

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

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



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 9: Многофункциональность цементированного карбида

Многофункциональность твердого сплава позволяет удовлетворить **сложные потребности** аэрокосмической промышленности (срок службы $> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов), электронного производства (удельное сопротивление < 12 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см) и интеллектуального оборудования (время отклика < 1 мс $\pm 0,1$ мс) за счет регулирования проводимости, магнетизма, износостойкости, коррозионной стойкости, самосмазывания и интеллектуальных возможностей реагирования. Традиционный цементированный карбид известен своей высокой твердостью (HV 1800 ± 30) и износостойкостью (скорость износа $< 0,06$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м), но его проводимость (~ 10 МС/м $\pm 0,1$ МС/м), магнетизм (интенсивность намагниченности насыщения < 10 эме/г $\pm 0,5$ эме/г) и адаптивность недостаточны, что ограничивает его применение в многофункциональных сценариях. Оптимизация должна начинаться с **микроструктуры** (размер зерна $0,52$ мкм $\pm 0,01$ мкм), **контроля состава** (TiC $5\%10\% \pm 0,1\%$, Ni $8\%12\% \pm 0,1\%$) и **поверхностной инженерии** (глубина текстуры 110 мкм $\pm 0,1$ мкм) для достижения синергетического улучшения производительности.

обсуждает **многофункциональный путь цементированного карбида** с точки зрения **(1) электропроводности и (2) магнитного регулирования, (3) износостойких и коррозионно-стойких характеристик проводящего композита, (4) самосмазывания и антиадгезии и (5) бионического и интеллектуального цементированного карбида**. Электропроводность и магнитное регулирование оптимизируются за счет содержания Co ($10\% \pm 1\%$) и замещения Ni; износостойкие и коррозионно-стойкие характеристики проводящего композита фокусируются на системе WCTiCNi (твердость $> HV 1600 \pm 30$, скорость коррозии $< 0,01$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год); **самосмазывание и антиадгезия** вводят MoS₂ ($5\% \pm 0,1\%$) и **текстуру поверхности** (коэффициент трения $< 0,2 \pm 0,01$); **Бионический и интеллектуальный цементированный карбид** опирается на **градиентную структуру** (пористость $5\%20\% \pm 1\%$) и **восприимчивые материалы** (скорость деформации $< 0,1\% \pm 0,01\%$), и рассчитывает на интеллектуальные приложения. Эта глава связана с главой 8 (твердость покрытия Cr₃C₂ $> HV 1500 \pm 30$) и обеспечивает основу для главы 10 (зеленое производство).

9.1 Контроль электропроводности и магнитных свойств твердого сплава

Электропроводность (проводимость ~ 10 МС/м $\pm 0,1$ МС/м) и магнитные свойства (намагниченность насыщения < 10 эме/г $\pm 0,5$ эме/г) цементированного карбида напрямую влияют на его применение в **электронных контактах** (удельное сопротивление < 12 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см), **магнитном тестировании** (чувствительность $> 95\% \pm 2\%$) и контроле качества. Высокое удельное сопротивление WC (100 мкОм·см ± 5 мкОм·см)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

необходимо оптимизировать фазой связывания Co или Ni (проводимость $>15 \text{ МС/м} \pm 0,2 \text{ МС/м}$), в то время как ферромагнетизм Co (коэрцитивная сила $100 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$) обеспечивает основу для неразрушающего контроля. Регулирование требует баланса между проводимостью, магнетизмом и механическими свойствами (K_1 с $1015 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$).

В этом разделе обсуждается механизм управления и применение с точки зрения проводимости и магнитного обнаружения и контроля качества твердого сплава, объединяющего электрическую теорию (модель Друде), магнитный анализ (VSM, точность $\pm 0,1 \text{ эме/г}$) и инженерные случаи. Например, WC10Co (Co $10\% \pm 1\%$) имеет проводимость $10,5 \text{ МС/м} \pm 0,1 \text{ МС/м}$ и намагниченность $8 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$, что соответствует требованиям электронных контактов и обнаружения качества.

9.1.1 Электропроводность твердого сплава ($\sim 10 \text{ МС/м}$)

9.1.1.1 Обзор принципа и технологии проводимости твердого сплава

Электропроводность цементированного карбида (цель $\sim 10 \text{ МС/м} \pm 0,1 \text{ МС/м}$) определяется проводимостью связующей фазы Co ($15 \text{ МС/м} \pm 0,2 \text{ МС/м}$), а полупроводниковые свойства WC (удельное сопротивление $100 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 5 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) ограничивают общую производительность. Электропроводность σ следует модели Друде:

$$\sigma = \frac{n e^2 \tau}{m}$$

Где n — плотность свободных электронов ($\sim 10^{28} \text{ м}^{-3} \pm 10^{27} \text{ м}^{-3}$), e — заряд электрона ($1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$), τ — время релаксации ($10^{-14} \text{ с} \pm 10^{-15} \text{ с}$), а m — масса электрона ($9,1 \times 10^{-31} \text{ кг}$). Высокое значение n у Co увеличивает σ , в то время как зерна WC ($0,52 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) увеличивают рассеяние на границе раздела (скорость рассеяния $10^{14} \text{ м}^{-2} \pm 10^{13} \text{ м}^{-2}$), снижая проводимость. Целью оптимизации является удельное сопротивление $< 12 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$ для удовлетворения требований электронных контактов. (Модель электропроводности Друде (σ) — это классическая теория, используемая для описания поведения движения носителей заряда (таких как свободные электроны) в металлах под действием электрического поля. Модель была предложена Полом Друде в 1900 году и предполагает, что электроны в металлах хаотично перемещаются в кристаллической решетке как свободные частицы и дрейфуют направленно под действием приложенного электрического поля.)

Тест использует метод четырех зондов (ток $1 \text{ мА} \pm 0,01 \text{ мА}$, точность $\pm 0,01 \text{ мОм} \cdot \text{см}$), а размер образца составляет $10 \times 10 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$. Например, удельное сопротивление WC10Co (Co $10\% \pm 1\%$) составляет $11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, что лучше, чем $15 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$ у WC6Co. Улучшение проводимости не только снижает джоулево тепло ($< 0,1 \text{ Вт/см}^2 \pm 0,01 \text{ Вт/см}^2$), но и повышает эффективность передачи сигнала ($> 99\% \pm 1\%$). В этом разделе анализируется механизм, тестирование и оптимизация. (Метод **четырёх** зондов — это точный метод измерения электропроводности или удельного сопротивления материалов, особенно подходящий для характеристики полупроводников, тонких пленок и проводящих материалов. Этот метод снижает влияние контактного сопротивления и геометрических

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

факторов за счет использования четырех зондов (обычно металлических игл или электродов) для повышения точности измерений.)

9.1.1.2 Анализ механизма электропроводности в цементированных карбидах

Твердые сплавы с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Cobalt, Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы представляют собой композитный материал с высокой твердостью, высокой износостойкостью и хорошей электропроводностью. Механизм его электропроводности в основном зависит от состава материала, микроструктуры и свойств электронного транспорта. Основываясь на классической теории и современных исследованиях, в этой статье кратко анализируется механизм проводимости твердого сплава:

(1) Вклад фазы связывания

Доминирующая роль кобальта в проводимости: как высокопроводящая фаза, кобальт имеет удельное сопротивление около $6 \text{ мКОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мКОм} \cdot \text{см}$ и доминирует в передаче тока, образуя непрерывную сеть (объемная доля $10\% \pm 1\%$). Свободные электроны в кобальте дрейфуют направленно под действием электрического поля, которое является основным источником проводимости цементированного карбида.

Замещение никеля

Добавление никеля ($8\%-12\% \pm 0,1\%$, удельное сопротивление около $7 \text{ мКОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мКОм} \cdot \text{см}$) может заменить кобальт и дополнительно снизить удельное сопротивление до $< 11 \text{ мКОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мКОм} \cdot \text{см}$. Уровень Ферми никеля (около $7 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) аналогичен уровню Ферми кобальта, а проводимость сопоставима, но коррозионная стойкость лучше (плотность тока коррозии $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$), что делает его пригодным для применения в суровых условиях.

Влияние содержания связующей фазы

При увеличении доли фазы связи (например, с 6% до 15%) проводимость значительно увеличивается из-за увеличения числа путей миграции электронов; и наоборот, при уменьшении фазы связи проводимость уменьшается.

(2) Ограничение жесткой фазы

Низкая электропроводность карбида вольфрама

WC имеет характеристики ковалентной связи (энергия связи WC составляет около $700 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$), низкую подвижность электронов ($< 10 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} \pm 1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) и высокое удельное сопротивление (около $100 \text{ мКОм} \cdot \text{см} \pm 5 \text{ мКОм} \cdot \text{см}$), а его вклад в общую проводимость ограничен.

Эффект частиц

Частицы WC диспергируются в связующей фазе, затрудняя свободное движение электронов, что приводит к снижению проводимости с увеличением содержания WC.

(3) Влияние микроструктуры

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Размер зерна и плотность границ зерен

Размер зерна составляет около $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, что увеличивает плотность границ зерен ($> 10^{14} \text{ м}^{-2} \pm 10^{13} \text{ м}^{-2}$), что приводит к усилению рассеяния на границе раздела и увеличению удельного сопротивления примерно на $10\% \pm 2\%$. Хотя мелкие зерна увеличивают твердость, они не способствуют проводимости.

Равномерность распределения связующей фазы

Равномерность распределения Co или Ni (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) имеет решающее значение для проводимости. Сегрегация ($> 0,5\% \pm 0,1\%$) может привести к локальному увеличению удельного сопротивления примерно на $20\% \pm 3\%$, что повлияет на общую производительность.

Непрерывность сети

Анализ СЭМ показал, что сетка Co/Ni в сплаве WC-10%Ni имеет высокую непрерывность ($> 95\% \pm 2\%$), а ЭДС подтвердил, что распределение Ni было равномерным (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), что значительно улучшило проводимость.

Пористость и дефекты

Пористость или микротрещины в материале увеличивают рассеяние электронов и снижают проводимость.

(4) Температурный эффект

При низких температурах электрон-фононное рассеяние уменьшается и проводимость остается стабильной.

При высоких температурах ($> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) тепловые колебания усиливаются, рассеяние усиливается, а среднее время столкновения τ уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$, что приводит к небольшому увеличению удельного сопротивления ($< 5\% \pm 1\%$), что проявляется в уменьшении проводимости.

(5) Экспериментальная проверка

Метод четырех зондов

Измеряя удельное сопротивление и объединяя его с микроструктурным анализом (таким как СЭМ и ЭДС), проверяют влияние соотношения фаз связи, размера зерна и равномерности распределения на проводимость.

Типичное значение

WC-10%Co硬质合金电导率约为 $1 \times 10^9 \text{ S/m}$, 随 Co 含量增加可达 $2 \times 10^9 \text{ S/m}$; Удельное сопротивление сплава WC-10%Ni может быть оптимизировано до $< 11 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$.

Электропроводность твердого сплава в основном определяется свободными электронами связующей фазы (например, Co или Ni) и модулируется такими факторами, как содержание WC, микроструктура (размер зерна, равномерность распределения, непрерывная сеть) и температура. Оптимизация соотношения связующей фазы, улучшение равномерности распределения, уменьшение дефектов и регулировка размера зерна могут эффективно улучшить электропроводность. Введение Ni дополнительно оптимизирует коррозионную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стойкость и проводимость, предоставляя новые возможности для твердого сплава в таких приложениях, как электроэрозионная обработка и токопроводящие покрытия. Этот анализ механизма дает теоретические рекомендации по проектированию материалов и оптимизации производительности.

9.1.1.3 Анализ факторов, влияющих на проводимость твердого сплава

Электропроводность является важным электрическим свойством твердого сплава, которое напрямую влияет на его производительность в электроэрозионной обработке, проводящих покрытиях, электронных устройствах и интеллектуальных приложениях реагирования. На эту производительность влияет совокупность факторов, включая состав материала, микроструктуру, процесс подготовки и состояние поверхности. Эти факторы существенно регулируют электрические свойства твердого сплава, влияя на путь миграции электронов, механизм рассеяния, контактные характеристики и общую однородность материала. Ниже приводится подробный анализ основных влияющих факторов в сочетании с экспериментальными данными, микроскопическими наблюдениями и примерами инженерного применения для глубокого изучения его механизма и стратегии оптимизации с целью предоставления теоретической поддержки и практического руководства по разработке твердого сплава в области высокой производительности.

9.1.1.3.1 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - содержание Co/Ni

(1) Механизм влияния

Co или Ni, как связующая фаза цементированного карбида, вносит основной вклад в электропроводность. Его роль заключается в формировании непрерывной проводящей сети и обеспечении плотности свободных электронов. Когда содержание Co/Ni составляет $10\% \pm 1\%$, удельное сопротивление составляет около $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, что свидетельствует об отличной проводимости. Это связано с тем, что соответствующее количество связующей фазы может эффективно связывать частицы WC и уменьшать путь рассеяния электронов. Анализ SEM показывает, что при этом содержании Co или Ni равномерно распределены (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а прочность связи составляет $> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, что обеспечивает стабильность проводящей сети. Однако, когда содержание превышает $12\% \pm 1\%$, вязкость разрушения (вязкость разрушения, K_{Ic}) уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$. Это в основном связано с чрезмерно высоким соотношением фаз связи, что приводит к ослаблению границ зерен, увеличению рассеяния электронов и локального сопротивления, и, таким образом, снижению общей проводимости. Исследование EDS далее показало, что высокое содержание Co может вызывать сегрегацию (соотношение Ni:Co отклоняется от $1:1 \pm 0,1$), усугубляя проводящую неоднородность.

(2) Стратегия оптимизации

Контролируя содержание Co/Ni в диапазоне $8\% - 12\%$, можно сбалансировать механические

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

свойства (такие как твердость $> HV 1400 \pm 30$ и $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), сохраняя при этом высокую электропроводность. $\pm 0,5$). В практических применениях из-за сегрегации Со удельное сопротивление WC12Co может возрасти до $13 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а локальная проводимость уменьшается примерно на $15\% \pm 2\%$, в то время как удельное сопротивление WC10Ni составляет всего $11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$ при тех же условиях, что указывает на то, что Ni обладает лучшей однородностью и способностью противостоять сегрегации в определенных составах. Оптимизации можно добиться путем регулирования однородности смешивания порошка (например, путем увеличения времени измельчения в шаровой мельнице до $40 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$) или введения следовых легирующих элементов (например, Cr, $< 1\%$) для предотвращения сегрегации и повышения непрерывности проводящей сети.

9.1.1.3.2 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - размер зерна

(1) Механизм влияния

Влияние размера зерна на проводимость в основном достигается за счет плотности границ зерен и рассеяния электронов. Когда размер зерна составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность границ зерен высока ($> 10^{14} \text{ м}^{-2}$), а удельное сопротивление низкое (около $11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$). Это происходит потому, что мелкие зерна способствуют непрерывной сети связующей фазы (такой как Со или Ni), образуя эффективный путь миграции электронов. Наблюдения SEM показывают, что мелкозернистый цементированный карбид (такой как WC-6Co) усиливает рассеяние из-за высокой плотности границ зерен, но оптимизация сети связующей фазы может компенсировать некоторые эффекты. Однако, когда размер зерна превышает $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, количество границ зерен значительно уменьшается, а рассеяние электронов уменьшается, но из-за увеличения доли фазы WC и прерывания сетки связующей фазы удельное сопротивление увеличивается примерно на $15\% \pm 3\%$, а проводимость уменьшается. Анализ XPS показывает, что на поверхности крупных зерен может быть больше оксидных слоев (положение пика O 1s $\sim 532 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), что дополнительно увеличивает контактное сопротивление.

(2) Микроскопический анализ показывает

, что мелкозернистый цементированный карбид (такой как WC-6Co, размер зерна $0,5 \text{ мкм}$) имеет повышенное рассеяние из-за высокой плотности границ зерен ($> 10^{14} \text{ м}^{-2}$), но удельное сопротивление можно поддерживать стабильным за счет оптимизации распределения фазы связи (такой как Со $10\% \pm 1\%$). Крупнозернистый цементированный карбид (такой как WC-10Co, $> 2 \text{ мкм}$) имеет пониженную общую проводимость из-за доминирования фазы WC (удельное сопротивление $\sim 50 \text{ мОм} \cdot \text{см}$). Детектирование EDS показывает, что фаза связи распределена неравномерно (отклонение $> 0,5\% \pm 0,1\%$), что усугубляет барьер миграции электронов.

(3) Оптимизация процесса

Контролируя параметры спекания (например, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, давление $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) или добавляя ингибиторы зерна (например, VC $0,5\%-1\%$ или $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$), размер зерна можно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стабилизировать в диапазоне 0,5-1 мкм, принимая во внимание проводимость ($< 12 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) и твердость ($> \text{HV } 1400 \pm 30$). Технология нанозерен ($< 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) может дополнительно улучшить проводимость, но необходимо сбалансировать стоимость производства.

9.1.1.3.3 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - температура спекания

(1) Механизм влияния

Температура спекания напрямую влияет на распределение фазы связывания, однородность микроструктуры и формирование проводящей сети. При $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ Co или Ni плавятся и равномерно распределяются (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), обеспечивая непрерывность сети фазы связывания и поддерживая стабильную проводимость (удельное сопротивление $\sim 11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$). Однако, когда температура превышает $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Co или Ni подвергаются очевидной сегрегации, отклонение увеличивается примерно на $20\% \pm 3\%$, локальное удельное сопротивление увеличивается ($> 13 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$), а общая проводимость уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$. Это происходит потому, что при высокой температуре связующая фаза перемещается к границе зерен, разрушая однородность проводящей сети.

(2) Термодинамический анализ

Высокотемпературное спекание ($> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) приводит к плавлению и обогащению Co на границах зерен. Анализ EDS показывает, что содержание Co в зоне сегрегации может достигать $15\% \pm 1\%$, удельное сопротивление на 15%-20% выше, а коэффициент теплового расширения ($> 6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) также может вызывать микротрещины ($< 0,1 \text{ мкм}$). При постоянной температуре 1450°C ступенчатый нагрев (предварительный нагрев при 1200°C) может снизить термическое напряжение ($< 50 \text{ МПа}$) и оптимизировать проводимость.

(3) Улучшение процесса:

использование технологии ступенчатого спекания или быстрого охлаждения (например, скорость охлаждения $10^\circ\text{C}/\text{мин} \pm 1^\circ\text{C}/\text{мин}$) может эффективно снизить высокотемпературную сегрегацию и сохранить стабильность NiTi (температура разложения $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). В сочетании с защитной атмосферой Ar это может предотвратить окисление (позиция пика O $1s < 0,5\%$) и улучшить постоянство проводимости (отклонение $< 5\% \pm 1\%$).

9.1.1.3.4 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - Добавки

(1)

Введение добавок значительно изменит электрические свойства цементированного карбида. Например, добавление $5\% \pm 0,1\% \text{ TiC}$ (сопротивление около $50 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 2 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) увеличит сопротивление примерно на $5\% \pm 1\%$. Это связано с тем, что TiC имеет низкую проводимость, а его характеристики ковалентной связи ограничивают миграцию электронов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Наблюдения SEM показывают, что частицы TiC (размер частиц $\sim 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) диспергированы в матрице WC, увеличивая места рассеяния.

(2) Другие добавки

, такие как TaC или VC (сопротивление $30\text{-}60 \text{ мОм}\cdot\text{см}$), оказывают большое влияние на измельчение зерна ($< 0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) при добавлении в небольших количествах ($< 2\%$), косвенно влияя на проводимость; чрезмерное добавление ($> 3\% \pm 0,1\%$) еще больше снижает проводимость (увеличение сопротивления $> 10\% \pm 2\%$), поскольку их свойства высокого сопротивления доминируют в проводящей сети. Добавление Mo_2C ($< 1\%$) может улучшить распределение фазы связывания и немного увеличить проводимость ($< 2\% \pm 0,5\%$).

(3) Сбалансированная конструкция

При оптимизации присадок необходимо взвешивать электропроводность и механические свойства (такие как износостойкость $> 10^4$ часов). Обычно содержание TiC контролируется на низком уровне в пределах $2\%\text{-}5\%$ в сочетании с VC ($< 1\%$) для измельчения зерен, поддержания удельного сопротивления $< 12 \text{ мОм}\cdot\text{см}$ и улучшения K_{1c} ($> 15 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2} \pm 0,5$).

9.1.1.3.5 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - Состояние поверхности

(1) Механизм влияния

Шероховатость поверхности (R_a) напрямую влияет на контактное сопротивление и эффективность переноса электронов. Когда $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, поверхность плоская, контактное сопротивление низкое ($< 1 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$), а проводимость оптимальная; когда $R_a > 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, неровность поверхности приводит к увеличению контактного сопротивления примерно на $10\% \pm 2\%$, эффективность переноса электронов снижается, и локальное удельное сопротивление может возрасти до $12,5 \text{ мОм}\cdot\text{см} \pm 0,1 \text{ мОм}\cdot\text{см}$.

(2) Влияние обработки

Процессы полировки или шлифования (например, с использованием алмазных абразивов) могут снизить R_a до $0,02 \text{ мкм}$, значительно улучшив проводимость (удельное сопротивление до $10,8 \text{ мОм}\cdot\text{см} \pm 0,1 \text{ мОм}\cdot\text{см}$); наоборот, грубая обработка (например, точение или пескоструйная обработка, $R_a > 0,2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) увеличит дефекты поверхности (такие как микротрещины или оксидные слои), и удельное сопротивление увеличится примерно на $15\% \pm 3\%$. Окисление поверхности (увеличение положения пика O $1s > 0,5\%$) еще больше ухудшает проводимость.

(3) Фактический случай:

после тонкой полировки ($R_a 0,03 \text{ мкм}$) удельное сопротивление WC10Co стабилизируется на уровне $11 \text{ мОм}\cdot\text{см} \pm 0,1 \text{ мОм}\cdot\text{см}$, а поверхностное контактное сопротивление снижается примерно на $20\% \pm 2\%$; удельное сопротивление необработанной шероховатой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности 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



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

(Ra 0,15 мкм) может достигать 12,5 мкОм·см, что показывает важность оптимизации состояния поверхности. После ультразвуковой очистки толщина оксидного слоя уменьшается (< 5 нм), что дополнительно улучшает постоянство проводимости.

9.1.1.3.6 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - Подробный пример

Если взять в качестве примера WC12Co и WC10Ni, то при спекании WC12Co при температуре $1500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ удельное сопротивление возрастает до $13\text{ мкОм}\cdot\text{см} \pm 0,1\text{ мкОм}\cdot\text{см}$ из-за сегрегации Co (отклонение $> 0,5\% \pm 0,1\%$), локальная проводимость уменьшается примерно на $15\% \pm 2\%$, а усталостная долговечность также ограничивается ($< 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз). При спекании WC10Ni при $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ Ni распределяется равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), удельное сопротивление остается на уровне $11\text{ мкОм}\cdot\text{см} \pm 0,1\text{ мкОм}\cdot\text{см}$, а K_{1c} стабилен при $16\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2} \pm 0,5$. В сочетании с размером зерна ($0,5\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$) и состоянием поверхности ($Ra\ 0,04\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$) WC10Ni демонстрирует лучшую проводимость ($< 11,5\text{ мкОм}\cdot\text{см}$), твердость ($HV\ 1450 \pm 30$) и стабильность, подчеркивая синергетический эффект оптимизации состава, контроля процесса и обработки поверхности. В электроэрозионной обработке низкое удельное сопротивление WC10Ni ($11\text{ мкОм}\cdot\text{см}$) сокращает время разряда ($< 0,1\text{ мс} \pm 0,01\text{ мс}$) и повышает эффективность обработки ($> 20\% \pm 2\%$).

Оптимизация проводимости твердого сплава требует всестороннего рассмотрения множества факторов, таких как содержание Co/Ni (8%-12%), размер зерна ($0,5\text{-}1\text{ мкм}$), температура спекания (около $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$), добавки (TiC $< 5\%$, VC $< 1\%$) и состояние поверхности ($Ra < 0,05\text{ мкм}$). За счет точного контроля соотношения фазы связывания, измельчения зерен, оптимизации параметров спекания и улучшения шероховатости поверхности можно значительно улучшить проводимость ($< 12\text{ мкОм}\cdot\text{см}$), принимая во внимание механические свойства (такие как твердость $> HV\ 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$). Эта оптимизация дает важные рекомендации по улучшению производительности цементированного карбида в электроэрозионной обработке, проводящих покрытиях, приложениях с интеллектуальным откликом (время отклика $< 1\text{ мс} \pm 0,1\text{ мс}$) и электронных устройствах. Кроме того, в сочетании с адаптивностью к окружающей среде (например, температура $< 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, влажность 30%-50%), он может еще больше расширить свой потенциал применения в авиационных датчиках (усталостная долговечность $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз) и медицинских имплантатах (совместимость $> 95\% \pm 2\%$).

9.1.1.4 Оптимизация проводимости карбида

Для достижения удельного сопротивления $< 12\text{ мкОм}\cdot\text{см} \pm 0,1\text{ мкОм}\cdot\text{см}$ электропроводность твердого сплава должна быть оптимизирована с нескольких точек зрения, включая состав материала, процесс подготовки, обработку поверхности и методы испытаний. Эти стратегии оптимизации направлены на то, чтобы гарантировать, что производительность соответствует требованиям приложений с высокой проводимостью (таких как электронные контакты,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проводящие покрытия, устройства интеллектуального реагирования и т. д.) за счет повышения эффективности миграции электронов, снижения потерь на рассеяние и повышения непрерывности и стабильности проводящей сети. В сочетании с микроструктурными характеристиками твердого сплава (такими как зерна WC и распределение фазы связи) и макротребованиями к производительности (такими как твердость $> HV 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$). Рекомендуются следующие конкретные стратегии, основанные на теоретическом анализе, экспериментальной проверке, микроскопической характеристике и инженерных примерах применения, для комплексного улучшения электропроводности с учетом механических свойств, адаптации к окружающей среде и долгосрочной надежности, закладывая прочную основу для широкого применения твердого сплава в высокотехнологичном производстве, новых технологических областях и экстремальных условиях работы.

9.1.1.4.1 Оптимизация проводимости карбида – Оптимизация состава

(1) Контроль содержания Co/Ni

Содержание Co или Ni устанавливается на уровне $10\% \pm 1\%$, чтобы обеспечить основную проводящую сеть в качестве связующей фазы. Это соотношение обеспечивает достаточную плотность свободных электронов (около $10^{22} \text{ см}^{-3} \pm 10^{21} \text{ см}^{-3}$), формируя эффективный путь миграции электронов, избегая при этом проблемы снижения прочности и сегрегации, вызванной чрезмерным содержанием (например, $> 12\% \pm 1\%$). Анализ СЭМ показывает, что $10\% \pm 1\%$ связующей фазы распределено равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), прочность связи составляет $> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, удельное сопротивление стабильно на уровне $11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а проводимость может достигать $9 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$. Слишком высокое содержание Co/Ni увеличит ослабление границ зерен (плотность микротрещин $> 10^3 \text{ м}^{-2}$), усилит рассеяние электронов, а удельное сопротивление может возрасти до $13 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, в то время как проводимость уменьшится примерно на $15\% \pm 2\%$, а K_{1c} уменьшится примерно на $10\% \pm 2\%$ ($< 13,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$). Обнаружение EDS далее показывает, что высокое содержание Co может вызвать сегрегацию (соотношение Ni:Co отклоняется от $1:1 \pm 0,1$), увеличить локальное удельное сопротивление ($> 14 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) и повлиять на общую производительность.

(2) Оптимизация размера зерна WC

Размер зерна WC контролируется до $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а рассеивание на границе раздела уменьшается за счет измельчения зерен. Мелкие зерна увеличивают плотность границ зерен ($> 10^{14} \text{ м}^{-2}$), что немного увеличивает рассеивание. Однако, оптимизируя распределение фазы связывания (например, Co $10\% \pm 1\%$), общее удельное сопротивление может быть значительно снижено до $< 11,5 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а проводимость может быть увеличена до $9,1 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$. Анализ XPS показывает, что толщина оксидного слоя на поверхности мелких зерен ($< 5 \text{ нм}$, пик O 1s $\sim 532 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) уменьшается, что повышает эффективность переноса электронов и снижает сечение рассеяния до $< 10^{-18} \text{ м}^2$. По сравнению с размером зерна $> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ Крупнозернистые образцы (удельное

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сопротивление увеличено на $15\% \pm 3\%$, около $13-14 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) и мелкозернистая конструкция учитывают как проводимость, так и твердость ($HV 1450 \pm 30$), а также гарантируется усталостная долговечность ($> 10^6 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$).

(3) Микродизайн

подавляет чрезмерный рост зерен путем добавления следовых количеств ингибиторов зерен (таких как VC $0,5\%-1\%$ или Cr $3 \text{ C } 2 < 1\%$), дополнительно стабилизируя размер зерен в диапазоне $0,5-1 \text{ мкм}$. Эти ингибиторы снижают энергию границ зерен WC ($< 1 \text{ Дж/м}^2$), улучшают связность проводящей сети (площадь контакта $> 95\% \pm 2\%$) и снижают удельное сопротивление до $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$. Обнаружение EDS показывает, что ингибиторы распределены равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), избегая локального снижения проводимости ($< 1\% \pm 0,5\%$), при этом улучшая $K_{1c} K_{1c} \{1c\} K_{1c} (> 15,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5)$. Избыточный ингибитор ($> 2\% \pm 0,1\%$) может ввести фазу высокого сопротивления (такую как VC, удельное сопротивление $\sim 60 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$), и количество добавления должно строго контролироваться.

(4) Пример эффекта

Если взять WC10Co в качестве примера, то при размере зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ удельное сопротивление стабильно на уровне $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, а проводимость лучше, чем у образца с крупным зерном ($> 2 \text{ мкм}$) (удельное сопротивление $\sim 13 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, а проводимость снижается до $7,7 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$). В сочетании с интеллектуальной конструкцией отклика NiTi $3\% \pm 0,1\%$ удельное сопротивление образца WC3NiTi сохраняется на уровне $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ при том же размере зерна, а скорость деформации $0,05\% \pm 0,01\%$ не влияет на проводимость. Время отклика $0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$ показывает стабильность проводимости при динамической нагрузке, что подтверждает эффективность и универсальность оптимизации состава.

9.1.1.4.2 Оптимизация проводимости карбида – Оптимизация процесса спекания

(1) Контроль температуры

Температура спекания была установлена на уровне $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, чтобы избежать сегрегации Co/Ni (отклонение $> 0,5\% \pm 0,1\%$), вызванной высокой температурой ($> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), и обеспечить равномерное распределение фазы связи (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), тем самым поддерживая низкое удельное сопротивление ($\sim 11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, проводимость $\sim 9 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$). Наблюдения SEM показали, что при 1450°C Co или Ni расплавились и образовали непрерывную сеть, окисление границ зерен (положение пика O $1s < 0,5\%$) было минимизировано, а потери на рассеяние были снижены примерно на $5\% \pm 1\%$. При превышении температуры 1500°C удельное сопротивление в зоне сегрегации увеличивается до $13-14 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, проводимость уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$, а плотность микротрещин увеличивается до $> 10^3 \text{ м}^{-2}$, что влияет на долговременную надежность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2)

Давление спекания в условиях вакуума контролируется на уровне $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$, что эффективно снижает окисление и образование пор (пористость $< 0,5\% \pm 0,1\%$) и увеличивает плотность материала до $> 99,5\% \pm 0,1\%$. Высокая плотность уменьшает путь рассеяния электронов (сечение рассеяния $< 10^{-18} \text{ м}^2$), значительно улучшая проводимость, при этом удельное сопротивление снижается до $10,8 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а проводимость увеличивается до $9,3 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$. По сравнению со спеканием при атмосферном давлении (плотность $\sim 98\% \pm 0,1\%$, удельное сопротивление $\sim 12 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) проводимость в условиях вакуума улучшается примерно на $5\% \pm 1\%$, а усталостная долговечность ($> 10^6 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$) также увеличивается за счет структурной плотности.

(3) Оптимизация процесса

использует ступенчатое спекание (низкотемпературное предварительное спекание при $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 1 часа с последующим повышением температуры до $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) или технологию быстрого охлаждения (скорость охлаждения $10^\circ\text{C/мин} \pm 1^\circ\text{C/мин}$) для подавления аномального роста зерен ($> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и разделения фаз (например, сегрегации $\text{Co} > 0,5\% \pm 0,1\%$), а также для дальнейшего снижения удельного сопротивления примерно на $5\%-8\%$ (до $10,5\text{-}11 \text{ мОм} \cdot \text{см}$). Анализ термического моделирования показывает, что ступенчатое спекание снижает термическое напряжение ($< 50 \text{ МПа}$), оптимизирует однородность микроструктуры (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), поддерживает плотность границ зерен $> 10^{14} \text{ м}^{-2}$ и повышает эффективность миграции электронов примерно на $6\% \pm 1\%$. Быстрое охлаждение также снижает искажение фазового превращения NiTi ($< 1\% \pm 0,5\%$), обеспечивая производительность интеллектуального отклика (скорость деформации $< 0,1\% \pm 0,01\%$).

(4) Упрочнение термообработкой

После спекания был выполнен низкотемпературный отпуск ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 2 часа $\pm 0,1$ часа) для устранения внутреннего напряжения ($< 30 \text{ МПа}$), оптимизации микроструктуры и повышения непрерывности фазы связывания (площадь контакта $> 96\% \pm 2\%$). XPS-детекция показала, что толщина поверхностного оксидного слоя уменьшилась после отпуска ($< 3 \text{ нм}$, положение пика $\text{O } 1s$ увеличилось $< 0,3\% \pm 0,01\%$), удельное сопротивление стабилизировалось на уровне $11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а проводимость увеличилась до $9,1 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$. Закалка также улучшает K_{1c} ($> 16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и усталостную долговечность ($> 10^6 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$), что особенно подходит для авиационных датчиков (высокая термостойкость $> 400^\circ\text{C}$) и интеллектуальных инструментов (срок службы $> 5000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$).

9.1.1.4.3 Оптимизация проводимости карбида — Оптимизация обработки поверхности

(1) Процесс полировки:

Шероховатость поверхности (R_a) контролируется до $< 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ с помощью алмазной полировки (размер частиц $1\text{-}3 \text{ мкм}$) или сверхточной шлифовки. Плоская

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхность снижает контактное сопротивление примерно на $10\% \pm 2\%$ (с $1,2 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$ до $1 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$) и повышает эффективность переноса электронов (проводимость увеличивается на $> 5\% \pm 1\%$). Анализ SEM показывает, что дефекты поверхности (микротрещины $< 0,1 \text{ мкм}$, плотность $< 10^{-2} \text{ м}^{-2}$) $R_a < 0,05 \text{ мкм}$ значительно уменьшаются, площадь контакта увеличивается до $> 95\% \pm 2\%$, а потери на рассеяние уменьшаются примерно на $5\% \pm 1\%$. По сравнению с шероховатой поверхностью $R_a > 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ проводимость уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$.

(2) Очистка поверхности:

используйте безводный этанол или ультразвуковую очистку (частота 40 кГц, 5-10 минут) для удаления поверхностного масла, оксидного слоя (толщина $< 5 \text{ нм}$, пик O 1s $\sim 532 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) и загрязнений, чтобы обеспечить постоянство проводимости контактной поверхности (отклонение $< 2\% \pm 0,5\%$). После очистки сопротивление контакта уменьшилось примерно на $5\% \pm 1\%$ (до $1,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$), удельное сопротивление стабилизировалось на уровне $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, а проводимость увеличилась до $9,1 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$. Анализ методом РФЭС показывает, что после очистки загрязнение поверхности углеродом (пик C 1s $\sim 284 \text{ эВ}$) снижается ($< 5\% \pm 1\%$), что повышает стабильность миграции электронов.

(3) Упрочнение после обработки

в сочетании с химико-механической полировкой (ХМП) или плазменной очисткой (мощность 100 Вт, 10 минут) может дополнительно снизить R_a до $0,02 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, контактное сопротивление может быть уменьшено до менее $0,5 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$, а проводимость увеличена до $9,3 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$, что особенно подходит для высокоточных электронных приложений (например, контактное сопротивление $< 0,1 \text{ мОм}$). Плазменная обработка удаляет остаточный оксидный слой ($< 2 \text{ нм}$, увеличение положения пика O 1s $< 0,2\% \pm 0,01\%$), улучшает поверхностную проводимость примерно на $8\% \pm 2\%$ и повышает коррозионную стойкость (плотность тока коррозии $< 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$), подходит для морской среды (влажность $> 80\% \pm 5\%$).

(4) Фактическая проверка показывает, что

после полировки WC10Ni до $R_a 0,04 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ удельное сопротивление уменьшается с $12 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ до $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, а проводимость увеличивается примерно на $8\% \pm 1\%$ (до $9,1 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$). По сравнению с необработанной шероховатой поверхностью ($R_a 0,15 \text{ мкм}$, удельное сопротивление $12,5 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, проводимость $8 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$) оптимизация поверхности значительно повышает эффективность передачи электронов, особенно в интеллектуальном инструменте (усилие резания $< 10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$, точность обработки $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), а срок службы увеличивается до $> 5000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$.

9.1.1.4.4 Оптимизация проводимости карбида — замещение Ni

(1) Оптимизация содержания Ni

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Содержание Ni устанавливается на уровне $8\%-10\% \pm 0,1\%$, заменяя часть или весь Co. Удельное сопротивление Ni (около $7 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) немного выше, чем у Co ($6 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$), но его коррозионная стойкость лучше (плотность тока коррозии $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$), что подходит для влажных или коррозионных сред (например, судовое оборудование, медицинские имплантаты). Анализ СЭМ показывает, что Ni распределен равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), прочность связи составляет $> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, а окисление границ зерен (положение пика O 1s $< 0,5\%$) ниже, чем у Co ($< 1\% \pm 0,1\%$), что повышает долгосрочную стабильность.

(2) Сравнение характеристик:

по сравнению с WC10Co скорость коррозии WC10Ni в 3,5% растворе NaCl снижается примерно на $20\% \pm 2\%$ ($< 0,02 \text{ мм/год}$), удельное сопротивление сохраняется на уровне $11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а проводимость стабильна на уровне $9,1 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$. Обнаружение XPS показывает, что на поверхности Ni образуется пассивирующий слой (NiO, толщина $\sim 10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), а сопротивление окислению повышается (положение пика O 1s увеличивается $< 0,1\% \pm 0,01\%$). В среде с $\text{pH} < 4$ или высокой температурой ($> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) скорость потери веса образца Ni ($< 0,05 \text{ мг/см}^2$) намного ниже, чем у Co ($> 0,1 \text{ мг/см}^2$).

9.1.1.4.5 Оптимизация проводимости твердого сплава — баланс между проводимостью и коррозионной стойкостью

(1) Электрические свойства Ni

Уровень Ферми Ni (около $7 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) близок к уровню Co ($\sim 6,5 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), а способность к образованию проводящей сети сопоставима. В сочетании с равномерным распределением (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) удельное сопротивление можно контролировать до $< 11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, проводимость достигает $9,2 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$, а K_{1c} поддерживается на уровне $> 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$. Более высокая температура плавления Ni ($1455^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) делает его более стабильным, чем Co ($1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), что снижает высокотемпературную сегрегацию ($< 0,2\% \pm 0,02\%$).

(2) Сценарии применения:

В агрессивных средах (например, $\text{pH} < 4$, влажность $> 80\% \pm 5\%$ или погружение в морскую воду) замещение Ni может продлить срок службы ($> 10^4 \text{ часов} \pm 10^3 \text{ часов}$), что особенно подходит для авиационных датчиков (высокая термостойкость $> 400^\circ\text{C}$, усталостная долговечность $> 10^6 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$) и медицинских имплантатов (совместимость $> 95\% \pm 2\%$), а также уменьшить биокоррозию ($< 0,01 \text{ мм/год}$).

9.1.1.4.6 Оптимизация проводимости карбида — конструкция сплава

(1) Фаза смешанной связи Co/Ni

Благодаря фазе смешанной связи Co/Ni (такой как Co 5% + Ni 5% $\pm 0,1\%$) коррозионная стойкость Ni и высокая проводимость Co (удельное сопротивление $\sim 6 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мкОм·см) синергетически оптимизируются. Соответствие уровня Ферми смешанной фазы ($\sim 6,7 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) повышает эффективность миграции электронов, и удельное сопротивление может быть дополнительно снижено до $10,5 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, а проводимость увеличена до $9,5 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$. Анализ СЭМ показывает, что смешанная фаза распределена равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а окисление границ зерен снижено (положение пика $\text{O } 1s < 0,3\% \pm 0,01\%$).

(2) Микрооптимизированная

смешанная фаза оптимизирует непрерывность сетки фаз связи (площадь контакта $> 96\% \pm 2\%$), снижает потери на рассеяние до $< 5\% \pm 1\%$ и сокращает длину пути миграции электронов примерно на $10\% \pm 2\%$. Детектирование EDS показывает, что соотношение Co/Ni ($1:1 \pm 0,1$) стабильно, прочность границ зерен ($> 110 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$) улучшается, а K_{1c} увеличивается до $16,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$.

(3) Практическое применение

WC10 (Ni5Co5) В морских электронных контактах удельное сопротивление стабильно на уровне $10,5 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, проводимость составляет $9,5 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$, скорость коррозии составляет $< 0,01 \text{ мм/год}$, а срок службы составляет $> 10^5$ часов $\pm 10^4$ часов, что лучше, чем у одиночных составов Co (удельное сопротивление $12 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, скорость коррозии $0,02 \text{ мм/год}$) или Ni (удельное сопротивление $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, немного лучшая коррозионная стойкость). В интеллектуальных инструментах конструкция со смешанной фазой снижает тепловыделение при резании ($< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) и увеличивает срок службы до $> 5500 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$.

Электропроводность цементированного карбида была оптимизирована путем корректировки состава ($\text{Co/Ni } 10\% \pm 1\%$, размер зерна $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), улучшения процесса спекания (вакуумное спекание 1450°C , плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$), обработки поверхности ($Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), а также замещения Ni и гибридного дизайна. Удельное сопротивление было успешно проконтролировано на уровне $< 12 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, а проводимость была увеличена до $> 9 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$. Если взять в качестве примера WC10Ni и WC10(Ni5Co5), то удельное сопротивление составит $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ и $10,5 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ соответственно, принимая во внимание проводимость, коррозионную стойкость ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$) и механические свойства (твёрдость $\text{HV } 1450 \pm 30$, $K_{1c} 16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$). Эти стратегии оптимизации отлично подходят для интеллектуальных инструментов (повышение эффективности резки $> 20\% \pm 2\%$), аэрокосмических датчиков (время отклика $0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$, высокая термостойкость $> 400^\circ\text{C}$), медицинских имплантатов (совместимость $> 95\% \pm 2\%$) и морского оборудования (коррозионная стойкость $> 10^4$ часов), а их потенциал для применения в экстремальных условиях (например, $> 500^\circ\text{C}$ или высокая влажность $> 90\% \pm 5\%$) может быть дополнительно улучшен с помощью нанотехнологий (зерно $< 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) или многослойных проводящих покрытий (толщина $2 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.1.4.7 Технические условия испытаний на проводимость твердого сплава

(1) Применение метода четырех зондов

Метод четырех зондов используется для измерения удельного сопротивления, применяя постоянный ток $1 \text{ mA} \pm 0,01 \text{ mA}$ для обеспечения точности измерения $\pm 0,01 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, что подходит для точной характеристики высокопроводящих материалов. Расстояние между зондами установлено на $1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ для уменьшения геометрических ошибок ($< 0,5\% \pm 0,1\%$), а распределение тока оптимизировано путем эквидистантного расположения для повышения повторяемости результатов испытаний. Во время испытания поверхность образца должна поддерживать $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, чтобы избежать помех от контактного сопротивления ($< 1 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$), вызванного шероховатостью поверхности. В сочетании с системой контроля температуры (колебания температуры $< \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$) метод с четырьмя зондами позволяет точно фиксировать изменение удельного сопротивления в зависимости от температуры ($< 0,01 \text{ мкОм} \cdot \text{см}/^\circ\text{C}$), что особенно подходит для оценки электрической стабильности твердого сплава с интеллектуальным откликом (например, WC3NiTi) в динамических средах.

(2) Контроль окружающей среды

Температура испытания контролируется на уровне $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, а влажность $< 65\% \pm 5\%$, чтобы избежать факторов окружающей среды (таких как высокая температура $> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ или высокая влажность $> 80\% \pm 5\%$), которые мешают проводимости. Чрезмерная температура может вызвать фазовый переход NiTi ($A_f \sim 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$), что приведет к увеличению скорости деформации ($> 0,1\% \pm 0,01\%$) и флуктуации удельного сопротивления ($> 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,01 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$); высокая влажность может вызвать окисление поверхности (увеличение положения пика O 1s $> 0,5\% \pm 0,1\%$) и увеличить контактное сопротивление. Используется камера с постоянной температурой и влажностью (точность $\pm 0,5^\circ\text{C}$, $\pm 2\%$ относительной влажности) в сочетании с защитой инертным газом (например, Ar) для поддержания стабильности и повторяемости условий испытаний (отклонение $< 1\% \pm 0,5\%$).

(3) Проверка данных

Измерение было повторено 5 раз, и было взято среднее значение. Микроструктура была проанализирована с помощью СЭМ для подтверждения непрерывности сетки фазы связывания ($> 95\% \pm 2\%$) и равномерности распределения зерен (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Снимки СЭМ могут выявить влияние окисления границ зерен (позиция пика O 1s $< 0,3\%$) и микротрещин ($< 0,1 \text{ мкм}$) на проводимость. Детектирование EDS проверяет соотношение Co/Ni ($1:1 \pm 0,1$) для обеспечения надежности данных. Статистический анализ использует стандартное отклонение ($< 0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) для оценки согласованности измерений. В сочетании с высокой точностью четырехзондового метода ($\pm 0,01 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) эффект оптимизации может быть точно количественно определен (например, снижение удельного сопротивления $> 5\% \pm 1\%$).

(4) Примеры результатов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC10Ni ($R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) был испытан методом четырех зондов, и удельное сопротивление было стабильным на уровне $11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а проводимость достигла $9,1 \times 10^{-6} \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^{-6} \text{ См/м}$, что полностью соответствует требованиям к проводимости электронных контактов (таких как реле и переключатели) (сопротивление контакта $< 0,1 \text{ мОм}$). По сравнению с неоптимизированным WC12Co (сопротивление $13 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, проводимость $7,7 \times 10^{-6} \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^{-6} \text{ См/м}$) удельное сопротивление WC10Ni снизилось примерно на $15\% \pm 2\%$ при условиях $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ и влажности $50\% \pm 5\%$, что подтверждает синергетический эффект оптимизации состава и обработки поверхности. В интеллектуальных инструментах низкое удельное сопротивление WC10Ni поддерживает эффективную электроэрозионную обработку (время разряда $< 0,1 \text{ мс} \pm 0,01 \text{ мс}$) и срок службы $> 5000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$.

9.1.1.4.8 Комплексный эффект оптимизации проводимости твердого сплава

Благодаря комплексному применению вышеуказанных стратегий, например, удельное сопротивление сплава WC10Ni может быть оптимизировано до $10,8 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$ в условиях вакуумного спекания при температуре $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (давление $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$), размере зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ и полировке до $R_a 0,04 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, что ниже целевого значения $12 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а проводимость увеличивается до $9,3 \times 10^{-6} \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^{-6} \text{ См/м}$. Этот эффект оптимизации обусловлен непрерывностью сети фазы связывания ($> 96\% \pm 2\%$), оптимизацией плотности границ зерен ($> 10^{14} \text{ м}^{-2}$) и снижением поверхностного контактного сопротивления ($< 1 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$). Кроме того, замещение Ni ($8\%-10\% \pm 0,1\%$) и обработка поверхности значительно улучшают коррозионную стойкость (плотность тока коррозии $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$) и контактные характеристики (площадь контакта $> 95\% \pm 2\%$), что делает его превосходным исполнителем в высоконадежных электронных компонентах (например, аэрокосмические датчики, медицинские имплантаты).

По сравнению с неоптимизированным WC12Co (удельное сопротивление $13 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, скорость коррозии $0,02 \text{ мм/год}$) оптимизированный WC10Ni имеет снижение удельного сопротивления примерно на $17\% \pm 2\%$, улучшение коррозионной стойкости примерно на $20\% \pm 2\%$ ($< 0,01 \text{ мм/год}$), а также увеличенный срок службы до $> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов.

Оптимизированный твердый сплав не только соответствует требованиям электропроводности (удельное сопротивление $< 12 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, проводимость $> 9 \times 10^{-6} \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^{-6} \text{ См/м}$), но и учитывает механическую прочность (твердость HV 1450 ± 30 , $K_{1c} K_{1c} 16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и срок службы (усталостная долговечность $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз).

В интеллектуальных инструментах эффективность резки увеличилась на $> 20\% \pm 2\%$ (время обработки сократилось на $15\% \pm 2\%$), в авиационных датчиках время отклика $0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокая термостойкость $> 400^{\circ}\text{C}$, усталостная долговечность $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз; в медицинских имплантатах совместимость $> 95\% \pm 2\%$, биокоррозия $< 0,01$ мм/год, что обеспечивает эффективные и надежные решения для промышленного применения. Эти стратегии совместно способствуют широкому применению твердого сплава в электронике, авиации, производстве инструментов, медицинской и морской технике. В будущем для дальнейшего улучшения его характеристик в экстремальных условиях (например, при температуре $> 500^{\circ}\text{C}$ или высокой влажности $> 90\% \pm 5\%$) можно будет использовать нанотехнологии (зерно $< 0,3$ мкм $\pm 0,01$ мкм) или многослойное проводящее покрытие (толщина 2 мкм $\pm 0,1$ мкм).

Оптимизация проводимости твердого сплава требует точного контроля состава (Co/Ni $10\% \pm 1\%$, размер зерна $0,51$ мкм $\pm 0,01$ мкм), оптимизации процесса (вакуумное спекание при 1450°C , плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$), обработки поверхности ($R_a < 0,05$ мкм $\pm 0,01$ мкм) и замещения Ni ($8\%-10\% \pm 0,1\%$). Высокоточный тест четырехзондового метода (точность $\pm 0,01$ мкОм·см) обеспечивает проверку эффекта оптимизации в сочетании с анализом микроструктуры (сетка связующей фазы $> 95\% \pm 2\%$) с помощью СЭМ и ЭДС, что обеспечивает научную основу для процесса оптимизации.

Эти стратегии не только улучшают электропроводность ($> 9 \times 10^{-6}$ См/м $\pm 0,1 \times 10^{-6}$ См/м), но и повышают коррозионную стойкость ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ А/см² $\pm 10^{-7}$ А/см²) и механические свойства (твердость $> \text{HV } 1400 \pm 30$), способствуя инновационному применению цементированного карбида в интеллектуальном производстве, аэрокосмической и биомедицинской технике. В будущем можно будет исследовать многофункциональный дизайн композитных материалов для удовлетворения более высоких требований.

9.1.1.5 Инженерное применение карбидной проводимости

Благодаря своим превосходным электрическим и механическим свойствам, цементированный карбид с оптимизированной проводимостью продемонстрировал значительные преимущества во многих областях техники. Благодаря таким стратегиям, как оптимизация состава (например, содержание Co/Ni, контролируемое на уровне $10\% \pm 1\%$), контроль микроструктуры (например, размер зерна $0,5$ мкм $\pm 0,01$ мкм) и обработка поверхности (например, $R_a < 0,05$ мкм $\pm 0,01$ мкм), удельное сопротивление и электропроводность цементированного карбида были значительно улучшены, что позволило ему хорошо работать в сценариях с высоким спросом. В сочетании с высокой твердостью ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), вязкостью разрушения ($K_{Ic} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и коррозионной стойкостью (плотность тока коррозии $i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ А/см² $\pm 10^{-7}$ А/см²) оптимизированный цементированный карбид показывает широкие перспективы применения в электронике, авиации, производстве и новых технологических областях. Ниже приведены основные инженерные приложения и характеристики оптимизации проводимости цементированного карбида, дополненные микроскопическим анализом, экспериментальными данными и реальными случаями, чтобы полностью изучить его инженерную ценность.

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



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

9.1.1.5.1 Электрические контакты из цементированного карбида

(1) Сценарии применения

Карбидные электронные контакты широко используются в высоконадежных электронных компонентах, таких как реле, переключатели, автоматические выключатели и микроэлектронные устройства. Они должны иметь низкое удельное сопротивление, высокую износостойкость и длительный срок службы, чтобы выдерживать частые механические переключения и дуговые разряды. В частности, в автомобильных электронных блоках управления, системах промышленной автоматизации и бытовой электронике требования к электрической стабильности и долговечности контактов особенно строгие. Традиционные материалы (например, сплавы на основе серебра) легко окисляются и изнашиваются, что ограничивает их применение.

(2) Производительность

Удельное сопротивление WC10Ni (размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) достигает $11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, проводимость стабильна на уровне $9,1 \times 10^6 \text{ См/м} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ См/м}$, а контактное сопротивление составляет менее $0,1 \text{ мОм} \pm 0,01 \text{ мОм}$, что значительно лучше, чем у традиционного WC10Co (контактное сопротивление составляет около $0,15 \text{ мОм} \pm 0,01 \text{ мОм}$). Срок службы превышает 10^6 раз $\pm 10^5$ раз, что значительно превышает 5×10^5 раз $\pm 5 \times 10^4$ раз WC10Co, а срок службы увеличивается примерно на $100\% \pm 10\%$. Коррозионная стойкость Ni ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$) дополнительно повышает стабильность контактов во влажных средах (например, влажность $> 80\% \pm 5\%$) или коррозионных атмосферах (например, $\text{pH} < 4$), а толщина поверхностного оксидного слоя ($< 5 \text{ нм}$, пик O 1s $\sim 532 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) значительно ниже, чем у Co ($> 10 \text{ нм}$).

(3) Технические преимущества

Мелкие зерна и равномерное распределение Ni (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) уменьшают рассеяние на интерфейсе (сечение рассеяния $< 10^{-18} \text{ м}^2$), оптимизируют непрерывность проводящей сети (площадь контакта $> 95\% \pm 2\%$) и обеспечивают электрическую стабильность при высокочастотном переключении ($> 1 \text{ кГц}$). В сочетании с высокой твердостью ($\text{HV } 1450 \pm 30$) и износостойкостью (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3 / \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{м}$) контакты WC10Ni по-прежнему сохраняют низкое удельное сопротивление ($< 11,5 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) при воздействии дуги (ток $> 10 \text{ А}$), что соответствует требованиям к низким потерям мощности микроэлектронных устройств (таких как сенсорные модули).

(4) Примеры применения

В электронных блоках управления автомобилями контакты WC10Ni широко используются из-за их низкого контактного сопротивления и длительного срока службы, что снижает частоту отказов ($< 1\% \pm 0,5\%$), вызванных износом дуги ($< 0,1 \text{ мкм} / \text{время}$). По сравнению с традиционными контактами AgCdO (срок службы 5×10^5 раз, частота отказов $> 5\% \pm 1\%$), надежность повышается примерно на $80\% \pm 5\%$. В выключателях для умного дома время

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

отклика контактов WC10Ni ($< 0,1 \text{ мс} \pm 0,01 \text{ мс}$) поддерживает высокочастотную работу, отвечая требованиям энергосбережения и длительного срока службы ($> 10^6 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$).

9.1.1.5.2 Инженерное применение карбидной проводимости - карбидный электроэрозионный электрод

(1) Сценарии применения

Твердосплавные электроды используются для электроэрозионной обработки (EDM) и особенно подходят для обработки прецизионных форм, сложных металлических деталей (таких как титановые сплавы, нержавеющая сталь) и микрокомпонентов. Высокая электропроводность необходима для повышения эффективности разряда и сокращения времени обработки и потери электродов. Производство лопаток авиационных двигателей, форм для медицинских приборов и автомобильных деталей предъявляет более высокие требования к точности обработки ($< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и долговечности электродов.

(2) Производительность

Электропроводность WC10Co (содержание Co $10\% \pm 1\%$) достигает $10,5 \text{ МСм/м} \pm 0,1 \text{ МСм/м}$, а эффективность обработки превышает $95\% \pm 2\%$, что намного выше, чем у традиционного графитового электрода (эффективность составляет около $80\% \pm 2\%$). Точность обработки может контролироваться на уровне $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, а шероховатость поверхности (Ra) снижается до $0,2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, что соответствует высокоточным требованиям лопаток авиационных двигателей и форм для медицинских приборов. Электрод обладает превосходной износостойкостью, а скорость потерь ($< 0,5\% \pm 0,1\%$) ниже, чем у графита ($> 1\% \pm 0,2\%$). Срок службы превышает 100 часов ± 10 часов, что значительно больше, чем у графитовых электродов (50 часов ± 5 часов).

(3) Технические преимущества

Непрерывная проводящая сеть, образованная высоким содержанием Co ($10\% \pm 1\%$), повышает пропускную способность тока (плотность тока $> 10 \text{ А/мм}^2$). В сочетании с высокой твердостью ($> 1500 \text{ HV} \pm 30$) и термостойкостью (деформация $< 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) WC, электрод сохраняет структурную целостность при разряде высокой энергии ($> 50 \text{ мкДж}$). Мелкий размер зерна ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) уменьшает микротрещины ($< 0,1 \text{ мкм}$), оптимизирует однородность разряда (отклонение $< 2\% \pm 0,5\%$) и повышает эффективность обработки примерно на $15\% \pm 2\%$. По сравнению с графитом низкое удельное сопротивление WC10Co ($11 \text{ мкОм}\cdot\text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$) сокращает время разряда ($< 0,1 \text{ мс} \pm 0,01 \text{ мс}$) и снижает потери энергии примерно на $10\% \pm 1\%$.

(4) Примеры применения

В производстве пресс-форм электроды WC10Co используются для обработки закаленных стальных деталей (твердость $> \text{HRC } 50$), что значительно сокращает время обработки (сокращается на $20\% - 30\% \pm 2\%$), а качество поверхности ($\text{Ra} < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) соответствует требованиям точности. По сравнению с графитовыми электродами ($\text{Ra} \sim 0,5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мкм $\pm 0,05$ мкм) процесс финишной обработки сокращается примерно на $50\% \pm 5\%$. В авиационной отрасли электроды WC10Co обрабатывают лопатки из титанового сплава с точностью $< 0,5$ мкм $\pm 0,1$ мкм и сроком службы > 120 часов ± 10 часов, поддерживая высокоэффективное производство.

9.1.1.5.3 Инженерное применение карбидной проводимости — подложка из карбидного проводящего покрытия

(1) Сценарии применения

В качестве токопроводящей подложки покрытия цементированный карбид широко используется в износостойких инструментах (например, режущих инструментах), электронных компонентах (например, печатных платах) и авиационных компонентах (например, лопатках турбин). Необходимо учитывать проводимость, адгезию и долгосрочные эксплуатационные характеристики. В коррозионных средах (например, морское оборудование) или условиях высоких температур (> 400 °C ± 10 °C) подложка должна обеспечивать стабильную электрическую поддержку и механическую защиту. Низкая проводимость традиционных стальных подложек ($< 5 \times 10^{-6}$ См/м) ограничивает их применение.

(2) Характеристики

WC8Ni (шероховатость поверхности $Ra < 0,05$ мкм $\pm 0,01$ мкм) имеют удельное сопротивление $10,8$ мОм·см $\pm 0,1$ мОм·см и проводимость $9,3 \times 10^{-6}$ См/м $\pm 0,1 \times 10^{-6}$ См/м. Адгезия покрытия превышает 50 МПа ± 5 МПа, а срок службы превышает 2 года $\pm 0,2$ года. По сравнению с WC8Co (адгезия около 45 МПа ± 5 МПа) матрица Ni демонстрирует более низкую скорость коррозии ($i_{corr} < 10^{-6}$ А/см² $\pm 10^{-7}$ А/см²) и скорость потери веса ($< 0,05$ мг/см²) в коррозионных средах (таких как 3,5% раствор NaCl). $\pm 0,01$ мг/см²) намного ниже, чем у Co ($> 0,1$ мг/см² $\pm 0,02$ мг/см²). Анализ XPS показал, что слой пассивации поверхности Ni (NiO, толщина ~ 10 нм ± 1 нм) повышает коррозионную стойкость.

(3) Технические преимущества

Низкая шероховатость поверхности ($Ra < 0,05$ мкм $\pm 0,01$ мкм) снижает контактное сопротивление (< 1 мОм·см²), равномерное распределение Ni (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) и мелкозернистая структура ($0,5$ мкм $\pm 0,01$ мкм) улучшают межфазную связь между покрытием и подложкой (площадь контакта $> 96\% \pm 2\%$) и продлевают срок службы. В сочетании с высокой твердостью (HV 1450 ± 30) и термостойкостью (деформация $< 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) подложка WC8Ni поддерживает стабильную работу многослойных покрытий (таких как TiN, толщина 2 мкм $\pm 0,1$ мкм) в условиях высоких температур или коррозионных сред.

(4) Примеры применения

В покрытиях лопастей ветряных турбин износостойкое покрытие, поддерживаемое подложкой WC8Ni, не имеет существенного ухудшения после $2,5$ лет $\pm 0,2$ года эксплуатации в среде соляного тумана (концентрация NaCl $5\% \pm 0,5\%$), а его проводимость ($> 9 \times 10^{-6}$ См/м

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,1 \times 10^{-6}$ См/м) и защитные характеристики (скорость износа $< 0,03$ мм³/м $\pm 0,01$ мм³/м) лучше, чем у обычной подложки WC8Co (1,5 года $\pm 0,2$ года эксплуатации, скорость износа $> 0,05$ мм³/м $\pm 0,01$ мм³/м). В лопатках авиационных турбин теплозащитное покрытие, поддерживаемое подложкой WC8Ni, имеет высокую термостойкость $> 1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, а стабильность проводимости (удельное сопротивление < 11 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см) поддерживает интеграцию датчиков.

9.1.1.5.4 Инженерные применения карбидной проводимости — другие потенциальные применения

(1) Материалы для электромагнитного экранирования из цементированного карбида

Сплавы WC-Ni с оптимизированной проводимостью могут использоваться для изготовления легких панелей электромагнитного экранирования. Их электропроводность ($> 10^{-6}$ См/м $\pm 0,1 \times 10^{-6}$ См/м) эффективно экранирует высокочастотные электромагнитные волны (> 1 ГГц) с эффективностью экранирования $> 90\% \pm 2\%$. Мелкие зерна ($0,5$ мкм $\pm 0,01$ мкм) и содержание Ni ($8\%-10\% \pm 0,1\%$) улучшают непрерывность проводящей сети (площадь контакта $> 95\% \pm 2\%$), а плотность (~ 12 г/см³) также очень высока. $\pm 0,1$ г/см³) примерно на $25\% \pm 2\%$ ниже, чем у меди ($8,9$ г/см³), что делает его пригодным для облегченной конструкции оборудования 5G и авионики.

(2) Карбидный проводящий соединитель

WC10Ni стал новым выбором для замены медных сплавов в силовых соединителях из-за его низкого удельного сопротивления (11 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см, проводимость $9,1 \times 10^{-6}$ См/м $\pm 0,1 \times 10^{-6}$ См/м) и высокой термостойкости ($> 800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ без деформации), с уменьшением веса примерно на $30\% \pm 2\%$ (плотность 12 г/см³ против $8,9$ г/см³). Анализ SEM показывает, что Ni равномерно распределен (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) и имеет хорошую коррозионную стойкость (исог $< 10^{-6}$ А/см²), что поддерживает применение в морских кабелях.

(3) Карбидные сенсорные элементы

Мелкозернистый сплав WC-Co-Ni используется в качестве электродного материала для высокоточных датчиков давления и температуры благодаря своим стабильным электрическим свойствам (удельное сопротивление 11 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см, проводимость $9,1 \times 10^{-6}$ См/м $\pm 0,1 \times 10^{-6}$ См/м), со временем отклика < 1 мс $\pm 0,1$ мс и точностью $> 99\% \pm 0,5\%$. Интеллектуальные характеристики отклика NiTi $3\% \pm 0,1\%$ (скорость деформации $< 0,1\% \pm 0,01\%$) поддерживают динамический мониторинг и подходят для авиационных датчиков и промышленной автоматизации.

9.1.1.5.5 Комплексные преимущества инженерных применений проводимости цементированного карбида

Эти приложения показывают, что цементированные карбиды с оптимизированной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электропроводностью значительно повышают надежность в секторе электроники. Например, низкое контактное сопротивление ($< 0,1 \text{ мОм} \pm 0,01 \text{ мОм}$) электронных контактов WC10Ni при высокочастотном переключении ($> 1 \text{ кГц}$) продлевает срок службы устройства ($> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз) и снижает частоту отказов до $< 1\% \pm 0,5\%$. Высокая эффективность ($> 95\% \pm 2\%$) электродов WC10Co в электроэрозионной обработке снижает производственные затраты (снижается на $20\%-30\% \pm 2\%$) и улучшает качество поверхности ($Ra < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) примерно на $50\% \pm 5\%$. Длительный срок службы ($> 2,5 \text{ лет} \pm 0,2 \text{ года}$) подложки покрытия WC8Ni в суровых условиях (таких как солевой туман, NaCl $5\% \pm 0,5\%$) соответствует промышленным потребностям, а износостойкость ($< 0,03 \text{ мм}^3/\text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{м}$) лучше, чем у традиционных материалов.

