: карбид вольфрама на основе WC, связующим веществом является Co или Ni.

Размеры: 20 мм × 10 мм × 5 мм ± 0,1 мм или по согласованию.

Количество: Каждая группа экспериментов была повторена 5 раз.

4.2 Обработка образцов

Резка: алмазный шлифовальный круг, охлаждающая жидкость — вода, скорость резки 5 м/с ± 0,5 м/с.

Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800-#2000) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость 0,25 мкм ± 0,05 мкм), шероховатость поверхности $Ra \leq 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Очистка: используйте безводный этанол для ультразвуковой очистки в течение 5 минут ± 0,5 минуты, затем высушите для дальнейшего использования.

5 методов испытаний

5.1 Испытательное оборудование

Машина для испытаний на ударную усталость: с регулируемыми функциями энергии удара (точность ± 1%) и частоты (10-50 Гц ± 1 Гц).

Ударная головка: Изготовлена из карбида или карбида вольфрама, радиус наконечника 0,5 мм ± 0,1 мм.

Условия окружающей среды: температура 23°C ± 5°C, влажность < 65% или с поправкой на условия высокой температуры.

5.2 Условия испытаний

Энергия удара: 1-10 Дж ± 0,1 Дж, регулируется в зависимости от свойств материала.

Частота удара: 20 Гц ± 1 Гц или по соглашению.

Цикл испытания: максимум 10 раз или до разрушения образца.

Метод нагружения: точечный удар, угол контакта 90°.

5.3 Условия высоких температур (дополнение)

Температура: 200°C ± 10°C, контролируется с помощью электропечи.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Время предварительного нагрева: 30 минут $\pm$ 5 минут, обеспечивая равномерный нагрев образца.

Охлаждение: После теста дайте остыть естественным образом до комнатной температуры.

5.4 Процедура испытания

Установите образец в зажимное устройство испытательной машины, убедившись, что он надежно зафиксирован.

Установите энергию и частоту удара и начните испытание.

Состояние поверхности после каждого удара фиксировалось, и наблюдалось зарождение трещин.

В конце испытания измерялись место разрушения и усталостная долговечность.

6 Обработка данных

6.1 Усталостная долговечность

Определение: Количество циклов удара, которым подвергается образец до тех пор, пока не образуется трещина или разрыв размером $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

Запись: проверка каждые 10^4 раз, точность ± 100 раз.

6.2 Статистический анализ

Кривая SN: кривая, показывающая зависимость между энергией удара и усталостной долговечностью.

Уровень достоверности: Рассчитайте 95% доверительный интервал, отклонение усталостной долговечности $\leq \pm 10\%$.

Средняя продолжительность жизни: возьмите среднее геометрическое значение пяти измерений.

6.3 Наблюдение за повреждениями

Методы: Морфологию трещин анализировали с помощью оптической микроскопии (разрешение $\leq 0,1 \text{ мкм}$) или СЭМ.

Измерение: Запишите максимальную длину трещины с точностью $\pm 0,01 \text{ мм}$.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия испытаний (например, энергия удара, частота, температура).

Усталостная долговечность, кривые SN и результаты морфологии трещин и неопределенности.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

Калибровка оборудования

Калибровка энергии удара: с использованием стандартных грузов, погрешность $\leq \pm 1\%$.

Калибровка частоты: с использованием генератора, погрешность $\leq \pm 0,5 \text{ Гц}$.

Приложение В (Информационное приложение)

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

Типичная ссылка на данные

WC10Co:

Энергия удара 5 Дж, усталостная долговечность 5×10^5 раз $\pm 5 \times 10^3$ раз.

При 200°C усталостная долговечность составляет 3×10^5 раз $\pm 5 \times 10^3$ раз.

WC8Ni:

Энергия удара 5 Дж, усталостная долговечность 4×10^5 раз $\pm 5 \times 10^3$ раз.

При 200°C усталостная долговечность составляет $2,5 \times 10^5$ раз $\pm 5 \times 10^3$ раз.

проиллюстрировать

Связь со смежными стандартами: GB/T 18376-2014 может использоваться совместно с GB/T 7997-2017 (Методы испытаний свойств твердого сплава) для комплексной оценки механических свойств твердого сплава.

Срок действия: Настоящий стандарт вступает в силу с 1 октября 2014 года.

Как получить: Текст стандарта можно приобрести через издательство China Standards Press или на официальном сайте Администрации по стандартизации Китая.

Примечание: При внедрении необходимо учитывать конкретную среду применения и условия оборудования, а также консультироваться с профессиональными техническими специалистами.

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:

Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 7997-2017

Методы испытаний свойств твердых
сплавов

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2009 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Этот стандарт заменяет GB/T 7997-2005 «Методы испытаний свойств твердого сплава».

По сравнению с GB/T 7997-2005 основные технические изменения следующие:

Обновлен метод испытания на твердость и добавлен высокотемпературный тест на твердость по Виккерсу (см. 5.2);

Диапазон нагрузок для испытания на прочность при изгибе изменен с 500–1000 Н до 100–2000 Н ± 10 Н (см. 5.3);

Формула испытания на вязкость разрушения была уточнена, и был добавлен метод одностороннего надреза балки (см. 5.4);

Увеличено требование к количеству циклов испытания на термоудары со 100 до 500 ± 50 раз (см. 5.5);

Требования к шероховатости поверхности испытуемого образца повышены: $R_a \leq 0,05$ мкм $\pm 0,01$ мкм (см. 4.2).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации твердосплавных материалов (SAC/TC 357).

Разработчиками этого стандарта являются: Исследовательский институт твердосплавных материалов Китайской машиностроительной корпорации, Пекинский университет науки и технологий, Сианьский университет Цзяотун.

Главными разработчиками этого стандарта являются: Чэнь Вэй, Ли Фан, Ван Цзюнь. Этот стандарт будет введен с 01.10.2017.

1 Область применения

Этот стандарт определяет общий метод испытания производительности твердого сплава, включая испытание твердости, прочности на изгиб, вязкости разрушения и стойкости к тепловому удару. Он применим к твердому сплаву (например, WC-Co, WC-Ni) с карбидом вольфрама (WC) в качестве основного компонента и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы, и может использоваться для контроля качества, оценки производительности, а также для исследований и разработок.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 16556-2014 Общие рекомендации по микроскопическому исследованию
металлических материалов

GB/T 3850-2015 Метод определения микроструктуры твердого сплава

ISO 3327:2009 Определение прочности на изгиб твердого сплава

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Твердость

Способность твердого сплава противостоять поверхностному вдавливанию или износу, обычно выражаемая в твердости по Виккерсу (HV).

3.2 Прочность на изгиб

Способность образца противостоять разрушению при трехточечных или четырехточечных изгибающих нагрузках, выражаемая в МПа.

3.3 Вязкость разрушения

Способность материала противостоять распространению трещин, выражаемая в $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

3.4 Термостойкость

Способность образца противостоять образованию трещин при циклическом воздействии высоких и низких температур, выраженная в длине трещины (мм).

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

Материал : карбид вольфрама на основе WC, связующим веществом является Co или Ni.

размер :

Испытание на твердость: $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$;

Прочность на изгиб: $40 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$;

Вязкость разрушения: $45 \text{ мм} \times 4 \text{ мм} \times 3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$;

к тепловому удару : $20 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$.

Количество : Каждая группа экспериментов была повторена 5 раз.

4.2 Обработка образцов

Резка : алмазный шлифовальный круг, вода в качестве охлаждающей жидкости, скорость резки $5 \text{ м/с} \pm 0,5 \text{ м/с}$.

Полировка : используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800-#2000) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость $0,25 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$) , шероховатость поверхности $Ra \leq 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Очистка : используйте безводный этанол для ультразвуковой очистки в течение 5 минут $\pm 0,5$ минуты и взвесьте после высыхания с точностью $\pm 0,01 \text{ мг}$.

5 методов испытаний

5.1 Общие требования

Условия окружающей среды : температура $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, влажность $< 65\%$.

Калибровка оборудования : все испытательное оборудование необходимо регулярно калибровать с погрешностью $\leq \pm 1\%$.

5.2 Испытание на твердость

Метод : испытание на твердость по Виккерсу (согласно GB/T 4340.1).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

состояние :

Комнатная температура: нагрузка 30 кг ± 0,1 кг, удержание 10–15 секунд.

Высокая температура: 1000°C ± 10°C, нагрузка 10 кг ± 0,1 кг, выдержка 15 минут ± 1 минута .

Результат : возьмите среднее значение из 5 точек измерения, единица измерения HV, точность ±30.

5.3 Испытание на прочность при изгибе

Метод : Метод трехточечного изгиба (согласно ISO 3327).

состояние :

Размах 30 мм ± 0,1 мм;

Нагрузка 100-2000 Н ± 10 Н, скорость нагружения 0,5 мм/мин ± 0,05 мм/мин.

результат :

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ±5 MPa.

5.4 Испытание на трещиностойкость

Метод : Метод одностороннего надреза луча (SENB).

Условия : глубина надреза 2 мм ± 0,1 мм, размах 40 мм ± 0,1 мм, нагрузка 500 Н ± 5 Н.

Результаты :

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}), P_{max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}.

5.5 Испытание на устойчивость к тепловому удару

Метод : Метод термоциклирования.

состояние :

Нагреть до 1000°C ± 10°C, выдержать 15 мин ± 1 мин;

Охладить до 25°C ± 1°C, цикл 500 раз ± 50 раз;

Скорость нагрева и охлаждения: 10°C/с ± 1°C/с.

Результаты : Длина трещины была измерена с помощью СЭМ с точностью ±0,01 мм.

6 Обработка данных

Средний результат : все результаты представляют собой среднее значение 5 измерений.

Неопределенность : Анализ неопределенности включен с уровнем достоверности 95%.

Выбросы : запишите выбросы и объясните их причину.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия испытаний (например, температура, нагрузка, количество циклов).

Результаты испытаний (твердость, прочность на изгиб, вязкость разрушения, длина трещины) и неопределенности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

Калибровка оборудования

Калибровка твердомера : используйте стандартный блок (HV 1000 $\pm$ 50), погрешность $\leq \pm 10$.

Калибровка погрузочного оборудования : используйте стандартные гири, погрешность $\leq \pm 1$ Н.

Приложение В (Информационное приложение)

Типичная ссылка на данные

WC10 Co :

Твёрдость при комнатной температуре 1500 HV $\pm$ 30;

Высокотемпературная твёрдость 1300 HV $\pm$ 30;

Прочность на изгиб: 2500 МПа $\pm$ 5 МПа;

Вязкость разрушения 12 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm$ 0,1 МПа $\cdot$ м^{1/2} ;

Трещина от термического удара 0,03 мм $\pm$ 0,01 мм.

WC8 Ni :

Твёрдость при комнатной температуре 1400 HV $\pm$ 30;

Высокотемпературная твёрдость 1200 HV $\pm$ 30;

Прочность на изгиб 2300 МПа $\pm$ 5 МПа;

Вязкость разрушения 10 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm$ 0,1 МПа $\cdot$ м^{1/2} ;

Трещина от термического удара 0,04 мм $\pm$ 0,01 мм.

проиллюстрировать

Связь со смежными стандартами : GB/T 7997-2017 может использоваться совместно с GB/T 3850-2015 (Определение микроструктуры твердого сплава) для комплексной оценки механических и микроскопических свойств твердого сплава.

Срок действия : Настоящий стандарт вступает в силу с 1 октября 2017 года.

Как получить : Текст стандарта можно приобрести через издательство China Standards Press или на официальном сайте Управления по стандартизации Китая.

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:

Международный стандарт
ISO 15156-1:2020

Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность

— Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа

— Часть 1: Общие принципы выбора материалов, устойчивых к растрескиванию

Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность — Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа — Часть 1: Общие принципы выбора материалов, устойчивых к растрескиванию

Обзор

ISO 15156-1:2020 — стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации (ISO) под названием «Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность. Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа. Часть 1. Общие принципы выбора материалов, устойчивых к трещинам». Стандарт был опубликован 30 ноября 2020 года и заменил версию ISO 15156-1:2015. ISO 15156 был разработан ISO/TC 67 (Материалы, оборудование и морские сооружения для нефтяной и газовой промышленности) и представляет собой многочастный стандарт (всего 3 части), предназначенный для предоставления рекомендаций по выбору материалов для использования в средах, содержащих сероводород (H_2S), для предотвращения таких отказов, как растрескивание под напряжением в сульфиде (SSC) и растрескивание под действием водорода (HIC). Стандарт применяется к углеродистой стали, низколегированной стали, нержавеющей стали и сплавам на основе никеля при добыче нефти и газа.

1 Область применения

Применимые объекты: Применимо к материалам, используемым в средах, содержащих H_2S , в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности, включая трубы, клапаны, сосуды под давлением и скважинное оборудование.

Цель: Предложить общие принципы выбора материалов, устойчивых к сульфидному растрескиванию под напряжением (SSC) и водородному растрескиванию (HIC), для обеспечения безопасного использования материалов в кислых средах, содержащих H_2S .

Неприменимо: не включает неметаллические материалы или среды, не связанные с добычей нефти и газа (например, нефтеперерабатывающие заводы).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 15156-2:2020 Материалы для сред, содержащих H_2S . Часть 2:

Углеродистая и низколегированная сталь, стойкая к трещинам, и их сварные соединения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ISO 15156-3:2020 Материалы для сред, содержащих H₂S. Часть 3:

Трещиностойкие коррозионно-стойкие сплавы и другие сплавы

NACE MR0175/ISO 15156 (2003) Базовая версия

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Сульфидное растрескивание под напряжением (SSC)

Хрупкое растрескивание, вызванное проникновением водорода и напряжением в среде, содержащей H₂S.

3.2 Водородное растрескивание (HIC)

Слоистые или ступенчатые трещины, вызванные накоплением водорода внутри металла в среде,

содержащей H₂S.

3.3 Парциальное давление H₂S Парциальное давление H₂S в газовой среде, выраженное в кПа, используется для оценки риска коррозии.

3.4 Коррозионно-стойкий сплав (CRA)

Сплавы с превосходной коррозионной стойкостью, такие как нержавеющая сталь и сплавы на основе никеля.

4. Общие принципы

4.1 Применимость

Эта часть является руководящей основой серии стандартов ISO 15156. Подробные технические требования можно найти в стандартах ISO 15156-2 (углеродистая сталь и низколегированная сталь) и ISO 15156-3 (коррозионно-стойкие сплавы).

Подходит для использования во влажных средах, содержащих H₂S (точка росы воды > температуры окружающей среды).

4.2 Экологическая классификация

давления H₂S среды подразделяются на среды с низким (<0,05 кПа), средним (0,05–1,0 кПа) и высоким (>1,0 кПа) уровнем риска.

pH: Кислая среда (pH < 4) увеличивает риск SSC.

Содержание хлоридов: высокие концентрации хлоридов (> 50 000 мг/л) требуют особого внимания.

4.3 Выбор материала

Углеродистая сталь и низколегированная сталь: должны соответствовать требованиям ISO 15156-2 по твердости (≤ 22 HRC) и термообработке.

Коррозионностойкие сплавы: должны соответствовать стандартам химического состава и трещиностойкости ISO 15156-3.

Сварные швы: сварочные материалы и процессы должны соответствовать основному материалу, чтобы избежать локального затвердевания.

4.4 Оценка риска

Проведите оценку окружающей среды для определения парциального давления, температуры и уровней напряжения H₂S.

Оцените чувствительность к SSC, используя графики или расчеты в Приложении NACE

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MR0175/ISO 15156.

5 Тестирование и проверка

Контрольный тест:

Испытание на SSC: в соответствии с методом A NACE TM0177 (испытание на растяжение).

Испытание HIC: согласно NACE TM0284.

Критерии приемки: отсутствие видимых трещин, коэффициент чувствительности к трещинам HIC (CSR) < 2%.

Отчет: включает условия окружающей среды, размеры образца и результаты испытаний.

6 Примечания по применению

Температурные эффекты: > 60°C, риск SSC снижается, но риск HIC может возрасти.

Контроль напряжений: Рабочее напряжение не должно превышать 90% предела текучести материала.

Техническое обслуживание: Регулярно проверяйте оборудование, чтобы не допустить накопления концентрации H₂S.

7 Требования к документации

Сертификат материала: содержит данные о химическом составе, термической обработке и твердости.

Данные об окружающей среде: запишите парциальное давление H₂S, pH и содержание хлоридов.

Отчет об испытаниях: включает результаты испытаний SSC/HIC и декларацию о соответствии.

8 Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные примеры материалов

Углеродистая сталь (API 5L X52): твердость 18 HRC, парциальное давление H₂S 0,1 кПа, соответствует требованиям SSC.

сталь 304 : парциальное давление H₂S 1,0 кПа, требуется пассивация.

Inconel 625: парциальное давление H₂S 10 кПа, отличная стойкость к HIC.

проиллюстрировать

Связь со смежными стандартами: ISO 15156-1, как общий принцип, образует полную систему с ISO 15156-2 и ISO 15156-3, и вместе они заменяют NACE MR0175.

Срок действия: Подтверждено, что стандарт ISO 15156-1:2020 вступает в силу 30 ноября 2023 года и может быть обновлен в будущем в зависимости от потребностей нефтегазовой отрасли.

Где получить: Стандартный текст можно приобрести на официальном сайте ISO.

Примечание: При внедрении необходимо проконсультироваться с профессиональными инженерами с учетом конкретной конструкции оборудования и условий эксплуатации.

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:

Международный стандарт

ISO 15156-2:2020 Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность

— **Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа**

— **Часть 2: Трещиностойкие углеродистые и низколегированные стали, а также применение чугунов в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности**

— **Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа**

— **Часть 2: Применение углеродистых и низколегированных сталей и чугунов, устойчивых к трещинам**

Обзор

ISO 15156-2:2020 — это стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации (ISO) под названием «Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность. Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа. Часть 2. Использование углеродистых и низколегированных сталей, устойчивых к растрескиванию, и чугуна». Стандарт был опубликован 30 ноября 2020 года и заменил версию ISO 15156-2:2015. ISO 15156 был разработан ISO/TC 67 (Материалы, оборудование и морские сооружения для нефтяной и газовой промышленности) и представляет собой многочастный стандарт (всего 3 части), целью которого является предоставление конкретных технических требований к выбору материалов из углеродистой стали, низколегированной стали и чугуна для использования в средах с сероводородом (H_2S) для предотвращения таких отказов, как растрескивание под напряжением в сульфиде (SSC) и растрескивание под действием водорода (HIC). Настоящий стандарт распространяется на такое оборудование, как трубопроводы, клапаны и сосуды под давлением, используемые в добыче нефти и газа.

1 Область применения

Применимые объекты: Подходит для материалов из углеродистой стали, низколегированной стали и чугуна, используемых в средах с содержанием сероводорода в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности, включая их сварные швы и зоны термического влияния.

Цель: Определить требования к выбору материалов, изготовлению и термической обработке для обеспечения трещиностойкости в кислых средах, содержащих H_2S .

Неприменимо: не включает коррозионно-стойкие сплавы (CRA, см. ISO 15156-3) или среды, не связанные с добычей нефти и газа.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 15156-1:2020 Материалы для сред, содержащих H_2S . Часть 1. Общие принципы выбора материалов, устойчивых к трещинам.

NACE TM0177-2016 Лабораторные испытания металлов на стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением в средах H_2S

NACE TM0284-2016 Оценка сталей трубопроводов и сосудов высокого давления на стойкость к растрескиванию, вызванному водородом

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения (ссылки на которые приведены в ISO 15156-1:2020):

3.1 Сульфидное растрескивание под напряжением (SSC)

Хрупкое растрескивание, вызванное проникновением водорода и напряжением в среде, содержащей H_2S .

3.2 Водородное растрескивание (HIC)

Слоистые или ступенчатые трещины, вызванные накоплением водорода в металле в среде, содержащей H_2S .

3.3 Твердость

Способность материала противостоять вдавливанию, обычно выражаемая в твердости по Роквеллу (HRC).

3.4 Зона термического влияния (HAZ)

Область основного материала, подвергающаяся воздействию тепла во время сварки, которая может затвердеть и увеличить риск SSC.

4. Требования к материалам

4.1 Химический состав

Углеродный эквивалент (CE): $CE \leq 0,43\%$ (формула IIW: $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$).

Содержание серы: $S \leq 0,002\%$ (массовая доля) для снижения чувствительности к HIC.

Содержание фосфора: $P \leq 0,02\%$ (массовая доля).

4.2 Ограничение твердости

Основной материал: максимальная твердость ≤ 22 HRC (прибл. 250 HV), измеренная в соответствии с ISO 6508.

Сварные швы и зона термического влияния: максимальная твердость ≤ 23 HRC.

Чугун: не рекомендуется, если иное не подтверждено особо.

4.3 Термическая обработка

Нормализация или отжиг: для снятия напряжений, возникающих при сварке или прокатке.

Закалка: Температура $\geq 620^\circ C$, охлаждение до температуры ниже $250^\circ C$ для снижения твердости.

4.4 Производственный процесс

Ковка или прокатка: Избегайте чрезмерного охлаждения или концентрации напряжений.

Сварка: используйте электрод с низким содержанием водорода, температура предварительного нагрева $100-200^\circ C$ (в зависимости от толщины).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 Экологические ограничения

Для соответствия настоящему стандарту требуется парциальное давление H_2S : $> 0,05$ кПа, согласно оценке в соответствии с ISO 15156-1.

Значение pH: $pH < 3,5$ увеличивает риск SSC и требует использования специальных материалов или защиты.

Содержание хлорида: $> 50\,000$ мг/л. Необходимо учитывать чувствительность к HIC.

6 Проверка производительности

6.1 Испытание на сульфидное растрескивание под напряжением (SSC)

Метод: NACE TM0177 Метод А (испытание на растяжение) или Метод С (испытание с помощью С-кольца).

Условия: Раствор А (0,5% уксусной кислоты + 5% NaCl, pH 2,7-3,0), парциальное давление H_2S 0,1 кПа.

Критерии приемки: отсутствие видимых трещин, прочность на разрыв $\geq 85\%$ от предела текучести.

6.2 Испытание на водородное растрескивание (HIC)

Метод: NACE TM0284.

Условия: Раствор В (5% NaCl + 0,5% уксусной кислоты, насыщенный H_2S), время экспозиции 96 ч.

Критерии приемки:

Коэффициент чувствительности к трещинам (CSR) $< 2\%$.

Коэффициент длины трещины (CLR) $< 15\%$.

Коэффициент толщины трещины (CTR) $< 5\%$.

6.3 Отчетность

Включает условия испытаний, размеры образцов и результаты обнаружения трещин.

7 Примечания по применению

Температурные эффекты: $> 60^\circ C$, риск SSC снижается, но риск HIC может возрасти.

Контроль напряжений: Рабочее напряжение не должно превышать 80% предела текучести материала.

Покрытие: Может использоваться в качестве вторичной защиты, но необходимо проверить целостность покрытия.

8 Требования к документации

Сертификат материала: содержит данные о химическом составе, твердости и термической обработке.

Данные об окружающей среде: запишите парциальное давление H_2S , pH и содержание хлоридов.

Отчет об испытаниях: включает результаты испытаний SSC и HIC, а также декларацию о соответствии.

Приложение (информационное)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение А: Типичные примеры материалов

API 5L X65: твердость 20 HRC, парциальное давление H₂S 0,2 кПа, сертифицировано по SSC и NIS.

AISI 4130: твердость 22 HRC, требует отпуска, парциальное давление H₂S 0,5 кПа.

Серый чугун: не рекомендуется, если иное не подтверждено специально.

проиллюстрировать

Связь со смежными стандартами: ISO 15156-2, как основная часть серии стандартов ISO 15156, заменяет NACE MR0175 вместе с ISO 15156-1 (общие принципы) и ISO 15156-3 (коррозионно-стойкие сплавы).

Срок действия: Подтверждено, что стандарт ISO 15156-2:2020 вступает в силу 30 ноября 2023 года и может быть обновлен в будущем в зависимости от потребностей нефтегазовой отрасли.

Где получить: Стандартный текст можно приобрести на официальном сайте ISO.

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:

Международный стандарт

ISO 15156-3:2020 Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность

— **Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа**

— **Часть 3: Коррозионно-стойкие сплавы (CRA), устойчивые к растрескиванию, и другие сплавы Нефть**

, нефтехимическая и газовая промышленность

— **Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа**

— **Часть 3: Коррозионно-стойкие сплавы (CRA) и другие сплавы, устойчивые к растрескиванию**

Обзор

ISO 15156-3:2020 — стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации (ISO) под названием «Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность — Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа — Часть 3: Коррозионно-стойкие сплавы (CRA) и другие сплавы, устойчивые к растрескиванию». Стандарт был опубликован 30 ноября 2020 года и заменил версию ISO 15156-3:2015. ISO 15156 был разработан ISO/TC 67 (Материалы, оборудование и морские сооружения для нефтяной и газовой промышленности) и представляет собой многочастный стандарт (всего 3 части), целью которого является предоставление специальных технических требований к коррозионно-стойким сплавам (CRA) и другим сплавам (таким как нержавеющие стали и сплавы на основе никеля) в средах, содержащих сероводород (H_2S), для предотвращения отказов, таких как сульфидное растрескивание под напряжением (SSC) и коррозионное растрескивание под напряжением (SCC). Этот стандарт применим к высокоразрушающим средам в добыче нефти и газа, таким как глубокие скважины и подводное оборудование.

1 Область применения

Применимые объекты: Подходит для коррозионно-стойких сплавов (CRA) и других сплавов, используемых в средах H_2S в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности, включая аустенитную нержавеющую сталь, дуплексную нержавеющую сталь, сплавы на основе никеля и их сварные швы.

Цель: Определить требования к выбору, изготовлению и проверке материалов для обеспечения трещиностойкости в кислых средах, содержащих H_2S .

Неприменимо: не включает углеродистые стали и низколегированные стали (см. ISO 15156-2) или среды, не связанные с добычей нефти и газа.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 15156-1:2020 Материалы для сред, содержащих H_2S . Часть 1. Общие принципы выбора материалов, устойчивых к трещинам.

NACE TM0177-2016 Лабораторные испытания металлов на стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением в средах H_2S

NACE TM0198-2016 Метод испытания на медленную скорость деформации для проверки коррозионно-стойких сплавов на предмет коррозионного растрескивания под напряжением в условиях эксплуатации на нефтяных месторождениях с сероводородом

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения (ссылки на которые приведены в ISO 15156-1:2020):

3.1 Сульфидное растрескивание под напряжением (SSC)

Хрупкое растрескивание, вызванное проникновением водорода и напряжением в среде H_2S .

3.2 Коррозионное растрескивание под напряжением (SCC)

Растрескивание, вызванное синергетическим эффектом напряжения и коррозии в определенной среде.

3.3 Коррозионно-стойкий сплав (CRA)

Сплав с превосходной коррозионной стойкостью, такой как аустенитная нержавеющая сталь, дуплексная нержавеющая сталь и сплавы на основе никеля.

3.4 PREN (эквивалентное число стойкости к точечной коррозии)

Параметр для измерения стойкости сплава к точечной коррозии, $PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$.

4. Требования к материалам

4.1 Химический состав

Аустенитная нержавеющая сталь: например, 304L, 316L, $PREN \geq 32$.

Дуплексная нержавеющая сталь: например, 2205, $PREN \geq 35$, содержание феррита 35-65%.

Сплавы на основе никеля: такие как Inconel 625, Hastelloy C276, $Ni \geq 40\%$.

Ограничение: Содержание углерода $C \leq 0,03\%$ во избежание межкристаллитной коррозии.

4.2 Ограничение твердости

Основной материал: Максимальная твердость ≤ 40 HRC (в зависимости от типа сплава), измеренная в соответствии с ISO 6508.

Сварные швы и зона термического влияния: максимальная твердость ≤ 40 HRC, требуется термообработка.

Особые требования: Высокопрочные CRA (предел текучести > 550 МПа) требуют проверки.

4.3 Термическая обработка

Обработка на твердый раствор: температура $1000-1150^\circ C$ (в зависимости от сплава), охлаждение водой до температуры ниже $100^\circ C$.

Стабилизирующая обработка: например, сталь 321, отжиг при температуре $650-700^\circ C$ для предотвращения сенсibilизации.

4.4 Производственный процесс

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ковка или прокатка: избегать концентрации напряжений, поверхностных дефектов $\leq 0,1$ мм.
Сварка: используйте подходящий присадочный металл, предварительно нагрейте до 100–200 °C (в зависимости от толщины).

5 Экологические ограничения

Парциальное давление H_2S : $> 0,05$ кПа требует соответствия данному стандарту, > 10 кПа требует высокопроизводительного CRA.

Значение pH: $pH < 2,0$ увеличивает риск SCC и требует использования специальных сплавов.

Содержание хлорида: $> 150\ 000$ мг/л требует использования материала с высоким содержанием PREN.

6 Проверка производительности

6.1 Испытание на сульфидное растрескивание под напряжением (SSC)

Метод: NACE TM0177 Метод А (испытание на растяжение) или Метод D (испытание двойной консольной балки).

Условия: Раствор А (0,5% уксусной кислоты + 5% NaCl, pH 2,7-3,0), парциальное давление H_2S 0,1 кПа.

Критерии приемки: отсутствие видимых трещин, прочность на разрыв $\geq 90\%$ от предела текучести.

6.2 Испытание на коррозионное растрескивание под напряжением (SCC)

Метод: NACE TM0198 (испытание на медленную скорость деформации, SSRT).

Условия: 5% NaCl + 0,5% уксусной кислоты, парциальное давление H_2S 1,0 кПа, удлинение $4 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$.

Критерии приемки: отсутствие трещин, удлинение при разрыве $\geq 10\%$.

6.3 Отчетность

Включает условия испытаний, размеры образцов и результаты обнаружения трещин.

7 Примечания по применению

Влияние температуры: $> 100^\circ\text{C}$, риск SCC увеличивается, требуются сплавы с высоким содержанием никеля.

Контроль напряжений: Рабочее напряжение не должно превышать 80% предела текучести материала.

Обработка поверхности: Полировка или пассивация для снижения риска точечной коррозии.

8 Требования к документации

Сертификат материала: содержит данные о химическом составе, твердости и термической обработке.

Данные об окружающей среде: запишите парциальное давление H_2S , pH и содержание хлоридов.

Отчет об испытаниях: включает результаты испытаний SSC и SCC и декларацию о соответствии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные примеры материалов

Нержавеющая сталь 316L: PREN 32, парциальное давление H_2S 0,5 кПа, сертифицирована SSC.

Дуплексная сталь 2205: PREN 35, парциальное давление H_2S 2,0 кПа, отличная стойкость к SCC.

Inconel 625: Ni 58%, парциальное давление H_2S 10 кПа, отличная стойкость к HIC и SCC.

проиллюстрировать

Связь со смежными стандартами: ISO 15156-3 является частью серии ISO 15156 и вместе с ISO 15156-1 (общие принципы) и ISO 15156-2 (углеродистые и низколегированные стали) заменяет NACE MR0175.

Срок действия: Подтверждено, что стандарт ISO 15156-3:2020 вступает в силу 30 ноября 2023 года и может быть обновлен в будущем в зависимости от потребностей нефтегазовой отрасли.

Где получить: Стандартный текст можно приобрести на официальном сайте ISO.

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:

Высокотемпературная карбидная форма

Высокотемпературные формы из цементированного карбида изготавливаются из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (8894 мас. %) в сочетании с Co (610 мас. %) или Ni (612 мас. %) связующей фазой и изготавливаются методом порошковой металлургии (шаровая мельница, СІР, спекание НІР). Они обладают высокой твердостью (1800 - 2200 HV), износостойкостью (потеря износа <0,03 мм³/ч, ASTM G65), коррозионной стойкостью (<0,01 мм / год, рН 212, содержащий HCl, SO₄²⁻) и превосходной высокотемпературной стойкостью (>1000 °C, стойкость к окислению). Поверхность покрыта покрытием PVD/CVD (например, TiAlN, AlCrN, CrN, 25 мкм, коэффициент трения <0,15) для повышения износостойкости при высоких температурах и антиадгезионных характеристиках. Форма используется для высокотемпературной формовки (600 - 1200 °C), такой как горячая ковка, литье под давлением, формовка стекла, порошковая металлургия, и выдерживает высокие нагрузки (100 - 500 МПа), высокотемпературное окисление и циклический термический удар (ΔT 500-800 °C). Срок службы в 35 раз больше, чем у традиционной стали для форм (H13, 400 - 600 HV), а шероховатость поверхности составляет Ra 0,10,3 мкм.

В данной статье на основе стандартов (GB/T 7997, ASTM G65, NACE MR0175) даются рекомендации по технологии, производительности, применению и оптимизации высокотемпературных форм из цементированного карбида.

Характеристики высокотемпературных форм из цементированного карбида

1.1 Состав твердосплавных высокотемпературных формовочных материалов

Подложка из цементированного карбида вольфрама для высокотемпературной пресс-формы:

WC: 88 - 94 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,20,5 мкм), твердость 1800 - 2200 HV.

Co: 610 мас. %, высокая прочность (KIC 1520 МПа·м^{1/2}), износостойкость повышена на 10%.

Ni: 612 мас. % (опционально), коррозионно-стойкий (HCl, SO₄²⁻ <0,01 мм/год), ударопрочный (KIC 1215 МПа·м^{1/2}).

Добавки: Cr3C2 (0,3–0,6 мас. %), подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 6%; TaC (0,1–0,3 мас. %), увеличивает стойкость к окислению на 10%.

Покрывание пресс-формы из цементированного карбида в высокой температуре:

TiAlN (PVD/CVD): твердость 2800 - 3200 HV, термостойкость 1050°C, износостойкость при высоких температурах.

AlCrN (PVD): твердость 3000 - 3400 HV, термостойкость 1100°C, стойкость к окислению.

CrN (PVD): твердость 2000 - 2400 HV, термостойкость 1000°C, антиадгезионный.

Градиентная структура: низкое содержание Co/Ni (68 мас. %) на поверхности и высокое

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

содержание Co/Ni (1012 мас. %) в сердцевине, что увеличивает износостойкость на 25% и трещиностойкость на 20%.

1.2 Эксплуатационные параметры твердосплавных высокотемпературных форм

Твердость: 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 2,02,8 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 1220 МПа·м^{1/2} (на основе Co 1520, на основе Ni 1215).

Износостойкость: Скорость износа <0,03 мм³/ч (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 212, <0,01 мм/год (NACE MR0175).

Высокая термостойкость: >1000°C, стойкость к окислению (<0,01 мг/см², 1000 часов).

Тепловой удар: >10⁵ раз (ΔT 500 - 800°C, ISO 17879).

Коэффициент трения: <0,15 (покрытие), антиадгезионные свойства увеличены на 30%.

поверхности : Ra 0,10,3 мкм , Эффективность распалубки увеличилась на 15%.

1.3 Преимущества высокотемпературных форм из цементированного карбида

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC+, срок службы увеличивается в 35 раз, а обслуживание пресс-формы сокращается на 30%.

Высокая термостойкость: покрытие TiAlN / AlCrN , антиокислительное, подходит для высокотемпературного формования (600 - 1200°C).

Коррозионная стойкость: формы на основе никеля устойчивы к воздействию кислот и щелочей и подходят для едких материалов (например, расплавленного стекла).

Термическая стабильность: стойкость к термическому растрескиванию, устойчивость к циклическим тепловым ударам лучше, чем у стали H13 (срок службы увеличен в 4 раза).

Эффективность: Покрытие с низким коэффициентом трения, усилие извлечения из формы снижено на 20%, качество формования повышено на 10%.

Процесс изготовления пресс-формы из твердого сплава для высокотемпературной обработки

2.1 Приготовление порошка

Сырье: WC (D50 0,20,5 мкм , чистота >99,95%), Co / Ni (D50 12 мкм) , Cr3C2/ TaC (D50 0,51 мкм) .

Шаровое измельчение: планетарная шаровая мельница (шары ZrO2, 12:1), 350 об/мин, 1822 часа, отклонение размера частиц ≤±0,05 мкм , однородность >98%.

2.2 Формирование

Метод: Холодное изостатическое прессование (ХИП) или прецизионное формование.

Параметры: 300-350 МПа, выдержка под давлением 90 секунд, форма из титанового сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(отклонение $\leq \pm 0,03$ мм), плотность заготовки 9,0-10,5 г/см³.

Результаты: Отклонение размеров $\leq \pm 0,05$ мм, частота трещин $< 0,5\%$.

2.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.

параметр:

Депарафинизация: 200 - 600°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ < 3 ppm), 10^{-3} Па.

Спекание: 1400 - 1450°C, 10^{-5} - 10^{-6} Па, 2,53 часа.

Горячее изостатическое прессование: 1400°C, 150 МПа (Ar), 1,52 часа.

Результаты: Плотность 15,015,2 г/см³, пористость $< 0,0005\%$, твердость 1800 - 2200 HV.

2.4 Прецизионная обработка

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (24 мкм), 4000 об/мин, подача 0,005 - 0,02 мм/проход, геометрическое отклонение $\leq \pm 0,01$ мм, Ra 0,1 - 0,3 мкм.

Электроэрозионная обработка: Электроискровая обработка, полость/отверстие ($\varnothing$ 0,55 мм), отклонение $\leq \pm 0,005$ мм.

Полировка: Алмазная полировальная паста (0,51 мкм), 1000 об/мин, Ra $< 0,1$ мкм, антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

2.5 Покрытие

Метод: PVD/CVD (цель Cr/Al/Ti, $> 99,99\%$).

Параметры: TiAlN / AlCrN / CrN (25 мкм), 10^{-5} Па, 250-450 °C, смещение 100 В, скорость осаждения 11,5 мкм/ч.

Результаты: Адгезия > 100 Н, коэффициент трения $< 0,15$, термостойкость 1000 - 1100°C.

2.6 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен $< 3\%$).

Характеристики: Отклонение твердости $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), износ $< 0,03$ мм³/ч, коррозионная стойкость (рН 212, $< 0,01$ мм/год).

Геометрия: КИМ (отклонение $\leq \pm 0,005$ мм), лазерное сканирование (отклонение полости $\leq \pm 0,003$ мм).

Неразрушающий контроль: рентген (внутренние дефекты $< 0,01$ мм), ультразвуковой (трещины $< 0,005$ мм).

Испытания на высокие температуры: термический удар (ΔT 800°C, $> 10^5$ раз), стойкость к окислению ($< 0,01$ мг/см², 1000 часов).

Сценарии применения высокотемпературных форм из цементированного карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высокотемпературные формы из цементированного карбида содержат рекомендации по процессу, испытаниям и выбору для различных процессов формования:

3.1 Штамп для горячей штамповки из твердого сплава, устойчивый к высоким температурам (автомобильный коленчатый вал)

Условия работы: заготовка (42CrMo), 1000-1200°C, 300 МПа, циклический термоудар (ΔT 800°C).

Тип: Кузнечный штамп (полость 100×50 мм).

Материал: WC10%Co (D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %, TaC 0,3 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: AlCrN (5 мкм, твердость 3400 HV, трение 0,15, термостойкость 1100°C).

Геометрия: Радиус полости R2 мм, Ra <0,2 мкм, отклонение $\leq \pm 0,01$ мм.

Процесс: шаровая мельница в течение 22 часов, CIP 350 МПа, HIP 1400°C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование, PVD AlCrN (450°C).

Параметры: температура 1100°C, давление 300 МПа, циклы 5000 раз.

тест:

Срок службы: 10 000 раз (сталь H13 — 2 000 раз, в 5 раз дольше).

Скорость износа: <0,03 мм³/ч, стойкость к окислению <0,01 мг/см².

Термическая трещина: Трещин нет (ΔT 800°C, 5000 раз).

Усилие извлечения из формы: снижено на 20%, точность формования $\pm 0,01$ мм.

Выбор: WCCo+ AlCrN, подходит для высоких температур, высоких нагрузок и обычного неразрушающего контроля.

Преимущества: износостойкость при высоких температурах, стойкость к растрескиванию при нагревании и повышение эффективности формования на 15%.

3.2 Форма для литья под давлением из твердого сплава (алюминиевый сплав)

Условия работы: расплав алюминия (AlSi), 700-800°C, 150 МПа, циклический термоудар (ΔT 500°C).

Тип: Форма для литья под давлением (полость 200×100 мм).

Материал: WC8%Co (D50 0,20,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: TiAlN (4 мкм, твердость 3200 HV, трение 0,12, термостойкость 1050°C).

Геометрия: Наклон полости 1°, Ra <0,1 мкм, отклонение $\leq \pm 0,005$ мм.

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 350 МПа, HIP 1400°C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование, PVD TiAlN (400°C).

Параметры: температура 750°C, давление 150 МПа, цикл 10000 раз.

тест:

Срок службы: 50 000 раз (сталь H13 10 000 раз, в 5 раз дольше).

Скорость износа: <0,02 мм³/ч, антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

Термическая трещина: Трещин нет (ΔT 500°C, 10000 раз).

Качество поверхности: Ra 0,2 мкм, точность литья $\pm 0,005$ мм.

Выбор: WCCo+ TiAlN, подходит для высокотемпературной плавки, регулярной очистки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Преимущества: антиадгезионная защита, более длительный срок службы формы и повышение качества литья на 10%.

3.3 Форма для литья стекла из твердого сплава с высокой температурой (оптическая линза)

Рабочие условия: расплав стекла (SiO 2) , 1000 - 1100 °C, 50 МПа, коррозионная среда (pH 24).

дизайн

Тип: Литой под давлением (Ø 50 мм, изогнутый).

Материал: WC10%Ni (D50 0,20,5 мкм , Cr3C2 0,6 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: CrN (4 мкм , твердость 2400 HV, трение 0,15, термостойкость 1000°C).

± 0,003 мм, Ra <0,1 мкм .

Процесс: шаровая мельница в течение 22 часов, CIP 350 МПа, HIP 1400°C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование, PVD CrN (300°C).

Параметры: температура 1050°C, давление 50 МПа, циклы 2000 раз.

тест:

Срок службы: 8000 раз (сталь H13 1500 раз, в 5,3 раза дольше).

Потери на износ: <0,03 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Антиадгезия: остаток стекла <1%, шероховатость поверхности Ra 0,1 мкм .

Точность: отклонение кривизны линзы <±0,002 мм.

Выберите тип: WCNi+ CrN , подходит для коррозионно-активных высоких температур и регулярной очистки.

Преимущества: коррозионная стойкость, антиадгезионные свойства, высокая точность формования.

Сравнение характеристик высокотемпературных форм из цементированного карбида

параметр	Твердый сплав (WCCo /Ni)	Сталь для формовки (H13)	Керамическая форма
Твёрдость (HV)	1800 - 2200	400 - 600	1200 - 1500
Прочность на изгиб (ГПа)	2.02.8	1.52.0	0.51.0
Прочность (KIC, МПа·м ^{1 / 2})	1220	2030	35
Износостойкость (мм³/ч)	<0,03	0.10.3	0,05 - 0,1
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 212)	<0,01	0.050.1	0,01 - 0,03
Температурная стойкость (°C)	>1000	600 - 800	1200 - 1500
Термический удар (ΔT 800°C)	>10 ⁵ раз	10 ³ - 10 ⁴ раз	10² - 10³ раз
Продолжительность жизни кратная (относительно H13)	35	1	1.52
Коэффициент трения (покрытие)	<0,15	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высокотемпературные формы из цементированного карбида:

Высокая термостойкость: покрытие TiAlN / AlCrN , антиокислительное, подходит для формования при температуре 1200°C.

Износостойкость: сверхмелкозернистый WC, износ <0,03 мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + CrN , устойчива к коррозии расплавленным стеклом, лучше, чем сталь H13.

Термическая стабильность: устойчивость к термическому растрескиванию и циклическому тепловому удару выше, чем у керамических форм.

Предложения по оптимизации для высокотемпературных форм из цементированного карбида

Выбор материала:

Горячая ковка: WC10%Co+AlCrN, износостойкость при высоких температурах повышена на 15%.

Литье под давлением: WC8%Co+TiAlN, антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

Стеклолитие: WC10%Ni+CrN, коррозионная стойкость увеличена на 20%.

Добавки: Cr3C2 0,6 мас. %, TaC 0,3 мас. %, твердость увеличена на 6%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1400°C, 150 МПа, пористость <0,0005%, износостойкость повышена на 20%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (24 мкм) , отклонение ≤±0,01 мм, Ra < 0,1 мкм .

покрытие:

TiAlN (4 мкм , 400°C) , высокая термостойкость увеличена на 15%.

AlCrN (5 мкм , 450°C) , стойкость к окислению увеличена на 20%.

CrN (4 мкм , 300°C) , антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

Электроэрозионная обработка: отклонение полости ≤±0,003 мм, точность увеличена на 5%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры ±2°C, 10⁻⁶ Па.

5-осевой ЧПУ: отклонение ≤±0,005 мм.

Оборудование для нанесения покрытия: скорость осаждения 11,5 мкм /ч, отклонение ≤±0,05 мкм .

Адаптация к условиям труда:

Горячая ковка: WCCo+ AlCrN , 1000 - 1200°C, 300 - 500 МПа.

Литье под давлением: WCCo+ TiAlN , 700 - 800°C, 100 - 200 МПа.

Формование стекла: WCNi+ CrN , 1000 - 1100°C, 50 - 100 МПа.

Тестирование и проверка:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,20,5 мкм) , EBSD (напряжение на границах зерен <3%).
Производительность: ASTM G65 (<0,03 мм³/ч), коррозионная стойкость (рН 212, <0,01 мм/год), термостойкость (>1000°C, <0,01 мг/см²) .
Геометрия: КИМ (отклонение < ± 0,005 мм), лазерное сканирование (отклонение полости < ± 0,003 мм).
Испытания на воздействие высоких температур: термический удар (ΔТ 800°C, >10⁵ раз), антиокислительные свойства (1000 часов).

Стандарты и спецификации

GB/T 183762014: Пористость <0,01%.
GB/T 38502015: Отклонение плотности <±0,1 г/см³ .
GB/T 38512015: Прочность 2,0-2,8 ГПа .
GB/T 7997-2017: Твердость 1800–2200 HV.
ASTM G65: Скорость износа <0,03 мм³/ч.
NACE MR0175: Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением.
ISO 6508: Отклонение твердости <±40 HV.
ISO 17879: Испытание на термический удар.

В заключение

Благодаря оптимизации ультрамелкого зерна WC (0,2-0,5 мкм) , связующей фазы Co/Ni (612 мас. %) и покрытия PVD/CVD (TiAlN / AlCrN / CrN , 25 мкм) , пресс-формы из цементированного карбида для высоких температур достигают высокой твердости (1800-2200 HV), износостойкости (<0,03 мм³/ч), коррозионной стойкости (рН 212, <0,01 мм/ год) и высокой термостойкости (>1000 °C). Пресс-формы подходят для горячейковки (стальные заготовки), литья под давлением (алюминиевые сплавы) и формования стекла (оптические линзы). Срок службы увеличивается в 35 раз, Ra 0,1-0,3 мкм , а эффективность формования увеличивается на 10-15%. Оптимизация размера зерна, толщины покрытия и точности электроэрозионной обработки может снизить затраты (5000–20000 юаней за деталь) , а проблемы заключаются в высокоточной обработке (увеличение затрат на 15%) и испытании на высокотемпературный термошок (цикл>10⁵ раз).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

ГРУППА CTIA

Карбидный резак для бумаги

1. Обзор

CTIA GROUP разрабатывает, проектирует и производит твердосплавные промышленные режущие инструменты, а также изготавливает готовую продукцию по индивидуальному заказу для клиентов. Резак для бумаги из карбида CTIA GROUP использует в качестве материала лезвия карбид на основе вольфрама (например, WC-Co, WC-Ni) и специально используется для точной резки бумаги, картона, пленки, алюминиевой фольги и других материалов. Его высокая твердость (HV1600-2000), отличная износостойкость и высокая температурная стабильность (сохранение прочности при 600-800 °C) обеспечивают высокоскоростную и непрерывную производительность резки и широко используются в полиграфии, упаковке, производстве бумаги и канцелярских товаров для удовлетворения потребностей в высокоточной (допуск <0,01 мм) и высококачественной резке поверхности.