Оптимизированный цементированный карбид имеет низкое удельное сопротивление ($< 12 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$), проводимость $> 10 \text{ МСм/м} \pm 0,1 \text{ МСм/м}$), высокую электропроводность и превосходные механические свойства (твердость HV 1450 ± 30 , $K_{1c} 16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), успешно расширяя перспективы его применения в электронных контактах, электродах EDM, подложках проводящих покрытий, материалах электромагнитного экранирования, проводящих разъемах и элементах датчиков. В интеллектуальном производстве контакты WC10Ni поддерживают эффективное переключение (время отклика $< 0,1 \text{ мс} \pm 0,01 \text{ мс}$), а электроды WC10Co повышают эффективность производства пресс-форм ($> 20\% \pm 2\%$); В аэрокосмической промышленности подложки из WC8Ni и датчики из WC-Co-Ni обеспечивают высокую температурную стабильность и точность ($< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$); в морской технике разъемы из WC10Ni обладают коррозионной стойкостью ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2$), что продлевает срок службы ($> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов).

Инженерное применение проводимости цементированного карбида выигрывает от синергетического эффекта оптимизации состава (Co/Ni $10\% \pm 1\%$, размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), управления процессом (вакуумное спекание $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$) и обработки поверхности ($Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Его превосходные характеристики в электронных контактах (срок службы $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз), электродах EDM (эффективность $> 95\% \pm 2\%$) и подложках проводящих покрытий (срок службы > 2 года $\pm 0,2$ года) подтверждают практическую ценность оптимизации проводимости. Кроме того, потенциал материалов для электромагнитного экранирования (эффективность экранирования $> 90\% \pm 2\%$), проводящих разъемов (снижение веса на $30\% \pm 2\%$) и сенсорных элементов (время отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$) показывает, что оптимизированный цементированный карбид может быть дополнительно расширен в области технологий 5G, авионики и интеллектуальной медицинской помощи, обеспечивая важную ссылку для разработки высокопроизводительных материалов. В будущем его возможности применения в экстремальных условиях ($> 500^\circ\text{C}$ или высокая влажность $> 90\% \pm 5\%$) могут быть улучшены за счет нанозерен ($< 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) или функционального градиентного дизайна.

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



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

9.1.2 Магнитный контроль и контроль качества твердого сплава

Магнитные свойства твердого сплава и технология его обнаружения играют ключевую роль в неразрушающем тестировании, контроле качества и прогнозировании механических свойств. Эти свойства в основном обусловлены ферромагнетизмом связующей фазы и зависят от комбинированного воздействия микроструктуры, распределения состава и дефектного состояния. Благодаря точному магнитному тестированию и анализу можно эффективно оценить внутреннее качество, однородность и постоянство характеристик твердого сплава, что обеспечивает надежную гарантию для промышленного применения. В этом разделе всесторонне анализируются научная основа и практическая ценность магнитного обнаружения и контроля качества твердого сплава путем глубокого изучения магнитного механизма, технологии испытаний и инженерного применения, объединяя экспериментальные данные и микроскопическую характеристику.

9.1.2.1 Обзор принципов и технологий магнитообработки твердого сплава

Принцип карбидного магнетизма

Магнитные свойства твердого сплава в основном определяются ферромагнетизмом связующей фазы. Его магнитные параметры включают намагниченность насыщения, которая обычно составляет менее $10 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$, и коэрцитивную силу, которая составляет около $100 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$. Эти свойства делают его очень ценным для применения в неразрушающем контроле, контроле качества и прогнозировании механических свойств, и могут отражать распределение связующей фазы, состояние зерна и внутренние дефекты. В сочетании с высокой твердостью ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), вязкостью разрушения ($K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и износостойкостью (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3 / \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{м}$) магнитные испытания являются ключевым техническим средством для оптимизации производительности и постоянства производства твердого сплава. В этом разделе проводится всесторонний анализ магнитного механизма, технологии испытаний и инженерного применения с целью выявления внутренней связи между магнитными свойствами, микроструктурой и механическими свойствами.

(1) Вклад ферромагнетизма Co

Магнетизм твердого сплава в основном обусловлен ферромагнетизмом Co, магнитный момент которого составляет около $1,7 \mu_B \pm 0,1 \mu_B$ (магнетон Бора), который возникает из-за спинового и орбитального движения неспаренных электронов атомов Co. Co образует непрерывную сеть в качестве связующей фазы, а его содержание и распределение напрямую влияют на намагниченность и коэрцитивную силу. Когда содержание Co составляет $10\% \pm 1\%$, магнитные свойства достигают равновесия, намагниченность насыщения стабильна при $8-9 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$, коэрцитивная сила составляет около $100-120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$, а магнитные домены равномерно распределены (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Слишком высокое содержание Co ($> 12\% \pm 1\%$) приводит к увеличению намагниченности до $> 10 \text{ эме/г} \pm 0,5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

emu/g, но снижает K_{1c} ($< 13,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) из-за ослабления границ зерен (плотность микротрещин $> 10^3 \text{ м}^{-2}$) $\pm 0,5$), в то время как слишком низкое содержание Co ($< 8\% \pm 1\%$) снижает намагниченность до $< 7 \text{ эму/г} \pm 0,5 \text{ эму/г}$ из-за прерывания проводящей сети. Анализ SEM показывает, что однородность Co (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) является ключом к поддержанию магнитной стабильности.

(2) Немагнитные свойства WC

Сам по себе WC является немагнитным материалом с интенсивностью намагничивания ниже $0,1 \text{ эму/г} \pm 0,01 \text{ эму/г}$. Его ковалентная структура связей (энергия связи WC $\sim 4 \text{ эВ}$) ограничивает вклад электронного спина и мало влияет на общий магнетизм. XPS-детектирование показывает, что на поверхности WC нет значительного магнитного сигнала (магнитный момент $< 0,01 \mu_B$). Его основная функция - обеспечить высокую твердость ($> 1500 \text{ HV} \pm 30$) и износостойкость (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3/\text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{м}$), в то время как магнитные свойства почти полностью зависят от фазы Co. Размер зерна WC ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) косвенно регулирует магнитные параметры, влияя на распределение Co, но его собственный вклад в намагниченность незначителен.

(3) Микроструктурный эффект Однородность

фазы Co и распределение границ зерен определяют формирование и ориентацию магнитных доменов. Когда отклонение распределения Co составляет $< 0,1\% \pm 0,02\%$, интенсивность намагничивания стабильна на уровне $8-9 \text{ эму/г} \pm 0,5 \text{ эму/г}$, коэрцитивная сила поддерживается на уровне $100-120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$, а постоянство отклика магнитного поля составляет ($> 95\% \pm 2\%$). Сегрегация ($> 0,5\% \pm 0,1\%$) приведет к локальной магнитной неоднородности, диапазон колебаний интенсивности намагничивания увеличивается до $\pm 1 \text{ эму/г}$, а коэрцитивная сила может возрасти до $> 130 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$, что снижает точность обнаружения. Анализ EDS показывает, что содержание Co в зоне сегрегации может достигать $15\% \pm 1\%$, образуя область высокой намагниченности ($> 10 \text{ эму/г} \pm 0,5 \text{ эму/г}$), в то время как плотность границ зерен ($> 10^4 \text{ м}^{-2}$) дополнительно влияет на коэрцитивную силу, ограничивая рост магнитных доменов.

(4) Дефекты влияют на

внутреннюю пористость (пористость) $< 0,1\% \pm 0,02\%$ имеет решающее значение для однородности магнитного потока. Пористость или микротрещины ($< 0,1 \text{ мкм}$, плотность $> 10^2 \text{ м}^{-2}$) рассеивают магнитное поле и ослабляют интенсивность намагничивания (уменьшение $> 5\% \pm 1\%$). Наблюдения SEM показывают, что при пористости $> 0,5\% \pm 0,1\%$ интенсивность намагничивания может упасть до $7 \text{ эму/г} \pm 0,5 \text{ эму/г}$, а коэрцитивная сила колеблется на $\pm 20 \text{ Э} \pm 2 \text{ Э}$, влияя на чувствительность неразрушающего контроля ($< 90\% \pm 2\%$). Микротрещины также могут вызывать локальную концентрацию напряжений ($> 50 \text{ МПа}$), еще больше снижая K_{1c} ($< 14 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), поэтому важно контролировать процесс спекания (например, вакуумное спекание при $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), чтобы поддерживать низкую пористость.

Технология магнитного контроля цементированного карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Инструменты и параметры

Обычно используемый вибрационный магнитометр (VSM) для магнитного обнаружения имеет точность измерения $\pm 0,1 \text{ emu/g}$ и чувствительность $> 99\% \pm 0,5\%$, что подходит для точной характеристики следовых магнитных материалов. Во время испытания приложенная напряженность магнитного поля составляет $1 \text{ Тл} \pm 0,01 \text{ Тл}$, а размер образца составляет $10 \times 10 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, чтобы обеспечить репрезентативность результатов измерений (погрешность $< 0,5\% \pm 0,1\%$). Среда испытания должна контролироваться при $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ и влажности $< 65\% \pm 5\%$, чтобы избежать дрейфа магнитных параметров ($< 0,1 \text{ emu/g} \pm 0,01 \text{ emu/g}$), вызванного температурой ($> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) или влажностью ($> 80\% \pm 5\%$).

(2) Индикаторы измерений

Намагниченность насыщения и коэрцитивная сила были измерены с помощью VSM для оценки однородности и внутренних дефектов фазы Co. Намагниченность положительно коррелирует с содержанием Co ($R^2 > 0,95$), и каждое увеличение Co на 1% соответствует увеличению намагниченности примерно на $0,8 \text{ emu/g} \pm 0,1 \text{ emu/g}$; на коэрцитивную силу влияют размер зерна и напряженное состояние. Когда размер зерна составляет $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, коэрцитивная сила стабильна на уровне $100\text{-}120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$, а когда размер зерна составляет $> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, она возрастает до $> 130 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$. В сочетании с анализом петли гистерезиса изменения намагниченности и коэрцитивной силы могут отражать однородность микроструктуры (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$).

(3) Чувствительность и точность

Чувствительность магнитного обнаружения составляет $> 95\% \pm 2\%$, а уровень дефектов контролируется на уровне $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Он может обнаруживать поры ($> 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) или микротрещины ($> 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Например, интенсивность намагничивания образца WC10Co составляет $8 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$, коэрцитивная сила составляет $120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$, а точность обнаружения превышает $98\% \pm 1\%$, показывая высокую надежность. По сравнению с традиционным магнитопорошковым контролем (чувствительность $\sim 90\% \pm 2\%$), VSM больше подходит для количественного анализа внутренних дефектов твердого сплава из-за его высокого разрешения ($< 0,1 \text{ эме/г}$).

(4) Анализ данных

Объединение SEM и EDS для анализа распределения Co, подтверждения области сегрегации ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) и пористости ($< 0,05\% \pm 0,01\%$), а также дальнейшей калибровки связи между магнитными параметрами и микроструктурой. Изображения SEM показывают, что интенсивность намагничивания в области сегрегации Co локально увеличена ($> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), а обнаружение EDS подтверждает флуктуацию содержания Co ($< 0,5\% \pm 0,1\%$), что согласуется с данными VSM. После коррекции данных отклонение интенсивности намагничивания снижается до $\pm 0,2 \text{ emu/g}$, а флуктуация коэрцитивной силы контролируется на уровне $\pm 5 \text{ Э} \pm 1 \text{ Э}$, что обеспечивает точность контроля качества ($> 99\% \pm 0,5\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2.2 Анализ магнитного механизма твердого сплава

Магнитные свойства твердых сплавов в основном определяются ферромагнетизмом связующей фазы (например, кобальта (Co) или никеля (Ni)), и его механизм включает в себя множество факторов, таких как спин электронов, микроструктура и процесс подготовки. В сочетании с высокой твердостью ($> HV 1400 \pm 30$), вязкостью разрушения ($K_{Ic} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и износостойкостью (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3/\text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{м}$) магнитные свойства обеспечивают важную основу для неразрушающего контроля и контроля качества. Ниже подробно обсуждается механизм магнетизма твердых сплавов через источник магнетизма, микроскопическое влияние, фазовый интерфейс и непрерывность сети, обнаружение и корреляцию производительности, а также воздействие окружающей среды и температуры, и раскрываются его внутренние законы путем объединения экспериментальных данных и микроскопического анализа.

9.1.2.2.1 Источник карбидного магнетизма

(1) 3d-электронный спин Co

Магнетизм Co возникает из его незаполненной 3d-электронной оболочки. Магнитный момент, генерируемый спином, составляет около $1,7 \mu_B \pm 0,1 \mu_B$ (магнетон Бора), что образует ферромагнитный порядок посредством спин-орбитальной связи. Намагниченность насыщения (намагниченность насыщения, M_s) пропорциональна объемной доле Co (f_{Co}), которую можно аппроксимировать следующим соотношением:

$$M_s \approx f_{Co} \cdot M_{Co}$$

Где f_{Co} - объемная доля Co ($10\% \pm 1\%$), а M_{Co} - намагниченность чистого Co (около $160 \text{ ед}/\text{г} \pm 5 \text{ ед}/\text{г}$). Таким образом, когда содержание Co составляет 10%, теоретическое значение M_s составляет около $16 \text{ ед}/\text{г}$, но фактически оно снижается до $8-10 \text{ ед}/\text{г} \pm 0,5 \text{ ед}/\text{г}$ из-за микроструктурных ограничений (рассеивание границ зерен, эффекты дефектов). XPS-детектирование показывает, что положение пика Co 3d ($\sim 778 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) подтверждает его неспаренный электронный вклад, а магнитная стабильность зависит от непрерывности сети Co ($> 95\% \pm 2\%$).

(2) Слабый ферромагнетизм Ni

Когда Ni (содержание $8\%-10\% \pm 0,1\%$) добавляется в качестве связующей фазы, его магнитный момент составляет всего $0,6 \mu_B \pm 0,1 \mu_B$, что является слабым ферромагнитным материалом, что приводит к значительному снижению намагниченности ($< 5 \text{ ед}/\text{г} \pm 0,5 \text{ ед}/\text{г}$). Ni имеет высокую степень 3d-электронного спаривания (около $0,6 \mu_B / \text{атом}$), слабый ферромагнитный порядок и намагниченность насыщения около $55 \text{ ед}/\text{г} \pm 5 \text{ ед}/\text{г}$ (чистый Ni), но в цементированном карбиде она падает до $4-5 \text{ ед}/\text{г} \pm 0,5 \text{ ед}/\text{г}$ из-за эффекта разбавления. Хотя введение Ni улучшает коррозионную стойкость ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А}/\text{см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А}/\text{см}^2$), оно ослабляет общий магнетизм и подходит для применений, требующих низкого магнетизма, но высокой коррозионной стойкости (например, судовое оборудование).

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



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

9.1.2.2.2 Влияние микроструктуры на магнитные свойства твердого сплава

(1) Размер зерна и коэрцитивная сила

размер зерна составляет $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность границ зерен высокая ($> 10^{14} \text{ м}^{-2}$), что затрудняет переключение магнитных доменов. Энергия переключения составляет около $10^{-19} \text{ Дж} \pm 10^{-20} \text{ Дж}$, что приводит к увеличению коэрцитивной силы до $120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$, а магнитный отклик более чувствителен к изменениям внешнего магнитного поля. Более крупные зерна ($> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) уменьшают рассеяние границ зерен, уменьшают сопротивление переключению магнитных доменов, и коэрцитивная сила может упасть до $80 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$, но флуктуация интенсивности намагничивания увеличивается до $\pm 0,5 \text{ эме/г} \pm 0,1 \text{ эме/г}$. Анализ СЭМ показал, что мелкозернистые образцы имели постоянную ориентацию магнитных доменов ($> 95\% \pm 2\%$), в то время как крупнозернистые образцы имели неравномерное распределение магнитного поля (отклонение $> 0,5\% \pm 0,1\%$).

(2) Температура спекания и распределение Со

Температура спекания $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ обеспечивает равномерное распределение фазы Со (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), поддерживая стабильную намагниченность ($8-9 \text{ ету/г} \pm 0,5 \text{ ету/г}$) и коэрцитивную силу ($100-120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$). Однако при превышении температуры $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ происходит сегрегация Со ($> 0,5\% \pm 0,1\%$), локальное содержание Со увеличивается до $15\% \pm 1\%$, образуя область высокой намагниченности ($> 10 \text{ ету/г} \pm 0,5 \text{ ету/г}$), отклонение намагниченности увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$, а флуктуация коэрцитивной силы усиливается ($> 130 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$). Обнаружение EDS подтвердило, что окисление границ зерен (позиция пика O 1s $\sim 532 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$) в зоне сегрегации увеличилось ($> 0,5\% \pm 0,1\%$), что повлияло на магнитную плотность.

(3) Дефекты и поры

Внутренние дефекты (например, поры $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность $> 10^2 \text{ м}^{-2}$) увеличивают коэрцитивную силу примерно на $5\% \pm 1\%$ (до $125 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$) за счет рассеивания магнитного поля. Образцы высокой плотности с пористостью $< 0,1\% \pm 0,02\%$ обладают более стабильными магнитными свойствами и улучшенной однородностью намагниченности (отклонение $< \pm 0,2 \text{ эме/г}$), тогда как при пористости $> 0,5\% \pm 0,1\%$ намагниченность падает до $7 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$, а однородность потока уменьшается ($< 90\% \pm 2\%$). Микротрещины также могут вызывать локальное напряжение ($> 50 \text{ МПа}$), снижая K_{1c} ($< 14 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), которое необходимо контролировать с помощью вакуумного спекания (давление $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$).

9.1.2.2.3 Непрерывность магнитного фазового интерфейса и сети цементированного карбида

(1) Анализ сети Со-фазы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SEM и EDS показывает, что непрерывность фазы Co в WC10Co превышает $95\% \pm 2\%$, образуя эффективный путь магнитной проводимости. Однородность сети Co напрямую определяет пространственное распределение интенсивности намагничивания. Магнитные свойства оптимальны, когда отклонение составляет $< 0,1\% \pm 0,02\%$ (M_s 8-9 emu/g $\pm 0,5$ emu/g, коэрцитивная сила 120 Э ± 10 Э). Прерывание сети Co (такое как пористость $> 0,1\% \pm 0,02\%$) приведет к потере магнитного потока ($> 5\% \pm 1\%$), и интенсивность намагничивания уменьшится примерно на $10\% \pm 2\%$.

(2) Эффект замещения Ni

В образце WC10Ni слабый магнетизм фазы Ni снижает M_s до 4 emu/g $\pm 0,5$ emu/g, а коэрцитивная сила составляет около 110 Э ± 10 Э, но его равномерность распределения (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) и коррозионная стойкость ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ A/cm² $\pm 10^{-7}$ A/cm²) компенсируют потерю магнетизма, что делает его пригодным для применений, требующих низкого магнетизма, но высокой коррозионной стойкости (например, медицинские имплантаты). Мелкозернистая структура фазы Ni (0,5 мкм $\pm 0,01$ мкм) повышает стабильность магнитного домена, а диапазон флуктуаций уменьшается до $\pm 0,1$ emu/g.

(3) Рассеивание на границе раздела

Несоответствие решеток ($\sim 5\% \pm 1\%$) на границе раздела WC/Co вызывает дополнительное рассеяние, влияя на ориентацию магнитных доменов, что приводит к увеличению коэрцитивной силы примерно на $5\% \pm 1\%$ (до 125 Э ± 10 Э). Оптимизация процесса спекания (например, ступенчатое спекание, предварительное спекание при 1200°C и затем повышение до 1450°C $\pm 10^\circ\text{C}$) может уменьшить дефекты на границе раздела ($< 0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм), повысить магнитную стабильность (отклонение $M_s < \pm 0,2$ эме/г) и улучшить K_{1c} ($> 15,5$ МПа $\cdot\text{м}^{1/2} \pm 0,5$).

9.1.2.2.4 Корреляция между магнитным контролем и эксплуатационными характеристиками твердого сплава

(1) Измерение VSM

Вибрационный магнитометр (VSM) имеет точность измерения $\pm 0,1$ emu/g. Когда приложенное магнитное поле составляет 1 Тл $\pm 0,01$ Тл, M_s WC10Co составляет 8 emu/g $\pm 0,5$ emu/g, а коэрцитивная сила составляет 120 Э ± 10 Э; M_s WC10Ni падает до 4 emu/g $\pm 0,5$ emu/g, а коэрцитивная сила составляет около 110 Э ± 10 Э. Петля гистерезиса показывает, что WC10Co имеет быстрое насыщение намагниченности ($< 0,5$ Тл $\pm 0,01$ Тл), в то время как WC10Ni требует более сильного магнитного поля ($> 0,7$ Тл $\pm 0,01$ Тл), что отражает влияние содержания Co/Ni и микроструктуры.

(2) Идентификация дефектов

Магнитный контроль может идентифицировать трещины ($< 0,1$ мм $\pm 0,01$ мм, плотность $> 10^2$ м⁻²) и отклонение содержания углерода ($\pm 0,1\% \pm 0,01\%$). Избыточный углерод ($> 6,13$ мас. % $\pm 0,01$ мас. %) или недостаточный углерод ($< 6,13$ мас. % $\pm 0,01$ мас. %) изменяет свойства интерфейса WC/Co, влияя на интенсивность намагничивания (уменьшение $> 5\% \pm 1\%$) и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коэрцитивную силу (увеличение $> 10\% \pm 2\%$). Снимки СЭМ показывают, что Со неравномерно распределен в области отклонения углерода (отклонение $> 0,5\% \pm 0,1\%$), и флуктуация магнитных параметров усугубляется.

(3) Механическая корреляция

Коэрцитивность отрицательно коррелирует с вязкостью разрушения (K_{Ic}) (коэффициент корреляции $> -0,9 \pm 0,05$). Образцы с высокой коэрцитивностью (например, $120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$) обычно соответствуют более низкому K_{Ic} ($< 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), поскольку рассеяние на границах зерен ограничивает энергию переполюсовки магнитных доменов ($> 10^{-19} \text{ Дж} \pm 10^{-20} \text{ Дж}$). Образцы с низкой коэрцитивностью (например, $80 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$) соответствуют более высокому K_{Ic} ($> 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), обеспечивая эталон для оценки механических свойств.

9.1.2.2.5 Влияние окружающей среды и температуры на магнитные свойства твердого сплава

(1) Температурный эффект

В диапазоне от 20°C до 200°C интенсивность намагничивания немного уменьшается с ростом температуры ($< 5\% \pm 1\%$) из-за тепловой вибрации, усиливающей рассеяние магнитных доменов (увеличение сечения рассеяния $> 10\% \pm 2\%$). Выше $300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ фаза Со начинает размягчаться (температура плавления $1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), магнетизм значительно ослабевает (M_s падает до $< 6 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), а коэрцитивная сила колеблется на $\pm 20 \text{ Э} \pm 2 \text{ Э}$. Фаза Ni (температура плавления $1455^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) немного более стабильна при высоких температурах, с уменьшением примерно на $3\% \pm 1\%$, что подходит для высокотемпературных сред (например, авиационных компонентов).

(2) Коррозионный эффект

Низкая скорость коррозии фазы Ni во влажной среде (например, $3,5\% \text{ NaCl}$, влажность $> 80\% \pm 5\%$) ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) делает ее магнитную стабильность лучше, чем у Со ($i_{\text{corr}} \sim 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$), и продлевает срок службы ($> 10^4$ часов $\pm 10^3$ часов). Обнаружение XPS показывает, что на поверхности Ni образуется пассивирующий слой (NiO, толщина $\sim 10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), а увеличение положения пика O 1s составляет $< 0,1\% \pm 0,01\%$, что снижает магнитное затухание.

Магнитный механизм твердого сплава обусловлен спином 3d-электронов Со, M_s пропорциональна содержанию Со (теоретическое значение снижено до $8-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ из-за микроскопических ограничений), а размер зерна ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и температура спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) регулируют коэрцитивную силу ($100-120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$) через плотность границ зерен и равномерность распределения Со (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Замещение Ni снижает M_s (до $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), но улучшает коррозионную стойкость, а микроскопические дефекты (пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$) и рассеивание на границе раздела (несоответствие решетки $\sim 5\% \pm 1\%$) дополнительно влияют на магнитные свойства. Обнаружение VSM (точность $\pm 0,1 \text{ emu/g}$) в сочетании с анализом SEM и EDS оптимизирует

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

состав ($\text{Co } 10\% \pm 1\%$) и процесс (вакуумное спекание), обеспечивая основу для калибровки магнитных параметров (отклонение $M_s < \pm 0,2 \text{ emu/g}$, флуктуация коэрцитивной силы $< \pm 5 \text{ Э} \pm 1 \text{ Э}$).

В будущем магнитные свойства и потенциал применения твердого сплава могут быть дополнительно улучшены за счет контроля мелкозернистости ($< 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и снижения сегрегации ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), особенно при высоких температурах ($> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) или в коррозионных средах ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$).

9.1.2.3 Анализ факторов, влияющих на магнитные свойства твердого сплава

Магнитные свойства твердых сплавов зависят от сочетания факторов, включая содержание связующей фазы, микроструктурные параметры, процесс приготовления и химический состав. Эти факторы существенно регулируют намагниченность насыщения (M_s) и коэрцитивную силу, влияя на распределение ферромагнитной фазы, поведение магнитных доменов и состояние дефектов. В сочетании с высокой твердостью ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), вязкостью разрушения ($K_{Ic} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и износостойкостью (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3 / \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{м}$) магнитные свойства обеспечивают ключевую основу для неразрушающего контроля и контроля качества. Ниже приводится подробный анализ основных влияющих факторов, и их роль подтверждается примерами, направленными на предоставление научных рекомендаций для проектирования процесса магнитной оптимизации.

9.1.2.3.1 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава - Содержание кобальта

(1) Механизм влияния

Со является ферромагнитной фазой, и ее содержание напрямую определяет интенсивность намагничивания. Когда содержание Со составляет $10\% \pm 1\%$, M_s составляет около $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, магнитные свойства стабильны, а связность магнитной сети ($> 95\% \pm 2\%$) и однородность (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) сбалансированы. Когда содержание Со превышает $12\% \pm 1\%$, M_s увеличивается примерно на $20\% \pm 3\%$ (до $9,6\text{-}10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$). Это связано с тем, что более высокая объемная доля Со увеличивает путь магнитной проницаемости, но в то же время может привести к ослаблению границ зерен (плотность микротрещин $> 10^3 \text{ м}^{-2}$) и снижению K_{Ic} ($< 13,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$). Когда содержание Со ниже $8\% \pm 1\%$, намагниченность уменьшается до $< 7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ из-за увеличения потерь потока ($> 5\% \pm 1\%$) из-за прерывания сети Со.

(2) Компромисс производительности:

хотя высокое содержание Со ($> 15\% \pm 1\%$) улучшает M_s ($> 12 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), оно может вызвать сегрегацию ($> 0,5\% \pm 0,1\%$), увеличить локальную магнитную неоднородность (отклонение $> 1 \text{ emu/g}$) и снизить прочность и износостойкость (скорость износа $> 0,1 \text{ мм}^3/\text{м}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{м}$). Сегрегации следует избегать с помощью контроля процесса (например, ступенчатого спекания), чтобы обеспечить согласованную оптимизацию магнитных и механических свойств.

(3) Пример анализа:

Из-за высокого содержания Co ($12\% \pm 1\%$) значение Ms образца WC12Co увеличилось до $9,6 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$, что свидетельствует о сильном магнитном отклике (насыщение магнитного поля $< 0,5 \text{ Тл} \pm 0,01 \text{ Тл}$), но анализ SEM выявил микротрещины на границах зерен (плотность $> 10^3 \text{ м}^{-2}$), а значение K_{1c} снизилось до $13 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, что указывает на необходимость сочетания высокого содержания Co с оптимизацией микроструктуры.

9.1.2.3.2 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава - Размер зерна

(1) Механизм влияния

Размер зерна влияет на плотность границ зерен и движение доменных стенок. Когда размер зерна составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность границ зерен высока ($> 10^{14} \text{ м}^{-2}$), что затрудняет движение доменных стенок, поддерживает высокую коэрцитивную силу (около $120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$) и повышает чувствительность магнитного отклика ($> 95\% \pm 2\%$). Если размер зерна превышает $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, то уменьшается количество границ зерен, уменьшается сопротивление движению доменных стенок и коэрцитивная сила примерно на $10\% \pm 2\%$ (до $108 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$), но флуктуация интенсивности намагничивания увеличивается до $\pm 0,5 \text{ эме/г} \pm 0,1 \text{ эме/г}$ из-за неравномерной концентрации магнитного потока.

(2) Микроскопические эффекты

Мелкозернистая структура ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) усиливает дисперсию фазы Co (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) и увеличивает магнитное рассеяние (сечение рассеяния $< 10^{-18} \text{ м}^2$), но увеличивает твердость материала ($\text{HV } 1450 \pm 30$) и K_{1c} ($> 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$); крупные зерна ($> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) способствуют концентрации магнитного потока и подходят для применений с низкой коэрцитивной силой (например, электромагнитное экранирование), но твердость снижается ($< \text{HV } 1400 \pm 30$).

(3) Оптимизация процесса:

добавляя ингибиторы зерен (такие как VC $0,5\%-1\%$ или $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$), можно стабилизировать зерна в диапазоне $0,5-1 \text{ мкм}$, уменьшить энергию границ зерен ($< 1 \text{ Дж/м}^2$), уменьшить магнитное рассеяние и контролировать колебания коэрцитивной силы в пределах $\pm 5 \text{ Э} \pm 1 \text{ Э}$, принимая во внимание как магнитные, так и механические свойства.

9.1.2.3.3 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава – добавление никеля

(1) Механизм влияния

Ni является слабой ферромагнитной фазой (магнитный момент $0,6 \mu_B \pm 0,1 \mu_B$). При его добавлении в количестве $8\%-10\% \pm 0,1\%$ Ms уменьшается примерно на $40\% \pm 5\%$ (до $4-5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

emu/g $\pm$ 0,5 emu/g) по сравнению с WC-Co, поскольку интенсивность намагничивания Ni (около 55 emu/g $\pm$ 5 emu/g) намного ниже, чем у Co (160 emu/g $\pm$ 5 emu/g). Если содержание Ni превышает 12% $\pm$ 0,1%, K_{1c} уменьшается примерно на 10% $\pm$ 2% ($< 13,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), что связано со слабыми границами зерен (плотность микротрещин $> 10^3 \text{ м}^{-2}$), вызванными избыточным содержанием Ni, а также с ухудшением связности магнитной сети ($< 90\% \pm 2\%$).

(2) Преимущества и ограничения

Ni улучшает коррозионную стойкость ($i_{\text{сог}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$), а скорость потери веса во влажной среде (например, 3,5% NaCl) ($< 0,05 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) намного ниже, чем у Co ($> 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,02 \text{ мг/см}^2$), но его слабый магнетизм ограничивает его применения с высокой интенсивностью намагничивания (например, для электромагнитного экранирования требуется $M_s > 10 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$).

(3) Эффект распределения: равномерное распределение

Ni (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) может уменьшить магнитные флуктуации (отклонение $M_s < \pm 0,2 \text{ эме/г}$). Анализ SEM показывает, что непрерывность сети Ni WC10Ni составляет $> 95\% \pm 2\%$, что более стабильно, чем WC10Co (сегрегация Co $> 0,5\% \pm 0,1\%$).

9.1.2.3.4 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава - процесс спекания

(1) Механизм влияния

Температура спекания $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ обеспечивает равномерное распределение Co или Ni (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), стабильную намагниченность ($8-9 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$) и коэрцитивную силу ($100-120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$). Когда температура превышает $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, сегрегация связующей фазы увеличивается примерно на $15\% \pm 3\%$ (локальное содержание Co/Ni $> 15\% \pm 1\%$), что приводит к локальной магнитной несогласованности (отклонение $M_s > 1 \text{ эме/г}$), а коэрцитивная сила может колебаться на $\pm 10 \text{ Э} \pm 1 \text{ Э}$.

(2) Подробности процесса

Вакуумное спекание (давление $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$) снижает окисление (пик O 1s $< 0,3\% \pm 0,01\%$), а плотность $> 99,5\% \pm 0,1\%$ способствует однородности магнитного потока (отклонение $< 2\% \pm 0,5\%$). Градуированное спекание (предварительное спекание при $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 1 часа и затем повышение до $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) подавляет сегрегацию ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), снижает термическое напряжение ($< 50 \text{ МПа}$) и улучшает стабильность магнитных параметров.

(3) Эффект термообработки

Низкотемпературный отпуск после спекания ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 2 часа $\pm$ 0,1 часа) устраняет внутреннее напряжение ($< 30 \text{ МПа}$), оптимизирует ориентацию магнитных доменов (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), стабилизирует M_s ($8-9 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$) и коэрцитивную силу ($120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$), а также улучшает K_{1c} ($> 16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2.3.5 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава - содержание углерода

(1) Механизм влияния

Отклонение содержания углерода ($\pm 0,1\% \pm 0,01\%$) изменяет свойства интерфейса WC/Co и влияет на структуру магнитных доменов. Недостаточное количество углерода (например, на $0,2\% \pm 0,01\%$ ниже теоретического значения $6,13 \text{ мас. \%} \pm 0,01 \text{ мас. \%}$) приводит к неполной фазе WC и увеличивает коэрцитивную силу примерно на $5\% \pm 1\%$ (до $105-110 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$); избыточное количество углерода (например, $0,3\% \pm 0,01\%$) образует свободный углерод, ослабляет магнитную сеть Co (снижение $M_s > 5\% \pm 1\%$), и коэрцитивная сила колеблется на $\pm 10 \text{ Э} \pm 1 \text{ Э}$.

(2) Микроанализ

EDS-обнаружение показывает, что при отклонении содержания углерода $< 0,1\% \pm 0,01\%$ чистота фазы Co высокая ($> 99\% \pm 0,5\%$), а интенсивность намагничивания постоянная (M_s $8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$). При отклонении $> 0,2\% \pm 0,01\%$ распределение Co неравномерно (отклонение $> 0,5\% \pm 0,1\%$), а флуктуация коэрцитивной силы усугубляется ($> 130 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$). СЭМ подтверждает, что свободная область углерода ($< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) влияет на магнитный поток.

(3) Стратегия контроля

обеспечивает стабильное содержание углерода и снижает магнитные аномалии (отклонение $M_s < \pm 0,2 \text{ эме/г}$) за счет точного смешивания углерода (молярное соотношение WC:Co $6,13:1 \pm 0,01$) и сочетает вакуумное спекание (давление $< 10^{-3} \text{ Па}$) для контроля улетучивания углерода ($< 0,05\% \pm 0,01\%$).

9.1.2.3.6 Подробный пример факторов, влияющих на магнитные свойства твердого сплава

Если взять в качестве примеров WC12Co и WC10Ni, то WC12Co имеет коэрцитивную силу $140 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$ и M_s $9,6 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$ из-за недостаточного содержания углерода ($0,2\% \pm 0,01\%$), показывая более высокий магнитный отклик, но магнитная неоднородность (отклонение $> 0,5 \text{ эме/г}$) и микротрещины (плотность $> 10^3 \text{ м}^{-2}$) были обнаружены с помощью СЭМ. Напротив, WC10Ni был спекен в вакууме при $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ с отклонением содержания углерода $< 0,1\% \pm 0,01\%$, коэрцитивной силой $100 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$ и стабильным M_s $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, что отражает синергетический эффект добавления Ni и оптимизации процесса. Анализ SEM дополнительно подтвердил, что уровень дефектов ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) и однородность распределения Co/Ni (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) у WC10Ni лучше, чем у WC12Co, а его коррозионная стойкость ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$) также больше подходит для влажных сред.

Магнитные свойства твердого сплава регулируются такими факторами, как содержание Co ($10\% \pm 1\%$), размер зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), добавление Ni ($8\% - 10\% \pm 0,1\%$), процесс спекания (вакуумное спекание $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и содержание углерода ($\pm 0,1\% \pm 0,01\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Содержание Co и температура спекания определяют M_s ($8-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) и однородность, размер зерна и содержание углерода влияют на коэрцитивную силу ($100-120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$), а добавление Ni уравнивает магнитные свойства (до $4-5 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) и коррозионную стойкость ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$).

Оптимизируя эти параметры, можно добиться точного контроля магнитных параметров (отклонение $M_s < \pm 0,2 \text{ эме/г}$, флуктуация коэрцитивной силы $< \pm 5 \text{ Э} \pm 1 \text{ Э}$), что соответствует высоким требованиям неразрушающего контроля (чувствительность $> 95\% \pm 2\%$) и контроля качества (уровень дефектов $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а также обеспечивает техническую поддержку для твердого сплава в высокотехнологичных приложениях (таких как авиация и медицина). В будущем магнитная последовательность может быть дополнительно улучшена за счет нанозерен ($< 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и многофазной конструкции.

9.1.2.4 Стратегия оптимизации магнитных свойств твердого сплава

Для достижения намагниченности насыщения (M_s) ниже $10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ и стабильной коэрцитивной силы (Coercivity) около $100 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$ магнитная оптимизация твердого сплава требует всестороннего рассмотрения состава, процесса подготовки, регулирования микроструктуры и спецификаций испытаний. Эти стратегии направлены на улучшение магнитной однородности, снижение влияния дефектов и обеспечение соответствия магнитных свойств сценариям применения с высокими требованиями, таким как неразрушающий контроль и контроль качества. Конкретный план оптимизации включает в себя следующие ключевые аспекты: во-первых, посредством оптимизации состава содержание Co контролируется на уровне $10\% \pm 1\%$, что обеспечивает основной вклад намагничивания в качестве ферромагнитной фазы, поддерживает M_s в диапазоне $8-10 \text{ emu/g}$ и позволяет избежать снижения вязкости, вызванного чрезмерным содержанием; в то же время содержание Ni $8\%-10\% \pm 0,1\%$ вводится в качестве вспомогательной связующей фазы. Слабый ферромагнетизм Ni (магнитный момент $0,6 \mu_B$) снизит M_s до $< 5 \text{ emu/g}$, но его отличная коррозионная стойкость ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) повышает стабильность материала в коррозионной среде. Смешанная фаза связи Co/Ni (например, $\text{Co } 6\% + \text{Ni } 4\%$) может обеспечить наилучший баланс между магнетизмом и долговечностью. Кроме того, добавление небольшого количества ингибиторов зерен (например, VC или Cr_3C_2 , $< 1\%$) помогает оптимизировать распределение Co/Ni , уменьшить сегрегацию ($< 0,1\%$) и дополнительно стабилизировать магнитные параметры.

Что касается процесса спекания, температура спекания установлена на уровне $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, чтобы избежать сегрегации Co/Ni (отклонение $> 0,5\%$), вызванной высокой температурой ($> 1500^\circ\text{C}$). При этой температуре Co распределяется равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), и улучшается постоянство интенсивности намагничивания. Благодаря вакуумному спеканию (давление $< 10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$) обеспечивается плотность материала, превышающая $99,5\% \pm 0,1\%$, а пористость снижается ($< 0,05\%$), тем самым повышая однородность магнитного потока и поддерживая низкую коэрцитивность. Использование технологии ступенчатого

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

спекания (предварительное спекание при 1200°C и последующее повышение температуры до 1450°C) или горячего изостатического прессования (HIP) позволяет устранить внутренние напряжения, подавить аномальный рост зерен и снизить магнитные флуктуации до $\pm 2\%$. Низкотемпературный отпуск (800°C $\pm 10^\circ\text{C}$) после спекания также позволяет оптимизировать ориентацию магнитных доменов и дополнительно стабилизировать M_s и коэрцитивную силу.

С точки зрения контроля микроструктуры, размер зерна WC контролируется на уровне 0,51 мкм $\pm 0,01$ мкм. Высокая плотность границ зерен ($> 10^{-14} \text{ м}^{-2}$) используется для того, чтобы препятствовать реверсированию доменов (движению доменной стенки) и поддерживать коэрцитивную силу стабильной на уровне 100 Э ± 10 Э. Мелкозернистая структура также улучшает дисперсию фазы Co и улучшает путь магнитной проводимости. VC (0,5%-1%) или TaC добавляются в качестве ингибитора для предотвращения роста зерен более 1 мкм, чтобы избежать снижения коэрцитивной силы (< 90 Э). Анализ SEM показывает, что непрерывность сети Co образца зерна 0,5 мкм составляет $> 95\%$, а флуктуация магнитных параметров составляет менее $\pm 0,2$ эме/г. По сравнению с образцом с крупным зерном (> 2 мкм) коэрцитивная сила мелких зерен увеличивается на 10–15 %, а постоянство интенсивности намагничивания значительно улучшается.

Контроль углерода является еще одним ключевым звеном. Отклонение содержания углерода должно контролироваться в пределах $< 0,1\% \pm 0,01\%$, чтобы избежать дефицита углерода ($< 6,0\%$), приводящего к неполной фазе WC или избытку углерода ($> 6,2\%$), образующему свободный углерод. Стабильное содержание углерода может снизить флуктуацию коэрцитивной силы ($< 5\% \pm 1\%$) и отклонение M_s . Равномерное распределение углерода может быть обеспечено точным подбором углерода (молярное соотношение WC:Co 6,13:1 $\pm 0,01$) или контролем атмосферы печи карбонизации (соотношение CO/CO₂ 1:1 $\pm 0,1$). Коэрцитивная сила образцов с недостатком углерода может возрасти до 110 Э, а M_s снизится на 5%-10%. Избыточный углерод ослабит магнитную сеть Co, что требует строгого контроля для поддержания магнитной стабильности.

Что касается спецификаций испытаний, для магнитных испытаний использовался вибрационный магнитометр (VSM). Приложенная напряженность магнитного поля составляла 1 Тл $\pm 0,01$ Тл, а точность измерений составляла $\pm 0,1$ эме/г для обеспечения надежности данных. Размер образца составлял 10 $\times$ 10 $\times$ 5 мм $\pm 0,1$ мм. Температура испытания контролировалась на уровне 23°C $\pm 2^\circ\text{C}$, а влажность составляла $< 65\%$, чтобы избежать влияния окружающей среды. Измерение повторялось 5 раз, и брали среднее значение. Для анализа распределения Co/Ni и уровня дефектов ($< 0,1\%$) использовались SEM и EDS. Например, WC10Co спекался при 1450°C $\pm 10^\circ\text{C}$, при этом M_s составляла около 8 эме/г $\pm 0,5$ эме/г и коэрцитивная сила 100 Э ± 10 Э. Точность обнаружения превысила 98% $\pm 1\%$, что полностью соответствует требованиям неразрушающего контроля.

В условиях WC10CoNi (Co 6% + Ni 4%), спеченного при 1450°C, размера зерна 0,5 мкм и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

отклонения углерода $< 0,1\%$, M_s оптимизирован до $7,8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, а коэрцитивная сила стабилизирована на уровне $98 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$, что лучше целевого значения. Полировка поверхности ($R_a < 0,05 \text{ мкм}$) дополнительно снижает магнитные флуктуации, а коррозионная стойкость Ni повышает применимость материала во влажных средах. Эти оптимизации позволяют цементированному карбиду хорошо работать при магнитном обнаружении и оценке механических свойств, закладывая основу для неразрушающего контроля и высокопроизводительных производственных приложений.

Магнитные свойства цементированного карбида оптимизированы путем балансировки магнитных свойств и коррозионной стойкости за счет содержания Co ($10\% \pm 1\%$) и добавления Ni ($8\%-10\%$). Спекание при 1450°C обеспечивает плотность ($> 99,5\%$) и равномерность распределения. Зерна $0,51 \text{ мкм}$ и отклонение углерода ($< 0,1\%$) стабилизируют коэрцитивную силу. Испытание VSM обеспечивает высокоточную проверку. Оптимизированные образцы WC10Co или WC10Ni соответствуют требованиям $M_s < 10 \text{ emu/g}$ и коэрцитивной силы $\sim 100 \text{ Э}$, обеспечивая надежную поддержку для неразрушающего контроля и высокопроизводительных производственных приложений.

9.1.2.5 Инженерное применение магнитов из цементированного карбида

Магнитные свойства твердого сплава демонстрируют значительные преимущества в области машиностроения, особенно в неразрушающем тестировании и контроле качества. Его превосходная намагниченность насыщения (M_s) и коэрцитивная сила делают его идеальным инструментом для обнаружения внутренних дефектов и оценки свойств материалов. Благодаря оптимизации состава (например, Co $10\% \pm 1\%$, Ni $8\%-10\% \pm 0,1\%$) и процесса (например, вакуумное спекание при $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) технология магнитного обнаружения твердого сплава хорошо работает в различных сценариях применения, включая контроль качества инструментов, проверку авиационных компонентов, производство пресс-форм, магнитные носители записи и материалы электромагнитного экранирования. Эти приложения в полной мере демонстрируют потенциал магнитного обнаружения в повышении эффективности и надежности контроля качества твердого сплава в сочетании с высокой твердостью ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), вязкостью разрушения ($K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и износостойкостью (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3/\text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{м}$), обеспечивая техническую поддержку для высокотехнологичных отраслей промышленности.

Контроль качества инструмента

В области контроля качества инструмента WC10Co (содержание Co $10\% \pm 1\%$) стал предпочтительным материалом для обнаружения внутренних дефектов в режущих инструментах из-за его коэрцитивной силы $120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$. Образцы с высокой коэрцитивной силой могут точно определять трещины размером менее $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. Вибрационный магнитометр (VSM) анализирует изменения магнитного поля с проходимостью более $99\% \pm 1\%$, что значительно снижает риск выхода инструмента из строя из-за трещин. Мелкозернистая структура ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) усиливает сеть магнитной проницаемости фазы Co, в сочетании с равномерным распределением (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечивая высокую чувствительность обнаружения ($> 95\% \pm 2\%$), значительно повышая эффективность скрининга невалифицированных продуктов в процессе производства, особенно при высокоскоростной резке и производстве износостойких инструментов. По сравнению с традиционным магнитопорошковым контролем (чувствительность $\sim 90\% \pm 2\%$), высокое разрешение VSM ($< 0,1 \text{ emu/g}$) дополнительно повышает точность идентификации дефектов.

Инспекция авиационных деталей

Для применения в аэрокосмических компонентах WC8Ni (M_s составляет около $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) имеет низкую намагниченность и отличную коррозионную стойкость ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) широко используется для контроля качества ключевых структурных деталей. Ni как слабая ферромагнитная фаза снижает магнитные помехи, в то время как его равномерное распределение (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) обеспечивает стабильность магнитного контроля и может идентифицировать поры менее $0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, что имеет решающее значение для высоких требований к надежности авиационных компонентов, таких как лопатки турбин. Срок службы образцов WC8Ni после оптимизированного спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) превышает 10^4 часов $\pm 10^3$ часов, что значительно превышает традиционные материалы (такие как WC10Co, срок службы $\sim 5 \times 10^3$ часов $\pm 10^2$ часов). Магнитный контроль также можно комбинировать с ультразвуковой технологией для дальнейшего повышения скорости распознавания дефектов до $> 99\% \pm 0,5\%$, эффективно гарантируя безопасность авиационных компонентов в экстремальных условиях (таких как высокие температуры $> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

Изготовление пресс-форм

В области производства пресс-форм WC10Co (температура спекания $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) широко используется в производстве и контроле качества прецизионных пресс-форм с превосходными магнитными характеристиками M_s около $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ и отклонением содержания углерода $< 0,1\% \pm 0,01\%$. Стабильная интенсивность намагничивания и низкий уровень дефектов ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) позволяют достичь точности $> 98\% \pm 1\%$ посредством инспекции VSM, выявить внутренние микротрещины ($< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и аномальное содержание углерода, а также гарантировать, что точность обработки пресс-формы достигает микронного уровня ($< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$). Эта высокоточная технология магнитного обнаружения не только сокращает цикл производства пресс-форм (сокращается на $20\% \pm 2\%$), но и снижает процент брака, вызванного дефектами материала ($< 1\% \pm 0,5\%$). Она особенно хорошо работает в прецизионных штамповочных пресс-формах для автомобильных деталей и электронных компонентов, значительно повышая эффективность производства.

Магнитные носители информации

В области магнитных носителей записи сплавы WC-Co-Ni используются при производстве устройств хранения данных благодаря своей регулируемой магнитной проницаемости ($> 1000 \pm 50$). Регулируя содержание Co ($10\% \pm 1\%$) и Ni ($8\%-10\% \pm 0,1\%$), можно контролировать интенсивность намагничивания ($4-8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), а в сочетании с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мелкозернистой структурой ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) достигается высокая плотность записи данных ($> 10^{12} \text{ бит/дюйм}^2$). $\pm 10^{11} \text{ бит/дюйм}^2$). Анализ SEM показывает, что непрерывность сети Co-Ni ($> 95\% \pm 2\%$) обеспечивает магнитную однородность, а точность обнаружения VSM ($\pm 0,1 \text{ эме/г}$) поддерживает контроль качества и снижает риск размагничивания магнитных носителей записи ($< 0,1\% \pm 0,01\%$), что делает его пригодным для производства жестких дисков и ленточных накопителей.

Электромагнитные экранирующие материалы

При применении материалов для электромагнитного экранирования WC8Ni с низким M_s обеспечивает эффективное экранирование электромагнитных волн и подходит для базовых станций 5G и авионики. M_s составляет около $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, что снижает магнитные помехи и в сочетании с коррозионной стойкостью Ni ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) эффективность экранирования превышает $90\% \pm 2\%$ (частота $> 1 \text{ ГГц}$). Плотность ($> 99,5\% \pm 0,1\%$) и равномерное распределение (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) WC8Ni после оптимизированного спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) повышают стабильность магнитной дорожки, а уровень дефектов ($< 0,05\% \pm 0,01\%$), подтвержденный СЭМ, является низким, что продлевает срок службы ($> 10^4 \text{ часов} \pm 10^3 \text{ часов}$) и хорошо работает в высокочастотных электромагнитных средах.

Применение твердого сплава в магнитной технике выигрывает от его оптимизированной намагниченности ($4-8 \text{ эме/г} \pm 0,5 \text{ эме/г}$) и коэрцитивной силы ($100-120 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$), демонстрируя превосходные характеристики при контроле качества инструментов, проверке компонентов аэрокосмической отрасли, производстве пресс-форм, магнитных носителей записи и материалов для электромагнитного экранирования. Высокая коэрцитивность WC10Co обеспечивает точность обнаружения трещин ($> 99\% \pm 1\%$), низкая намагниченность WC8Ni поддерживает долговечные компоненты аэрокосмической отрасли ($> 10^4 \text{ часов} \pm 10^3 \text{ часов}$) и электромагнитное экранирование (эффективность $> 90\% \pm 2\%$), стабильные магнитные свойства WC10Co улучшают качество изготовления пресс-форм (точность $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), а сплав WC-Co-Ni расширяет возможности хранения данных (плотность $> 10^{12} \text{ бит/дюйм}^2 \pm 10^{11} \text{ бит/дюйм}^2$). В совокупности эти приложения демонстрируют ключевую роль магнитного обнаружения в повышении надежности и эффективности производства твердого сплава. В будущем, за счет дальнейшей оптимизации состава (например, нанозерна $< 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и процесса (например, многофазная конструкция), потенциал магнитного применения твердого сплава будет расширен в более высокотехнологичных областях (например, квантовые вычисления, технология 6G).

9.2 Износостойкие, коррозионностойкие и электропроводящие композиционные свойства твердого сплава

Многофункциональное развитие цементированного карбида требует от него превосходной износостойкости, коррозионной стойкости и электропроводности для удовлетворения все более разнообразных потребностей в инженерном применении. В частности, износостойкость должна достигать скорости износа (скорости износа) ниже $0,06 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$ для обеспечения стабильности материала при долгосрочном использовании; коррозионная стойкость требует потери веса менее $0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ для сопротивления влиянию коррозионной среды; электропроводность требует удельного сопротивления (удельного сопротивления) менее $12 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ для поддержания эффективных электрических характеристик. Эти характеристики совместно определяют потенциал применения твердого сплава в таких сценариях, как электронные формы (срок службы более 10^6 раз $\pm 10^5$ раз), морское оборудование (срок службы более 5 лет $\pm 0,5$ года) и токопроводящие детали (контактное сопротивление менее $0,1 \text{ мОм} \pm 0,01 \text{ мОм}$). Система WCTiCNi вводит TiC (твердость более HV 2000 ± 50) в качестве твердой фазы и Ni (плотность тока коррозии $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2$) $\pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$) в качестве коррозионно-стойкой связующей фазы, эффективно оптимизируя эти композитные свойства.

Теория износостойких, коррозионностойких и электропроводящих композиционных свойств твердого сплава

С теоретической точки зрения механизм производительности композитов WCTiCNi можно объяснить фазовыми диаграммами, электронными структурами и микроскопическими взаимодействиями в материаловедении. Во-первых, анализ фазовой диаграммы показывает, что растворимость между WC и TiC низкая ($< 5\% \pm 0,1\%$), что ограничивает межфазную диффузию, но во время высокотемпературного спекания синергетический эффект высокой твердости TiC (около HV 2200) и WC (около HV 1800) образует прочный твердый скелет, который значительно повышает износостойкость. Согласно уравнению износа Арчарда $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (где V — объем износа, k — коэффициент износа, F — нагрузка, L — расстояние скольжения, а H — твердость), добавление фазы высокой твердости снижает значение k, тем самым контролируя скорость износа ниже $0,06 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$. Во-вторых, как связующая фаза, Ni обладает превосходной коррозионной стойкостью благодаря своей высокой электрохимической стабильности. Низкая плотность тока коррозии указывает на то, что он обладает сильной пассивирующей способностью в кислых или соляных средах, а потеря веса может поддерживаться ниже $0,06 \text{ мг/см}^2$, что связано с тем, что уровень Ферми Ni (около 7 эВ) близок к Co (около 7,1 эВ), но имеет более низкую тенденцию к окислению. Кроме того, реализация проводимости зависит от характеристик миграции электронов фаз Ni и WC/TiC. Модель Друде показывает, что проводимость $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (где n — плотность носителей, e — заряд электрона, τ — время столкновения, m — эффективная масса), высокая электронная плотность Ni (около 10^{22} см^{-3}) в сочетании с частичной проводимостью WC (около 10^5 См/м) делает удельное сопротивление композитного материала стабильным на уровне около $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, что соответствует требованиям проводящих деталей. Микроскопически равномерное распределение частиц WC и TiC (отклонение $< 0,1\%$) было подтверждено методом СЭМ, а непрерывность сетки Ni ($> 95\%$) дополнительно снизила контактное сопротивление.

Этот раздел начинается с испытания производительности композитных материалов WCTiCNi (удельное сопротивление $< 12 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) в сочетании с анализом фазовой диаграммы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(растворимость $WC_{TiC} < 5\% \pm 0,1\%$), стандартами испытаний (ASTM G65, G59) и случаями, чтобы исследовать механизм и применение производительности композита. Например, твердость $WC_{10TiC_{10}Ni} > HV\ 1600 \pm 30$, потеря веса $0,06\text{ мг/см}^2 \pm 0,01\text{ мг/см}^2$, удельное сопротивление $11\text{ мКОм}\cdot\text{см} \pm 0,1\text{ мКОм}\cdot\text{см}$.

9.2.1.1 Обзор принципов и технологий композитных материалов на основе цементированного карбида WC_{TiCNi}

Композит WC_{TiCNi} представляет собой многофункциональный цементированный карбид, который значительно повышает износостойкость за счет введения TiC (твердость более $HV\ 2000 \pm 50$, содержание $5\% - 10\% \pm 0,1\%$) в качестве твердой фазы, в то время как Ni (содержание $8\% - 12\% \pm 0,1\%$) в качестве связующей фазы улучшает коррозионную стойкость и проводимость, стремясь достичь комплексных целей производительности: твердость выше $HV\ 1600 \pm 30$, потеря веса ниже $0,08\text{ мг/см}^2 \pm 0,01\text{ мг/см}^2$ и удельное сопротивление менее $12\text{ мКОм}\cdot\text{см} \pm 0,1\text{ мКОм}\cdot\text{см}$. Эти свойства позволяют ему соответствовать сценариям применения с высокими требованиями, таким как электронные формы (срок службы более 10^6 раз), морское оборудование (срок службы более 5 лет) и токопроводящие детали (контактное сопротивление менее $0,1\text{ мОм}$). Высокая твердость TiC обусловлена его ковалентной структурой связи (энергия связи TiC составляет около $500\text{ кДж/моль} \pm 10\text{ кДж/моль}$), что значительно повышает износостойкость за счет укрепления решетки; в то время как пассивирующий слой NiO/Ni (толщина около $10\text{ нм} \pm 1\text{ нм}$) снижает плотность тока коррозии (i_{corr}) за счет электрохимической стабильности и повышает коррозионную стойкость. Кроме того, энергия интерфейса между WC и TiC составляет около $1,5\text{ Дж/м}^2 \pm 0,1\text{ Дж/м}^2$ в сочетании с низкой растворимостью ($< 5\% \pm 0,1\%$), что обеспечивает хорошую совместимость и структурную стабильность между фазами. По сравнению с традиционной системой $WC-Co$, синергетическая оптимизация композитных материалов WC_{TiCNi} по износостойкости, коррозионной стойкости и проводимости дает ему уникальные преимущества.

9.2.1.2 Технология приготовления и эксплуатационные характеристики композитных материалов на основе карбида вольфрама WC_{TiCNi}

Процесс приготовления композиционных материалов WC_{TiCNi} включает несколько ключевых этапов: во-первых, дозирование порошка, размер частиц TiC контролируется на уровне $0,51\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$ для обеспечения равномерного диспергирования и упрочняющего эффекта; затем используется шаровая мельница (продолжительностью 40 часов ± 1 час) для достижения полного смешивания и измельчения порошка и оптимизации контакта между частицами; наконец, вакуумное спекание (температура $1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, давление $< 10^{-3}\text{ Па} \pm 10^{-4}\text{ Па}$) используется для получения плотной структуры с высокой плотностью ($> 99,5\% \pm 0,1\%$) и низкой пористостью ($< 0,1\% \pm 0,02\%$). Например, образец $WC_{10TiC_{10}Ni}$ показывает твердость $HV\ 1650 \pm 30$ и потерю веса $0,06\text{ мг/см}^2$ при вышеуказанном процессе. $\pm 0,01\text{ мг/см}^2$, удельное сопротивление $11\text{ мКОм}\cdot\text{см} \pm 0,1\text{ мКОм}\cdot\text{см}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

по сравнению с WC10Co (твердость HV 1500 ± 30 , потеря веса $0,09 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) имеет значительное улучшение характеристик. Это показывает, что введение TiC и Ni не только улучшает механические и электрохимические свойства материала, но и оптимизирует его проводящие свойства, делая его более подходящим для multifunctional применений. В этом разделе будут систематически изучаться эксплуатационные преимущества композитов WCTiCNi и методы их реализации посредством анализа механизмов, оптимизации процесса и тестирования производительности.

9.2.1.3 Анализ механизма действия композитов на основе цементированного карбида WCTiCNi

С точки зрения механизма высокая твердость TiC ($> \text{HV } 2000 \pm 50$) значительно повышает износостойкость за счет упрочнения решетки, а его постоянная решетки составляет около $4,3 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$, образуя плотную ковалентную сеть связей. Согласно уравнению износа Арчарда $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (где V — объем износа, k — коэффициент износа, F — нагрузка, L — расстояние скольжения, а H — твердость), высокое значение H TiC эффективно снижает k и контролирует скорость износа до $0,06 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$ или менее. Ni в качестве связующей фазы обладает электрохимической стабильностью (потенциал коррозии E_{corr} составляет около $0,1 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$ по сравнению с SCE) и образует на поверхности пассивирующий слой NiO (толщина $\sim 10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), значительно снижая плотность тока коррозии до $10^{-6} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$, тем самым контролируя потерю веса ниже $0,06 \text{ мг/см}^2$, что особенно заметно в морской среде или кислых средах. Прочность связи интерфейса между WC и TiC превышает $120 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, эффективно предотвращая отслоение частиц (скорость $< 0,05\% \pm 0,01\%$), а умеренное значение энергии интерфейса ($1,5 \text{ Дж/м}^2 \pm 0,1 \text{ Дж/м}^2$) дополнительно усиливает связь между фазами.

С точки зрения проводимости, сеть Ni (объемная доля $10\% \pm 1\%$) является основным фактором. Ее высокая электронная плотность (около 10^{22} см^{-3}) обеспечивает эффективный путь миграции электронов в соответствии с моделью Друде $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (где n — плотность носителей, e — заряд электрона, τ — время столкновения, а m — эффективная масса). Хотя более высокое удельное сопротивление TiC (около $50 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 2 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) немного увеличивает общее сопротивление, из-за непрерывности сети Ni ($> 95\% \pm 2\%$) удельное сопротивление композитного материала остается на уровне $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, что соответствует требованиям, предъявляемым к проводящим деталям. Микроструктурный анализ показывает, что изображения SEM указывают на то, что частицы TiC в WC10TiC10Ni распределены равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а фаза Ni образует непрерывную проводящую и устойчивую к коррозии сеть. EDS подтверждает, что содержание TiC составляет $10\% \pm 0,1\%$, а обнаружение XPS подтверждает образование слоя NiO (пик Ni 2p составляет около $854 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), что дополнительно подтверждает механизм устойчивости к коррозии.

Контроль размера зерна ($0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) повышает износостойкость за счет снижения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

скорости износа примерно на $10\% \pm 2\%$, но когда содержание TiC превышает $10\% \pm 0,1\%$, вязкость разрушения (K_{1c}) снижается примерно на $10\% \pm 2\%$. Это связано с тем, что чрезмерное содержание TiC приводит к концентрации напряжений на границах зерен, и эксплуатационные характеристики необходимо сбалансировать путем оптимизации соотношения. Температура спекания $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ обеспечивает высокую плотность и низкий уровень дефектов (пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$) материала. Благодаря вакуумной среде и точному контролю температуры гарантируется однородность фаз TiC и Ni, что позволяет избежать разделения фаз или сегрегации, вызванных высокотемпературным спеканием ($> 1500^\circ\text{C}$), тем самым поддерживая общую стабильность эксплуатационных характеристик композитного материала.

9.2.1.4 Анализ факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики композитов на основе карбида вольфрама WCTiCNi

Комплексные свойства композитов из цементированного карбида WCTiCNi , включая износостойкость, коррозионную стойкость и электропроводность, существенно зависят от множества факторов, которые совместно определяют их производительность в практических приложениях, изменяя микроструктуру, распределение фаз и взаимодействие между материалом и окружающей средой. Эти ключевые факторы влияния включают содержание TiC и Ni, размер зерна, температуру спекания и условия окружающей среды использования. Любой дисбаланс одного фактора может привести к отклонению производительности. Ниже приводится подробный анализ влияния различных факторов на производительность композита на основе теоретических механизмов, экспериментальных данных и случаев применения, а также исследуется направление его оптимизации для обеспечения его надежности в таких сценариях, как электронные формы, морское оборудование и проводящие компоненты.

(1) Содержание TiC

Содержание TiC является основным параметром, влияющим на износостойкость и механические свойства. Когда содержание TiC составляет $10\% \pm 0,1\%$, твердость может превышать $\text{HV } 1600 \pm 30$. Это связано с тем, что высокая твердость TiC ($> \text{HV } 2000 \pm 50$) обеспечивает эффект упрочнения решетки за счет ковалентных связей (энергия связи TiC составляет около 500 кДж/моль). Согласно уравнению износа Арчарда $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (где V — объем износа, k — коэффициент износа, F — нагрузка, L — расстояние скольжения, а H — твердость), высокое значение H TiC эффективно снижает k и поддерживает скорость износа на низком уровне. Однако, когда содержание TiC превышает $15\% \pm 0,1\%$, вязкость разрушения (K_{1c}) снижается примерно на $15\% \pm 3\%$, что объясняется концентрацией напряжений на границах зерен и ослаблением межфазных связей, вызванным чрезмерным содержанием частиц TiC. Анализ SEM показывает, что агломерация частиц TiC ($> 0,1\%$) еще больше усугубляет этот эффект, что приводит к увеличению скорости осыпания частиц ($> 0,05\%$). Например, K_{1c} образца WC15TiC10Ni составляет всего $8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ из-за высокого содержания TiC. $\pm 0,5$, в то время как WC10TiC10Ni достигает $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

указывает на то, что умеренное содержание TiC является ключом к оптимизации производительности. В будущем твердость и прочность можно будет сбалансировать, снизив содержание TiC до 8% -10% и оптимизировав распределение частиц.

(2) Содержание Ni

Содержание Ni играет доминирующую роль в проводимости и коррозионной стойкости. Когда содержание Ni составляет $10\% \pm 1\%$, удельное сопротивление остается ниже $12 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$. Это связано с тем, что сеть Ni (объемная доля $10\% \pm 1\%$) $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ обеспечивает эффективный путь миграции электронов в соответствии с моделью Друде, а плотность электронов (около 10^{22} см^{-3}) гарантирует, что проводимость соответствует потребностям проводящих деталей. В то же время пассивирующий слой NiO (толщина $\sim 10 \text{ нм}$) Ni снижает плотность тока коррозии ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ А/см}^2$) за счет электрохимической стабильности. Однако, когда содержание Ni превышает $12\% \pm 1\%$, твердость уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$. Это связано с тем, что избыточное содержание Ni ослабляет поддерживающую роль твердой фазы, что приводит к снижению прочности границ зерен. Анализ EDS показывает, что сегрегация фазы Ni ($> 0,5\%$) дополнительно влияет на однородность материала и увеличивает локальную коррозионную чувствительность. Поэтому оптимизация содержания Ni должна искать баланс между проводимостью, механическими свойствами и коррозионной стойкостью. Обычно идеальным диапазоном считается 8%-12%. Слишком высокое содержание Ni может потребоваться в сочетании с другими легирующими элементами (например, Co, $< 5\%$) для поддержания твердости.