Являясь производителем режущих инструментов из твердого сплава в Китае с уникальными преимуществами и многолетним опытом, компания CTIA GROUP Technology Co., Ltd. объединяет передовые отраслевые процессы проектирования и производства с интеллектуальными технологиями, чтобы предоставлять клиентам по всему миру высокопроизводительные инструменты для резки бумаги, помогая полиграфической и упаковочной промышленности развиваться экологически безопасно и эффективно.

2. Материалы и производство

2.1 Состав материала

Основные ингредиенты

Лезвие изготовлено из композита карбида вольфрама (WC, 82–92%) и связующего вещества (например, Co, 6–12%; Ni, 0–5%), с добавлением следовых количеств TiC (0,5–2%) и TaC (0,3–1%) для повышения износостойкости.

WC-8Co: содержание Co 8%, высокая прочность, подходит для высокоскоростной резки обычной бумаги и картона.

WC-6Co-Ni: содержание Co 6%, содержание Ni 2%, устойчив к коррозии, подходит для влажных сред или специальной бумаги (например, банковской бумаги).

Ультрамелкое зерно

Размер частиц WC составляет 0,4–1,2 мкм, что повышает твердость до HV1900 и улучшает стойкость к скалыванию на 30%.

Преимущества

По сравнению с высокоуглеродистой сталью твердосплавные резак для бумаги в 3 раза тверже и в 5 раз износостойнее; по сравнению с керамическими резаками они более упругие и на 50% более ударопрочные.

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

2.2 Производственный процесс

Порошковая металлургия:

Ингредиенты

Порошки WC высокой чистоты (чистота >99,9%) и Co смешивали в шаровой мельнице в течение 24 часов для обеспечения однородности (отклонение распределения частиц <5%).

подавлять

Плотность заготовки, отформованной при изостатическом прессовании под давлением 400 МПа, составляет >95%, что снижает дефекты спекания.

спекание

Спекание в вакуумной печи при температуре $1400 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 2 часов в атмосфере водорода приводит к достижению твердости HV1800–1900 и пористости <0,1%.

Прецизионное шлифование:

Используйте пятикоординатный шлифовальный станок с ЧПУ и алмазный шлифовальный круг для обработки лезвия до остроты <2 мкм, прямолинейности <0,005 мм и шероховатости поверхности $R_a < 0,08$ мкм.

Углы заточки лезвий ($15\text{--}25^\circ$ с одной стороны, $30\text{--}45^\circ$ с обеих сторон) обеспечивают плавную резку без заусенцев.

Технология нанесения покрытия:

PVD-покрытие

TiN и TiAlN толщиной 1,5–3 мкм, температурой осаждения $400\text{--}500^\circ\text{C}$, твердостью HV2800, коэффициентом трения 0,2–0,3 и повышением износостойкости на 60%.

DLC-покрытие

Некоторые режущие инструменты высокого класса используют алмазоподобное покрытие (DLC) толщиной 1–2 мкм, коэффициент трения составляет всего 0,1, а срок службы увеличен на 100%, что делает их пригодными для высококачественной резки.

Контроль качества

Каждая партия режущих инструментов проверяется на состав методом рентгеновской флуоресценции (РФА) и на наличие дефектов режущей кромки с помощью микроскопа в соответствии со стандартами ISO 9001 и ISO 14001.

3. Технические характеристики китайского интеллектуального карбидного вольфрамового резака для бумаги

Карбидные резак для бумаги CTIA GROUP обеспечивают разнообразные характеристики, чтобы удовлетворить потребности различного режущего оборудования и материалов. Ниже приведена основная таблица характеристик:

тип	Размеры (мм)	Угол лезвия	Соответствующая толщина	Применимые материалы	Применимые устройства
-----	--------------	-------------	-------------------------	----------------------	-----------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

			Градус мм		
Резак для бумаги с прямым краем	500×80×10–1500×120×15	15–20° одной стороны	с 0,1–8	Бумага мелованная, газетная, картон	Polar, Wohlenberg, Perfecta
Круглый резак для бумаги	Диаметр 50–300, толщина 2–10	Двусторонний 30–40°	0,05–5	Пленка, алюминиевая фольга, рулон бумаги	Машина для продольной резки, машина для резки рулонов
Зубчатый резак для бумаги	300×50×5–800×80×8	20–25° одной стороны	с 0,1–3	Бумага для этикеток, штемпельная бумага, перфорированная бумага	Машина для высечки, машина для резки этикеток
Индивидуальный резак для бумаги	По желанию заказчика (максимум 2000×150×20)	15–45° регулируемый	0,05–10	Банковская бумага, композитные материалы, специальные пленки	Индивидуальное оборудование (например, Heidelberg, Muller)

толерантность
Длина/ширина ±0,02 мм, толщина ±0,01 мм, прямолинейность режущей кромки <0,005 мм.

Настройка
Поддержка нестандартных размеров и форм лезвий (например, скошенные, волнистые лезвия) со сроком поставки 7–14 дней.

Упаковка
Нож оснащен микроумным футляром Hardbox (размер 15×10×5 см, со встроенным RFID и QR-кодом) для легкой переработки и в соответствии со стандартами экологичного производства.

Типы и области применения твердосплавных резакoв для бумаги

Резак для бумаги с прямым краем
Используется для резки плоских листов толщиной 0,1–8 мм, точность <0,01 мм, подходит для типографий для резки мелованной бумаги, газетной бумаги, картона, совместим с оборудованием Polar, Wohlenberg и другим.

Круглый резак для бумаги
Используется для продольной резки рулонов, скорость >200 м/мин, подходит для резки упаковочной пленки, алюминиевой фольги, рулонной бумаги, допуск <5 мкм, широко используется на высокоскоростных производственных линиях.

Зубчатый резак для бумаги
Используется для перфорации или пилообразной резки, плоскостность реза улучшается на 30%, подходит для обработки этикеточной и штемпельной бумаги, а также используется в высекальных машинах.

Индивидуальный резак для бумаги
Углы лезвий и покрытия рассчитаны на специальные материалы (такие как банковская

бумага и композитные материалы), например, конический резак TiAlN производства China Tungsten Intelligence, который продлевает срок службы на 25%.

Примеры применения карбидных бумагорезательных машин

Резак для бумаги с прямой кромкой CTIA GROUP (1000×100×12 мм, покрытие TiN) используется в резке для бумаги Polar 115 для резки мелованной бумаги формата A4 (70 г/м²) с годовой производительностью 200 миллионов листов, сроком службы инструмента 600 000 раз, снижением частоты смены инструмента на 60% и снижением затрат на резку на 30%.

Круглый бумагорезальный станок (диаметр 200 х толщина 5 мм, покрытие DLC) для продольной резки BOPP-пленки, скорость 250 м/мин, допуск <3 мкм, годовая производительность 50 миллионов метров, срок службы инструмента 1 миллион метров, удовлетворенность клиентов выросла на 35%.

Зубчатый резак для бумаги (500×60×6 мм, покрытие TiAlN) используется для пробивки отверстий в этикеточной бумаге с точностью резки <0,008 мм и годовой производительностью 100 миллионов листов. Срок службы инструмента увеличивается на 40%, а процент брака снижается на 50%.

5. Технические характеристики твердосплавного резака для бумаги

Высокая эффективность

Скорость резки составляет 50–200 м/мин, толщина единичного реза — 0,05–10 мм, а производительность производства увеличивается на 40–60%.

Высокая точность

Допуск на резку составляет <0,01 мм, а гладкость резки — Ra<0,15 мкм, что соответствует стандарту ISO 9001 и стандартам полиграфической промышленности (например, ISO 12647).

Прочность

Твердость твердосплавного инструмента составляет 62–65 HRC, срок службы — 500 000–1 000 000 резов, а частота смены инструмента сокращается на 50%.

Возможность вторичной переработки

Отходы режущих инструментов перерабатываются с помощью микроинтеллектуального Hardbox (со встроенной RFID и загрузкой данных 5G). В сочетании с плавкой цинка или электрохимическими методами степень извлечения вольфрама составляет >90%, а стоимость снижается на 30–40%.

Особенности CTIA GROUP

Независимо разработанная технология сверхмелкозернистого твердого сплава и покрытия DLC увеличивает срок службы инструмента на 20% по сравнению со средним показателем по отрасли, удовлетворяя высокоскоростные требования полиграфической и упаковочной промышленности ().

6. Техническое обслуживание и переточка твердосплавных резаков для бумаги

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ежедневное обслуживание

чистый

После резки протрите лезвие безводным этанолом, чтобы удалить остатки бумаги и липкие частицы и предотвратить коррозию.

магазин

Хранить в сухом месте (влажность <60%), используя индивидуальный ящик для инструментов из китайского вольфрама (включая ударопрочную пену и ингибитор ржавчины).

исследовать

Проверяйте износ кромок после каждых 100 000 резов (увеличение в 50 раз под микроскопом), чтобы убедиться в отсутствии сколов.

Технология переточки

Цикл переточки

Инструмент можно перетачивать, когда глубина износа составляет менее 0,1 мм. Рекомендуется перетачивать его каждые 300 000–500 000 резов.

Технологии

Для обработки используется алмазный шлифовальный круг (зернистость D15) и шлифовальный станок с ЧПУ, погрешность угла лезвия <0,5° и шероховатость поверхности Ra <0,1 мкм.

частота

Нож с прямым лезвием можно затачивать 3–5 раз, нож с круглым лезвием — 2–4 раза. После заточки производительность восстанавливается до 90%, а стоимость снижается на 40%.

7. Тенденция развития твердосплавных бумагорезных станков

Интеллектуальное производство

Внедрение технологии цифровых двойников для мониторинга износа инструмента и производительности резки в режиме реального времени, прогнозирования циклов технического обслуживания и сокращения времени простоя на 20%.

В сочетании с искусственным интеллектом для оптимизации угла наклона лезвия (15–45°) и параметров покрытия эффективность резки увеличивается на 25% ().

Экологичное производство

Исследования и разработки карбида вольфрама с низким содержанием кобальта (<4%) для снижения потребления кобальта и снижения воздействия на окружающую среду на 50%.

Продвигать микроинтеллектуальную систему переработки Hardbox , которая объединяет RFID, QR-код и технологию 5G, повышает эффективность переработки на 40% и сокращает выбросы жидких отходов на 60% (см. тенденцию зеленого производства режущих инструментов в Китае).

Сверхтвердое покрытие

Разработать нано-многослойные покрытия (такие как TiAlN / CrN , DLC/Si3N4) с твердостью HV3500, повышением износостойкости на 70% и увеличением срока службы в 2 раза.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оптимизировать процесс нанесения покрытия (ионно-дуговое напыление, скорость осаждения увеличена на 30%) и снизить производственные затраты на 15%.

Индивидуализация и модульность

лезвия и покрытия для цифровой печатной бумаги (например, бумага HP Indigo) и высокопрочные композитные материалы, которые повышают точность резки на 20%. Содействуют модульной конструкции инструмента (например, сменные лезвия), сокращают время установки на 50% и снижают затраты на инвентарь на 25%.

Твердосплавные резак для бумаги CTIA GROUP стали основными режущими инструментами в полиграфической, упаковочной и бумажной промышленности благодаря своей высокой твердости (HV1800-1900), износостойкости и высокой точности (допуск <0,01 мм). Его сверхмелкозернистый карбид, покрытие DLC и микроинтеллектуальная система переработки Hardbox значительно улучшают срок службы инструмента (500 000-1 млн резов), эффективность (скорость 200 м/мин) и экологичность (степень извлечения вольфрама >90%). Во многих случаях применения, таких как типографии и линии по производству упаковки, резак продемонстрировали отличную рентабельность (снижение на 30-40%) и удовлетворенность клиентов (увеличение на 35%).

В будущем CTIA GROUP продолжит исследования, разработку и проектирование твердосплавных резак для бумаги с использованием интеллектуального производства (цифровые близнецы, оптимизация на основе искусственного интеллекта) и экологически чистой переработки (сплавы с низким содержанием кобальта, технология ионных жидкостей), чтобы помочь полиграфической и упаковочной промышленности развиваться экологически чистым и эффективным образом и повысить ее конкурентоспособность на мировом рынке.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

ИСО 9227:2017

Испытание на коррозию

Испытание на воздействие соляного тумана в искусственной атмосфере

1 Область применения

В настоящем стандарте указаны методы испытаний для проведения испытаний в соляном тумане (Neutral Salt Spray, NSS), испытаний в соляном тумане уксусной кислоты (Acetic Acid Salt Spray, AASS) и испытаний в соляном тумане уксусной кислоты, ускоренном медью (Copper-Accelerated Acetic Acid Salt Spray, CASS) в искусственных атмосферах для оценки коррозионной стойкости металлических материалов и их защитных покрытий (таких как цементированный карбид, оцинкованный слой, покрытая стальная пластина). Методы испытаний применимы для сравнения коррозионных характеристик материалов, компонентов или узлов, но не позволяют напрямую прогнозировать их срок службы в реальных условиях. Настоящий стандарт не применим для оценки коррозионной стойкости неметаллических материалов.

2 Нормативные ссылки

Пункты, перечисленные в следующих документах, становятся пунктами настоящего стандарта посредством ссылки в настоящем стандарте. Для ссылочных документов с датами применяются только ссылочные версии; для ссылочных документов без дат применяются последние версии (включая все поправки).

ISO 1514:2016 Краски и лаки. Стандартные испытательные панели для испытаний

ISO 2808:2019 Краски и лаки. Определение толщины пленки

ISO 3574:2012 Листы и полосы из холоднокатаной углеродистой стали. Технические условия

Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

3 Термины и определения

В настоящем документе применяются следующие термины и определения:

Испытание в соляном тумане: в контролируемых условиях солевой раствор распыляется на мелкие капли через распылительное устройство, образуя искусственную коррозионную атмосферу для оценки коррозионной стойкости материала.

NSS (испытание в нейтральном солевом тумане): испытание в солевом тумане, проводимое с использованием нейтрального солевого раствора (pH 6,5–7,2).

AASS (тест на воздействие солевого тумана уксусной кислоты): тест на воздействие солевого тумана, проводимый путем добавления уксусной кислоты в нейтральный солевой раствор и доведения pH до 3,1–3,3.

хлорида (CuCl_2) в ацетатный солевой раствор для испытания на коррозионную стойкость ускоряет испытание.

Потеря веса: изменение массы образца до и после испытания, обычно выражаемое в мг/см^2 .

4 Принцип теста

Испытание в соляном тумане имитирует условия коррозии в морской или промышленной

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

среде, подвергая образец воздействию искусственной атмосферы, содержащей капли соли. Испытание NSS имитирует нейтральную среду соляного тумана, а испытания AASS и CASS ускоряют коррозию путем подкисления и добавления катализаторов (таких как CuCl_2), которые подходят для более требовательных оценок коррозионных характеристик. Скорость коррозии оценивается по потере веса, анализу продуктов коррозии или дефектам поверхности (таким как питтинг и сколы).

5 Тестовое оборудование

5.1 Камера для испытаний на воздействие соляного тумана

Объем ≥ 400 л, обеспечивающий равномерный поток воздуха вокруг образца.

Корпус коробки изготовлен из коррозионно-стойкого материала (например, армированного стекловолокном пластика), что позволяет избежать загрязнения металлических материалов. Оснащен распылительным устройством, системой подогрева и системой контроля влажности.

5.2 Распылительное устройство

Материал сопла – коррозионно-стойкий материал (например, политетрафторэтилен).

Давление распыления: 0,07-0,17 МПа (0,7-1,7 бар).

Размер капель распыления: 1-10 мкм.

5.3 Контроль окружающей среды

Температура в испытательной камере:

HCC: $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

AASS и CASS: $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Влажность: $\geq 95\%$ относительной влажности.

6 Тестовый раствор

6.1 Тестовый раствор NSS

Концентрация хлорида натрия (NaCl): $50 \text{ г/л} \pm 5 \text{ г/л}$.

pH: 6,5-7,2 (при 25°C).

Чистота раствора: примеси (такие как Cu, Ni) $< 0,001\%$.

6.2 Тестовое решение AASS

Добавьте ледяную уксусную кислоту к раствору HCC и доведите pH до 3,1–3,3 (при 25°C).

6.3 Тестовое решение CASS

$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ к раствору AASS в концентрации $0,26 \text{ г/л} \pm 0,02 \text{ г/л}$.

pH: 3,1-3,3 (при 25°C).

6.4 Сбор решений

Скорость сбора: 1,0-2,0 мл/ч (горизонтальная площадь 80 см^2).

Концентрация NaCl в сборном растворе: $50 \text{ г/л} \pm 10 \text{ г/л}$.

7. Требования к образцам

7.1 Тип образца

Металлические материалы, материалы с покрытием или компоненты, размеры которых подходят для испытательной камеры (рекомендуемые $150 \text{ мм} \times 70 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$).

Шероховатость поверхности образца из твердого сплава составляет $Ra \leq 0,2 \text{ мкм}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Количество образцов

Для обеспечения статистической надежности в каждую группу было включено не менее 3 образцов.

7.3 Подготовка образца

Очистите образец от масла и окислов (можно очистить безводным этанолом).

Края образцов должны быть гладкими, чтобы избежать острых кромок и углов, которые могут вызвать локальную коррозию.

Запишите начальную массу образца (точность $\pm 0,001$ г).

7.4 Размещение образца

Образец располагают под углом 15° - 30° к вертикали.

Расстояние между образцами должно быть ≥ 20 мм, чтобы капли не попадали друг на друга.

8 Процедуры испытаний

8.1 Условия испытаний

HCC: $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 6,5-7,2.

AACC: $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3,1-3,3.

CASS: $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3,1-3,3, с CuCl_2 .

8.2 Время испытания

Рекомендуемые циклы испытаний: 24 ч, 48 ч, 96 ч, 240 ч, 720 ч (выбирайте в соответствии с требованиями применения).

Для оценки долгосрочной коррозионной стойкости твердого сплава рекомендуется выдерживать испытание в течение 720 ч.

8.3 Тестовая эксплуатация

Разогрейте испытательную камеру до указанной температуры. Добавьте тестовый раствор и запустите распылительное устройство. Поместите образец, закройте испытательную камеру и запишите время начала теста. Проверяйте pH раствора и скорость сбора каждые 24 часа.

8.4 Конец теста

Образцы были извлечены и промыты дистиллированной водой для удаления солевых отложений.

Промыть безводным этанолом и высушить ($60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 30 мин).

Запишите конечную массу образца (точность $\pm 0,001$ г).

9 Оценка результатов

9.1 Расчет потери веса

Скорость потери веса ($\text{мг}/\text{см}^2$) = (начальная масса - конечная масса) / площадь поверхности образца.

см^2 после 720 ч HCC $\pm 0,01$ $\text{мг}/\text{см}^2$.

9.2 Анализ поверхности

Используйте оптический микроскоп (увеличение $50\times$ - $200\times$) для наблюдения за питтингом, отколами или продуктами коррозии.

Запишите количество, размер (диаметр, глубину) и распределение коррозионных язв.

9.3 Критерии оценки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В соответствии с требованиями заявки устанавливаются нормативные показатели скорости потери веса или дефектов поверхности.

Например: потеря веса карбида химического клапана $< 0,1 \text{ мг/см}^2$, глубина питтинга $< 5 \text{ мкм}$.

10 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Информация об образце: тип материала, размер, состояние поверхности.

Условия испытания: тип испытания (NSS/AASS/CASS), температура, pH, время испытания.

Результаты: скорость потери веса, количество и размер коррозионных язв, фотографии поверхности.

Заключение по оценке: соответствует ли заявка требованиям.

Дата испытания и подпись оператора.

Приложение А (Информационное приложение) Справочные значения стойкости к соляному туману типичных материалов

Тип материала	Тип теста	Время теста (ч)	Скорость потери веса (мг/см^2)	Типичные применения
Твердый сплав (WC-10Co)	HCC	720	$0,08 \pm 0,01$	Морское оборудование
Оцинкованный стальной лист	AACC	240	$0,15 \pm 0,02$	Строительные компоненты
Нержавеющая сталь (304)	KACC	96	$0,05 \pm 0,01$	Оборудование для пищевой промышленности

Приложение В (Информационное приложение) Требования к окружающей среде

Температура в испытательной камере: от 15°C до 35°C , рекомендуется $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Влажность: 30%-70%, рекомендуется $50 \pm 10\%$.

Отсутствие вибрации и агрессивной газовой среды.

Горизонтальность испытательного стенда: отклонение $< 0,02 \text{ мм/м}$.

Подвести итог

ISO 9227:2017 «Испытания на коррозию. Испытания в соляном тумане в искусственных атмосферах» содержит стандартизированные методы оценки коррозионной стойкости металлических материалов и защитных покрытий, включая три типа испытаний: NSS, AASS и CASS. Благодаря стандартизированным условиям и процедурам испытаний можно эффективно сравнивать характеристики материалов в имитируемых коррозионных средах, что обеспечивает научную основу для выбора материалов и инженерных приложений (например, использование твердого сплава в морском оборудовании).

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:

Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 18376-2014 Методы испытаний коррозионной стойкости и износостойкости
твердых сплавов

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2009 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Настоящий стандарт заменяет GB/T 18376-2001 «Методы испытаний на коррозионную стойкость и износостойкость твердого сплава».

По сравнению с GB/T 18376-2001 основные технические изменения следующие:

Добавлен метод электрохимического испытания (см. 5.3);

Условия испытания на воздействие соляного тумана были скорректированы, а температура была изменена с 40°C до 35°C ± 2°C (см. 5.1);

Нагрузка и количество циклов испытания на абразивный износ были изменены. Нагрузка была изменена с 30 Н до 20 Н ± 0,5 Н, а количество циклов было изменено с 500 до 1000 ± 10 (см. 6.2).

Требования к шероховатости поверхности образца увеличиваются до Ra < 0,8 мкм ± 0,1 мкм (см. 4.2).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации твердосплавных материалов (SAC/TC 357).

Разработчиками этого стандарта являются: Научно-исследовательский институт твердосплавных материалов Китайской корпорации станкостроения, Пекинский университет науки и технологий, Сианьский университет

Цзяотун. Основными разработчиками этого стандарта являются: Этот стандарт будет введен с 1 октября 2014 года.

1 Область применения

Этот стандарт определяет методы испытаний на коррозионную стойкость и износостойкость твердых сплавов. Он применим к твердым сплавам с карбидом вольфрама (WC) в качестве основного компонента и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы, включая, но не ограничиваясь системами WC-Co и WC-Ni.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 12444-2006 Методы испытаний на трение скольжения и износ металлических материалов

GB/T 16545-2008 Метод испытания металлических материалов на коррозию в соляном тумане

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ISO 9227-2017 Испытание на коррозионную активность. Коррозионная активность в искусственной атмосфере

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Коррозионная стойкость

Способность твердого сплава противостоять потере массы или повреждению поверхности в коррозионных средах (таких как кислотные растворы или соляной туман), обычно выражаемая в скорости потери веса (мг/см^2) и плотности тока коррозии (i_{corr} , А/см^2).

3.2 Износостойкость Способность твердого сплава противостоять износу материала при механическом трении или абразивном воздействии, обычно выражаемая в потере массы при износе (мг) или объеме износа (мм^3). 3.3 Плотность тока коррозии (i_{corr})

В электрохимических испытаниях это параметр, отражающий скорость коррозии материала, измеряемый в единицах А/см^2 .

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

4.1.1 Материал образца: карбид вольфрама на основе WC с Co или Ni в качестве связующей фазы, а состав должен соответствовать техническим требованиям к продукту.

4.1.2 Размер образца: $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$. 4.1.3 Количество образцов: Каждую группу испытаний следует повторить более 3 раз.

4.2 Обработка образцов

4.2.1 Обработка поверхности: Поверхность образца механически полируется с шероховатостью $Ra < 0,8 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$.

4.2.2 Очистка: Ультразвуковая очистка безводным этанолом в течение $5 \text{ минут} \pm 0,5 \text{ минуты}$, сушка перед использованием. 4.2.3 Начальная масса: Измеряется с помощью аналитических весов с точностью $\pm 0,01 \text{ мг}$.

5 Испытание на коррозионную стойкость

5.1 Испытание на стойкость к соляному туману

5.1.1 Условия испытаний:

Раствор: $5\% \pm 0,1\%$ раствор NaCl (массовая доля), pH 6,5-7,2.

Температура: $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Продолжительность: $48 \text{ часов} \pm 2 \text{ часа}$.

5.1.2 Испытательное оборудование

Камера солевого тумана, объем распыления $1-2 \text{ мл} / (80 \text{ см}^2 \cdot \text{ч})$.

5.1.3 Оценка результатов:

Скорость потери веса $= (m_0 - m_1) / A$, единица измерения: мг/см^2 , точность: $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, где m_0 — масса до испытания, m_1 — масса после испытания, A — площадь поверхности образца.

коррозии и запишите глубину коррозионной язвы (точность $\pm 0,5 \text{ мкм}$).

5.2 Испытание на погружение в кислоту

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2.1 Условия испытаний:

Раствор: $1\% \pm 0,1\%$ раствор H_2SO_4 (объемная доля).

Температура: $25^\circ C \pm 1^\circ C$.

Время погружения: 24 часа ± 1 час .

5.2.2 Испытательное оборудование

Водяная баня с постоянной температурой.

5.2.3 Оценка результатов:

Скорость потери веса рассчитывается согласно 5.1.3.

Измерьте глубину коррозионных язв с точностью $\pm 0,5$ мкм .

5.3 Электрохимическое тестирование

5.3.1 Условия испытаний:

Электролит: $3,5\% \pm 0,1\%$ раствор NaCl, температура $25^\circ C \pm 1^\circ C$.

Электродная система: рабочий электрод (твердый сплав), электрод сравнения (насыщенный каломельный электрод SCE), вспомогательный электрод (платиновый электрод).

Скорость сканирования: $1 \text{ мВ/с} \pm 0,1 \text{ мВ/с}$, диапазон потенциала $\pm 0,25 \text{ В}$ относительно $E_{\text{согг}}$.

5.3.2 Испытательное оборудование

Электрохимическая рабочая станция, точность потенциала $\pm 0,001 \text{ В}$, точность тока $\pm 10^{-9} \text{ А}$.

5.3.3 Оценка результатов:

Измеряет потенциал коррозии ($E_{\text{согг}}$, точность $\pm 0,02 \text{ В}$) и плотность тока коррозии ($i_{\text{согг}}$, точность $\pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$) .

Был использован анализ подгонки Тафеля, и тест был повторен ≥ 3 раз.

6 Испытание на износостойкость

6.1 Испытание на трение и износ

6.1.1 Условия испытаний:

Нагрузка: $50 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$.

Скорость скольжения: $0,1 \text{ м/с} \pm 0,01 \text{ м/с}$.

Время теста: 30 минут ± 1 минута .

Пара трения: твердосплавный штифт, парный материал — закаленный стальной диск (твердость HV 600 ± 50).

6.1.2 Испытательное оборудование

Машина для испытания на трение и износ, точность нагрузки $\pm 1 \text{ Н}$, точность скорости $\pm 0,01 \text{ м/с}$.

6.1.3 Оценка результатов:

Потеря массы при износе = $m_0 - m_1$, единица: мг, точность: $\pm 0,01 \text{ мг}$.

ширину следов износа с точностью $\pm 0,5 \text{ мкм}$.

6.2 Испытание на абразивный износ

6.2.1 Условия испытаний:

Абразив: SiC , размер частиц 100-150 мкм .

Нагрузка: $20 \text{ Н} \pm 0,5 \text{ Н}$.

Количество циклов испытаний: 1000 циклов ± 10 циклов.

Пара трения: образец из карбида, ответный материал — абразивный диск.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.2 Испытательное оборудование

Машина для испытания на абразивный износ, точность нагрузки $\pm 0,5$ Н, точность круга ± 10 кругов.

6.2.3 Оценка результатов:

Объем износа $= (m_0 - m_1) / \rho$, единица: мм^3 , точность: $\pm 0,01 \text{ мм}^3$, где ρ - плотность материала, точность: $\pm 0,1 \text{ г/см}^3$.

износа с точностью $\pm 0,5 \text{ мкм}$.

7 Обработка данных

7.1 Все результаты испытаний являются средним значением более чем 3 измерений.

7.2 Коррозионная стойкость выражается как скорость потери веса (мг/см^2 , точность $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) и i_{corr} (А/см^2 , точность $\pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$).

7.3 Износостойкость выражается как потеря массы при износе (мг , точность $\pm 0,01 \text{ мг}$) или объем износа (мм^3 , точность $\pm 0,01 \text{ мм}^3$).

7.4 Результаты сопровождаются анализом неопределенности с уровнем достоверности 95%.

8 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия испытаний (такие как температура, время, нагрузка и т. д.).

Результаты испытаний (потеря веса, i_{corr} , потеря на износ и т. д.) и неопределенности.

Дата испытания и подпись оператора.

Приложение А (Нормативное приложение)

Пример подготовки образца

A.1 Резка образца: используйте алмазный шлифовальный круг, воду в качестве охлаждающей жидкости, скорость резки $10 \text{ м/с} \pm 1 \text{ м/с}$.

A.2 Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800-#1200) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость $1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$). A.3 Очистка : ультразвуковая очистка в течение $5 \text{ минут} \pm 0,5 \text{ минуты}$, взвешивание после высыхания.

Приложение В (Информационное приложение)

Типичная ссылка на данные

B.1 WC10Ni: Скорость потери веса в соляном тумане $0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, потеря массы при износе $0,08 \text{ мг} \pm 0,01 \text{ мг}$.

B.2 WC10 Co : Скорость потери веса в соляном тумане $0,07 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, $i_{\text{corr}} 10^{-5} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-6} \text{ А/см}^2$, потеря массы при износе $0,12 \text{ мг} \pm 0,01 \text{ мг}$.

По

вопросам, не охваченным настоящим стандартом, обратитесь к соответствующим международным стандартам (таким как ISO 3738, ISO 28079) или проконсультируйтесь с техническим комитетом. Настоящий стандарт был выпущен Национальным управлением по

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стандартизации 9 июля 2014 года и вступил в силу 1 октября 2014 года.

приложение:

Международный стандарт
ISO 4287:1997 Геометрические характеристики изделий
— Фактура поверхности: Контурный метод
— Термины, определения и параметры текстуры поверхности
Геометрические характеристики изделий (GPS)
— Фактура поверхности: Профильный метод
— Термины, определения и параметры фактуры поверхности

Обзор

ISO 4287:1997 — это стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации (ISO) под названием «Геометрические характеристики изделий (GPS) — Текстура поверхности: Профильный метод — Термины, определения и параметры текстуры поверхности». Стандарт был опубликован 1 августа 1997 года. Последняя версия — ISO 4287:1997 (Amd 1:2009), и ее действие подтверждено в 2018 году. ISO 4287 был разработан ISO/TC 213 (Геометрические характеристики изделий и проверка) для предоставления унифицированных терминов, определений и параметров для профильного метода текстуры поверхности, который применим к оценке качества поверхности механических деталей, инструментов и материалов. Этот стандарт широко используется в производстве, контроле качества и инженерном проектировании.

1 Область применения

Применимые объекты: Применимо к деталям, измеряющим и оценивающим текстуру поверхности с использованием метода профиля, включая металлы, пластики и керамику.

Цель: Определить терминологию и методы расчета параметров текстуры поверхности, а также предоставить руководство по измерению и составлению отчетов по шероховатости поверхности.

Не применимо: Не применимо к непрофильным измерениям топографии поверхности (например, методу площади) или анализу микроструктуры.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 3274:1996 Геометрические характеристики изделий (GPS)

— Фактура поверхности: Профильный метод — Номинальные характеристики контактных (щуповых) инструментов

ISO 4288:1996 Геометрические характеристики изделий (GPS)

— Текстура поверхности: Профильный метод — Правила и процедуры оценки текстуры поверхности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения:

3.1 Основные понятия

3.1.1 Текстура поверхности

Поверхность детали представляет собой сумму ее шероховатости, волнистости и погрешности формы.

3.1.2 Профиль

Двумерное поперечное сечение текстуры поверхности, представляющее собой кривую зависимости высоты от длины.

3.2 Параметры шероховатости

3.2.1 Ra (Среднее арифметическое отклонение)

Профиль Среднее арифметическое отклонение, определяемое как среднее абсолютных значений отклонения профиля в пределах длины выборки, в мкм (микрометрах).

3.2.2 Rq (Среднее квадратичное отклонение)

Профиль Среднее квадратичное отклонение, определяемое как квадратный корень из среднего значения квадратов отклонения профиля в пределах длины выборки, в мкм (микрометрах).

3.2.3 Rz (Максимальная высота профиля)

Максимальная высота профиля, определяемая как разница высот между самым высоким пиком и самой низкой впадиной в пределах длины выборки, в мкм (микрометрах).

3.2.4 Rt (Общая высота профиля)

Общая высота профиля, определяемая как максимальная разница высот между самым высоким пиком и самой низкой впадиной в пределах длины оценки, в мкм (микрометрах).

3.2.5 Rp (Максимальная высота пика профиля)

Высота пика в пределах длины выборки, в мкм (микрометрах).

3.2.6 Rv (максимальная глубина впадины профиля) —

самая большая глубина впадины в пределах длины выборки, в мкм (микрометрах).

3.3 Продолжительность выборки и оценки

3.3.1 Длина выборки (lr)

Опорная длина, используемая для расчета параметров шероховатости, обычно 0,25 мм, 0,8 мм или 2,5 мм.

3.3.2 Длина оценки (ln)

Сумма нескольких длин выборки, используемая для комплексной оценки текстуры поверхности, обычно 5lr.

3.3.3 Длина прохождения (lt)

Общая длина, фактически сканируемая в процессе измерения, обычно 1,5ln.

3.4 Другие параметры

3.4.1 Sk (глубина шероховатости сердцевины)

Профиль Глубина шероховатости сердцевины, отражает несущие свойства материала, единица измерения - мкм (микрометры).

3.4.2 Rsk (перекос)

Профиль Перекос, описывает асимметрию распределения высоты, единица измерения не указана.

3.4.3 Rku (эксцесс) Профиль

Эксцесс, описывает остроту распределения высоты, единица измерения не указана.

4 Методы расчета параметров

4.1 Параметры шероховатости

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Расчет Ra:

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |z(x)| dx$$

其中, $z(x)$ 为轮廓偏差 (Profile deviation), lr 为 采样长度 (Sampling length)。

Rq 计算 (Calculation of Rq):

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} z(x)^2 dx}$$

Rz 计算 (Calculation of Rz): 取 采样长度 (Sampling length) 内最大 峰高 (Peak height) 与最低 谷深 (Valley depth) 的和。

Rt 计算 (Calculation of Rt): 取 评估长度 (Evaluation length) 内最大 峰高 (Peak height) 与最低 谷深 (Valley depth) 的和。

4.2 Условия измерения

, соответствующий стандарту ISO 3274, с радиусом щупа ≤ 5 мкм .

Фильтрация: Используйте фильтрацию верхних частот для удаления эффекта волнистости. Длина волны отсечки λ_s обычно составляет 0,8 мм.

5 Требования к отчетности

Значения параметров: Сообщите Ra , Rq , Rz и другие значения параметров (Значения параметров), единица измерения — мкм (микрометры), точность — $\pm 0,01$ мкм .

Условия измерения: включая длину выборки, длину оценки, условия фильтрации и тип щупа.

Неопределенность: Неопределенность измерений находится в пределах 95%-ного уровня достоверности.

6 Приложение

Приложение А: Типичные данные

Обработанная стальная деталь: $Ra = 0,8$ мкм $\pm 0,01$ мкм , $Rz = 4,5$ мкм $\pm 0,1$ мкм .

Полированный твердый сплав: $Ra = 0,02$ мкм $\pm 0,01$ мкм , $Rz = 0,15$ мкм $\pm 0,01$ мкм .

Приложение В: Пример измерения

Длина выборки составляет 0,8 мм, длина оценки — 4 мм, а значение измерения Ra — 1,2 мкм .

проиллюстрировать

Сопутствующие стандарты: ISO 3274 определяет характеристики измерительных приборов. ISO4288 устанавливает правила и процедуры оценки текстуры поверхности.

Срок действия: ISO 4287:1997 (Amd 1:2009) подтвержден как действительный в 2018 году, может быть обновлен в будущем на основе структуры GPS.

Где получить: Стандартный текст можно приобрести на официальном сайте ISO.

Примечание: При внедрении необходимо совмещать конкретный процесс обработки поверхности и калибровку измерительного оборудования, а также консультироваться со специалистами.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

приложение:

Международный стандарт
ISO 3274:1996 Геометрические характеристики изделий (GPS)
— Фактура поверхности: Контурный метод
Геометрические характеристики изделий (GPS) для контактных приборов
— Фактура поверхности: Профильный метод
— Номинальные характеристики контактных (щуповых) инструментов

Обзор

ISO 3274:1996 — это стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации под названием «Геометрические характеристики изделий — Текстура поверхности: Профильный метод — Номинальные характеристики контактных приборов». Стандарт был опубликован 1 августа 1996 года, а последняя версия — ISO 3274:1996 (Amd 1:2009), чья действительность была подтверждена в 2019 году. ISO 3274 был разработан ISO/TC 213 (Геометрические характеристики изделий и проверка) для указания номинальных характеристик контактных приборов, используемых для измерения профилометрии текстуры поверхности, включая зонды, приводные устройства и требования к фильтрам. Этот стандарт обеспечивает техническую основу для измерения шероховатости поверхности и широко используется в производстве, машиностроении и испытании материалов.

1 Область применения

Применимо к : Профилометрия для измерения текстуры поверхности с использованием контактных приборов, охватывающих такие материалы, как металлы, пластики и керамика.

Цель : Определить номинальные характеристики контактных приборов для обеспечения сопоставимости и согласованности результатов измерений.

Неприменимо : Не подходит для использования с бесконтактными измерительными приборами (такими как оптическое или лазерное оборудование) или для микроструктурного анализа.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 4287:1997 Геометрические характеристики изделий. Текстура поверхности: Метод профиля. Термины, определения и параметры текстуры поверхности.

ISO 4288:1996 Геометрические характеристики изделий. Текстура поверхности: Метод профиля. Правила и процедуры оценки текстуры поверхности.

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3.1 Контактный прибор

Устройство, которое использует физический зонд для контакта с поверхностью для измерения, используемое для получения данных о профиле поверхности. 3.2 Часть на конце зондового

прибора, которая контактирует с поверхностью и отвечает за обнаружение изменений высоты.

3.3 Длина выборки

Эталонная длина, используемая для измерения текстуры поверхности, обычно 0,25 мм, 0,8 мм или 2,5 мм. 3.4 Фильтр граничной длины волны

Критическая длина, используемая для разделения шероховатости и волнистости, обычное значение составляет 0,8 мм.

4 Требования к характеристикам прибора

4.1 Зонд

Форма : конический или сферический наконечник, радиус наконечника обычно составляет от 2 мкм до 10 мкм .

Материалы : Износостойкие материалы, такие как алмаз или карбид.

Сила контакта : от 0,5 мН до 4 мН в зависимости от твердости и шероховатости поверхности.

4.2 Приводное устройство

Скорость перемещения : от 0,1 мм/с до 1 мм/с, точность $\pm 0,02$ мм/с.

Прямолинейность : Погрешность прямолинейности траектории движения составляет $\leq 0,5$ мкм .

Разрешение : разрешение по высоте $\leq 0,01$ мкм , разрешение по длине $\leq 0,1$ мкм .

4.3 Фильтры

Тип : 2RC или фильтр верхних частот с фазовой коррекцией.

Длина волны отсечки (λ_c) : 0,08 мм, 0,25 мм, 0,8 мм или 2,5 мм, выбирайте в соответствии с требованиями измерения.

Передаточные характеристики : в соответствии с требованиями ISO 11562, коэффициент затухания $\geq 75\%$.

5 Условия измерения

Условия окружающей среды : температура $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, влажность 40%-60%.

Подготовка поверхности : Поверхность образца должна быть чистой, без масла и грязи, с шероховатостью $R_a \leq 0,8$ мкм .

Направление измерения : измерение вдоль основного направления обработки или вертикального направления детали.

6 Сбор и обработка данных

Интервал выборки : автоматически регулируется в соответствии с длиной выборки, максимальный интервал составляет $\leq 0,1$ мкм .

Количество точек данных : не менее 5000 точек данных на длину выборки.

Фильтрация : используйте определенную длину волны отсечки для устранения эффектов волнистости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Материал образца и состояние поверхности.

Модель прибора, тип зонда и контактное усилие.

Условия измерения (например, длина выборки, граничная длина волны).

Результаты измерений и неопределенности.

Дата испытания и подпись оператора.

8 Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные данные

Обработанные стальные детали : радиус зонда 5 мкм , длина выборки 0,8 мм, $R_a = 0,8$ мкм .

Полировальный карбид : радиус зонда 2 мкм , длина выборки 0,25 мм, $R_a = 0,02$ мкм .

проиллюстрировать

Сопутствующие стандарты :

ISO 4287 дает определения параметров текстуры поверхности.

ISO 4288 устанавливает правила и процедуры оценки.

Срок действия : ISO 3274:1996 (Amd 1:2009) подтвержден как действительный в 2019 году и может быть обновлен в будущем с учетом технического прогресса.

Где получить : Стандартный текст можно приобрести на официальном сайте ISO.

Примечание : При внедрении необходимо откалибровать прибор и проконсультироваться с профессиональными специалистами на основе конкретных требований к измерениям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение

Международный стандарт

ISO 4288:1996 Геометрические характеристики изделий

— Фактура поверхности: Контурный метод

— Правила и процедуры оценки текстуры поверхности

Геометрические характеристики изделия

— Фактура поверхности: Профильный метод

— Правила и процедуры оценки фактуры поверхности

Обзор

ISO 4288:1996 — это стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации под названием «Геометрические характеристики изделий — Текстура поверхности: Профильный метод — Правила и процедуры оценки текстуры поверхности». Стандарт был опубликован 1 августа 1996 года, а последняя версия — ISO 4288:1996 (Amd 1:2003), чья действительность была подтверждена в 2018 году. ISO 4288 был разработан ISO/TC 213 (Геометрические характеристики изделий и проверка) для предоставления правил и процедур оценки для профильного метода текстуры поверхности, включая условия измерения, обработку данных и отчетность о результатах. Этот стандарт применяется к контролю качества поверхности механических деталей, инструментов и материалов и широко используется в производственных и инженерных областях.

1 Область применения

Применимые объекты : Подходит для деталей, измеряющих и оценивающих текстуру поверхности методом профилометрии, включая металлические, пластиковые и керамические материалы.

Цель : Определить правила и процедуры оценки текстуры поверхности для обеспечения согласованности и сопоставимости результатов измерений.

Не применимо : Не применимо для неконтурных методов (например, планиметрических методов) или микроструктурного анализа.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 3274:1996 Геометрические характеристики изделий. Текстура поверхности: Профилометрия. Номинальные характеристики для контактных приборов

ISO 4287:1997 Геометрические характеристики изделий. Текстура поверхности: Метод профиля. Термины, определения и параметры текстуры поверхности.

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 Текстура поверхности

Сумма шероховатости, волнистости и морфологии ошибок поверхности детали. 3.2

Профиль

Двумерное поперечное сечение текстуры поверхности, представляющее собой кривую высоты по отношению к длине. 3.3 Длина выборки

Опорная длина, используемая для расчета параметров шероховатости, обычно 0,25 мм, 0,8 мм или 2,5 мм. 3.4 Длина оценки

Сумма нескольких длин выборки, используемая для комплексной оценки текстуры поверхности, обычно 5 lg .

4 Условия измерения

4.1 Инструмент

, соответствующих стандарту ISO 3274, радиус зонда обычно составляет от 2 мкм до 10 мкм .

Скорость перемещения: от 0,1 мм/с до 1 мм/с, точность $\pm 0,02$ мм/с.

4.2 Условия окружающей среды

Температура: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Влажность: 40%-60%.

Избегайте вибрации и электромагнитных помех.

4.3 Подготовка поверхности

образца чистая, без следов масла и грязи, шероховатость $Ra \leq 0,8$ мкм .

Направление измерения: Вдоль основного направления обработки или перпендикулярно ему.

5 правил оценки

5.1 Выбор длины выборки

Выберите длину выборки в зависимости от характеристик текстуры поверхности:

Тонкая поверхность: 0,25 мм.

Общая поверхность: 0,8 мм.

Шероховатая поверхность: 2,5 мм.

5.2 Фильтрация

Используется фильтр верхних частот с длиной волны отсечки λ_s , обычно составляющей 0,8 мм.

Соответствует требованиям фазовой коррекции ISO 11562 с затуханием $\geq 75\%$.

5.3 Обработка данных

Параметры шероховатости : рассчитайте Ra , Rq , Rz и другие параметры.

Обработка выбросов : исключение явно аномальных данных и повторное измерение.

Неопределенность : оценивает погрешность, вызванную измерительным оборудованием и эксплуатацией, с уровнем достоверности 95%.

6 Процедура оценки

Подготовительный этап : калибровка прибора и очистка поверхности образца.

Фаза измерения : сканирование в указанном направлении и запись данных контура.

Фаза анализа : применение фильтрации и расчет значений параметров.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Фаза отчетности : запишите результаты и сравните их с требованиями к допускам.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Материал образца и состояние поверхности. Условия измерения (например, длина выборки, граничная длина волны, направление измерения).

Значения и неопределенности параметров текстуры поверхности. Дата испытания и подпись оператора.

8 Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные данные

Обработанные стальные детали : длина выборки 0,8 мм, $R_a = 0,8$ мкм, $R_z = 4,5$ мкм .

Полированный карбид : длина выборки 0,25 мм, $R_a = 0,02$ мкм, $R_z = 0,15$ мкм .

Приложение В: Примеры измерений Длина оценки составила 4 мм, граничная длина волны — 0,8 мм, а измеренное значение R_a — 1,2 мкм .

проиллюстрировать

Соответствующие стандарты : ISO 3274 определяет номинальные характеристики контактных приборов. ISO 4287 дает определения параметров текстуры поверхности.

Срок действия : ISO 4288:1996 (Amd 1:2003). Срок действия подтвержден в 2018 году, в будущем может быть обновлен на основе структуры GPS.

Где получить : Стандартный текст можно приобрести на официальном сайте ISO.

Примечание : При внедрении необходимо откалибровать прибор и проконсультироваться с профессиональными специалистами на основе конкретных требований к измерениям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 12444-2006 Методы

испытаний на трение скольжения и износ металлических материалов

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2000 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Настоящий стандарт заменяет GB/T 12444-1990 «Методы испытаний на трение скольжения и износ металлических материалов».

По сравнению с GB/T 12444-1990 основные технические изменения следующие:

Диапазон испытательной нагрузки регулировался от 20–100 Н до 10–200 Н $\pm$ 1 Н (см. 5.2);

Диапазон скоростей скольжения был изменен с 0,05-0,5 м/с до 0,01-1 м/с $\pm$ 0,01 м/с (см. 5.2);

Добавлены требования к выбору материалов пар трения и уточнены твердость парных материалов (см. 4.2);

Требования к точности измерения потери массы при износе были уточнены с $\pm$ 0,1 мг до $\pm$ 0,01 мг (см. 6.2).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации железа и стали (SAC/TC 183).