(3) Размер зерна

Размер зерна оказывает значительное влияние на износостойкость и общую стабильность. Когда размер зерна составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, плотность границ зерен высока ($> 10^{14} \text{ м}^{-2}$), что сохраняет низкую скорость износа, препятствуя проникновению абразивных частиц и уменьшая осыпание частиц (скорость $< 0,05\%$). Эта мелкозернистая структура также улучшает равномерное распределение TiC и WC. Наблюдение с помощью СЭМ показывает, что сила связи границ зерен составляет $> 120 \text{ МПа}$, что снижает вероятность образования микротрещин. Однако, когда размер зерна превышает $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, скорость износа увеличивается примерно на $15\% \pm 3\%$. Это связано с тем, что крупные зерна уменьшают количество границ зерен, снижают износостойкость и увеличивают риск образования микротрещин, что влияет на долгосрочную долговечность материала. Контроль размера зерна обычно достигается путем добавления ингибиторов (таких как VC, $< 1\%$) и оптимизации времени шаровой мельницы ($40 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$) для поддержания стабильности производительности. В будущем можно будет исследовать наноразмерные зерна ($< 0,3 \text{ мкм}$) для дальнейшего снижения скорости износа.

(4) Температура спекания

Температура спекания имеет решающее значение для плотности материала и распределения фаз. При $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ композиты WCTiCNi достигают высокой плотности ($> 99,5\% \pm 0,1\%$) и низкой пористости ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), обеспечивая равномерное распределение фаз TiC и Ni

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(отклонение $< 0,1\%$), что достигается вакуумным спеканием (давление $< 10^{-3}$ Па), эффективно снижая окисление и дефекты. Однако, когда температура спекания превышает $1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, сегрегация увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$, миграция фазы Ni приводит к повышению локальной коррозионной чувствительности, а твердость и проводимость могут снизиться на $5\%-8\%$. Анализ SEM показывает, что зона сегрегации ($> 0,5\%$) значительно влияет на постоянство характеристик и увеличивает пористость ($> 0,15\%$). Таким образом, оптимальной температурой спекания считается 1450°C , а микроструктуру можно дополнительно оптимизировать путем комбинирования ступенчатого спекания или горячего изостатического прессования (ГИП), а риск разделения фаз можно снизить путем точного контроля температуры ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) в будущем.

(5) Условия окружающей среды

Условия окружающей среды оказывают значительное влияние на коррозионную стойкость. В сильноокислой среде с $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ стабильность пассивирующего слоя NiO снижается, плотность тока коррозии (i_{corr}) увеличивается примерно на $20\% \pm 5\%$, а потеря веса может возрасти до $0,10 \text{ мг/см}^2$, что связано со смещением коррозионного потенциала (E_{corr}) Ni в электрохимическом поляризационном тесте (ASTM G59). Наблюдения SEM показывают, что глубина коррозионной язвы может достигать $0,5 \text{ мкм}$. В среде солевого тумана с концентрацией NaCl, превышающей $5\% \pm 0,1\%$, потеря веса увеличивается примерно на $15\% \pm 3\%$, что связано с тем, что ионы хлорида ускоряют локальную коррозию, и пассивирующий слой фазы Ni повреждается. Анализ XPS показывает, что толщина слоя NiO уменьшается ($< 5 \text{ нм}$). Оптимизация факторов окружающей среды требует нанесения поверхностного покрытия (например, CrN, толщина 2 мкм) или легирования (например, добавления Mo, $< 2\%$) для повышения коррозионной стойкости и продления срока службы. Особенно в применениях морского оборудования, улучшенная коррозионная стойкость может контролировать потерю веса ниже $0,05 \text{ мг/см}^2$.

9.2.1.5 Стратегия оптимизации производительности композитов на основе карбида вольфрама WCTiCNi

Для достижения твердости более $\text{HV } 1600 \pm 30$ потеря веса должна быть менее $0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, а с учетом электропроводности для удовлетворения потребностей multifunctional приложений оптимизация производительности композитов из цементированного карбида WCTiCNi требует всестороннего рассмотрения проектирования состава, процесса подготовки, регулирования микроструктуры и обработки поверхности. Эти стратегии направлены на обеспечение превосходной производительности материалов в таких сценариях, как электронные формы (срок службы $> 10^6$ раз), морское оборудование (срок службы > 5 лет) и проводящие детали (контактное сопротивление $< 0,1 \text{ мОм}$) за счет усиления синергии износостойкости, коррозионной стойкости и электропроводности. Ниже приводится подробное объяснение схемы оптимизации и эффекта ее реализации на основе теоретической основы, оптимизации процесса и проверки испытаний.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Оптимизация состава композитов на основе цементированного карбида WCTiCNi

Оптимизация состава является ключевым шагом в улучшении характеристик композитов WCTiCNi. Содержание TiC устанавливается в диапазоне $5\%-10\% \pm 0,1\%$. Высокая твердость TiC ($> HV 2000 \pm 50$) обеспечивает упрочнение решетки $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ за счет ковалентных связей (энергия связи TiC составляет около 500 кДж/моль). Согласно уравнению износа Арчарда (где V — объем износа, k — коэффициент износа, F — нагрузка, L — расстояние скольжения, а H — твердость), высокое значение H эффективно снижает скорость износа. Этот диапазон гарантирует, что твердость достигает значения выше HV 1600, избегая при этом снижения вязкости разрушения (K_{1c}), вызванного избыточным содержанием TiC ($> 15\%$). Содержание Ni контролируется на уровне $8\%-10\% \pm 1\%$. Пассивирующий слой NiO (толщина ~ 10 нм) Ni снижает коррозионную потерю веса до менее $0,06$ мг/см² за счет электрохимической стабильности ($i_{corr} < 10^{-6}$ А/см²), в то время как его высокая электронная плотность (около 10^{22} см⁻³) $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ поддерживает удельное сопротивление менее 12 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см в соответствии с моделью Друде. Соответствующее добавление следовых легирующих элементов (таких как VC, $< 1\%$) может дополнительно оптимизировать равномерное распределение TiC и Ni (отклонение $< 0,1\%$) и повысить силу межфазной связи (> 120 МПа), тем самым достигая всеобъемлющего баланса производительности.

(2) Процесс спекания композитных материалов из цементированного карбида WCTiCNi

Процесс спекания напрямую влияет на плотность и распределение фаз материала. Температура спекания установлена на уровне $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, чтобы избежать сегрегации Ni ($> 0,5\%$), вызванной высокой температурой ($> 1500^\circ\text{C}$). Анализ SEM показывает, что при этой температуре фазы TiC и Ni распределены равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а пористость низкая ($< 0,1\% \pm 0,02\%$). Вакуумное спекание (давление $< 10^{-3}$ Па $\pm 10^{-4}$ Па) обеспечивает плотность более $99,5\% \pm 0,1\%$, снижает окисление и дефекты, а также повышает износостойкость и коррозионную стойкость. Теоретически высокая плотность уменьшает путь проникновения агрессивных сред, и потеря веса может быть дополнительно снижена. Использование технологии ступенчатого спекания (предварительное спекание при 1200°C и последующее повышение температуры до 1450°C) или горячего изостатического прессования (HIP) позволяет оптимизировать микроструктуру, подавить аномальный рост зерен, снизить скорость износа примерно на $5-8\%$ и устранить внутренние напряжения посредством низкотемпературного отпуска ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), стабилизировать пассивирующий слой NiO и продлить срок службы.

(3) Контроль зерна композитов на основе цементированного карбида WCTiCNi

Точный контроль размера зерна является важным средством для улучшения износостойкости и механических свойств. Размер зерна WC и TiC контролируется на уровне $0,51$ мкм $\pm 0,01$ мкм. Высокая плотность границ зерен ($> 10^{14}$ м⁻²) препятствует проникновению абразивных частиц и осыпанию частиц (скорость $< 0,05\%$). Согласно теории упрочнения границ зерен, мелкие зерна улучшают равномерное распределение твердых фаз. Наблюдения SEM показывают, что сила связи границ зерен составляет > 120 МПа, тем самым

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сохраняя скорость износа на низком уровне при одновременном балансе твердости и прочности ($K_{1c} > 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Если размер зерна превышает $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, количество границ зерен уменьшается, скорость износа может увеличиться на $15\% \pm 3\%$, а прочность снижается. Необходимо обеспечить измельчение зерна путем добавления ингибиторов (например, VC, 0,5%-1%) и увеличения времени шаровой мельницы ($40 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$). В будущем можно будет исследовать наноразмерные зерна ($< 0,3 \text{ мкм}$) для дальнейшего снижения скорости износа и повышения твердости, но следует обратить внимание на производственные затраты и сложность процесса.

(4) Обработка поверхности композитных материалов из цементированного карбида WCTiCNi

Обработка поверхности является эффективным средством оптимизации износостойкости и коррозионной стойкости. Алмазная полировка или химико-механическая полировка (ХМП) используется для контроля шероховатости поверхности (R_a) до $< 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, уменьшения дефектов поверхности и микротрещин, а также, теоретически, выравнивания поверхности для уменьшения адгезии абразивных частиц и проникновения коррозионных сред. Согласно контактной механике, снижение шероховатости поверхности на $10\% \pm 2\%$ может снизить скорость износа примерно на $10\% \pm 2\%$, а также уменьшится контактное сопротивление ($< 0,1 \text{ МОм}$), что повысит производительность токопроводящих деталей. После полировки ультразвуковая очистка сочетается с удалением остатков, дальнейшим улучшением целостности пассивирующего слоя NiO (толщина $> 10 \text{ нм}$), а потеря веса может быть стабилизирована ниже $0,06 \text{ мг/см}^2$. В будущем могут быть разработаны коррозионно-стойкие покрытия (например, TiN, толщиной $1,5\text{--}2 \text{ мкм}$) или плазменное азотирование для дальнейшего повышения коррозионной стойкости в экстремальных средах (например, при $\text{pH} < 2$).

(5) Технические условия испытаний для композитов на основе карбида вольфрама WCTiCNi

Проверка производительности проводится в соответствии с международными стандартами для обеспечения надежности и повторяемости данных. Испытание на износостойкость основано на ASTM G65 (испытание на износ сухим песком/резиновым колесом) для оценки скорости износа. Испытание на коррозионную стойкость основано на ASTM G59 (испытание электрохимической поляризации) для измерения потери веса и i_{corr} . Для измерения удельного сопротивления используется четырехзондовый метод (точность $\pm 0,01 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$). Размер образца для испытания составляет $10 \times 10 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$. Условия окружающей среды контролируются при температуре $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, а влажность $< 65\%$. Среднее значение берется после повторения измерения 5 раз. Микроструктура и распределение фаз анализируются путем объединения SEM и EDS (отклонение $< 0,1\%$). Например, после спекания WC10TiC10Ni при температуре $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ твердость достигает $\text{HV } 1650 \pm 30$, потеря веса составляет $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, а удельное сопротивление — $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, что лучше целевых значений, что подтверждает эффективность стратегии оптимизации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Комплексный эффект оптимизации и перспективы применения

Благодаря синергетическому эффекту вышеуказанных стратегий образец WC10TiC10Ni, спеченный при 1450 °C, с размером зерна 0,51 мкм и Ra < 0,05 мкм, имеет твердость HV 1650, потерю веса 0,06 мг/см² и удельное сопротивление 11 мкОм · см, что лучше первоначальной цели. Износостойкость соответствует требованиям электронных форм (срок службы > 10⁶ раз), коррозионная стойкость поддерживает морское оборудование (срок службы > 5 лет), а проводимость подходит для токопроводящих деталей (контактное сопротивление < 0,1 мОм). По сравнению с WC10Co (твердость HV 1500, потеря веса 0,09 мг/см²) система WCTiCNi имеет очевидные преимущества в универсальности. В будущем твердость может быть дополнительно увеличена до более чем 1700 HV, а потеря веса может быть снижена до 0,05 мг/см² за счет внедрения технологии нано-TiC (<100 нм) или плазменного спекания (SPS), что расширит потенциал его применения в области авиации и высокотехнологичной электроники.

Оптимизация производительности цементированного карбида WCTiCNi обеспечивает баланс твердости и коррозионной стойкости за счет содержания TiC (5–10 %) и содержания Ni (8–10 %), вакуумное спекание при 1450 °C обеспечивает плотность (> 99,5 %) и однородность, контроль зерна 0,51 мкм повышает износостойкость, полировка поверхности (Ra < 0,05 мкм) снижает скорость износа, а стандартные испытания ASTM подтверждают, что производительность соответствует стандартам. Если взять WC10TiC10Ni в качестве примера, его твердость HV 1650, потеря веса 0,06 мг/см² и удельное сопротивление 11 мкОм·см отвечают многофункциональным потребностям. В будущем нанотехнологии и модификация поверхности могут еще больше повысить его применимость в экстремальных условиях.

9.2.1.6 Инженерные применения композитов на основе цементированного карбида WCTiCNi

Композиты из цементированного карбида WCTiCNi продемонстрировали превосходные эксплуатационные характеристики в различных областях техники благодаря своей превосходной износостойкости, коррозионной стойкости и электропроводности. Благодаря оптимизации соотношения TiC и Ni и сложному процессу подготовки материал успешно удовлетворяет потребности сценариев с высоким спросом, таких как электронные формы, морское оборудование и токопроводящие контакты. Эти приложения не только подтверждают многофункциональные свойства композитов WCTiCNi, но и закладывают основу для их широкого использования в экстремальных условиях и прецизионном производстве. Далее подробно обсуждается его инженерная прикладная ценность и его роль в содействии развитию отрасли на основе сценариев применения, преимуществ производительности и реальных случаев.

(1) Электронная пресс-форма из композитного карбида вольфрама WCTiCNi

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В области электронных пресс-форм WC10TiC10Ni является идеальным выбором благодаря своей превосходной износостойкости и высокой твердости. Материал основан на мелкозернистости и имеет очень высокую твердость. Добавление TiC значительно снижает износ и обеспечивает долговременную стабильность пресс-формы при высокочастотной штамповке. Срок его службы превышает миллион раз, что намного превышает показатели традиционных материалов. Кроме того, равномерное распределение и защита от коррозии фазы Ni снижают риск выхода из строя пресс-формы из-за коррозии во влажной заводской среде, что делает его широко используемым в производстве прецизионных электронных компонентов, таких как производство корпусов мобильных телефонов и пресс-форм разъемов, значительно повышая эффективность производства и качество продукции.

(2) Детали судового оборудования из композитного карбида вольфрама WCTiCNi

Для применения в морском оборудовании WC8TiC10Ni хорошо работает благодаря своей превосходной коррозионной стойкости и износостойкости. Благодаря полировке поверхности поверхность становится очень гладкой, что снижает проникновение коррозионных сред, а потеря веса сохраняется на низком уровне, что соответствует требованиям к эксплуатации в условиях солевого тумана, со сроком службы более пяти лет. Ni, как связующая фаза, обеспечивает сильную стойкость к эрозии морской воды, в то время как содержание TiC повышает твердость материала, обеспечивая длительную долговечность оборудования в морских буровых установках и судовых компонентах. Кроме того, умеренное содержание Ni также поддерживает проводимость материала, поддерживая требования к электрическим соединениям, таким как датчики и системы управления для морских платформ, демонстрируя его надежность в суровых условиях.

(3) Проводящие контакты из композитного карбида вольфрама WCTiCNi

При применении токопроводящих контактов WC10TiC10Ni предпочитают за его превосходные электрические свойства. Удельное сопротивление поддерживается на очень низком уровне, а сеть Ni обеспечивает эффективный ток. Контактное сопротивление также очень мало, что соответствует требованиям высокочастотных переключателей и микроэлектронного оборудования. Его срок службы превышает один миллион раз благодаря высокой твердости TiC, которая снижает износ, а коррозионная стойкость Ni обеспечивает дополнительную защиту во влажных или кислотных средах, что позволяет ему хорошо работать в автомобильных электронных блоках управления и промышленных реле, значительно снижая износ дуги и отказ контактов.

(4) Покрытие авиационных деталей из композитного карбида вольфрама WCTiCNi

Композиты WCTiCNi также демонстрируют большой потенциал в покрытиях авиационных компонентов. Например, WC10TiC8Ni используется для износостойких покрытий для лопаток турбин и двигателей. Его высокая твердость и высокая термостойкость (способность выдерживать температуры выше 800 °C) значительно продлевают срок службы компонентов. TiC обеспечивает дополнительную защиту поверхности, снижая износ, вызванный высокоскоростным потоком воздуха и очисткой частицами, в то время как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионная стойкость Ni обеспечивает стабильность покрытия в условиях высокой влажности и соляного тумана, продлевая циклы технического обслуживания. Это покрытие также имеет определенную степень проводимости, поддерживая требования заземления авионики, и хорошо работает в авиационных двигателях и компонентах воздушных винтов, повышая общую безопасность полетов.

(5) Композитные инструменты для бурения нефтяных скважин из цементированного карбида WCTiCNi

В нефтяной промышленности WC12TiC10Ni широко используется в буровых долотах и режущих инструментах благодаря своей превосходной износостойкости и коррозионной стойкости. TiC повышает износостойкость материала, позволяя ему работать в течение длительного времени в высокотвердых горных породах, в то время как добавление Ni значительно улучшает коррозионную стойкость инструмента в серо- и хлорсодержащих средах, сохраняя потерю веса на очень низком уровне, обеспечивая эффективность бурения и срок службы инструмента. Полировка поверхности дополнительно снижает риск износа и коррозии, позволяя ему хорошо работать в глубоководных и наземных буровых операциях, сокращая частоту замены и снижая эксплуатационные расходы.

(6) Медицинские изделия из композитного карбида вольфрама WCTiCNi

WC8TiC5Ni также появляется в области медицинских приборов, таких как производство ортопедических скальпелей и стоматологических бормашин. Высокая твердость TiC гарантирует, что режущая кромка остается острой и соответствует требованиям прецизионной хирургии, в то время как биосовместимость и коррозионная стойкость Ni снижают риск коррозии в жидкой среде человеческого тела, а потеря веса очень низкая, что продлевает срок службы инструмента. Кроме того, его низкое удельное сопротивление поддерживает требования к проводимости определенных электрохирургических инструментов, хорошо работает в стерильных и влажных средах и повышает безопасность и эффективность хирургии.

(7) Комплексные преимущества и расширенные возможности применения композитных материалов из цементированного карбида WCTiCNi

Эти приложения в полной мере демонстрируют синергетическую оптимизацию композитных материалов WCTiCNi с точки зрения износостойкости, коррозионной стойкости и электропроводности. В электронных формах его высокая твердость и низкая скорость износа продлевают срок службы формы; в морском оборудовании коррозионная стойкость Ni обеспечивает долгосрочную службу; в токопроводящих контактах низкое удельное сопротивление и длительный срок службы соответствуют высоким требованиям надежности; в покрытиях авиационных компонентов его высокая термостойкость и износостойкость улучшают срок службы компонентов; в инструментах для бурения нефтяных скважин износостойкость и коррозионная стойкость повышают эффективность работы; в медицинских приборах биосовместимость и высокая твердость обеспечивают безопасность. По сравнению с традиционными материалами WC-Co система WCTiCNi имеет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

очевидные преимущества в универсальности. Например, потеря веса WC10Co выше, чем у WC10TiC10Ni, а коррозионная стойкость значительно улучшена.

Кроме того, WCTiCNi также демонстрирует потенциал для расширенных применений. Например, в износостойком слое железнодорожных путей его высокая твердость может снизить износ; в носимых электронных устройствах его низкое удельное сопротивление поддерживает гибкие проводящие компоненты. В будущем, путем корректировки состава материала и технологии обработки поверхности, его область применения в области энергетики, медицины и транспорта может быть еще больше расширена.

Композиты из цементированного карбида WCTiCNi хорошо работают в электронных формах, морском оборудовании, проводящих контактах, покрытиях авиационных компонентов, инструментах для бурения нефтяных скважин и медицинских устройствах. Высокая твердость, низкая скорость износа и длительный срок службы WC10TiC10Ni соответствуют требованиям к формам, низкая потеря веса и длительный срок службы WC8TiC10Ni поддерживают морские приложения, низкое удельное сопротивление и контактные характеристики WC10TiC10Ni обеспечивают надежность контакта, высокая термостойкость WC10TiC8Ni увеличивает срок службы авиационных компонентов, износостойкость и коррозионная стойкость WC12TiC10Ni оптимизируют эффективность бурения, а биосовместимость WC8TiC5Ni поддерживает медицинские устройства. Эти приложения подтверждают комплексные преимущества WCTiCNi в износостойкости, коррозионной стойкости и проводимости. В будущем, за счет совершенствования процессов и инноваций в материалах, его потенциал применения в различных областях техники может быть еще больше расширен.

9.2.2 Тест производительности композитов из цементированного карбида WCTiCNi

9.2.2.1 Принцип испытания эксплуатационных характеристик композитных материалов на основе карбида вольфрама WCTiCNi

Тестирование производительности является основным средством для оценки комплексной производительности композитов из цементированного карбида WCTiCNi. Оно количественно определяет твердость (целевое значение $> HV\ 1600 \pm 30$), скорость износа (целевое значение $< 0,06\text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$), потерю веса (целевое значение $< 0,08\text{ мг/см}^2 \pm 0,01\text{ мг/см}^2$) и удельное сопротивление (целевое значение $< 12\text{ мкОм}\cdot\text{см} \pm 0,1\text{ мкОм}\cdot\text{см}$), а также систематически исследует его износостойкость, коррозионную стойкость и проводимость. Эти показатели напрямую отражают надежность и долговечность материала в практических приложениях. Стандарты испытаний включают ASTM G65 (испытание на износ сухим песком) для оценки износостойкости, ASTM G59 (испытание на электрохимическую коррозию) для оценки коррозионной стойкости и метод четырех зондов для измерения проводимости, направленные на обеспечение превосходных характеристик материалов WCTiCNi в области электроники (например, контактное сопротивление $< 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мОм $\pm$ 0,01 мОм) и морской среды (например, срок службы > 5 лет $\pm$ 0,5 года). Процесс испытаний не только предоставляет количественные данные, но и обеспечивает научную основу для оптимизации материалов и улучшения процессов.

9.2.2.2 Методы и оборудование для испытаний эксплуатационных характеристик композитного материала из цементированного карбида WCTiCNi

Тестирование производительности основано на передовом испытательном оборудовании и стандартизированных процедурах. Твердомер Виккерса выполняет измерение вдавливания на поверхности материала с нагрузкой $10 \text{ кг} \pm 0,1 \text{ кг}$ для точной оценки значения твердости, отражающего вклад высокой твердости ($> \text{HV } 2000$) фазы TiC в износостойкость. Тестер износа имитирует реальные рабочие условия с нагрузкой $130 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$ и количественно определяет скорость износа с помощью испытания на износ сухим песком (ASTM G65). Очистка и трение частиц песка в условиях испытания имитируют среды с высоким износом, такие как сценарии использования электронных форм и инструментов для бурения нефтяных скважин. Электрохимическая рабочая станция выполняет испытания на коррозию (ASTM G59) с потенциальной точностью $\pm 0,001 \text{ В}$ и оценивает коррозионную стойкость фазы Ni и стабильность ее пассивирующего слоя NiO путем измерения потери веса и плотности тока коррозии в 3,5% растворе NaCl. Правило четырех зондов точно определяет удельное сопротивление, применяя постоянный ток и измеряя падение напряжения, отражающее проводящий вклад сети Ni. Размер образца обычно составляет $10 \times 10 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, а испытательная среда контролируется при температуре $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ и влажности $< 65\%$ для снижения помех от факторов окружающей среды. Тест повторяется 5 раз, и берется среднее значение для обеспечения надежности и статистической значимости данных.

(1) Анализ данных и проверка производительности

Данные испытаний раскрывают эксплуатационные преимущества материалов WCTiCNi посредством комплексного анализа. Взяв в качестве примера WC10TiC10Ni, его твердость достигает $\text{HV } 1650 \pm 30$, что указывает на то, что содержание TiC ($10\% \pm 0,1\%$) и мелкозернистая структура ($0,51 \text{ мкм}$) эффективно повышают износостойкость, при этом скорость износа составляет $0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$. Это лучше целевого значения, что демонстрирует превосходство при высокочастотной штамповке и резке. Потеря веса $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$ ниже $0,08 \text{ мг/см}^2$, что доказывает, что содержание Ni ($10\% \pm 1\%$) обеспечивает хорошую защиту от коррозии через пассивирующий слой NiO (толщина $\sim 10 \text{ нм}$), отвечая требованиям долгосрочного обслуживания морского оборудования и медицинских приборов. Удельное сопротивление составляет $11 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$ и ниже $12 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, что указывает на то, что непрерывность сети Ni ($> 95\%$) обеспечивает эффективную проводимость и поддерживает применение проводящих контактов и авионики. Анализы SEM и EDS дополнительно подтверждают равномерное распределение частиц TiC (отклонение $< 0,1\%$) и стабильность фазы Ni, а обнаружение XPS подтверждает образование слоя NiO (положение пика Ni 2p $\sim 854 \text{ эВ}$), обеспечивая микроскопическое подтверждение данных о производительности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Прикладная и расширенная проверка

Результаты испытаний напрямую направляют применение материалов WCTiCNi в конкретных инженерных сценариях. В электронных формах твердость и низкая скорость износа обеспечивают срок службы более миллиона раз; в морском оборудовании низкая потеря веса обеспечивает срок службы более пяти лет; в токопроводящих контактах низкое удельное сопротивление соответствует высоким требованиям надежности. Кроме того, испытания производительности были распространены и на другие области, такие как покрытия авиационных компонентов. Высокая твердость и высокая термостойкость ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) WC10TiC8Ni подтвердили его применимость в лопатках турбин с помощью испытаний на износостойкость и коррозионную стойкость; инструменты для бурения нефтяных скважин, низкая скорость износа и коррозионная стойкость WC12TiC10Ni подтвердили его преимущества в серосодержащих средах с помощью имитационных испытаний; медицинские приборы, низкая потеря веса и биосовместимость WC8TiC5Ni поддерживают использование ортопедических инструментов с помощью испытаний на коррозионную стойкость. Данные испытаний также дают основу для оптимизации. Например, слишком большой размер зерна ($> 2\text{ }\mu\text{m}$) приведет к увеличению скорости износа на 15%, а слишком высокая температура спекания ($> 1500^{\circ}\text{C}$) может увеличить сегрегацию на 10%, что необходимо контролировать с помощью корректировки процесса. В будущем можно будет ввести динамические испытания на износ и долгосрочное моделирование коррозии для дальнейшей проверки характеристик материалов в экстремальных условиях.

9.2.2.3 Анализ механизма испытаний производительности композитных материалов из цементированного карбида WCTiCNi

Анализ механизма испытания производительности композитных материалов из цементированного карбида WCTiCNi направлен на глубокое выявление микроскопических механизмов, лежащих в основе его твердости, скорости износа, коррозионных характеристик и удельного сопротивления. Эти характеристики совместно определяют эксплуатационные характеристики материалов в таких инженерных приложениях, как электроника, океан и проводимость. Объединяя экспериментальные данные и микроскопические наблюдения, анализируется упрочняющий эффект TiC, вклад Ni в прочность и коррозионную стойкость, а также влияние размера зерна и распределения фаз для предоставления теоретической поддержки для оптимизации эксплуатационных характеристик материала и расширения областей применения. В этом разделе будут подробно обсуждаться аспекты испытания твердости, механизма износа, коррозионного поведения и характеристик удельного сопротивления, а также проверка его механизма в сочетании с фактическими результатами испытаний.

(1) Механизм испытания на твердость

Испытание на твердость в основном отражает эффект усиления TiC на композитных материалах WCTiCNi. Собственная твердость TiC превышает $\text{HV } 2000 \pm 50$, что обусловлено

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

его плотной ковалентной структурой связей. Эта высокая твердость значительно улучшает общие характеристики материала за счет укрепления решетки. Если взять в качестве примера WC10TiC10Ni, его твердость достигает $HV\ 1650 \pm 30$, что достигается синергетическим вкладом WC (около $HV\ 1800 \pm 30$) и TiC. WC обеспечивает основную твердость как основную твердую фазу, а добавление TiC дополнительно повышает сопротивление сжатию поверхности. В испытании для измерения вдавливания поверхности использовался твердомер Виккерса (нагрузка $10\text{ кг} \pm 0,1\text{ кг}$). Мелкозернистая структура ($0,5\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$) дополнительно улучшает сопротивление деформации за счет увеличения плотности границ зерен ($> 10^{14}\text{ м}^{-2}$), что обеспечивает равномерное распределение твердости и снижает локальное размягчение. Наблюдения с помощью СЭМ показали, что частицы TiC равномерно внедрены в матрицу WC (отклонение $< 0,1\%$), что повышает прочность межфазной связи ($> 120\text{ МПа}$), тем самым поддерживая высокие показатели твердости.

(2) Анализ механизма износа

Испытание на износ количественно определяет износостойкость материала путем моделирования реальных рабочих условий. Скорость износа WC10TiC10Ni составляет менее $0,06\text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, на что влияет высокая твердость TiC и вязкость Ni. Процесс износа включает потерю массы (Δm , точность $\pm 0,01\text{ мг}$), плотность материала (ρ около $14,5\text{ г/см}^3 \pm 0,1\text{ г/см}^3$), приложенную нагрузку ($F\ 130\text{ Н} \pm 1\text{ Н}$) и расстояние скольжения ($L\ 1436\text{ м} \pm 1\text{ м}$), мелкие зерна ($0,5\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$) снижают скорость износа примерно на $10\% \pm 2\%$ за счет снижения абразивного проникновения и распространения трещин. Прочность Ni (K_{1c} около $12\text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) дополнительно уменьшила образование трещин износа (размер $< 0,1\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$), а морфология износа, наблюдаемая с помощью СЭМ, показала, что глубина канавки была менее $1\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$, что указывает на то, что поверхность имела высокую износостойкость. Напротив, слишком высокое содержание TiC ($> 15\%$) может привести к снижению прочности и увеличению риска микротрещин, и необходимо поддерживать баланс путем оптимизации соотношения.

(3) Механизм коррозионного поведения

Испытание на коррозию оценивает коррозионную стойкость WCTiCNi электрохимическим методом. При использовании Ni в качестве связующей фазы его плотность тока коррозии (i_{corr}) составляет около $10^{-6}\text{ А/см}^2 \pm 10^{-7}\text{ А/см}^2$, что значительно лучше, чем у традиционных материалов на основе Co (i_{corr} составляет около $10^{-5}\text{ А/см}^2 \pm 10^{-6}\text{ А/см}^2$), благодаря пассивирующему слою NiO (толщина $\sim 10\text{ нм}$), образованному на поверхности Ni. В 3,5% растворе NaCl потеря веса контролируется на уровне $0,06\text{ мг/см}^2 \pm 0,01\text{ мг/см}^2$, что ниже целевого значения $0,08\text{ мг/см}^2$. Анализ EDS подтвердил химический состав слоя NiO (соотношение Ni:O около $1:1 \pm 0,1$), что указывает на то, что электрохимическая стабильность Ni (потенциал коррозии $E_{\text{corr}} \sim 0,1\text{ В}$ по сравнению с SCE) эффективно замедляет скорость коррозии. Напротив, фаза Co с большей вероятностью образует оксиды в тех же условиях, и потеря веса может возрасти до $0,09\text{ мг/см}^2$. Добавление Ni значительно повышает долговечность материала в морской среде или кислой среде. Наблюдения SEM показывают, что глубина коррозионной язвы составляет $< 0,5\text{ мкм}$, что еще раз подтверждает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

его превосходство.

(4) Анализ характеристик сопротивления

Тест сопротивления измеряет электропроводность WCTiCNi методом четырех зондов. Удельное сопротивление WC10TiC10Ni стабильно на уровне $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, что ниже целевого значения $12 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$. Это в основном связано с непрерывностью сети Ni ($> 95\% \pm 2\%$). Ni обеспечивает эффективный путь миграции электронов в качестве связующей фазы. TiC, как неметаллическая твердая фаза, имеет высокое собственное удельное сопротивление (около $50 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$), что немного увеличивает общее сопротивление композитного материала (вклад $< 5\% \pm 1\%$), но из-за равномерного распределения фазы Ni (отклонение $< 0,1\%$) общая проводимость остается превосходной, что поддерживает применение проводящих контактов и авионики. Анализ СЭМ показывает, что фаза Ni образует трехмерную сетку, а ЭДС подтверждает, что содержание Ni ($10\% \pm 1\%$) отрицательно коррелирует с удельным сопротивлением, указывая на то, что умеренное увеличение содержания Ni может дополнительно снизить удельное сопротивление, но при этом необходимо сбалансировать твердость и коррозионную стойкость.

(5) Микроскопическое наблюдение и всеобъемлющий механизм

Микроскопический анализ дает интуитивное доказательство механизма производительности через SEM и EDS. Морфология износа показывает четкие канавки и следы износа. Размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ эффективно ограничивает расширение износа. Наличие слоя NiO снижает проникновение коррозионной среды. EDS обнаруживает корреляцию между содержанием TiC ($10\% \pm 0,1\%$) и твердостью и скоростью износа. Анализ XPS дополнительно проверяет химическое состояние слоя NiO (пик Ni 2p $\sim 854 \text{ эВ}$), подтверждая механизм коррозионной стойкости. Совместный эффект упрочнения границ зерен и межфазной связи ($> 120 \text{ МПа}$) снижает пористость ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) и уровень дефектов ($< 0,05\%$), а также улучшает общую стабильность производительности материала. По сравнению с WC10Co, WCTiCNi имеет очевидные преимущества в прочности и коррозионной стойкости, а данные по скорости износа и потере веса лучше, чем у традиционных материалов.

(6) Проверка приложений и направление оптимизации

Анализ механизма испытаний определяет производительность WCTiCNi в инженерных приложениях. В электронных формах высокая твердость и низкая скорость износа поддерживают срок службы более миллиона раз; в морском оборудовании низкая потеря веса обеспечивает срок службы более пяти лет; в токопроводящих контактах низкое удельное сопротивление соответствует высоким требованиям надежности. Будущая оптимизация может быть сосредоточена на уменьшении размера зерна до $0,3 \text{ мкм}$ для дальнейшего снижения скорости износа, увеличении содержания Ni до 12% для повышения коррозионной стойкости, но обратите внимание на риск снижения твердости; введение поверхностных покрытий (таких как TiN) может улучшить коррозионную стойкость и продлить срок службы в средах с $\text{pH} < 2$; использование технологии плазменного спекания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(SPS) может улучшить плотность и однородность для соответствия более высоким требованиям в авиационной и медицинской областях.

Механизм испытания производительности композитного материала из цементированного карбида WC₁₀TiC₁₀Ni показывает синергетический эффект усиления твердости TiC (HV 1650 ± 30), повышения ударной вязкости и коррозионной стойкости Ni (потеря веса 0,06 мг/см²), поддержки проводимости сети Ni (удельное сопротивление 11 мкОм·см), а скорость износа ниже 0,06 мм³/Н·м благодаря мелкому зерну и межфазной связи. СЭМ и ЭДС предоставляют микроскопические доказательства, а его эксплуатационные характеристики в различных областях могут быть дополнительно улучшены за счет оптимизации зерен и обработки поверхности в будущем.

9.2.2.4 Методы испытаний эксплуатационных характеристик композитных материалов из цементированного карбида WC₁₀TiC₁₀Ni

Для обеспечения точности и согласованности испытаний производительности композитного материала из цементированного карбида WC₁₀TiC₁₀Ni требуются стандартизированные методы испытаний и прецизионное оборудование, охватывающие ключевые показатели, такие как твердость, скорость износа, коррозионная стойкость и удельное сопротивление. Эти методы испытаний должны не только отражать износостойкость, коррозионную стойкость и проводимость материала, но и обеспечивать применимость данных в таких сценариях применения, как электронные формы, морское оборудование и проводящие контакты. Благодаря оптимизации условий испытаний и процесса подготовки образцов результаты испытаний могут обеспечить надежную основу для оценки производительности материала, улучшения процесса и инженерного применения. Ниже приводится подробное объяснение методов испытаний, параметров оборудования и подготовки образцов для обеспечения точности и повторяемости испытаний в соответствии с требованиями многофункциональной производительности.

(1) Испытание на твердость

Испытание на твердость проводится с помощью твердомера Виккерса. Прикладывая нагрузку 10 кг ± 0,1 кг для формирования отпечатка на поверхности материала, измеряют длину диагонали для расчета значения твердости с точностью ± 30, что отражает вклад фазы TiC (твердость > HV 2000) в общее упрочнение. Перед испытанием необходимо убедиться, что поверхность ровная и не имеет явных дефектов, а положения отпечатков расположены на расстоянии не менее 2,5 от длины диагонали отпечатка, чтобы избежать взаимного влияния. Каждое испытание повторяют 5 раз, и берется среднее значение для уменьшения погрешности. Твердость образца WC₁₀TiC₁₀Ni обычно достигает HV 1650 ± 30. Этот высокоточный метод испытаний подходит для оценки долговечности материалов при высокочастотной штамповке и резке, обеспечивая требования к применению электронных пресс-форм и инструментов для бурения нефтяных скважин.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Испытание на износ

Испытания на износ проводились в соответствии с ASTM G65 с использованием испытательной машины для испытания на износ сухого песка/резинового колеса с приложенной нагрузкой $130 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$ и расстоянием скольжения $1436 \text{ м} \pm 1 \text{ м}$ для имитации износа в реальных рабочих условиях. Во время испытания частицы песка промывались по поверхности образца с постоянной скоростью потока, а потеря массы измерялась с помощью прецизионных весов (точность $\pm 0,01 \text{ мг}$). Скорость износа рассчитывалась на основе плотности материала (приблизительно $14,5 \text{ г/см}^3$) с целевым значением менее $0,06 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$. Условия испытания контролируются при температуре $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, влажности $< 65\%$, и каждое испытание повторяется 3 раза, а среднее значение берется для обеспечения повторяемости $> 95\% \pm 2\%$. Например, скорость износа WC10TiC10Ni достигает $0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, что свидетельствует о том, что его мелкозернистая структура ($0,5 \text{ мкм}$) и равномерное распределение TiC (отклонение $< 0,1\%$) эффективно повышают износостойкость и подходят для покрытий авиационных деталей и износостойких слоев на железной дороге.

(3) Испытание на коррозию

Испытание на коррозию проводилось с использованием электрохимической рабочей станции с использованием стандарта ASTM G59 со скоростью сканирования $0,1 \text{ мВ/с} \pm 0,01 \text{ мВ/с}$, а плотность тока коррозии (i_{corr}) и потеря веса измерялись в $3,5\%$ растворе NaCl. После погружения образца на 24 часа поляризационная кривая регистрировалась с использованием трехэлектродной системы (рабочий электрод, электрод сравнения и вспомогательный электрод), а потеря веса определялась путем взвешивания (точность $\pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) с целевым значением менее $0,08 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$. Температура испытания контролировалась на уровне $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, pH стабилизировался на уровне 6,5-7,0, а среднее значение принималось после 3 повторений. Потеря веса WC10TiC10Ni составляет $0,06 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$, i_{corr} составляет около 10^{-6} А/см^2 , что лучше, чем у материалов на основе Co, что доказывает преимущество коррозионной стойкости пассивирующего слоя NiO (толщина $\sim 10 \text{ нм}$) в морском оборудовании и медицинских приборах.

(4) Тест сопротивления

В тесте сопротивления используется метод четырех зондов, при котором постоянный источник тока подается $1 \text{ мА} \pm 0,01 \text{ мА}$, а падение напряжения измеряется для расчета сопротивления с точностью $\pm 0,01 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ и целевым значением менее $12 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$. Расстояние между зондами составляет 1 мм , а поверхность образца не должна иметь оксидного слоя или грязи. Тест повторяется 5 раз, и берется среднее значение для обеспечения проводящего вклада сети Ni ($> 95\%$ непрерывности). Удельное сопротивление WC10TiC10Ni стабильно на уровне $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, что отражает высокую плотность электронов и равномерное распределение фазы Ni (отклонение $< 0,1\%$), что соответствует требованиям к низкому контактному сопротивлению ($< 0,1 \text{ мОм}$) токопроводящих контактов и носимой электроники.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Подготовка образца

Подготовка образца является ключевым шагом для обеспечения точности испытаний. Алмазная полировка или химико-механическая полировка (ХМП) используется для контроля шероховатости поверхности (Ra) до $< 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, уменьшения дефектов поверхности и микротрещин, а также выравнивания поверхности для снижения скорости износа и проникновения коррозионных сред. После полировки используется ультразвуковая очистка для удаления остатков. Размер образца составляет $10 \times 10 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, а фаска кромки составляет $0,2 \text{ мм}$, чтобы избежать концентрации напряжений. Однородность поверхности подготовленного образца проверяется с помощью СЭМ (отклонение $< 0,1\%$), что обеспечивает последовательную основу для последующих испытаний. Например, скорость износа образца WC10TiC10Ni при указанной выше подготовке составляет $0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, а повторяемость $> 95\% \pm 2\%$, что свидетельствует о том, что процесс полировки значительно повышает надежность и последовательность результатов испытаний.

(6) Экологический контроль и проверка данных

Во время испытания необходимо строго контролировать условия окружающей среды, при этом температура должна поддерживаться на уровне $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, а влажность $< 65\%$ для снижения помех от температуры и влажности. Оборудование калибровалось перед каждым испытанием для обеспечения стабильности параметров нагрузки, тока и потенциала. Проверка данных проводилась путем сравнения со стандартными образцами (например, WC10Co), с использованием СЭМ и ЭДС для анализа микроструктуры, подтверждения содержания TiC ($10\% \pm 0,1\%$) и распределения Ni (отклонение $< 0,1\%$), а XPS может дополнительно подтвердить образование слоя NiO. Результаты испытаний также могут быть распространены на другие сценарии применения, такие как авиационные покрытия (высокая термостойкость) и медицинские устройства (биосовместимость), обеспечивая поддержку данных для оптимизации материалов.

(7) Ориентация на применение и будущие улучшения

Эти методы испытаний напрямую направляют применение материалов WCTiCNi в машиностроении. Испытания на твердость поддерживают оценку долговечности электронных форм и инструментов для бурения нефтяных скважин. Испытания на износ оптимизируют производительность авиационных деталей и износостойких слоев для железнодорожного транспорта. Испытания на коррозию обеспечивают долговременную надежность морского оборудования и медицинских приборов. Испытания на сопротивление отвечают потребностям проводящих контактов и носимой электроники. В будущем могут быть внедрены динамическое моделирование износа (например, испытание на высокоскоростное вращение) и длительное коррозионное погружение (> 1000 часов) в сочетании с автоматизированным оборудованием (например, роботизированной системой полировки) для повышения эффективности, а наномасштабная обработка поверхности (например, покрытие TiN) может использоваться для дальнейшего снижения шероховатости до $Ra < 0,03 \text{ мкм}$, что повышает точность испытаний и эксплуатационные характеристики материала.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тесты производительности композитов из цементированного карбида $WC_{10}TiCNi$ были количественно оценены с помощью твердомера Виккерса (нагрузка 10 кг), ASTM G65 (нагрузка 130 Н), ASTM G59 (скорость сканирования 0,1 мВ/с) и четырехзондового метода (ток 1 мА) для количественной оценки твердости, скорости износа, потери веса и удельного сопротивления. Образцы были отполированы до $Ra < 0,05$ мкм для обеспечения точности. Взяв в качестве примера $WC_{10}TiCNi$, скорость износа $0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$ и повторяемость $> 95\%$ подтвердили надежность метода. В будущем динамические испытания и оптимизация поверхности могут еще больше повысить его потенциал применения в различных областях.

9.3 Самосмазывание и антиадгезия твердого сплава

9.3.1 Теория самосмазывания и антиадгезии твердого сплава

Самосмазывание (коэффициент трения $< 0,2 \pm 0,01$) и антиадгезия (сила адгезии $< 1 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$) — это свойства, которые необходимо улучшить твердому сплаву в современных промышленных приложениях. Эти свойства значительно улучшаются за счет введения твердых смазочных материалов (таких как MoS_2 и C, с содержанием $5\% \pm 0,1\%$) и оптимизации текстуры поверхности (глубина $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), что отвечает потребностям сценариев с высоким спросом, таких как высокоскоростная резка (скорость $> 500 \text{ м/мин} \pm 10 \text{ м/мин}$), сухая обработка (тепло трения $< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) и формование форм (сила извлечения формы $< 10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$). Традиционные материалы WCCo имеют высокий естественный коэффициент трения (около $0,5 \pm 0,05$), что затрудняет эффективную работу в условиях низкого трения и высокой адгезии, что приводит к проблемам износа и адгезии при сухой обработке и прецизионном формовании, тем самым ограничивая область их применения. Напротив, система $WC_{10}TiCNi$ сочетает в себе низкие сдвиговые свойства твердых смазок и эффект снижения сопротивления за счет текстурного дизайна, предоставляя новое решение для самосмазывания и антиадгезии.

(1) Введение твердых смазочных материалов

Твердые смазочные материалы MoS_2 и C являются ключом к достижению самосмазывания и антиадгезии. Как слоистое соединение, MoS_2 обеспечивает низкие характеристики трения из-за его слабой межслойной силы Ван-дер-Ваальса (около 0,1 эВ), а коэффициент трения может быть снижен до $0,15 \pm 0,01$, что подходит для высокоскоростной резки и сухой обработки. C (например, в форме графита или карбида) дополнительно снижает напряжение сдвига между поверхностями за счет своей пластинчатой структуры и самосмазывания, особенно при высоких температурах ($> 500^\circ\text{C}$). Когда содержание контролируется на уровне $5\% \pm 0,1\%$, твердая смазка равномерно распределяется в матрице WC и TiC (отклонение $< 0,1\%$). Анализ SEM показывает, что частицы MoS_2 и C внедряются в фазовую границу, что снижает прямой контакт металла, а сила адгезии снижается до $0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. По сравнению с высоким коэффициентом трения WCCo ($0,5 \pm 0,05$) эта добавка значительно снижает потери энергии и накопление тепла ($< 100^\circ\text{C}$), улучшая срок службы инструмента и эффективность обработки. Например, коэффициент трения WC_5MoS_2 при сухой резке составляет $0,15 \pm 0,01$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

а адгезия — $0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$, что соответствует требованиям по защите окружающей среды при обработке без СОЖ.

(2) Текстура поверхности и механизм смазки

$\mu\text{м} \pm 0,1 \mu\text{м}$ на поверхности материала посредством лазерного травления или обработки, что улучшает самосмазывающиеся и антиадгезионные свойства. Эти структуры текстуры могут захватывать и хранить частицы MoS_2 или C , уменьшая прямой контакт между парами трения. Кривая Штрибека показывает, что от области граничной смазки (низкая скорость и низкая нагрузка) до области смешанной смазки (средняя скорость и средняя нагрузка) коэффициент трения уменьшается до значения ниже 0,2 с улучшением распределения смазки. После оптимизации глубины текстуры и расстояния (около 100-120 $\mu\text{м}$) сила адгезии ($< 1 \text{ Н}$) эффективно снижается, особенно при формовании формы, сила извлечения из формы снижается до $10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$, что снижает адгезию заготовки и повреждение поверхности. Наблюдение с помощью СЭМ показывает, что толщина слоя смазки в текстуре составляет около 5-10 $\mu\text{м}$, что значительно снижает тенденцию к адгезии стружки к поверхности инструмента, особенно при обработке липких материалов (таких как алюминиевые сплавы). Кроме того, текстура способствует быстрому рассеиванию тепла трения ($< 100^\circ\text{C}$), избегая высокотемпературного склеивания и продлевая срок службы инструмента.

(3) Теория трибологии и стандарты испытаний

Трибологическая теория обеспечивает теоретическую поддержку механизма самосмазывания и антиадгезии. Кривая Штрибека описывает изменение состояния смазки в зависимости от нагрузки и скорости. Система WCTiCNi достигает перехода от граничной смазки к смешанной смазке с помощью твердых смазочных материалов и текстуры, а коэффициент трения снижается с 0,5 WCCo до 0,15-0,2. Для количественной оценки коэффициента трения и адгезии используется стандарт испытаний ASTM G99 (испытание на трение и износ штифта-диска). Диапазон нагрузки составляет 10-200 Н, скорость составляет 0,1-1 м/с, испытание повторяется 3 раза, а среднее значение берется для обеспечения надежности данных. Условия окружающей среды контролируются при температуре $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ и влажности $50\% \pm 5\%$, имитируя условия сухой обработки и высокоскоростного резания. В сочетании с анализом морфологии поверхности (СЭМ) и распределением смазочного материала (ЭДС) результаты испытаний подтверждают роль MoS_2 и C в снижении трения и адгезии, предоставляя данные, подтверждающие необходимость оптимизации материалов.

(4) Теория трибологии и стандарты испытаний

Трибологическая теория обеспечивает теоретическую поддержку механизма самосмазывания и антиадгезии. Кривая Штрибека описывает изменение состояния смазки в зависимости от нагрузки и скорости. Система WCTiCNi достигает перехода от граничной смазки к смешанной смазке с помощью твердых смазочных материалов и текстуры, а коэффициент трения снижается с 0,5 WCCo до 0,15-0,2. Для количественной оценки коэффициента трения и адгезии используется стандарт испытаний ASTM G99 (испытание на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

трение и износ штифта-диска). Диапазон нагрузки составляет 10-200 Н, скорость составляет 0,1-1 м/с, испытание повторяется 3 раза, а среднее значение берется для обеспечения надежности данных. Условия окружающей среды контролируются при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажности $50\% \pm 5\%$, имитируя условия сухой обработки и высокоскоростного резания. В сочетании с анализом морфологии поверхности (SEM) и распределением смазочного материала (EDS) результаты испытаний подтверждают роль MoS_2 и С в снижении трения и адгезии, предоставляя данные, подтверждающие необходимость оптимизации материалов.

Внедрение твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS_2 , С)

9.3.2.1 Обзор принципа и технологии твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида

Самосмазывающиеся свойства твердого сплава значительно улучшаются за счет введения твердых смазочных материалов MoS_2 и С. MoS_2 (прочность на межслойный сдвиг $< 1\text{ МПа} \pm 0,1\text{ МПа}$, содержание $5\% \pm 0,1\%$) и С (форма графита, коэффициент трения $< 0,1 \pm 0,01$) эффективно снижают коэффициент трения за счет низкого усилия сдвига ($< 1\text{ МПа} \pm 0,1\text{ МПа}$), а целевое значение устанавливается на уровне $< 0,2 \pm 0,01$, что соответствует требованиям низкого трения при высокоскоростной резке, сухой обработке и формовке. Слоистая структура MoS_2 (межслоевое расстояние около $6,2\text{ \AA} \pm 0,1\text{ \AA}$) обеспечивает гладкую поверхность скольжения, снижая сопротивление прямому контакту и трению между поверхностями, в то время как связь sp^2 С (энергия связи СС составляет около $600\text{ кДж/моль} \pm 10\text{ кДж/моль}$) снижает поверхностную адгезию ($< 1\text{ Н} \pm 0,1\text{ Н}$) за счет своих пластинчатых характеристик и повышает антиадгезионную эффективность. WC как матрица сохраняет высокую твердость ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) и обеспечивает структурную поддержку материала. Смазка должна быть равномерно распределена (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), чтобы обеспечить синергетическую оптимизацию эффекта смазки и механических свойств. Такое сочетание позволяет твердому сплаву адаптироваться к более высоким требованиям современной промышленности к низкому трению и антиадгезии на основе его традиционного преимущества высокой твердости.

Как типичное слоистое соединение, самосмазывающиеся свойства MoS_2 обусловлены его уникальной гексагональной кристаллической структурой. Слои соединены слабыми силами Ван-дер-Ваальса (около $0,1\text{ эВ}$). Эта низкая энергия связи позволяет слоям легко скользить под действием механического напряжения, что значительно снижает сопротивление трения, особенно при смазке без масла или в условиях высоких температур (например, $> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Когда содержание контролируется на уровне $5\% \pm 0,1\%$, частицы MoS_2 могут равномерно распределяться в матрице WC, образуя непрерывную смазочную сеть, уменьшая прямой контакт между металлами, тем самым эффективно подавляя накопление тепла трения ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) и продлевая срок службы инструмента. Графитовая форма С основана на его

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

двумерной пластинчатой структуре и низкой поверхностной энергии (около $0,1 \text{ Дж/м}^2$). Высокая стабильность и низкие сдвиговые характеристики связей sp^2 позволяют им демонстрировать превосходную антиадгезионную способность при высокоскоростной резке (например, $> 500 \text{ м/мин}$) или сухой обработке, а сила адгезии снижается до $< 1 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$, что особенно подходит для обработки липких материалов, таких как алюминиевые сплавы или медные сплавы. Оба работают синергетически, причем MoS_2 обеспечивает динамическую смазку, а С усиливает статическую антиадгезию, образуя дополнительный механизм смазки.

Как материал скелета твердого сплава, WC имеет высокую твердость ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) благодаря своей компактной структуре решетки и эффекту упрочнения границ зерен, что обеспечивает структурную целостность материала при высокой нагрузке. Однако сам WC имеет высокий коэффициент трения (около $0,5 \pm 0,05$) и не обладает естественной самосмазываемостью, поэтому этот недостаток компенсируется введением MoS_2 и С. Равномерное распределение смазочных материалов (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) является ключом к оптимизации производительности. Анализ SEM показывает, что частицы MoS_2 и С внедряются в фазовую границу WC, образуя смазочный слой толщиной около 5-10 мкм, что снижает межфазное трение и тенденцию к адгезии. Такое распределение достигается путем смешивания порошков и процесса шаровой мельницы, чтобы гарантировать, что смазочный материал не влияет на твердость и износостойкость WC, одновременно улучшая общую производительность. По сравнению с традиционными материалами WCCo система WCTiCNi снижает коэффициент трения примерно на 70%, а адгезию более чем на 50% за счет добавления смазочных материалов, что значительно повышает эффективность сухой обработки и качество извлечения из формы.

Кроме того, преимущества этой самосмазывающейся и антиадгезионной конструкции также отражаются в ее адаптивности. MoS_2 особенно хорошо работает в вакууме или инертной атмосфере, что подходит для применения в авиации и космической технике, в то время как высокая температурная стабильность С₂ поддерживает сферы энергетики и тяжелого машиностроения. Низкое усилие сдвига смазки не только снижает потери энергии, но и снижает термическое напряжение во время обработки ($< 100^\circ\text{C}$), продлевая срок службы инструментов и форм, что соответствует промышленной тенденции зеленого производства и устойчивого развития. Благодаря этой многофазной синергетической оптимизации цементированный карбид успешно достиг прорыва в низкофрикционных и антиадгезионных свойствах, сохраняя при этом высокую твердость, удовлетворяя потребности современной промышленности в эффективных, экологически чистых и многофункциональных материалах и обеспечивая надежную поддержку для высокоскоростной резки, сухой обработки и точной формовки.

9.3.2.2 Анализ механизма действия твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS_2 , С)

карбид, самосмазывающиеся и антиадгезионные свойства MoS_2 и С вытекают из их

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

уникальной микроструктуры и физико-химических свойств, которые значительно улучшают фрикционные свойства материалов при высокоскоростной резке, сухой обработке и формовке. Благодаря глубокому анализу механизма смазки, влияния механических свойств и микрораспределения в этом разделе исследуется, как MoS₂ и C синергетически снижают коэффициент трения и адгезию, сохраняя при этом структурную целостность матрицы WC, обеспечивая научную основу для оптимизации содержания смазки и процесса подготовки.

(1) Механизм смазки твердосплавным смазочным материалом (MoS₂, C)

Самосмазывающееся свойство MoS₂ в основном обусловлено слабой силой Ван-дер-Ваальса (около 0,1 эВ ± 0,01 эВ) в его слоистой кристаллической структуре. Эта низкая энергия связи позволяет слоям легко скользить под действием силы сдвига. В процессе трения образуется пленка переноса (толщиной около 10 нм ± 1 нм), покрывающая поверхность пары трения, а коэффициент трения снижается до 0,15 ± 0,01. Эта пленка переноса достигается путем осаждения и переориентации частиц MoS₂ на контактной поверхности, что значительно снижает сопротивление прямого контакта и трения между металлами, особенно в сухих или высокотемпературных средах (например, > 400 °C). C обеспечивает дополнительный эффект смазки за счет ламеллярного скольжения его гибридной структуры sp² (энергия скольжения около 0,01 эВ ± 0,001 эВ), а его низкая поверхностная энергия (около 0,1 Дж/м²) эффективно снижает адгезию до < 0,8 Н ± 0,1 Н, что особенно подходит для обработки липких материалов, таких как алюминиевые сплавы или медные сплавы. Синергетический эффект MoS₂ и C образует комбинацию динамической и статической смазки, при этом MoS₂ обеспечивает непрерывный скользящий интерфейс, а C усиливает антиадгезионную способность, совместно оптимизируя характеристики трения.

(2) Влияние твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS₂, C) на механические свойства

В образце WC5MoS₂ твердость остается на уровне HV 1550 ± 30, а вязкость разрушения (K_{1c}) составляет около 10 МПа·м^{1/2} ± 0,5, что указывает на то, что добавление смазки оказывает ограниченное влияние на механические свойства матрицы WC. Частицы MoS₂ и C равномерно внедрены в матрицу WC. Анализ SEM показывает, что смазка не оказывает существенного влияния на структуру решетки WC (отклонение < 0,1% ± 0,02%). Твердость в основном обеспечивается WC и TiC, в то время как вязкость выигрывает от пластического вклада фазы Ni. Однако, когда содержание MoS₂ превышает 5% ± 0,1%, K_{1c} уменьшается примерно на 10% ± 2%. Это связано с тем, что избыточное количество смазки приводит к ослаблению границ зерен или агломерации частиц (> 0,1%), что увеличивает риск образования микротрещин. Поэтому точный контроль содержания смазки является ключом к поддержанию баланса между механическими свойствами и эффектом смазки. 5% считается идеальным диапазоном, и необходимо избегать ухудшения производительности путем оптимизации соотношения.

(4) Микроскопическое распределение и проверка твердых смазочных материалов из цементированного карбида (MoS₂, C)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Микроскопический анализ предоставил визуальное доказательство механизма смазки с помощью SEM и EDS. Наблюдение SEM показало, что частицы MoS₂ были равномерно внедрены в матрицу WC (отклонение < 0,1% ± 0,02%), а покрытие пленки переноса после испытания на трение превысило 90% ± 2%, что указывает на то, что смазка эффективно мигрировала и покрывала контактную поверхность в процессе трения, уменьшая износ и адгезию. Анализ EDS подтвердил химический состав MoS₂ (соотношение Mo:S около 1:2 ± 0,1), подтвердив целостность его слоистой структуры, в то время как обнаружение XPS показало sp²-структуру C (положение пика C 1s ~ 284 эВ ± 0,1 эВ), подтверждая источник его свойств низкого трения. Температура спекания контролировалась на уровне 1400°C ± 10°C, чтобы избежать термического разложения MoS₂ (температура разложения > 1200°C ± 10°C) и гарантировать, что смазка остается стабильной в процессе высокотемпературной подготовки. СЭМ также показал, что размер зерна (0,5 мкм ± 0,01 мкм) способствовал равномерному распределению смазки и уменьшению межфазных дефектов (< 0,05%).

(5) Поведение трения и влияние нагрузки твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS₂, C)

Коэффициент трения показывает определенную закономерность с нагрузкой. Когда нагрузка > 50 Н ± 1 Н, коэффициент трения немного увеличивается (< 5% ± 1%), что связано с высокой нагрузкой, сжимающей толщину пленки переноса (< 8 нм) и увеличивающей локальный металлический контакт. Однако коэффициент трения WC5MoS₂ остается в диапазоне 0,15 ± 0,01, что лучше, чем у WC10Co (0,5 ± 0,05), что указывает на то, что смазочный эффект MoS₂ и C по-прежнему эффективен при средних и высоких нагрузках. Анализ СЭМ показывает, что пленка переноса локально повреждается (< 5%) при высокой нагрузке, но sp²-скольжение C дополняет эффект смазки, и сила адгезии остается < 0,8 Н ± 0,1 Н. Контроль теплоты трения (< 100 °C) выигрывает от низких сдвиговых характеристик смазки, что позволяет избежать связывания, вызванного высокой температурой, и продлевает срок службы инструмента.

(6) Проверка применения и направление оптимизации твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS₂, C)

WC5MoS₂ был проверен в инженерных приложениях. При высокоскоростной резке (500 м/мин) коэффициент трения 0,15 ± 0,01 и сила адгезии 0,8 Н ± 0,1 Н значительно снижают износ и адгезию стружки сухой обработки, а срок службы инструмента увеличивается примерно на 30%. При формовании пресс-форм низкая адгезия способствует плавному извлечению пластиковых изделий из формы (усилие извлечения из формы < 10 Н). Дальнейшая оптимизация может быть достигнута за счет увеличения содержания MoS₂ до 6% или введения нано-MoS₂ (размер частиц < 100 нм) для повышения стабильности пленки переноса и снижения коэффициента трения до 0,12. В сочетании с текстурированием поверхности (глубина 110 мкм) или технологией плазменного напыления силу адгезии можно дополнительно снизить до < 0,5 Н, что подходит для сценариев с высокими температурами (> 800 °C) или высокими нагрузками (> 200 Н), например, для авиационных двигателей и тяжелой техники.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MoS₂ снижает коэффициент трения до $0,15 \pm 0,01$ за счет слабых сил Ван-дер-Ваальса ($0,1 \text{ эВ}$) и пленки переноса (10 нм), C снижает адгезию до $< 0,8 \text{ Н}$ за счет скольжения sp^2 ($0,01 \text{ эВ}$), твердость WC5MoS₂ HV 1550 и $K_{1c} 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ сохраняют механические свойства, СЭМ и ЭДС подтверждают равномерное распределение смазки. Спекание при $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ позволяет избежать разложения, а эффект смазки может быть дополнительно улучшен за счет нанооптимизации в будущем.

9.3.2.3 Анализ факторов, влияющих на твердые смазочные материалы на основе цементированного карбида (MoS₂, C)

На твердые смазочные материалы из цементированного карбида MoS₂ и C существенное влияние оказывают различные факторы, которые совместно определяют эффективность его коэффициента трения и адгезии при высокоскоростной резке, сухой обработке и формовке путем изменения распределения смазки, микроструктуры и условий окружающей среды. Ключевые параметры, такие как содержание, размер зерна, температура спекания и среда использования MoS₂ и C, напрямую влияют на эффекты самосмазывания и антиадгезии и оказывают определенное влияние на механические свойства материала (такие как твердость и прочность). Анализируя механизм и взаимосвязь между этими факторами, можно оптимизировать процесс проектирования и приготовления смазки для удовлетворения требований низкого трения и высокой долговечности в инженерных приложениях. В этом разделе подробно обсуждается влияние каждого влияющего фактора на эффективность смазки на основе его характеристик, экспериментальных данных и случаев применения, а также выдвигаются предложения по оптимизации.

(1) Содержание MoS₂

Содержание MoS₂ является важным фактором, влияющим на смазку и механические свойства. При содержании $5\% \pm 0,1\%$ коэффициент трения может быть снижен до $< 0,2 \pm 0,01$. Слабая сила Ван-дер-Ваальса ($0,1 \text{ эВ} \pm 0,01 \text{ эВ}$) слоистой структуры MoS₂ образует стабильную пленку переноса (толщиной $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), которая эффективно снижает сопротивление трения. При этом содержании анализ SEM показывает, что MoS₂ равномерно внедрен в матрицу WC (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) с покрытием $> 90\% \pm 2\%$, что соответствует требованиям высокоскоростной резки (500 м/мин) и сухой обработки. Однако, когда содержание MoS₂ превышает $10\% \pm 0,1\%$, вязкость разрушения (K_{1c}) снижается примерно на $15\% \pm 3\%$, что связано с избыточной смазкой, приводящей к ослаблению границ зерен или агломерации частиц ($> 0,1\%$), что увеличивает риск образования микротрещин. Например, WC10MoS₂ имеет K_{1c} всего $8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ из-за высокого содержания MoS₂. $\pm 0,5$, в то время как WC5MoS₂ достигает $10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, что указывает на то, что 5% является точкой равновесия между механическими свойствами и эффектом смазки. В будущем MoS₂ можно будет добавлять поэтапно, чтобы контролировать его локальную концентрацию и избегать снижения вязкости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Содержание C

Содержание C оказывает значительное влияние на адгезию и твердость. При содержании $3\% \pm 0,1\%$ адгезия остается на низком уровне ($< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$). Благодаря структуре связи sp^2 (энергия скольжения $0,01 \text{ эВ} \pm 0,001 \text{ эВ}$) и пластинчатым характеристикам скольжения C адгезия между поверхностями снижается, особенно при обработке алюминиевых сплавов или пластиков. Наблюдения SEM показывают, что частицы C образуют однородную смазочную пленку толщиной около 5-10 мкм, что повышает антиадгезионную эффективность. Однако, когда содержание C превышает $5\% \pm 0,1\%$, твердость снижается примерно на $10\% \pm 2\%$, поскольку чрезмерное содержание C ослабляет прочность решетки матрицы WC. Анализ EDS показывает, что сегрегация фазы C ($> 0,2\%$) может мешать равномерному распределению TiC и WC. Поэтому идеальным диапазоном считается 3%-5%, а более высокий C требует следового количества отвердителя (например, VC, $< 1\%$) для поддержания твердости ($> \text{HV } 1500$). Оптимизации можно добиться путем улучшения дисперсии нано C (размер частиц $< 100 \text{ нм}$), что еще больше снизит силу адгезии до $< 0,5 \text{ Н}$.

(3) Размер зерна

Размер зерна имеет решающее значение для производительности смазки и стабильности пленки переноса. Когда размер зерна составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, пленка переноса формируется стабильно со степенью покрытия $> 90\% \pm 2\%$. Частицы MoS_2 и C равномерно распределены между границами мелких зерен (плотность $> 10^{14} \text{ м}^{-2}$), что снижает увеличение коэффициента трения и поддерживает коэффициент трения $< 0,2 \pm 0,01$. Анализ SEM показывает, что мелкие зерна ограничивают абразивное проникновение и распространение трещин, а также повышают несущую способность смазки. Однако, когда размер зерна превышает $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, коэффициент трения увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$. Это связано с тем, что крупные зерна уменьшают количество границ зерен, снижается степень покрытия пленки переноса ($< 85\%$), увеличивается локальный металлический контакт, а сила адгезии может возрасти до более чем 1 Н. Для контроля размера зерна требуется добавление ингибиторов (таких как VC, 0,5%-1%) и оптимизация времени шаровой мельницы ($40 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$). В будущем можно будет исследовать наночастицы ($< 0,3 \text{ мкм}$) для дальнейшей стабилизации пленки переноса и повышения эффективности смазки.

(4) Температура спекания

Температура спекания напрямую влияет на целостность и стабильность работы смазки. При $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ MoS_2 остается стабильным (температура разложения $> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) без значительного разложения. Наблюдение SEM показывает, что смазка равномерно распределена (отклонение $< 0,1\%$), а коэффициент трения и сила адгезии достигают $0,15 \pm 0,01$ и $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$ соответственно. Однако, когда температура спекания превышает $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, разложение MoS_2 увеличивается примерно на $5\% \pm 1\%$, а EDS обнаруживает, что соотношение Mo и S является несбалансированным ($\text{Mo:S} < 1:2$), что приводит к снижению производительности смазки, а коэффициент трения может возрасти до $0,25 \pm 0,01$. Высокая температура может также вызвать чрезмерную графитизацию фазы C, что влияет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на твердость ($> HV\ 1500$). Поэтому $1400^{\circ}C$ считается оптимальной температурой, а в сочетании с защитной атмосферой Ar или градуированным спеканием (предварительный нагрев при $1200^{\circ}C$) может дополнительно снизить риск разложения и повысить стабильность смазки.

(5) Окружающая среда

Условия окружающей среды оказывают значительное влияние на эффективность смазки. Когда влажность превышает $50\% \pm 5\%$, коэффициент трения увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$. Это происходит из-за того, что вода адсорбируется на поверхностях MoS_2 и C, что ослабляет способность межслоевого скольжения, препятствует образованию пленки переноса (покрытие $< 85\%$), а адгезия может возрасти до $1\ H \pm 0,1\ H$. Анализ SEM показывает, что следы оксидов ($< 0,1\%$) появляются на поверхности при высокой влажности, что еще больше увеличивает сопротивление трения. В условиях сухой обработки или морской среды контроль влажности на уровне $30\%-50\%$ может оптимизировать эффект смазки. Пассивирующий слой $NiO\ Ni$ (толщина $\sim 10\text{ нм}$) обеспечивает дополнительную защиту в условиях высокой влажности, а потеря веса остается $< 0,06\text{ мг/см}^2$. В будущем для снижения воздействия влажности и поддержания низкого коэффициента трения можно будет использовать поверхностные покрытия (например, TiN , толщиной 2 мкм) или добавление гигроскопических агентов (например, SiO_2 , $< 1\%$).

(6) Всеобъемлющее дело

Если взять в качестве примеров $WC_{10}MoS_2$ и WC_5MoS_2 , то у $WC_{10}MoS_2$ слишком высокое содержание MoS_2 (10%), поэтому K_{1c} падает до $8\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2} \pm 0,5$, коэффициент трения немного увеличивается до $0,18 \pm 0,01$, что указывает на компромисс между прочностью и эффектом смазки; у WC_5MoS_2 , спекенного при $1400^{\circ}C$, K_{1c} достигает $10\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2} \pm 0,5$, коэффициент трения $0,15 \pm 0,01$, адгезия $0,8\text{ Н} \pm 0,1\text{ Н}$, что свидетельствует о превосходных комплексных характеристиках. В среде с влажностью 60% коэффициент трения WC_5MoS_2 повышается до $0,165 \pm 0,01$, но его можно восстановить до $0,16 \pm 0,01$ путем полировки поверхности ($Ra < 0,05\text{ мкм}$). Дальнейшая оптимизация может быть достигнута путем контроля содержания MoS_2 до $4\%-6\%$, ограничения содержания C до $2\%-4\%$, измельчения зерен до $0,3\text{ мкм}$, регулирования температуры спекания до $1380^{\circ}C-1420^{\circ}C$ и разработки влагонепроницаемого покрытия для снижения коэффициента трения до $0,12$ и адгезии до $< 0,5\text{ Н}$, что соответствует высоким требованиям авиационных двигателей и медицинских приборов.

На смазочные свойства цементированного карбида $WCTiCNi$ влияют содержание MoS_2 (5%), содержание C (3%), размер зерна ($0,51\text{ мкм}$), температура спекания ($1400^{\circ}C$) и влажность окружающей среды ($< 50\%$). $5\%\ MoS_2$ снижает коэффициент трения до $< 0,2$, $3\%\ C$ снижает адгезию, мелкое зерно и умеренное спекание обеспечивают стабильность пленки переноса, а высокая влажность увеличивает трение. На основе WC_5MoS_2 его производительность лучше, чем $WC_{10}MoS_2$, и смазочный эффект может быть дополнительно улучшен за счет оптимизации соотношения и покрытия в будущем.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3.2.4 Оптимизация твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS_2 , C)

Для достижения коэффициента трения $< 0,2 \pm 0,01$ для твердых смазок из цементированного карбида с учетом антиадгезионных характеристик (сила сцепления $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$) и механической стабильности (твердость $> \text{HV } 1500$, $K_{1c} > 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) требуется комплексная стратегия оптимизации смазки, корректировки процесса спекания, контроля зерна и обработки поверхности. Эти меры оптимизации направлены на усиление самосмазывающегося эффекта MoS_2 и C, удовлетворение требований низкого трения высокоскоростной резки ($> 500 \text{ м/мин}$), сухой обработки и формования форм, при сохранении структурной целостности матрицы WC, обеспечивая надежную поддержку для таких применений, как электронные пресс-формы, морское оборудование и авиационные компоненты. Ниже приводится подробное описание схемы оптимизации с точки зрения параметров процесса, микроструктуры и характеристик поверхности, а ее осуществимость проверяется путем объединения фактических результатов.

(1) Оптимизация смазочных материалов

Оптимизация смазки является ключом к снижению коэффициента трения. Содержание MoS_2 установлено на уровне $5\% \pm 0,1\%$, а его слоистая структура (межслоевое расстояние $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) и низкое усилие сдвига ($< 1 \text{ МПа} \pm 0,1 \text{ МПа}$) эффективно снижают сопротивление трения за счет формирования пленки переноса (толщина $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), а коэффициент трения может быть снижен до $0,15 \pm 0,01$. Содержание C контролируется на уровне $3\% \pm 0,1\%$, а его структура связи sp^2 (энергия связи $\text{CC } 600 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$) обеспечивает ламеллярное скольжение (энергия скольжения $0,01 \text{ эВ} \pm 0,001 \text{ эВ}$), снижая силу адгезии до $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$, что особенно подходит для обработки липких материалов. Анализ SEM показывает, что MoS_2 и C равномерно распределены в матрице WC (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), с коэффициентом покрытия $> 90\% \pm 2\%$, что позволяет избежать снижения прочности (K_{1c} уменьшается на $10\% - 15\%$), вызванного избыточным содержанием ($> 10\% \text{ MoS}_2$ или $> 5\% \text{ C}$). Добавление следовых количеств ингибиторов (таких как VC, $< 1\%$) может дополнительно оптимизировать совместимость смазочных материалов с WC и повысить стабильность смазочной пленки.

(2) Процесс спекания

Процесс спекания напрямую влияет на целостность смазки и плотность материала. Рекомендуемая температура составляет $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, а давление составляет $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$, что достигается путем горячего прессования. 1400°C ниже температуры разложения MoS_2 ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), что гарантирует, что смазка не подвергается термическому разложению. Наблюдение с помощью СЭМ показывает, что частицы MoS_2 и C сохраняют стабильное распределение (отклонение $< 0,1\%$), плотность достигает $99\% \pm 0,1\%$, а пористость составляет $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Высокое давление (50 МПа) способствует внедрению смазки в границу фазы WC, образуя непрерывную сетку смазки и снижая тепло трения ($<$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

100°C). По сравнению с традиционным вакуумным спеканием, процесс горячего прессования позволяет избежать разложения смазки ($> 5\% \pm 1\%$), вызванного высокой температурой ($> 1450^\circ\text{C}$), а ступенчатый нагрев (предварительный нагрев 1200°C и затем повышение температуры до 1400°C) также может снизить термическое напряжение и обеспечить баланс между эффектом смазки и твердостью ($> \text{HV } 1500$). Защитная атмосфера Ar дополнительно предотвращает окисление и улучшает долгосрочную стабильность смазочной пленки.

(3) Контроль зерна

Точный контроль размера зерна является важным средством оптимизации производительности смазки. Цель состоит в том, чтобы контролировать его на уровне $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Несущая способность смазки и стабильность пленки переноса улучшаются за счет тонких границ зерен (плотность $> 10^{14} \text{ м}^{-2}$). Анализ SEM показывает, что размер зерна $0,51 \text{ мкм}$ обеспечивает равномерное распределение частиц MoS_2 и C по границам зерен, покрытие пленкой переноса составляет $> 90\% \pm 2\%$, коэффициент трения остается $< 0,2 \pm 0,01$, а сила адгезии составляет $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. Если размер зерна превышает $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, количество границ зерен уменьшается, покрытие пленкой переноса уменьшается ($< 85\%$), коэффициент трения может увеличиться на $10\% \pm 2\%$, а сила адгезии возрастает до более чем 1 Н . Измельчение зерна достигается путем добавления ингибиторов (например, VC, $0,5\% - 1\%$) и увеличения времени измельчения в шаровой мельнице ($40 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$). В будущем можно будет исследовать наночастицы ($< 0,3 \text{ мкм}$) для дальнейшего повышения эффективности смазки и адаптации к условиям работы с высокими нагрузками ($> 200 \text{ Н}$).

(4) Обработка поверхности

Обработка поверхности оптимизирует эффективность смазки за счет технологии полировки. Рекомендуется контролировать шероховатость поверхности (R_a) до $< 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ и использовать алмазную полировку или химико-механическую полировку (CMP) для удаления поверхностных дефектов и микротрещин. Плоская поверхность уменьшает прямой контакт пары трения, улучшает адгезию пленки переноса MoS_2 (покрытие $> 95\% \pm 2\%$), снижает коэффициент трения до $0,15 \pm 0,01$ и дополнительно снижает адгезию до $< 0,7 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. После полировки ультразвуковая очистка объединяется для удаления остатков, СЭМ проверяет однородность поверхности (отклонение $< 0,1\%$) и снижает увеличение коэффициента трения ($< 5\% \pm 1\%$), вызванное влажностью ($> 50\%$). Обработка поверхности также способствует быстрому рассеиванию тепла трения ($< 90^\circ\text{C}$) и продлевает срок службы инструмента. При формовании форм $R_a < 0,05 \text{ мкм}$ значительно снижает усилие извлечения из формы ($< 10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$) и улучшает качество поверхности заготовки. В будущем для повышения износостойкости поверхности и долговечности смазки может быть введено покрытие TiN (толщиной 2 мкм) или плазменное азотирование.

(5) Комплексный эффект оптимизации и проверка приложений

Благодаря вышеуказанной стратегии, WC5MoS₂C3 (MoS_2 5 %, C 3%) с горячим прессованием спеканием при 1400°C , размером зерна $0,51 \text{ мкм}$ и $R_a < 0,05 \text{ мкм}$, достиг коэффициента

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

трения $0,15 \pm 0,01$, адгезии $0,7 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$, твердости $\text{HV } 1550 \pm 30$, $K_{1c} 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, что лучше целевого значения. При высокоскоростной резке (500 м/мин) срок службы инструмента увеличивается на 30%, а теплота трения составляет $< 90^\circ\text{C}$, что соответствует потребностям сухой обработки; при формировании форм усилие извлечения из формы снижается до 8 Н, что снижает адгезию пластика; в морском оборудовании низкая адгезия обеспечивает более пяти лет службы. По сравнению с WC10Co (коэффициент трения $0,5 \pm 0,05$, адгезия $> 2 \text{ Н}$) система WCTiCNi показывает значительные преимущества. В будущем наносмазки или многослойные покрытия могут быть использованы для дальнейшего снижения коэффициента трения до 0,12 и адгезии до $< 0,5 \text{ Н}$ для удовлетворения высоких требований авиационных двигателей и медицинских приборов.

(6) Экологический контроль и будущее развитие

Во время испытаний и применения влажность окружающей среды должна контролироваться на уровне 30%-50%, чтобы избежать увеличения коэффициента трения ($10\% \pm 2\%$), вызванного $> 50\% \pm 5\%$. Спекание с защитой Ar и влагостойкие покрытия (например, SiO_2 , $< 1\%$) могут снизить влияние влажности и сохранить эффективность смазки. В будущем могут быть внедрены динамические симуляции смазки (например, испытания на высокоскоростное вращение) и долгосрочные испытания на выносливость (> 1000 часов), а технология плазменного напыления может использоваться для увеличения толщины слоя смазки до 15 мкм, оптимизации производительности в условиях высоких температур ($> 800^\circ\text{C}$) или высоких нагрузок ($> 200 \text{ Н}$) и расширения потенциала ее применения в энергетике и тяжелом машиностроении.

Твердая смазка из цементированного карбида оптимизирует коэффициент трения $< 0,2$ через MoS_2 5% и C 3%, горячее прессование при 1400°C обеспечивает стабильность смазки, зерна 0,51 мкм улучшают эффект переноса пленки, обработка поверхности $R_a < 0,05 \text{ мкм}$ снижает адгезию. Если взять WC5MoS₂ C3 в качестве примера, его производительность лучше, чем WC10Co. В будущем, благодаря нанотехнологиям и улучшениям покрытия, он сможет еще больше соответствовать требованиям экстремальных условий работы.

9.3.2.3 Инженерное применение твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS_2 , C)

Благодаря введению MoS_2 и C в качестве твердых смазочных материалов самосмазывающийся цементированный карбид значительно улучшает свои эксплуатационные характеристики в условиях низкого трения и высокой прочности, отвечая разнообразным требованиям современной промышленности к эффективной обработке и защите окружающей среды. Благодаря превосходному коэффициенту трения ($< 0,2 \pm 0,01$) и адгезии ($< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$) этот материал демонстрирует превосходные эксплуатационные характеристики в таких сценариях, как высокоскоростная резка, сухая обработка и формирование форм, что не только продлевает срок службы инструментов и форм, но и снижает потребление энергии и накопление тепла во время обработки. Далее

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подробно **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



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

обсуждается его инженерная прикладная ценность на основе конкретных сценариев применения, преимуществ производительности и реальных случаев, а также анализируется его вклад в промышленную эффективность и устойчивое развитие.

(1) Высокоскоростная резка

В области высокоскоростной резки WC5MoS₂ является идеальным выбором благодаря своим превосходным самосмазывающимся свойствам. Размер зерна контролируется на уровне 0,5 мкм ± 0,01 мкм, что гарантирует равномерное внедрение частиц MoS₂ в матрицу WC (отклонение < 0,1% ± 0,02%), образуя стабильную пленку переноса (толщина 10 нм ± 1 нм), а коэффициент трения снижается до 0,15 ± 0,01. Анализ SEM показывает, что покрытие пленкой переноса составляет > 90% ± 2%, что значительно снижает прямой контакт между стружкой и поверхностью инструмента и продлевает срок службы инструмента более чем на 5000 м ± 500 м, что намного превышает срок службы традиционного инструмента WC10Co (срок службы около 3000 м). Эти характеристики особенно заметны при обработке материалов высокой твердости (например, титановых сплавов) или в условиях высоких скоростей (> 500 м/мин), снижая скорость износа и силу резания, улучшая качество поверхности и сокращая использование охлаждающей жидкости, что соответствует тенденции экологичного производства.

(2) Сухая обработка

хорошо работает с его низкой адгезией и возможностями терморегулирования. Полировка поверхности до Ra < 0,05 мкм ± 0,01 мкм уменьшает дефекты поверхности и микротрещины, а структура связи sp² C (энергия скольжения 0,01 эВ ± 0,001 эВ) образует однородную смазочную пленку, а адгезия снижается до 0,8 Н ± 0,1 Н, что особенно подходит для обработки липких материалов, таких как алюминиевые сплавы или медь. Тепло трения контролируется при < 100 °C ± 1 °C, и наблюдение SEM показывает, что толщина смазочной пленки составляет около 5-10 мкм, что эффективно рассеивает тепло и предотвращает высокотемпературную адгезию, продлевая срок службы инструмента примерно на 20% -30% по сравнению с традиционными материалами. Сухая обработка без охлаждающей жидкости снижает загрязнение окружающей среды и затраты на обработку и широко применяется в производстве автомобильных деталей и электронных компонентов, демонстрируя потенциал самосмазывающегося твердого сплава в защите окружающей среды и высокоэффективной обработке.

(3) Формование форм

В формовочных приложениях WC5MoS₂ предпочитают из-за его низкой силы извлечения из формы и длительного срока службы. Слоистая структура MoS₂ (межслоевое расстояние 6,2 Å ± 0,1 Å) снижает коэффициент трения за счет слабых сил Ван-дер-Ваальса (0,1 эВ ± 0,01 эВ), а сила извлечения из формы снижается до < 10 Н ± 1 Н, что снижает адгезию пластиковых или металлических заготовок к поверхности формы и улучшает качество поверхности формованных деталей. Анализ SEM показывает, что покрытие пленки переноса смазки составляет > 90% ± 2%, поддерживая срок службы формы более 10⁶ раз ± 10⁵ раз,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

что намного превышает срок службы формы WC10Co (срок службы около 5×10^5 раз). Эти характеристики являются выдающимися при точной литейной обработке и штамповке, например, при производстве корпусов мобильных телефонов и автомобильных приборных панелей, снижая дефекты при извлечении из формы и частоту технического обслуживания, а также значительно повышая эффективность производства и экономические выгоды.

(4) Покрытие авиационных деталей

WC10MoS₂ также был распространен на область покрытий авиационных компонентов, особенно в износостойких покрытиях для лопаток турбин и двигателей. Его низкий коэффициент трения ($0,15 \pm 0,01$) снижает износ, вызванный высокоскоростным потоком воздуха и истиранием частиц. Размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ обеспечивает равномерное распределение смазочных материалов и продлевает срок службы до более чем 6000 часов. Высокая температурная стабильность MoS₂ ($> 400 \text{ }^\circ\text{C}$) сохраняет эффект смазки в среде авиационных двигателей, а теплота трения составляет $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$, что повышает усталостную прочность компонентов и снижает затраты на техническое обслуживание. Он подходит для требований надежности в условиях полета на большой высоте.

(5) Инструменты для бурения нефтяных скважин

В нефтяных буровых инструментах WC8MoS₂C (MoS₂ 5 %, C 3%) предпочитают за его превосходную антиадгезию и износостойкость. Смазочная пленка уменьшает адгезию между буровым долотом и породой, а сила адгезии составляет $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$, что продлевает срок службы бурового долота примерно на 25% по сравнению с традиционными материалами. В условиях сухого бурения тепло трения контролируется при $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Синергетический эффект MoS₂ и C снижает сопротивление резанию и повышает эффективность бурения, особенно в серосодержащих или высокотвердых породах, снижая частоту замены и эксплуатационные расходы.

(6) Медицинские приборы

WC5MoS₂ также оставляет свой след в области медицинских приборов, таких как ортопедические скальпели и стоматологические бормашины. Коэффициент трения $0,15 \pm 0,01$ и адгезия $0,7 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$ обеспечивают резку с низким трением, уменьшая повреждение тканей и адгезию. Полировка поверхности до $Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ улучшает остроту режущей кромки, а срок службы превышает 5000 раз, что соответствует требованиям высокой точности в стерильной среде, повышает хирургическую безопасность и долговечность инструментов.

(7) Комплексные преимущества и расширенные возможности применения

Эти приложения в полной мере демонстрируют превосходство самосмазывающегося твердого сплава в снижении трения и адгезии. Он продлевает срок службы инструмента при высокоскоростной резке, снижает воздействие на окружающую среду при сухой обработке, повышает эффективность производства при формировании пресс-форм, повышает долговечность компонентов в авиационных покрытиях, повышает эффективность работы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

инструментов для бурения нефтяных скважин и обеспечивает хирургическое качество в медицинских приборах. По сравнению с WC10Co (коэффициент трения $0,5 \pm 0,05$, адгезия > 2 Н) коэффициент трения системы WCTiCNi снижен примерно на 70%, а адгезия снижена более чем на 50%, что значительно повышает точность обработки и срок службы инструмента. Кроме того, самосмазывающиеся свойства также поддерживают новые приложения, такие как износостойкие слои железнодорожных путей, WC8MoS₂ C снижает потери на трение между дорожками и колесными парами; носимая электроника, низкая адгезия WC3C поддерживает гибкие проводящие компоненты. В будущем потенциал его применения в энергетике, авиации и медицине может быть расширен за счет использования наносмазок или многослойных покрытий.

Самосмазывающийся твердый сплав хорошо работает при высокоскоростной резке, сухой обработке, формовке, авиационных покрытиях, инструментах для бурения нефтяных скважин и медицинских приборах. Коэффициент трения WC5MoS₂ составляет $0,15 \pm 0,01$, а срок службы инструмента > 5000 м, адгезия WC3C составляет 0,8 Н, а теплота трения < 100 °C, а усилие извлечения из формы WC5MoS₂ составляет < 10 Н, а срок службы $> 10^6$ раз, что подтверждает эффективность обработки и улучшение срока службы за счет оптимизации смазки. В будущем, благодаря инновациям в области материалов, он сможет удовлетворить более широкий спектр инженерных потребностей.

9.3.2 Текстура поверхности и механизм смазки твердого сплава

9.3.2.1 Обзор принципов и технологий текстуры поверхности твердого сплава, а также механизма смазки

Конструкция текстуры поверхности твердого сплава значительно улучшает его самосмазывающиеся и антиадгезионные свойства за счет введения определенных микроструктур на поверхность материала. Глубина текстуры установлена на уровне $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, а интервал составляет $50\text{-}100 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$. Эти структуры текстуры эффективно снижают коэффициент трения ($< 0,2 \pm 0,01$) и адгезию ($< 1 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$) за счет хранения твердых смазочных веществ (таких как MoS₂ и C) и улавливания стружки износа (размер $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), что соответствует требованиям низкого трения высокоскоростной резки, сухой обработки и формования форм. Конструкция текстуры основана на теории кривой Штрибека. За счет оптимизации состояния динамической смазки жидкости толщина масляной пленки составляет около $1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что усиливает эффект смазки, сохраняя при этом износостойкость (скорость износа $< 0,06 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$) и твердость ($> \text{HV } 1500 \pm 30$). По сравнению с нетекстурированной поверхностью, структура текстуры не только уменьшает прямой контакт пары трения, но и захватывает продукты износа через микроканавки или ямки, предотвращая вторичный износ и продлевая срок службы инструмента. Цель состоит в том, чтобы достичь синергетической оптимизации смазывающей способности и износостойкости, что подходит для сценариев с высоким спросом, таких как электронные формы, авиационные компоненты и инструменты для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

бурения нефтяных скважин.

Текстура достигается с помощью технологии лазерной обработки, используя лазерное устройство с длиной волны $1064 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$ и мощностью $10 \text{ Вт} \pm 0,1 \text{ Вт}$, с точностью $\pm 0,1 \text{ мкм}$ для обеспечения постоянства глубины текстуры и интервала. Например, коэффициент трения образца WC5MoS_2 снижается до $0,12 \pm 0,01$ при условии глубины текстуры $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что лучше, чем у нетекстурированного образца ($0,15 \pm 0,01$), а сила адгезии снижается до $0,7 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$, подтверждая, что текстура поверхности значительно улучшает эффективность смазки. В этом разделе будет проведен подробный анализ с точки зрения механизмов смазки, технологий обработки и инженерного применения, чтобы изучить, как дизайн текстуры может оптимизировать трение и долговечность твердого сплава.

9.3.2.2 Технология обработки текстуры поверхности твердого сплава

Обработка текстуры использует технологию лазерной обработки. Лазер Nd:YAG с длиной волны $1064 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$ используется для точного травления при мощности $10 \text{ Вт} \pm 0,1 \text{ Вт}$. Скорость сканирования контролируется на уровне $100 \text{ мм/с} \pm 1 \text{ мм/с}$, а точность достигает $\pm 0,1 \text{ мкм}$. После оптимизации параметров лазера глубина текстуры $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ и расстояние $50\text{-}100 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ образуют однородную микроструктуру. СЭМ подтверждает, что край текстуры гладкий ($R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), чтобы избежать концентрации напряжений. Во время обработки защитная атмосфера Ar предотвращает окисление MoS_2 (температура разложения $> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) и обеспечивает стабильность смазки. По сравнению с механической обработкой лазерный процесс уменьшает зону термического влияния ($< 10 \text{ мкм}$) и сохраняет твердость матрицы WC ($> \text{HV } 1500 \pm 30$). Последующая термическая обработка (например, отпуск при $800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) устраняет остаточные напряжения и усиливает связь между текстурой и матрицей. Например, после лазерного текстурирования коэффициент трения WC5MoS_2 снижается с $0,15 \pm 0,01$ до $0,12 \pm 0,01$, а скорость износа составляет $< 0,06 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, что демонстрирует эффективность оптимизации процесса.

Анализ текстуры поверхности твердого сплава и механизма смазки

Текстура поверхности цементированного карбида значительно улучшает его самосмазывающиеся и противоизносные свойства за счет микроструктурного дизайна. Структура текстуры снижает коэффициент трения и износ поверхности за счет увеличения запаса смазки, оптимизации образования масляной пленки и улавливания частиц износа, обеспечивая эффективную поддержку смазки для таких применений, как высокоскоростная резка, сухая обработка и формование форм. В этом разделе глубоко анализируется механизм смазки текстуры, исследуется ее влияние на коэффициент трения, скорость износа и силу сдвига, а также объединяются микроскопические наблюдения и экспериментальные данные, чтобы показать, как глубина текстуры, интервал и технология обработки взаимодействуют с пленкой переноса MoS_2 для оптимизации эффекта смазки, и предлагается направление оптимизации производительности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3.2.3 Текстура поверхности и механизм смазки твердого сплава

Текстура поверхности значительно улучшает самосмазывающиеся характеристики за счет увеличения емкости хранения смазки ($> 90\% \pm 2\%$). Микроканавки или ямки хранят частицы MoS_2 и C, образуя непрерывную масляную пленку (толщиной $1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), что снижает коэффициент трения до $0,12 \pm 0,01$. Эта масляная пленка обеспечивает гидродинамическую смазку между парами трения и снижает прямой металлический контакт. Кривая Штрибека показывает, что в условиях смешанной смазки структура текстуры оптимизирует распределение смазки и снижает сопротивление трения. Текстура также снижает трехкомпонентный износ за счет захвата частиц износа (размер $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), а скорость износа контролируется на уровне $< 0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, особенно при высокоскоростной резке (например, $> 500 \text{ м/мин}$). Глубина текстуры $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ оптимизирует эффект динамики жидкости, локальное давление $> 1 \text{ МПа} \pm 0,1 \text{ МПа}$ и повышает несущую способность масляной пленки; интервал $50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ обеспечивает однородность масляной пленки (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), чтобы избежать локального дефицита смазки. Пленка переноса MoS_2 (толщина $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) дополнительно снижает усилие сдвига ($< 1 \text{ МПа} \pm 0,1 \text{ МПа}$), а ее слоистая структура (расстояние между слоями $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) скользит внутри текстуры с покрытием $> 90\% \pm 2\%$ и синергетически сниженными силами адгезии ($< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$).

9.3.2.4 Микроскопическое наблюдение и проверка текстуры поверхности твердого сплава

Анализ SEM показал, что количество продуктов износа на текстурированной поверхности значительно уменьшилось ($< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), что указывает на эффективность эффекта захвата текстуры, что снижает вторичный износ и поверхностные царапины. Обнаружение EDS подтвердило, что MoS_2 был обогащен в области текстуры (соотношение $\text{Mo:S} \sim 1:2 \pm 0,1$), что подтверждает химическую стабильность смазки. XPS далее показал положение пика S 2p MoS_2 ($\sim 162 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), что подтверждает источник его свойств с низким сдвигом. После лазерной обработки шероховатость поверхности $R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, целостность текстуры $> 95\% \pm 2\%$, а SEM наблюдал, что край текстуры был гладким без очевидной зоны термического влияния ($< 10 \text{ мкм}$), что обеспечивает равномерную адгезию смазки и стабильность масляной пленки. По сравнению с нетекстурированной поверхностью ($R_a \sim 0,5 \text{ мкм}$) низкая шероховатость текстурированной поверхности улучшает адгезию смазки и продлевает срок службы инструмента.

9.3.2.5 Влияние параметров текстуры поверхности карбида

Глубина текстуры оказывает двойное влияние на смазку и износостойкость. Глубина $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ оптимизирует гидродинамический эффект, а давление $> 1 \text{ МПа} \pm 0,1 \text{ МПа}$ поддерживает стабильность масляной пленки с коэффициентом трения $0,12 \pm 0,01$. Однако, когда глубина текстуры превышает $10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, скорость износа увеличивается

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

примерно на $10\% \pm 2\%$. Это связано с тем, что слишком глубокие текстуры могут привести к концентрации напряжений или чрезмерному накоплению смазки. Анализ SEM показывает, что при глубине > 10 мкм эффективность улавливания частиц износа снижается ($< 85\%$) и увеличивается локальный износ. Расстояние $50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ обеспечивает равномерное распределение масляной пленки (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а слишком большое расстояние ($> 100 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) может снизить эффективность хранения смазки, а коэффициент трения возрастет до $0,18 \pm 0,01$. В будущем смазывание и износостойкость могут быть сбалансированы за счет многомасштабной конструкции текстуры (например, микротекстура 5 мкм в сочетании с нанотекстурой 100 нм).

(1) Поведение трения и влияние скорости

Коэффициент трения показывает определенную закономерность со скоростью скольжения. Когда скорость составляет $> 0,5 \text{ м/с} \pm 0,01 \text{ м/с}$, коэффициент трения немного уменьшается ($< 5\% \pm 1\%$). Это связано с тем, что динамическое образование пленки переноса MoS_2 ускоряется на высокой скорости, толщина масляной пленки немного увеличивается ($> 1,1 \text{ мкм}$), а сила сдвига дополнительно уменьшается ($< 0,9 \text{ МПа}$). Наблюдение с помощью СЭМ показывает, что после высокоскоростного трения скорость покрытия пленки переноса увеличивается до $> 95\% \pm 2\%$, а сила адгезии уменьшается до $0,7 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. Однако чрезмерная скорость ($> 1 \text{ м/с} \pm 0,01 \text{ м/с}$) может вызвать повреждение масляной пленки ($< 90\%$), и коэффициент трения снова возрастает. Глубина текстуры и содержание смазочного материала должны быть оптимизированы для адаптации к условиям высокоскоростной работы. Контроль теплоты трения ($< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) достигается за счет рассеивания тепла текстурой, что продлевает срок службы инструмента.

(2) Проверка приложений и направление оптимизации

Механизм текстурной смазки был проверен в инженерных приложениях. При высокоскоростной резке коэффициент трения WC5MoS_2 (глубина текстуры 5 мкм) составляет $0,12 \pm 0,01$, срок службы инструмента $> 5000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$, а сила резания снижается; при сухой обработке адгезия WC3C составляет $0,7 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$, теплота трения $< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, и он подходит для обработки алюминиевых сплавов; при формовании форм усилие извлечения WC5MoS_2 составляет $< 10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$, а срок службы $> 10^6 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$. Дальнейшая оптимизация может быть достигнута путем регулирования глубины текстуры до $7\text{--}10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ для повышения несущей способности масляной пленки и снижения коэффициента трения до $0,1 \pm 0,01$; использования лазерной нанобработки (длина волны 532 нм) для измельчения текстуры до 100 нм и снижения скорости износа до $< 0,04 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$; в сочетании с плазменным напылением покрытия MoS_2 (толщина 15 мкм) оно может адаптироваться к средам с высокими температурами ($> 800^\circ\text{C}$) или высокими нагрузками ($> 200 \text{ Н}$), таким как авиационные двигатели и тяжелая техника.

снижает коэффициент трения до $0,12 \pm 0,01$ за счет хранения смазки ($> 90\%$) и улавливания продуктов износа. Глубина 5 мкм оптимизирует гидродинамический эффект. Пленка переноса MoS_2 (10 нм) снижает силу сдвига. СЭМ и ЭДС проверяют эффект смазки. Лазерная

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обработка обеспечивает $Ra < 0,1$ мкм. В будущем нанотекстурирование и оптимизация покрытия могут еще больше улучшить его производительность в экстремальных рабочих условиях.

9.3.2.6 Анализ факторов, влияющих на текстуру поверхности и смазку твердого сплава

На смазочные характеристики текстуры поверхности твердого сплава влияет совокупность факторов, которые определяют ее коэффициент трения и износостойкость при высокоскоростной резке, сухой обработке и формовке путем изменения распределения смазки, стабильности масляной пленки, качества обработки и условий окружающей среды. Ключевые параметры, такие как глубина текстуры, интервал, содержание смазки, точность обработки и влажность окружающей среды, напрямую влияют на баланс между эффектом самосмазывания и механическими свойствами. Анализируя механизм и взаимодействие этих факторов, можно оптимизировать конструкцию текстуры и технологию обработки для удовлетворения потребностей сценариев с высоким спросом, таких как электронные формы, авиационные компоненты и инструменты для бурения нефтяных скважин. В этом разделе подробно обсуждается влияние каждого влияющего фактора на смазочные характеристики на основе его характеристик, экспериментальных данных и случаев применения, а также выдвигаются предложения по улучшению.

(1) Глубина текстуры

Глубина текстуры оказывает значительное влияние на смазку и износостойкость. Когда глубина составляет $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, коэффициент трения остается низким ($< 0,12 \pm 0,01$). Это связано с тем, что соответствующая глубина оптимизирует гидродинамическую смазку. Толщина масляной пленки составляет около $1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, а давление составляет $> 1 \text{ МПа} \pm 0,1 \text{ МПа}$ для поддержки несущей способности смазки. Анализ SEM показывает, что глубина 5 мкм гарантирует, что пленка переноса MoS_2 (толщина $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) имеет покрытие $> 90\% \pm 2\%$, а скорость износа контролируется на уровне $0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$. Однако, когда глубина текстуры превышает $10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, скорость износа увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$. Причина в том, что чрезмерно глубокая текстура приводит к концентрации напряжений или чрезмерному накоплению смазки, что снижает эффективность улавливания стружки ($< 85\%$) и усиливает локальный износ. Например, скорость износа WC5MoS_2 при глубине текстуры $15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ достигает $0,08 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, тогда как $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ составляет всего $0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, что указывает на необходимость точного контроля глубины для баланса смазки и износостойкости.

(2) Интервал между текстурами

Расстояние между текстурами имеет решающее значение для стабильности масляной пленки и равномерности смазки. Диапазон расстояния $50\text{-}100 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ обеспечивает равномерное распределение масляной пленки (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), коэффициент трения остается $< 0,12 \pm 0,01$, а сила адгезии $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. Наблюдения с помощью СЭМ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

показывают, что микроканавки с интервалом 50 мкм эффективно хранят частицы MoS_2 и C, а покрытие переносимой пленкой составляет $> 90\% \pm 2\%$, что соответствует требованиям высокоскоростной резки и сухой обработки. Однако, когда зазор меньше $50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, коэффициент трения увеличивается примерно на $5\% \pm 1\%$, что связано с тем, что слишком плотная текстура ограничивает поток смазки, толщина масляной пленки уменьшается ($< 0,9 \text{ мкм}$), локальный контакт увеличивается, а сила адгезии может возрасти до $1 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. Если зазор слишком большой ($> 100 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$), эффективность хранения будет снижена, а коэффициент трения возрастет до $0,18 \pm 0,01$. Для оптимизации распределения зазоров требуется лазерная обработка. В будущем для улучшения равномерности смазки может использоваться конструкция с градуированным зазором.

(3) Смазка

Содержание смазки напрямую влияет на качество и механические свойства пленки переноса. При содержании MoS_2 $5\% \pm 0,1\%$ покрытие пленки переноса высокое ($> 90\% \pm 2\%$), коэффициент трения снижается до $0,12 \pm 0,01$, а слоистая структура (межслоевое расстояние $6,2 \text{ \AA}$) составляет $\pm 0,1 \text{ \AA}$ снижает усилие сдвига ($< 1 \text{ МПа} \pm 0,1 \text{ МПа}$) за счет слабых сил Ван-дер-Ваальса ($0,1 \text{ эВ} \pm 0,01 \text{ эВ}$). Анализ EDS показывает, что MoS_2 обогащается ($\text{Mo:S} \sim 1:2 \pm 0,1$), что усиливает антиадгезионный эффект. Однако, когда содержание MoS_2 превышает $10\% \pm 0,1\%$, вязкость разрушения (K_{1c}) снижается примерно на $10\% \pm 2\%$, поскольку избыточная смазка приводит к ослаблению границ зерен или агломерации ($> 0,1\%$), увеличивая риск образования микротрещин. Содержание AC $3\% \pm 0,1\%$ обеспечивает скольжение sp^2 (энергия скольжения $0,01 \text{ эВ} \pm 0,001 \text{ эВ}$) и адгезию $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. Если содержание C слишком велико ($> 5\% \pm 0,1\%$), твердость снизится ($> 10\% \pm 2\%$), и соотношение необходимо оптимизировать. В будущем для увеличения покрытия могут быть введены наносмазки.

(4) Точность обработки

Точность обработки имеет решающее значение для качества текстуры и эффекта смазки. Обработка с мощностью лазера $10 \text{ Вт} \pm 0,1 \text{ Вт}$ обеспечивает целостность текстуры $> 95\% \pm 2\%$, шероховатость поверхности $R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а СЭМ подтверждает, что край текстуры гладкий и нет зоны термического влияния ($< 10 \text{ мкм}$). Высокоточная обработка способствует адгезии пленки переноса MoS_2 , коэффициент трения остается на уровне $0,12 \pm 0,01$, а скорость износа составляет $< 0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$. Однако, когда мощность лазера превышает $20 \text{ Вт} \pm 0,1 \text{ Вт}$, повреждение увеличивается примерно на $5\% \pm 1\%$, СЭМ наблюдает микротрещины ($< 0,5 \text{ мкм}$) или зоны расплава ($> 15 \text{ мкм}$) на краях текстуры, устойчивость масляной пленки снижается ($< 90\%$), а коэффициент трения увеличивается до $0,16 \pm 0,01$. Оптимизация требует контроля мощности и скорости сканирования ($100 \text{ мм/с} \pm 1 \text{ мм/с}$), и в будущем для улучшения согласованности обработки могут использоваться многолучевые лазеры.

(5) Окружающая среда

Условия окружающей среды оказывают значительное влияние на эффективность смазки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Когда влажность превышает $50\% \pm 5\%$, коэффициент трения увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$. Причина в том, что вода адсорбируется на поверхностях MoS_2 и C , ослабляя способность межслоевого скольжения, уменьшая покрытие пленки переноса ($< 85\%$), а сила адгезии увеличивается до $1 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. Анализ SEM показывает, что следы оксидов ($< 0,1\%$) появляются на поверхности при высокой влажности, увеличивая сопротивление трения. В условиях сухой обработки или морской среды контроль влажности на уровне $30\%-50\%$ может оптимизировать смазку. Пассивирующий слой NiO (толщина $\sim 10 \text{ нм}$) обеспечивает защиту в условиях высокой влажности с потерей веса $< 0,06 \text{ мг/см}^2$. В будущем для снижения воздействия влажности и поддержания низкого коэффициента трения можно будет использовать влагостойкие покрытия (например, TiN , толщиной 2 мкм) или осушители (например, SiO_2 , $< 1\%$).

(6) Комплексные кейсы и направления оптимизации

На примере WC5MoS_2 при глубине текстуры $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, шаге $50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, содержании MoS_2 $5\% \pm 0,1\%$ и мощности лазера $10 \text{ Вт} \pm 0,1 \text{ Вт}$ коэффициент трения составляет $0,12 \pm 0,01$, а скорость износа составляет $0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, что лучше, чем $0,08 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ при глубине $15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$. В среде с влажностью 60% коэффициент трения возрастает до $0,132 \pm 0,01$, но может быть восстановлен до $0,125 \pm 0,01$ путем полировки до $R_a < 0,05 \text{ мкм}$. Будущая оптимизация может регулировать глубину текстуры до $7-10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ для повышения несущей способности масляной пленки; оптимизировать расстояние до $40-60 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ для улучшения равномерности смазки; контролировать содержание MoS_2 до $4\%-6\%$, чтобы избежать снижения прочности; ограничить мощность лазера до $8-12 \text{ Вт} \pm 0,1 \text{ Вт}$ для уменьшения повреждений; и разработать влагостойкое покрытие для адаптации к средам с высокой температурой ($> 800 \text{ }^\circ\text{C}$) или высокой влажностью ($> 70\%$).

На смазочные свойства текстуры поверхности твердого сплава влияют глубина текстуры (5 мкм), расстояние ($50-100 \text{ мкм}$), содержание MoS_2 (5%), точность обработки (10 Вт) и влажность окружающей среды ($< 50\%$). Глубина 5 мкм снижает коэффициент трения до $0,12$, а слишком большая глубина увеличивает скорость износа. В будущем ее производительность в экстремальных рабочих условиях может быть улучшена за счет оптимизации параметров и покрытий.

9.3.2.7 Стратегия оптимизации текстуры поверхности и смазки твердого сплава

Достичь коэффициента трения $< 0,2 \pm 0,01$ для текстуры поверхности карбида, принимая во внимание антиадгезионные свойства (сила сцепления $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$) и износостойкость (скорость износа $< 0,06 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$), что должно быть достигнуто посредством комплексной стратегии проектирования текстуры, оптимизации смазки, улучшения технологии обработки и оптимизации обработки поверхности. Эти меры направлены на усиление самосмазывающегося эффекта MoS_2 и C , отвечая требованиям низкого трения высокоскоростной резки, сухой обработки и формования форм, при

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сохранении твердости ($> HV 1500 \pm 30$) и вязкости ($K_{1c} > 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) матрицы WC. Ниже приводится подробное описание схемы оптимизации с точки зрения параметров текстуры, соотношения смазки, технологии обработки, обработки поверхности и спецификаций испытаний, а ее осуществимость проверяется путем объединения фактических результатов.

(1) Текстурированный дизайн

Дизайн текстуры является основой оптимизации производительности смазки, с рекомендуемой глубиной $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ и диапазоном интервалов $50\text{-}100 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$. Эта глубина формирует стабильную масляную пленку (толщиной $1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) посредством гидродинамического эффекта, с давлением $> 1 \text{ МПа} \pm 0,1 \text{ МПа}$, а коэффициент трения снижается до $0,12 \pm 0,01$. Анализ SEM показывает, что покрытие переносимой пленки составляет $> 90\% \pm 2\%$. Расстояние $50\text{-}100 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ обеспечивает равномерное распределение масляной пленки (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), улавливает частицы износа ($< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и снижает износ трех тел, при этом скорость износа $< 0,06 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$. По сравнению с глубиной $> 10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ (скорость износа увеличивается на $10\% \pm 2\%$), глубина 5 мкм позволяет избежать концентрации напряжений и подходит для высокоскоростной резки и формовки.

(2) Смазка

Оптимизация смазки усиливает эффект смазки. Содержание MoS_2 установлено на уровне $5\% \pm 0,1\%$. Его слоистая структура (межслоевое расстояние $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) образует пленку переноса (толщиной $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) посредством слабых сил Ван-дер-Ваальса ($0,1 \text{ эВ} \pm 0,01 \text{ эВ}$), а коэффициент трения снижается до $0,12 \pm 0,01$. Содержание C контролируется на уровне $3\% \pm 0,1\%$, а его структура связи sp^2 (энергия скольжения $0,01 \text{ эВ} \pm 0,001 \text{ эВ}$) снижает адгезию до $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. СЭМ подтверждает, что смазка распределена равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$). $\text{MoS}_2 > 10\% \pm 0,1\%$ или $\text{C} > 5\% \pm 0,1\%$ может привести к снижению K_{1c} ($10\%\text{-}15\%$). Следовые ингибиторы (такие как VC, $< 1\%$) могут оптимизировать совместимость. В будущем могут быть введены наносмазки для улучшения покрытия.

(3) Технология обработки

Технология обработки использует лазерную технологию с длиной волны $1064 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$ и мощностью $10 \text{ Вт} \pm 0,1 \text{ Вт}$, что обеспечивает точность текстуры $\pm 0,1 \text{ мкм}$ и скорость сканирования $100 \text{ мм/с} \pm 1 \text{ мм/с}$. Наблюдения с помощью СЭМ показывают, что целостность текстуры составляет $> 95\% \pm 2\%$ при мощности 10 Вт , $R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а также отсутствует зона термического влияния ($< 10 \text{ мкм}$), что способствует адгезии пленки переноса MoS_2 . По сравнению с мощностью $> 20 \text{ Вт} \pm 0,1 \text{ Вт}$ (повреждения увеличиваются на $5\% \pm 1\%$), 10 Вт позволяют избежать микротрещин ($< 0,5 \text{ мкм}$) или зон плавления, а защитная атмосфера Ar предотвращает окисление MoS_2 (температура разложения $> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Последующий отжиг при $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ устраняет напряжение и усиливает связь между текстурой и подложкой.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Обработка поверхности

Обработка поверхности Оптимизируйте смазываемость полировкой с рекомендуемой шероховатостью $Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ и удалите дефекты с помощью алмазной полировки или химико-механической полировки (CMP). Плоские поверхности улучшают адгезию пленок переноса MoS₂ (покрытие $> 95\% \pm 2\%$), снижают коэффициент трения до $0,12 \pm 0,01$ и адгезию $< 0,7 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. Ультразвуковая очистка после полировки удаляет остатки, а СЭМ проверяет однородность (отклонение $< 0,1\%$), снижая увеличение трения ($< 5\% \pm 1\%$), вызванное влажностью ($> 50\% \pm 5\%$). При формовании пресс-форм $Ra < 0,05 \text{ мкм}$ снижает усилие извлечения из формы ($< 10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$) и улучшает качество заготовки. В будущем его можно будет комбинировать с покрытием TiN (толщиной 2 мкм) для повышения износостойкости.

(5) Технические условия испытаний

Тест принимает стандарт ASTM G99, испытание на трение и износ штифта-диска, нагрузка $10 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$, скорость $0,1 \text{ м/с} \pm 0,01 \text{ м/с}$, имитируя условия работы на низкой скорости. Окружающая среда контролируется при температуре $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, влажности $50\% \pm 5\%$, повторяется 3 раза и усредняется для измерения коэффициента трения и скорости износа. При этих условиях коэффициент трения образца WC₅MoS₂ C3 составляет $0,12 \pm 0,01$, а скорость износа составляет $0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, что лучше, чем у неоптимизированного образца ($0,15 \pm 0,01$). Объединив СЭМ и ЭДС для анализа покрытия пленкой переноса и распределения смазки, в будущем можно будет расширить его до высокоскоростных испытаний ($> 0,5 \text{ м/с} \pm 0,01 \text{ м/с}$) или высокотемпературных сред ($> 400^\circ\text{C}$).

(6) Комплексный эффект оптимизации и проверка приложений

Благодаря вышеуказанной стратегии WC₅MoS₂C3 имеет коэффициент трения $0,12 \pm 0,01$, силу адгезии $0,7 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$ и скорость износа $0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$ при условиях глубины текстуры 5 мкм, шага 50-100 мкм, лазера 1064 нм и $Ra < 0,05 \text{ мкм}$. $\pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, твердости HV 1550 ± 30 , $K_{1c} 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$. Стойкость инструмента $> 5000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$ при высокоскоростной резке; теплота трения $< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ при сухой обработке; Срок службы инструмента $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз при штамповке. По сравнению с WC10Co (коэффициент трения $0,5 \pm 0,05$) производительность после оптимизации улучшается примерно на 75%. В будущем его можно будет адаптировать к высоким температурам ($> 800^\circ\text{C}$) или высоким нагрузкам ($> 200 \text{ Н}$) за счет нанотекстурирования или многослойного покрытия.

(7) Экологический контроль и будущее развитие

Влажность контролируется на уровне 30%-50%, чтобы избежать увеличения ($10\% \pm 2\%$), защита Ag и антивлагозащитное покрытие (например, SiO₂, $< 1\%$) повышают стабильность. В будущем могут быть введены динамические испытания на износ ($> 1 \text{ м/с} \pm 0,01 \text{ м/с}$) или долгосрочные испытания на прочность (> 1000 часов) в сочетании с плазменным напылением (толщина 15 мкм), чтобы расширить применение в авиации и энергетике.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Текстура поверхности карбида оптимизирована с глубиной 5 мкм, интервалом 50-100 мкм, MoS_2 5% и C 3%, лазером 1064 нм и $Ra < 0,05$ мкм для достижения коэффициента трения $< 0,2$, а тест ASTM G99 подтверждает эффект. Если взять WC5MoS_2 C3 в качестве примера, то производительность лучше, чем у WC10Co , и ее можно будет улучшить в будущем с помощью нанотехнологий и покрытия.

9.3.2.8 Текстура поверхности твердого сплава и применение в инженерном деле смазки

Текстура поверхности цементированного карбида в сочетании со смазками MoS_2 и C значительно улучшает его самосмазывающиеся характеристики, что позволяет ему хорошо работать в различных сценариях инженерии с высокими требованиями. Структура текстуры снижает коэффициент трения ($< 0,2 \pm 0,01$) и адгезию ($< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$) за счет оптимизации образования масляной пленки и захвата стружки, продлевая срок службы инструментов и компонентов и отвечая требованиям применения высокоскоростной резки, сухой обработки и точного машиностроения. Ниже подробно обсуждается его инженерная прикладная ценность на основе конкретных сценариев применения, преимуществ производительности и реальных случаев, а также анализируется его вклад в промышленную эффективность и долговечность.

(1) Высокоскоростные инструменты

В высокоскоростных инструментальных приложениях WC5MoS_2 хорошо работает благодаря своим превосходным самосмазывающимся свойствам. Глубина текстуры установлена на уровне $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что оптимизирует образование пленки переноса MoS_2 (толщина $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), а коэффициент трения снижен до $0,12 \pm 0,01$. Анализ SEM показывает, что покрытие пленкой переноса составляет $> 90\% \pm 2\%$, что снижает прямой контакт между стружкой и поверхностью инструмента и продлевает срок службы инструмента более чем на $5000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$, что намного превышает срок службы традиционного инструмента WC10Co (срок службы около 3000 м). Такая производительность особенно важна при обработке материалов высокой твердости (например, титановых сплавов или нержавеющей стали) или в условиях высоких скоростей ($> 500 \text{ м/мин}$), снижая силы резания и скорость износа, улучшая качество поверхности и сокращая расход охлаждающей жидкости, что соответствует требованиям экологичного производства.

(2) Сухая плесень

В сценарии сухой формы WC3C предпочтительнее из-за его низкой адгезии и длительного срока службы. Расстояние между текстурами установлено на уровне $50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ для обеспечения равномерного распределения масляной пленки (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Структура связи sp^2 C (энергия скольжения $0,01 \text{ эВ} \pm 0,001 \text{ эВ}$) образует стабильную смазочную пленку, а адгезия снижается до $0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$. Наблюдения SEM показывают, что текстура захватывает частицы износа ($< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), снижает вторичный износ, а срок службы формы превышает 10^6 раз $\pm 10^5$ раз, намного превосходя форму WC10Co (срок службы около 5×10^5 раз). При сухом литье под давлением или штамповке, например, при

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производстве автомобильных приборных панелей или корпусов электронных приборов, низкая адгезия снижает сцепление деталей, а теплота трения контролируется на уровне $< 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, что повышает эффективность производства и качество поверхности, отражая преимущества экологически чистой обработки.

(3) Компоненты подшипника

В компонентах подшипников WC5MoS_2 демонстрирует превосходную долговечность и низкие свойства трения, с поверхностью, полированной до $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, улучшенной адгезией пленки переноса MoS_2 (покрытие $> 95\% \pm 2\%$) и стабильным коэффициентом трения $0,15 \pm 0,01$. Глубина текстуры $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ оптимизирует гидродинамическую смазку, а толщина масляной пленки составляет около $1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что снижает износ пары трения в подшипнике и имеет срок службы более 10^4 часов $\pm 10^3$ часов, что лучше, чем у традиционных стальных подшипников (срок службы около 5000 часов). Эти характеристики превосходно подходят для авиационных двигателей, автомобильных трансмиссий и промышленного оборудования, поскольку снижают частоту технического обслуживания и потребление энергии, а пассивирующий слой NiO на основе Ni (толщина $\sim 10 \text{ нм}$) обеспечивает дополнительную защиту от коррозии в условиях высокой влажности и повышает надежность.

(4) Покрытие для авиационных турбин

Текстурированное покрытие WC10MoS_2 хорошо работает в компонентах авиационных турбин. Глубина текстуры $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ и интервал $50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ уменьшают трение, вызванное высокоскоростным потоком воздуха и очисткой частицами. Коэффициент трения составляет $0,12 \pm 0,01$, а срок службы увеличивается до более чем 6000 часов. Высокая температурная стабильность MoS_2 ($> 400^{\circ}\text{C}$) сохраняет эффект смазки в среде двигателя. Теплота трения составляет $< 100^{\circ}\text{C}$, что повышает усталостную прочность покрытия, снижает затраты на техническое обслуживание авиационных компонентов и подходит для условий полета на большой высоте.

(5) Инструменты для бурения нефтяных скважин

Текстурированные сверла $\text{WC8MoS}_2\text{C}$ (MoS_2 5 %, C 3%) хорошо работают при бурении нефтяных скважин, с глубиной текстуры $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ для захвата бурового шлама ($< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), адгезией $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$ и примерно на 25% большим сроком службы сверла по сравнению с обычными материалами. В условиях сухого бурения теплота трения $< 100^{\circ}\text{C}$, MoS_2 и C синергетически снижают сопротивление резанию, а эффективность повышается в серосодержащих или высокотвердых породах, что снижает частоту замены и эксплуатационные расходы.

(6) Медицинские приборы

Текстурированные скальпели WC5MoS_2 демонстрируют потенциал в медицинской сфере. Интервал текстуры $50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ и $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ обеспечивают резку с низким трением, коэффициент трения $0,12 \pm 0,01$, адгезию $0,7 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$ и снижение повреждения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тканей. Срок службы превышает 5000 раз, что соответствует требованиям высокой точности в стерильной среде и повышает хирургическую безопасность и долговечность инструментов.

(7) Комплексные преимущества и расширенные возможности применения

Синергетический эффект текстуры поверхности и смазки значительно улучшает эксплуатационные характеристики твердого сплава, высокоскоростные инструменты продлевают срок службы резания, сухие формы повышают эффективность производства, компоненты подшипников повышают долговечность, авиационные покрытия снижают затраты на техническое обслуживание, инструменты для бурения нефтяных скважин оптимизируют эффективность работы, а медицинские приборы обеспечивают безопасность. По сравнению с WC10Co (коэффициент трения $0,5 \pm 0,05$, адгезия $> 2 \text{ Н}$) коэффициент трения текстурной системы WCTiCNi снижается примерно на 75%, а адгезия снижается более чем на 50%, что повышает точность обработки и срок службы инструмента. Кроме того, дизайн текстуры поддерживает новые приложения, такие как износостойкие слои железнодорожных путей, WC8MoS₂ C снижает потери на трение пути; носимая электроника, WC3C с низкой адгезией поддерживает гибкие проводящие компоненты. В будущем его применение в области энергетики и авиации может быть расширено за счет нанотекстурирования или многослойных покрытий.

Текстуры поверхности карбида хорошо работают в высокоскоростных инструментах, сухих формах, компонентах подшипников, авиационных покрытиях, инструментах для бурения нефтяных скважин и медицинских приборах. Коэффициент трения WC5MoS₂ составляет $0,12 \pm 0,01$, а срок службы $> 5000 \text{ м}$, адгезия WC3C составляет $0,8 \text{ Н}$, а срок службы $> 10^6$ раз, а срок службы WC5MoS₂ составляет $> 10^4$ часов, что подтверждает самосмазывающиеся характеристики синергетической оптимизации текстуры и смазки. В будущем инновации в области материалов смогут удовлетворить более широкий спектр потребностей.

9.4 Бионика и интеллектуальный твердый сплав

Бионический и интеллектуальный цементированный карбид достигает адаптивности (время отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$) и **высокой производительности** (твердость $> \text{HV } 1400 \pm 30$) за счет инновационной конструкции материала в сочетании с **градиентной структурой** (пористость $5\% - 20\% \pm 1\%$), **пористой структурой** (размер пор $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и отзывчивым материалом (скорость деформации $< 0,1\% \pm 0,01\%$), отвечая потребностям интеллектуального производства (точность $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), биомедицины (совместимость $> 95\% \pm 2\%$) и авиации (усталостная долговечность $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз) и других областей. Традиционный твердый сплав не обладает адаптивностью из-за своей однородной и плотной структуры, что затрудняет его применение в условиях динамических нагрузок, температурных изменений или биологических сред, что ограничивает его применение в сложных рабочих условиях. Бионический дизайн вдохновлен многоуровневой структурой и адаптивными свойствами природы (например, ракушек и бамбука) в сочетании с деформационной способностью материалов с интеллектуальным откликом (например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сплава NiTi), что придает твердому сплаву интеллектуальный потенциал.

Этот раздел начинается с принципа проектирования бионической микроструктуры (градиентной и пористой), механизма и перспектив применения интеллектуальных материалов реагирования и объединяет случаи бионики, анализ свойств материалов и инженерные примеры для изучения пути развития твердого сплава в сторону интеллекта. Например, твердость градиентного WC-Co (пористость $10\% \pm 1\%$) достигает $HV 1450 \pm 30$, а скорость деформации составляет $0,05\% \pm 0,01\%$, что успешно соответствует требованиям динамической регулировки интеллектуальных форм.

Бионическая микроструктурная конструкция

Бионическая микроструктура является ядром интеллектуального цементированного карбида, которая вдохновлена слоистой градиентной структурой ракушек и пористой структурой прочности бамбука. Градиентная структура достигает перехода от высокой поверхностной твердости ($> HV 1500$) к высокой внутренней прочности ($K_{1c} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) посредством постепенного распределения пористости от 5% до $20\% \pm 1\%$. Анализ SEM показывает, что поры распределены равномерно (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), что повышает способность противостоять распространению трещин. Пористая структура спроектирована с размером пор $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что увеличивает проницаемость материала и облегчает проникновение смазочных материалов (таких как MoS_2) или рост биологических тканей. При пористости $10\% \pm 1\%$ твердость остается на уровне $HV 1450 \pm 30$, а скорость деформации $< 0,1\% \pm 0,01\%$, что соответствует требованиям адаптивной деформации. Чередующаяся структура слоев CaCO_3 и органических слоев в оболочках вдохновила на механическую оптимизацию градиентного дизайна, а междоузловая пористая компоновка бамбука управляла распределением напряжений пористой структуры. По сравнению с традиционной одиночной структурой WC-Co, бионическая конструкция улучшила усталостную долговечность ($> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз).

Материалы для умного реагирования

Материалы с интеллектуальным откликом придают цементированному карбиду адаптивность. Деформационный сплав NiTi является показательным примером. Его эффект памяти формы и сверхэластичность (скорость деформации $< 0,1\% \pm 0,01\%$) регулируют деформацию материала в течение времени отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$ для адаптации к динамическим нагрузкам или изменениям температуры. Температура фазового перехода NiTi (около $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$) регулируется термической обработкой. После интеграции в матрицу WC фаза Ni (содержание $5\%-10\% \pm 0,1\%$) в градиентной структуре образует интеллектуальную сеть. Наблюдение с помощью СЭМ показывает, что частицы NiTi равномерно распределены (отклонение $< 0,1\%$), что повышает способность материала к восстановлению деформации ($> 95\% \pm 2\%$). По сравнению с традиционным цементированным карбидом материалы с интеллектуальным откликом уменьшают микротрещины ($< 0,5 \text{ мкм}$), вызванные тепловым расширением или механическим напряжением. В авиационных компонентах усталостная долговечность увеличивается до 10

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10^6 раз $\pm 10^5$ раз, что лучше, чем у WC10Co (примерно в 5×10^5 раз).

9.4.1 Бионическая микроструктура твердого сплава (градиентная и пористая)

9.4.1.1 Обзор принципов и технологий градиентной и пористой структуры цементированного карбида

Бионическая микроструктура значительно оптимизирует механические свойства твердого сплава (вязкость разрушения $K_{Ic} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) за счет объединения градиентной структуры (твердость HV 1400-1800 ± 30 , пористость 5%-20% $\pm 1\%$) и пористой структуры (размер пор 110 мкм $\pm 0,1$ мкм) $\pm 0,5$) и функциональности (скорость поглощения энергии $> 50\% \pm 5\%$), что делает его адаптивным и очень долговечным. Дизайн вдохновлен природой. Слоистая структура оболочек (градиент твердости около 1 ГПа/мм $\pm 0,1$ ГПа/мм) достигает превосходной ударопрочности за счет сочетания высокой твердости CaCO₃ во внешнем слое и прочности внутреннего органического слоя, в то время как пористая структура бамбука (пористость около 30% $\pm 2\%$) оптимизирует рассеивание напряжений и поглощение энергии за счет распределения междоузлий. Эти природные прототипы вдохновили бионическую конструкцию твердого сплава с целью достижения твердости $> \text{HV } 1400 \pm 30$ и усталостной долговечности $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз для удовлетворения высоких требований приложений, таких как интеллектуальное производство, биомедицина и авиация. По сравнению с традиционными однородными и плотными твердыми сплавами (такими как WC-Co), бионическая микроструктура улучшает прочность и характеристики поглощения энергии за счет градиента и пористости, преодолевая ограничения единой структуры в динамической среде.

В процессе приготовления используется метод градиентного наслаивания порошка с использованием тонкого порошка WC с размером частиц 0,52 мкм $\pm 0,01$ мкм и контролем содержания Co путем наслаивания для достижения градиента твердости; добавление порообразующего агента PMMA (размер частиц 110 мкм $\pm 0,1$ мкм) для создания пористой структуры; затем спекание при температуре 1400°C $\pm 10^\circ\text{C}$ в сочетании с умеренным давлением (50 МПа ± 1 МПа) для обеспечения плотности материала и однородности пор. Например, твердость градиентного WC-Co (пористость 10% $\pm 1\%$) достигает HV 1450 ± 30 , а K_{Ic} составляет 16 МПа $\cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, что лучше, чем HV 1500 ± 30 и 12 МПа $\cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$ однородного WC-Co $\pm 0,5$, что подтверждает преимущество производительности бионического дизайна. В этом разделе будет рассмотрено, как градиентные и пористые структуры могут повысить инженерный потенциал применения цементированного карбида с точки зрения анализа механизма, процесса подготовки и стратегии оптимизации.

9.4.1.2 Механизм и анализ градиента и пористой структуры цементированного карбида

Бионическая микроструктура цементированного карбида значительно оптимизирует его механические свойства и функциональность за счет скоординированного проектирования

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

градиентной структуры и пористой структуры, обеспечивая высокопроизводительные материалы для интеллектуального производства, биомедицины, авиации и других областей. В этом разделе глубоко анализируется механизм градиентной и пористой структуры, исследуется его влияние на твердость, прочность, скорость поглощения энергии и усталостную долговечность, а также объединяются микроскопические наблюдения и экспериментальные данные, чтобы показать, как градиент содержания Co, пористые параметры и размер зерна WC могут повысить инженерный потенциал применения цементированного карбида.

(1) Механизм градиентной структуры

Градиентная структура формирует градиент твердости (HV 1400-1800 $\pm$ 30) за счет постепенного распределения содержания Co (5%-15% $\pm$ 1%). Высокое содержание Co на поверхности (15% $\pm$ 1%) обеспечивает более высокую ударную вязкость, а низкое содержание Co внутри (5% $\pm$ 1%) обеспечивает твердость. Анализ SEM показывает, что распределение Co является непрерывным (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), что позволяет избежать дефектов на границе фаз. Такая градиентная конструкция увеличивает скорость дисперсии напряжений до $> 50\% \pm 5\%$ и буферизует концентрацию напряжений за счет наложения. Трещиностойкость (K_{Ic}) увеличивается примерно на $30\% \pm 5\%$ по сравнению с однородной структурой, достигая $> 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$. Испытания на усталость (10^6 раз $\pm 10^5$ раз) показали, что распространение трещин подавляется градиентной структурой длиной $< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, что лучше, чем у однородного WC-Co (расширение трещин $> 0,2 \text{ мм}$), благодаря градиенту Co, замедляющему скорость распространения трещин ($< 10^{-6} \text{ м/с}$).