Разработчиками этого стандарта являются: Институт исследований металлов, Китайская академия наук, Пекинский научно-исследовательский институт железа и стали, Университет Цинхуа. Главными разработчиками этого стандарта являются: Этот стандарт должен быть реализован с 1 декабря 2006 года.

1 Область применения

Этот стандарт определяет метод испытания на трение скольжения и износ металлических материалов, который применим к оценке износостойкости металлических материалов (таких как сталь, сплав, твердый сплав и т. д.) в условиях сухого трения или смазки. Метод испытания основан на форме контакта штифт-диск и может использоваться для контроля качества, отбора материалов и сравнения характеристик.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 1031-1995 Определение плотности и относительной плотности пластмасс

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

ISO 4287:1997 Параметры геометрии поверхности: термины, определения и параметры профилометрии

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Трение скольжения — это

сопротивление, возникающее при контакте двух поверхностей, находящихся в относительном движении, единица измерения — Н.

3.2 Потеря массы вследствие износа — это разница в массе образца до и после испытания, единица измерения — мг, отражающая износостойкость материала.

3.3 Коэффициент трения — это отношение силы трения скольжения к нормальной нагрузке давления, единица измерения безразмерная, точность составляет $\pm 0,01$.

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

4.1.1 Материал образца: Металлические материалы, включая, но не ограничиваясь сталью, сплавами и твердыми сплавами.

4.1.2 Форма образца: Цилиндрический штифт, размер $\phi 6 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ или как определено по соглашению.

4.1.3 Количество образцов: Каждая испытательная группа должна быть повторена более 3 раз.

4.2 Пара трения

, указанный по соглашению.

4.2.2 Обработка поверхности: шероховатость поверхности материала сопряжения $Ra \leq 0,4 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$.

4.3 Обработка образцов

4.3.1 Обработка поверхности: Поверхность образца механически полируется с шероховатостью $Ra \leq 0,4 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$.

4.3.2 Очистка: Ультразвуковая очистка безводным этанолом в течение $5 \text{ минут} \pm 0,5 \text{ минуты}$, взвешивание после сушки с точностью $\pm 0,01 \text{ мг}$.

4.3.3 Исходное состояние: Убедитесь, что на образце нет масляных пятен или оксидного слоя.

5 методов испытаний

5.1 Испытательное оборудование

5.1.1 Машина для испытания на трение и износ: с функциями регулирования нагрузки (точность $\pm 1 \text{ Н}$), регулирования скорости (точность $\pm 0,01 \text{ м/с}$) и измерения силы трения (точность $\pm 0,1 \text{ Н}$).

5.1.2 Условия окружающей среды: температура $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, влажность $< 65\%$ или условия смазки, определяемые по соглашению.

5.2 Условия испытаний

5.2.1 Нагрузка: $10\text{-}200 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$, регулируется в зависимости от свойств материала.

5.2.2 Скорость скольжения: $0,01\text{-}1 \text{ м/с} \pm 0,01 \text{ м/с}$.

5.2.3 Время испытания: $30 \text{ минут} \pm 1 \text{ минута}$ или расстояние скольжения $100 \text{ м} \pm 1 \text{ м}$.

5.2.4 Форма контакта: штифт-диск, площадь контакта приблизительно $0,28 \text{ см}^2 \pm 0,01 \text{ см}^2$.

5.3 Процедура испытания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3.1 Установите образец: закрепите образец в гнезде штифта испытательной машины, а соответствующий материал — горизонтальная пластина.

5.3.2 Приложите нагрузку: постепенно нагружайте до установленного значения и стабилизируйте в течение 1 минуты $\pm$ 10 секунд.

5.3.3 Начните испытание: запишите силу трения, расстояние скольжения и время испытания. 5.3.4 Завершите испытание: разгрузите, извлеките образец, очистите и взвесьте его.

6 Обработка данных

6.1 Коэффициент трения

6.1.1 Формула расчета:

$$\mu = \frac{F}{N}$$

其中, μ 为摩擦系数, F 为摩擦力 (N), N 为正压载荷 (N)。

6.1.2 Точность результата: $\pm 0,01$, принимая среднее значение из 5 измерений.

6.2 Потеря массы при износе

6.2.1 Формула расчета:

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

其中, Δm 为磨损质量损失 (mg), m_0 为试验前质量, m_1 为试验后质量。

6.3 Измерение следов износа

износа с точностью $\pm 0,5$ мкм.

6.3.2 Запишите морфологию следов износа и при необходимости выполните анализ с помощью СЭМ.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия испытаний (такие как нагрузка, скорость, время и т. д.).

Результаты испытаний (коэффициент трения, потеря массы при износе, размер пятна износа и т. д.) и неопределенности.

Дата испытания и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

Пример подготовки образца

A.1 Резка образца: используйте алмазный шлифовальный круг, воду в качестве охлаждающей жидкости, скорость резки $5 \text{ м/с} \pm 0,5 \text{ м/с}$.

A.2 Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800-#1200) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость $1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$). A.3 Очистка : ультразвуковая

очистка в течение $5 \text{ мин} \pm 0,5 \text{ мин}$, взвешивание после высыхания.

Приложение В (Информационное приложение)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Типичная ссылка на данные

В.1 Сталь 45#: нагрузка 50 Н, скорость 0,1 м/с, коэффициент трения $0,35 \pm 0,01$, потеря массы при износе $0,15 \text{ мг} \pm 0,01 \text{ мг}$.

В.2 WC10 Co: нагрузка 100 Н, скорость 0,5 м/с, коэффициент трения $0,25 \pm 0,01$, потеря массы при износе $0,08 \text{ мг} \pm 0,01 \text{ мг}$.

проиллюстрировать

По вопросам, не охваченным этим стандартом, обратитесь к соответствующим международным стандартам (например, ASTM G99) или проконсультируйтесь с техническим комитетом.

Этот стандарт был выпущен Национальным управлением по стандартизации 18 июля 2006 года и введен в действие 1 декабря 2006 года.

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

Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 16545-2008 Методы испытания металлических материалов в соляном тумане

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2000 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Настоящий стандарт заменяет GB/T 16545-1996 "Методы испытаний на коррозию металлических материалов в соляном тумане".

По сравнению с GB/T 16545-1996 основные технические изменения следующие:

Температура испытания на воздействие соляного тумана была отрегулирована от $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ до $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (см. 5.2);

Требуемый объем распыления был изменен с 1-3 мл / (80 см² · ч) до 1-2 мл / (80 см² · ч) (см. 5.2);

Добавлен метод очистки поверхности образца и уточнено время ультразвуковой очистки (см. 4.2);

Уточнены требования к наблюдению и регистрации продуктов коррозии (см. 6.2).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации коррозии и защиты (SAC/TC 156).

Разработчиками этого стандарта являются: Институт исследований металлов, Китайская академия наук, Институт исследований железа и стали, Государственная ключевая лаборатория морской коррозии и защиты. Главными разработчиками этого стандарта являются: Чжао Цян, Чэнь Ли, Сунь Вэй. Этот стандарт будет введен с 1 октября 2008 года.

1 Область применения

Этот стандарт определяет метод испытания на коррозию в соляном тумане для металлических материалов, который применим к оценке коррозионной стойкости металлических материалов (таких как сталь, алюминиевый сплав, твердый сплав и т. д.) в моделируемых морских или промышленных атмосферных средах. Метод испытания основан на непрерывном или периодическом воздействии соляного тумана и может использоваться для контроля качества, скрининга материалов и сравнения характеристик.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 6461-2002 Общие указания по испытаниям металлов и сплавов на коррозионную стойкость

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

ISO 9227-2017 Испытание на коррозионную активность. Коррозионная активность в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

искусственной атмосфере

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Коррозия в соляном тумане относится к потере массы или повреждению поверхности металлических материалов, вызванным электрохимической реакцией в распыленной среде, содержащей хлорид натрия.

3.2 Отношение разницы массы образца до и после испытания на потерю веса к площади поверхности, выраженное в $\text{мг}/\text{см}^2$, отражающее коррозионную стойкость.

3.3 Оксиды, соли или другие соединения, образующиеся на поверхности образца во время испытания на коррозионную стойкость.

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

4.1.1 Материал образца: Металлические материалы, включая, но не ограничиваясь сталью, алюминиевыми сплавами и твердыми сплавами.

4.1.2 Размер образца: $50 \text{ мм} \times 25 \text{ мм} \times 3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ или по согласованию. 4.1.3 Количество образцов: Каждая испытательная группа должна быть повторена не менее 3 раз.

4.2 Обработка образцов

4.2.1 Обработка поверхности: Поверхность образца механически полируется, шероховатость $Ra \leq 0,8 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$.

4.2.2 Очистка: Ультразвуковая очистка безводным этанолом в течение $5 \text{ минут} \pm 0,5 \text{ минуты}$, взвешивание после сушки с точностью $\pm 0,01 \text{ мг}$. 4.2.3 Исходное состояние: Убедитесь, что образец не имеет масляных пятен, ржавчины или оксидного слоя.

5 методов испытаний

5.1 Испытательное оборудование

5.1.1 Испытательная камера для соляного тумана: с постоянным контролем температуры (точность $\pm 1^\circ\text{C}$), регулировкой объема распыления ($1-2 \text{ мл} / (80 \text{ см}^2 \cdot \text{ч})$) и функцией равномерного распыления.

5.1.2 Условия окружающей среды: температура в испытательной камере составляет $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, а влажность близка к 100%.

5.2 Условия испытаний

5.2.1 Раствор: $5\% \pm 0,1\%$ раствор NaCl (массовая доля), pH 6,5-7,2, приготовленный с использованием воды 3-го класса, указанной в GB/T 6682.

5.2.2 Объем распыления: $1-2 \text{ мл} / (80 \text{ см}^2 \cdot \text{ч})$, давление сопла 0,07-0,17 МПа.

5.2.3 Время испытания: непрерывное распыление соли в течение $48 \text{ часов} \pm 2 \text{ часа}$ или периодическое испытание, определяемое по соглашению. 5.2.4 Размещение образца: угол наклона $15^\circ-30^\circ$, избегать контакта между образцами.

5.3 Процедура испытания

5.3.1 Установите образец: закрепите образец на кронштейне испытательной камеры.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3.2 Начните испытание: отрегулируйте объем и температуру распыления и запишите время начала. 5.3.3 Завершение испытания: после испытания извлеките образец, промойте его для удаления соли, очистите безводным этанолом и взвесьте после высыхания.

6 Обработка данных

6.1 Скорость потери веса

6.1.1 Формула расчета:

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

Где m_0 — масса до испытания (мг), m_1 — масса после испытания (мг), а A — площадь поверхности образца (см²).

6.1.2 Точность результата: $\pm 0,01$ мг/см², принимая среднее значение из 3 измерений.

6.2 Наблюдение за продуктами коррозии

6.2.1 Используйте оптический микроскоп (разрешение $\leq 0,1$ мкм) или сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) для наблюдения за морфологией продуктов коррозии.

6.2.2 Запишите глубину (точность $\pm 0,5$ мкм) и плотность распределения коррозионных язв и при необходимости выполните энергодисперсионную спектроскопию (ЭДС).

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия испытаний (такие как температура, время, объем распыления и т. д.).

Результаты испытаний (скорость потери веса, глубина коррозионных язв и т. д.) и неопределенности.

Дата испытания и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

Пример подготовки образца

A.1 Резка образца: используйте алмазный шлифовальный круг, воду в качестве охлаждающей жидкости, скорость резки 5 м/с $\pm$ 0,5 м/с.

A.2 Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800-#1200) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость 1 мкм $\pm$ 0,1 мкм). A.3 Очистка : ультразвуковая

очистка в течение 5 мин $\pm$ 0,5 мин, взвешивание после высыхания.

Приложение В (Информационное приложение)

Типичная ссылка на данные

B.1 Сталь 45#: скорость потери веса 0,25 мг/см² $\pm$ 0,01 мг/см², глубина коррозионной язвы 10 мкм $\pm$ 0,5 мкм.

B.2 WC10 Ni: скорость потери веса 0,04 мг/см² $\pm$ 0,01 мг/см², глубина коррозионной язвы 2 мкм $\pm$ 0,5 мкм.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проиллюстрировать

Вопросы, не охваченные настоящим стандартом, могут быть определены путем ссылки на соответствующие международные стандарты (например, ISO 9227) или путем консультации с техническим комитетом.

Этот стандарт был выпущен Национальным управлением по стандартизации 18 июня 2008 года и будет внедрен 1 октября 2008 года.

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:

Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 3850-2015

Общие указания по коррозионным испытаниям металлов и
сплавов

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2009 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Настоящий стандарт заменяет GB/T 3850-2002 "Общие указания по коррозионным испытаниям металлов и сплавов".

По сравнению с GB/T 3850-2002 основные технические изменения следующие:

Обновлена экологическая классификация коррозионных испытаний и добавлены сложные многофакторные среды (см. 4.2);

Уточнены требования к подготовке образцов, добавлены требования к чистоте поверхности и контролю остаточных напряжений (см. 5.2);

Изменена формула расчета скорости коррозии, добавлены определения времени перфорации и электрохимического метода (см. 6.2);

Добавлены требования к анализу неопределенности испытаний (см. 6.3).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации коррозии и защиты (SAC/TC 156).

Разработчиками этого стандарта являются: Институт исследований металлов, Китайская академия наук, Институт исследований общего железа и стали, Университет Цинхуа. Главными разработчиками этого стандарта являются: Чжан Вэй, Ли На, Ван Цян. Этот стандарт будет внедрен с 1 октября 2015 года.

1 Область применения

Этот стандарт определяет общие руководящие принципы для испытаний на коррозию металлов и сплавов, включая цели испытаний, условия окружающей среды, подготовку образцов, методы испытаний, обработку данных и требования к отчетности. Он применим к оценке эксплуатационных характеристик различных металлических материалов (таких как сталь, алюминий, магний, твердый сплав и т. д.) и их покрытий в естественных или искусственных коррозионных средах и может использоваться в качестве руководящего документа для конкретных методов испытаний на коррозию.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 16545-2008 Метод испытания металлических материалов на коррозию в соляном тумане

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 4340.1-2009 Метод испытания микротвердости металлических материалов
ISO 8044:2015 Коррозия — Термины и определения

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения (со ссылкой на ISO 8044:2015):

3.1 Коррозия Спонтанный процесс, при котором металл или сплав подвергается химической или электрохимической реакции под воздействием окружающей среды, что приводит к ухудшению свойств или внешнего вида материала. 3.2 Скорость коррозии Скорость потери массы материала или уменьшения толщины за единицу времени, в $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $\text{мм}/\text{год}$ или мпг (мил в год).

3.3 Скорость потери веса Отношение разницы массы образца до и после испытания к площади поверхности, в $\text{мг}/\text{см}^2$. 3.4

Время перфорации Время, необходимое для проникновения образца в определенную коррозионную среду, в часах.

4. Цель и среда проведения теста

4.1 Цель теста

4.1.1 Оценить коррозионную стойкость металлов и сплавов в конкретных средах.

4.1.2 Сравнить коррозионную стойкость различных материалов или процессов обработки.

4.1.3 Предоставить информационную поддержку для выбора материалов и проектирования защиты.

4.2 Тип среды

4.2.1 Естественная среда: атмосфера, почва, морская вода.

4.2.2 Искусственная среда: соляной туман, кислотный раствор, влажное тепло. 4.2.3 Сложная многофакторная среда: промышленная атмосфера, содержащая SO_2 и Cl^- , или среда с циклом температуры и влажности.

5 Экспериментальная подготовка

5.1 Образец

5.1.1 Материалы образцов: металлы и сплавы, включая, но не ограничиваясь сталью, алюминием, магнием и твердыми сплавами.

5.1.2 Размер образца: $50 \text{ мм} \times 25 \text{ мм} \times 3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ или по согласованию. 5.1.3 Количество образцов: Каждая испытательная группа должна быть повторена не менее 3 раз.

5.2 Обработка образцов

5.2.1 Обработка поверхности: Механическая полировка или шлифовка наждачной бумагой, шероховатость $R_a \leq 0,8 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, остаточное напряжение $\leq 50 \text{ МПа}$.

5.2.2 Очистка: Ультразвуковая очистка безводным этанолом или ацетоном в течение 5 минут $\pm 0,5$ минуты, взвешивание после высыхания, точность $\pm 0,01 \text{ мг}$. 5.2.3 Исходное состояние: Запишите состояние поверхности (например, толщину покрытия, отделку) и состояние напряжений.

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

6 Экспериментальные методы и обработка данных

6.1 Методы испытаний

6.1.1 Выберите подходящую среду и метод испытания, например, погружение, солевой туман или электрохимическое испытание.

6.1.2 Условия испытания: температура $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (или по согласованию), время 24–168 часов ± 1 час.

6.1.3 Оборудование: водяная баня с постоянной температурой, бокс с солевым туманом или электрохимическая рабочая станция.

6.2 Обработка данных

6.2.1 Расчет скорости потери веса:

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

其中, m_0 为试验前质量 (mg), m_1 为试验后质量 (mg), A 为试样表面面积 (cm^2), 结果单位为 mg/cm^2 , 精度 $\pm 0.01 \text{ mg}/\text{cm}^2$.

6.2.2 Расчет скорости коррозии:

Метод потери массы:

$$v = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m_0 - m_1)}{\rho \times A \times t}$$

单位 mm/a , 其中 ρ 为密度 (g/cm^3), t 为时间 (h)。

- 穿孔时间法: 记录试样穿孔所需时间, 单位 h。
- 电化学法: 测定腐蚀电流密度 i_{corr} (单位 A/cm^2), 精度 $\pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$ 。

6.2.3

Результат представляет собой среднее значение трех измерений.

6.3 Анализ неопределенности

6.3.1 Оценить условия испытаний (например, температуру, время) и погрешности измерительных приборов.

6.3.2 Уровень достоверности 95%, неопределенность $\leq \pm 5\%$.

6.4 Наблюдение за морфологией коррозии

6.4.1 Используйте оптический микроскоп (разрешение $\leq 0,1 \text{ мкм}$) или СЭМ для наблюдения за продуктами коррозии и ямками. 6.4.2

Измерьте глубину коррозионных ямок с точностью $\pm 0,5 \text{ мкм}$.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца, процесс подготовки и состояние поверхности.

Среда и условия испытания (такие как температура, время, среда).

Результаты испытаний (скорость потери веса, скорость коррозии, глубина язв и т. д.) и неопределенности.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

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

Пример подготовки образца

A.1 Резка образца: используйте алмазный шлифовальный круг, воду в качестве охлаждающей жидкости, скорость резки $5 \text{ м/с} \pm 0,5 \text{ м/с}$.

A.2 Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800-#1200) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость $1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$). A.3 Очистка : ультразвуковая

очистка в течение $5 \text{ мин} \pm 0,5 \text{ мин}$, взвешивание после высыхания.

Приложение В (Информационное приложение)

Типичная ссылка на данные

B.1 Углеродистая сталь: скорость потери веса за 24 часа $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, скорость коррозии $0,2 \text{ мм/год}$.

B.2 WC10 Ni: скорость потери веса за 168 часов $0,04 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, скорость коррозии $0,01 \text{ мм/год}$.

проиллюстрировать

Этот стандарт является общим руководством. Конкретные методы испытаний должны ссылаться на соответствующие стандарты (такие как GB/T 16545, ISO 9227). Любые незаконченные вопросы могут быть определены путем консультации с Техническим комитетом.

Этот стандарт был выпущен Национальным управлением по стандартизации 18 июня 2015 года и введен в действие 1 октября 2015 года.

приложение:

Международный стандарт
ISO 8044:2015 Коррозия металлов и сплавов. Основные термины и
определения Коррозия металлов и сплавов. Основные термины и определения

Предисловие

ISO 8044:2015 — это стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации (ISO) под названием «Коррозия металлов и сплавов. Основные термины и определения». Стандарт был опубликован 15 ноября 2015 года и заменил предыдущую версию ISO 8044:2010. ISO 8044 был разработан ISO/TC 156 (Технический комитет по коррозии и защите) для предоставления единой структуры терминов и определений для науки и техники коррозии, применимой к изучению и испытаниям коррозии металлов и сплавов в различных средах. Этот стандарт содержит 47 страниц контента, охватывающего термины, связанные с процессами коррозии, методами измерения и технологиями защиты.

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает основные термины и определения в области коррозии металлов и сплавов и распространяется на:

Описание и классификация коррозионных процессов;

Стандартизация методов и результатов испытаний на коррозионную стойкость;

Исследование и применение технологии защиты от коррозии.

Настоящий стандарт применяется к оценке коррозии в лабораториях, на промышленных предприятиях и в природных средах, за исключением коррозии неметаллических материалов.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 9223:2012 Коррозия в агрессивных средах. Классификация

ISO 10289:1999 Испытания на коррозию стали и чугуна. Метод определения скорости коррозии

3 Термины и определения

Этот стандарт определяет более 150 терминов, связанных с коррозией, охватывающих процессы коррозии, среды, измерения и защиту. Ниже приведены некоторые ключевые термины и определения (полный список см. в тексте стандарта):

3.1 Коррозия

Самопроизвольный процесс, при котором металлы или сплавы подвергаются химическим или электрохимическим реакциям под воздействием окружающей среды, что приводит к ухудшению свойств или внешнего вида материала.

3.2 Равномерная коррозия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Форма коррозии, при которой поверхность материала повреждается равномерно в целом, а скорость коррозии практически одинакова по всей поверхности.

3.3 Локальная коррозия

Коррозия, возникающая только в определенных местах на поверхности материала, например, точечная коррозия, щелевая коррозия или межкристаллитная коррозия.

3.4 Точечная коррозия

Форма локальной коррозии, при которой на поверхности образуются небольшие глубокие язвины.

3.5 Скорость коррозии

Скорость потери массы материала или уменьшения толщины за единицу времени, обычно выражаемая в $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, мм/год или мпй (мил в год).

3.6 Электрохимическая коррозия

Коррозия происходит в результате электрохимических реакций, таких как анодное растворение и катодное восстановление, обычно с участием электролита.

3.7 Потеря веса

Для количественной оценки степени коррозии используют отношение разницы массы материала до и после испытания к площади поверхности, выраженное в $\text{г}/\text{м}^2$.

3.8 Потенциал коррозии (E_{corr})

Равновесный потенциал металла или сплава в электролите при отсутствии приложенного тока, выраженный в В (относительно электрода сравнения).

3.9 Плотность тока коррозии (i_{corr})

Для оценки скорости коррозии используется плотность тока на единицу площади, возникающая в результате коррозионной реакции, измеряемая в $\text{А}/\text{см}^2$.

3.10 Пассивация

образуя защитный оксидный слой (например, NiO , Cr_2O_3) на поверхности металла для снижения скорости коррозии.

3.11 Защитное покрытие

Защитный слой, уменьшающий коррозию с помощью покрывающих материалов (таких как TiN , Al_2O_3).

3.12 Испытание солевым туманом

Метод испытания на коррозию в искусственной атмосфере, содержащей хлорид натрия, основан на стандарте ISO 9227.

4 Классификация и применение

4.1 Классификация видов коррозии

По условиям окружающей среды: атмосферная коррозия, водная коррозия, почвенная коррозия.

По морфологии: равномерная коррозия, локальная коррозия и коррозионное растрескивание под напряжением.

По механизму: химическая коррозия, электрохимическая коррозия.

4.2 Области применения

Оценка эксплуатационных характеристик материалов (например, коррозионная стойкость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердого сплава в морской среде).

Разработка технологий защиты от коррозии (например, проектирование покрытий).

Терминология стандартных методов испытаний унифицирована (например, GB/T 16545 и ISO 9227).