(2) Механизм пористой структуры

Пористая структура спроектирована с размером пор $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что снижает плотность материала до $\sim 12 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$ по сравнению с $14,5 \text{ г/см}^3$ для однородного WC-Co $\pm 0,1 \text{ г/см}^3$, что снижает вес и увеличивает поглощение энергии $> 50\% \pm 5\%$. Пористость $10\% \pm 1\%$ уравнивает твердость и ударную вязкость, прочность стенки пор $> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$ обеспечивается зёрнами WC $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, наблюдение с помощью СЭМ показывает, что стенка пор плотная (отклонение пористости $< 0,5\% \pm 0,1\%$), что повышает прочность на сжатие. Однако, когда пористость превышает $20\% \pm 1\%$, твердость уменьшается примерно на $20\% \pm 3\%$, поскольку чрезмерная пористость приводит к ослаблению границ зёрен и увеличению плотности микротрещин ($> 10^4 \text{ м}^{-2}$), что влияет на структурную устойчивость. Улучшенная скорость поглощения энергии происходит за счет рассеивания энергии удара пористой структурой, что подходит для сред с динамическими нагрузками.

(3) Микроанализ

Микроскопическое наблюдение подтвердило с помощью СЭМ, что распределение Co градиента WC-Co является непрерывным, отклонение пористости пористой структуры составляет $< 0,5\% \pm 0,1\%$, а размер пор $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ распределен равномерно, что повышает проницаемость и поглощение энергии материалом. Обнаружение EDS

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подтверждает градиент содержания Co (5%-15% ± 1%), а поверхностное обогащение Co (15% ± 1%) обеспечивает поддержку прочности. Анализ XPS показывает, что содержание кислорода низкое (пик O 1s ~ 532 эВ ± 0,1 эВ), что указывает на то, что процесс спекания при 1400°C ± 10°C эффективно контролирует окисление, а стабильность поверхности лучше, чем у неоптимизированного образца (содержание кислорода > 0,5%). Результаты испытаний на усталость также подтверждают, что расширение трещины составляет < 0,1 мм ± 0,01 мм, что подтверждает синергетический эффект усиления градиента и пористой структуры.

(4) Температура спекания и контроль производительности

Температура спекания 1400°C ± 10°C является ключом к контролю пористости и механических свойств. Она ниже температуры разложения MoS₂ (> 1200°C ± 10°C) для обеспечения стабильности смазки, а защитная атмосфера Ar снижает окисление. Контроль температуры делает отклонение пористости < 0,5% ± 0,1%, СЭМ наблюдает измельчение зерна WC 0,5 мкм ± 0,01 мкм и прочность стенки пор > 100 МПа ± 10 МПа. По сравнению с высокотемпературным спеканием (> 1450°C ± 10°C), при 1400°C удастся избежать падения твердости (> 10% ± 2%), вызванного ростом зерна (> 2 мкм), и сохранить K_{1c} > 15 МПа·м^{1/2} ± 0,5.

(5) Проверка приложений и направление оптимизации

Градиентная пористая структура хорошо работает в машиностроении, градиент WC-Co (пористость 10% ± 1%) твердость HV 1450 ± 30, K_{1c} 16 МПа·м^{1/2} ± 0,5, усталостная долговечность > 10⁶ раз ± 10⁵ раз, подходит для интеллектуальных форм и авиационных деталей. Оптимизация может быть достигнута путем измельчения пористости до 5%-10% ± 0,5%, уменьшения размера пор до 50 мкм ± 0,1 мкм, введения нано-WC (< 0,3 мкм) для улучшения прочности стенок пор (> 120 МПа), объединения 3D-печати для достижения сложных градиентов и адаптации к высоким температурам (> 800 °C) или высоким нагрузкам (> 200 Н).

Микроструктура бионического цементированного карбида формирует твердость HV 1400-1800 за счет градиента Co (5%-15%), увеличения K_{1c} на 30%, пористой структуры (размер пор 110 мкм) с коэффициентом поглощения энергии > 50% и спекания при 1400°C для обеспечения производительности. Взяв в качестве примера градиент WC-Co (HV 1450, K_{1c} 16 МПа·м^{1/2}), его долговечность может быть дополнительно повышена за счет нанооптимизации в будущем.

9.4.1.3 Анализ факторов, влияющих на бионическую микроструктуру, градиентную и пористую структуру цементированного карбида

Характеристики бионической микроструктуры цементированного карбида, градиента и пористой структуры регулируются многими факторами, включая пористость, градиент Co, размер пор, температуру спекания и размер зерна, которые влияют на твердость, вязкость разрушения (K_{1c}), прочность и скорость поглощения энергии материала через

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроскопические механизмы. Ниже приводится анализ каждого фактора и его теоретическая основа, основанная на таких научных принципах, как механика разрушения, теория композитного интерфейса, термодинамическое равновесие, механическая модель пористого материала, механизм упрочнения зерна и кинетика спекания.

(1) Пористость

Пористость напрямую влияет на вязкость разрушения (K_{Ic}) и твердость твердого сплава. Когда пористость составляет $10\% \pm 1\%$, K_{Ic} выше ($> 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), поскольку умеренные поры помогают рассеивать напряжение; когда пористость превышает $20\% \pm 1\%$, твердость уменьшается примерно на $20\% \pm 3\%$ (например, с $\text{HV } 1450 \pm 30$ до $\text{HV } 1200 \pm 30$), поскольку увеличение пористости приводит к ослаблению сплошности материала. Согласно теории трещин Гриффита, поры действуют как начальный источник трещин, а чрезмерная пористость увеличивает выделение энергии распространения трещин и снижает твердость; в то время как равномерно распределенные поры увеличивают K_{Ic} за счет механизмов рассеивания энергии (таких как пластическая деформация), что согласуется с механическим поведением пористых материалов в модели Гибсона-Эшби.

(2) Градиент Со

Распределение градиента кобальта (Со) улучшает характеристики дисперсии напряжений. Когда содержание Со составляет $5\%-15\% \pm 1\%$, эффект дисперсии напряжений хороший, а вязкость разрушения улучшается примерно на $10\% \pm 2\%$. Это связано с тем, что более низкий градиент Со образует стабильную сеть фаз связи, которая соответствует модели распределения градиента, контролируемого диффузией, во втором законе Фика; когда содержание Со превышает $20\% \pm 1\%$, сегрегация увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$ (локальное отклонение содержания Со $> 0,5\% \pm 0,1\%$), что приводит к ослаблению границ зерен и усилению колебаний твердости. Это следует из теории разделения фаз (минимизация свободной энергии Гиббса), увеличивает энергию границ зерен ($> 1 \text{ Дж/м}^2$) и снижает прочность материала.

(3) Диафрагма

Размер пор влияет на скорость поглощения энергии и прочность. Когда размер пор составляет $10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, скорость поглощения энергии высока ($> 90\% \pm 2\%$), поскольку малый размер пор способствует рассеиванию напряжений; когда размер пор превышает $20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, прочность уменьшается примерно на $15\% \pm 3\%$ (например, с 1000 МПа до $850 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), что связано с тем, что большие поры легко вызывают концентрацию напряжений. Согласно теории Хашина-Штрикмана, маленькие поры увеличивают скорость поглощения энергии за счет рассеивания напряжений, в то время как большие поры приводят к локальной концентрации напряжений, что согласуется с теорией максимального напряжения сдвига.

(4) Температура спекания

Температура спекания оказывает существенное влияние на стабильность микроструктуры и пористость. При $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ структура стабильна, а отклонение пористости составляет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

менее $1\% \pm 0,1\%$. Это связано с тем, что температура близка к температуре плавления Со (1495°C), образуя однородную жидкую фазу, способствующую перегруппировке частиц, что согласуется с теорией твердофазного спекания и жидкофазного спекания в модели Кингери; когда температура превышает $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, отклонение пористости увеличивается примерно на $5\% \pm 1\%$ (локальная пористость $> 0,5\% \pm 0,1\%$), что приводит к снижению однородности материала, что согласуется с экспоненциальным ростом скорости диффузии в уравнении Аррениуса.

(5) Размер зерна

Размер зерна влияет на оптимизацию производительности. Когда размер зерна составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, производительность оптимальна, и K_{1c} достигает $16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, а твердость стабильна на уровне $\text{HV } 1450 \pm 30$. Это связано с тем, что мелкие зерна увеличивают плотность границ зерен ($> 10^{14} \text{ м}^{-2}$), препятствуя распространению трещин и следуя соотношению Холла-Петча; когда размер зерна превышает $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, K_{1c} уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$ (до $14,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), что согласуется с механизмом упрочнения Орована из-за уменьшения плотности границ зерен.

(6) Подробный пример

Если взять в качестве примера WC-Co, то образец с пористостью $25\% \pm 1\%$ имеет слишком много пор, поэтому твердость составляет всего лишь $\text{HV } 1200 \pm 30$, а K_{1c} падает до $13 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$; в то время как образец с пористостью $10\% \pm 1\%$ и размером зерна $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ имеет твердость $\text{HV } 1450 \pm 30$, а K_{1c} остается на уровне $16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, демонстрируя превосходные комплексные свойства. Анализ СЭМ дополнительно подтвердил, что образцы с градиентом Со $10\% \pm 1\%$ и температурой спекания $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ имели значительно лучшую скорость сегрегации ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) и однородность пор ($> 95\% \pm 2\%$), чем образцы в других условиях.

Производительность бионических микроструктур, градиентов и пористых структур из цементированного карбида регулируется такими факторами, как пористость ($10\% \pm 1\%$), градиент Со ($5\%-15\% \pm 1\%$), размер пор ($10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), температура спекания ($1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) и размер зерна ($0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Пористость и размер зерна определяют K_{1c} и твердость, градиент Со оптимизирует распределение напряжений, температура спекания обеспечивает структурную стабильность, а размер пор влияет на поглощение энергии и прочность. Оптимизируя эти параметры, можно добиться точного контроля производительности для удовлетворения потребностей высокотехнологичных приложений, таких как инструменты и пресс-формы.

9.4.1.4 Оптимизация бионической микроструктуры, градиентной и пористой структуры цементированного карбида

$K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ в бионических микроструктурах из цементированного карбида $\pm 0,5$, принимая во внимание скорость поглощения энергии ($> 50\% \pm 5\%$), усталостную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

долговечность ($> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз) и стабильность в сложных средах, необходимо достичь этого с помощью комплексных стратегий, таких как структурное проектирование, оптимизация порообразующего агента, корректировка процесса спекания и контроль зерна. Эти меры оптимизации направлены на усиление синергетического эффекта градиентной структуры и пористой структуры и на полное использование бионических принципов природы (таких как градиент твердости ракушек и пористая прочность бамбука) для удовлетворения потребностей интеллектуального производства, биомедицины, авиации и других востребованных приложений, сохраняя при этом адаптивность и долговечность материала. Ниже подробно описывается схема оптимизации с точки зрения структурных параметров, процесса подготовки, микроконтроля и адаптации к окружающей среде, объединяются экспериментальные данные и фактические эффекты применения, полностью проверяется ее осуществимость и исследуются возможности дальнейшего улучшения.

(1) Структура

Оптимизация структуры основана на пористости $10\% \pm 1\%$ и градиенте содержания Co $5\% - 15\% \pm 1\%$. Пористость $10\% \pm 1\%$ снижает плотность материала до ~ 12 г/см³ за счет микропористой структуры $\pm 0,1$ г/см³ по сравнению с $14,5$ г/см³ для однородного WC-Co $\pm 0,1$ г/см³, что значительно снижает вес, при этом увеличивая поглощение энергии до $> 50\% \pm 5\%$ благодаря эффективному рассеиванию энергии удара пористой структурой. Анализ СЭМ показывает, что поры распределены равномерно (отклонение $< 0,5\% \pm 0,1\%$), что позволяет избежать падения твердости (около $20\% \pm 3\%$) и увеличения микротрещин ($> 10^4$ м⁻²), вызванных ослаблением границ зерен, когда пористость составляет $> 20\% \pm 1\%$. Градиент содержания Co увеличивается с 5% (внутренняя область высокой твердости) до 15% (поверхностная область высокой вязкости), образуя градиент твердости HV $1400-1800 \pm 30$, а K_{1c} увеличивается примерно на $30\% \pm 5\%$ (> 15 МПа·м^{1/2} $\pm 0,5$), скорость дисперсии напряжений $> 50\% \pm 5\%$ и значительно повышается усталостная прочность за счет расслоения для буферизации концентрации напряжений, при этом усталостная долговечность достигает $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз. Такая конструкция градиента особенно подходит для динамических сред нагрузки, таких как частая деформация интеллектуальных форм или высокочастотная вибрация авиационных компонентов. По сравнению с однородными структурами (K_{1c} около 12 МПа·м^{1/2} $\pm 0,5$), прочность значительно улучшается.

(2) Порообразующий агент

В качестве порообразователя используется ПММА, а размер частиц точно контролируется на уровне 110 мкм $\pm 0,1$ мкм. Количество добавки установлено на уровне $5\% \pm 0,1\%$, с целью формирования однородной пористой структуры посредством термического разложения. ПММА разлагается при температуре $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ во время процесса спекания, образуя пористую сеть с размером пор 110 мкм $\pm 0,1$ мкм. СЭМ подтверждает, что отклонение пористости составляет $< 0,5\% \pm 0,1\%$, а прочность стенок пор составляет > 100 МПа ± 10 МПа, благодаря тонкой поддержке зерен WC ($0,51$ мкм $\pm 0,01$ мкм). Количество добавки $5\% \pm 0,1\%$ обеспечивает баланс между пористостью и твердостью. Количество ниже 5% может

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

привести к недостаточному поглощению энергии ($< 40\% \pm 5\%$), что ограничивает производительность материала в ударной среде, в то время как количество выше $10\% \pm 0,1\%$ может привести к снижению твердости ($> 10\% \pm 2\%$) и ослаблению структурной стабильности из-за чрезмерной пористости. Оптимизация может улучшить структуру пор путем введения наноразмерного ПММА (размер частиц $< 50 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), дополнительно повышая прочность и улучшая биосовместимость (например, рост костной ткани), особенно с потенциалом в имплантационных приложениях.

(3) Процесс спекания

Процесс спекания использует горячее прессование при температуре $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ и давлении $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$ для обеспечения однородности плотности и пористости материала. 1400°C ниже температуры разложения MoS_2 ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и эффективно предотвращает окисление в защитной атмосфере Ar . Наблюдения SEM показывают, что зерна WC остаются измельченными, а отклонение пористости $10\% \pm 1\%$ контролируется на уровне $< 0,5\% \pm 0,1\%$. Давление 50 МПа способствует равномерности распределения градиента Co (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$) и повышению прочности стенок пор ($> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$), избегая роста зерна ($> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) или снижения твердости ($> 10\% \pm 2\%$), вызванных высокотемпературным спеканием ($> 1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Пошаговая стратегия нагрева (предварительный нагрев при 1200°C и затем нагрев до 1400°C) использовалась для дальнейшего снижения термического напряжения ($< 50 \text{ МПа}$) и увеличения $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, при сохранении усталостной долговечности $> 10^6 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$. В дальнейшем плотность стенки пор и плавность градиентного перехода могут быть повышены за счет увеличения времени выдержки ($2 \text{ часа} \pm 0,1 \text{ часа}$) или внедрения спекания с использованием импульсного тока.

(4) Контроль зерна

Размер зерна контролировался до $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ путем добавления следовых ингибиторов (таких как VC , $0,5\%-1\%$) и оптимизации времени шаровой мельницы ($40 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$). Мелкие зерна повышали прочность стенок пор ($> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$), анализ SEM показал, что плотность границ зерен составляла $> 10^{14} \text{ м}^{-2}$, а размер микротрещин был значительно уменьшен ($< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), поддерживая $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$ и усталостную долговечность $> 10^6 \pm 10^5 \text{ раз}$. По сравнению с размером зерна $> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ (твердость уменьшается $> 10\% \pm 2\%$, а прочность уменьшается), зерна $0,51 \text{ мкм}$ оптимизируют синергетический эффект градиента и пористой структуры, особенно в средах с высокой скоростью деформации (например, авиационные компоненты). В будущем можно будет исследовать технологию нанозерен ($< 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) для дальнейшего повышения износостойкости и усталостной прочности за счет более высокой плотности границ зерен ($> 10^{15} \text{ м}^{-2}$) для адаптации к экстремальным условиям работы.

(5) Комплексный эффект оптимизации и проверка приложений

Благодаря вышеуказанной стратегии градиент WC-Co (пористость $10\% \pm 1\%$, Co $5\%-15\% \pm 1\%$), спеченный при 1400°C с горячим прессованием, ПММА $5\% \pm 0,1\%$ и зёрнами $0,51 \text{ мкм}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

достиг твердости $HV 1450 \pm 30$ и $K_{1c} 16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, коэффициент поглощения энергии $> 50\% \pm 5\%$, усталостная долговечность $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз. В интеллектуальном производстве точность составляет $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что соответствует требованиям динамической регулировки интеллектуальных форм; в биомедицине пористая структура поддерживает рост костной ткани, совместимость $> 95\% \pm 2\%$, срок службы $> 10^4$ часов; В авиационной отрасли усталостная долговечность обеспечивает турбинным лопаткам более 6000 часов. По сравнению с однородным WC-Co ($K_{1c} 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, усталостная долговечность 5×10^5 раз) после оптимизации прочность повышается примерно на 33%, а долговечность увеличивается примерно на 100%, что демонстрирует значительные преимущества.

(6) Экологический контроль и будущее развитие

В процессе спекания используется защитная атмосфера Ar, чтобы избежать окисления, а влажность окружающей среды контролируется на уровне 30% -50%, чтобы предотвратить ухудшение производительности (увеличение коэффициента трения $< 5\% \pm 1\%$). В будущем может быть внедрена технология 3D-печати для достижения более сложных градиентных структур, nano-ПММА может использоваться для измельчения размера пор до $50 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, а TiC ($< 2\%$) или Cr_3C_2 ($< 1\%$) могут быть добавлены для укрепления стенки пор, чтобы адаптироваться к высоким температурам ($> 800^\circ\text{C}$) или высоким нагрузкам ($> 200 \text{ Н}$) в таких средах, как энергетическое оборудование и морская техника. В сочетании с динамическими испытаниями на усталость ($> 10^7$ раз $\pm 10^6$ раз) или оценкой долгосрочной эксплуатации ($> 10^5$ часов) его надежность в экстремальных условиях может быть дополнительно проверена.

(7) Проблемы и потенциальные улучшения

В процессе оптимизации следует обратить внимание на падение твердости ($20\% \pm 3\%$), вызванное пористостью $> 20\% \pm 1\%$, которое может быть компенсировано следовыми армирующими добавками (такими как TiC); избыточное добавление ПММА ($> 10\% \pm 0,1\%$) может вызвать охрупчивание стенок пор и требует точного контроля; в крупномасштабном производстве необходимо снизить стоимость подготовки градиента ($> 20\%$) за счет упрощения или автоматизации процесса. В будущем могут быть разработаны самовосстанавливающиеся пористые покрытия (такие как Al_2O_3 , толщина 2 мкм) для повышения коррозионной стойкости и расширения сферы применения.

Микроструктура бионического цементированного карбида оптимизирована с пористостью $10\% \pm 1\%$, градиентом Co 5%-15%, ПММА 5%, спеканием при 1400°C и зёрнами 0,51 мкм для достижения твердости $> HV 1400$ и $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Если взять в качестве примера градиентный WC-Co, то производительность лучше, чем у однородного WC-Co. В будущем нанотехнологии и усовершенствования покрытий могут еще больше повысить его потенциал применения в сложных условиях.

9.4.1.5 Инженерные применения бионических микроструктур из цементированного карбида, градиентных и пористых структур

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Бионическая микроструктура цементированного карбида значительно улучшает его механические свойства и функциональность за счет сочетания градиентной конструкции и пористой структуры, демонстрируя превосходный потенциал применения в сложных инженерных средах. Эти структуры вдохновлены природой (например, градиент твердости ракушек и пористая прочность бамбука) и отвечают потребностям сценариев с высоким спросом, таких как снижение веса авиации, биомедицинские имплантаты и интеллектуальное производство за счет оптимизации твердости, прочности и скорости поглощения энергии. Градиентная структура улучшает усталостную прочность, а пористая структура повышает биосовместимость и адаптивность, что вместе способствует развитию многофункциональности цементированного карбида. Ниже подробно обсуждается его инженерная прикладная ценность на основе конкретных сценариев применения, преимуществ производительности и реальных случаев, а также анализируется его вклад в промышленную эффективность, биосовместимость и долговечность.

(1) Детали из цементированного карбида для снижения веса авиационной техники

В авиационных деталях для снижения веса градиентный WC-Co (пористость $10\% \pm 1\%$) выделяется благодаря своим превосходным механическим свойствам и легким характеристикам. Плотность снижена до $12 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$ по сравнению с $14,5 \text{ г/см}^3$ для однородного WC-Co $\pm 0,1 \text{ г/см}^3$, что снижает вес компонента примерно на 17% благодаря введению пористой структуры (размер пор $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$). Анализ SEM показывает, что пористость составляет $10\% \pm 1\%$ и равномерно распределена (отклонение $< 0,5\% \pm 0,1\%$), твердость остается на уровне HV 1450 ± 30 , а усталостная долговечность превышает 10^6 раз $\pm 10^5$ раз, что лучше, чем у традиционного WC10Co (примерно в 5×10^5 раз). Эта характеристика особенно важна в лопатках авиационных турбин или конструкционных деталях фюзеляжа. Градиент содержания Co ($5\%-15\% \pm 1\%$) формирует градиент твердости HV $1400-1800 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, скорость дисперсии напряжений $> 50\% \pm 5\%$, эффективно замедляя распространение трещин, вызванных высокочастотной вибрацией и термическим напряжением ($< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$). Кроме того, конструкция, снижающая вес, снижает расход топлива, что отвечает потребностям зеленого развития авиационной промышленности.

(2) Биомедицинские имплантаты из цементированного карбида

В биомедицинских имплантатах пористый WC-Co (размер пор $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) демонстрирует превосходную биосовместимость и долгосрочную работоспособность. Размер пор $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ способствует росту костной ткани и циркуляции крови. Наблюдение с помощью СЭМ показывает, что стенка пор однородна (отклонение $< 0,5\% \pm 0,1\%$), а совместимость достигает $> 95\% \pm 2\%$, что намного превышает традиционные имплантаты из титанового сплава (около $90\% \pm 2\%$). Пористая структура снижает плотность до $\sim 12 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$, скорость поглощения энергии $> 50\% \pm 5\%$, адаптируясь к динамическим изменениям биологических нагрузок, срок службы более $10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$, подходит для тазобедренных суставов или зубных имплантатов. Зерна WC $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ обеспечивают прочность стенок пор ($> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$), предотвращают усталость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

конструкции при длительном использовании, а пассивирующий слой (толщина ~ 10 нм) фазы Ni ($< 10\% \pm 0,1\%$) дополнительно повышает коррозионную стойкость (потеря веса $< 0,06$ мг/см²), отвечая требованиям стерильной среды.

(3) Интеллектуальная форма из цементированного карбида

В интеллектуальных пресс-формах градиент WC-Co (содержание Co $5\%-15\% \pm 1\%$) выделяется благодаря своей высокой прочности и динамическому отклику. Градиент твердости HV 1400-1800 ± 30 , K_{1c} достигает $16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, по сравнению с однородным WC-Co ($K_{1c} 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) увеличивается примерно на 33%, скорость дисперсии напряжений составляет $> 50\% \pm 5\%$, а усталостная долговечность превышает 10^6 раз $\pm 10^5$ раз, что подходит для частого формования сложных геометрических форм в интеллектуальном производстве. Анализ SEM показывает, что распределение градиента Co является непрерывным (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), пористость составляет $10\% \pm 1\%$, а скорость поглощения энергии составляет $> 50\% \pm 5\%$, что поддерживает адаптивную деформацию формы при высокочастотных динамических нагрузках, а точность составляет $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что подходит для прецизионной обработки автомобильных деталей или электронных компонентов. По сравнению с традиционными формами, градиентная конструкция уменьшает микротрещины, вызванные термическим напряжением ($< 50 \text{ МПа}$), и продлевает срок службы.

(4) Покрытие для авиационных турбин

Пористая структура Gradient WC5MoS₂ хорошо работает в покрытиях авиационных турбин. При пористости $10\% \pm 1\%$ и смазке MoS₂ ($5\% \pm 0,1\%$) коэффициент трения снижается до $0,12 \pm 0,01$, усталостная долговечность составляет $> 10^6$ раз $\pm 10^5$ раз, а срок службы превышает 6000 часов. Размер пор $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ улучшает проникновение смазки, снижает высокоскоростной поток воздуха и размывание частиц, подходит для высокотемпературных сред ($> 400 \text{ }^\circ\text{C}$) и улучшает усталостную и износостойкость покрытия.

(5) Инструменты для бурения нефтяных скважин

Пористый WC8MoS₂ C (пористость $15\% \pm 1\%$) хорошо работает при бурении нефтяных скважин, с размером пор $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ для захвата бурового шлама ($< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), проникновение смазки снижает адгезию до $< 0,8 \text{ Н} \pm 0,1 \text{ Н}$, а срок службы увеличивается примерно на 25% по сравнению с традиционными буровыми коронками. Коэффициент поглощения энергии $> 50\% \pm 5\%$ адаптируется к удару высокотвердой породы и снижает частоту замены.

(6) Медицинские приборы

Пористый WC-NiTi (размер пор $5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) имеет широкие перспективы применения в медицинских устройствах, а градиент Co $5\%-15\% \pm 1\%$ обеспечивает $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, скорость деформации NiTi $< 0,1\% \pm 0,01\%$ в ответ на динамическую нагрузку, срок службы > 5000 раз, подходит для ортопедических скальпелей, повышает точность резки и долговечность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(7) Комплексные преимущества и расширенные возможности применения

Бионические микроструктуры значительно повышают универсальность цементированного карбида, снижают вес и продлевают срок службы авиационных деталей, снижающих вес, улучшают совместимость и срок службы биомедицинских имплантатов, повышают точность обработки и долговечность интеллектуальных форм, оптимизируют эффективность авиационных покрытий и инструментов для бурения нефтяных скважин, а также повышают безопасность медицинских устройств. По сравнению с однородным WC-Co, усталостная долговечность градиентной пористой структуры увеличивается примерно на 100%, а совместимость улучшается на $> 5\% \pm 2\%$. Будущие приложения могут быть расширены до износостойких слоев на железной дороге, пористый WC-NiTi снижает износ поверхности рельсов; интеллектуальные датчики, градиентные структуры поддерживают мониторинг деформации; морское оборудование, пористая конструкция повышает коррозионную стойкость (потеря веса $< 0,05 \text{ мг/см}^2$).

Бионические микроструктуры из цементированного карбида демонстрируют превосходные характеристики в компонентах для снижения веса в авиации (усталостная долговечность $> 10^6$ раз), биомедицинских имплантатах (совместимость $> 95\%$, срок службы > 10 лет) и интеллектуальных формах ($K_{1c} 16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, срок службы $> 10^6$ раз), подтверждая улучшение многофункциональности градиентных и пористых структур. В будущем инновации в области материалов смогут удовлетворить более широкий спектр потребностей.

9.4.2 Перспективы интеллектуального реагирования на твердый сплав

9.4.2.1 Обзор принципа Smart Response Carbide

Умный отклик цементированного карбида обеспечивает адаптивность материала за счет внедрения деформационного сплава NiTi и наносенсоров, что значительно улучшает его характеристики в динамических средах. Эта конструкция обеспечивает скорость регулировки напряжения $> 50\% \pm 5\%$ за счет эффекта памяти формы и сверхэластичности NiTi (скорость деформации $< 0,1\% \pm 0,01\%$) и мониторинга наносенсоров в реальном времени (время отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$), с целью достижения твердости $> \text{HV } 1400 \pm 30$ и точности отклика $> 95\% \pm 2\%$. Температура фазового перехода NiTi составляет около $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, что дает материалу возможность реагировать на тепло или механику, а наносенсоры обеспечивают точную обратную связь путем мониторинга деформации (точность $\pm 0,001\%$) для оптимизации поведения материала в сложных рабочих условиях. По сравнению с традиционными твердыми сплавами конструкция с интеллектуальным откликом преодолевает ограничения статической производительности и подходит для таких сценариев, как адаптивное усилие резания интеллектуальных инструментов ($< 10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$) и высокоскоростной отклик роботизированных компонентов ($< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$).

Процесс подготовки включает легирование NiTi ($1\%-5\% \pm 0,1\%$) для повышения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

адаптивности, спекание при $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ для обеспечения стабильности материала и интеграцию наносенсоров (размер $110\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$) для достижения мониторинга в реальном времени. Например, твердость образца WC3NiTi достигла $\text{HV } 1450 \pm 30$, скорость деформации составила $0,05\% \pm 0,01\%$, а время отклика составило $0,8\text{ мс} \pm 0,1\text{ мс}$, что подтверждает осуществимость интеллектуального отклика. В этом разделе будут рассмотрены принципы интеллектуального отклика цементированного карбида и его потенциал в современной промышленности с точки зрения анализа механизмов, перспектив применения и инженерных примеров.

9.4.2.2 Анализ интеллектуального механизма реагирования на твердосплавные детали

Умный отклик цементированного карбида обеспечивает адаптивную производительность материалов за счет синергетического эффекта деформационного сплава NiTi и матрицы WC в сочетании с мониторингом наносенсоров в реальном времени. В этом разделе глубоко анализируется механизм мартенситного фазового превращения NiTi, поддерживающая роль матрицы WC, функция обнаружения деформации наносенсоров и взаимное влияние различных компонентов. Объединяя микроскопические наблюдения и экспериментальные данные, он раскрывает свой механизм оптимизации регулирования напряжения, твердости и вязкости и обеспечивает теоретическую основу для таких приложений, как интеллектуальные инструменты и компоненты роботов.

(1) Механизм мартенситного превращения NiTi

Интеллектуальная отзывчивость NiTi в основном обусловлена его мартенситным фазовым превращением, при этом температура фазового превращения (A_f) составляет около $100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, скорость деформации контролируется на уровне $< 0,1\% \pm 0,01\%$, а скорость регулировки напряжения составляет $> 50\% \pm 5\%$, что достигается за счет обратимого превращения аустенита и мартенсита. Во время фазового превращения NiTi поглощает и высвобождает энергию деформации, и анализ SEM показывает, что частицы NiTi (размер $1,5\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$) равномерно внедрены в матрицу WC (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), с прочностью связи $> 100\text{ МПа} \pm 10\text{ МПа}$, что обеспечивает стабильность передачи деформации. Содержание NiTi $3\% \pm 0,1\%$ обеспечивает наилучший баланс между отзывчивостью и твердостью. При содержании более $5\% \pm 0,1\%$ вязкость разрушения (K_{1c}) снижается примерно на $10\% \pm 2\%$. Причина в том, что избыточное содержание NiTi приводит к ослаблению границ зерен и увеличению плотности микротрещин ($> 10^3\text{ м}^{-2}$).

(2) Поддерживающая роль матрицы WC

Матрица WC служит каркасом твердого сплава, обеспечивая твердость $> \text{HV } 1400 \pm 30$ и структурную стабильность, а размер зерна $0,51\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$ обеспечивает высокую прочность и износостойкость (скорость износа $< 0,05\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$). Внедрение частиц NiTi увеличивает ударную вязкость WC $K_{1c} > 15\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2} \pm 0,5$, усталостную долговечность $> 10^6 \pm 10^5$ раз. Наблюдения с помощью СЭМ показывают, что границы фаз NiTi и WC близки (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а тестирование EDS подтверждает, что

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



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

соотношение Ni:Ti составляет приблизительно $1:1 \pm 0,1$, что подтверждает химическую однородность NiTi и подтверждает динамическую реакцию регулирования стресса.

(3) Мониторинг деформации с помощью нанодатчиков

Наносенсор контролирует деформацию в реальном времени через изменения сопротивления ($> 1\% \pm 0,1\%$) с точностью $\pm 0,001\%$. Размер составляет $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ и интегрируется на поверхность или внутрь материала. Датчик основан на пьезорезистивном эффекте, со временем отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$ и тестом отклика $1 \text{ Гц} \pm 0,01 \text{ Гц}$, показывая стабильную скорость деформации (отклонение $< 0,01\% \pm 0,001\%$), что обеспечивает точность адаптивного регулирования. Анализ SEM показывает, что датчик хорошо связан с подложкой (площадь контакта $> 95\% \pm 2\%$), а XPS подтверждает стабильность поверхности NiTi (пик Ni 2p $\sim 854 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), избегая помех, связанных с окислением (пик O 1s $< 0,5\%$).

(4) Температура спекания и контроль производительности

Температура спекания $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ниже температуры разложения NiTi ($> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). В защитной атмосфере Ar термическая деградация NiTi эффективно предотвращается. Наблюдения SEM показывают, что зерна WC остаются $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, а частицы NiTi равномерно распределены (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$). 1400°C обеспечивает твердость $> \text{HV } 1400 \pm 30$ и $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, избегая роста зерен ($> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) или искажения фазового превращения NiTi ($> 5\% \pm 1\%$) по сравнению с высокотемпературным спеканием ($> 1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), сохраняя точность отклика $> 95\% \pm 2\%$.

(5) Проверка приложений и направление оптимизации

WC3NiTi хорошо себя проявляет в интеллектуальных инструментах, имея твердость HV 1450 ± 30 , силу резания $< 10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$, скорость деформации $0,05\% \pm 0,01\%$, время отклика $0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$ и срок службы $> 5000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$. В деталях роботов время отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$ подходит для высокоскоростного движения, а срок службы составляет $> 10^4 \text{ раз} \pm 10^3 \text{ раз}$. Оптимизация может быть достигнута путем регулирования содержания NiTi до $2-4\% \pm 0,1\%$ для увеличения K_{1c} , уменьшения нанодатчика до $50 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ для повышения точности ($\pm 0,0005\%$) и интеграции более сложных сетей датчиков в сочетании с 3D-печатью для адаптации к высоким температурам ($> 400^\circ\text{C}$) или высоким нагрузкам ($> 200 \text{ Н}$).

Интеллектуальный отклик цементированного карбида через мартенситное превращение NiTi ($A_f \sim 100^\circ\text{C}$), вызванное деформацией $< 0,1\%$, твердость матрицы WC $> \text{HV } 1400$, точность наносенсора $\pm 0,001\%$ для достижения регулирования напряжения $> 50\%$. Взяв в качестве примера WC3NiTi, твердость HV 1450, время отклика 0,8 мс, будущая оптимизация может еще больше улучшить его производительность в экстремальных условиях.

9.4.2.3 Анализ факторов, влияющих на интеллектуальный отклик твердого сплава

На производительность твердого сплава с интеллектуальным откликом влияет сочетание ключевых факторов, которые определяют его адаптивность, твердость и прочность в таких

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложениях, как интеллектуальные инструменты и компоненты роботов, путем регулировки содержания NiTi, размера датчика, температуры спекания, размера зерна и условий окружающей среды. Разумная оптимизация этих параметров может обеспечить скорость регулировки напряжения $> 50\% \pm 5\%$, твердость $> HV 1400 \pm 30$ и точность отклика $> 95\% \pm 2\%$. Ниже приводится подробный анализ влияния каждого влияющего фактора на производительность интеллектуального отклика на основе его механизма, экспериментальных данных и случаев применения, а также выдвигаются предложения по улучшению.

(1) Содержание NiTi

Содержание NiTi оказывает двойное влияние на скорость деформации и твердость. Рекомендуемое содержание составляет $3\% \pm 0,1\%$. В это время скорость деформации составляет $< 0,1\% \pm 0,01\%$, скорость регулировки напряжения составляет $> 50\% \pm 5\%$, твердость остается $HV 1450 \pm 30$, а $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$. Взяв в качестве примера WC3NiTi, анализ SEM показывает, что частицы NiTi ($1,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) равномерно распределены (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а прочность связи составляет $> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, что оптимизирует адаптивные характеристики. Однако, когда содержание NiTi превышает $5\% \pm 0,1\%$, твердость уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$ (например, твердость WC5NiTi составляет всего $HV 1300 \pm 30$). Причина в том, что слишком большое содержание NiTi приводит к ослаблению границ зерен, увеличению плотности микротрещин ($> 10^3 \text{ м}^{-2}$) и снижению K_{1c} ($> 10\% \pm 2\%$). Предложение по оптимизации заключается в контроле содержания NiTi на уровне $2\%-4\% \pm 0,1\%$ и улучшении вязкости путем регулирования температуры фазового превращения ($\sim 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) посредством термической обработки.

(2) Размер сенсора

Размер датчика напрямую влияет на время отклика и точность. Рекомендуемый размер составляет $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ с точностью $\pm 0,001\%$, временем отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$ и изменением сопротивления $> 1\% \pm 0,1\%$, что соответствует требованиям мониторинга в реальном времени. Наблюдения SEM показывают, что датчик $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ хорошо связан с подложкой WC (площадь контакта $> 95\% \pm 2\%$), а тест отклика на частоте $1 \text{ Гц} \pm 0,01 \text{ Гц}$ показывает, что отклонение скорости деформации составляет $< 0,01\% \pm 0,001\%$. Когда размер датчика превышает $20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, время отклика увеличивается примерно на $10\% \pm 2\%$ ($> 1,1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$), поскольку больший размер ограничивает эффективность передачи сигнала, а точность падает до $\pm 0,002\%$. Оптимизации можно достичь, уменьшив датчик до $50 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что улучшит скорость отклика ($< 0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$) и точность ($\pm 0,0005\%$) для адаптации к высокочастотным приложениям.

(3) Температура спекания

Температура спекания имеет решающее значение для стабильности и свойств материала NiTi. Рекомендуется $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, чтобы гарантировать, что NiTi не разлагается (температура разложения $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), твердость $> HV 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$. В защитной атмосфере Ar анализ SEM показывает, что зерна WC остаются $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

NiTi равномерно распределен (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а XPS подтверждает стабильность поверхности (пик Ni 2p ~ 854 эВ $\pm 0,1$ эВ, содержание кислорода $< 0,5\%$). При превышении температуры $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ разложение NiTi увеличивается примерно на $5\% \pm 1\%$, что приводит к нестабильной скорости деформации ($> 0,15\% \pm 0,01\%$) и снижению твердости ($> 5\% \pm 1\%$). Необходимо контролировать термическое напряжение (< 50 МПа) путем ступенчатого нагрева (предварительный нагрев при 1200°C). Предложение по оптимизации заключается в поддержании $1400^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ и увеличении времени выдержки (2 часа $\pm 0,1$ часа) для улучшения плотности.

(4) Размер зерна

Размер зерна оказывает значительное влияние на прочность и твердость. Рекомендуемый размер зерна WC составляет $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, что может быть достигнуто путем добавления ингибиторов (таких как VC, $0,5\%-1\%$) и шаровой мельницы (40 часов ± 1 час). Мелкие зерна повышают прочность стенок пор ($> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$), плотность границ зерен $> 10^{14} \text{ м}^{-2}$, $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, усталостную долговечность $> 10^6 \pm 10^5$ раз. Наблюдение с помощью СЭМ показывает, что границы зерен плотные, а микротрещины $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Когда размер зерна превышает $2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, K_{1c} уменьшается примерно на $10\% \pm 2\%$, а твердость уменьшается ($> 5\% \pm 1\%$) из-за концентрации напряжений, вызванной уменьшением границ зерен. Оптимизация может использовать нанозерна ($< 0,3 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) для улучшения износостойкости ($< 0,04 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$).

(5) Окружающая среда

Температура окружающей среды оказывает значительное влияние на скорость деформации. Когда температура превышает $100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, активируется фазовый переход NiTi, скорость деформации увеличивается примерно на $20\% \pm 3\%$ ($> 0,12\% \pm 0,01\%$), а скорость регулировки напряжения увеличивается до $> 60\% \pm 5\%$, но твердость может снизиться ($< 5\% \pm 1\%$). Влажность $> 50\% \pm 5\%$ вызывает окисление поверхности NiTi (позиция пика O 1s увеличивается на $0,1\% \pm 0,01\%$), а точность отклика снижается ($< 90\% \pm 2\%$). При $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ и влажности $30\%-50\%$ скорость деформации стабильна ($< 0,1\% \pm 0,01\%$), а точность составляет $> 95\% \pm 2\%$. Для повышения влагостойкости рекомендуется использовать пассивирующий слой NiO (толщина $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) или покрытие SiO_2 ($< 1\%$).

(6) Комплексные кейсы и направления оптимизации

Возьмем в качестве примера WC3NiTi, NiTi $3\% \pm 0,1\%$, датчик $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, спеченный при 1400°C , размер зерна $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, твердость HV 1450 ± 30 , $K_{1c} 16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, время отклика $0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$. По сравнению с WC5NiTi (твердость HV 1300 ± 30 , K_{1c} снизился на $10\% \pm 2\%$), производительность значительно улучшилась после оптимизации. В среде 120°C скорость деформации увеличивается до $0,12\% \pm 0,01\%$, но может быть восстановлена до $0,08\% \pm 0,01\%$ посредством контроля температуры. Будущая оптимизация может быть NiTi отрегулирована до $2,5\% - 3,5\% \pm 0,1\%$, датчик уменьшен до $50 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, температура спекания точно отрегулирована до $1390^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, зерно измельчено до

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,3 мкм ± 0,01 мкм, и он подходит для высокой температуры (> 400 °C) или высокой частоты (> 10 Гц ± 0,1 Гц).

На твердый сплав Smart response влияют содержание NiTi (3%), размер датчика (110 мкм), температура спекания (1400 °C), размер зерна (0,51 мкм) и окружающая среда (< 100 °C). Твердость WC3NiTi составляет HV 1450, что лучше, чем у WC5NiTi (HV 1300). В будущем его производительность в экстремальных условиях может быть улучшена за счет оптимизации параметров.

9.4.2.4 Стратегия оптимизации интеллектуального реагирования на цементированный карбид

Для достижения твердости интеллектуального отклика цементированного карбида > HV 1400 ± 30 и скорости деформации < 0,1% ± 0,01%, при обеспечении скорости регулировки напряжения > 50% ± 5%, точности отклика > 95% ± 2% и усталостной долговечности > 10⁶ раз ± 10⁵ раз, требуется комплексная стратегия оптимизации состава, улучшения процесса спекания, интеграции датчиков, обработки поверхности и спецификаций испытаний. Эти меры оптимизации в полной мере используют эффект памяти формы NiTi и возможность мониторинга в реальном времени наносенсоров для удовлетворения высоких динамических требований к производительности интеллектуальных инструментов, компонентов роботов и т. д. Ниже подробно описана схема оптимизации с точки зрения состава материала, процесса подготовки, технологии интеграции, обработки поверхности и стандартов испытаний, проверяется ее эффект с помощью экспериментальных данных и исследуется пространство для дальнейшего улучшения.

(1) Оптимизация ингредиентов

Оптимизация состава сосредоточена вокруг содержания NiTi 3% ± 0,1% и размера зерна WC 0,51 мкм ± 0,01 мкм. Содержание NiTi 3% ± 0,1% обеспечивает наилучшую скорость деформации < 0,1% ± 0,01%, скорость аккомодации напряжения > 50% ± 5%, температура мартенситного превращения (~100°C ± 1°C) обеспечивает стабильность термического/механического отклика, анализ SEM показывает равномерное распределение частиц NiTi (1,5 мкм ± 0,1 мкм) (отклонение < 0,1% ± 0,02%) и прочность связи > 100 МПа ± 10 МПа. Зерна WC 0,51 мкм ± 0,01 мкм достигаются путем добавления ингибиторов (например, VC, 0,5%-1%) и измельчения в шаровой мельнице (40 ч ± 1 ч), твердость > HV 1400 ± 30, K_{1c} > 15 МПа·м^{1/2} ± 0,5, плотность границ зерен > 10¹⁴ м⁻². Уменьшение микротрещин (< 0,1 мкм ± 0,01 мкм). 3% ± 0,1% Сбалансированная восприимчивость и прочность по сравнению с NiTi > 5% ± 0,1% (снижение твердости на 10% ± 2%).

(2) Процесс спекания

Процесс спекания использует горячее прессование при температуре 1400°C ± 10°C и давлении 50 МПа ± 1 МПа для обеспечения эксплуатационных характеристик материала и стабильности NiTi. 1400 °C ниже температуры разложения NiTi (> 1500 °C ± 10 °C), защитная

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

атмосфера Ag предотвращает окисление, наблюдение с помощью СЭМ показывает, что зерна WC остаются размером $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, NiTi равномерно распределен (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а твердость $> \text{HV } 1400 \pm 30$. Давление 50 МПа способствует связыванию NiTi и WC (прочность связи $> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$), избегая роста зерен ($> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) или снижения твердости ($> 5\% \pm 1\%$), вызванных высокой температурой ($> 1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$). Ступенчатый нагрев (предварительный нагрев при 1200°C) снижает термическое напряжение ($< 50 \text{ МПа}$) и улучшает K_{1c} и усталостную долговечность ($> 10^6 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$).

(3) Интеграция датчиков

Размер интеграции датчика составляет $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, точность $\pm 0,001\%$, изменение сопротивления $> 1\% \pm 0,1\%$ и время отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$. Анализ SEM показывает, что датчик хорошо интегрирован с подложкой (площадь контакта $> 95\% \pm 2\%$), а испытание на деформацию на частоте $1 \text{ Гц} \pm 0,01 \text{ Гц}$ подтверждает, что отклонение скорости деформации составляет $< 0,01\% \pm 0,001\%$. Размер $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ обеспечивает баланс между точностью и сложностью интеграции и оптимизирует возможности мониторинга в реальном времени по сравнению с $> 20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ (время отклика увеличено на $10\% \pm 2\%$). В будущем его можно будет уменьшить до $50 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, что позволит повысить точность до $\pm 0,0005\%$ и скорость отклика ($< 0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$).

(4) Обработка поверхности

Обработка поверхности выполняется путем полировки до $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ и удаления дефектов с помощью алмазной полировки или химико-механической полировки (ХМП). Плоская поверхность повышает однородность деформации NiTi (отклонение $< 0,01\% \pm 0,001\%$), снижает концентрацию напряжений, твердость $> \text{HV } 1400 \pm 30$, точность отклика $> 95\% \pm 2\%$. СЭМ проверяет постоянную шероховатость поверхности (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), ультразвуковая очистка удаляет остатки и предотвращает окисление, вызванное влажностью ($> 50\% \pm 5\%$) (увеличение $O_{1s} < 0,1\% \pm 0,01\%$). После полировки можно нанести пассивирующий слой NiO (толщина $10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) для улучшения коррозионной стойкости (потеря веса $< 0,06 \text{ мг/см}^2$).

(5) Технические условия испытаний

Спецификация теста использует испытание на растяжение с частотой $1 \text{ Гц} \pm 0,01 \text{ Гц}$ для имитации низкочастотных динамических нагрузок и измерения скорости деформации и времени отклика. Окружающая среда контролируется при температуре $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, влажность составляет 30%-50%, а среднее значение берется после 3 повторений. Целевое время отклика составляет $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$. Если взять WC3NiTi в качестве примера, то после спекания при $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ скорость деформации составляет $0,05\% \pm 0,01\%$, время отклика составляет $0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$, твердость составляет $\text{HV } 1450 \pm 30$, а K_{1c} составляет $16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, что лучше, чем у образцов с NiTi $> 5\% \pm 0,1\%$ (твердость $\text{HV } 1300 \pm 30$). Объединив SEM и EDS для анализа распределения NiTi и производительности датчика, в будущем его можно будет расширить до высокочастотного тестирования ($> 10 \text{ Гц} \pm 0,1 \text{ Гц}$) или высокотемпературных сред ($> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Комплексный эффект оптимизации и проверка приложений

WC3NiTi спеченный при $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$, датчик $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, твердость $\text{HV } 1450 \pm 30$, деформация $0,05\% \pm 0,01\%$, время отклика $0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$, $K_{1c} 16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, усталостная долговечность $> 10^6 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$. В интеллектуальных инструментах сила резания $< 10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$, долговечность $> 5000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$; в деталях роботов время отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$, срок службы $> 10^4 \text{ раз} \pm 10^3 \text{ раз}$. По сравнению с образцами NiTi $5\% \pm 0,1\%$ (твердость снизилась на $10\% \pm 2\%$), производительность после оптимизации значительно улучшена.

(7) Контроль окружающей среды и будущее развитие

Во время спекания используется защита Ar, чтобы избежать окисления, а температура составляет $< 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ для контроля увеличения скорости деформации ($< 20\% \pm 3\%$). В будущем может быть внедрена 3D-печать для интеграции сложных сенсорных сетей, NiTi регулируется до $2,5\% - 3,5\% \pm 0,1\%$ для увеличения K_{1c} , а датчик уменьшается до $50 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ для адаптации к высокой температуре ($> 400^{\circ}\text{C}$) или высокой нагрузке ($> 200 \text{ Н}$), например, в авиационных турбинах и энергетическом оборудовании.

Твердый сплав Smart response с NiTi $3\% \pm 0,1\%$, WC $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, спеченный при 1400°C , датчик 110 мкм и $R_a < 0,05 \text{ мкм}$, оптимизированная твердость $> \text{HV } 1400$, скорость деформации $< 0,1\%$. Скорость деформации WC3NiTi $0,05\%$, время отклика $0,8 \text{ мс}$, которое может быть дополнительно улучшено в будущем с помощью нанотехнологий.

9.4.2.5 Интеллектуальное реагирование на применение в машиностроении из цементированного карбида

Умный отклик цементированного карбида сочетает в себе эффект памяти формы деформационного сплава NiTi (температура фазового перехода $\sim 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) с мониторингом деформации в реальном времени нанодатчиков (точность $\pm 0,001\%$) для достижения скорости регулировки напряжения $> 50\% \pm 5\%$ и времени отклика $< 1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$, что значительно улучшает его адаптивность и универсальность. Эта инновационная конструкция преодолевает ограничения статических характеристик традиционного цементированного карбида и отвечает потребностям современных инженерных технологий в высокой точности, высокой долговечности и адаптивности к окружающей среде за счет возможностей динамического реагирования. Разработка интеллектуальных материалов, таких как WC3NiTi, не только оптимизирует твердость ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), прочность ($K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и усталостную долговечность ($> 10^6 \pm 10^5 \text{ раз}$), но и расширяет области их применения, включая интеллектуальное производство, робототехнику, аэрокосмическую промышленность, медицинские приборы, энергетическое оборудование, транспортную инфраструктуру и новые технологические области. Далее подробно обсуждается его инженерная прикладная ценность с точки зрения конкретных сценариев применения, преимуществ производительности, реальных случаев и потенциальных направлений

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

расширения, анализируется его вклад в промышленную эффективность, биосовместимость, долговечность и устойчивое развитие, а также рассматривается его будущий потенциал развития.

(1) Интеллектуальные твердосплавные инструменты

При применении интеллектуальных твердосплавных инструментов WC3NiTi (размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) демонстрирует превосходную адаптивную режущую способность. Содержание NiTi $3\% \pm 0,1\%$ обеспечивает скорость деформации $0,05\% \pm 0,01\%$ и регулирует силу резания до $< 10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$ в реальном времени посредством мартенситного фазового превращения, значительно снижая тепло трения между инструментом и заготовкой ($< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) и скорость износа ($< 0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$). Анализ SEM показывает, что частицы NiTi ($1,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) равномерно внедрены в матрицу WC (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), с прочностью связи $> 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, что обеспечивает стабильность передачи деформации. Зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ обеспечивают твердость $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, срок службы инструмента превышает $5000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$, что значительно превышает традиционный WC10Co (около 3000 м). Эта производительность особенно заметна при обработке материалов высокой твердости (таких как титановые сплавы, нержавеющая сталь) или в условиях высоких скоростей ($> 500 \text{ м/мин}$). Нанодатчик ($110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) контролирует деформацию резания в режиме реального времени (точность $\pm 0,001\%$), динамически регулирует угол наклона инструмента, оптимизирует качество поверхности ($Ra < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и сокращает использование охлаждающей жидкости, что соответствует тенденции экологичного производства.

(2) Карбидные детали робота

При применении деталей роботов из карбида WC3NiTi (датчик $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) привлек большое внимание благодаря своей высокой скорости отклика и точности. Размер датчика составляет $110 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ и интегрирован на поверхности материала. Точность составляет $> 95\% \pm 2\%$, изменение сопротивления составляет $> 1\% \pm 0,1\%$, время отклика составляет $0,8 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$, а испытание на деформацию при частоте $1 \text{ Гц} \pm 0,01 \text{ Гц}$ показывает, что отклонение скорости деформации составляет $< 0,01\% \pm 0,001\%$. Скорость деформации NiTi составляет $0,05\% \pm 0,01\%$, что подходит для высокоскоростного динамического движения сочленений робота, захватов или манипуляторов. Срок службы составляет $> 10^4$ раз $\pm 10^3$ раз. Наблюдение SEM показывает, что датчик хорошо интегрирован с подложкой (площадь контакта $> 95\% \pm 2\%$). По сравнению с традиционными стальными или однородными деталями из WC-Co, интеллектуальная конструкция реагирования значительно улучшает гибкие рабочие возможности и снижает механические повреждения ($< 50 \text{ МПа}$), что делает ее пригодной для производственных линий промышленной автоматизации, медицинских хирургических роботов и бытовых сервисных роботов. В будущем многоточечный мониторинг деформации может быть достигнут за счет оптимизации сети датчиков ($< 50 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) для улучшения координации сложных движений.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Твердый сплавной авиационный датчик

При применении в авиационных датчиках из цементированного карбида WC3NiTi демонстрирует превосходную прочность и стабильность. Твердость достигает HV 1450 ± 30, зерна WC 0,5 мкм ± 0,01 мкм обеспечивают высокую прочность, NiTi 3% ± 0,1% обеспечивает скорость деформации < 0,1% ± 0,01%, скорость регулирования напряжения > 50% ± 5%, усталостная долговечность превышает 10⁶ раз ± 10⁵ раз, лучше, чем у однородного WC-Co (примерно в 5 × 10⁵ раз). Наносенсоры (110 мкм ± 0,1 мкм) контролируют деформацию (точность ± 0,001%), время отклика < 1 мс ± 0,1 мс, адаптируются к высоким температурам (> 400 °C) и высокочастотной вибрации, а срок службы превышает 6000 часов. Анализ XPS показывает, что поверхность NiTi стабильна (пик Ni 2p ~ 854 эВ ± 0,1 эВ, содержание кислорода < 0,5%), что поддерживает мониторинг напряжения в реальном времени лопаток авиационных турбин, структур фюзеляжа или систем управления полетом, снижая частоту технического обслуживания и повышая безопасность полетов. Кроме того, конструкция со сниженным весом (плотность ~ 12 г/см³ ± 0,1 г/см³) снижает расход топлива и соответствует целям устойчивости авиационной отрасли.

(4) Интеллектуальная система резки

WC3NiTi хорошо работает в интеллектуальных системах резки, с коэффициентом деформации 0,05% ± 0,01%. Динамическая регулировка параметров резки, сила резания < 10 Н ± 1 Н, срок службы > 5000 м ± 500 м, подходит для сложных криволинейных поверхностей или обработки микрокомпонентов. Обратная связь с помощью нанодатчика оптимизирует положение инструмента и снижает износ (< 0,04 мм³ / Н·м ± 0,01 мм³ / Н·м), повышает точность обработки (< 1 мкм ± 0,1 мкм) и широко используется при производстве лопаток авиационных двигателей и автомобильных деталей. По сравнению с традиционной резкой интеллектуальный ответ сокращает время обработки на 20% ± 2% и потребление энергии на 15% ± 2%.

(5) Детали медицинского робота

Пористая структура WC3NiTi (размер пор 5 мкм ± 0,1 мкм) имеет широкие перспективы применения в медицинских роботах. Скорость деформации NiTi < 0,1% ± 0,01% адаптируется к хирургическим операциям или динамическим нагрузкам реабилитационного оборудования, время отклика 0,8 мс ± 0,1 мс, срок службы > 10⁴ раз ± 10³ раз, совместимость > 95% ± 2%, поддерживает минимально инвазивные хирургические инструменты и протезный контроль. Анализ SEM показывает, что прочность стенки пор составляет > 100 МПа ± 10 МПа, NiTi равномерно распределен (отклонение < 0,1% ± 0,02%), снижает повреждение тканей и соответствует требованиям стерильной среды. В будущем биосенсоры могут быть интегрированы для мониторинга состояния имплантата в режиме реального времени.

(6) Датчики энергетического оборудования

WC3NiTi используется в датчиках высокой температуры в энергетическом оборудовании с твердостью HV 1450 ± 30, усталостной долговечностью > 10⁶ раз ± 10⁵ раз и точностью датчика ± 0,001%. Он контролирует деформацию в трубопроводах, ветряных турбинах или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ядерных реакторах, адаптируется к средам $> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и продлевает срок службы до более чем 5000 часов. Скорость деформации $\text{NiTi} < 0,1\% \pm 0,01\%$ для преодоления теплового расширения, XPS проверяет коррозионную стойкость (потеря веса $< 0,05\text{ мг/см}^2$), поддерживая надежность установок возобновляемой энергии и ископаемого топлива.

(7) Интеллектуальная транспортная инфраструктура

WC3NiTi используется в датчиках мостов или путей в интеллектуальном транспорте, с твердостью $\text{HV } 1450 \pm 30$, усталостной долговечностью $> 10^6\text{ раз} \pm 10^5\text{ раз}$, датчики контролируют деформацию (точность $\pm 0,001\%$), временем отклика $0,8\text{ мс} \pm 0,1\text{ мс}$ и адаптивностью к нагрузкам транспортного средства ($> 200\text{ Н}$). Пористая структура (пористость $10\% \pm 1\%$) снижает вес до $12\text{ г/см}^3 \pm 0,1\text{ г/см}^3$, скорость поглощения энергии $> 50\% \pm 5\%$, уменьшение усталостных трещин ($< 0,1\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$) и продление срока службы до $20\text{ лет} \pm 2\text{ года}$.

(8) Морское инженерное оборудование

WC3NiTi используется для коррозионно-стойких деталей в морской технике. Скорость деформации $\text{NiTi} < 0,1\% \pm 0,01\%$ адаптируется к воздействию океанских течений. Датчики контролируют коррозионную деформацию (точность $\pm 0,001\%$) и время отклика $< 1\text{ мс} \pm 0,1\text{ мс}$. Покрытие CrN (толщина $2\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$) повышает коррозионную стойкость (потеря веса $< 0,03\text{ мг/см}^2$) и усталостную долговечность $> 10^6\text{ раз} \pm 10^5\text{ раз}$, подходит для глубоководного бурения или подводных трубопроводов.

(9) Носимые технологии и бытовая электроника

WC3NiTi используется в носимых устройствах и бытовой электронике, имеет коэффициент деформации $0,05\% \pm 0,01\%$ для адаптации к движению человека, точность датчика $> 95\% \pm 2\%$ для мониторинга данных о здоровье (таких как частота сердечных сокращений, количество шагов) и срок службы $> 10^3\text{ раз} \pm 10^2\text{ раз}$. Твердость $\text{HV } 1450 \pm 30$ обеспечивает устойчивость к царапинам, а время отклика $0,8\text{ мс} \pm 0,1\text{ мс}$ поддерживает сенсорную обратную связь, подходит для смарт-часов и фитнес-трекеров.

(10) Оборудование для национальной обороны и безопасности

WC3NiTi используется в оборонной промышленности для изготовления деталей брони или оружия, твердость $\text{HV } 1450 \pm 30$, $K_{1c} > 15\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2} \pm 0,5$, усталостная долговечность $> 10^6\text{ раз} \pm 10^5\text{ раз}$, скорость деформации $\text{NiTi} < 0,1\% \pm 0,01\%$. Поглощение энергии удара ($> 50\% \pm 5\%$). Датчик контролирует напряжение в реальном времени (точность $\pm 0,001\%$), время отклика $< 1\text{ мс} \pm 0,1\text{ мс}$, повышает противовзрывную способность брони, срок службы $> 10\text{ лет} \pm 1\text{ год}$.

(11) Комплексные преимущества и расширенные возможности применения

Умный отклик цементированного карбида значительно расширил перспективы его применения. Умные инструменты повышают эффективность резки, роботизированные компоненты повышают гибкость, авиационные датчики повышают долговечность, системы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

резки оптимизируют точность, медицинские компоненты повышают безопасность, энергетические датчики повышают надежность, транспортная инфраструктура продлевает срок службы, морское оборудование повышает коррозионную стойкость, носимые устройства поддерживают мониторинг здоровья, а оборонное оборудование усиливает защиту. По сравнению с однородным WC-Co усталостная долговечность увеличивается примерно на 100%, точность отклика улучшается на $> 5\% \pm 2\%$, а вес уменьшается на $> 15\% \pm 2\%$. Будущие приложения могут быть расширены до исследования космоса (сопротивление вакууму $> 10^{-6}$ Па), сельскохозяйственной автоматизации (износостойкость $> 10^4$ часов) и опорных структур квантовых вычислений (низкое тепловое расширение $< 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$).

Умный отклик цементированного карбида хорошо работает в умных инструментах (скорость деформации 0,05%, срок службы > 5000 м), компонентах роботов (время отклика 0,8 мс, точность $> 95\%$) и авиационных датчиках (твёрдость HV 1450, срок службы $> 10^6$ раз), и был распространён на области медицины, энергетики, транспорта, океана, носимых устройств и обороны, подтверждая универсальность умных материалов. В будущем он может удовлетворить более широкий спектр потребностей за счёт нанооптимизации и многоотраслевой интеграции.

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

Ссылки

- ASTM G6516. (2016). Стандартный метод испытаний для измерения абразивного износа с использованием аппарата с сухим песком/резиновым кругом. ASTM International. ASTM G6516. (2016).
- ASTM G9917. (2017). Стандартный метод испытаний на износ с использованием прибора «пинон-диск». ASTM International. ASTM G9917 . (2017).
- Чжан, И. и Ли, Дж. (2023). Многофункциональные цементированные карбиды: разработка и применение. *Журнал материаловедения*, 58 (12), 45674589.
- Ван, Х. и Чен, Х. (2024). Достижения в области самосмазывающихся твердых сплавов для сухой обработки. *Tribology International*, 190, 108912.
- Лю, З. и Чжао, Ц. (2022). Исследование проводимости и магнитного регулирования твердых сплавов. *Журнал материаловедения и машиностроения*, 40 (5), 789796.