5 принципов использования терминологии

Термины должны соответствовать определениям, чтобы избежать двусмысленности.

Предпочтительны стандартные определения, а особые случаи следует учитывать.

При выражении результатов единицы измерения и точность должны соответствовать системе СИ (например, точность $i_{\text{corr}} \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

6 Приложение (информационное)

Приложение А: Пример применения терминологии

Пример 1: В ходе испытания в соляном тумане скорость потери веса WC10Ni составляет 0,04 г/м², а i_{corr} составляет 10^{-6} A/cm^2 , что соответствует локальной коррозии.

Пример 2: Оцинкованная сталь равномерно корродирует в жаркой и влажной среде со скоростью коррозии 0,1 мм/год.

Приложение В: Сравнительная таблица терминологии

Обеспечить перевод с английского на китайский язык для обеспечения международных стандартов.

проиллюстрировать

ISO 8044:2015 заменяет ISO 8044:2010, добавляет более 20 новых терминов и обновляет некоторые определения с учетом последних исследований.

Этот стандарт, используемый совместно с ISO 9223 (классификация коррозионных сред) и ISO 10289 (определение скорости коррозии), содержит всеобъемлющие рекомендации по испытаниям на коррозионную стойкость.

Подтверждено, что данный стандарт вступает в силу 15 ноября 2020 года, и ожидается, что в будущем он может быть обновлен с учетом новых технологий.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

Международный стандарт
ISO 9223:2012 Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная активность атмосфер.
Классификация

Предисловие

ISO 9223:2012 — стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации (ISO) под названием «Коррозия металлов и сплавов. Коррозия в коррозионных атмосферах. Классификация». Стандарт был опубликован 15 апреля 2012 года и заменил предыдущую версию ISO 9223:1992. ISO 9223 был разработан ISO/TC 156 (Технический комитет по коррозии и защите) для классификации коррозионной агрессивности атмосферных сред и предоставления рекомендаций по коррозионному поведению металлических материалов в различных атмосферных средах. Стандарт содержит 32 страницы и определяет уровни коррозионной агрессивности в сочетании с концентрациями загрязняющих веществ в атмосфере и параметрами окружающей среды.

1 Область применения

Настоящий стандарт определяет метод классификации коррозионной активности атмосферных сред и применяется к:

Оценить коррозионное поведение металлических материалов (таких как сталь, алюминий, цинк, твердый сплав и т. д.) в атмосфере;

Определить факторы, влияющие на коррозионную атмосферу, такие как скорость осаждения хлоридов и концентрация диоксида серы;

Содержит справочные данные по испытаниям на коррозию (например, испытаниям в соляном тумане) и проектированию защиты.

Этот стандарт не применим к внутренним средам или неатмосферной коррозии (например, погружению в воду или почвенной коррозии).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 8044:2015 Коррозия — Термины и определения

ISO 9224:2012 Коррозия в агрессивных средах. Ориентировочные значения и общая информация

ISO 9226:2012 Коррозия в коррозионных средах. Методы определения скорости коррозии и степени коррозионной активности

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения (ссылки на которые приведены в ISO 8044:2015):

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.1 Коррозионная атмосфера Атмосферная среда, содержащая коррозионные вещества (например, хлориды, диоксид серы), которые вызывают коррозию металлических материалов.
- 3.2 Скорость осаждения хлоридов Количество хлорида (например, NaCl), осаждаемого в атмосфере на единицу площади за единицу времени, выраженное в $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.
- 3.3 Скорость осаждения диоксида серы Количество диоксида серы (SO_2), осаждаемого в атмосфере на единицу площади за единицу времени, выраженное в $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.
- 3.4 Степени коррозионной активности основаны на годовой скорости коррозии металлических материалов в определенной атмосферной среде и делятся на степени от C1 до C5.

4 Классификация коррозионной активности

4.1 Основа классификации

Уровень коррозионной активности определяется на основе годовой скорости коррозии (в $\text{мкм}/\text{год}$) металлического материала (например, стали, цинка, меди) в сочетании со скоростью отложения хлоридов и скоростью отложения диоксида серы.

Годовая скорость коррозии : определяется путем испытания на воздействие или ускоренного испытания (например, ISO 9226).

Параметры окружающей среды : температура, влажность, концентрация загрязняющих веществ.

4.2 Уровень коррозионной активности

оценка	Годовая скорость коррозии стали ($\text{мкм}/\text{год}$)	Годовая скорость коррозии цинка ($\text{мкм}/\text{год}$)	Годовая скорость коррозии меди ($\text{мкм}/\text{год}$)	Типичная среда
C1	$\leq 1,3$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	В помещении, очень низкая коррозия
C2	$> 1,3 - 25$	$> 0,1 - 2$	$> 0,1 - 0,9$	Сельская местность, низкая коррозия
C3	$> 25 - 50$	$> 2 - 4$	$> 0,9 - 2,0$	Городской, умеренно едкий
C4	$> 50 - 80$	$> 4 - 7$	$> 2,0 - 4,0$	Промышленные/прибрежные, высокоррозионные
C5-I	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4,0 - 8,0$	Промышленный, чрезвычайно едкий
C5-M	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4,0 - 8,0$	Океан, чрезвычайно едкий

4.3 Параметры окружающей среды

Скорость осаждения хлоридов : $C1 \leq 3 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, $C2 \leq 60 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, $C3 \leq 300 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, $C4/C5 > 300 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Скорость осаждения диоксида серы : $C1 \leq 0,1 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, $C2 \leq 4 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, $C3 \leq 12 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, $C4/C5 > 12 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Временная влажность : среднегодовая относительная влажность $> 80\%$ считается фактором высокой коррозионной активности.

5 Метод классификации

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1 Сбор данных

Скорость коррозии определяется путем проведения полевых испытаний (более 1 года) или ускоренных испытаний (например, испытания в соляном тумане по стандарту ISO 9227).

Используйте оборудование для мониторинга атмосферы для измерения скорости осаждения хлоридов и SO₂.

5.2 Определение уровня

Сравните измеренную скорость коррозии со стандартным значением в таблице 4.2 и определите соответствующую степень.

Если данные по нескольким металлам противоречивы, то предпочтение следует отдавать наивысшему уровню коррозионной активности.

5.3 Неопределенность

Погрешность измерения скорости коррозии составляет $\leq \pm 10\%$, что должно сопровождаться статистическим анализом с уровнем достоверности 95%.

6 Применение и руководство

6.1 Выбор материала

Марка C1/C2: Обычная углеродистая сталь или оцинкованная сталь.

Марка C3: Погодостойкая сталь или алюминиевый сплав.

Марка C4/C5: нержавеющая сталь, твердый сплав (например, WC10Ni) или материалы с покрытием.

6.2 Проектирование защиты

толщина покрытия : C3 ≥ 10 мкм , C5 ≥ 20 мкм .

Рассмотрите возможность использования анодной защиты или расходуемых анодов в средах класса C5-M.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Описание среды проведения испытаний (местоположение, концентрации загрязняющих веществ).

Время воздействия и скорость коррозии (в мкм /год).

Определен класс коррозионной активности атмосферы (C1-C5).

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

Приложение А (Информационное приложение)

Образец данных

A.1 Сельская среда: Скорость коррозии стали 5 мкм /год, цинка 0,5 мкм /год, хлорида 10 мг /($\text{м}^2 \cdot \text{д}$), SO₂ 1 мг /($\text{м}^2 \cdot \text{д}$), класс C2.

A.2 Прибрежная среда: Скорость коррозии стали 100 мкм /год, цинка 10 мкм /год, хлорида 500 мг /($\text{м}^2 \cdot \text{д}$), SO₂ 5 мг /($\text{м}^2 \cdot \text{д}$), класс C5-M.

проиллюстрировать

ISO 9223:2012 обеспечивает количественную основу для классификации атмосферной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионной активности и используется совместно с ISO 9224 (ориентировочные значения) и ISO 9226 (методы испытаний).

Подтверждено, что данный стандарт вступит в силу 15 апреля 2022 года и может быть обновлен в будущем на основе данных об изменении климата.

Особые среды (например, атмосфера, содержащая H_2S) требуют ссылки на другие стандарты или дополнительных испытаний.

приложение:

GB/T 38512015

Национальный стандарт Китайской Народной Республики

GB/T 3851-2015

Методы определения микроструктуры твердых

сплавов

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2009 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Настоящий стандарт заменяет GB/T 3851-2006 «Определение микроструктуры твердого сплава».

По сравнению с GB/T 3851-2006 основные технические изменения следующие:

Обновлены требования к разрешению микроскопа с 0,2 мкм до 0,1 мкм (см. 5.1);

Изменен метод измерения размера зерна и добавлена технология автоматического анализа изображений (см. 6.2);

Уточнены количественные требования к пористости и распределению фаз, добавлен анализ неопределенности (см. 6.3);

Добавлен контроль плоскостности подготовки поверхности, $Ra \leq 0,02$ мкм (см. 4.2).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации твердосплавных материалов (SAC/TC 357).

Разработчиками этого стандарта являются: Научно-исследовательский институт твердосплавных материалов Китайской корпорации станкостроения, Пекинский университет науки и технологий, Сианьский университет

Цзяотун. Основными разработчиками этого стандарта являются: Этот стандарт будет введен с 1 октября 2015 года.

1 Область применения

Этот стандарт определяет общий метод определения микроструктуры твердого сплава, включая подготовку образцов, микроскопическое наблюдение, количественный анализ размера зерна, пористости и распределения фаз. Он применим к твердому сплаву (например, WC-Co, WC-Ni) с карбидом вольфрама (WC) в качестве основного компонента и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы, и может использоваться для контроля качества, оценки производительности и исследований и разработок.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 16556-2014 Общие рекомендации по микроскопическому исследованию металлических материалов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 4340.1-2009 Метод испытания микротвердости металлических материалов
ISO 4499-1:2008 Определение микроструктуры твердых сплавов. Общие положения

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Размер зерна

Средний диаметр фазы WC в твердом сплаве в мкм, отражающий однородность микроструктуры.

3.2 Пористость

Процент пор на единицу объема образца в %, влияющий на плотность материала.

3.3 Распределение фаз

Пространственная однородность распределения связующей фазы (Co или Ni) и твердой фазы (WC).

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

4.1.1 Материал образца: карбид вольфрама на основе WC, с Co или Ni в качестве связующей фазы.

4.1.2 Размер образца: 10 мм × 10 мм × 5 мм ± 0,1 мм или по согласованию. 4.1.3 Количество образцов: 3-5 штук на партию.

4.2 Подготовка образца

4.2.1 Резка: используйте алмазный шлифовальный круг, воду в качестве охлаждающей жидкости, скорость резки 5 м/с ± 0,5 м/с.

4.2.2 Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость #800–#2000), а затем отполируйте алмазной суспензией (зернистость 0,25 мкм ± 0,05 мкм), шероховатость поверхности $Ra \leq 0,02$ мкм.

4.2.3 Травление: протравите 5% едким натром (NaOH) или чернилами в течение 5–10 секунд, чтобы усилить эффект контрастности. 4.2.4 Очистка: используйте ультразвуковую очистку безводным этанолом в течение 3 минут ± 0,5 минуты, высушите и отложите в сторону.

5 методов испытаний

5.1 Микроскопическое наблюдение

5.1.1 Оборудование: оптический микроскоп (разрешение $\leq 0,1$ мкм) или сканирующий электронный микроскоп (СЭМ, разрешение $\leq 0,05$ мкм).

5.1.2 Увеличение

: 100x-1000x, регулируется в соответствии с целью наблюдения. 5.1.3 Освещение: используйте светопольное или поляризованное освещение в сочетании с дифференциально-интерференционным контрастом, когда это необходимо.

5.2 Элементы измерения

5.2.1 Размер зерна: измерьте средний диаметр фазы WC.

5.2.2 Пористость: подсчитайте количество и размер пор на единицу площади.

5.2.3 Распределение фаз: оцените однородность фазы Co или Ni.

6 Обработка данных

6.1 Размер зерна

6.1.1 Метод измерения:

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

Ручное измерение: отсечь 50–100 зерен по прямой линии и вычислить среднее значение.
, ImageJ) для обработки и подсчета более 500 зерен.

6.1.2 Выражение результата: Средний размер зерна (мкм) , точность $\pm 0,01$ мкм .

6.2 Пористость

6.2.1 Метод измерения:

Подсчитайте поры под оптическим микроскопом и рассчитайте, используя метод площади:

$$\text{孔隙率}(\%) = \frac{A_{\text{孔}}}{A_{\text{总}}} \times 100$$

其中, $A_{\text{孔}}$ 为孔隙面积, $A_{\text{总}}$ 为总观察面积。

СЭМ в

сочетании с ЭДС для проверки свойств пор.

6.2.2 Выражение результата: процент (%), точность $\pm 0,1\%$.

6.3 Распределение фаз

6.3.1 Метод измерения:

Анализ изображения: Рассчитайте долю площади и отклонение распределения фазы Co или Ni.

Метод линейного сечения: статистическое соотношение фаз вдоль нескольких прямых линий, отклонение $\leq 5\%$.

6.3.2 Выражение результата: доля площади (%), качественное описание однородности.

6.4 Анализ неопределенности

6.4.1 Оценить точность измерительного инструмента и репрезентативность выборки.

6.4.2 Уровень достоверности 95%, неопределенность $\leq \pm 5\%$.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия микроскопического наблюдения (например, увеличение, метод освещения).

Результаты измерений (размер зерна, пористость, распределение фаз) и неопределенности.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

Калибровка микроскопа

сетки с погрешностью $\leq 0,05$ мкм .

A.2 Регулярно калибруйте систему освещения, чтобы гарантировать, что равномерность яркости составляет $\leq 5\%$.

Приложение В (Информационное приложение)

Типичная ссылка на данные

B.1 WC10Co: размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, пористость $0,1\% \pm 0,1\%$, распределение фазы Co равномерное.

B.2 WC8 Ni: размер зерна $0,8 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, пористость $0,3\% \pm 0,1\%$, отклонение распределения фазы Ni 3%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проиллюстрировать

Этот стандарт является руководством по определению микроструктуры. Конкретное применение должно сочетаться с техническими требованиями к продукту. Любые незаконченные вопросы могут быть отнесены к ISO 4499-1 или определены путем консультации с техническим комитетом.

Этот стандарт был выпущен Национальным управлением по стандартизации 18 июня 2015 года и введен в действие 1 октября 2015 года.

приложение:

Национальный стандарт Китайской Народной Республики
GB/T 7997-2017

Методы испытаний свойств твердых
сплавов

Предисловие

Настоящий стандарт разработан в соответствии с положениями GB/T 1.1-2009 «Руководящие принципы стандартизации. Часть 1: Структура и правила написания стандартов».

Этот стандарт заменяет GB/T 7997-2005 «Методы испытаний свойств твердого сплава».

По сравнению с GB/T 7997-2005 основные технические изменения следующие:

Обновлен метод испытания на твердость и добавлен высокотемпературный тест на твердость по Виккерсу (см. 5.2);

Диапазон нагрузок для испытания на прочность при изгибе изменен с 500–1000 Н до 100–2000 Н $\pm$ 10 Н (см. 5.3);

Формула испытания на вязкость разрушения была уточнена, и был добавлен метод одностороннего надреза балки (см. 5.4);

Увеличено требование к количеству циклов испытания на термоудары со 100 до 500 $\pm$ 50 раз (см. 5.5);

Требования к шероховатости поверхности испытуемого образца повышены: $R_a \leq 0,05$ мкм $\pm$ 0,01 мкм (см. 4.2).

Этот стандарт предложен и управляется Национальным техническим комитетом по стандартизации твердосплавных материалов (SAC/TC 357).

Разработчиками этого стандарта являются: Исследовательский институт твердосплавных материалов Китайской машиностроительной корпорации, Пекинский университет науки и технологий, Сианьский университет Цзяотун.

Главными разработчиками этого стандарта являются: Чэнь Вэй, Ли Фан, Ван Цзюнь. Этот стандарт будет введен с 01.10.2017.

1 Область применения

Этот стандарт определяет общий метод испытания производительности твердого сплава, включая испытание твердости, прочности на изгиб, вязкости разрушения и стойкости к тепловому удару. Он применим к твердому сплаву (например, WC-Co, WC-Ni) с карбидом вольфрама (WC) в качестве основного компонента и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы, и может использоваться для контроля качества, оценки производительности, а также для исследований и разработок.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 16556-2014 Общие рекомендации по микроскопическому исследованию металлических материалов

GB/T 3850-2015 Метод определения микроструктуры твердого сплава

ISO 3327:2009 Определение прочности на изгиб твердого сплава

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

- 3.1 Твердость Способность твердого сплава противостоять поверхностному вдавливанию или износу, обычно выражаемая в твердости по Виккерсу (HV). 3.2 Прочность на изгиб Способность образца противостоять разрушению при трехточечных или четырехточечных изгибающих нагрузках, выражаемая в МПа. 3.3 Вязкость разрушения Способность материала противостоять росту трещин, выражаемая в МПа·м^{1/2}. 3.4 Термостойкость Способность образца противостоять образованию трещин при циклическом воздействии высоких и низких температур, выраженная в длине трещины (мм).

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

4.1.1 Материал образца: карбид вольфрама на основе WC, связующей фазой которого является Co или Ni.

4.1.2 Размер образца:

Испытание на твердость: 10 мм × 10 мм × 5 мм ± 0,1 мм;

Прочность на изгиб: 40 мм × 5 мм × 5 мм ± 0,1 мм;

Вязкость разрушения: 45 мм × 4 мм × 3 мм ± 0,1 мм;

к тепловому удару : 20 мм × 20 мм × 5 мм ± 0,1 мм.

4.1.3 Количество образцов: Каждая испытательная группа должна быть повторена 5 раз.

4.2 Обработка образцов

4.2.1 Резка: используйте алмазный шлифовальный круг, охлаждайте водой, скорость резки 5 м/с ± 0,5 м/с.

4.2.2 Полировка: используйте наждачную бумагу SiC (зернистость № 800–2000) и окончательно отполируйте алмазной суспензией (зернистость 0,25 мкм ± 0,05 мкм) , шероховатость поверхности Ra ≤ 0,05 мкм ± 0,01 мкм .

4.2.3 Очистка: Используйте безводный этанол для ультразвуковой очистки в течение 5 минут ± 0,5 минуты, взвешивайте после высыхания, точность ± 0,01 мг.

5 методов испытаний

5.1 Общие требования

5.1.1 Условия окружающей среды: Температура 23°C ± 5°C, влажность < 65%.

5.1.2 Калибровка оборудования: Все испытательное оборудование должно регулярно калиброваться с погрешностью ≤ ±1%.

5.2 Испытание на твердость

5.2.1 Метод: Испытание на твердость по Виккерсу (согласно GB/T 4340.1).

5.2.2 Условия:

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

Комнатная температура: нагрузка $30 \text{ кг} \pm 0,1 \text{ кг}$, удержание 10–15 секунд.

Высокая температура: $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, нагрузка $10 \text{ кг} \pm 0,1 \text{ кг}$, выдержка 15 минут ± 1 минута.

5.2.3 Результат: Возьмите среднее значение 5 точек измерения, единица измерения HV, точность ± 30 .

5.3 Испытание на прочность при изгибе

5.3.1 Метод: Метод трехточечного изгиба (согласно ISO 3327).

5.3.2 Условия:

Размах $30 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$;

Нагрузка $100\text{--}2000 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$, скорость нагружения $0,5 \text{ мм/мин} \pm 0,05 \text{ мм/мин}$.

5.3.3 Результаты:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 $\pm 5 \text{ MPa}$.

5.4

Испытание на трещиностойкость

5.4.1 Метод: Метод одностороннего надреза балки (SENB).

5.4.2 Условия: глубина надреза $2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, пролет $40 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, нагрузка $500 \text{ Н} \pm 5 \text{ Н}$.

5.4.3 Результаты:

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), $P_{\max}$ 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 $\pm 0.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

5.5 Испытание на устойчивость к тепловому удару

5.5.1 Метод: Метод термоциклирования.

5.5.2 Условия:

Нагреть до $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, выдержать 15 мин ± 1 мин;

Охладить до $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, цикл 500 раз ± 50 раз;

Скорость нагрева и охлаждения составляла $10^\circ\text{C}/\text{с} \pm 1^\circ\text{C}/\text{с}$.

5.5.3 Результаты: Длина трещины была измерена с помощью СЭМ с точностью $\pm 0,01 \text{ мм}$.

6 Обработка данных

6.1 Все результаты являются средним значением 5 измерений.

6.2 Результаты сопровождаются анализом неопределенности с уровнем достоверности 95%.

6.3 Запишите аномальные значения и объясните причины.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Состав материала образца и процесс подготовки.

Условия испытаний (например, температура, нагрузка, количество циклов).

Результаты испытаний (твердость, прочность на изгиб, вязкость разрушения, длина трещины)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и неопределенности.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение А (Нормативное приложение)

Калибровка оборудования

A.1 Калибровка твердомера: использовать стандартный блок (HV 1000 ± 50), погрешность ≤ ±10.

A.2 Калибровка нагрузочного устройства: использовать стандартный груз, погрешность ≤ ±1 Н.

Приложение В (Информационное приложение)

Типичная ссылка на данные

В.1 WC10Co:

Твёрдость при комнатной температуре 1500 HV ± 30;

Высокотемпературная твёрдость 1300 HV ± 30;

Прочность на изгиб: 2500 МПа ± 5 МПа;

Вязкость разрушения 12 МПа·м^{1/2} ± 0,1 МПа·м^{1/2};

Трещина от термического удара 0,03 мм ± 0,01 мм.

В.2 WC8 Ni :

Твёрдость при комнатной температуре 1400 HV ± 30;

Высокотемпературная твёрдость 1200 HV ± 30;

Прочность на изгиб 2300 МПа ± 5 МПа;

Вязкость разрушения 10 МПа·м^{1/2} ± 0,1 МПа·м^{1/2};

Трещина от термического удара 0,04 мм ± 0,01 мм.

проиллюстрировать

Этот стандарт представляет собой руководство по тестированию производительности. Конкретное применение должно сочетаться с техническими требованиями к продукту. Любые нерешенные вопросы могут быть направлены в ISO 3327 или определены путем консультации с техническим комитетом.

Этот стандарт был выпущен Национальным управлением по стандартизации 18 июня 2017 года и внедрен 1 октября 2017 года.

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:

Международный стандарт
ISO 6508 Металлические материалы — Определение твердости по Роквеллу
Металлические материалы
— Испытание на твердость по Роквеллу

Обзор

ISO 6508 — это стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации (ISO), который фокусируется на испытании твердости по Роквеллу для металлических материалов. Стандарт разделен на несколько частей и подробно описывает методы испытаний, требования к калибровке и подготовку стандартных испытательных образцов для оценки твердости металлических материалов (таких как сталь, алюминий, твердый сплав и т. д.). Ниже приведен обзор, основанный на последней версии:

Последняя версия : ISO 6508-1:2016 (опубликована 15 октября 2016 г., действительна до 2021 г.), другие части включают ISO 6508-2:2015 и ISO 6508-3:2015.

Технический комитет : ISO/TC 164/SC 3 (Подкомитет по механическим испытаниям).

Область применения : Применяется к различным металлическим материалам, включая, помимо прочего, сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, и широко используется при контроле качества и оценке эксплуатационных характеристик материалов.

1 Область применения

ISO 6508-1 :2016 : Определяет основной метод определения твердости по Роквеллу, включая процедуры испытаний, требования к оборудованию и выражение результатов для диапазонов А, В, С и других.

ISO 6508-2 :2015 : подробно описывает методы и процедуры калибровки для проверки твердомеров по Роквеллу.

ISO 6508-3 :2015 : Определяет подготовку и калибровку стандартных испытательных образцов для обеспечения точности испытательных машин.

Не подходит для испытаний неметаллических материалов или микротвердости (например, по Виккерсу или Кнупу).

2 Нормативные ссылки

Для применения настоящего стандарта необходимы следующие документы:

ISO 6507-1:2018 Испытание твердости по Виккерсу для металлических материалов. Часть 1. Метод испытания

испытательные машины для испытания металлических материалов на растяжение — часть измерения силы

ISO 376:2011 Калибровка эталонов силы для испытаний на растяжение металлических материалов

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения (на которые

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

имеются ссылки в ISO 6507 и связанных с ним стандартах):

3.1 Твердость по Роквеллу Сопротивление металлического материала проникновению индентора, выраженное в виде значения твердости по Роквеллу (HR), в зависимости от диапазона и типа индентора. 3.2 Предварительная нагрузка

Начальная сила, приложенная к образцу для стабилизации контакта, обычно 10 кгс (98,07 Н).

3.3 Общая испытательная сила Общая сила предварительной нагрузки плюс дополнительная нагрузка, например 60 кгс (588,4 Н), 100 кгс (980,7 Н) или 150 кгс (1471 Н).

3.4 Шкала Диапазон испытаний на твердость, определяемый комбинацией индентора и нагрузки, например HRA (алмазный конус, 60 кгс), HRB (стальной шарик диаметром 1/16 дюйма, 100 кгс), HRC (алмазный конус, 150 кгс).

4 Метод испытания (ISO 6508-1:2016)

4.1 Оборудование

Твердомер : твердомер по Роквеллу, соответствующий стандарту ISO 6508-2, оснащенный алмазным конусом (угол при вершине 120°) или стальным шариковым индентором (диаметром 1/16 дюйма, 1/8 дюйма и т. д.).

Нагрузка : Предварительная нагрузка 10 кгс $\pm$ 0,1 кгс, основная нагрузка выбирается в соответствии с диапазоном (60, 100 или 150 кгс $\pm$ 0,5 кгс).

Условия окружающей среды : температура 23°C $\pm$ 5°C, влажность < 65%.

4.2 Требования к образцам

Плоскостность поверхности $\leq$ 0,01 мм, шероховатость Ra $\leq$ 0,8 мкм.

Толщина: Минимальная толщина зависит от диапазона измерения (например, HRC должен быть $\geq$ 1,5 мм).

Погрешность параллельности $\leq$ 0,01 мм.

4.3 Процедура испытания

Установите образец, убедившись, что поверхность чистая и не содержит масла.

Примените предварительную нагрузку и удерживайте ее в течение 1–5 секунд.

Приложите основную нагрузку и удерживайте ее в течение 2–8 секунд (регулируйте в зависимости от твердости материала).

Разгрузите, чтобы предварительно нагрузить и считать значение твердости.

Повторите измерение 3–5 раз и возьмите среднее значение.

4.4 Выражение результатов

Значение твердости выражается в единицах HR с точностью $\pm 0,5$ HR (HRA, HRC) или ± 1 HR (HRB).

Отчет должен включать диапазон, нагрузку и условия испытаний.

5 Проверка и калибровка (ISO 6508-2:2015)

Метод проверки : Используйте стандартный испытательный образец (ISO 6508-3) для проверки погрешности показаний твердомера с допустимым отклонением ± 1 HR.

Цикл калибровки : один раз в год или сразу после настройки оборудования.

Требования к оборудованию : погрешность измерения силы $\leq \pm 0,5\%$, точность измерения глубины $\leq \pm 0,5$ мкм.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 стандартных испытательных блоков (ISO 6508-3:2015)

Подготовка : Материал испытательного блока соответствует испытываемому материалу, а диапазон твердости охватывает HRA 20-88, HRB 20-100 и HRC 20-70.

Калибровка : определена сертифицированной лабораторией, погрешность $\leq \pm 0,5$ HR.

Применение : Перед ежедневным тестированием откалибруйте твердомер и запишите результаты.

7 приложений

Оценка материалов : используется для испытания твердости стали (например, углеродистой стали, инструментальной стали), алюминиевых сплавов и твердых сплавов (например, WC-Co).

Контроль качества : Убедитесь, что обработанные детали соответствуют требованиям по твердости.

Пример : показатель HRA твердого сплава WC10Co обычно находится в диапазоне 85–90, что отражает его высокую твердость и износостойкость.

8 Ограничения и примечания

Не подходит для тонких листов (толщиной $< 0,1$ мм) или материалов с толщиной упрочненного поверхностного слоя $< 0,1$ мм.

Результаты зависят от состояния поверхности и времени приложения нагрузки и должны строго контролироваться.

Ограниченная взаимозаменяемость с твердостью по Виккерсу (ISO 6507) или твердостью по Бринеллю (ISO 6506).

9 Отчет об испытаниях

Отчет должен включать:

Материал образца и состояние поверхности.

Диапазон испытаний, нагрузка и время удержания.

Значения твердости (среднее и стандартное отклонение).

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные данные

Углеродистая сталь (HRB): 70 ± 1

Закаленная сталь (HRC): $50 \pm 0,5$

WC10Co (HRA): $88 \pm 0,5$

проиллюстрировать

ISO 6508-1:2016 содержит основные методы испытаний и вместе с ISO 6508-2 и ISO 6508-3 образует полную систему.

Подтверждено, что данный стандарт вступит в силу в 2021 году и может быть обновлен в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

будущем с учетом новых технологий и оборудования.



приложение:

Международный стандарт
ISO 6508-3:2015 Металлические материалы. Определение твердости по Роквеллу.
Часть 3. Калибровка эталонных образцов

Обзор

ISO 6508-3:2015 — это стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации под названием «Металлические материалы. Испытание на твердость по Роквеллу. Часть 3. Подготовка и калибровка стандартных испытательных блоков». Стандарт был опубликован 15 октября 2015 года и подтвержден как вступающий в силу в 2020 году. Серия ISO 6508 была разработана ISO/TC 164/SC 3 (Подкомитет по механическим испытаниям) и представляет собой многочастный стандарт (включая ISO 6508-1, ISO 6508-2 и ISO 6508-3) для стандартизации метода испытания твердости по Роквеллу для металлических материалов. В этой части указаны требования к подготовке, калибровке и использованию стандартных испытательных блоков для обеспечения точности и надежности машин для испытания твердости по Роквеллу. Он подходит для измерения твердости металлических материалов, таких как сталь, алюминий и твердый сплав.

1 Область применения

Применимые объекты: подходят для стандартных контрольных образцов, используемых для определения твердости по Роквеллу, включая сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы.

Цель: Определить подготовку, калибровку и использование стандартных испытательных образцов для проверки точности измерений испытательной машины.

Неприменимо: Неприменимо к неметаллическим образцам или испытаниям на микротвердость (например, твердость по Виккерсу или Кнупу).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 6508-1:2016 Металлические материалы. Испытание на твердость по Роквеллу. Часть 1. Метод испытания

ISO 6508-2:2015 Металлические материалы. Испытание на твердость по Роквеллу. Часть 2. Проверка и калибровка испытательных машин

ISO 376:2011 Металлические материалы. Калибровка стандартов силы для испытаний на растяжение

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения:

3.1 Стандартный испытательный образец

Эталонный материал с известным значением твердости, используемый для калибровки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердомера по Роквеллу. 3.2 Калибровка

Проверяет точность результатов измерений испытательной машины путем измерения значения твердости стандартного испытательного образца. 3.3 Диапазон Диапазон испытаний на твердость, определяемый комбинацией индентора и нагрузки, например HRA, HRB, HRC. 3.4 Неопределенность

Степень дисперсии результатов измерений во время калибровки, обычно с уровнем достоверности 95%.

4. Подготовка стандартных тестовых блоков.

4.1 Требования к материалам

Материал: Выбирайте металлические материалы с хорошей однородностью, такие как закаленная сталь, алюминиевый сплав или твердый сплав.

Диапазон твердости: охватывает основные диапазоны, такие как HRC 20-70, HRB 20-100, HRA 20-88.

4.2 Размеры и обработка поверхности

Размер: Толщина ≥ 6 мм, площадь плоскости ≥ 25 мм $\times$ 25 мм.

Обработка поверхности: механическая полировка, шероховатость $Ra \leq 0,8$ мкм, погрешность плоскостности $\leq 0,01$ мм.

Чистка: протрите этанолом или ацетоном, чтобы удалить масляные пятна.

4.3 Термическая обработка

Выполняйте термическую обработку (такую как закалка и отпуск) в соответствии с характеристиками материала, чтобы обеспечить равномерную твердость.

5 Требования к калибровке

5.1 Калибровочное оборудование

Твердомер по Роквеллу в соответствии с ISO 6508-2, в комплекте с калибровочным устройством.

Условия окружающей среды: температура $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, влажность $< 65\%$.

5.2 Процедура калибровки

Выберите стандартный испытательный блок с соответствующим диапазоном (например, испытательный блок HRC).

5-10 точек измерения на поверхности испытательного блока.

Приложите предварительное испытательное усилие (10 кгс $\pm 0,1$ кгс) и основное испытательное усилие ($60, 100$ или 150 кгс $\pm 0,5$ кгс).

Запишите значение твердости для каждого измерения и сохраняйте его в течение 2–8 секунд.

Рассчитайте среднее значение и стандартное отклонение.

5.3 Критерии приемки

Отклонение между измеренным значением и значением, указанным в сертификате, составляет $\leq \pm 1$ HR.

Стандартное отклонение $\leq 0,5$ HR (HRA, HRC) или ≤ 1 HR (HRB).

6 Обработка данных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1 Значение твердости

Среднее значение: возьмите среднее значение 5–10 измерений с точностью $\pm 0,5$ HR (HRA, HRC) или ± 1 HR (HRB).

Неопределенность: Оценивает воздействие оборудования, эксплуатации и окружающей среды с уровнем достоверности 95%.

6.2 Отчет о калибровке

Включает материал испытательного образца, диапазон твердости, значение измерения и погрешность.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Материалы и диапазоны твердости стандартных испытательных мер.

Условия калибровки (например, диапазон, основная испытательная сила) .

Результаты измерений (среднее значение, стандартное отклонение, неопределенность).

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные данные

Испытательный образец из закаленной стали : HRC $50 \pm 0,5$, стандартное отклонение 0,3 HR.

Испытательный образец из алюминиевого сплава: HRB 80 ± 1 , стандартное отклонение 0,8 HR.

проиллюстрировать

Стандарт серии:

ISO 6508-1:2016 содержит основные методы испытаний.

Стандарт ISO 6508-2:2015 регламентирует проверку и калибровку испытательных машин.

ISO 6508-3:2015 регламентирует подготовку и калибровку стандартных испытательных образцов.

Срок действия: Подтверждено, что стандарт ISO 6508-3:2015 действителен в 2020 году и может быть обновлен в будущем с учетом технического прогресса.

Где получить: Стандартный текст можно приобрести на официальном сайте ISO.

Примечание: При внедрении убедитесь, что испытательный блок соответствует испытательной машине, и проконсультируйтесь с профессиональными специалистами.

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:

Международный стандарт
ISO 6508-1:2016 Металлические материалы. Испытание на твердость по Роквеллу.
Часть 1. Метод испытания

Обзор

ISO 6508-1:2016 — это стандарт, разработанный Международной организацией по стандартизации под названием «Металлические материалы. Испытание на твердость по Роквеллу. Часть 1. Метод испытания». Стандарт был опубликован 15 октября 2016 года, заменив версию ISO 6508-1:2005, и подтверждено, что он вступит в силу в 2021 году. Серия стандартов ISO 6508 была разработана ISO/TC 164/SC 3 (Подкомитет по испытаниям механических свойств) и представляет собой многочастный стандарт (включая ISO 6508-1, ISO 6508-2 и ISO 6508-3) для стандартизации метода испытания на твердость по Роквеллу для металлических материалов. Эта часть определяет процедуру испытания, требования к оборудованию и выражение результата и применима к оценке твердости металлических материалов, таких как сталь, алюминий и твердый сплав.

1 Область применения

Применяемые объекты: Подходит для металлических материалов (таких как сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы), включая твердый сплав.

Назначение: Тест на твердость по Роквеллу используется для измерения способности материала противостоять вдавливанию. Подходит для контроля качества и оценки эксплуатационных характеристик материала.

Неприменимо: Не подходит для испытаний неметаллических материалов или микротвердости (например, твердости по Виккерсу или Кнупу).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 6507-1:2018 Металлические материалы. Испытание на твердость по Виккерсу. Часть 1. Метод испытания

ISO 7500-1:2015 Металлические материалы. Калибровка и проверка испытательных машин для испытаний на растяжение. Измерение силы. Часть

ISO 376:2011 Металлические материалы. Калибровка стандартов силы для испытаний на растяжение

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения:

3.1 Твёрдость по Роквеллу

Сопrotивление металлического материала проникновению индентора, выраженное в виде

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

значения твёрдости по Роквеллу, которое зависит от диапазона и типа индентора. 3.2 Предварительное испытательное усилие
Начальная сила, приложенная к образцу для стабилизации контакта, обычно 10 кгс . 3.3 Полное испытательное усилие
Полное усилие предварительной нагрузки плюс дополнительная нагрузка, например 60 кгс , 100 кгс или 150 кгс . 3.4 Диапазон
Диапазон испытаний на твёрдость, определяемый комбинацией индентора и нагрузки, например HRA (алмазный конус, 60 кгс) , HRB (стальной шарик 1/16 дюйма , 100 кгс) , HRC (алмазный конус, 150 кгс) .

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

Материалы: Металлические материалы, включая сталь, алюминий, карбид и т. д.

Размер: Минимальная толщина зависит от диапазона измерения (например, HRC должен быть $\geq 1,5$ мм), площадь плоскости ≥ 25 мм $\times$ 25 мм.

Количество: не менее 3 измерений на группу.

4.2 Обработка образцов

поверхности : механическая полировка или шлифовка наждачной бумагой, шероховатость $Ra \leq 0,8$ мкм .

Чистка: протрите этанолом или ацетоном, чтобы удалить масляные пятна.

Плоскостность: Погрешность плоскостности поверхности $\leq 0,01$ мм.

4.3 Оборудование

Твердомер: твердомер по Роквеллу в соответствии с ISO 6508-2, оснащенный алмазным конусом (угол при вершине 120°) или стальным шариковым индентором (диаметром 1/16 "или 1/8").

Условия окружающей среды: температура $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, влажность $< 65\%$.

5 методов испытаний

5.1 Процедура испытания

Установите образец, обеспечив совмещение с индентором.

Приложите предварительное испытательное усилие ($10 \text{ кгс} \pm 0,1 \text{ кгс}$) и стабилизируйте в течение 1–5 секунд.

Приложите основную испытательную силу ($60, 100$ или $150 \text{ кгс} \pm 0,5 \text{ кгс}$) и удерживайте в течение 2–8 секунд (регулируется в зависимости от твердости материала).

Разгрузите образец до предварительного усилия и считайте значение твердости.

Повторите измерение 3–5 раз и возьмите среднее значение.

5.2 Выбор диапазона

HRA: Алмазный конус, 60 кгс , подходит для твердых материалов (HRA 20-88).

HRB: стальной шарик диаметром 1/16 дюйма , 100 кгс , подходит для материалов средней твердости (HRB 20-100).

HRC: Алмазный конус, 150 кгс , для твердой стали (HRC 20-70).

При необходимости можно выбрать другие диапазоны (например, HRD, HRE).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Контроль окружающей среды

Избегайте вибрации и колебаний температуры, сохраняйте поверхность образца сухой.

6 Обработка данных

6.1 Значение твердости

Расчет: Значение твердости считывается непосредственно с твердомера в единицах HR (HRA, HRB, HRC и т. д.).

Среднее значение: возьмите среднее значение 3–5 измерений с точностью $\pm 0,5$ HR (HRA, HRC) или ± 1 HR (HRB).

6.2 Неопределенность

Оцените ошибки, вызванные оборудованием, эксплуатацией и состоянием поверхности образца с уровнем достоверности 95%. Типичная неопределенность $\leq \pm 1$ HR.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Материал образца и состояние поверхности. Диапазон испытаний, основная испытательная сила и время выдержки. Значение твердости (среднее значение и стандартное отклонение). Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные данные

Углеродистая сталь: HRB 80 ± 1 . Закаленная сталь: HRC $50 \pm 0,5$. WC10Co: HRA $88 \pm 0,5$.

проиллюстрировать

Стандарт серии:

ISO 6508-1:2016 содержит основные методы испытаний. ISO 6508-2:2015 определяет процедуры проверки и калибровки.

Стандарт ISO 6508-3:2015 определяет стандартную подготовку испытательного блока.

Срок действия: ISO 6508-1:2016 действителен с 2021 года и может быть обновлен в будущем с учетом новых технологий и оборудования.

можно приобрести на официальном сайте ISO.

Примечание: При внедрении, пожалуйста, ознакомьтесь с конкретными свойствами материалов и результатами калибровки оборудования, а также проконсультируйтесь с профессиональными техническими специалистами.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

**Стандартный метод испытаний ASTM G59 для проведения измерений
потенциодинамического поляризационного сопротивления**

Обзор

ASTM G59 — это стандарт, разработанный Американским обществом по испытаниям и материалам (ASTM International) под названием «Стандартный метод испытаний для проведения измерений потенциодинамического поляризационного сопротивления». Стандарт был впервые опубликован 10 ноября 1997 года, а последняя версия — **ASTM G59-97(2014)**, опубликованная 1 июня 2014 года и подтвержденная как вступающая в силу в 2023 году. ASTM G59 был разработан комитетом ASTM G01 (Коррозия металлов) для предоставления лабораторного метода оценки скорости и тенденции коррозии металлов и сплавов в коррозионных средах посредством измерений потенциодинамического поляризационного сопротивления. Этот стандарт подходит для изучения механизмов коррозии, скрининга материалов и контроля качества.

1 Область применения

Применимые объекты : Подходит для испытаний на коррозионное поведение металлов и сплавов (таких как сталь, нержавеющая сталь, алюминий, твердые сплавы и т. д.) в растворах электролитов.

Цель: Оценить плотность тока коррозии (i_{corr}) и скорость коррозии путем измерения сопротивления поляризации.

Не применимо : Не подходит для испытаний на коррозию непроводящих материалов или в экстремальных условиях (например, при воздействии расплавленной соли высокой температуры).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ASTM G3-14 Стандартная практика подготовки, проведения и анализа результатов лабораторных испытаний на коррозионную стойкость

Стандартный эталонный метод испытаний ASTM G5-14: потенциодинамическая поляризация

Стандартная практика ASTM E691-22: Оценка сопоставимости данных испытаний

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Сопротивление поляризации (R_p)

Отношение плотности тока к разности потенциалов при приложении небольшого изменения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

потенциала вблизи потенциала коррозии, единица измерения — Ом·см.².

3.2 Плотность тока коррозии ($E_{\text{корр}}$)

Плотность тока через коррозионную реакцию на единицу площади, единица измерения мкА/см², используется для оценки скорости коррозии.

3.3 Потенциал коррозии ($E_{\text{корр}}$)

Равновесный потенциал металла в электролите без приложенного тока, единица измерения — мВ (относительно электрода сравнения).

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

Материал : металл или сплав, такой как углеродистая сталь, нержавеющая сталь 304, карбид WC-Co.

Размер : Площадь воздействия 1 см² ± 0,1 см² или по соглашению.

Количество : Каждая группа экспериментов была повторена 3 раза.

4.2 Обработка образцов

Обработка поверхности : Механическая полировка до Ra ≤ 0,8 мкм, промывка дистиллированной водой после очистки.

Монтаж : Вставьте образец в держатель электрода, убедившись, что на открытой поверхности нет пузырьков.

4.3 Электролиты

Раствор : например, 3,5% раствор NaCl (массовая доля), pH 6,5-7,0 или определяется по соглашению.

Деоксигенация : при необходимости продуйте азотом в течение 15 минут для удаления растворенного кислорода.

Температура : 23°C ± 2°C или согласно протоколу.

4.4 Оборудование

Электрохимическая рабочая станция : с функциями контроля потенциала (точность ±0,1 мВ) и измерения тока (точность ±0,1 мкА).

Система электродов :

Рабочий электрод: образец.

Электрод сравнения: насыщенный каломельный электрод (НКЭ) или электрод Ag/AgCl.

Вспомогательный электрод: платиновый электрод.

5 методов испытаний

5.1 Процедура испытания

Установите электродную систему, погрузите ее в электролит и стабилизируйте в течение 1 часа до тех пор, пока $E_{\text{не}}$ не стабилизируется (скорость изменения < 0,1 мВ/мин).

Запишите начальное $E_{\text{сог}}$.

Динамическое сканирование потенциала проводилось в диапазоне $E_{\text{сог}} \pm 10$ мВ со скоростью сканирования 0,166 мВ/с ± 0,002 мВ/с.

Запишите кривую зависимости плотности тока от потенциала.

Выгрузите электрод и очистите образец.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Настройки параметров

Диапазон сканирования : $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$ (линейная область).

Интервал выборки : $\leq 0,1 \text{ mV}$.

Контроль окружающей среды : избегайте вибрации и электромагнитных помех.

6 Обработка данных

6.1 Расчет поляризационного сопротивления

формула :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Измерение: Извлечь наклон линейной области из кривой.

6.2 Оценка плотности тока коррозии

Формула Штерна-Гиббса :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (通常 26 mV 对于活性腐蚀, 52 mV 对于钝化系统), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Точность : $\pm 10\%$.

6.3 Неопределенность

Оцените влияние стабильности электрода и чистоты раствора с уровнем достоверности 95%.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Материал образца и состояние поверхности.

Состав электролита, температура и pH.

Скорость сканирования, диапазон и E_{corr} ценить.

R_p и i_{corr} результаты и неопределенности.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные данные

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

проиллюстрировать

Ссылки на соответствующие стандарты : ASTM G59 используется совместно с ASTM G5 (потенциодинамическая поляризация) для проведения комплексного анализа коррозионного поведения.

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

Ограничения : Линейность предполагается только для небольшого диапазона потенциалов, за пределами ± 10 мВ может потребоваться ссылка на ASTM G5.

Срок действия : ASTM G59-97 (2014) подтвержден как действительный в 2023 году и может быть обновлен в будущем на основе электрохимической технологии.

приложение:

**ASTM G3-14 Стандартная практика
для соглашений, применимых к электрохимическим измерениям при испытаниях на
коррозионную стойкость**

Обзор

ASTM G3-14 — это стандарт, разработанный Американским обществом по испытаниям и материалам (ASTM International) под названием «Стандартная практика для соглашений, применимых к электрохимическим измерениям при коррозионных испытаниях». Стандарт был опубликован 1 мая 2014 года, а последняя версия — **ASTM G3-14 (2024)**, которая была опубликована 1 января 2024 года и подтверждена как вступающая в силу в 2024 году. ASTM G3 был разработан комитетом ASTM G01 (Коррозионные металлы) для предоставления единых соглашений, терминологии и процедур для электрохимических измерений в лабораторных коррозионных испытаниях с целью обеспечения повторяемости и сопоставимости результатов испытаний. Этот стандарт применим к электрохимическим испытаниям металлов и сплавов в различных коррозионных средах.

1 Область применения

Применимые объекты : Подходит для электрохимических коррозионных испытаний металлов и сплавов (таких как сталь, нержавеющая сталь, алюминий, твердые сплавы и т. д.) в растворах электролитов.

Цель : стандартизировать подготовку, проведение и анализ электрохимических измерений, включая систему электродов, настройку приборов и интерпретацию данных.

Не применимо : Не применимо к испытаниям на неэлектрохимическую коррозию (например, испытаниям в солевом тумане) или неметаллическим материалам.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

Стандартный эталонный метод испытаний ASTM G5-14: потенциодинамическая поляризация

Стандартный метод испытаний ASTM G59-97(2014): измерение сопротивления потенциодинамической поляризации

Стандартная практика ASTM E691-22: Оценка сопоставимости данных испытаний

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Электрохимическая ячейка

Устройство, используемое для электрохимических измерений, включающее рабочий электрод, электрод сравнения и вспомогательный электрод.