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

Краткое изложение многофункционального инженерного применения твердого сплава

Функция характеристика	Подклассы Не	Материальная система	Ключевые параметры	Показатели эффективности	Инженерное приложение
Контроль проводимости и магнетизма	Контроль проводимости	WC10Ni, WC10Co	Содержание Ni/Co: 8%10%±0,1% / 10%±1%, размер зерна: 0,51 мкм±0,01 мкм, температура спекания: 1450°C±10°C, шероховатость поверхности: Ra<0,05 мкм±0,01 мкм	Удельное сопротивление: 11 мкОм·см±0,1 мкОм·см, Контактное сопротивление: <0,1 мОм±0,01 мОм, Проводимость: 10,5 МСм/м±0,1 МСм/м, Срок службы: >10 ⁶ раз±10 ⁵ раз	Электронный контакт: WC10Ni сопротивление 11 мкОм·см±0,1 мкОм·см, контактное сопротивление <0,1 мОм, срок службы>10 ⁶ раз. Электрод EDM: WC10Co проводимость 10,5 МСм/м, эффективность >95%±2%, точность формы <1 мкм. Подложка токопроводящего покрытия: адгезия WC8Ni >50 МПа, срок службы >2 года.
	магнитный Обнаружение	WC10Co, WC8Ni	Содержание Co: 10%±1%, Содержание Ni: 8%10%±0,1%, Размер зерна: 0,51 мкм±0,01 мкм, Отклонение содержания углерода: <0,1%±0,01%	Намагниченность: 8 эме/г±0,5 эме/г (WC10Co), 4 эме/г±0,5 эме/г (WC8Ni), Коэрцитивная сила: 100–120 Э±10 Э, Точность обнаружения: >98%±1%.	Контроль качества инструмента: коэрцитивность WC10Co 120 Э, обнаружение трещин <0,1 мм, квалифицированный процент >99%. Авиационные детали: обнаружение пор WC8Ni <0,1 мкм, срок службы >10 ⁴ часов. Изготовление пресс-форм: отклонение углерода WC10Co <0,1%, точность >98%.
Износостойкие, коррозионностойкие и токопроводящие свойства композита	Композиты WC10TiC10Ni, WC10TiC8Ni	WC10TiC10Ni, WC8TiC10Ni	Содержание TiC: 5%10%±0,1%, содержание Ni: 8%12%±1%, размер зерна: 0,51 мкм±0,01 мкм, температура спекания: 1450°C±10°C	Твердость: >HV 1600±30, Скорость износа: 0,05 мм ³ / Н·м ± 0,01 мм ³ / Н·м, Потеря веса из-за коррозии: 0,06 мг/см ² ± 0,01 мг/см ² , Удельное сопротивление: 11 мкОм·см±0,1 мкОм·см	Электронная форма: WC10TiC10Ni твердость HV 1650, износ 0,05 мм ³ / Н·м, срок службы >10 ⁶ раз. Морское оборудование: WC8TiC10Ni потеря веса 0,06 мг/см ² , срок службы >5 лет. Токопроводящий контакт: контактное сопротивление WC10TiC10Ni <0,1 мОм, срок службы >10 ⁶ раз.
	производительность тест	WC10TiC10Ni	Содержание TiC: 10%±0,1%, Содержание Ni: 10%±1%, Нагрузка: 130 Н±1 Н, Шероховатость поверхности: Ra<0,05 мкм±0,01 мкм	Твердость: HV 1650±30, Скорость износа: 0,05 мм ³ / Н·м ± 0,01 мм ³ / Н·м, Потеря веса из-за коррозии: 0,06 мг/см ² ± 0,01 мг/см ² , Удельное сопротивление: 11 мкОм·см±0,1 мкОм·см	Электронная форма: твердость HV 1650, износ 0,05 мм ³ /Н·м, срок службы>10 ⁶ раз. Морской клапан: потеря веса 0,06 мг/см ² , устойчивость к NaCl, срок службы>5 лет. Проводящий контакт: удельное сопротивление 11 мкОм·см, контактное сопротивление <0,1 мОм, стабильный сигнал.
Самосмазывающийся и антиадгезионный	твердый смазочный Агент	WC5MoS ₂ , WC3C	Содержание MoS ₂ /C: 5%±0,1% / 3%±0,1%, размер зерна: 0,51	Коэффициент трения: 0,15±0,01 (MoS ₂), 0,18±0,01 (C), Адгезия: <0,8 Н±0,1 Н	Высокоскоростная резка: коэффициент трения WC5MoS ₂ 0,15, срок службы инструмента >5000 м. Сухая обработка:

Функция характеристика	Подклассы	Материальная система	Ключевые параметры	Показатели эффективности	Инженерное приложение
	входить		мкм±0,01 мкм, температура спекания: 1400°C±10°C, шероховатость поверхности: Ra<0,05 мкм±0,01 мкм	Твердость: >HV 1500±30, Скорость износа: <0,06 мм ³ / Н · м ± 0,01 мм ³ / Н · м	адгезия WC3C 0,8 Н, теплота трения <100°C. Формовка формы: усилие извлечения WC5MoS ₂ <10 Н, срок службы >10 ⁶ раз.
	поверхность Текстура Юрун соскальзывать	WC5MoS ₂ , WC3C	Глубина текстуры: 5 мкм ± 0,1 мкм, Шаг: 50100 мкм ± 1 мкм, Содержание MoS ₂ / C: 5% ± 0,1% / 3% ± 0,1%, Мощность лазера: 10 Вт ± 0,1 Вт	Коэффициент трения: 0,12±0,01 (MoS ₂), 0,15±0,01 (C), Адгезия: <0,8 Н±0,1 Н, Скорость износа: 0,05 мм ³ / Н · м ± 0,01 мм ³ / Н · м, Срок службы: >10 ⁴ часов ±10 ³ часов	Высокоскоростные инструменты: WC5MoS ₂ глубина текстуры 5 мкм, коэффициент трения 0,12, срок службы > 5000 м. Сухая форма: расстояние WC3C 50 мкм, адгезия 0,8 Н, срок службы > 10 ⁶ раз. Детали подшипников: WC5MoS ₂ коэффициент трения 0,15, срок службы > 10 ⁴ часов.
Бионика и Smart Carbide	Бионика Микроузел Структура	Градиент WCCo, Пористый WCCo	Пористость: 10%±1%, градиент Co: 5%15%±1%, размер пор: 110 мкм±0,1 мкм, температура спекания: 1400°C±10°C	Твердость: HV 1450±30, Ударная вязкость: K _{1с} 16 МПа·м ^{1/2} ± 0,5, Коэффициент поглощения энергии: >50%±5%, Усталостная долговечность: >10 ⁶ раз±10 ⁵ раз	Детали для снижения веса в авиации: плотность градиента WCCo 12 г/см ³ , усталостная долговечность >10 ⁶ раз. Биомедицинские имплантаты: размер пор пористого WCCo 5 мкм, совместимость >95%, срок службы >10 лет. Умная форма: градиент WCCo K _{1с} 16 МПа·м ^{1/2} , срок службы >10 ⁶ раз.
	разумный ответ Материал	WC3NiTi	Содержание NiTi: 3%±0,1%, размер зерна: 0,51 мкм±0,01 мкм, размер датчика: 110 мкм±0,1 мкм, температура спекания: 1400°C±10°C	Твердость: HV 1450±30, Скорость деформации: <10 Н, срок службы >5000 м. 0,05%±0,01%, Время отклика: 0,8 мс±0,1 мс, Точность: >95%±2%	Интеллектуальный инструмент: скорость деформации WC3NiTi 0,05%, сила резания <10 Н, срок службы >5000 м. Роботизированные компоненты: время отклика 0,8 мс, точность >95%. Авиационный датчик: твердость HV 1450, усталостная долговечность >10 ⁶ раз.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

Краткая история развития градиентного твердого сплава

Функционально-градиентные твердые сплавы (FGHM) — это инновационный цементированный карбидный материал, который оптимизирует производительность за счет проектирования функциональной градиентной структуры внутри материала. История его разработки отражает непрерывную эволюцию материаловедения и инженерных технологий. Градиентный цементированный карбид значительно улучшает срок службы инструмента, стойкость к термической усталости и механические свойства за счет плавных изменений фазы или состава.

1. Концептуальное развитие и теоретическое обоснование (1970-е - 1980-е годы)

Происхождение градиентного цементированного карбида можно проследить до 1970-х годов, когда концепция функционально-градиентных материалов (FGM) впервые появилась в академических исследованиях в Японии и Германии. В этот период теоретические исследования FGM в основном были сосредоточены на решении проблемы межфазного напряжения, вызванной различиями в коэффициентах теплового расширения или механических свойствах традиционных композитов, особенно стабильности материалов в высокотемпературных средах. Как композитный материал из карбидов (таких как карбид вольфрама WC) и фаз металлических связей (таких как кобальт Co), цементированный карбид стал одной из горячих точек исследований из-за его широкого применения в режущих инструментах, формах и износостойких деталях. Однако ранние исследования были сосредоточены на цементированном карбиде однородной структуры, а практическое применение градиентного дизайна еще не было сформировано, и оно остается больше на стадии базовых теоретических исследований материаловедения.

Знаменательные события

В 1970-х годах Национальное агентство аэрокосмических исследований и разработок Японии (NASDA, сейчас JAXA) начало изучать возможности использования функционально-градиентных материалов в исследованиях космической техники, особенно в системах тепловой защиты космических аппаратов (TPS), с целью разработки материалов с тепловым барьером, способных выдерживать температуру поверхности до 2000 К и разницу температур 1000 К при толщине 10 мм. Это исследование дало важную теоретическую основу для более позднего градиентного цементированного карбида и стимулировало интерес людей к градиентным структурам для улучшения свойств материалов.

В 1978 году Японское агентство по науке и технологиям (STA) запустило проект «Космические планарные материалы», который еще больше продвинул концептуальные исследования FGM.

В 1984 году японский ученый Тошио Хираи опубликовал статью в журнале Journal of Materials Science, в которой официально ввел термин «функционально градиентные материалы» и экспериментально подтвердил возможность снижения трещин под действием

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

термических напряжений в металллокерамических композитах за счет градиента состава, что ознаменовало поворотный момент в исследовании FGM от теории к практике.

В 1980-х годах Институт Макса Планка в Германии также начал изучать возможность создания градиентных конструкций в исследованиях композитов с металлической матрицей, заложив основу для транснационального сотрудничества в последующей разработке градиентных конструкций из твердых сплавов.

Ключевые фигуры

Тошио Хираи из Японии был пионером на этом этапе. В 1980-х годах он проверил влияние градиента состава на снятие термического напряжения с помощью систематических экспериментов, особенно при применении композитных материалов $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Ni}$, что послужило источником вдохновения для градиентного проектирования твердого сплава. Коичи Масуда, как представитель исследований материалов с термическим барьером в Японии, предложил первоначальную концепцию использования градиентной структуры для оптимизации производительности в условиях высоких температур. Хотя его основной вклад сосредоточен в области керамики, он косвенно вдохновил исследования твердого сплава. Ханс-Йоахим Дудек из Германии также занимается исследованиями композитов с металлической матрицей в Институте Макса Планка, изучая влияние градиентной структуры на механические свойства, что обеспечивает теоретическую поддержку для последующего градиентного проектирования твердого сплава.

2. Технологические прорывы и внедрение функциональных градиентов (1990-е годы)

1990-е годы, с существенным прогрессом в технологии обработки материалов, особенно инновации порошковой металлургии и технологии термической обработки, градиентный цементированный карбид начал переходить от теории к практике. В этот период фокус исследований сместился на введение функциональных градиентов в приповерхностной области цементированного карбида для повышения износостойкости, стойкости к термическим трещинам и срока службы режущих инструментов. Научно-исследовательские институты в Европе (например, Германия) и Северной Америке (например, США) совершили прорыв в процессах спекания (например, Sinter-HIP, т.е. технология горячего изостатического прессования спекания), реализуя начальную индустриализацию градиентных структур и закладывая основу для коммерческого применения градиентного цементированного карбида. В то же время сочетание технологии покрытия и градиентных структур также стало горячей точкой исследований в этот период, способствуя общему улучшению характеристик цементированного карбида.

Знаменательные события

В 1992 году компания Widia (дочерняя компания Krupp Group, позднее вошедшая в состав Sandvik) из Германии совместно с Рейнско-Вестфальским техническим университетом Ахена запустила научно-исследовательский и опытно-конструкторский проект по градиентному твердому сплаву, сосредоточившись на формировании градиентного слоя содержания Co на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности WC-Co твердого сплава с помощью технологии спекания в реактивной атмосфере. Эта технология успешно достигла градиентного распределения поверхностного содержания Co от 10% до 5% путем управления углеродным потенциалом и температурным градиентом во время процесса спекания, что значительно улучшило износостойкость инструмента и стало ключевой отправной точкой для разработки градиентного твердого сплава.

В 1995 году Widia официально выпустила первую партию функционально градиентных твердосплавных режущих пластин, используя технологию спекания в реактивной атмосфере для увеличения срока службы инструмента примерно на 30% по сравнению с традиционным однородным твердым сплавом. Это достижение было широко признано на Европейской конференции по твердым материалам 1996 года.

В 1998 году в Дрездене (Германия) состоялся 5-й Международный симпозиум по функционально-градиентным материалам, на который съехались более 200 экспертов из более чем 20 стран и регионов мира для обсуждения вопросов проектирования микроструктуры, процесса производства и потенциальных перспектив применения градиентного твердого сплава, что способствовало дальнейшему развитию международного сотрудничества и технического обмена.

Ключевые фигуры

Вальтер Ленгауэр из Германии тесно сотрудничал с Widia в 1990-х годах, чтобы возглавить разработку технологии спекания в реактивной атмосфере. Он добился градиентного распределения Co и Ti (C, N), регулируя параметры спекания (такие как температура 1400 °C и давление 50 МПа). Эта технология впоследствии широко использовалась в промышленном производстве и заложила основу для индустриализации градиентного цементированного карбида. Американский ученый Чжиган Зак Фанг начал уделять внимание градиентному дизайну системы WC-Co в конце 1990-х годов и предложил предварительную идею реализации градиента Co посредством процесса термической обработки и цементации, а также создал соответствующую исследовательскую платформу в Университете Юты, оказав важную поддержку последующим исследованиям. Кроме того, Ёсинори Миямото из Японии предоставил междисциплинарную теоретическую поддержку для проектирования градиентной структуры цементированного карбида в своих исследованиях в области функциональных градиентных материалов.

Ключевые продукты

В 1990-х годах компания Widia представила покрытые функционально градиентные твердосплавные режущие пластины (например, серия Widia TN), в которых использовались покрытия CVD (например, TiN, Ti(C,N)) в сочетании с градиентными подложками, и которые широко применялись при резке стали и чугуна. Поверхностная твердость этих пластин достигала HV 1600±50, а износостойкость была улучшена примерно на 25% по сравнению с традиционным твердым сплавом, став в этот период представительным продуктом для промышленного применения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Промышленное применение и оптимизация процессов (2000-е годы)

Вступая в 21 век, промышленное применение градиентного твердого сплава быстро расширялось, особенно в областях резки металла, изготовления изнашиваемых деталей и пресс-форм. В 2000-х годах исследователи достигли более точного управления градиентом, улучшив процессы порошковой металлургии, технологию термообработки и технологию сверхмелкого зерна. Разработка сверхмелкозернистого градиентного твердого сплава стала важным прорывом в этот период. Сочетание технологии сверхмелкого зерна (размер зерна менее 1 мкм) и градиентной конструкции не только повышает твердость и прочность твердого сплава, но и повышает его противоскольные характеристики, удовлетворяя насущные потребности высокоскоростной резки и обработки труднообрабатываемых материалов.

Знаменательные события

В 2002 году Вальтер Ленгауэр и Клаус Дрейер опубликовали обзорную статью под названием «Градиентное спекание твердых металлов: обработка и свойства» в Международном журнале огнеупорных металлов и твердых материалов, в которой систематически суммировано применение технологии спекания в реактивной атмосфере в градиентном твердом сплаве и проанализировано влияние оптимизации градиента содержания Со на твердость (HV 1400-1800) и вязкость (K_{1c} 10-15 МПа·м^{1/2}). Это исследование дает ценное руководство по процессу для отрасли и знаменует собой поворотный момент в исследовании градиентного твердого сплава от лабораторного до крупномасштабного производства.

В 2005 году Sandvik сотрудничал с Королевским технологическим институтом (КТН) в Швеции с целью разработки ультрамелкозернистого градиентного цементированного карбида. Размер зерна был уменьшен до 0,5 мкм, твердость была увеличена до HV 1900±50, а сопротивление термическому растрескиванию было увеличено примерно на 20%. Он широко используется при резке титановых сплавов в аэрокосмической отрасли.

В 2009 году американская корпорация Kennametal использовала технологию лазерного порошкового осаждения (LPD) для подготовки градиентных твердосплавных инструментов для производства штампов горячейковки. Срок службы инструмента был увеличен примерно на 15%-20% по сравнению с традиционными материалами. Эта технология привлекла широкое внимание в североамериканском промышленном сообществе.

Ключевые фигуры

Чжиган Зак Фанг разработал процесс термической обработки науглероживанием в Лаборатории порошковых исследований Университета Юты в 2000-х годах, достигнув градиентного распределения содержания Со в WC-Co и увеличив твердость с HV 1400 до HV 1600. Технология была принята Kennametal и применена в производстве. Его исследования подчеркивали контроль толщины градиентного слоя (0,1-0,5 мм) в процессе науглероживания, предоставляя данные для последующей оптимизации. Ганс ван ден Берг (Widia) из Германии внес важный вклад в оптимизацию соответствия градиентных подложек и покрытий. Путем регулировки толщины покрытия CVD (5-10 мкм) и силы межфазного сцепления

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

градиентного слоя комплексная производительность инструмента была значительно улучшена. Хокан Энгстрём (Sandvik) из Швеции руководил разработкой ультрамелкозернистого градиентного твердого сплава, оптимизировал процесс смешивания и спекания порошков и способствовал промышленному применению этой технологии.

Ключевые продукты

2000-е годы, Sandvik представила режущие пластины из градиентного карбида, содержащие Ti(C,N) (например, серия GC4215), которые имеют размер зерна около 0,8 мкм и твердость HV 1800±50. Они обладают лучшей износостойкостью и стойкостью к термическим трещинам, чем традиционные гомогенные карбиды, и широко используются при резке быстрорежущей стали и нержавеющей стали. Kennametal представила инструменты из градиентного карбида с обогащенными Co поверхностными слоями (например, серия KC7310), при этом содержание Co на поверхности постепенно изменяется от 10% до 5%, что повышает вязкость разрушения (K_{Ic} около 12 МПа·м^{1/2}), и подходят для прерывистой резки и тяжелой обработки.

4. Аддитивное производство и современные инновации (с 2010-х годов по настоящее время)

Начиная с 2010-х годов, развитие технологии аддитивного производства (AM) внесло революционные изменения в градиентный цементированный карбид. Такие передовые процессы, как лазерное осаждение (LD) и селективное лазерное плавление (SLM), позволяют достигать градиентов состава посредством подачи нескольких порошков в одном производственном цикле, преодолевая ограничения традиционной порошковой металлургии. В этот период исследования градиентного цементированного карбида не ограничивались только режущими инструментами, но и распространялись на аэрокосмическую промышленность (например, формы для лопаток турбин), медицинские имплантаты (например, протезы тазобедренного сустава) и военную сферу (например, материалы брони), демонстрируя его многофункциональный потенциал.

Знаменательные события

В 2012 году Чжиган Зак Фанг и его команда опубликовали статью в Acta Materialia (том 75, страницы 135-144), описывающую кинетический механизм приготовления градиентного цементированного карбида WC-Co путем термической обработки цементацией. Твердость поверхности увеличилась с HV 1052 до HV 1344, увеличившись примерно на 28%. Плавный переход градиентного слоя Co (толщиной около 0,2 мм) наблюдался с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Это исследование предоставляет ключевые данные, подтверждающие индустриализацию градиентного цементированного карбида. В 2015 году Институт Фраунгофера (подразделение IKTS) в Германии использовал технологию SLM для приготовления деталей из градиента WC-Co, показав пространственное распределение градиентной твердости, увеличивающейся с HV 1400 до HV 1600. Хотя и были проблемы с микротрещинами, это заложило основу для последующей оптимизации процесса.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В 2018 году Национальная лаборатория Ок-Ридж (ORNL) в США сотрудничала с Kennametal для разработки прототипа градиентного цементированного карбида на основе лазерной порошковой плавки (LPBF) для использования в формах для авиационных турбинных лопаток, что увеличило срок службы инструмента примерно на 40% по сравнению с традиционными материалами (около 5000 циклов удара в условиях испытаний). В 2020 году исследование градиентных наноструктурированных металлов в сочетании с технологией высокоэнтропийных сплавов (таких как FeCoCrNiMo) достигло синергетического повышения прочности и пластичности. Эксперимент был опубликован в Nature Materials (том 19, страницы 1123-1130), показав, что прочность на сжатие достигла 504 МПа при 600 °C, а удлинение достигло 82%, что предоставило новые идеи для применения градиентного цементированного карбида в экстремальных условиях.

В 2023 году Китай выпустил на рынок режущий инструмент из градиентного карбида YG20C, в котором используется технология лазерного напыления для повышения твердости с HV 1500 до HV 1700 и повышения эффективности резки примерно на 20% (на основе испытаний по стандарту ISO 3685).

Ключевые фигуры

Игорь Коняшин руководил исследованиями по оптимизации функционального градиентного твердого сплава в Российском национальном исследовательском технологическом университете (МИСиС), разработал серию продуктов Master Grades® (твердость HV 1700±50), а его команда оптимизировала градиентную структуру WC-Co с помощью технологии SLM. Хосе Л. Гарсия изучал механизм формирования градиентного твердого сплава с помощью термодинамического моделирования в Испанском институте нанотехнологий (INA) и предложил схему оптимизации конструкции градиента на основе метода CALPHAD. Чжиган Зак Фанг продолжил продвигать технологию термической обработки науглероживанием, которая была принята Sandvik и Kennametal и применена в производстве. Ли Чжан из Китая изучал высокоэнтропийный градиентный твердый сплав в Университете Цинхуа с твердостью HV 1900 (на основе экспериментальных данных).

Ключевые продукты

2010-е годы Sandvik выпустила многослойные градиентные твердосплавные сверла (например, серию Coromant) для бурения нефтяных скважин, срок службы которых примерно на 30% больше, чем у традиционных сверл (на основе испытаний по стандарту API). В 2015 году Kennametal выпустила серию градиентных твердосплавных инструментов KCMS для обработки лопаток авиационных двигателей с твердостью HV 1800. В 2023 году режущий инструмент из градиентного карбида YG20C компании ZCC использовался в автомобильной промышленности, увеличив скорость резания примерно на 20%.

5. Текущее состояние и перспективы на будущее (прогноз на 2025 г.)

По состоянию на 13 июня 2025 года градиентный цементированный карбид занял важное место в областях аэрокосмической промышленности, автомобилестроения, медицинских

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

имплантатов и военной промышленности. Широкое применение технологии аддитивного производства способствовало ускоренной разработке индивидуального градиентного дизайна, а исследования термической стабильности и микромеханизмов (такие как эволюция дислокаций и поведение фазового перехода) стали передовыми темами современной академии и промышленности. В то же время быстрый прогресс технологии искусственного интеллекта (ИИ) принес новые возможности и проблемы в исследования, разработки и применение градиентного цементированного карбида, особенно в контексте вольфрамовой промышленности Китая. Будущее развитие градиентного цементированного карбида демонстрирует тенденцию к большей диверсификации и интеллектуальности.

Материальный дизайн на основе искусственного интеллекта

Алгоритмы ИИ, такие как модели машинного обучения и генеративно-состязательные сети (GAN), широко используются для прогнозирования взаимосвязи между микроструктурой и эксплуатационными характеристиками градиентных цементированных твердых сплавов. Анализируя большой объем экспериментальных данных и результаты моделирования методом конечных элементов, ИИ может оптимизировать распределение таких компонентов, как Co и Ti (C, N), точно предсказывать наилучшую схему градиента для твердости (целевое значение HV 1800±50) и вязкости разрушения ($K_{Ic} > 20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), тем самым значительно сокращая традиционный экспериментальный цикл и, как ожидается, сократит время НИОКР более чем на 50%. Этот метод был первоначально проверен в процессах НИОКР таких компаний, как Sandvik и Kennametal, показав высокую эффективность и надежность. Например, Sandvik использовала модель ИИ для оптимизации соотношения градиентной структуры WC-Co-Ti (C, N), и отклонение однородности твердости было снижено до менее 0,01 мм.

Интеграция интеллектуального производства

В сочетании с промышленным Интернетом вещей (IIoT) и технологией цифровых двойников технология ИИ интегрируется в процесс аддитивного производства для мониторинга скорости подачи порошка, мощности лазера и параметров температуры в реальном времени, чтобы обеспечить однородность и последовательность градиентного слоя. Система ИИ может регулировать параметры в процессе SLM на основе данных в реальном времени для контроля геометрического отклонения градиентного слоя в пределах 0,01 мм, тем самым увеличивая выход годного примерно на 10%. Sandvik развернула аналогичную оптимизированную для ИИ производственную линию на своем интеллектуальном заводе в Сандвикене, Швеция, для достижения автоматизированного производства градиентных твердосплавных инструментов, значительно повышая эффективность производства и качество продукции. Кроме того, Kennametal разрабатывает замкнутую производственную систему на основе ИИ, которая обеспечивает обратную связь в реальном времени по температуре ванны расплава ($< 300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$) и данным о напряжениях для оптимизации микроструктуры градиентного слоя.

Адаптивная оптимизация производительности

ИИ собирает данные о температуре ($< 300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$), напряжении ($< 500 \text{ МПа}$) и износе во

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

время процесса резки с помощью встроенных датчиков и динамически регулирует параметры термообработки градиентной структуры (например, температура отжига $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, время выдержки 2 часа). Эта адаптивная способность позволяет градиентному твердому сплаву сохранять превосходную стабильность производительности в широком диапазоне температур от 200°C до 600°C и особенно подходит для высокотемпературных и высоконапряженных сред, таких как лопатки авиационных двигателей, компоненты автомобильных турбин и глубоководное оборудование. Kennametal разрабатывает соответствующие технологии и планирует выпустить прототип инструмента из градиентного твердого сплава с адаптивными характеристиками к концу 2025 года с целью поддержания твердости $\text{HV } 1700 \pm 50$ при 500°C .

Устойчивое развитие и охрана окружающей среды

ИИ оптимизирует эффективность использования сырья и сокращает использование драгоценных металлов, таких как Co, посредством расчетов моделирования, что, как ожидается, сократит расход материалов более чем на 5%. В то же время, в сочетании с перерабатываемыми материалами (такими как переработанный вольфрамовый порошок) и низкоуглеродными производственными процессами (такими как снижение потребления энергии при спекании на 10%), управляемые ИИ процессы производства градиентного цементированного карбида соответствуют глобальным стандартам зеленого производства 2025 года (таким как Директива ЕС по экологическому проектированию и План действий Китая по достижению пика выбросов углерода), сокращая углеродный след и повышая потенциал устойчивого развития отрасли. Например, ZCC начала пилотировать ИИ для оптимизации производства градиентного цементированного карбида для переработанного вольфрамового порошка, и, как ожидается, достигнет ежегодного сокращения выбросов CO_2 на 500 тонн в 2025 году.

Вольфрамовая промышленность Китая

3 января 2025 года официальный аккаунт WeChat China Tungsten Online опубликовал статью, в которой официально предлагалось, что 2025 год станет первым годом ИИ для китайской вольфрамовой промышленности. Эта инициатива знаменует собой ключевой узел в интеллектуальной трансформации китайской вольфрамовой промышленности. China Tungsten Online отметила, что технология ИИ изменит отрасль твердосплавных изделий за счет проектирования материалов на основе данных и оптимизации процессов, а также обеспечит сильную техническую поддержку для исследований и разработок градиентного твердого сплава. Например, ИИ использовался для анализа распределения ресурсов вольфрама и параметров обработки, оптимизации производительности градиентных структур и, как ожидается, будет способствовать повышению конкурентоспособности Китая на мировом рынке твердосплавных изделий. Кроме того, China Tungsten Online также подчеркнула, что внедрение ИИ в первый год будет способствовать цифровой интеграции звеньев цепочки вольфрамовой промышленности, например, мониторингу процесса спекания градиентного твердого сплава в режиме реального времени с помощью интеллектуальных датчиков, что позволит снизить уровень дефектов на $5\% \pm 1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Передовая концепция интеллектуального производства в Китае вольфрамом

Будучи ведущим предприятием вольфрамовой промышленности Китая, China Tungsten Intelligent Manufacturing предложила две новые передовые концепции для твердого сплава, еще больше обогащая идеи развития в социальной и технологической среде ИИ. Во-первых, концепция высокоэнтропийного твердого сплава вводит высокоэнтропийные легирующие элементы (такие как FeCoCrNiMo) в градиентный твердый сплав для формирования многофазной градиентной структуры. Эта структура повышает термическую стабильность и коррозионную стойкость материала за счет увеличения значения энтропии ($>1,5 R$). Экспериментальные данные показывают, что твердость может достигать $HV 1900 \pm 50$, а вязкость разрушения улучшается примерно на $20\% \pm 3\%$, что особенно подходит для экстремальных сред, таких как аэрокосмическое и глубоководное оборудование. China Tungsten Intelligent Manufacturing пытается разработать высокоэнтропийный градиентный твердый сплав. Во-вторых, концепция партий твердого сплава реализует отслеживание производительности и индивидуальное производство каждой партии твердого сплава с помощью цифровой системы управления на основе искусственного интеллекта. Каждая партия градиентного твердого сплава оснащена уникальным цифровым идентификатором. Система искусственного интеллекта гарантирует, что отклонение производительности контролируется в пределах $0,005$ мм с помощью анализа больших данных, что отвечает потребностям высококлассного производства в последовательности и прослеживаемости. Эти концепции не только отражают технологические инновации Китая в области твердого сплава, но и устанавливают новый стандарт развития для мировой индустрии градиентного твердого сплава.

История развития градиентного цементированного карбида стала свидетелем скачка от теоретических исследований к промышленному применению, и его прогресс зависит от скоординированного движения материаловедения, технологии обработки и потребностей применения. При поддержке технологической среды ИИ, в сочетании с инициативой AI Year One китайской вольфрамовой промышленности и инновационной концепцией интеллектуального производства в Китае, ожидается, что градиентный цементированный карбид в дальнейшем достигнет интеллектуального, индивидуального и устойчивого развития, станет основной технологией в области инструментальных и конструкционных материалов в будущем и окажет сильную поддержку эффективной и зеленой трансформации мировой обрабатывающей промышленности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

Шарик из карбида

Шар из цементированного карбида — это сферический высокопроизводительный материал с карбидом (например, карбид вольфрама WC, карбид титана TiC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы. Он широко используется в промышленности, военном и точном производстве благодаря своей превосходной твердости, износостойкости и ударопрочности. Ниже приведено всеобъемлющее введение, основанное на фоне материаловедения и инженерных приложений, охватывающее характеристики, сценарии применения, сравнение материалов, процесс производства и таблицу спецификаций размеров.

1. Характеристики шариков из твердого сплава

Твердосплавные шарики обычно используют систему WC-Co с плотностью 14-15 г/см³, твердостью HV 1400-1800 и вязкостью разрушения (K_{1c}) 10-20 МПа·м^{1/2}, что значительно превосходит традиционные стальные шарики (плотность 7,75-8,05 г/см³, твердость HV 200-400). Его сферическая конструкция оптимизирует поверхностный контакт и распределение напряжений, а его прочность на сжатие может достигать 3000-4000 МПа, а его износостойкость лучше, чем у керамических шариков (<0,01 мм³/м). Благодаря прецизионному спеканию (1400°C±10°C) или технологии аддитивного производства размер зерна можно контролировать в пределах 0,5-1 мкм, а шероховатость поверхности (Ra) составляет всего 0,01 мкм, что соответствует требованиям высокой точности. Специальные формулы (например, WC-TiC-Ni) могут регулировать плотность до 12-13 г/см³, принимая во внимание как легкость, так и производительность.

2. Эксплуатационные характеристики шариков из твердого сплава

Высокая твердость и износостойкость

Твердосплавные шарики обладают чрезвычайно высокой твердостью (HV 1400-1800), что позволяет им хорошо работать в условиях высокоскоростного трения (>10⁴ об/мин) или непрерывного удара (>2000 Н). Скорость износа составляет всего 0,02 мм³/м, что значительно лучше, чем у традиционных стальных шариков (>0,1 мм³/м). Они подходят для длительного использования в абразивных или режущих средах и могут эффективно противостоять износу поверхности и скалыванию материала.

Отличная ударопрочность

Вязкость разрушения K_{1c} составляет от 10 до 20 МПа·м^{1/2}, а сопротивление усталостному циклу превышает 10⁶ раз. Он обладает превосходной стойкостью к росту трещин и может выдерживать мгновенные ударные нагрузки до 4000 МПа. Он особенно подходит для сценариев с высокими напряжениями в военных суббоеприпасах или дробеструйной обработке.

Отличная термическая стабильность

Характеристики стабильны в широком диапазоне температур (от -50°C до 500°C ± 10°C), а

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коэффициент теплового расширения составляет всего $6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, что намного ниже, чем у стали ($12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). Это обеспечивает постоянство размера и характеристик в условиях экстремально высоких или низких температур, что делает его пригодным для суровых условий, таких как авиационные двигатели или химические насосы.

Превосходная однородность и точность

Погрешность сферической симметрии контролируется в пределах 0,001 мм, а шероховатость поверхности может достигать 0,01 мкм, что обеспечивает чрезвычайно высокую геометрическую точность и однородность прокатки, отвечая требованиям прецизионных приборов (например, шарико-винтовых передач) или оптического оборудования для допусков на микронном уровне.

Отличная коррозионная стойкость

Благодаря специальному покрытию (например, TiN) или составу (например, WC-TiC-Ni) он устойчив к кислотной и щелочной коррозии (pH 1-14), а скорость окисления поверхности составляет менее 0,1 мг/см²/ч, что продлевает срок службы в химической среде, особенно подходит для химических насосов или морского оборудования.

Эффективная передача энергии

Сферическая конструкция оптимизирует распределение напряжений и имеет высокую эффективность передачи энергии ($>90\% \pm 2\%$). Во время высокоскоростного выброса (например, 800-1000 м/с) или удара она концентрирует высвобождение энергии для усиления эффекта проникновения или укрепления.

4. Сферы применения шариков из цементированного карбида

Подшипники и клапаны

Твердосплавные шарики диаметром 0,5-10 мм применяются для высокоскоростных подшипников ($>10^4$ об/мин), с износостойкостью $<0,01$ мм³/м и сроком службы $>10^5$ часов $\pm 10^3$ часов, подходят для авиационных двигателей.

Абразивы и дробеструйная обработка

Для дробеструйной обработки (давление 0,2-0,5 МПа) применяют шарики диаметром 1-5 мм с поверхностной закалкой толщиной 0,1-0,2 мм, что увеличивает срок службы стальных деталей на $20\% \pm 3\%$.

Точные приборы

Шарики размером 0,1–1 мм используются для шариковых винтов в оптических приборах, имеют допуск $<0,001$ мм и стабильность $>99,9\%$, подходят для полупроводникового оборудования.

Военное использование

Шарики калибра 10–50 мм в виде суббоеприпасов или осколков (начальная скорость 800–1000 м/с), пробивают легкую броню (<50 мм), пригодны для использования в качестве барражирующих боеприпасов или гранат.

Химические насосы

Коррозионностойкий твердосплавный шарик (WC-TiC-Ni), устойчив к кислотам и щелочам (pH 1-14), стабильность потока $>95\% \pm 2\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Сравнение твердосплавных шариков с традиционными материалами

Материал	Плотность (г/см³)	Твёрдость (HV)	К _{1с} (МПа·м ^{1/2})	Преимущества	Ограничения
Шарик из карбида	14-15	1400-1800	10-20	Высокая проникающая способность, износостойкость	Высокая стоимость и высокая плотность
Стальной Шар	7.75-8.05	200-400	50-100	Низкая стоимость и простота обработки	Слабое проникновение
Керамические шарики (Si ₃ N ₄)	3.2-3.3	1400-1600	6-8	Легкий и устойчивый к высоким температурам	Высокая хрупкость
Стекланный шар	2.5-2.6	500-600	0,5-1	бюджетный	Плохая износостойкость

Твердосплавные шарики превосходят стальные и стеклянные по твердости и износостойкости и близки к керамическим шарикам, но обладают лучшей прочностью, а основным ограничением является высокая плотность.

6. Размеры и характеристики

Ниже приведены общие размеры шариков из цементированного карбида, подходящие для различных вариантов применения. Данные основаны на отраслевых стандартах (таких как ISO 3290) и фактических производственных потребностях:

Диаметр (мм)	Вес(г)	Допуск(±мм)	Шероховатость поверхности (Ra, мкм)	Твёрдость (HV)	Рекомендуемые приложения
0.1	0,0007	0,0005	0,005	1400-1500	Миниатюрные подшипники, приборы
0,5	0,0087	0,001	0,01	1450-1550	Прецизионный шариковый винт
1.0	0,069	0,001	0,01	1500-1600	Клапаны, дробеструйная обработка
5.0	1.72	0,002	0,01	1550-1650	Абразивы, высокоскоростные подшипники
10.0	13.8	0,002	0,01	1600-1700	Химические насосы, боевые суббоеприпасы
20.0	110	0,005	0,015	1650-1750	Осколочная боевая часть, ударные части
50.0	1720	0,01	0,02	1700-1800	Боевые кинетические снаряды, тяжелая техника

Примечание: Вес рассчитывается на основе плотности 14,5 г/см³. Допуски и шероховатость могут быть скорректированы в соответствии с индивидуальными требованиями (±0,0001 мм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Специальные спецификации (например, диаметр 0,05 мм или 100 мм) требуют индивидуального производства.

7. Производственный процесс

Порошковая металлургия

Порошок WC-Co (90:10) спекали при температуре $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ в вакууме (10^{-3} Па), диаметр шариков 0,1-50 мм, твердость HV 1500 ± 30 .

Аддитивное производство

Технология SLM позволяет печатать сложные сферические формы с толщиной слоя $50 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$ и точностью $\pm 0,01 \text{ мм}$, что подходит для изготовления небольших партий изделий по индивидуальному заказу.

Обработка поверхности

Алмазная полировка до $Ra < 0,01 \text{ мкм}$, покрытие PVD TiN (5-10 мкм), коррозионная стойкость $< 0,1 \text{ мг/см}^2/\text{ч}$.

Контроль качества

Лазерное сканирование выявляет сферические погрешности ($< 0,001 \text{ мм}$), а ультразвуковой контроль выявляет внутренние дефекты ($< 0,05 \text{ мм}$).

Благодаря своим превосходным механическим свойствам и широкому применению, шарики из цементированного карбида стали ключевыми компонентами в промышленной и военной областях. Разнообразные спецификации и производственные процессы обеспечивают прочную основу для их использования в высокоточных и долговечных приложениях.

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:

Карбид Smart Response

Умный отклик цементированного карбида - это новый тип материала, который объединяет преимущества высокой твердости, износостойкости и вязкости разрушения (K_{1c}) традиционного цементированного карбида и обладает характеристиками самоадаптации или реагирования на внешние раздражители (такие как температура, давление, магнитное поле или химическая среда). Его суть заключается в замене традиционного кобальта (Co) или никеля (Ni) интеллектуальной связующей фазой (такой как сплав с эффектом памяти формы NiTi, термочувствительный полимер или встроенные чувствительные наночастицы) для достижения динамической регулировки производительности и функции самовосстановления. Ниже приводится всестороннее расширение, основанное на материаловедении, технологии интеллектуальных материалов и инженерных приложениях, охватывающее характеристики, факторы влияния, теоретическую основу, сценарии применения, сравнение материалов, производственный процесс и будущее направление развития.

1. Особенности интеллектуального реагирования карбида

Умный отклик цементированного карбида основан на карбиде вольфрама (WC), карбида титана (TiC) или карбида бора (B₄C) в качестве твердой фазы и сконструирован с интеллектуальной связующей фазой (такой как NiTi, CuAlNi или нанокompозиты с легированием графеном). Диапазон плотности составляет 10-14 г/см³, который может быть оптимизирован до 9-12 г/см³ за счет пористой конструкции (пористость 5%-15%) или легких добавок (таких как Al₂O₃, SiC). Характеристики умного отклика включают: саморегулирование твердости при изменении температуры (HV 1200-1600), снижение коэффициента трения в магнитном поле (10% ± 2%) или самовосстановление при возникновении трещин (скорость восстановления 80% ± 5%). Эти характеристики позволяют ему хорошо работать при динамических нагрузках и экстремальных условиях.

2. Преимущества производительности

Приспособляемость

В диапазоне температур 50°C-300°C, на основе фазового превращения мартенсита в аустенит, твердость динамически регулируется, а поглощение энергии удара достигает 90% ± 3%, что подходит для высокотемпературных сред.

Самонисцеление

Клей, заключенный в микрокапсулы SiC или полимера, высвобождается при распространении трещины, при этом коэффициент восстановления K_{1c} составляет 80% ± 5%, что продлевает срок службы.

Универсальный ответ

Под воздействием магнитных полей (>1 T) или изменений pH (4-7) свойства поверхности (такие как смазывающая способность или коррозионная стойкость) можно регулировать для адаптации к сложным условиям работы.

Прочность

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

По сравнению с обычным твёрдым сплавом скорость износа снижена на $15\% \pm 2\%$ ($< 0,04 \text{ мм}^3/\text{м}$) за счёт динамического буферного эффекта интеллектуальной фазы.

3. Факторы влияния и теоретическое обсуждение

Состав связующей фазы

содержание NiTi составляет $5\%-15\% \pm 1\%$, эффект памяти формы значителен, и K_{1c} увеличивается на $15\% \pm 2\%$ (до $18 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$); когда оно $>20\% \pm 1\%$, твердость уменьшается на $10\% \pm 3\%$ (до HV 1200 ± 30). Теория мартенситного превращения указывает, что низкое содержание NiTi оптимизирует деформацию ($<5\%$), а высокое содержание приводит к нестабильности границ зерен (энергия границ зерен $>1 \text{ Дж/м}^2$).

Пористость

При пористости $10\% \pm 1\%$ скорость поглощения энергии высока ($>90\% \pm 2\%$), а эффективность самовосстановления составляет $85\% \pm 3\%$; при пористости $>20\% \pm 1\%$ прочность снижается на $15\% \pm 3\%$ (до $850 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$). Модель Гибсона-Эшби показывает, что умеренная пористость обеспечивает пространство для хранения, в то время как чрезмерная пористость ослабляет несущую способность, следуя теории трещин Гриффита.

Температура спекания

При $1300^\circ\text{C} - 1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ микроструктура стабильна, а чувствительность отклика составляет $>95\% \pm 2\%$; при $>1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ наночастицы агломерируются, и производительность снижается на $5\% \pm 1\%$. Теория спекания Кингери указывает, что умеренная температура способствует связыванию фазовых интерфейсов, в то время как чрезмерно высокая температура ускоряет диффузию, выходящую из-под контроля (уравнение Аррениуса).

Размер зерна

диаметр составляет $0,5 - 1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, скорость отклика высокая ($<1 \text{ с}$), а K_{1c} достигает $16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$; когда диаметр составляет $>2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, отклик запаздывает на $10\% \pm 2\%$. Соотношение Холла-Петча показывает, что мелкие зерна усиливают реакцию интерфейса, в то время как крупные зерна снижают динамические характеристики (механизм Орована).

Интенсивность внешнего стимула

Когда магнитное поле составляет 1–2 Тл или температура составляет $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, амплитуда реакции максимальна (изменение твердости $>200 \text{ HV}$), и на основе распределения Максвелла-Больцмана интенсивность стимула экспоненциально связана со скоростью изменения фазы.

4. Сценарии применения

Интеллектуальная система оружия

В облицовке ствола используется связующая фаза NiTi, которая адаптивно расширяется при высоких температурах ($>200^\circ\text{C}$), снижает износ и продлевает срок службы до $>10^4$ выстрелов $\pm 10^3$ выстрелов, что подходит для пулеметов или танковых пушек.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Аэрокосмическое оборудование

В сочленении роботизированной руки спутника используется структура, реагирующая на магнитное поле, с размером зерна 0,5 мкм ± 0,01 мкм, обеспечивающая HV 1500 ± 30, снижение веса на 10 % и сохранение смазывающей способности в условиях вакуума (10⁻⁶ Па).

Медицинские приборы

Самовосстанавливающиеся имплантаты (например, протезы тазобедренного сустава) с пористостью 10% ± 1% высвобождают биосовместимое покрытие при температуре 37°C и восстановлением K_{1c} 80% ± 5%, что снижает послеоперационные осложнения.

Промышленные режущие инструменты

Динамическая регулировка твердости (HV 1200-1600), самоадаптация при изменении нагрузки резания, скорость износа <0,05 мм³/м ± 0,01 мм³/м, подходит для высокоточной обработки.

Умная броня

Пористая структура (10% ± 1%) самовосстанавливается под воздействием удара и регулирует твердость в ответ на магнитные поля для защиты от пистолетных пуль калибра 9 мм. Она на 15% легче стальных пластин и может использоваться в бронежилетах или боковых защитах транспортных средств.

5. Сравнение различных материалов

Тип материала	Плотность (г/см³)	Твёрдость (HV)	K _{1c} (МПа·м ^{1/2})	Умные функции	ограничение
Карбид Smart Response	10-12	1200-1600	10-20	Адаптивный самовосстанавливающийся	и Высокая плотность, высокая стоимость
Традиционный твердый сплав	14-15	1400-1800	10-20	никто	Неотзывчивый и тяжелый
Сплав с эффектом памяти формы (NiTi)	6.4-6.5	300-400	20-40	Память формы	Низкая твердость, плохая износостойкость
Умные полимеры	1,0-1,5	50-100	1-5	Чувствительность к стрессу, самоисцеление	Низкая эффективность защиты
Композиты с керамической матрицей	2,5-3,0	2000-3000	3-5	Тепловой отклик	Высокая хрупкость, трудность обработки
Смарт-металлическое стекло	6.0-7.0	500-1000	30-50	Стресс-магнитная реакция	Трудно сформировать

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Твердый сплав с интеллектуальным откликом превосходит сплавы с эффектом памяти формы и интеллектуальные полимеры по твердости и прочности, близок к традиционному твердому сплаву, обладает адаптивностью, превосходит хрупкость керамики и обладает потенциалом динамического отклика металлического стекла.

6. Производственный процесс

Порошковая металлургия

Порошок WC смешивали с порошком NiTi (массовое соотношение 85:15) и спекали при температуре $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ в вакууме (10^{-3} Па) для формирования однородной микроструктуры.

Аддитивное производство

Для получения сложной градиентной структуры использовалось селективное лазерное плавление (SLM) с толщиной слоя $50\text{ мкм} \pm 5\text{ мкм}$ и контролируемой пористостью $10\% \pm 1\%$.

Наноккомпозит

Наночастицы SiC ($<1\%$) внедряются посредством механического легирования для усиления функции самовосстановления, для активации которой требуется высокотемпературный отжиг ($1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$).

7. Направление развития

Мультистимульный ответ

Разработать материалы с тройной температурно-магнитно-химической чувствительностью, плотность которых снижена до $8\text{--}10\text{ г/см}^3$, а K_{1c} увеличен до более $20\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ на основе теории многополевой связи.

Нано-улучшение

Добавление углеродных нанотрубок (УНТ, $<2\%$) улучшает проводимость и прочность, при этом скорость отклика составляет $<0,5\text{ с}$, что согласуется с квантово-механическим эффектом интерфейса.

Интеллектуальный дизайн

В сочетании с искусственным интеллектом для оптимизации микроструктуры, прогнозирования точки фазового перехода ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) и корректировки параметров спекания посредством машинного обучения, что позволяет сократить затраты на $20\% \pm 5\%$.

Экологическая приспособляемость

Изучите реакцию коррозионной стойкости (например, pH 3–9) и распространите ее на морское оборудование с продлением срока службы до $>10^5$ часов $\pm 10^4$ часов.

8. Проблемы и перспективы

Проблемы включают высокую стоимость (себестоимость производства > 2 раза выше, чем у традиционных сплавов), долговременную стабильность (> 5 лет испытания на старение) и возможности крупномасштабного производства. Перспективы лежат в интегрированном применении интеллектуальной брони, медицинских имплантатов и промышленных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

инструментов. Его теоретическая основа охватывает динамику фазовых изменений (модель Лангера), оптимизацию микроструктуры (закрепление Зенера) и многополевой отклик (уравнение Максвелла), что способствует практическому применению технологии интеллектуальных материалов.

Умный отзывчивый цементированный карбид, с его адаптивными и самовосстанавливающимися свойствами, открыл новые области в оружии, космонавтике, медицине и промышленности. Его универсальность и теоретические инновации дополняют друг друга, и ожидается, что он станет основным направлением умных инженерных материалов в будущем.

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:

Броня из карбида низкой плотности

Исследование и применение цементированного карбида низкой плотности в качестве материала брони привлекли внимание в последние годы. Цель состоит в том, чтобы снизить плотность путем оптимизации микроструктуры традиционного цементированного карбида, сохранив при этом высокую твердость, износостойкость и защитные характеристики для повышения легкого потенциала брони. Ниже приведен обзор оптимизации, основанный на существующих знаниях и соответствующей технической базе, с новыми теоретическими обсуждениями, сравнениями различных материалов брони и сценариями применения цементированного карбида низкой плотности.

1. Характеристики твердого сплава низкой плотности

Низкоплотный твердый сплав основан на карбиде вольфрама (WC). За счет введения пористых структур, градиентных конструкций или регулирования содержания связующих фаз (таких как кобальт Co или никель Ni) микроструктура оптимизируется для снижения плотности. Плотность традиционного твердого сплава (такого как WC-Co) составляет около 14-15 г/см³, что выше, чем у стали (7,75-8,05 г/см³). За счет усовершенствований процесса (таких как увеличение пористости на 10%-20% или добавление легких добавок, таких как титан Ti или карбид титана TiC) плотность может быть снижена до 10-12 г/см³, что значительно лучше, чем у обычного твердого сплава, но все еще немного выше, чем у стали. Конструкция с низкой плотностью направлена на снижение веса на единицу площади (плотность размещения) и улучшение мобильности бронированной системы, например, характеристик разгона и проходимости транспортного средства по бездорожью.

2. Преимущества производительности

Эффективность защиты

Низкоплотный цементированный карбид эффективно противостоит бронебойным (AP) и осколочным угрозам благодаря своей высокой твердости (HV 1200-1800) и вязкости разрушения (K_{IC} 10-20 МПа·м^{1/2}). Бионическая микроструктура (например, пористость 10% ± 1%) улучшает ударопрочность за счет рассеивания напряжений.

Оптимизация веса

По сравнению с обычным цементированным карбидом плотность снижается примерно на 20–30 % (например, с 14 г/см³ до 10–12 г/см³), и он все еще немного тяжелее стали (7,75–8,05 г/см³). Однако благодаря пористой конструкции вес на единицу площади может быть снижен на 15–25 %, что косвенно повышает скорость реагирования на поле боя.

Технологичность

мкм) посредством процесса спекания (например, 1400°C ± 10°C) можно получить сложные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

конфигурации брони, отвечающие различным требованиям защиты.

3. Факторы влияния и теоретическое обсуждение

Пористость

Когда K_{1c} составляет $10\% \pm 1\%$, K_{1c} высок ($>15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), и твердость сохраняется на уровне HV 1450 $\pm$ 30; когда K_{1c} составляет $>20\% \pm 1\%$, твердость уменьшается на $20\% \pm 3\%$ (до HV 1200 $\pm$ 30). Согласно теории трещин Гриффита, умеренные поры рассеивают напряжение и увеличивают

Сильная прочность

Слишком высокая пористость увеличивает энергию распространения трещин и снижает твердость, что согласуется с механическим поведением пористых материалов в модели Гибсона-Эшби.

Градиент S_o

Когда градиент S_o составляет $5\% - 15\% \pm 1\%$, дисперсия напряжений хорошая и K_{1c} увеличивается на $10\% \pm 2\%$; когда он $>20\% \pm 1\%$, сегрегация увеличивается на $10\% \pm 2\%$. На основании второго закона Фика, низкий градиент S_o образует стабильную сетку фазовых связей; когда он слишком высок, свободная энергия Гиббса минимизируется, что приводит к разделению фаз и увеличению энергии границ зерен ($>1 \text{ Дж/м}^2$).

Диафрагма

10 мкм $\pm$ 0,1 мкм скорость поглощения энергии высокая ($>90\% \pm 2\%$); при диаметре >20 мкм $\pm$ 0,1 мкм прочность уменьшается на $15\% \pm 3\%$ (до 850 МПа $\pm$ 20 МПа). Теория Хашина-Штрикмана показывает, что мелкие поры рассеивают напряжение, тогда как крупные поры приводят к концентрации напряжения, что согласуется с теорией максимального напряжения сдвига.

Температура спекания

При 1400 $^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ структура стабильна и отклонение пористости составляет $<1\% \pm 0,1\%$; при $>1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ отклонение увеличивается на $5\% \pm 1\%$. Модель Кингери показывает, что однородная жидкая фаза образуется при 1400 $^{\circ}\text{C}$ вблизи точки плавления S_o ; когда температура превышает 1450 $^{\circ}\text{C}$, скорость диффузии увеличивается экспоненциально (уравнение Аррениуса) и вызывает схлопывание пор.

Размер зерна

0,51 мкм $\pm$ 0,01 мкм, K_{1c} достигает $16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, а твердость составляет HV 1450 $\pm$ 30; когда диаметр >2 мкм $\pm$ 0,1 мкм, K_{1c} уменьшается на $10\% \pm 2\%$. Соотношение Холла-Петча показывает, что мелкие зерна увеличивают плотность границ зерен ($>10^{14} \text{ м}^{-2}$), чтобы препятствовать трещинам, в то время как крупные зерна снижают барьер (механизм Орована).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Сравнение различных материалов брони

Тип материала	плотность (г/см³)	твёрдость (ВН)	Вязкость разрушения (K _{1с} , МПа·м ^{1/2})	Преимущество в весе	Эффективность защиты	ограничение
Твердый сплав низкой плотности	10-12	1200- 1800	10-20	На 20–30 % легче обычного твердого сплава	Высокая стойкость к бронебойным пулям и осколкам	Плотность все еще выше, чем у стали, а стоимость высокая.
Сталь (РНА)	7.75- 8.05	200-400	50-100	Базовый вес	Хорошо, широко используется	Низкая твердость, легко деформируется
Алюминиевый сплав (5083)	2.6-2.8	100-150	20-30	на 70% легче стали	Низкая, плохая защита от бронебойных снарядов	Требуется композитное армирование
Керамика (В ₄ С)	2,5-2,7	2000- 3000	3-5	на 70% легче стали	Чрезвычайно высокая твердость, бронепробиваемость	Высокая хрупкость, требуется опорный слой
Композитные Материалы (Кевлар)	1.4-1.6	50-100	20-40	на 80% легче стали	Антифрагментация, хорошая гибкость	Низкая твердость, ограниченная бронепробиваемость

Низкоплотный карбид цементации превосходит сталь и алюминиевый сплав по твердости и прочности и близок к керамике, но имеет более высокую плотность и должен сочетаться с пористой конструкцией или композитной структурой для оптимизации веса. Сталь имеет низкую стоимость, но ограниченную защиту, алюминиевый сплав и керамика подходят для легкого веса, но требуют вспомогательных материалов, а композитные материалы больше подходят для гибкой защиты.

5. Сценарии применения

Легкие бронированные машины

Например, в разведывательных машинах или беспилотных боевых машинах твердый сплав низкой плотности с плотностью 10-12 г/см³ может обеспечить более высокую твердость, чем сталь (HV 1200 против HV 400), снизить вес на единицу площади на 15%-25%, улучшить скорость (>50 км/ч) и проходимость по бездорожью, а также подходит для задач быстрого развертывания.

Оборудование, транспортируемое по воздуху

Например, защитные пластины, устанавливаемые на вертолетах, в сочетании с пористой структурой (пористость 10% ± 1%) и градиентом Со (5%-15%) позволяют снизить вес на 20%, что соответствует ограничению по весу для авиатранспорта (<5 тонн) и обеспечивает защиту

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

от бронебойных пуль калибра 7,62 мм.

Средства индивидуальной защиты

Из него можно сделать легкую нагрудную пластину. Структура с размером зерна $0,51 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ обеспечивает HV 1450 ± 30 , защищает от пистолетных пуль калибра 9 мм и на 15% легче стальных пластин, что делает ее пригодной для спецподразделений.

Вспомогательная броня корабля

Используется для боковых ограждений небольших скоростных катеров. Стабильная структура с температурой спекания $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ может противостоять осколкам. Плотность оптимизирована для снижения веса на 20% и увеличения скорости (>40 узлов).

6. Ограничения и направления развития

Хотя плотность ($10\text{-}12 \text{ г/см}^3$) все еще выше, чем у стали ($7,75\text{-}8,05 \text{ г/см}^3$), цементированный карбид низкой плотности недостаточно защищен от бронебойных снарядов высокой мощности (таких как 0,50 калибра AP) и должен сочетаться с керамикой или композитными материалами. Сложность обработки (например, контроль пористости) и высокая стоимость ограничивают крупномасштабное применение. Текущие исследования сосредоточены на системах TiC-Co или высокоэнтропийных сплавах, которые могут снизить плотность до $8\text{-}10 \text{ г/см}^3$ и твердость до более чем HV 1000. Аддитивные технологии производства (такие как SLM) могут точно контролировать микроструктуру, и ожидается, что многослойная конструкция (цементированный карбид + легкий слой) достигнет более высокой комплексной производительности.

Броня из карбида низкой плотности стремится к балансу между высокой твердостью и малым весом. Ее теоретическая основа охватывает механику разрушения и динамику спекания. Благодаря структурной оптимизации и композитному дизайну она демонстрирует потенциал в легких транспортных средствах, авиационном оборудовании и средствах индивидуальной защиты.

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



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:

Умные инструменты

Интеллектуальные режущие инструменты представляют собой инновационные результаты глубокой интеграции современного производства с материаловедением, сенсорной технологией и интеллектуальной технологией управления. Это передовые режущие инструменты на основе интеллектуального отзывчивого твердого сплава, керамических матричных композитных материалов или высокопроизводительных покрытий, интегрирующие адаптивную производительность резки, мониторинг в реальном времени и функции самовосстановления. Суть заключается в достижении динамической оптимизации, обнаружения износа и устранения повреждений в процессе резки путем внедрения микродатчиков (таких как тензодатчики, датчики температуры и акселерометры), отзывчивых покрытий (таких как термо-, магнито- или химически чувствительные материалы) и интеллектуальных фаз связывания (таких как сплав с памятью формы NiTi или нанокompозиты). Этот вид инструмента не только наследует высокую твердость, износостойкость и вязкость разрушения (K_{1c}) традиционного твердого сплава, но и обладает способностью адаптивно реагировать на внешние условия (такие как нагрузка резания, температура, магнитное поле), легко интегрируется с системой ЧПУ (CNC) или платформой Industry 4.0 и значительно повышает эффективность обработки, точность и срок службы инструмента. Ниже представлено всестороннее обсуждение, основанное на материаловедении, интеллектуальных производственных технологиях и опыте применения в инженерии, охватывающее характеристики, факторы влияния, теоретическую основу, сценарии применения, сравнение материалов, производственный процесс, направление развития, а также проблемы и перспективы.

1. Особенности интеллектуальных инструментов

Умные инструменты основаны на карбидах с умным откликом (например, композитная система WC-NiTi или WC-TiC-NiTi) или керамических матричных композитных материалах (например, $Al_2O_3 - TiC$) с диапазоном плотности 10-14 г/см³. За счет введения пористой структуры (пористость 5%-15%) или легких добавок (например, TiC, Al_2O_3) плотность может быть оптимизирована до 9-12 г/см³ с учетом как легкости, так и прочности. Умные функции включают в себя:

Адаптивная резка

При скоростях резания 500–2000 м/мин твердость динамически регулируется (HV 1200–1800), вибрации снижаются (<0,05 мм) за счет фазового перехода или реакции покрытия, а шероховатость поверхности оптимизируется ($Ra < 0,02$ мкм).

Мониторинг в реальном времени

Встроенные микродатчики собирают данные о температуре ($< 300^\circ C \pm 5^\circ C$), напряжении (< 500 МПа ± 10 МПа), вибрации (<0,1 g) и глубине износа ($\pm 0,01$ мм) в режиме реального времени, а данные передаются обратно в систему ЧПУ по беспроводной связи (задержка < 0,1 с).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Самоисцеление

Встроенные наночастицы SiC или микрокапсулированные полимеры высвобождают клей при появлении микротрещин ($<0,1$ мм) со степенью восстановления K_{1c} $80\% \pm 5\%$, что значительно продлевает срок службы.

Универсальность

Под воздействием магнитного поля (>1 Т) или при изменении pH (4-7) коэффициент поверхностного трения снижается на $10\% \pm 2\%$ или коррозионная стойкость увеличивается на $15\% \pm 3\%$, что позволяет адаптироваться к различным условиям обработки.

Эти функции позволяют интеллектуальным инструментам превосходно работать в условиях высокой точности, высокой эффективности и экстремальных рабочих условиях и особенно подходят для удовлетворения требований современной обрабатывающей промышленности к интеллектуальности и устойчивому развитию.

2. Преимущества производительности

Адаптивная резка

Благодаря фазовому превращению связующей фазы (например, мартенситно-аустенитное превращение NiTi) или регулированию теплового расширения покрытия инструмент самостоятельно оптимизирует параметры резания при изменении нагрузки резания, снижает динамическое напряжение между инструментом и заготовкой (<100 МПа), повышает эффективность резания на $15\% \pm 2\%$ и улучшает качество поверхности на $20\% \pm 3\%$ (R_a снижается с $0,1$ мкм до $0,02$ мкм).

Мониторинг в реальном времени

Сенсорная сеть обеспечивает поддержку многомерных данных, мониторинг температуры для предотвращения термического повреждения (предупреждение при >300 °C), мониторинг напряжений для оптимизации скорости подачи ($<0,1$ мм/об), мониторинг износа для прогнозирования срока службы (погрешность $<5\%$) и выполнения профилактического обслуживания.

Самоисцеление

Нанонаполнители (например, SiC, размер частиц <50 нм) или микрокапсулы (диаметром 5–10 мкм) активируются при распространении трещин, высвобождая эпоксидную смолу или металлический клей, что обеспечивает скорость ремонта $80\% \pm 5\%$ и продление срока службы на $20\% \pm 3\%$ (>10 4 часов $\pm$ 10 3 часов).

Прочность

По сравнению с традиционными инструментами скорость износа снижена на $20\% \pm 2\%$ ($<0,03$ мм³/м), а стойкость к окислению повышена на $10\% \pm 2\%$ ($<0,1$ мг/см²/ч), что подходит для высоких нагрузок (например, резка авиационного титанового сплава) и высокотемпературных сред.

3. Факторы влияния

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Состав связующей фазы

Содержание NiTi составляет 5%-15%±1%, приспособляемость к резанию сильная, K_{1c} увеличивается на 15%±2% (до 18 МПа·м^{1/2} ± 0,5), а твердость стабильна при HV 1500±30; когда оно >20%±1%, твердость уменьшается на 10%±3% (до HV 1200±30), а граница зерен нестабильна. Теория мартенситного фазового превращения показывает, что низкое содержание NiTi оптимизирует деформацию (<5%), а высокое содержание увеличивает энергию границы зерен (>1 Дж/м²), следуя принципу минимизации свободной энергии Гиббса.

Пористость

При пористости 10%±1% скорость поглощения энергии высокая (>90%±2%), эффективность самовосстановления составляет 85%±3%, а устойчивость к резанию повышается; при пористости >20%±1% прочность снижается на 15%±3% (до 850 МПа±20 МПа). Модель Гибсона-Эшби указывает на то, что умеренная пористость рассеивает напряжение, а чрезмерная пористость ослабляет структуру. Теория трещин Гриффита поддерживает увеличение энергии распространения трещин.

Температура спекания

При 1300°C-1400°C±10°C микроструктура стабильна, чувствительность отклика составляет >95%±2%, а адгезия покрытия составляет >50 Н/мм²; при >1450°C±10°C производительность снижается на 5%±1%. Теория спекания Кингери показывает, что умеренная температура способствует связыванию фазового интерфейса, а уравнение Аррениуса объясняет неконтролируемую диффузию при слишком высокой температуре.

Размер зерна

диаметр 0,5-1 мкм ± 0,01 мкм, точность резки высокая (допуск < 0,005 мм), K_{1c} достигает 16 МПа·м^{1/2} ± 0,5, а скорость износа < 0,02 мм³ / м; когда диаметр > 2 мкм ± 0,01 мкм, скорость износа увеличивается на 10% ± 2%. Соотношение Холла-Петча показывает, что мелкие зерна повышают износостойкость, а механизм Орована объясняет ухудшение характеристик крупных зерен.

Толщина покрытия

5-10 мкм±0,5 мкм эффективность термического реагирования составляет >90%±2%, а коэффициент трения снижается на 10%±2%; при толщине >15 мкм±0,5 мкм адгезия снижается на 10%±2%. Теория адгезии указывает на то, что умеренная толщина оптимизирует сцепление интерфейса, в то время как чрезмерная толщина приводит к накоплению внутреннего напряжения (>200 МПа).

Чувствительность сенсора

Чувствительность к деформации >100 мкЭ, разрешение по температуре <1°C, основано на пьезоэлектрическом эффекте и термоэлектрическом эффекте, что обеспечивает точность данных.

4. Сценарии применения

Авиационное производство

Обработка лопаток турбин из титанового сплава (например, Ti-6Al-4V), саморегулировка

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердости (HV 1500±30), контроль температуры <250°C±5°C, точность ±0,01 мм, снижение процента брака на 10%±2%, подходит для сложной обработки поверхностей.

автомобильная промышленность

Резка деталей корпуса из алюминия (6061) со встроенным датчиком деформации для определения нагрузки <400 МПа, динамическая регулировка скорости подачи (0,05-0,2 мм/об), повышение эффективности на 15% ± 2%, что соответствует потребностям массового производства.

Изготовление пресс-форм

Обработка стали высокой твердости (H13, HV 500±20), самовосстанавливающееся покрытие ремонтирует микротрещины (<0,05 мм), срок службы до 10⁴ часов ±10³ часов, снижение частоты замены на 20%±3% и снижение затрат на техническое обслуживание.

Электронная промышленность

Прецизионная обработка кремниевых пластин (толщина < 0,5 мм), размер зерна 0,5 мкм ± 0,01 мкм, гладкая поверхность среза (Ra < 0,02 мкм), обратная связь по данным в реальном времени для оптимизации процесса, подходит для производства микроэлектронных компонентов и чипов.

Энергетическое оборудование

Вырубка лопастей ветряных турбин, высокая термостойкость (<300°C), адаптивная твердость, сниженный риск образования термических трещин (<0,1 мм), подходит для экстремальных условий и требований к длительному сроку службы.

Судостроительная промышленность

Обработанные винты из нержавеющей стали, реакция магнитного поля снижает трение (<0,1), коррозионная стойкость улучшена на 15% ± 3%, подходит для морской среды с высоким содержанием соли.

5. Сравнение различных материалов

Тип материала	Плотность (г/см³)	Твёрдость (HV)	K1c K_{1c} K1c (МПа·м ^{1/2} / Умные функции	ограничение	
Карбид Smart Response	10-12	1200-1800	10-20	Самоадаптация, мониторинг и самовосстановление	Высокая плотность, высокая стоимость
Традиционный твердый сплав	14-15	1400-1800	10-20	никто	Невосприимчивый, ограниченный срок службы
Режущие инструменты с керамическим покрытием	2,5-3,0	2000-3000	3-5	Тепловой отклик	Высокая хрупкость, легко ломается
Карбидное покрытие (PVD)	6.0-7.0	1500-2500	5-10	Износостойкий	Отсутствие адаптивности, короткая продолжительность жизни

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тип материала	Плотность (г/см³)	Твёрдость (HV)	K1c K_{1c} K1c (МПа·м ^{1/2})	Умные функции	ограничение
Умные полимерные композиты	1,0-1,5	50-100	1-5	Распознавание стресса	Низкая твердость, неустойчив к высоким температурам
Режущие инструменты с нанопокрывтием	5,0-6,0	1000-1500	10-15	Самосмазывающийся	Плохая устойчивость к высоким температурам

Твердый сплав Smart Response превосходит керамические покрытия и полимерные композиты по твердости и прочности, близок к традиционному твердому сплаву, обладает адаптивными и контролирующими функциями, превосходит по сроку службы карбидные покрытия и обладает смазочным потенциалом нанопокровтий.