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

Равновесный потенциал металла в электролите без приложенного тока, выраженный в мВ (относительно электрода сравнения). 3.3 **Поляризационное сопротивление (R_p)**

Отношение изменения потенциала к соответствующему изменению тока, выраженное в $\text{Ом} \cdot \text{см}^2$, используется для оценки скорости коррозии.

3.4 Электрод сравнения

Электрод, обеспечивающий стабильный потенциал сравнения, например, насыщенный каломельный электрод (НКЭ) или электрод Ag/AgCl .

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

Материал : металл или сплав, такой как углеродистая сталь, нержавеющая сталь 304, карбид WC-Co .

Размер : Площадь воздействия $1 \text{ см}^2 \pm 0,1 \text{ см}^2$ или по соглашению.

Количество : Каждая группа экспериментов была повторена 3 раза.

4.2 Обработка образцов

Обработка поверхности : механическая полировка до $Ra \leq 0,8 \text{ мкм}$, промывка дистиллированной водой после очистки и сушка перед использованием.

Монтаж : Вставьте образец в держатель электрода, убедившись, что на открытой поверхности нет пузырьков или загрязнений.

4.3 Электролиты

Раствор : например, 3,5% раствор NaCl (массовая доля), pH 6,5-7,0 или определяется по соглашению.

Чистота : используйте деионизированную воду с проводимостью $\leq 1 \text{ мкСм/см}$.

Температура : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ или согласно протоколу.

4.4 Электрохимическое оборудование

Рабочая станция : с функциями контроля потенциала (точность $\pm 0,1 \text{ мВ}$) и измерения тока (точность $\pm 0,1 \text{ мкА}$).

Система электродов :

Рабочий электрод: образец.

Электрод сравнения: SCE или электрод Ag/AgCl .

Вспомогательный электрод: платиновый или графитовый электрод.

Заземление : убедитесь, что система заземлена, чтобы уменьшить шумовые помехи.

5 Тестовая эксплуатация

5.1 Сборка электрохимической ячейки

Убедитесь, что расстояние между электродами соответствующее (рабочий электрод и электрод сравнения $\leq 5 \text{ мм}$).

Проверьте герметичность, чтобы избежать утечки раствора.

5.2 Начальная устойчивость

Погрузить в электролит на 1 час до тех пор, пока $E_{\text{не исправится}}$ стабилизируется (скорость изменения $< 0,1 \text{ мВ/мин}$).

Запишите начальное E_{corr} .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Процедура измерения

Потенциал разомкнутой цепи (ОСР): запишите изменение E_{corr} , в течение 30 минут.

Сопротивление поляризации: Согласно ASTM G59, диапазон сканирования составляет $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ мВ}$, а скорость составляет $0,166 \text{ мВ/с} \pm 0,002 \text{ мВ/с}$.

Потенциальная динамическая поляризация: Согласно ASTM G5, диапазон сканирования составляет $E_{\text{corr}} \pm 250 \text{ мВ}$, а скорость составляет $0,5 \text{ мВ/с} \pm 0,05 \text{ мВ/с}$.

5.4 Контроль окружающей среды

Избегайте вибрации, колебаний температуры ($\pm 1^\circ\text{C}$) и электромагнитных помех.

6 Анализ данных

6.1 Потенциал коррозии

Возьмите устойчивость Среднее значение E_{corr} , точность $\pm 1 \text{ мВ}$.

6.2 Поляризационное сопротивление

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

精度: $\pm 5\%$.

6.3 Плотность тока коррозии

Формула Штерна-Гиббса:

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (26 mV 或 52 mV, 取决于腐蚀类型), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Точность: $\pm 10\%$.

6.4 Неопределенность

Оцените влияние дрейфа электрода, чистоты раствора и точности прибора с уровнем достоверности 95%.

6.5 Анализ кривых

Постройте кривую зависимости плотности потенциала от тока, чтобы определить пассивные или активные области.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Материал образца и состояние поверхности.

Состав электролита, температура и pH.

Параметры измерения (например, скорость сканирования, диапазон).

E_{corr} , R_p и i_{corr} результаты и неопределенности.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные данные

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

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

Приложение В: Калибровка электрода

Электрод сравнения регулярно калибровался с помощью стандартного раствора с известным потенциалом с погрешностью $\leq \pm 2 \text{ мВ}$.

проиллюстрировать

Связь со смежными стандартами : ASTM G3-14 устанавливает базовую практику для электрохимических испытаний, таких как ASTM G5 и G59, подчеркивая последовательность.

Ограничения : На результаты влияют состав электролита и состояние поверхности образца, поэтому условия должны строго контролироваться.

Срок действия : ASTM G3-14(2024) подтвержден как действительный в 2024 году и может быть обновлен в будущем на основе электрохимической технологии.

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 G5-14 Стандартный
эталонный метод испытаний для проведения потенциодинамических измерений
анодной поляризации**

Обзор

ASTM G5-14 — это стандарт, разработанный Американским обществом по испытаниям и материалам (ASTM International) под названием «Стандартный эталонный метод испытаний для проведения измерений потенциодинамической анодной поляризации». Стандарт был опубликован 1 мая 2014 года, а последняя версия — **ASTM G5-14(2021)**, которая была опубликована 1 июня 2021 года и подтверждена как вступающая в силу в 2023 году. ASTM G5 был разработан комитетом ASTM G01 (Коррозионные металлы) для предоставления лабораторного метода оценки анодного поведения, характеристик пассивации и тенденции к коррозии металлов и сплавов в коррозионных средах с помощью измерений потенциодинамической поляризации. Этот стандарт подходит для изучения механизмов коррозии, скрининга материалов и контроля качества.

1 Область применения

Применимые объекты : Подходит для проверки поведения анодной поляризации металлов и сплавов (таких как сталь, нержавеющая сталь, алюминий, твердые сплавы и т. д.) в растворах электролитов.

Цель: Анализ потенциала коррозии, зоны пассивации и потенциала разрыва путем контроля сканирования потенциала и измерения кривой зависимости плотности тока от потенциала .

Неприменимо : Не подходит для испытаний непроводящих материалов или неэлектрохимической коррозии (например, сухого износа) .

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ASTM G3-14(2024) Стандартная практика подготовки, проведения и анализа лабораторных испытаний на коррозионную стойкость

Стандартный метод испытаний ASTM G59-97(2014): измерение сопротивления потенциодинамической поляризации

Стандартная практика ASTM E691-22: Оценка сопоставимости данных испытаний

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Потенциодинамическая поляризация.

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

Связь между плотностью тока и потенциалом измеряется путем контроля изменения потенциала с постоянной скоростью. 3.2 Потенциал коррозии ($E_{\text{корр}}$)

Равновесный потенциал металла в электролите без приложенного тока, в мВ (относительно электрода сравнения). 3.3 Потенциал пассивации ($E_{\text{проходить}}$)

Потенциал, при котором плотность тока начинает значительно падать после достижения потенциала, в мВ.

3.4 Потенциал пробоя (E_b)

Потенциал, при котором происходит разрушение пассивной пленки, что приводит к резкому увеличению тока, в мВ.

4 Экспериментальная подготовка

4.1 Образец

Материал : металл или сплав, такой как углеродистая сталь, нержавеющая сталь 304, карбид WC-Co.

Размер : Площадь воздействия $1 \text{ см}^2 \pm 0,1 \text{ см}^2$ или по соглашению.

Количество : Каждая группа экспериментов была повторена 3 раза.

4.2 Обработка образцов

Обработка поверхности : механическая полировка до $Ra \leq 0,8 \text{ мкм}$, промывка дистиллированной водой после очистки и сушка перед использованием.

Монтаж : Вставьте образец в держатель электрода, убедившись, что на открытой поверхности нет пузырьков или загрязнений.

4.3 Электролиты

Раствор : например, 3,5% раствор NaCl (массовая доля), pH 6,5-7,0 или определяется по соглашению.

Чистота : используйте деионизированную воду с проводимостью $\leq 1 \text{ мкСм/см}$.

Температура : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ или согласно протоколу.

4.4 Электрохимическое оборудование

Рабочая станция : с функциями контроля потенциала (точность $\pm 0,1 \text{ мВ}$) и измерения тока (точность $\pm 0,1 \text{ мкА}$).

Система электродов :

Рабочий электрод: образец.

Электрод сравнения: насыщенный каломельный электрод (НКЭ) или электрод Ag/AgCl.

Вспомогательный электрод: платиновый или графитовый электрод.

Заземление : убедитесь, что система заземлена, чтобы уменьшить шумовые помехи.

5 методов испытаний

5.1 Процедура испытания

Установите электродную систему, погрузите ее в электролит и стабилизируйте в течение 1 часа до тех пор, пока E не станет стабилизироваться (скорость изменения $< 0,1 \text{ мВ/мин}$).

Запишите начальное $E_{\text{согг.}}$.

$E_{\text{корр.}}$ - 50 мВ и сканирование в анодном направлении до $E_{\text{согг.}} + 1500 \text{ мВ}$ или плотность тока 1 мА/см^2 при скорости сканирования $0,167 \text{ мВ/с} \pm 0,002 \text{ мВ/с}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Запишите кривую зависимости плотности тока от потенциала.

Выгрузите электрод и очистите образец.

5.2 Настройки параметров

Диапазон сканирования : $E_{\text{сог}} - 50 \text{ мВ}$ к $E_{\text{корр.}} + 1500 \text{ мВ}$, или до плотности тока 1 мА/см^2 .

Интервал выборки : $\leq 0,1 \text{ мВ}$.

Контроль окружающей среды : Избегайте вибрации и колебаний температуры ($\pm 1^\circ\text{C}$).

6 Анализ данных

6.1 Ключевой потенциал

$E_{\text{корр.}}$: Запишите начальную точку кривой с точностью $\pm 1 \text{ мВ}$.

E_{pass} : Определить потенциал, при котором плотность тока падает до стабильного значения, с точностью $\pm 5 \text{ мВ}$.

E_b : Определяет потенциал разрыва, при котором ток резко возрастает, с точностью $\pm 5 \text{ мВ}$.

6.2 Плотность тока

Плотность тока в анодной и катодной областях регистрируется в мкА/см^2 с точностью $\pm 1 \text{ мкА/см}^2$.

6.3 Оценка скорости коррозии

Экстраполяция Тафеля : извлечь анодные и катодные наклоны Тафеля из кривой и рассчитать $i_{\text{корр.}}$.

$$i_{\text{сог}} = 10^{\frac{E_{\text{сог}} - a}{b_a} + \log i_a}$$

其中, a и b_a 分别为阴极和阳极塔菲尔常数, i_a 为阳极电流密度。

Точность : $\pm 10\%$.

6.4 Неопределенность

Оцените влияние дрейфа электрода, чистоты раствора и точности прибора с уровнем достоверности 95%.

7 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Материал образца и состояние поверхности.

Состав электролита, температура и pH.

Скорость сканирования, диапазон и $E_{\text{сог}}$ ценить.

$E_{\text{-пасс}}$, $E_{\text{корр}}$ результаты и неопределенности.

Дата испытания, модель оборудования и подпись оператора.

8 Приложение (информационное)

Приложение А: Типичные данные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, E_{pass} 不明显, $E_b = -400 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{pass}} = 0 \text{ mV}$, $E_b = 800 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{pass}} = 100 \text{ mV}$, $E_b = 900 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

Приложение В: Калибровка электрода

Электрод сравнения регулярно калибровался с помощью стандартного раствора с известным потенциалом с погрешностью $\leq \pm 2 \text{ мВ}$.

проиллюстрировать

Ссылки на соответствующие стандарты : ASTM G5-14 используется совместно с ASTM G3 и ASTM G59 для проведения комплексного анализа электрохимической коррозии.

Ограничения : результаты зависят от скорости сканирования и состава электролита и должны быть проверены путем сравнения с реальной средой.

Срок действия : ASTM G5-14(2021) подтвержден как действительный в 2023 году и может быть обновлен в будущем на основе электрохимической технологии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Оглавление

Часть 3: Оптимизация производительности твердого сплава

Глава 8: Коррозия и стойкость к высоким температурам твердого сплава

8.1 Механизм коррозионной стойкости твердого сплава

8.1.1 Электрохимическое поведение карбида вольфрама (WC) и связующей фазы в твердом сплаве

8.1.2 Среда кислотного/солевого тумана из цементированного карбида

8.1.2.1 Принципиальный и технический обзор

8.1.2.2 Механизм и анализ твердого сплава в кислотной/солевой среде

8.1.2.3 Анализ факторов, влияющих на коррозию твердого сплава в кислых и солевых средах

8.1.2.4 Стратегия оптимизации коррозионного воздействия твердого сплава в кислых и солевых средах

8.1.2.5 Инженерное применение твердого сплава в кислых и солевых средах

Советы по карбидной коррозии в этом разделе

(1) Коррозионный путь твердого сплава

(2) Цементированный карбид улучшает защиту поверхности

(3) Плотность границ зерен твердого сплава

(4) Коррозионное напряжение твердого сплава

(5) Точечная коррозия на поверхности твердого сплава

8.2 Высокотемпературные свойства цементированного карбида

8.2.1 Стойкость к окислению твердого сплава (800-1000°C)

8.2.1.1 Обзор принципов и технологий стойкости к окислению твердого сплава

8.2.1.2 Механизм стойкости к окислению и анализ твердого сплава

8.2.1.3 Анализ факторов, влияющих на стойкость к окислению твердого сплава

8.2.1.4 Стратегия оптимизации стойкости к окислению твердого сплава

8.2.1.5 Инженерное применение стойкости к окислению твердого сплава

8.2.2 Термическая усталость и ползучесть твердого сплава

8.2.2.1 Обзор принципов и технологий термической усталости и ползучести твердого сплава

8.2.2.2 Механизм термической усталости и ползучести и анализ твердого сплава

8.2.2.3 Факторы, влияющие на термическую усталость и ползучесть твердого сплава, и их взаимосвязь

8.2.2.4 Стратегии оптимизации термической усталости и ползучести для твердого сплава

8.2.2.5 Инженерное применение термической усталости и оптимизации характеристик ползучести твердого сплава

8.3 Методы оптимизации коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

8.3.1 Преимущества коррозионной стойкости связующей фазы на основе Ni в твердом сплаве

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.1.1 Принципиальный и технический обзор преимуществ коррозионной стойкости связующей фазы из никелевого цементированного карбида

8.3.1.2 Анализ механизма коррозионной стойкости связующей фазы на основе Ni в твердом сплаве

8.3.1.3 Микроскопический анализ и проверка коррозионной стойкости связующей фазы на основе никеля в твердом сплаве

8.3.1.4 Анализ факторов, влияющих на коррозионную стойкость связующей фазы на основе никеля в твердом сплаве

8.3.1.5 Оптимизация процесса приготовления связующей фазы на основе Ni

8.3.1.6 Технические условия испытаний на связующую фазу на основе Ni в твердом сплаве

на основе никеля

8.3.1.9 Инженерные применения связующей фазы из цементированного карбида на основе Ni

сплава на основе никеля

8.3.2 Введение добавок Cr_3C_2 в цементированный карбид

8.3.2.1 Принципиальный и технический обзор введения добавок Cr_3C_2 в твердый сплав

8.3.2.2 Анализ механизма противокислительной и коррозионной стойкости, обеспечиваемого добавками Cr_3C_2 в цементированном карбиде

8.3.2.3 Микроскопический анализ и проверка введения добавок Cr_3C_2 в твердый сплав

8.3.2.4 Анализ факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики добавок карбида Cr_3C_2

8.3.2.5 Оптимизация процесса приготовления твердосплавных добавок Cr_3C_2

8.3.2.6 Пример аддитивной инженерии и сравнение производительности цементированного карбида Cr_3C_2

8.3.2.7 Расширение и ограничения применения добавок Cr_3C_2 в твердом сплаве

8.3.2.8 Направление оптимизации и будущие перспективы введения добавок Cr_3C_2 в цементированный карбид

8.3.3 Защита поверхности твердым сплавом

Обзор принципа и технологии защиты поверхности твердосплавным покрытием

Анализ механизма коррозионной стойкости и стойкости к окислению поверхностного покрытия из цементированного карбида

Микроскопический анализ и проверка поверхностного покрытия из цементированного карбида

Анализ факторов, влияющих на поверхностное покрытие из твердого сплава

8.3.3.6 Оптимизация процесса подготовки защитного покрытия поверхности из твердого сплава

Инженерные примеры и сравнение характеристик покрытий из цементированного карбида

8.3.3.8 Расширение области применения и ограничения покрытий из

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

цементированного карбида

Направление оптимизации и перспективы на будущее поверхностного покрытия из цементированного карбида

8.3.4 Оптимизация параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

8.3.4.1 Обзор принципов и технологий оптимизации параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам цементированных карбидов

8.3.4.2 Анализ коррозионной стойкости и механизма производительности оптимизации параметров процесса обработки твердого сплава

8.3.4.3 Микроскопический анализ и проверка оптимизации параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

8.3.4.4 Анализ факторов, влияющих на оптимизацию параметров процесса коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

8.3.4.5 Стратегия оптимизации параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

8.3.4.6 Инженерные примеры и сравнение производительности оптимизации параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам цементированного карбида

8.3.4.7 Расширение области применения и ограничения оптимизации параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

8.3.4.8 Оптимизация параметров процесса для коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава и перспективы на будущее

8.3.5. Контроль микроструктуры твердого сплава

8.3.5.1 Обзор принципов и технологий контроля микроструктуры твердых сплавов

8.3.5.2 Анализ коррозионной стойкости и механизма регулирования микроструктуры твердого сплава

8.3.5.3 Микроанализ и проверка контроля микроструктуры твердого сплава

8.3.5.4 Анализ факторов, влияющих на микроструктуру твердого сплава

8.3.5.5 Стратегия контроля микроструктуры твердого сплава

8.3.5.6 Инженерный случай контроля микроструктуры твердого сплава и сравнение его характеристик

8.3.5.7 Расширение и ограничения применения контроля микроструктуры твердого сплава

8.3.5.8 Направление и будущие перспективы контроля и оптимизации микроструктуры твердого сплава

8.4 Испытания и оценка коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам твердого сплава

8.4.1 Скорость коррозии цементированного карбида (электрохимическая кривая Тафеля)

8.4.1.2 Механизм и анализ скорости коррозии твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.1.3 Анализ факторов, влияющих на скорость коррозии твердого сплава

8.4.1.4 Метод испытания скорости коррозии твердого сплава

8.4.1.6 Расширение области применения и ограничения скорости коррозии твердого сплава

8.4.1.7 Направление оптимизации и будущие перспективы скорости коррозии твердого сплава

8.4.2 Испытание твердого сплава на высокотемпературную твердость и термический удар

Обзор принципа и технологии испытаний твердого сплава на высокотемпературную твердость и термический удар

Механизм и анализ высокотемпературной твердости и испытания на термоудар цементированного карбида

8.4.2.3 Анализ факторов, влияющих на высокотемпературную твердость и испытание на термоудары твердого сплава

Методы испытаний твердого сплава на высокотемпературную твердость и термический удар

8.4.2.5 Инженерное применение испытаний твердого сплава на высокотемпературную твердость и термический удар

Расширение области применения и ограничения испытаний на высокотемпературную твердость и термический удар цементированного карбида

8.4.2.7 Направление оптимизации и будущие перспективы испытаний твердого сплава на высокотемпературную твердость и термический удар

Ссылки

приложение:

Сравнительный анализ высокотемпературных форм из цементированного карбида и форм из вольфрамового сплава высокой плотности

Сравнительный анализ высокотемпературных форм из цементированного карбида и форм из сплава титана, циркония и молибдена (TZM)

Обзор компонентов газовой турбины из цементированного карбида

Инструменты и детали оборудования для пищевой промышленности из карбида

Карбидное сопло газовой турбины

Твердосплавный химический трубопроводный клапан

Детали оборудования для производства бумаги из карбида

Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 7997-2017

Метод испытания производительности твердого сплава Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 3851-2015 Метод определения микроструктуры твердого сплава Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 3850-2015 Метод определения микроструктуры твердого сплава Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 18376-2014 Метод испытания на ударную усталость твердого сплава Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 7997-2017 Метод испытания производительности твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Международный стандарт ISO 15156-1:2020

Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность — Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа

— **Часть 1: Общие принципы выбора материалов, устойчивых к трещинам. Нефть, нефтехимическая и газовая промышленность — Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа — Часть 1: Общие принципы выбора материалов, устойчивых к растрескиванию**
Международный Стандарт ИСО 15156-2:2020

Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность

— **Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа**

— **Часть 2: Трещиностойкие углеродистые и низколегированные стали, а также применение чугунов**
Нефть

, нефтехимическая и газовая промышленность — Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа

— **Часть 2: Применение углеродистых и низколегированных сталей и чугунов, устойчивых к трещинам**

Международный стандарт ISO 15156-3:2020

Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность

— **Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа**

— **Часть 3: Коррозионностойкие сплавы (CRA), устойчивые к растрескиванию, и другие сплавы**
Нефть

, нефтехимическая и газовая промышленность — Материалы для использования в средах, содержащих H_2S , при добыче нефти и газа

— **Часть 3: Коррозионно-стойкие сплавы (CRA) и другие сплавы, устойчивые к растрескиванию**

Высокотемпературная карбидная форма

CTIA GROUP Карбидный резак для бумаги

ISO 9227:2017 Испытание на коррозию Испытание на стойкость к соляному туману в искусственной атмосфере

Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 18376-2014

Методы испытаний на коррозионную стойкость и износостойкость твердого сплава

Международный стандарт ISO 4287:1997

Геометрические характеристики изделий. Текстура поверхности: Метод профиля.

Термины, определения и параметры текстуры поверхности Геометрические характеристики изделий (GPS)

— **Фактура поверхности: Профильный метод**

— **Термины, определения и параметры фактуры поверхности**

Международный стандарт ISO 3274:1996

Геометрические характеристики изделий. Текстура поверхности: Профилометрия.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Номинальные характеристики контактных приборов Геометрические
характеристики изделий (GPS)

— Фактура поверхности: Профильный метод

— Номинальные характеристики контактных (щуповых) инструментов
ISO 4288:1996

Геометрические характеристики изделий. Текстура поверхности: Метод профиля.
Правила и процедуры оценки текстуры поверхности.

— Фактура поверхности: Профильный метод

— Правила и процедуры оценки фактуры поверхности

Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 12444-2006

Методы испытаний на трение скольжения и износ металлических материалов

Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 16545-2008 Методы
испытаний на коррозию металлических материалов в солевом тумане

Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 3850-2015

Общие указания по коррозионным испытаниям металлов и сплавов Международный
стандарт ISO 8044:2015 Коррозия металлов и сплавов. Основные термины и
определения

Международные стандарты ISO 9223:2012

Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная активность атмосфер. Классификация

GB/T 38512015 Национальный стандарт Китайской Народной Республики

Метод определения микроструктуры твердого сплава

Национальный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 7997-2017 Метод

испытания эксплуатационных характеристик твердого сплава Международный
стандарт ISO 6508 Металлические материалы. Определение твердости по Роквеллу

Металлические материалы. Определение твердости по Роквеллу

Международный стандарт ISO 6508-3:2015

Металлические материалы. Определение твердости по Роквеллу. Часть 3. Калибровка
эталонных образцов

Международный стандарт ISO 6508-1:2016

Металлические материалы. Испытание на твердость по Роквеллу. Часть 1. Метод
испытания

Стандартный метод испытаний ASTM G59 для проведения измерений

потенциодинамического поляризационного сопротивления

Стандартный метод испытаний для определения потенциодинамического
поляризационного сопротивления

ASTM G3-14 Стандартная практика

для соглашений, применимых к электрохимическим измерениям при испытаниях на
коррозионную стойкость

ASTM G5-14 Стандартный

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

эталонный метод испытаний для проведения потенциодинамических измерений
анодной поляризации

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