6. Производственный процесс

Порошковая металлургия

Порошок WC и порошок NiTi (85:15) смешивали и спекали при температуре 1400°C ± 10°C в вакууме (10⁻³ Па), при этом пористость контролировали на уровне 10% ± 1%, чтобы сформировать однородную микроструктуру с твердостью HV 1500± 30.

Аддитивное производство

Селективное лазерное плавление (SLM) с толщиной слоя 50 мкм ± 5 мкм, встроенные датчики (<1 мм³), точность ± 0,01 мм, подходит для сложных геометрий.

Обработка поверхности

Нанесенное методом PVD покрытие TiAlN или CrN (5-10 мкм), высокотемпературный отжиг (1000°C ± 10°C) активирует отзывчивость, адгезию > 50 Н/мм², а износостойкость улучшается на 20% ± 2%.

Интеграция датчиков

Миниатюрные тензодатчики (чувствительность >100 мкЭ) и термопары (разрешение <1°C) встраиваются с помощью лазерной сварки, со скоростью передачи сигнала >100 Гц, совместимы с промышленным Интернетом вещей.

Постобработка

Плазменная полировка устраняет дефекты поверхности (Ra<0,01 мкм) и повышает прочность связи между покрытием и подложкой (>60 Н/мм²).

7. Направление развития

Слияние нескольких датчиков

Интеграция датчиков температуры, вибрации, износа и акустической эмиссии для создания цифровой модели двойника, прогнозирования срока службы (погрешность <3%), оптимизации параметров резки на основе глубокого обучения и снижения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

энергопотребления на $10\% \pm 2\%$.

Адаптивное покрытие

Разработано термо-магнитно-химическое покрытие с тройным откликом, диапазон твердости которого расширен до HV 1000-2000, а время отклика составляет $<0,5$ с, что соответствует распределению Максвелла-Больцмана и кинетике электрохимических реакций.

Нано-улучшение

Добавление углеродных нанотрубок (УНТ, $<2\%$) или графена ($<1\%$) улучшает теплопроводность (>200 Вт/м·К) и прочность, при этом K_{1c} увеличивается до $20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, на основе квантовых интерфейсных эффектов и теории упрочнения нанокompозитов.

Интеллектуальное управление

Интеграция с 5G и периферийными вычислениями позволяет получать обратную связь по данным резки в режиме реального времени (задержка $< 0,05$ с), адаптироваться к гибкому производству и снижать погрешности обработки до $\pm 0,005$ мм.

Устойчивый дизайн

Разработать перерабатываемые покрытия, которые позволят сократить отходы материалов на $10\% \pm 2\%$ в соответствии со стандартами экологичного производства.

8. Проблемы и перспективы

Проблемы включают высокую себестоимость производства ($>3-4$ раза по сравнению с традиционными инструментами), надежность датчиков при высоких температурах ($>400^\circ\text{C}$) ($>10^5$ циклов) и долгосрочную стабильность в сложных рабочих условиях (>5 лет). Перспектива заключается в глубоком применении интеллектуального производства, теоретическая основа которого охватывает динамику фазовых изменений (модель Лангера), оптимизацию микроструктуры (закрепление Зенера), технологию датчиков (пьезоэлектрический эффект), многополевые связи (уравнения Максвелла) и теорию нанокompозитных материалов (модель Халпина-Цая). Интеллектуальные инструменты будут способствовать развитию авиации, автомобилестроения, электроники и энергетической обработки в направлении эффективного, точного и устойчивого развития и станут основным компонентом Индустрии 4.0.

Умные инструменты произвели революцию в современных технологиях обработки благодаря адаптивной резке, мониторингу в реальном времени и функциям самовосстановления. Их универсальность и теоретические инновации дополняют друг друга и, как ожидается, будут доминировать в мировой обрабатывающей промышленности в будущем.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

Электрод электроэрозионный твердосплавный

Электроды для электроэрозионной обработки (EDM) из цементированного карбида изготавливаются из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (8592 мас. %) в сочетании с Co (610 мас. %) или Ni (612 мас. %) в качестве связующей фазы и производятся методом порошковой металлургии (шаровая мельница, СІР, спекание НІР). Они обладают высокой твердостью (1600 - 2000 HV), отличной износостойкостью (потеря износа $<0,02 \text{ мм}^3 / \text{ч}$, ASTM G65), высокой термостойкостью ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$, стойкость к окислению), высокой проводимостью ($>90\%$ IACS, IEC 6051221) и стойкостью к дуговой эрозии ($<0,01 \text{ мм}^3 / \text{мин}$, IEC 60850). Поверхность покрыта PVD/CVD покрытием (например, TiN, ZrN, 13 мкм, коэффициент трения $<0,2$) или функциональным покрытием (Cu, Ag, 0,52 мкм, проводимость $>95\%$ IACS) для повышения стойкости к дуговой эрозии, износостойкости и электрических свойств. Электроды используются для прецизионной обработки EDM (например, турбинных лопаток, микропор, сложных полостей) в областях аэрокосмической промышленности, производства пресс-форм, автомобилестроения и медицины, а также для обработки материалов высокой твердости (например, титановых сплавов, литейных сталей, 400 - 600 HV), обеспечивая высокую точность (отклонение $\leq \pm 0,005 \text{ мм}$), низкие потери электрода ($<0,5\%$) и высокое качество поверхности (Ra 0,10,3 мкм).

В данной статье на основе стандартов (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60850, ISO 9001) приводятся рекомендации по технологии, производительности, применению и оптимизации твердосплавных электроэрозионных электродов.

Характеристики твердосплавных электроэрозионных электродов

1.1 Состав твердосплавных электродных материалов для электроэрозионной обработки

Матрица

Содержание WC: 85–92 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,1–0,4 мкм), твердость 1600–2000 HV.

Co: 6 - 10 мас. %, высокая ударная вязкость ($K_{IC} 1015 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), стойкость к дуговой эрозии увеличена на 10%.

Ni: 6 - 12 мас. % (опционально), коррозионная стойкость (электролит $<0,01 \text{ мм/год}$), проводимость увеличена на 5%.

Добавки: TaC (0,10,3 мас. %), антиоксидантная способность увеличена на 10%; ZrC (0,20,5 мас. %), износостойкость увеличена на 5%.

покрытие

TiN (PVD): твердость 2000 - 2400 HV, термостойкость 800°C , стойкость к дуговой эрозии.

ZrN (PVD): твердость 2200 - 2600 HV, коррозионно-стойкий, антиадгезионные свойства

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

увеличены на 15%.

Cu/Ag (PVD): проводимость >95% IACS, термостойкость 600°C, устойчивость дуги увеличена на 20%.

Градиентная структура: низкое содержание Co/Ni на поверхности (6–8 мас. %), высокое содержание Co/Ni в сердцевине (10–12 мас. %), повышение износостойкости на 20%, повышение трещиностойкости на 15%.

1.2 Эксплуатационные параметры твердосплавных электроэрозионных электродов

Твердость: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 1,8 - 2,5 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 10 - 15 МПа·м^{1/2} (на основе Co 1215, на основе Ni 1012).

Износостойкость: Скорость износа <0,02 мм³/ч (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: электролит (pH 410), <0,01 мм/год (NACE MR0175).

Высокая термостойкость: >1000°C, стойкость к окислению (<0,01 мг/см², 500 часов).

Стойкость к дуговой эрозии: потери <0,01 мм³/мин (IEC 60850).

Электропроводность: >90% IACS (покрытие Cu/Ag, IEC 6051221).

Шероховатость поверхности: Ra 0,05 - 0,2 мкм, точность обработки повышена на 15%.

Потери электрода: <0,5% (обработка литейной стали, ширина импульса 50-100 мкс).

1.3 Преимущества твердосплавных электроэрозионных электродов

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC+, потери <0,5%, срок службы увеличен в 35 раз.

Стойкость к дуговой эрозии: покрытие TiN/ZrN, скорость эрозии <0,01 мм³/мин, лучше, чем у медных электродов.

Высокая проводимость: покрытие Cu/Ag, проводимость >95% IACS, эффективность обработки увеличена на 20%.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + ZrN, устойчив к электролитной коррозии, подходит для длительной обработки.

Высокая точность: низкие потери + прецизионная обработка, отклонение <±0,005 мм, поверхность Ra 0,1 - 0,3 мкм.

2. Процесс производства электроэрозионных электродов из цементированного карбида

2.1 Подготовка твердосплавного порошка для электроэрозионной обработки

Сырье: WC (D50 0,1 - 0,4 мкм, чистота >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 мкм), TaC / ZrC (D50 0,51 мкм).

Шаровая мельница: планетарная шаровая мельница (шары ZrO₂, 15:1), 400 об/мин, 1620 часов, отклонение размера частиц <±0,03 мкм, однородность >99%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Формовка твердосплавных электродов методом электроэрозионной обработки

Метод: Холодное изостатическое прессование (ХИП) или прецизионное формование.
Параметры: 250 - 300 МПа, выдержка под давлением 60 секунд, форма из вольфрамовой стали (отклонение $< \pm 0,02$ мм), плотность заготовки 8,510,0 г/см³.
Результаты: Отклонение размеров $< \pm 0,03$ мм, частота трещин $< 0,3\%$.

2.3 Спекание твердосплавных электроэрозионных электродов

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.
параметр:
Депарафинизация: 200 - 500°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Па.
Спекание: 1350 - 1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Па, 22,5 часа.
Горячее изостатическое прессование: 1350°C, 120 МПа (Ar), 11,5 ч.
Результаты: Плотность 14,8 - 15,0 г/см³, пористость $< 0,0003\%$, твердость 1600 - 2000 HV.

2.4 Прецизионная обработка твердосплавных электроэрозионных электродов

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), 5000 об/мин, подача 0,003 - 0,01 мм/проход, геометрическое отклонение $< \pm 0,005$ мм, Ra 0,05 - 0,2 мкм.
Электроэрозионная обработка: электроискровая правка, микроканавка/отверстие ($\varnothing$ 0,1-0,5 мм), отклонение $< \pm 0,003$ мм.
Полировка: Алмазная полировальная паста (0,30,5 мкм), 1200 об/мин, Ra $< 0,05$ мкм, стабильность дуги увеличена на 10%.

2.5 Покрытие электродов из цементированного карбида для электроэрозионной обработки

Метод: PVD/CVD (мишень Ti/Zr/Cu/Ag, $> 99,99\%$).
Параметры: TiN/ZrN/Cu/Ag (13 мкм), 10^{-5} Па, 200 - 400°C, смещение 80 В, скорость осаждения 0,51 мкм/ч.
Результаты: Адгезия > 80 Н, коэффициент трения $< 0,2$, проводимость $> 95\%$ IACS.

2.6 Проверка твердосплавных электроэрозионных электродов

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен $< 2\%$).
Характеристики: Отклонение твердости $< \pm 30$ HV (ISO 6508), износ $< 0,02$ мм³/ч, коррозионная стойкость ($< 0,01$ мм/год).
Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,003$ мм), лазерное сканирование (отклонение паза $< \pm 0,002$ мм).
Неразрушающий контроль: рентген (дефекты $< 0,005$ мм), ультразвуковой (трещины $< 0,003$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мм).

Электрические свойства: проводимость >90% IACS, скорость дуговой эрозии <0,01 мм³/мин (IEC 60850).

Испытание обработки: потеря электрода <0,5%, отклонение обработки <±0,005 мм, поверхность Ra 0,10,3 мкм.

Сценарии применения твердосплавных электроэрозионных электродов

Электроды для электроэрозионной обработки с карбидным сплавом предоставляют рекомендации по процессу, испытаниям и выбору для обеспечения высокой точности, высокой эффективности и сложных требований к обработке:

3.1 Обработка лопаток авиационных турбин

Рабочие условия: литейная сталь (H13, 500 HV), электролит (pH 7), ширина импульса 50 мкс, ток 20 А.

дизайн

Тип: Электрод сложной формы (50×30×10 мм).

Материал: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 мкм, TaC 0,3 мас. %), твердость 1900 HV.

Покрытие: TiN (2 мкм, PVD, твердость 2400 HV, термостойкость 800°C).

Геометрия: Отклонение поверхности <±0,003 мм, Ra <0,1 мкм.

Процесс: шаровая мельница 20 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD TiN (300°C).

Параметры: глубина обработки 5 мм, ширина импульса 50 мкс, ток 20 А, время обработки 2 часа.

тест:

Потери электрода: <0,4% (медный электрод 2%, снижение в 5 раз).

Точность обработки: отклонение <±0,005 мм, Ra 0,2 мкм.

Противодуговая эрозия: потери <0,01 мм³/мин, срок службы увеличен в 4 раза.

Коррозионная стойкость: 100 часов в электролите, <0,01 мм/год.

Выбор: WCCo+TiN, подходит для сложных поверхностей высокой твердости, регулярной полировки.

Преимущества: низкие потери, высокая точность, эффективность обработки увеличена на 20%.

3.2 Обработка микроотверстий пресс-формы

Рабочие условия: титановый сплав (Ti6Al4V, 350 HV), электролит (pH 6), ширина импульса 30 мкс, ток 10 А.

дизайн

Тип: Микропористый электрод (Ø 0,5 мм, длина 10 мм).

Материал: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 мкм, ZrC 0,5 мас. %), твердость 1700 HV.

Покрытие: ZrN (1,5 мкм, PVD, твердость 2600 HV, антиадгезионный).

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

Геометрия: Отклонение апертуры $\leq \pm 0,002$ мм, Ra $< 0,05$ мкм.

Процесс: шаровая мельница в течение 18 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), электроэрозионная обработка, PVD ZrN (250°C).

Параметры: глубина отверстия 5 мм, ширина импульса 30 мкс, ток 10 А, время обработки 1 час.

тест:

Потери электрода: $< 0,3\%$ (1,5% для медного электрода, в 5 раз ниже).

Точность обработки: отклонение $\leq \pm 0,003$ мм, Ra 0,1 мкм.

Противодуговая эрозия: потери $< 0,008$ мм³/мин, срок службы увеличен в 5 раз.

Коррозионная стойкость: 200 часов в электролите, $< 0,01$ мм/год.

Выбор: WCNi+ZrN, подходит для обработки микроотверстий, регулярная очистка.

Преимущества: Высокая точность антиадгезии, качество микропор увеличено на 15%.

3.3 Обработка полости медицинского имплантата

Рабочие условия: сплав CoCr (500 HV), электролит (pH 8), ширина импульса 100 мкс, ток 15 А.

дизайн

Тип: Полостной электрод (20×10×5 мм).

Материал: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 мкм, TaC 0,3 мас. %), твердость 1800 HV.

Покрытие: Cu (1 мкм, PVD, проводимость $> 95\%$ IACS).

Геометрия: Отклонение полости $\leq \pm 0,004$ мм, Ra $< 0,1$ мкм.

Процесс: шаровая мельница 20 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD Cu (200°C).

Параметры: глубина полости 3 мм, ширина импульса 100 мкс, ток 15 А, время обработки 3 часа.

тест:

Потери электрода: $< 0,5\%$ (медный электрод 2,5%, снижение в 5 раз).

Точность обработки: отклонение $\leq \pm 0,005$ мм, Ra 0,3 мкм.

Противодуговая эрозия: потери $< 0,01$ мм³/мин, срок службы увеличен в 3 раза.

Проводимость: $> 95\%$ IACS, эффективность обработки увеличена на 20%.

Выбор: WCCo+Cu, подходит для полостей с высокой проводимостью, обычная полировка.

Преимущества: высокая эффективность, низкие потери, качество резонатора повышено на 10%.

Сравнение производительности твердосплавных электродов для электроэрозионной обработки

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Медный электрод	Графитовый электрод
Твёрдость (HV)	1600 - 2000	50 - 100	50 - 80
Прочность на изгиб (ГПа)	1,8 - 2,5	0,2 - 0,4	0,02 - 0,05

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Медный электрод	Графитовый электрод
Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})	10 - 15	20 - 30	12
Износостойкость (мм ³ /ч)	<0,02	0.51.0	0.30.6
Стойкость к дуговой эрозии (мм ³ /мин)	<0,01	0,05 - 0,1	0,03 - 0,06
Электропроводность (% IACS)	>90	>95	10 - 20
Потеря электрода (%)	<0,5	1,5 - 2,5	1.0 - 2.0
Точность обработки (мм)	<±0,005	±0,01 - 0,02	±0,008 - 0,015
Срок службы кратный (по отношению к меди)	35	1	1.52

Основные характеристики твердосплавных электроэрозионных электродов:

Низкие потери: субстрат WC, потери <0,5%, срок службы увеличен в 35 раз.

Стойкость к дуговой эрозии: покрытие TiN/ZrN, скорость эрозии <0,01 мм³/мин, лучше, чем у меди.

Высокая проводимость: покрытие Cu/Ag, проводимость >95% IACS, высокая эффективность.

Высокая точность: прецизионная обработка, отклонение <±0,005 мм, Ra 0,10,3 мкм.

Рекомендации по оптимизации электроэрозионной обработки твердосплавными электродами

Выбор материала:

Лопатки турбины: WC8%Co+TiN, стойкость к дуговой эрозии повышена на 15%.

Обработка микроотверстий: WC10%Ni+ZrN, антиадгезионные свойства увеличены на 20%.

Обработка полости: WC8%Co+Cu, проводимость увеличена на 10%.

Добавки: TaC 0,3 мас.%, ZrC 0,5 мас.%, износостойкость увеличена на 5%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1350°C, 120 МПа, пористость <0,0003%, износостойкость повышена на 15%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), отклонение <±0,005 мм, Ra <0,05 мкм.

покрытие:

TiN (2 мкм, PVD), сопротивление дуговой эрозии увеличено на 20%.

ZrN (1,5 мкм, PVD), антиадгезионные свойства увеличены на 15%.

Cu (1 мкм, PVD), проводимость увеличилась на 10%.

Электроэрозионная обработка: отклонение паза <±0,002 мм, точность увеличена на 5%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры ±1°C, 10⁻⁶ Па.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

5-осевой ЧПУ: отклонение $\leq \pm 0,003$ мм.

Оборудование для нанесения покрытий: скорость осаждения 0,51 мкм/ч, отклонение $\leq \pm 0,03$ мкм.

Адаптация к условиям труда:

Лопатки турбины: WCCo+TiN, литейная сталь, ширина импульса 50 мкс, ток 20 А.

Обработка микроотверстий: WCNi+ZrN, титановый сплав, ширина импульса 30 мкс, ток 10 А.

Обработка полости: WCCo+Cu, сплав CoCr, ширина импульса 100 мкс, ток 15 А.

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен $< 2\%$).

Производительность: ASTM G65 ($< 0,02$ мм³/ч), коррозионная стойкость ($< 0,01$ мм/год), стойкость к дуговой эрозии ($< 0,01$ мм³/мин).

Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,003$ мм), лазерное сканирование (отклонение паза $< \pm 0,002$ мм).

Электрические свойства: проводимость $> 90\%$ IACS, потери электрода $< 0,5\%$ (IEC 60850).

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 1600-2000 HV.

ASTM G65: Скорость износа $< 0,02$ мм³/ч.

NACE MR0175: Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением.

IEC 60850: Испытание на дуговую эрозию.

ISO 9001: Управление качеством.

Благодаря оптимизации сверхмелкого зерна WC (0,10,4 мкм), связующей фазы Co/Ni (612 мас. %) и покрытия PVD/CVD (TiN/ZrN/Cu, 13 мкм) электроды EDM из цементированного карбида достигают высокой твердости (1600-2000 HV), износостойкости ($< 0,02$ мм³/ч), стойкости к дуговой эрозии ($< 0,01$ мм³/мин), высокой проводимости ($> 90\%$ IACS) и высокой точности (отклонение $\leq \pm 0,005$ мм). Электроды подходят для обработки лопаток авиационных турбин, микропор пресс-форм и полостей медицинских имплантатов с потерями $< 0,5\%$, сроком службы, увеличенным в 35 раз, Ra 0,10,3 мкм и повышением эффективности обработки на 1520%. Оптимизация размера зерна, толщины покрытия и электроэрозионной обработки может снизить затраты, но проблемы заключаются в сверхточной обработке (увеличение затрат на 10%) и стабильности дуги ($> 10^6$ раз). Твердосплавные электроды превосходят медные и графитовые электроды и отвечают высоким требованиям надежности прецизионной обработки (ISO 9001).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

Подложка с карбидным токопроводящим покрытием

Подложка токопроводящего покрытия из цементированного карбида изготовлена из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (85 - 92 мас. %) в сочетании с Co (6 - 10 мас. %) или Ni (6 - 12 мас. %) в качестве связующей фазы и изготовлена методом порошковой металлургии (шаровая мельница, СІР, спекание НІР). Она имеет высокую твердость (1600 - 2000 НV), отличную износостойкость (потеря износа <0,02 мм³ /ч, ASTM G65), коррозионную стойкость (<0,01 мм/год, рН 212, содержит HCl, SO₄²⁻), высокую термостойкость (>800 °C, антиокислительная) и высокую прочность (прочность на изгиб 1,82,5 ГПа). Поверхность покрыта проводящим покрытием PVD/CVD (например, Cu, Ag, Au, NiP, 0,53 мкм, проводимость>95% IACS, IEC 6051221) для повышения проводимости, стойкости к дуговой эрозии (<0,01 мм³ / мин, IEC 60850) и низкого контактного сопротивления (<10 мОм). Подложка используется в аэрокосмической промышленности (электрические разъемы, проводящие контактные кольца), новой энергетике (электроды аккумуляторных батарей, биполярные пластины топливных элементов) и электронике (контактные площадки печатных плат), выдерживая высокую плотность тока (10 - 100 А/см²), вибрацию (1050 г) и коррозионную среду (солевой туман, влажное тепло), обеспечивая высокую проводимость (>95% IACS), низкие потери (<0,5%) и длительный срок службы (>10⁶ циклов), с шероховатостью поверхности Ra 0,050,2 мкм.

В данной статье на основе стандартов (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 6051221, ISO 9001) приводятся рекомендации по подложке, процессу, эксплуатационным характеристикам, применению и оптимизации токопроводящего покрытия из цементированного карбида.

Характеристики токопроводящего покрытия из цементированного карбида

1.1 Состав материала подложки из цементированного карбида вольфрама

Подложка с карбидным токопроводящим покрытием:

Содержание WC: 85–92 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,1–0,4 мкм), твердость 1600–2000 НV.

Co: 6 - 10 мас. %, высокая ударная вязкость (KIC 1015 МПа·м^{1/2}), сопротивление усталости увеличено на 10%.

Ni: 6 - 12 мас. % (опционально), коррозионная стойкость (HCl, SO₄²⁻ <0,01 мм/год), проводимость увеличена на 5%.

Добавки: TaC (0,1–0,3 мас. %), увеличивает стойкость к окислению на 10%; ZrC (0,2–0,5 мас. %), увеличивает износостойкость на 5%.

Проводящее покрытие из карбида подложки проводящее покрытие:

Cu (PVD): проводимость >98% IACS, термостойкость 600°C, контактное сопротивление <8 мОм.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ag (PVD): проводимость >99% IACS, термостойкость 650°C, стойкость к дуговой эрозии.

Au (PVD): проводимость >95% IACS, термостойкость 700°C, коррозионная стойкость увеличена на 20%.

NiP (химическое покрытие): проводимость >90% IACS, твердость 800-1000 HV, коррозионная стойкость.

Градиентная структура: низкое содержание Co/Ni на поверхности (6–8 мас. %), высокое содержание Co/Ni в сердцевине (10–12 мас. %), повышение износостойкости на 20%, повышение трещиностойкости на 15%.

Модификация поверхности: нанотекстурирование (размер элемента 50–200 нм), увеличение площади контакта на 15%, снижение сопротивления на 10%.

1.2 Эксплуатационные параметры токопроводящего покрытия из цементированного карбида

Твердость: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 1,8 - 2,5 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 1015 МПа·м^{1/2} (на основе Co 1215, на основе Ni 1012).

Износостойкость: Скорость износа <0,02 мм³/ч (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 212, <0,01 мм/год (NACE MR0175).

Высокая термостойкость: >800°C, стойкость к окислению (<0,01 мг/см², 500 часов).

Электропроводность: >95% IACS (IEC 6051221).

Сопротивление контакта: <10 мкОм (IEC 6051221).

Стойкость к дуговой эрозии: потери <0,01 мм³/мин (IEC 60850).

Шероховатость поверхности: Ra 0,05 - 0,2 мкм, устойчивость контакта увеличена на 20%.

Срок службы: >10⁶ раз (10100 А/см², MILSTD810G).

1.3 Преимущества токопроводящего покрытия из цементированного карбида

Высокая проводимость: покрытие Cu/Ag/Au, проводимость >95% IACS, контактное сопротивление <10 мкОм.

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC+, износ <0,02 мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + Au/NiP, устойчив к воздействию соляного тумана/влажности и тепла, лучше, чем на основе меди.

Высокая термостойкость: покрытие Au, антиокислительное, подходит для высокотемпературной среды (700°C).

Стойкость к дуговой эрозии: покрытие Ag/Au, потери <0,01 мм³/мин, подходит для больших токов.

Процесс изготовления токопроводящего покрытия из цементированного карбида

2.1 Приготовление порошка

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сырье: WC (D50 0,1 - 0,4 мкм, чистота >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 мкм), TaC / ZrC (D50 0,51 мкм).

Шаровая мельница: планетарная шаровая мельница (шары ZrO₂, 15:1), 400 об/мин, 1620 часов, отклонение размера частиц <±0,03 мкм, однородность >99%.

2.2 Формирование

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

Параметры: 250 - 300 МПа, выдержка под давлением 60 секунд, форма из вольфрамовой стали (отклонение < ± 0,02 мм), плотность заготовки 8,5 - 10,0 г/см³.

Результаты: Отклонение размеров <±0,03 мм, частота трещин <0,3%.

2.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.

параметр:

Депарафинизация: 200 - 500°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Па.

Спекание: 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Па, 22,5 часа.

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

Результаты: Плотность 14,8 - 15,0 г/см³, пористость <0,0003%, твердость 1600 - 2000 HV.

2.4 Прецизионная обработка

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), 5000 об/мин, подача 0,003 - 0,01 мм/проход, геометрическое отклонение <±0,005 мм, Ra 0,05-0,2 мкм.

Электроэрозионная обработка: электроискровая обработка, микроканавка/отверстие (Ø 0,1-0,5 мм), отклонение <±0,003 мм.

Полировка: Алмазная полировальная паста (0,3 - 0,5 мкм), 1200 об/мин, Ra < 0,05 мкм, контактное сопротивление снижено на 10%.

2.5 Проводящее покрытие

Метод: PVD (мишень Cu/Ag/Au, >99,99%) или химическое осаждение (NiP).

Параметры: Cu/Ag/Au (0,53 мкм), 10⁻⁵ Па, 200400 °C, смещение 80 В, скорость осаждения 0,51 мкм/ч; NiP (13 мкм), pH 4,5 5,5, 85 °C.

Результаты: Адгезия >80 Н, проводимость >95% IACS, контактное сопротивление <10 мкОм.

2.6 Модификация поверхности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Методы: Лазерная микрообработка (длина волны 1064 нм) для создания нанотекстур (размер элемента 50 - 200 нм).

Параметры: мощность 1020 Вт, частота 50 кГц, скорость сканирования 500 мм/с.

Результаты: площадь контакта увеличилась на 15%, сопротивление контакта уменьшилось на 10%, а устойчивость проводимости увеличилась на 20%.

2.7 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,1 - 0,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <2%).

Характеристики: Отклонение твердости <±30 HV (ISO 6508), износ <0,02 мм³/ч, коррозионная стойкость (<0,01 мм/год).

Геометрия: КИМ (отклонение < ± 0,003 мм), лазерное сканирование (отклонение поверхности < ± 0,002 мм).

Неразрушающий контроль: рентген (дефекты < 0,005 мм), ультразвуковой (трещины < 0,003 мм).

Электрические свойства: проводимость >95% IACS, контактное сопротивление <10 мкОм, стойкость к дуговой эрозии <0,01 мм³/мин (IEC 6051221).

Испытания на воздействие окружающей среды: MILSTD810G (соляной туман 1000 часов, влажное тепло 85°C/85% относительной влажности, вибрация 50 g).

Сценарии применения токопроводящих покрытий

Подложки с карбидным токопроводящим покрытием обеспечивают высокую проводимость, износостойкость и соответствуют экстремальным требованиям к окружающей среде, рекомендации по процессу, испытаниям и выбору:

3.1 Авиационный электрический разъем

Условия эксплуатации: 50 А/см², вибрация 10 g, температура от 55°C до 200°C, соляной туман (5% NaCl), 10⁶ циклов.

дизайн

Тип: Контактный штифт (Ø 2 мм, длина 10 мм).

Материал: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 мкм, ZrC 0,5 мас. %), твердость 1700 HV.

Покрытие: Au (1 мкм, PVD, проводимость >95% IACS, термостойкость 700°C).

Геометрия: отклонение от круглости < ± 0,002 мм, Ra < 0,05 мкм, нанотекстура 50 - 100 нм.

Процессы: шаровая мельница 20 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD Au (250°C), лазерная микрообработка.

Параметры: плотность тока 50 А/см², вибрация 10 g, частота включения и выключения 1 Гц, тест:

Срок службы: 2×10⁶ раз (5×10⁵ раз для медной подложки, в 4 раза дольше).

Скорость износа: <0,01 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Контактное сопротивление: <8 мкОм, проводимость >95% IACS.

Вибростойкость: 10 g, 10⁶ раз, без сбоев.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Выбор: WCNi+Au, подходит для сильноточной коррозии и обычного неразрушающего контроля.

Преимущества: Низкое сопротивление, коррозионная стойкость, надежность соединения повышена на 20%.

3.2 Биполярные пластины топливных элементов

Условия эксплуатации: 100 А/см², 80°C, влажное тепло (95% относительной влажности), кислый электролит (рН 3), 10⁷ циклов.

дизайн

Тип: Биполярная пластина (100×100×2 мм).

Материал: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 мкм, ТаС 0,3 мас. %), твердость 1900 HV.

Покрытие: NiP (2 мкм, химическое покрытие, проводимость >90% IACS, твердость 1000 HV).

Геометрия: Отклонение канала потока <±0,003 мм, Ra <0,1 мкм, нанотекстура 100 - 200 нм.

Процесс: шаровая мельница в течение 18 часов, СІР 300 МПа, НІР 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, химическое покрытие NiP (85°C), лазерная микрообработка.

Параметры: плотность тока 100 А/см², температура 80°C, частота цикла 0,1 Гц.

Тест:

Срок службы: 1,5×10⁷ раз (3×10⁶ раз для нержавеющей стали, в 5 раз дольше).

Скорость износа: <0,02 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Контактное сопротивление: <10 мкОм, проводимость >90% IACS.

Устойчивость к воздействию тепла и влаги: относительная влажность 95%, 1000 часов, отсутствие коррозии.

Выбор: WCCo+NiP, подходит для кислотного и влажного тепла, регулярной уборки.

Преимущества: коррозионная стойкость, высокая проводимость, КПД аккумулятора увеличен на 15%.

3.3 Контактные площадки электронной платы

Условия эксплуатации: 20 А/см², вибрация 5 g, температура от 40°C до 150°C, сухая среда, 10⁶ контактов.

дизайн

Тип: Контактная площадка (5×5×0,5 мм).

Материал: WC8%Co (D50 0,10,4 мкм, ZrC 0,5 мас. %), твердость 1800 HV.

Покрытие: Ag (1 мкм, PVD, проводимость >99% IACS, термостойкость 650°C).

Геометрия: Отклонение от плоскостности <±0,002 мм, Ra <0,05 мкм, нанотекстура 50100 нм.

Процессы: шаровая мельница 20 часов, СІР 300 МПа, НІР 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD Ag (200°C), лазерная микрообработка.

Параметры: плотность тока 20 А/см², вибрация 5 g, частота контактов 1 Гц.

тест:

Срок службы: 2×10⁶ раз (4×10⁵ раз для медной подложки, в 5 раз дольше).

Скорость износа: <0,01 мм³/ч, стойкость к дуговой эрозии: <0,01 мм³/мин.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Контактное сопротивление: <7 мкОм, проводимость >99% IACS.

Вибростойкость: 5 g, 10⁶ раз, без сбоев.

Выбор: WCCo+Ag, подходит для высокочастотной контактной и обычной полировки.

Преимущества: низкое сопротивление дуге, прочность контакта увеличена на 20%.

Сравнение характеристик токопроводящего покрытия из цементированного карбида

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Медная подложка	Подложка из нержавеющей стали
Твёрдость (HV)	1600 - 2000	50 - 100	200 - 300
Прочность на изгиб (ГПа)	1,8 - 2,5	0,2 - 0,4	0,5 - 0,8
Прочность (K _{IC} , МПа·м ^{1/2})	10 - 15	20 - 30	50 - 70
Износостойкость (мм ³ /ч)	<0,02	0,5 - 1,0	0,2 - 0,5
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 212)	<0,01	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Электропроводность (% IACS)	>95	>98	двадцать три
Контактное сопротивление (мкОм)	<10	<5	50 - 100
Стойкость к дуговой эрозии (мм ³ /мин)	<0,01	0,05 - 0,1	0,03 - 0,06
Срок службы кратный (по отношению к меди)	35	1	1.52

Основные характеристики токопроводящего покрытия из цементированного карбида:

Высокая проводимость: покрытие Cu/Ag/Au, проводимость >95% IACS, контактное сопротивление <10 мкОм.

Износостойкость: подложка WC, износ <0,02 мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + Au/NiP, устойчив к воздействию соляного тумана/влажности и тепла, лучше, чем на основе меди.

Стойкость к дуговой эрозии: покрытие Ag/Au, потери <0,01 мм³/мин, подходит для больших токов.

Предложения по оптимизации для подложки из цементированного карбида токопроводящего покрытия

Выбор материала:

Электрический разъем: WC10%Ni+Au, коррозионная стойкость и проводимость увеличены на 15%.

Биполярная пластина топливного элемента: WC8%Co+NiP, кислотостойкость увеличена на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Контактная площадка печатной платы: WC8%Co+Ag, сопротивление дуге увеличено на 15%.
Добавки: TaC 0,3 мас.%, ZrC 0,5 мас.%, износостойкость увеличена на 5%.

Оптимизация процесса:

Спекание: HIP 1350°C, 120 МПа, пористость <0,0003%, проводимость увеличена на 10%.
Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), отклонение $\leq \pm 0,005$ мм, Ra <0,05 мкм.

покрытие:

Au (1 мкм, PVD), контактное сопротивление снижено на 10%.

NiP (2 мкм, химическое покрытие), коррозионная стойкость увеличена на 20%.

Ag (1 мкм, PVD), проводимость увеличилась на 5%.

Лазерная микрообработка: нанотекстура 50200 нм, площадь контакта увеличена на 15%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Па.

5-осевой ЧПУ: отклонение $\leq \pm 0,003$ мм.

Оборудование для нанесения покрытий: скорость осаждения 0,51 мкм/ч, отклонение $\leq \pm 0,03$ мкм.

Адаптация к условиям труда:

Электрический разъем: WCNi+Au, 50 А/см², от 55°C до 200°C, соляной туман.

Биполярная пластина: WCCo+NiP, 100 А/см², 80°C, кислый электролит.

Контактная площадка: WCCo+Ag, 20 А/см², от 40°C до 150°C, сухая среда.

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <2%).

Производительность: ASTM G65 (<0,02 мм³/ч), коррозионная стойкость (<0,01 мм/год), электропроводность (>95% IACS).

Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,003$ мм), лазерное сканирование (отклонение поверхности $< \pm 0,002$ мм).

Окружающая среда: MILSTD810G (соляной туман 1000 часов, влажное тепло 85°C/85% относительной влажности, вибрация 50 g).

Электрические свойства: контактное сопротивление <10 мкОм, стойкость к дуговой эрозии <0,01 мм³/мин (IEC 6051221).

Стандарты и спецификации

GB/T 183762014: Пористость <0,01%.

GB/T 38502015: Отклонение плотности $\leq \pm 0,1$ г/см³.

GB/T 38512015: Прочность 1,8 - 2,5 ГПа.

GB/T 79972017: Твердость 1600 - 2000 HV.

ASTM G65: Скорость износа <0,02 мм³/ч.

NACE MR0175: Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением.

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

IEC 6051221: Свойства электрических контактов.

IEC 60850: Испытание на дуговую эрозию.

ISO 9001: Управление качеством.

Проводящее покрытие из цементированного карбида обеспечивает высокую твердость (1600–2000 HV), износостойкость ($<0,02 \text{ мм}^3/\text{ч}$), коррозионную стойкость ($<0,01 \text{ мм/год}$), высокую проводимость ($> 95 \% \text{ IACS}$) и низкое контактное сопротивление ($<10 \text{ мкОм}$) за счет оптимизации сверхмелкого зерна WC ($0,1\text{--}0,4 \text{ мкм}$), фазы связывания Co/Ni (612 мас.%), проводящего покрытия PVD/химического осаждения (Cu/Ag/Au/NiP, $0,53 \text{ мкм}$) и нанотекстурированной поверхности. Подложка подходит для авиационных электрических разъемов, биполярных пластин топливных элементов и контактных площадок электронных плат, со сроком службы, увеличенным в 35 раз, Ra $0,05\text{--}0,2 \text{ мкм}$ и повышением эффективности проводимости на 15–20%. Оптимизация размера зерна, толщины покрытия и лазерной микрообработки может снизить затраты, но проблемы заключаются в сверхточной обработке (увеличение затрат на 10%) и однородности покрытия (отклонение $\leq \pm 0,03 \text{ мкм}$). Карбидная подложка превосходит подложки из меди и нержавеющей стали и соответствует высоким требованиям к проводимости надежности (ISO 9001).

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 для снижения веса авиационной техники из цементированного карбида

Компоненты из цементированного карбида для снижения веса авиации изготавливаются из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (8592 мас. %) в сочетании с Co (6 - 10 мас. %) или Ni (6 - 12 мас. %) в качестве связующей фазы и изготавливаются методом порошковой металлургии (шаровая мельница, CIP, спекание HIP). Они обладают высокой твердостью (1600 - 2000 HV), отличной износостойкостью (объем износа $<0,02 \text{ мм}^3 / \text{ч}$, ASTM G65), коррозионной стойкостью ($<0,01 \text{ мм/год}$, pH 212, содержит HCl, SO_4^{2-}), высокой термостойкостью ($>800^\circ\text{C}$, стойкость к окислению) и усталостной прочностью ($>10^6$ раз, MILSTD810G). За счет оптимизации соотношения материалов и структуры (например, пористая структура и тонкие стенки) плотность деталей снижается до $8-12 \text{ г/см}^3$ (на 20-40 % легче, чем традиционный твердый сплав $14,8-15,0 \text{ г/см}^3$), а соотношение прочности к весу ($>200 \text{ МПа}\cdot\text{см}^3/\text{г}$) лучше, чем у титанового сплава ($100-150 \text{ МПа}\cdot\text{см}^3/\text{г}$). Поверхность покрывается покрытием PVD/CVD (например, TiN, Al_2O_3 , 13 мкм, коэффициент трения $<0,2$) или функциональным покрытием (Au, Ag, 0,52 мкм, проводимость $>90\%$ IACS) для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и электрических свойств. Компоненты используются в аэрокосмической промышленности (например, соединители крыльев, крепежи и кронштейны) и подвергаются высоким нагрузкам (100 - 500 МПа), вибрации (10 - 100 г) и экстремальным условиям (от 55°C до 800°C). Срок службы в 35 раз больше, чем у традиционных материалов (таких как нержавеющая сталь, титановый сплав, 300 - 600 HV), а шероховатость поверхности составляет Ra 0,050,2 мкм.

В данной статье на основе стандартов (GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100) даются рекомендации по производству, обработке, эксплуатационным характеристикам, применению и оптимизации авиационных компонентов из цементированного карбида, облегчающих вес.

Характеристики авиационных компонентов из цементированного карбида для снижения веса

1.1 Детали для снижения веса авиационной техники из цементированного карбида

Состав материала

Матрица:

Содержание WC: 85–92 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,1–0,4 мкм), твердость 1600–2000 HV.

Co: 6 - 10 мас. %, высокая ударная вязкость ($K_{IC} 10 - 15 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$), сопротивление усталости увеличено на 10%.

Ni: 6–12 мас. % (опционально), коррозионная стойкость (HCl, SO_4^{2-} $<0,01 \text{ мм/год}$), стойкость к высокотемпературному окислению.

Добавки: Cr3C2 (0,2–0,5 мас. %), подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 5%; TaC

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

(0,1–0,3 мас. %), увеличивает антиоксидантные свойства на 10%.

Потеря веса:

Пористая структура: пористость 5 - 15%, размер пор 50 - 200 мкм, снижение плотности 20 - 30%.

Тонкая стенка: толщина стенки 0,52 мм, снижение веса 10–20%.

Композитная арматура: углеродное волокно/УНТ (13 мас. %), отношение прочности к весу увеличено на 15%.

покрытие:

TiN (PVD): твердость 2000 - 2400 HV, термостойкость 800°C, износостойкость.

Al₂O₃ (CVD): твердость 1800 - 2200 HV, термостойкость 1000°C, коррозионная стойкость.

Au/Ag (PVD): проводимость >90% IACS, термостойкость 500 - 600°C, антиокислительная защита.

Градиентная структура: низкое содержание Co/Ni на поверхности (6–8 мас. %), высокое содержание Co/Ni в сердцевине (10–12 мас. %), износостойкость повышена на 20%, трещиностойкость повышена на 15%.

1.2 Эксплуатационные параметры авиационных компонентов из цементированного карбида для снижения веса

Твердость: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 1,8 - 2,5 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 10 - 15 МПа·м^{1/2} (на основе Co 12 - 15, на основе Ni 10 - 12).

Удельная прочность: >200 МПа·см³/г (титановый сплав 100 - 150).

Плотность: 8 - 12 г/см³ (снижение веса на 20 - 40%).

Износостойкость: Скорость износа <0,02 мм³/ч (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 212, <0,01 мм/год (NACE MR0175).

Высокая термостойкость: >800°C, стойкость к окислению (<0,01 мг/см², 500 часов).

Усталостная прочность: >10⁶ раз (100 - 500 МПа, MILSTD810G).

Электропроводность: >90% IACS (покрытие Au/Ag, IEC 6051221).

Шероховатость поверхности: Ra 0,05 - 0,2 мкм, устойчивость контакта увеличена на 20%.

1.3 Преимущества авиационных компонентов из цементированного карбида в снижении веса

Высокая прочность и низкая плотность: пористые/тонкостенные, отношение прочности к весу >200 МПа·см³/г, снижение веса на 20–40%.

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC+, срок службы увеличен в 35 раз, а частота отказов снижена на 30%.

Высокая термостойкость: покрытие TiN / Al₂O₃, антиокислительное, подходит для высокотемпературной среды (800 °C).

Коррозионная стойкость: на основе Ni + Al₂O₃, устойчив к авиационному топливу/солевому туману, подходит для суровых условий.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Усталостная прочность: высокая прочность Co/Ni, выдерживает высокочастотную вибрацию ($>10^6$ раз), лучше, чем титановый сплав.

Процесс производства деталей из цементированного карбида для снижения веса авиатехники

2.1 Приготовление порошка

Сырье: WC (D50 0,1 - 0,4 мкм, чистота $>99,95\%$), Co/Ni (D50 0,51 мкм), Cr₃C₂/TaC (D50 0,51 мкм), углеродное волокно/CNT (D50 0,10,5 мкм).

Шаровая мельница: планетарная шаровая мельница (шары ZrO₂, 15:1), 400 об/мин, 1620 часов, отклонение размера частиц $\leq \pm 0,03$ мкм, однородность $>99\%$.

2.2 Формирование

Метод: Холодное изостатическое прессование (ХИП) + аддитивное производство (с использованием 3D-печати).

Параметры: 250 - 300 МПа, выдержка под давлением 60 секунд, форма из вольфрамовой стали (отклонение $< \pm 0,02$ мм), плотность заготовки 8,5 - 10,0 г/см³.

3D-печать: SLM (селективное лазерное плавление), порошок WCNi, толщина слоя 30–50 мкм, пористость 5–15%.

Результаты: отклонение размеров $\leq \pm 0,03$ мм, отклонение пористости $\leq \pm 0,5\%$, скорость трещин $< 0,3\%$.

2.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.

параметр:

Депарафинизация: 200 - 500°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Па.

Спекание: 1350 - 1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Па, 22,5 часа.

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

Результаты: Плотность 8 - 12 г/см³, пористость $< 0,0003\%$, твердость 1600 - 2000 HV.

2.4 Прецизионная обработка

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), 5000 об/мин, подача 0,003 - 0,01 мм/проход, геометрическое отклонение $\leq \pm 0,005$ мм, Ra 0,05-0,2 мкм.

Электроэрозионная обработка: Электроискровая обработка, микроотверстие/паз ($\varnothing$ 0,1-0,5 мм), отклонение $\leq \pm 0,003$ мм.

Полировка: Алмазная полировальная паста (0,30,5 мкм), 1200 об/мин, Ra $< 0,05$ мкм, коэффициент трения снижен на 10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.5 Покрытие

Метод: PVD/CVD (мишени Ti/Al/Au/Ag, >99,99%).

Параметры: TiN / Al₂O₃ /Au/Ag (13 мкм), 10⁻⁵Па, 200 - 400°C, смещение 80 В, скорость осаждения 0,51 мкм / ч.

Результаты: Адгезия >80 Н, коэффициент трения <0,2, проводимость >90% IACS.

2.6 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,1 - 0,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <2%).

Характеристики: Отклонение твердости <±30 HV (ISO 6508), износ <0,02 мм³/ч, коррозионная стойкость (<0,01 мм/год).

Геометрия: КИМ (отклонение < ± 0,003 мм), лазерное сканирование (отклонение апертуры < ± 0,002 мм).

Неразрушающий контроль: рентген (дефекты < 0,005 мм), ультразвуковой (трещины < 0,003 мм).

Климатические испытания: MILSTD810G (от 55°C до 800°C, вибрация 100 g, 10⁶ циклов).

Механические испытания: сопротивление усталости (>10⁶ раз, MILSTD810G), отношение прочности к массе (>200 МПа·см³/г).

Сценарии применения деталей для снижения веса авиации

Детали из цементированного карбида для облегчения веса авиационной техники содержат рекомендации по процессу, испытаниям и выбору для обеспечения высокой прочности, низкой плотности и соответствия требованиям экстремальных условий:

3.1 Твердый сплав авиационных деталей для снижения веса соединителя крыла

Условия: 300 МПа, вибрация 100 г, температура от 55°C до 200°C, соляной туман (5% NaCl), 10⁶ циклов.

дизайн

Тип: Соединительная пластина (100×50×2 мм, пористость 10%).

Материал: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 мкм, Cr3C2 0,4 мас.%, CNT 2 мас.%), твердость 1700 HV.

Покрытие: Al₂O₃ (2 мкм, CVD, термостойкость 1000°C, коррозионная стойкость).

Геометрия: Отклонение апертуры <±0,002 мм, Ra <0,1 мкм, плотность 9,5 г/см³.

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 300 МПа, SLM (пористость 10%), HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, CVD Al₂O₃ (400°C).

Параметры: напряжение 300 МПа, вибрация 100 g, частота дискретизации 1 кГц.

тест:

Срок службы: 2×10⁶ раз (5×10⁵ раз для титанового сплава, в 4 раза дольше).

Скорость износа: <0,01 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Удельная прочность: 220 МПа·см³/г, снижение массы на 30%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вибростойкость: 100 г, 10^6 раз, без сбоев.

Выбор: WCNi+ Al₂O₃ +CNT, подходит для коррозионных испытаний под высоким напряжением и обычного неразрушающего контроля.

Преимущества: высокая прочность, низкая плотность, коррозионная стойкость, устойчивость крыла увеличена на 15%.

3.2 Крепежные детали из карбида вольфрама для снижения веса авиационной техники (болты)

Условия: 200 МПа, вибрация 20 г, температура от 40°C до 150°C, сухая среда, 10^7 циклов. дизайн

Тип: Болт (М6, толщина 1 мм, пористость 8%).

Материал: WC8%Co (D50 0,10,4 мкм, TaC 0,3 мас.%, углеродное волокно 1 мас.%), твердость 1800 HV.

Покрытие: TiN (1 мкм, PVD, термостойкость 800°C, твердость 2400 HV).

Геометрия: отклонение резьбы $\leq \pm 0,003$ мм, Ra $\leq 0,05$ мкм, плотность 10 г/см³.

Процесс: шаровая мельница в течение 18 часов, CIP 300 МПа, SLM (пористость 8%), HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD TiN (250°C).

Параметры: напряжение 200 МПа, вибрация 20 г, крутящий момент 10 Нм.

тест:

Срок службы: $1,5 \times 10^7$ раз (нержавеющая сталь 2×10^6 раз, в 7,5 раз дольше).

Скорость износа: $< 0,02$ мм³/ч, коррозионная стойкость $< 0,01$ мм/год.

Удельная прочность: 210 МПа·см³/г, снижение массы 25%.

Усталостная прочность: 200 МПа, 10^7 раз, без поломок.

Выбор: WCCo+TiN +углеродное волокно, подходит для высокочастотной вибрации, регулярная проверка крутящего момента.

Преимущества: низкая плотность, высокая прочность, усталостная прочность, эффективность сборки повышена на 10%.

3.3 Твердый сплав кронштейна для снижения веса авиационного компонента (подвеска двигателя)

Условия: 500 МПа, вибрация 50 г, 200800°C, авиационное топливо, 10^6 циклов.

дизайн

Тип: Кронштейн (200×100×1,5 мм, тонкостенный).

Материал: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 мкм, Cr3C2 0,3 мас.%, TaC 0,2 мас.%), твердость 1900 HV.

Покрытие: Al₂O₃ (2 мкм, CVD, термостойкость 1000°C) + Au (0,5 мкм, PVD, проводимость $> 95\%$ IACS).

Геометрия: отклонение толщины стенки $\leq \pm 0,002$ мм, Ra $\leq 0,1$ мкм, плотность 11 г/см³.

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350 °C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, CVD Al₂O₃ (400 °C), PVD Au (200 °C).

Параметры: напряжение 500 МПа, вибрация 50 г, температура 800°C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тест:

Срок службы: 2×10^6 раз (титановый сплав 4×10^5 раз, в 5 раз дольше).

Скорость износа: $<0,01$ мм³/ч, коррозионная стойкость $<0,01$ мм/год.

Удельная прочность: 230 МПа·см³/г, снижение массы 20%.

Высокая термостойкость: 800°C, 500 часов, без окисления.

Выбор: WCCo+ Al₂O₃ +Au, подходит для высоких температур, высоких нагрузок и обычного неразрушающего контроля.

Преимущества: стойкость к высокотемпературной коррозии, высокая проводимость, КПД двигателя повышен на 10%.

Сравнение характеристик компонентов из цементированного карбида для снижения веса авиации

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Титановый сплав (Ti6Al4V)	Нержавеющая сталь (316L)
Твёрдость (HV)	1600 - 2000	300 - 400	200 - 300
Прочность на изгиб (ГПа)	1,8 - 2,5	0,9 - 1,2	0,5 - 0,8
Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})	10 - 15	40 - 60	50 - 70
Соотношение прочности и веса (МПа·см ³ /г)	>200	100 - 150	60 - 80
Плотность (г/см ³)	812	4.4	8.0
Износостойкость (мм ³ /ч)	<0,02	0.10.3	0.20.5
Коррозионная стойкость (мм/год, рН 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Температурная стойкость (°C)	>800	400 - 600	300 - 500
Усталостная прочность (раз, 500 МПа)	>10 ⁶	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵
Срок службы многократно (по сравнению с нержавеющей сталью)	35	двадцать три	1

из карбида вольфрама для снижения веса авиационных компонентов :

Снижение веса: пористый/тонкостенный, плотность 812 г/см³, снижение веса 2040%.

Высокая прочность: отношение прочности к весу >200 МПа·см³/г, лучше, чем у титанового сплава.

Износостойкость: подложка WC, износ $<0,02$ мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + Al₂O₃, устойчив к соляному туману/топливу, лучше, чем у нержавеющей стали.

Предложения по оптимизации для компонентов из цементированного карбида в авиации для снижения веса

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Выбор материала:

Соединитель крыла: WC10%Ni+Al₂O₃ + CNT, коррозионная стойкость и снижение веса на 30 %.

Крепеж: WC8%Co+TiN+углеродное волокно, устойчивое к усталости и на 25% менее весящее.

Кронштейн двигателя: WC8%Co+Al₂O₃ + Au, высокая термостойкость и электропроводность увеличены на 10%.

Добавки: Cr3C2 0,4 мас.%, TaC 0,3 мас.%, твердость увеличена на 5%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1350°C, 120 МПа, пористость <0,0003%, прочность увеличилась на 15%.

3D-печать: SLM, пористость 515%, снижение веса 2030%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), отклонение <±0,005 мм, Ra <0,05 мкм.

покрытие:

Al₂O₃ (2 мкм, CVD), высокая термостойкость увеличена на 15%.

TiN (1 мкм, PVD), износостойкость увеличена на 20%.

Au (0,5 мкм, PVD), проводимость увеличилась на 10%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры ±1°C, 10⁻⁶ Па.

Оборудование SLM: толщина слоя 30 - 50 мкм, отклонение пористости <±0,5%.

5-осевой ЧПУ: отклонение <±0,003 мм.

Адаптация к условиям труда:

Соединитель крыла: WCNi+ Al₂O₃, 300 МПа, от 55°C до 200°C, соляной туман.

Крепеж: WCCo+TiN, 200 МПа, от 40°C до 150°C, сухая среда.

Основа: WCCo+Al₂O₃ + Au, 500 МПа, 200 - 800°C, мазут.

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <2%).

Производительность: ASTM G65 (<0,02 мм³/ч), коррозионная стойкость (<0,01 мм/год), термостойкость (>800°C, <0,01 мг/см²).

Геометрия: КИМ (отклонение < ± 0,003 мм), лазерное сканирование (отклонение апертуры < ± 0,002 мм).

Окружающая среда: MILSTD810G (от 55°C до 800°C, 100 г, 10⁶ раз).

Механические: удельная прочность (>200 МПа·см³/г), усталостная прочность (>10⁶ раз).

Стандарты и спецификации

GB/T 183762014: Пористость <0,01%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 38502015: Отклонение плотности $< \pm 0,1 \text{ г/см}^3$.

GB/T 38512015: Прочность 1,8 - 2,5 ГПа.

GB/T 79972017: Твердость 1600 - 2000 HV.

ASTM G65: Скорость износа $< 0,02 \text{ мм}^3/\text{ч}$.

NACE MR0175: Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением.

MILSTD810G: Адаптивность к окружающей среде (вибрация, температура, коррозия).

AS9100: Управление качеством в аэрокосмической отрасли.

Детали из цементированного карбида, облегчающие авиацию, достигают высокой твердости (1600–2000 HV), износостойкости ($< 0,02 \text{ мм}^3/\text{ч}$), коррозионной стойкости ($< 0,01 \text{ мм/год}$), высокой термостойкости ($> 800 \text{ }^\circ\text{C}$) и высокого отношения прочности к весу ($> 200 \text{ МПа} \cdot \text{см}^3/\text{г}$) за счет оптимизации ультрамелкозернистого WC (0,1–0,4 мкм), связующей фазы Co/Ni (6–12 мас. %), пористой/тонкостенной структуры и покрытия PVD/CVD (TiN/Al₂O₃/Au, 13 мкм). Детали подходят для соединителей крыльев, крепежей и кронштейнов двигателя, с уменьшением веса на 20-40%, увеличением срока службы в 35 раз, Ra 0,05-0,2 мкм и повышением надежности на 15%. Оптимизация пористости, толщины покрытия и процесса SLM может снизить затраты, но проблемы заключаются в сверхточной обработке (увеличение затрат на 10%) и однородности пор (отклонение $< \pm 0,5\%$). Твердый сплав превосходит титановый сплав и нержавеющую сталь и соответствует строгим требованиям аэрокосмической промышленности (AS9100, MILSTD810G).

приложение:

Биомедицинские имплантаты из цементированного карбида

Биомедицинские имплантаты из цементированного карбида изготавливаются из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (85 - 92 мас. %) в сочетании с Co (6 - 10 мас. %) или Ni (6 - 12 мас. %) в качестве связующей фазы и производятся методом порошковой металлургии (шаровая мельница, СІР, спекание НІР). Они обладают высокой твердостью (1600 - 2000 HV), отличной износостойкостью (объем износа $<0,02 \text{ мм}^3 / \text{ч}$, ASTM G65), коррозионной стойкостью ($<0,01 \text{ мм/год}$, pH 68, содержит NaCl, белок), высокой биосовместимостью (ISO 109935, цитотоксичность $<5\%$) и усталостной прочностью ($>10^7$ раз, ISO 72064). Поверхность покрыта PVD/CVD покрытием (например, TiN, DLC, ZrN, 13 мкм, коэффициент трения $<0,2$) или биоактивным покрытием (например, гидроксиапатит, HA, 510 мкм) для повышения износостойкости, антибактериальности (уровень антибактериальности $>99\%$, ISO 22196) и интеграции костей (уровень интеграции костей $>80\%$, ISO 109936). Имплантаты используются в ортопедии (тазобедренные/коленные суставы, костные гвозди), стоматологии (имплантаты) и сердечно-сосудистой системе (стенты) и подвергаются высоким нагрузкам (500-2000 Н), коррозии под воздействием жидкостей организма и циклической усталости ($>10^7$ раз). Срок службы в 35 раз больше, чем у традиционных материалов (таких как титановые сплавы, сплавы CoCr, 300-600 HV), а шероховатость поверхности составляет Ra 0,050,2 мкм.

В данной статье на основе стандартов (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 10993, ISO 7206) приводятся рекомендации по производству, обработке, эксплуатационным характеристикам, применению и оптимизации биомедицинских имплантатов из цементированного карбида.

Характеристики цементированных карбидных биомедицинских имплантатов

Состав материалов биомедицинских имплантатов из цементированного карбида

Матрица:

Содержание WC: 85–92 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,10,4 мкм), твердость 1600–2000 HV.

Co: 6 - 10 мас. %, высокая ударная вязкость ($KIC 1015 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), сопротивление усталости увеличено на 10%.

Ni: 6–12 мас. % (опционально), коррозионно-стойкий (NaCl, белок $<0,01 \text{ мм/год}$), низкотоксичный (ISO 109935).

Добавки: TaC (0,10,3 мас. %), антиоксидантная способность увеличена на 10%; ZrC (0,20,5 мас. %), биосовместимость увеличена на 5%.

покрытие:

TiN (PVD): твердость 2000-2400 HV, термостойкость 800°C, износостойкость, высокая биосовместимость.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

DLC (PVD): твердость 2500-3000 HV, коэффициент трения <0,1, уровень антибактериальности >99%.

ZrN (PVD): твердость 2200-2600 HV, коррозионная стойкость, скорость интеграции кости увеличена на 15%.

ГА (плазменное напыление): толщина 510 мкм, степень интеграции в кость >80%, высокая биологическая активность.

Градиентная структура: низкое соотношение Co/Ni (68 мас. %) на поверхности, высокое соотношение Co/Ni (1012 мас. %) в сердцевине, повышение износостойкости на 20%, повышение трещиностойкости на 15%.

Модификация поверхности: Нанопористая структура (размер пор 50-200 нм), скорость прикрепления клеток увеличена на 30%.

1.2 Эксплуатационные параметры цементированных карбидных биомедицинских имплантатов

Твердость: 1600-2000 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 1,8 - 2,5 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 10 - 15 МПа·м^{1/2} (на основе Co 1215, на основе Ni 1012).

Износостойкость: Скорость износа <0,02 мм³/ч (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 68, <0,01 мм/год (ISO 1099310).

Усталостная прочность: >10⁷ раз (500-2000 Н, ISO 72064).

Биосовместимость: Цитотоксичность <5%, не вызывает сенсibilизации (ISO 109935).

Антибактериальные свойства: уровень антибактериальности >99% (DLC/ZrN, ISO 22196).

Остеоинтеграция: показатель остеоинтеграции >80% (HA, ISO 109936).

Коэффициент трения: <0,2 (покрытие), антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

Шероховатость поверхности: Ra 0,05 - 0,2 мкм, прикрепление клеток увеличено на 20%.

1.3 Преимущества цементированных карбидных биомедицинских имплантатов

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC+, износ <0,02 мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + DLC/ZrN, устойчив к жидкой коррозии, лучше, чем сплав CoCr.

Высокая биосовместимость: покрытие TiN/HA, нетоксично, уровень интеграции кости >80%.

Усталостная прочность: Высокая вязкость Co/Ni, выдерживает большие нагрузки (>10⁷ раз), лучше, чем титановые сплавы.

Антибактериальное: покрытие DLC/ZrN, уровень антибактериальности >99%, риск заражения снижен на 30%.

Процесс изготовления биомедицинских имплантатов из цементированного карбида

2.1 Приготовление порошка

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сырье: WC (D50 0,10,4 мкм, чистота >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 мкм), TaC/ZrC (D50 0,51 мкм).
Шаровая мельница: планетарная шаровая мельница (шары ZrO₂, 15:1), 400 об/мин, 1620 часов, отклонение размера частиц <±0,03 мкм, однородность >99%.

2.2 Формирование

Метод: Холодное изостатическое прессование (ХИП) или прецизионное формование.
Параметры: 250-300 МПа, выдержка под давлением 60 секунд, форма из вольфрамовой стали (отклонение <±0,02 мм), плотность заготовки 8,510,0 г/см³.
Результаты: Отклонение размеров <±0,03 мм, частота трещин <0,3%.

2.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.
параметр:
Депарафинизация: 200-500°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Па.
Спекание: 1350-1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Па, 22,5 часа.
Горячее изостатическое прессование: 1350°C, 120 МПа (Ar), 11,5 ч.
Результаты: Плотность 14,815,0 г/см³, пористость <0,0003%, твердость 1600-2000 HV.

2.4 Прецизионная обработка

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), 5000 об/мин, подача 0,003-0,01 мм/проход, геометрическое отклонение <±0,005 мм, Ra 0,05-0,2 мкм.
Электроэрозионная обработка: Электроискровая обработка, микроотверстие/паз (Ø 0,1-0,5 мм), отклонение <±0,003 мм.
Полировка: Алмазная полировальная паста (0,30,5 мкм), 1200 об/мин, Ra <0,05 мкм, прикрепление клеток увеличено на 15%.

2.5 Покрытие

Метод: PVD/CVD (мишень Ti/Zr/C, >99,99%) или плазменное напыление (НА).
Параметры: TiN /DLC/ ZrN (13 мкм), 10⁻⁵ Па, 200 - 400 °C, смещение 80 В, скорость осаждения 0,51 мкм/ч; НА (510 мкм), температура распыления 8000 °C, скорость 400 м/с.
Результаты: сила сцепления >80 Н, коэффициент трения <0,2, степень интеграции кости >80%.

2.6 Модификация поверхности

Методы: Лазерная микрообработка (длина волны 1064 нм) для создания нанопористых структур (размер пор 50-200 нм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Параметры: мощность 1020 Вт, частота 50 кГц, скорость сканирования 500 мм/с.

Результаты: Скорость прикрепления клеток увеличилась на 30%, а время интеграции кости сократилось на 20%.

2.7 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <2%).

Характеристики: Отклонение твердости <±30 HV (ISO 6508), износ <0,02 мм³/ч, коррозионная стойкость (<0,01 мм/год).

Геометрия: КИМ (отклонение < ± 0,003 мм), лазерное сканирование (отклонение поверхности < ± 0,002 мм).

Неразрушающий контроль: рентген (дефекты < 0,005 мм), ультразвуковой (трещины < 0,003 мм).

Биологические испытания: цитотоксичность <5% (ISO 109935), интеграция в костную ткань >80% (ISO 109936), уровень антибактериальной активности >99% (ISO 22196).

Механические испытания: сопротивление усталости >10⁷ раз (ISO 72064), прочность на сдвиг >20 МПа (ASTM F1044).

Сценарии применения биомедицинских имплантатов из цементированного карбида

Твердосплавные имплантаты предъявляют высокие требования к прочности и биосовместимости, рекомендации по процессу, испытаниям и выбору:

3.1 Биомедицинские имплантаты из цементированного карбида Тазобедренный эндопротез (вертлужная впадина/головка бедренной кости)

Условия: 1000-2000 Н, биологическая жидкость (рН 7,4), 10⁷ циклов, 37°C. дизайн

Тип: Вертлужная чашка (Ø 50 мм) + головка бедренной кости (Ø 28 мм).

Материал: WC10%Ni (D50 0,10,4 мкм, ZrC 0,5 мас. %), твердость 1800 HV.

Покрытие: DLC (2 мкм, PVD, коэффициент трения <0,1) + HA (5 мкм, плазменное напыление).

Геометрия: сферическое отклонение <±0,002 мм, Ra <0,05 мкм, апертура 100-200 нм.

Процессы: шаровая мельница 20 часов, СІР 300 МПа, НІР 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD DLC (250°C), плазменное напыление HA, лазерная микрообработка.

Параметры: нагрузка 1500 Н, частота колебаний 1 Гц, рН биологической жидкости 7,4.

тест:

Срок службы: 2×10⁷ раз (титановый сплав 5×10⁶ раз, в 4 раза дольше).

Скорость износа: <0,01 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Биосовместимость: цитотоксичность <3%, скорость интеграции в костную ткань >85%.

Антибактериальные свойства: уровень антибактериальности >99% (S. aureus), коэффициент трения <0,1.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Выбор: WCNi+DLC+HA, подходит для высоконагруженных биологических жидкостей и регулярных визуализационных исследований.

Преимущества: износостойкость и антибактериальность, прочная интеграция с костью и сокращение времени послеоперационного восстановления на 20%.

3.2 Цементированные карбидные биомедицинские имплантаты Дентальные имплантаты (корни зубов)

Условия: 500-1000 Н, слюна (рН 6,7), 10^7 жеваний, 37°C.

дизайн

Тип: Резьбовой имплантат (Ø 4 мм, длина 10 мм).

Материал: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 мкм, TaC 0,3 мас. %), твердость 1900 HV.

Покрытие: ZrN (2 мкм, PVD, твердость 2600 HV) + HA (5 мкм, плазменное напыление).

Геометрия: отклонение резьбы $\leq \pm 0,003$ мм, Ra $< 0,1$ мкм, апертюра 50150 нм.

Процессы: шаровая мельница 18 часов, СІР 300 МПа, НІР 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD ZrN (300°C), плазменное напыление HA, лазерная микрообработка.

Параметры: нагрузка 800 Н, частота жевания 2 Гц, рН слюны 6,5.

тест:

Срок службы: $1,5 \times 10^7$ раз (сплав CoCr 4×10^6 раз, в 3,8 раза дольше).

Скорость износа: $< 0,02$ мм³/ч, коррозионная стойкость $< 0,01$ мм/год.

Биосовместимость: цитотоксичность $< 4\%$, скорость интеграции в костную ткань $> 80\%$.

Антибактериальные свойства: уровень антибактериальной активности $> 99\%$ (P. gingivalis), показатель успешности имплантации увеличивается на 15%.

Выбор: WCCo+ZrN+HA, подходит для жевательной нагрузки и регулярного осмотра полости рта.

Преимущества: коррозионная стойкость, быстрая интеграция кости и повышение стабильности имплантата на 20%.

3.3 Цементированный карбидный биомедицинский имплантат сердечно-сосудистый стент

Условия: 100–200 Н, кровь (рН 7,4), 10^8 ударов сердца, 37 °C.

дизайн

Тип: Сетчатый стент (Ø 3 мм, длина 15 мм).

Материал: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 мкм, ZrC 0,5 мас. %), твердость 1700 HV.

Покрытие: TiN (1 мкм, PVD, твердость 2400 HV) + DLC (1 мкм, PVD).

Геометрия: отклонение ячеек $\leq \pm 0,002$ мм, Ra $< 0,05$ мкм, размер пор 50-100 нм.

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, СІР 300 МПа, НІР 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), EDM, PVD TiN+DLC (250°C), лазерная микрообработка.

Параметры: нагрузка 150 Н, частота пульсации 1 Гц, рН крови 7,4.

тест:

Срок службы: 3×10^8 раз (сплав CoCr 1×10^8 раз, в 3 раза дольше).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Скорость износа: <0,01 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Биосовместимость: Цитотоксичность <2%, частота тромбоза <1%.

Антибактериальные свойства: уровень антибактериальной активности >99% (E. coli), проходимость стента увеличивается на 20%.

Выбор: WCNi+TiN+DLC, подходит для среды крови и регулярных ультразвуковых исследований.

Преимущества: Противоусталостный, противотромбозный, снижение частоты сосудистых рестенозов на 15%.

Сравнение характеристик цементированных карбидных биомедицинских имплантатов

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Титановый сплав (Ti6Al4V)	сплав CoCr
Твёрдость (HV)	1600 - 2000	300 - 400	400 - 600
Прочность на изгиб (ГПа)	1,8 - 2,5	0,9 - 1,2	1,5 - 2,0
Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})	10 - 15	40 - 60	20 - 30
Износостойкость (мм ³ /ч)	<0,02	0.10.3	0.050.1
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 68)	<0,01	0,02 - 0,05	0,01 - 0,03
Усталостная прочность (раз, 2000 Н)	>10 ⁷	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁶ -- 10 ⁷
Биосовместимость (токсичность%)	<5	<5	<10
Остеоинтеграция (%)	>80	6070	50 - 60
Антибактериальные свойства(%)	>99	50 - 70	60 - 80
Срок службы кратный (относительно титанового сплава)	35	1	1.52

Основные характеристики цементированных карбидных биомедицинских имплантатов:

Износостойкость: подложка WC, износ <0,02 мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + DLC/ZrN, устойчив к жидкой коррозии, лучше, чем сплав CoCr.

Биосовместимость: покрытие TiN/HA, степень интеграции кости > 80%, лучше, чем у титанового сплава.

Антибактериальное: покрытие DLC/ZrN, уровень антибактериальности >99%, низкий риск инфицирования.

Рекомендации по оптимизации для цементированных карбидных биомедицинских имплантатов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Выбор материала:

Тазобедренный сустав: WC10%Ni+DLC+HA, износостойкость костной интеграции повышена на 20%.

Дентальный имплантат: WC8%Co+ZrN+HA, антикоррозионная стойкость и усиление сцепления с костью на 15%.

Сердечно-сосудистый стент: WC10%Ni+TiN+DLC, антитромботический эффект увеличен на 20%.

Добавки: ZrC 0,5 мас.%, TaC 0,3 мас.%, биосовместимость увеличена на 5%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1350°C, 120 МПа, пористость <0,0003%, износостойкость повышена на 15%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), отклонение $\leq \pm 0,005$ мм, Ra <0,05 мкм.

покрытие:

DLC (2 мкм, PVD), коэффициент трения снижен на 10%.

ZrN (2 мкм, PVD), антибактериальная активность увеличена на 15%.

ГА (5 мкм, плазменное напыление), скорость срачивания кости увеличилась на 20%.

Лазерная микрообработка: размер пор 50-200 нм, прикрепление клеток увеличено на 30%.

Оптимизация оборудования =

Печь для спекания: регулировка температуры $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Па.

5-осевой ЧПУ: отклонение $\leq \pm 0,003$ мм.

Оборудование для нанесения покрытий: скорость осаждения 0,51 мкм/ч, отклонение $\leq \pm 0,03$ мкм.

Адаптация к условиям труда:

Тазобедренный сустав: WCNi+DLC+HA, 1000-2000 Н, биологическая жидкость, 10^7 раз.

Дентальные имплантаты: WCCo+ZrN+HA, 500-1000 Н, слюна, 10^7 раз.

Сердечно-сосудистый стент: WCNi+TiN+DLC, 100-200 Н, кровь, 10^8 раз.

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <2%).

Производительность: ASTM G65 (<0,02 мм³/ч), коррозионная стойкость (<0,01 мм/год), усталостная прочность ($>10^7$ раз).

Биологические: ISO 109935 (токсичность <5%), ISO 109936 (остеоинтеграция >80%), ISO 22196 (уровень антибактериальности >99%).

Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,003$ мм), лазерное сканирование (отклонение поверхности $\leq \pm 0,002$ мм).

Стандарты и спецификации

GB/T 183762014: Пористость <0,01%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 38502015: Отклонение плотности $\leq \pm 0,1$ г/см³.

GB/T 38512015: Прочность 1,82,5 ГПа.

GB/T 79972017: Твердость 1600-2000 HV.

ASTM G65: Скорость износа $< 0,02$ мм³/ч.

ISO 109935: Биосовместимость (токсичность $< 5\%$).

ISO 109936: Испытания на остеоинтеграцию.

ISO 22196: Антимикробные свойства.

ISO 72064: Испытание на усталостную прочность.

Твердосплавные биомедицинские имплантаты достигают высокой твердости (1600-2000 HV), износостойкости ($< 0,02$ мм³/ч), коррозионной стойкости ($< 0,01$ мм/год), высокой биосовместимости (токсичность $< 5\%$) и усталостной прочности ($> 10^7$ раз) за счет оптимизации ультрамелкого зерна WC (0,10,4 мкм), фазы связывания Co/Ni (612 мас.%), покрытия PVD/CVD (TiN/DLC/ZrN, 13 мкм) и покрытия HA (510 мкм). Имплантаты подходят для тазобедренных суставов, зубных имплантатов и сердечно-сосудистых стентов, срок службы которых увеличен в 35 раз, Ra 0,050,2 мкм, скорость интеграции кости $> 80\%$ и риск инфицирования снижен на 30%. Оптимизация размера зерна, толщины покрытия и лазерной микрообработки может снизить затраты, но проблемы заключаются в сверхточной обработке (увеличение затрат на 10%) и долгосрочных испытаниях in vivo ($> 10^7$ раз). Твердый сплав превосходит титановый сплав и сплав CoCr и соответствует высоким требованиям надежности биомедицины (ISO 10993, ISO 7206).

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



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:

Интеллектуальная карбидная пресс-форма

Интеллектуальные формы из цементированного карбида изготавливаются из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (88-94 мас. %) в сочетании с Co (6 - 10 мас. %) или Ni (612 мас. %) в качестве связующей фазы и изготавливаются методом порошковой металлургии (шаровая мельница, CIP, спекание HIP). Они обладают высокой твердостью (1800-2200 HV), отличной износостойкостью (объем износа $<0,03 \text{ мм}^3/\text{ч}$, ASTM G65), коррозионной стойкостью ($<0,01 \text{ мм/год}$, pH 212, содержит HCl, SO_4^{2-}) и высокой термостойкостью ($>1000^\circ\text{C}$, антиокислительная). Поверхность покрыта PVD/CVD покрытием (например, TiAlN, AlCrN, DLC, 25 мкм, коэффициент трения $<0,15$) для улучшения противоизносных и антиадгезионных свойств, а также встроенными интеллектуальными датчиками (MEMS, тензодатчиками) для достижения мониторинга в реальном времени (температура $\pm 0,5^\circ\text{C}$, давление $\pm 0,1 \text{ МПа}$, деформация $\pm 1 \text{ мк}$). Форма используется в интеллектуальном производстве (например, автомобилестроение, авиация, электроника) и подвергается высоким нагрузкам (100-500 МПа), высоким температурам (600-1200 $^\circ\text{C}$) и циклическому тепловому удару (ΔT 500-800 $^\circ\text{C}$). 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, ISO 17879, ISO 9001) приводятся рекомендации по технологии, производительности, применению и оптимизации интеллектуальных форм из цементированного карбида.

Характеристики интеллектуальной пресс-формы из цементированного карбида

1.1 Состав материала интеллектуальной пресс-формы из цементированного карбида

Матрица:

WC: 88-94 мас.%, ультрамелкое зерно (D50 0,2 - 0,5 мкм), твердость 1800-2200 HV.
Co: 6-10 мас.%, высокая прочность ($\text{KIC } 1520 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), износостойкость повышена на 10%.
Ni: 6-12 мас. % (опционально), коррозионная стойкость (HCl, SO_4^{2-} $<0,01 \text{ мм/год}$), ударопрочность ($\text{KIC } 1215 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).
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%.

покрытие:

TiAlN (PVD/CVD): твердость 2800–3200 HV, термостойкость 10–50 $^\circ\text{C}$, износостойкость при высоких температурах.
AlCrN (PVD): твердость 3000-3400 HV, термостойкость 1100 $^\circ\text{C}$, стойкость к окислению.
DLC (PVD): твердость 2500-3000 HV, коэффициент трения $<0,1$, термостойкость 600 $^\circ\text{C}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

антиадгезионный.

Градиентная структура: низкое содержание Co/Ni (6-8 мас. %) на поверхности, высокое содержание Co/Ni (10-12 мас. %) в сердцевине, повышение износостойкости на 25%, повышение трещиностойкости на 20%.

Интеллектуальные компоненты: МЭМС (на основе кремния, <0,5 мм) или тензодатчики (NiCr, толщиной 0,01 мм), контролирующие температуру, давление, деформацию, погрешность <±0,5%.

1.2 Параметры производительности интеллектуальной пресс-формы из цементированного карбида

Твердость: 1800-2200 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 2,0-2,8 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 12-20 МПа·м^{1/2} (на основе Co 1520, на основе Ni 1215).

Износостойкость: Скорость износа <0,03 мм³/ч (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 2-12, <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%.

Шероховатость поверхности: Ra 0,1-0,3 мкм, эффективность извлечения из формы увеличивается на 15%.

Точность контроля: температура ±0,5°C, давление ±0,1 МПа, деформация ±1 мкЭ (IEC 60751).

1.3 Преимущества интеллектуальных форм из цементированного карбида

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC+, срок службы увеличен в 35 раз, затраты на обслуживание снижены на 30%.

Высокая термостойкость: покрытие TiAlN / AlCrN, антиокислительное, подходит для высокотемпературного формования (600-1200°C).

Коррозионная стойкость: на основе никеля + DLC, устойчив к кислотам, щелочам и расплавам, подходит для электроники/лития стекла.

Интеллектуальный мониторинг: МЭМС/тензометры, обратная связь в реальном времени об условиях работы, эффективность оптимизации повышена на 20%.

Высокая точность: антифрикционное покрытие + прецизионная обработка, отклонение формовки <±0,005 мм, повышение качества на 15%.

2. Интеллектуальный процесс изготовления пресс-форм из цементированного карбида

2.1 Приготовление порошка

Сырье: WC (D50 0,2-0,5 мкм, чистота>99,95%), Co/Ni (D50 1-2 мкм), Cr3C2/TaC (D50 0,51 мкм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Шаровое измельчение: планетарная шаровая мельница (шары ZrO_2 , 12:1), 350 об/мин, 18-22 часа, отклонение размера частиц $\leq \pm 0,05$ 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 (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 H_2 ($O_2 < 3$ 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 15,0-15,2 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 0,10,3 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: $TiAlN$ / $AlCrN$ /DLC (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 600-1100°C.

2.6 Интеллектуальная интеграция

Датчик: MEMS (температура, давление, $< 0,5$ мм) или тензодатчик ($NiCr$, 0,01 мм), погрешность $\leq \pm 0,5\%$.

Упаковка: Лазерная сварка (Ti оболочка, герметичность $< 10^{-8}$ Па·м³/с), термостойкость 1000°C, вибростойкость 50 г.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Передача данных: встроенный чип (5G/Bluetooth, задержка <5 мс, энергопотребление <30 мВт), поддержка протоколов IIoT (OPC UA, MQTT).

2.7 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,2-0,5 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <3%).

Характеристики: Отклонение твердости <±40 HV (ISO 6508), износ <0,03 мм³/ч, коррозионная стойкость (<0,01 мм/год).

Геометрия: КИМ (отклонение < ± 0,005 мм), лазерное сканирование (отклонение полости < ± 0,003 мм).

Неразрушающий контроль: рентген (дефекты < 0,01 мм), ультразвуковой (трещины < 0,005 мм).

Интеллектуальное тестирование: температура (±0,5°C, IEC 60751), давление (±0,1 МПа, IEC 61298), деформация (±1 мкЭ, ASTM E251).

Испытания на воздействие окружающей среды: термический удар (ΔT 800°C, >10⁵ циклов, ISO 17879), соляной туман (1000 часов, ISO 9227).

3. Сценарии применения интеллектуальных форм из цементированного карбида

В ответ на высокие требования к точности и надежности интеллектуального производства интеллектуальные формы из цементированного карбида предоставляют рекомендации по процессу, испытаниям и выбору:

3.1 Интеллектуальный штамп из цементированного карбида для автомобильной горячейковки (коленчатый вал)

Условия работы: 1000-1200°C, 300 МПа, циклический термоудар (ΔT 800°C), 10⁵ формовок. дизайн

Тип: Кузнечный штамп (полость 100×50 мм).

Материал: WC10%Co (D50 0,2-0,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас.%, TaC 0,3 мас.%), твердость 2000-2200 HV.

Покрытие: AlCrN (5 мкм, PVD, твердость 3400 HV, термостойкость 1100°C).

Интеллектуальные компоненты: МЭМС (температура ±0,5°C, давление ±0,1 МПа), встроенные в полость.

Геометрия: Радиус полости R2 мм, Ra <0,2 мкм, отклонение <±0,01 мм.

Процесс: шаровая мельница 22 часа, CIP 350 МПа, HIP 1400°C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование, PVD AlCrN (450°C), лазерная сварка MEMS.

Параметры: температура 1100°C, давление 300 МПа, циклы 5000 раз, частота дискретизации 1 кГц.

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.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Термическая трещина: Трещин нет (ΔT 800°C, 5000 раз).

Точность контроля: температура $\pm 0,5^\circ\text{C}$, давление $\pm 0,1$ МПа, прогнозируемый темп обслуживания увеличен на 20%.

Выбор: WCCo+AlCrN+MEMS, подходит для высоких температур и высоких нагрузок, регулярных неразрушающих испытаний.

Преимущества: износостойкость при высоких температурах, интеллектуальный мониторинг, эффективность формования повышена на 15%.

3.2 Интеллектуальная форма из цементированного карбида. Авиационная литейная форма (лопатка турбины)

Условия работы: 700-800°C, 150 МПа, циклический термоудар (ΔT 500°C), 10^6 формовок. дизайн

Тип: Форма для литья под давлением (полость 200×100 мм).

Материал: WC8%Co (D50 0,2-0,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 2000-2200 HV.

Покрытие: TiAlN (4 мкм, PVD, твердость 3200 HV, термостойкость 1050°C).

Интеллектуальные компоненты: тензодатчики (деформация ± 1 мкЭ), встроенные в поверхность формы.

Геометрия: Наклон полости 1° , Ra < 0,1 мкм, отклонение $\leq \pm 0,005$ мм.

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, HIP 350 МПа, HIP 1400°C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование, PVD TiAlN (400°C), монтаж тензодатчика.

Параметры: температура 750°C, давление 150 МПа, цикл 10000 раз, частота дискретизации 500 Гц.

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).

Точность контроля: деформация ± 1 мкЭ, частота обнаружения дефектов увеличена на 15%.

Выберите тип: WCCo+TiAlN +тензометр, подходит для высокотемпературного расплава, регулярной очистки.

Преимущества: антиадгезия, интеллектуальная обратная связь, качество литья повышено на 10%.

3.3 Интеллектуальная форма для электронного стекла из твердого сплава (экран мобильного телефона)

Условия эксплуатации: 1000-1100°C, 50 МПа, коррозионная (pH 24), 10^5 формовочных масс. дизайн

Тип: Литой под давлением ($\varnothing$ 50 мм, изогнутый).

Материал: WC10%Ni (D50 0,2-0,5 мкм, Cr3C2 0,6 мас. %), твердость 2000-2200 HV.

Покрытие: DLC (3 мкм, PVD, коэффициент трения < 0,1, термостойкость 600°C).

Умные компоненты: MEMS (температура $\pm 0,5^\circ\text{C}$), встроенные в ядро формы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Геометрия: Отклонение поверхности $<\pm 0,003$ мм, Ra $<0,1$ мкм.

Процесс: шаровая мельница 22 часа, CIP 350 МПа, HIP 1400°C (150 МПа, 2 часа), 5-осевое шлифование, PVD DLC (300°C), лазерная сварка MEMS.

Параметры: температура 1050°C, давление 50 МПа, циклы 2000 раз, частота дискретизации 2 кГц.

тест:

Срок службы: 8000 раз (сталь H13 1500 раз, в 5,3 раза дольше).

Скорость износа: $<0,03$ мм³/ч, коррозионная стойкость $<0,01$ мм/год.

Антиадгезия: Остаток стекла $<1\%$, Ra 0,1 мкм.

Точность контроля: температура $\pm 0,5^\circ\text{C}$, стабильность качества повышена на 20%.

Выберите тип: WCNi+DLC+MEMS, подходит для коррозионно-активных высоких температур, регулярной очистки.

Преимущества: коррозионная стойкость, интеллектуальный мониторинг, высокая точность формования.

Сравнение производительности интеллектуальных 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)	2.0 - 2.8	1,5 - 2,0	0,5 - 1,0
Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})	12-20	20-30	35
Износостойкость (мм ³ /ч)	$<0,03$	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 212)	$<0,01$	0,05 - 0,1	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	10^2 - 10^3 раз
Продолжительность жизни кратная (относительно H13)	35	1	1.52
Коэффициент трения (покрытие)	$<0,15$	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4
Точность мониторинга	$\pm 0,5\%$	никто	никто

Основные характеристики интеллектуальной пресс-формы из цементированного карбида:

Износостойкость: подложка WC, износ $<0,03$ мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз.

Высокая термостойкость: покрытие TiAlN / AlCrN, антиокислительное, подходит для температуры 1200°C.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + DLC, устойчива к расплавленному стеклу, лучше, чем сталь H13.

Интеллект: МЭМС/тензометр, мониторинг в реальном времени, повышение эффективности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на 20%.

Предложения по оптимизации для интеллектуальных форм из цементированного карбида

Выбор материала:

Горячая штамповка автомобилей: WC10%Co+AlCrN, износостойкость при высоких температурах увеличена на 15%.

Литье под давлением в авиации: WC8%Co+TiAlN, антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

Электронное стекло: WC10%Ni+DLC, коррозионная стойкость повышена 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 $\leq \pm 0,01$ 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%.

DLC (3 мкм, 300°C), антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

Электроэрозионная обработка: отклонение полости $\leq \pm 0,003$ мм, точность увеличена на 5%.

Умная интеграция:

Датчики: MEMS (температура, давление), тензодатчик (деформация), погрешность $\leq \pm 0,5\%$.

Обработка данных: встроенные чипы, поддержка IoT, скорость предиктивного обслуживания увеличилась на 20%.

Упаковка: титановый корпус, герметичность $< 10^{-8}$ Па·м³/с, вибростойкость 50 г.

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 покрытий: скорость осаждения 11,5 мкм/ч, отклонение $\leq \pm 0,05$ мкм.

Адаптация к условиям труда:

Горячая штамповка автомобилей: WCCo+AlCrN, 1000-1200°C, 300-500 МПа.

Авиационное литье под давлением: WCCo+TiAlN, 700-800°C, 100-200 МПа.

Электронное стекло: WCNi+DLC, 1000-1100°C, 50-100 МПа.

Тестирование и проверка:

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

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,2-0,5 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <3%).
Производительность: ASTM G65 (<0,03 мм³/ч), коррозионная стойкость (<0,01 мм/год), термостойкость (>1000°C, <0,01 мг/см²).
Геометрия: КИМ (отклонение < ± 0,005 мм), лазерное сканирование (отклонение полости < ± 0,003 мм).
Smart: IEC 60751 (температура ±0,5°C), IEC 61298 (давление ±0,1 МПа), ASTM E251 (деформация ±1 мкЭ).
Окружающая среда: ISO 17879 (термический удар, >10⁵ раз), ISO 9227 (соляной туман, 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 79972017: Твердость 1800-2200 HV.
ASTM G65: Скорость износа <0,03 мм³/ч.
NACE MR0175: Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением.
ISO 17879: Испытание на термический удар.
ISO 9001: Управление качеством.
IEC 60751: Точность датчиков температуры.
IEC 61298: Точность датчиков давления.

Благодаря оптимизации сверхмелкого зерна WC (0,2-0,5 мкм), связующей фазы Co/Ni (612 мас. %), покрытия PVD/CVD (TiAlN/AlCrN/DLC, 25 мкм) и интеграции MEMS/тензометра, интеллектуальная пресс-форма из цементированного карбида достигает высокой твердости (1800-2200 HV), износостойкости (<0,03 мм³/ч), коррозионной стойкости (<0,01 мм/год), высокой термостойкости (>1000 °C) и высокоточного контроля (погрешность <±0,5%). Пресс-форма подходит для горячей штамповки в автомобильной промышленности, литья под давлением в авиации и формования электронного стекла, при этом срок службы увеличен в 35 раз, Ra 0,1-0,3 мкм и эффективность производства увеличена на 1520%. Оптимизация размера зерна, толщины покрытия и интеллектуальная интеграция могут снизить затраты, но проблема заключается в высокоточной обработке (увеличение затрат на 15%) и долговечности датчика (>10⁵ раз). Карбидные интеллектуальные формы превосходят стальные и керамические формы H13 и соответствуют высоким требованиям надежности интеллектуального производства (ISO 9001).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

Детали робота из карбида

Детали роботов из цементированного карбида изготавливаются из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (85 - 92 мас. %) в сочетании с Co (6 - 10 мас. %) или Ni (6 - 12 мас. %) в качестве связующей фазы и изготавливаются методом порошковой металлургии (шаровая мельница, CIP, спекание HIP). Они обладают высокой твердостью (1600 - 2000 HV), отличной износостойкостью (потеря износа $<0,02 \text{ мм}^3 / \text{ч}$, ASTM G65), коррозионной стойкостью ($<0,01 \text{ мм/год}$, pH 212, содержит HCl, SO_4^{2-}), высокой термостойкостью ($>800^\circ\text{C}$, стойкость к окислению) и ударопрочностью ($>10^6$ раз, ISO 1791). Покрытие PVD/CVD (например, TiN, DLC, AlCrN, 13 мкм, коэффициент трения $<0,2$) используется на поверхности для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и низкого трения. Компоненты используются в промышленных роботах (соединения, захваты, шестерни), сервисных роботах (корпуса, детали трансмиссии) и специальных роботах (глубоководные, аэрокосмические) и подвергаются высоким нагрузкам (100–1000 Н), высокочастотным движениям ($10^5 - 10^7$ циклов) и экстремальным условиям (от 40°C до 800°C , соляной туман, песок и пыль). Срок службы в 510 раз больше, чем у традиционных материалов (например, нержавеющей стали, алюминиевого сплава, 200–600 HV), а шероховатость поверхности составляет Ra 0,05–0,2 мкм.

В данной статье на основе стандартов (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 1791, ISO 9001) приводятся рекомендации по проектированию, процессу, производительности, применению и оптимизации компонентов робототехники из цементированного карбида.

1. Характеристики деталей роботов-машин из твердого сплава

1.1 Состав материала деталей робототехнических машин из карбида

Матрица:

Содержание WC: 85–92 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,1–0,4 мкм), твердость 1600–2000 HV.

Co: 6 - 10 мас. %, высокая ударная вязкость ($K_{IC} 1015 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), ударопрочность повышена на 10%.

Ni: 612 мас. % (опционально), коррозионная стойкость (HCl, $\text{SO}_4^{2-} <0,01 \text{ мм/год}$), стойкость к высокотемпературному окислению.

Добавки: Cr3C2 (0,2–0,5 мас. %), подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 5%; TaC (0,1–0,3 мас. %), увеличивает антиоксидантные свойства на 10%.

покрытие:

TiN (PVD): твердость 2000 - 2400 HV, термостойкость 800°C , износостойкость.

DLC (PVD): твердость 2500 - 3000 HV, коэффициент трения $<0,1$, термостойкость 600°C , антиадгезионный.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

AlCrN (PVD): твердость 3000 - 3400 HV, термостойкость 1100°C, коррозионная стойкость.
Градиентная структура: низкое содержание Co/Ni на поверхности (6–8 мас. %), высокое содержание Co/Ni в сердцевине (10–12 мас. %), повышение износостойкости на 20%, повышение трещиностойкости на 15%.

1.2 Параметры производительности деталей робототехнических станков из твердого сплава

Твердость: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).
Прочность на изгиб: 1,8 - 2,5 ГПа (GB/T 38512015).
Вязкость разрушения: 1015 МПа·м^{1/2} (на основе Co 1215, на основе Ni 1012).
Износостойкость: Скорость износа <0,02 мм³/ч (ASTM G65).
Коррозионная стойкость: pH 212, <0,01 мм/год (NACE MR0175).
Высокая термостойкость: >800°C, стойкость к окислению (<0,01 мг/см², 500 часов).
Ударопрочность: >10⁶ раз (ISO 1791, нагрузка 100 Н).
Коэффициент трения: <0,2 (покрытие), антиадгезионные свойства увеличены на 25%.
Шероховатость поверхности: Ra 0,05 - 0,2 мкм, устойчивость движения увеличена на 20%.

1.3 Преимущества деталей роботов из карбида

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC+, срок службы увеличен в 510 раз, потребность в обслуживании снижена на 30%.
Коррозионная стойкость: на основе Ni + DLC/AlCrN, устойчив к воздействию солевого тумана/химикатов, подходит для использования в морской/химической среде.
Высокая термостойкость: покрытие AlCrN, антиокислительное, подходит для эксплуатации при высоких температурах (800°C, сварочный робот).
Ударопрочность: Высокая прочность Co/Ni, выдерживает высокочастотные движения (>10⁶ раз), лучше, чем алюминиевый сплав.
Низкое трение: покрытие DLC/TiN, коэффициент трения <0,2, эффективность движения увеличена на 15%.

2. Процесс изготовления деталей робототехнических станков из твердого сплава

2.1 Приготовление порошка

Сырье: WC (D50 0,1 - 0,4 мкм, чистота >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 мкм), Cr3C2/TaC (D50 0,51 мкм).
Шаровая мельница: планетарная шаровая мельница (шары ZrO2, 15:1), 400 об/мин, 1620 часов, отклонение размера частиц ≤±0,03 мкм, однородность >99%.

2.2 Формирование

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Метод: Холодное изостатическое прессование (ХИП) или прецизионное формование.
Параметры: 250 - 300 МПа, выдержка под давлением 60 секунд, форма из вольфрамовой стали (отклонение $< \pm 0,02$ мм), плотность заготовки 8,5 - 10,0 г/см³.
Результаты: Отклонение размеров $< \pm 0,03$ мм, частота трещин $< 0,3\%$.

2.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.
параметр:
Депарафинизация: 200 - 500°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Па.
Спекание: 1350 - 1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Па, 22,5 часа.
Горячее изостатическое прессование: 1350°C, 120 МПа (Ar), 11,5 часов.
Результаты: Плотность 14,8 - 15,0 г/см³, пористость $< 0,0003\%$, твердость 1600 - 2000 HV.

2.4 Прецизионная обработка

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), 5000 об/мин, подача 0,003 - 0,01 мм/проход, геометрическое отклонение $\leq \pm 0,005$ мм, Ra 0,05-0,2 мкм.
Электроэрозионная обработка: Электроэрозионная обработка, прорезь/отверстие ($\varnothing$ 0,21 мм), отклонение $\leq \pm 0,003$ мм.
Полировка: Алмазная полировальная паста (0,30,5 мкм), 1200 об/мин, Ra $< 0,05$ мкм, коэффициент трения снижен на 10%.

2.5 Покрытие

Метод: PVD/CVD (мишень Ti/Cr/Al, $> 99,99\%$).
Параметры: TiN /DLC/ AlCrN (13 мкм), 10^{-5} Па, 200400°C, смещение 80 В, скорость осаждения 0,51 мкм/ч.
Результаты: Адгезия > 80 Н, коэффициент трения $< 0,2$, термостойкость 600 - 1100°C.

2.6 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен $< 2\%$).
Характеристики: Отклонение твердости $< \pm 30$ HV (ISO 6508), износ $< 0,02$ мм³/ч, коррозионная стойкость ($< 0,01$ мм/год).
Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,003$ мм), лазерное сканирование (отклонение паза $< \pm 0,002$ мм).
Неразрушающий контроль: рентген (дефекты $< 0,005$ мм), ультразвуковой (трещины $< 0,003$ мм).
Испытания на воздействие окружающей среды: ISO 9227 (соляной туман, 1000 часов), ISO 1791 (удар, $> 10^6$ раз).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Сценарии применения деталей робототехнических станков из твердого сплава

Компоненты робота из карбида содержат рекомендации по процессу, испытаниям и выбору для высоких нагрузок, высокочастотного движения и экстремальных условий:

3.1 Детали робототехнических станков из карбида Соединения промышленных роботов (сварочные роботы)

Условия эксплуатации: 800°C, нагрузка 500 Н, 10^6 оборотов, сухая среда.

дизайн

Тип: Шарнирный ($\varnothing$ 20 мм, толщина 5 мм).

Материал: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 мкм, Cr3C2 0,3 мас.%, TaC 0,2 мас.%), твердость 1900 HV.

Покрытие: AlCrN (2 мкм, PVD, термостойкость 1100°C, твердость 3400 HV).

Геометрия: круглость $<\pm 0,002$ мм, Ra $<0,1$ мкм.

Процесс: шаровая мельница 20 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD AlCrN (400°C).

Параметры: нагрузка 500 Н, скорость вращения 100 об/мин, температура 800°C.

тест:

Срок службы: 2×10^6 раз (3×10^5 раз для нержавеющей стали, в 6,7 раз больше).

Скорость износа: $<0,01$ мм³/ч, коэффициент трения $<0,15$.

Высокая термостойкость: 800°C, 500 часов, без окисления.

Ударопрочность: 500 Н, 10^6 раз, без трещин.

Выбор: WCCo+AlCrN, подходит для высоких температур и нагрузок, регулярных неразрушающих испытаний.

Преимущества: Устойчивость к износу при высоких температурах, устойчивость движения увеличена на 20%.

3.2 Детали робота для станков с карбидным сплавом Захватное устройство сервисного робота (логистический робот)

Условия: от 20°C до 60°C, нагрузка 200 Н, 10^7 обхватов, влажная среда (85% относительной влажности).

дизайн

Тип: Зубья захвата (10×5 мм, толщина 2 мм).

Материал: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 мкм, Cr3C2 0,4 мас. %), твердость 1700 HV.

Покрытие: DLC (1,5 мкм, PVD, коэффициент трения $<0,1$, термостойкость 600°C).

Геометрия: Отклонение вершины зуба $<\pm 0,003$ мм, Ra $<0,05$ мкм.

Процесс: шаровая мельница 18 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), EDM, PVD DLC (250°C).

Параметры: нагрузка 200 Н, частота захвата 1 Гц, влажность 85% RH.

тест:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Срок службы: $1,5 \times 10^7$ раз (2×10^6 раз для алюминиевого сплава, в 7,5 раз больше).
Скорость износа: $<0,02$ мм³/ч, коррозионная стойкость $<0,01$ мм/год.
Антиадгезия: частота отказов при схватывании $<1\%$, коэффициент трения $<0,1$.
Влагостойкость: 85% относительной влажности, 1000 часов, без коррозии.
Выбор: WCNi+DLC, подходит для частой уборки во влажной среде, регулярной чистки.
Преимущества: низкое трение, коррозионная стойкость, повышение эффективности захвата на 15%.

3.3 Детали робота из карбидного станка Специальные шестерни робота (глубоководного робота)

Условия: от 40°C до 100°C, нагрузка 1000 Н, 10^6 циклов, морская вода (pH 8).
дизайн
Тип: Цилиндрическая шестерня (Ø 30 мм, модуль 2).
Материал: WC8%Ni (D50 0,1 - 0,4 мкм, Cr3C2 0,4 мас.%, TaC 0,3 мас.%), твердость 1800 HV.
Покрытие: TiN (2 мкм, PVD, термостойкость 800°C, твердость 2400 HV).
Геометрия: Отклонение профиля зуба $\leq \pm 0,002$ мм, Ra $<0,1$ мкм.
Процесс: шаровая мельница 20 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD TiN (300°C).
Параметры: нагрузка 1000 Н, скорость вращения 50 об/мин, давление 100 МПа.
тест:
Срок службы: 2×10^6 раз (нержавеющая сталь 4×10^5 раз, в 5 раз дольше).
Скорость износа: $<0,01$ мм³/ч, коррозионная стойкость $<0,01$ мм/год.
Устойчивость к морской воде: pH 8, 1000 часов, отсутствие коррозии.
Ударопрочность: 1000 Н, 10^6 раз, без поломок.
Выбор: WCNi+TiN, подходит для глубоководных условий высокого давления, обычного неразрушающего контроля.
Преимущества: устойчивость к коррозии и износу, повышение стабильности трансмиссии на 20%.

Сравнение производительности деталей робототехнических станков из карбида

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Нержавеющая сталь (316L)	Алюминиевый сплав (7075)
Твёрдость (HV)	1600 - 2000	200 - 300	150 - 200
Прочность на изгиб (ГПа)	1,8 - 2,5	0,5 -- 0,8	0.50.7
Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})	10 - 15	50 - 70	20 - 30
Износостойкость (мм ³ /ч)	$<0,02$	0.20.5	0.30.6
Коррозионная стойкость (мм/год)	$<0,01$	0,05 - 0,1	0,1 - 0,2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Нержавеющая сталь (316L)	Алюминиевый сплав (7075)
pH 212)			
Температурная стойкость (°C)	>800	300 - 500	100 - 200
Ударопрочность (раз, 100 Н)	>10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵	10 ³ - 10 ⁴
Срок службы кратный (по отношению к алюминиевому сплаву)	5 - 10	двадцать три	1
Коэффициент трения (покрытие)	<0,2	0,3 - 0,5	0,4 - 0,6

Основные характеристики деталей роботизированных станков с карбидным сплавом :

Износостойкость: подложка WC, износ <0,02 мм³/ч, срок службы увеличен в 510 раз.

Коррозионная стойкость: на основе Ni + DLC/TiN, устойчив к морской воде/солевым брызгам, лучше, чем у нержавеющей стали.

Высокая термостойкость: покрытие AlCrN, антиокислительное, лучше, чем у алюминиевого сплава.

Низкое трение: покрытие DLC, коэффициент трения <0,1, высокая эффективность движения.

5. Предложения по оптимизации деталей роботов из твердосплавных станков

Выбор материала:

Сварное соединение: WC8%Co+AlCrN, износостойкость при высоких температурах повышена на 15%.

Логистический захват: WC10%Ni+DLC, антиадгезионные свойства увеличены на 20%.

Глубоководное снаряжение: WC8%Ni+TiN, коррозионная стойкость повышена на 15%.

Добавки: Cr3C2 0,4 мас.%, TaC 0,3 мас.%, твердость увеличена на 5%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1350°C, 120 МПа, пористость <0,0003%, износостойкость повышена на 15%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), отклонение <±0,005 мм, Ra <0,05 мкм.

покрытие:

AlCrN (2 мкм, PVD), устойчивость к высоким температурам увеличена на 15%.

DLC (1,5 мкм, PVD), коэффициент трения снижен на 10%.

TiN (2 мкм, PVD), коррозионная стойкость увеличена на 20%.

Электроэрозионная обработка: отклонение паза <±0,002 мм, точность увеличена на 5%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры ±1°C, 10⁻⁶ Па.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5-осевой ЧПУ: отклонение $\leq \pm 0,003$ мм.

Оборудование для нанесения покрытий: скорость осаждения 0,51 мкм/ч, отклонение $\leq \pm 0,03$ мкм.

Адаптация к условиям труда:

Сварочный робот: WCCo+AlCrN, 800°C, 500 Н, сухая среда.

Логистический робот: WCNi+DLC, от 20°C до 60°C, 200 Н, влажная среда.

Глубоководной робот: WCNi+TiN, 40°C - 100°C, 1000 Н, морская вода.

6. Проверка и верификация деталей робота-станка из твердого сплава:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен $< 2\%$).

Производительность: ASTM G65 ($< 0,02$ мм³/ч), коррозионная стойкость ($< 0,01$ мм/год), термостойкость ($> 800^\circ\text{C}$, $< 0,01$ мг/см²).

Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,003$ мм), лазерное сканирование (отклонение паза $< \pm 0,002$ мм).

Окружающая среда: ISO 9227 (соляной туман, 1000 часов), ISO 1791 (удар, $> 10^6$ раз).

Стандарты и спецификации для деталей робототехнических станков из карбида вольфрама

GB/T 183762014: Пористость $< 0,01\%$.

GB/T 38502015: Отклонение плотности $\leq \pm 0,1$ г/см³.

GB/T 38512015: Прочность 1,8 - 2,5 ГПа.

GB/T 79972017: Твердость 1600 - 2000 HV.

ASTM G65: Скорость износа $< 0,02$ мм³/ч.

NACE MR0175: Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением.

ISO 1791: Испытание на удар.

ISO 9001: Управление качеством.

Благодаря оптимизации ультрамелкого зерна WC (0,1 - 0,4 мкм), связующей фазы Co/Ni (6 - 12 мас. %) и покрытия PVD/CVD (TiN/DLC/AlCrN, 13 мкм) детали роботов из цементированного карбида достигают высокой твердости (1600 - 2000 HV), износостойкости ($< 0,02$ мм³ / ч), коррозионной стойкости ($< 0,01$ мм/год), высокой термостойкости ($> 800^\circ\text{C}$) и ударопрочности ($> 10^6$ раз). Детали подходят для соединений промышленных роботов, захватов сервисных роботов и специальных передач роботов со сроком службы 510 раз, Ra 0,05 - 0,2 мкм и повышением эффективности движения на 15%. Оптимизация размера зерна, толщины покрытия и точности электроэрозионной обработки может снизить затраты, но проблемы заключаются в сверхточной обработке (увеличение затрат на 10%) и экстремальных испытаниях окружающей среды ($> 10^6$ раз). Твердый сплав превосходит нержавеющую сталь и алюминиевый сплав и соответствует высоким требованиям надежности роботов (ISO 9001).

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



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:

Карбидный авиационный датчик

Авиационные датчики из цементированного карбида изготавливаются из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (85 - 92 мас. %) в сочетании с Co (6 - 10 мас. %) или Ni (6 - 12 мас. %) в качестве связующей фазы и изготавливаются методом порошковой металлургии (шаровая мельница, СІР, спекание НІР). Они обладают высокой твердостью (1600 - 2000 HV), превосходной износостойкостью (объем износа $<0,02 \text{ мм}^3 / \text{ч}$, ASTM G65), коррозионной стойкостью ($<0,01 \text{ мм/год}$, pH 212, содержит HCl, SO_4^{2-}), высокой термостойкостью ($>800^\circ\text{C}$, антиокислительная) и вибростойкостью ($>10^6$ раз, MILSTD810G). Поверхность покрыта покрытием PVD/CVD (например, TiN, Al_2O_3 , 13 мкм, коэффициент трения $<0,2$) или функциональным покрытием (Au, Ag, 0,52 мкм, проводимость $>90\%$ IACS) для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и электрических свойств. Датчик используется в аэрокосмических областях (например, мониторинг двигателей, управление полетом, мониторинг состояния конструкций), выдерживает экстремальные условия (от 55°C до 800°C , вибрация 10100 g , $10^5 10^7$ циклов), обеспечивает высокоточные данные (погрешность $<\pm 0,5\%$) и имеет срок службы в 510 раз больше, чем у традиционных материалов (например, нержавеющей стали, титанового сплава, 400 - 600 HV), с шероховатостью поверхности Ra 0,05 - 0,2 мкм.

В данной статье на основе стандартов (GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100) приводятся рекомендации по технологии, производительности, применению и оптимизации авиационных датчиков из цементированного карбида.

1. Характеристики авиационных датчиков из карбида вольфрама

1.1 Состав материала авиационных датчиков из цементированного карбида

Матрица:

Содержание WC: 85–92 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,1–0,4 мкм), твердость 1600–2000 HV.

Co: 6 - 10 мас. %, высокая ударная вязкость ($K_{IC} 10 - 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), вибростойкость повышена на 10%.

Ni: 6–12 мас. % (опционально), коррозионная стойкость (HCl, SO_4^{2-} $<0,01 \text{ мм/год}$), стойкость к высокотемпературному окислению.

Добавки: Cr3C2 (0,2–0,5 мас. %), подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 5%; TaC (0,1–0,3 мас. %), увеличивает антиоксидантные свойства на 10%.

покрытие:

TiN (PVD): твердость 2000 - 2400 HV, термостойкость 800°C , износостойкость.

Al_2O_3 (CVD): твердость 1800 - 2200 HV, термостойкость 1000°C , коррозионная стойкость.

Au/Ag (PVD): проводимость $>90\%$ IACS, термостойкость 500 - 600°C , антиокислительная защита.

Градиентная структура: низкое содержание Co/Ni на поверхности (6–8 мас. %), высокое

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

содержание Co/Ni в сердцевине (10–12 мас. %), износостойкость повышена на 20%, трещиностойкость повышена на 15%.

1.2 Параметры производительности авиационных датчиков из цементированного карбида

Твердость: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 1,8 - 2,5 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: $1015 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (на основе Co 1215, на основе Ni 1012).

Износостойкость: Скорость износа $<0,02 \text{ мм}^3/\text{ч}$ (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 212, $<0,01 \text{ мм/год}$ (NACE MR0175).

Высокая термостойкость: $>800^\circ\text{C}$, стойкость к окислению ($<0,01 \text{ мг/см}^2$, 500 часов).

Вибростойкость: $>10^6$ раз (10100 г, MILSTD810G).

Электропроводность: $>90\%$ IACS (покрытие Au/Ag, IEC 6051221).

Точность измерения: погрешность $<\pm 0,5\%$ (температура, давление, деформация).

Шероховатость поверхности: Ra 0,050,2 мкм, стабильность сигнала увеличена на 20%.

1.3 Преимущества авиационных датчиков из цементированного карбида

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC+, срок службы увеличен в 510 раз, а частота отказов снижена на 30%.

Высокая термостойкость: покрытие TiN / Al_2O_3 , антиокислительное, подходит для высокотемпературной среды (800°C , двигатель).

Коррозионная стойкость: на основе Ni + Al_2O_3 , устойчив к авиационному топливу/солевому туману, подходит для суровых условий.

Вибростойкость: Высокая прочность Co/Ni, выдерживает высокочастотную вибрацию ($>10^6$ раз), лучше, чем титановый сплав.

Высокая точность: покрытие с низким коэффициентом трения + прецизионная обработка, погрешность данных $<\pm 0,5\%$, затухание сигнала снижено на 15%.

2. Процесс производства авиационных датчиков из цементированного карбида

2.1 Приготовление порошка

Сырье: WC (D50 0,1 - 0,4 мкм, чистота $>99,95\%$), Co/Ni (D50 0,51 мкм), Cr3C2/TaC (D50 0,51 мкм).

Шаровое измельчение: планетарная шаровая мельница (шары ZrO_2 , 15:1), 400 об/мин, 1620 часов, отклонение размера частиц $<\pm 0,03 \text{ мкм}$, однородность $>99\%$.

2.2 Формирование

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Параметры: 250 - 300 МПа, выдержка под давлением 60 секунд, форма из вольфрамовой стали (отклонение $< \pm 0,02$ мм), плотность заготовки 8,5 - 10,0 г/см³.

Результаты: Отклонение размеров $< \pm 0,03$ мм, частота трещин $< 0,3\%$.

2.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.

параметр:

Депарафинизация: 200 - 500°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Па.

Спекание: 1350 - 1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Па, 22,5 часа.

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

Результаты: Плотность 14,8 - 15,0 г/см³, пористость $< 0,0003\%$, твердость 1600 - 2000 HV.

2.4 Прецизионная обработка

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), 5000 об/мин, подача 0,003 - 0,01 мм/проход, геометрическое отклонение $< \pm 0,005$ мм, Ra 0,05 - 0,2 мкм.

Электроэрозионная обработка: Электроискровая обработка, микроотверстие/паз ($\varnothing$ 0,1-0,5 мм), отклонение $< \pm 0,003$ мм.

Полировка: Алмазная полировальная паста (0,30,5 мкм), 1200 об/мин, Ra $< 0,05$ мкм, стабильность сигнала увеличена на 10%.

2.5 Покрытие

Метод: PVD/CVD (мишени Ti/Al/Au/Ag, $> 99,99\%$).

Параметры: TiN/Al₂O₃/Au/Ag (13 мкм), 10^{-5} Па, 200400 °C, смещение 80 В, скорость осаждения 0,51 мкм/ч.

Результаты: Адгезия > 80 Н, коэффициент трения $< 0,2$, проводимость $> 90\%$ IACS.

2.6 Интеграция датчиков

Чувствительные элементы: МЭМС (на основе кремния, размер $< 0,5$ мм) или тензодатчики (NiCr, толщина 0,01 мм), контролирующие температуру ($\pm 0,5^\circ\text{C}$), давление ($\pm 0,1$ МПа) и деформацию (± 1 мкЭ).

Упаковка: Лазерная сварка (Ti оболочка, герметичность $< 10^{-8}$ Па·м³/с), термостойкость 800°C, вибростойкость 100 г.

Передача данных: модуль 5G/Bluetooth, задержка < 5 мс, энергопотребление < 30 мВт.

2.7 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен $< 2\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Характеристики: Отклонение твердости $< \pm 30$ HV (ISO 6508), износ $< 0,02$ мм³/ч, коррозионная стойкость ($< 0,01$ мм/год).

Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,003$ мм), лазерное сканирование (отклонение паза $< \pm 0,002$ мм).

Неразрушающий контроль: рентген (дефекты $< 0,005$ мм), ультразвуковой (трещины $< 0,003$ мм).

Климатические испытания: MILSTD810G (от 55°C до 800°C, вибрация 100 g, 10^6 циклов).

Электрические свойства: проводимость $> 90\%$ IACS, погрешность сигнала $< \pm 0,5\%$ (IEC 6051221).

3. Сценарии применения авиационных датчиков из цементированного карбида

Карбидные авиационные датчики предоставляют рекомендации по процессу, тестированию и выбору для экстремальных условий и требований высокой точности:

3.1 Карбидный авиационный датчик контроля двигателя (датчик температуры/давления)

Условия: 800°C, 50 МПа, вибрация 100 g, среда авиационного топлива, 10^6 циклов, дизайн

Тип: датчик давления/температуры MEMS ($\varnothing$ 10 мм, толщина 2 мм).

Материал: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 мкм, Cr3C2 0,3 мас.%, TaC 0,2 мас.%), твердость 1900 HV.

Покрытие: Al₂O₃ (2 мкм, CVD, термостойкость 1000°C, коррозионная стойкость).

Геометрия: Отклонение от плоскостности $< \pm 0,002$ мм, Ra $< 0,05$ мкм.

Процессы: шаровая мельница в течение 20 часов, HIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, CVD Al₂O₃ (400°C), интеграция MEMS, лазерная сварка.

Параметры: температура 800°C, давление 50 МПа, вибрация 100 g, частота дискретизации 1 кГц.

тест:

Срок службы: 2×10^6 раз (титановый сплав 3×10^5 раз, в 6,7 раз дольше).

Скорость износа: $< 0,01$ мм³/ч, коррозионная стойкость $< 0,01$ мм/год.

Точность: погрешность температуры $\pm 0,5^\circ\text{C}$, погрешность давления $\pm 0,1$ МПа.

Вибростойкость: 100 g, 10^6 раз, без сбоев.

Выбор: WCCo+Al₂O₃, подходит для высоких температур и высокого давления, регулярного неразрушающего контроля.

Преимущества: стойкость к высокотемпературной коррозии, высокая точность и повышение КПД двигателя на 10%.

3.2 Мониторинг состояния конструкции авиационных датчиков из цементированного карбида (датчиков деформации)

Условия эксплуатации: от 55°C до 200°C, вибрация 10 g, соляной туман (5% NaCl), 10^7 циклов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дизайн

Тип: Тензометрический датчик (5×3 мм, толщина 0,5 мм).

Материал: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 мкм, Cr3C2 0,4 мас. %), твердость 1700 HV.

Покрытие: TiN (1 мкм, PVD, термостойкость до 800°C, износостойкость).

Геометрия: Отклонение поверхности $\leq \pm 0,003$ мм, Ra $\leq 0,1$ мкм.

Процесс: шаровая мельница в течение 18 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа),

EDM, PVD TiN (250°C), монтаж тензодатчиков, лазерная сварка.

Параметры: деформация ± 5000 мкЭ, вибрация 10 g, частота дискретизации 500 Гц.

тест:

Срок службы: $1,5 \times 10^7$ раз (нержавеющая сталь 2×10^6 раз, в 7,5 раз дольше).

Потеря износа: $< 0,02$ мм³/ч, стойкость к солевому туману 1000 часов, увеличение стойкости $< 5\%$.

Точность: погрешность деформации ± 1 мкЭ, затухание сигнала $< 0,1\%$.

Вибростойкость: 10 г, 10^7 раз, без сбоев.

Выбор: WCNi+TiN, подходит для низкотемпературной коррозии, регулярной очистки.

Преимущества: антивибрационная защита от коррозии, подходит для контроля крыльев/фюзеляжа, безопасность повышена на 15%.

3.3 Карбидный авиационный датчик управления полетом (магнитный датчик)

Условия эксплуатации: от 40°C до 150°C, вибрация 20 g, сухая среда, 10^6 циклов.

дизайн

Тип: Магнитный датчик Холла (Ø 3 мм, толщина 1 мм).

Материал: WC8%Co1%Ag (D50 0,10,4 мкм, Cr3C2 0,3 мас. %), твердость 1800 HV.

Покрытие: Au (0,5 мкм, PVD, проводимость $> 95\%$ IACS, термостойкость 600°C).

Геометрия: Округлость $\leq \pm 0,002$ мм, Ra $\leq 0,05$ мкм.

Процесс: шаровая мельница 20 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD Au (200°C), интеграция элемента Холла, лазерная сварка.

Параметры: магнитное поле 0500 мТл, вибрация 20 g, частота дискретизации 2 кГц.

тест:

Срок службы: 2×10^6 раз (титановый сплав 4×10^5 раз, в 5 раз дольше).

Потери на износ: $< 0,01$ мм³/ч, контактное сопротивление < 8 мкОм.

Точность: погрешность магнитного поля $\pm 0,1$ мТл, стабильность сигнала $\pm 0,5\%$.

Вибростойкость: 20 г, 10^6 раз, без сбоев.

Выбор: WCCo+Au, подходит для сухой среды с высокой проводимостью, регулярное определение сопротивления.

Преимущества: Высокоточная проводимость, подходит для навигации/управления ориентацией, надежность повышена на 20%.

4. Сравнение характеристик авиационных датчиков из цементированного карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Титановый сплав (Ti6Al4V)	Нержавеющая сталь (316L)
Твёрдость (HV)	1600 - 2000	300 - 400	200 - 300
Прочность на изгиб (ГПа)	1,8 - 2,5	0,9 - 1,2	0,5 - 0,8
Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})	10 - 15	40 - 60	50 - 70
Износостойкость (мм ³ /ч)	<0,02	0.10.3	0.20.5
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Температурная стойкость (°C)	>800	400 - 600	3005-00
Вибростойкость (раз, 100 г)	>10 ⁶	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵
Срок службы многократно (по сравнению с нержавеющей сталью)	5 - 10	двадцать три	1
Электропроводность (% IACS)	>90	12	двадцать три

Основные характеристики карбидных авиационных датчиков:

Износостойкость: подложка WC, износ <0,02 мм³/ч, срок службы увеличен в 510 раз.
термостойкость: покрытие TiN / Al₂O₃, антиокислительное, лучше, чем у титанового сплава.
Коррозионная стойкость: на основе Ni + Al₂O₃, устойчив к соляному туману/топливу, лучше, чем у нержавеющей стали.
Высокая точность: низкое трение + прецизионная обработка, погрешность <±0,5%, лучше, чем у традиционных материалов.

5. Предложения по оптимизации для авиационных датчиков из цементированного карбида

Выбор материала:

Мониторинг двигателя: WC8%Co+Al₂O₃, стойкость к высокотемпературной коррозии повышена на 15%.

Мониторинг состояния конструкции: WC10%Ni+TiN, устойчивость к вибрационной коррозии повышена на 20%.

Управление полетом: WC8%Co+Au, проводимость>95% IACS, точность увеличена на 10%.

Добавки: Cr₃C₂ 0,4 мас.%, TaC 0,3 мас.%, твердость увеличена на 5%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1350°C, 120 МПа, пористость <0,0003%, износостойкость повышена на 15%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), отклонение <±0,005 мм, Ra <0,05 мкм.

покрытие:

Al₂O₃ (2 мкм, CVD), высокая термостойкость увеличена на 15%.

TiN (1 мкм, PVD), износостойкость увеличена на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Au (0,5 мкм, PVD), контактное сопротивление снижено на 10%.

Электроэрозионная обработка: отклонение микроотверстий $\leq \pm 0,002$ мм, точность увеличена на 5%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Па.

5-осевой ЧПУ: отклонение $\leq \pm 0,003$ мм.

Оборудование для нанесения покрытий: скорость осаждения 0,51 мкм/ч, отклонение $\leq \pm 0,03$ мкм.

Адаптация к условиям труда:

Двигатель: $\text{WCCo} + \text{Al}_2\text{O}_3$, 800 °C, 50 МПа, вибрация 100 g.

Мониторинг структуры: $\text{WCNi} + \text{TiN}$, от 55°C до 200°C, вибрация 10 g, соляной туман.

Управление полетом: $\text{WCCo} + \text{Au}$, от 40°C до 150°C, вибрация 20 g, сухая среда.

6. Испытания и проверка твердосплавных авиационных датчиков:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен $< 2\%$).

Производительность: ASTM G65 ($< 0,02$ мм³/ч), коррозионная стойкость ($< 0,01$ мм/год), термостойкость ($> 800^\circ\text{C}$, $< 0,01$ мг/см²).

Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,003$ мм), лазерное сканирование (отклонение паза $< \pm 0,002$ мм).

Окружающая среда: MILSTD810G (от 55°C до 800°C, 100 г, 10^{-6} раз).

Электрические свойства: проводимость $> 90\%$ IACS, погрешность $\leq \pm 0,5\%$ (IEC 6051221).

7. Стандарты и спецификации для твердосплавных авиационных датчиков

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 1600-2000 HV.

ASTM G65: Скорость износа $< 0,02$ мм³/ч.

NACE MR0175: Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением.

MILSTD810G: Адаптивность к окружающей среде (вибрация, температура, коррозия).

AS9100: Управление качеством в аэрокосмической отрасли.

IEC 6051221: Контактное сопротивление < 10 мОм.

Благодаря оптимизации сверхмелкого зерна WC (0,10,4 мкм), связующей фазы Co/Ni (612 мас. %), покрытия PVD/CVD ($\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Au}$, 13 мкм) и интеграции MEMS/тензометра, авиационные датчики из цементированного карбида достигают высокой твердости (1600–2000 HV), износостойкости ($< 0,02$ мм³/ч), коррозионной стойкости ($< 0,01$ мм/год), высокой термостойкости ($> 800^\circ\text{C}$) и высокой точности (погрешность $\leq \pm 0,5\%$). Датчик подходит для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мониторинга двигателей, контроля состояния конструкции и управления полетом, при этом срок службы увеличен в 510 раз, Ra 0,05–0,2 мкм, а надежность данных увеличена на 20%. Оптимизация размера зерна, толщины покрытия и интеграции MEMS может снизить затраты, но проблемы заключаются в сверхточной обработке (увеличение затрат на 10%) и испытаниях в экстремальных условиях ($>10^6$ раз). Твердый сплав превосходит титановый сплав и нержавеющую сталь и соответствует строгим требованиям аэрокосмической промышленности (AS9100, MILSTD810G).

приложение:

Интеллектуальные твердосплавные режущие инструменты

Инструменты Smart carbide изготавливаются из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (88 - 94 мас. %) в сочетании с Co (6 - 10 мас. %) или Ni (6 - 12 мас. %) в качестве связующей фазы и изготавливаются методом порошковой металлургии (шаровая мельница, CIP, спекание HIP). Они обладают высокой твердостью (1800 - 2200 HV), износостойкостью (объем износа <0,03 мм³/ч, ASTM G65), коррозионной стойкостью (<0,01 мм/год, pH 212, содержит HCl, SO₄²⁻) и высокой термостойкостью (>1000 °C, стойкость к окислению). Поверхность покрыта покрытием PVD/CVD (например, DLC, TiAlN, AlCrN, 25 мкм, коэффициент трения <0,15), интегрированным с интеллектуальным датчиком (температура, износ, напряжение) и адаптивным управлением (оптимизация параметров резания), что повышает эффективность обработки на 20-30 %, а срок службы в 35 раз больше, чем у традиционных инструментов (нержавеющая сталь, 400-600 HV), с шероховатостью поверхности Ra 0,10,2 мкм. Инструмент используется для высокоточной обработки (аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение, пресс-формы), подходит для высокоскоростной резки (1000-5000 об/мин), сухой/мокрой резки и труднообрабатываемых материалов (титановый сплав, сплав на основе никеля). В этой статье на основе стандартов (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 6508) представлены интеллектуальные твердосплавные инструменты, процессы, производительность, области применения и предложения по оптимизации.

1. Особенности интеллектуальных твердосплавных инструментов

1.1 Интеллектуальный состав твердосплавного инструмента

Матрица:

Содержание WC: 88–94 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,2–0,5 мкм), твердость 1800–2200 HV.

Co: 6 - 10 мас. %, высокая ударная вязкость ($K_{IC} 15 - 20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), износостойкость повышена на 10%.

Ni: 6 - 12 мас. % (опционально), коррозионно-стойкий (HCl, SO₄²⁻ <0,01 мм/год), ударопрочный ($K_{IC} 12 - 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

Добавки: Cr3C2 (0,3–0,6 мас. %), подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 6%; TaC (0,1–0,3 мас. %), увеличивает антиоксидантные свойства на 10%.

покрытие:

DLC (PVD): твердость 3000 - 3500 HV, коэффициент трения <0,1, термостойкость 600°C, антиадгезионный.

TiAlN (PVD/CVD): твердость 2800 - 3200 HV, термостойкость 1050°C, эрозионная стойкость.

AlCrN (PVD): твердость 3000 - 3400 HV, термостойкость 1100°C, износостойкость при высоких температурах.

Градиентная структура: низкое содержание Co/Ni на поверхности (6–8 мас. %), высокое

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

содержание Co/Ni в сердцевине (10–12 мас. %), износостойкость повышена на 25%, трещиностойкость повышена на 20%.

1.2 Интеллектуальные функции твердосплавного инструмента

Датчики: Встроенные микродатчики (MEMS, размер $< 0,5$ мм), контролирующие температуру ($\pm 1^\circ\text{C}$, 0500°C), износ ($\pm 0,01$ мм), напряжение (± 5 МПа).

Передача данных: модуль Bluetooth/5G, передача в систему ЧПУ в реальном времени, задержка < 10 мс.

Адаптивное управление: алгоритм ИИ (машинное обучение на основе данных об износе/температуре) динамически регулирует скорость резания ($\pm 10\%$) и скорость подачи ($\pm 15\%$), оптимизируя эффективность на 20–30%.

Прогнозирование срока службы: на основе модели износа (модель Арчарда) прогнозируется оставшийся срок службы (погрешность $\pm 5\%$), что сокращает время простоя на 30%.

1.3 Параметры производительности интеллектуальных твердосплавных инструментов

Твердость: 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 2,0 - 2,8 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: $1220 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (на основе Co 1520, на основе Ni 1215).

Износостойкость: Скорость износа $< 0,03 \text{ мм}^3/\text{ч}$ (ASTM G65).

Коррозионная стойкость: pH 212, $< 0,01 \text{ мм/год}$ (NACE MR0175).

Высокая термостойкость: $> 1000^\circ\text{C}$, стойкость к окислению ($< 0,01 \text{ мг/см}^2$, 1000 часов).

Коэффициент трения: $< 0,15$ (покрытие), антиадгезионные свойства увеличены на 30%.

Шероховатость поверхности: Ra 0,10,2 мкм, качество обработки поверхности повышено на 15%.

1.4 Преимущества интеллектуальных твердосплавных инструментов

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC+, срок службы увеличен в 35 раз, эффективность резки увеличена на 20%.

Коррозионная стойкость: инструменты на основе никеля устойчивы к кислотам и щелочам (HCl , SO_4^{2-}) и подходят для влажной резки.

Высокая термостойкость: покрытие TiAlN/AlCrN, устойчивое к термическому растрескиванию, подходит для высокоскоростной сухой резки.

Интеллект: мониторинг в реальном времени + адаптивное управление, снижение процента брака на 15% и экономия энергии на 10–20%.

2. Интеллектуальный процесс производства твердосплавного инструмента

2.1 Приготовление порошка

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сырье: WC (D50 0,2 - 0,5 мкм, чистота >99,95%), Co/Ni (D50 12 мкм), Cr₃C₂/TaC (D50 0,5 - 1 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 (отклонение < ± 0,03 мм), плотность заготовки 9,0 - 10,5 г/см³.

Результаты: Отклонение размеров <±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 15,0 - 15,2 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 <±0,01 мм, Ra 0,10,2 мкм.

Электроэрозионная обработка: Электроэрозионная обработка, прорезь/отверстие (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%.

2.5 Покрытие

Метод: PVD/CVD (цель Cr/Al/Ti, >99,99%).

Параметры: DLC/ TiAlN / AlCrN (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 600 - 1100°C.

2.6 Интеллектуальная интеграция

Встраивание датчика: лазерная микрообработка (глубина канавки 0,51 мм), имплантация МЭМС-датчиков (температуры, напряжения, износа), герметизация эпоксидной смолой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(температурная стойкость 500°C).

Интеграция схемы: тонкопленочные схемы (толщиной 0,1 мм), модули 5G/Bluetooth, потребляемая мощность <50 мВт.

Программное обеспечение: алгоритм ИИ (Python, TensorFlow), оптимизация параметров резки в реальном времени, хранение данных в облаке (шифрование, AES256).

2.7 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,2 0,5 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <3%).

Характеристики: Отклонение твердости <±40 HV (ISO 6508), износ <0,03 мм³/ч, коррозионная стойкость (рН 212, <0,01 мм/год).

Геометрия: КИМ (отклонение < ± 0,005 мм), лазерное сканирование (радиус кромки < ± 0,003 мм).

Интеллектуальные функции: точность датчика (температура ±1°C, износ ±0,01 мм), задержка передачи <10 мс.

Неразрушающий контроль: рентген (внутренние дефекты < 0,01 мм), ультразвуковой (трещины < 0,005 мм).

3. Интеллектуальные сценарии реагирования на твердосплавные инструменты

Интеллектуальные твердосплавные инструменты предоставляют рекомендации по высокоточной обработке, процессу, тестированию и выбору:

3.1 Аэрокосмическая промышленность (обработка титановых сплавов)

Условия работы: Ti6Al4V, 2000 об/мин, 200°C, сухая резка, глубина резания 12 мм.

Тип: Фреза (Ø 20 мм, 4 канавки).

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).

Интеллект: датчики MEMS (температура, износ), оптимизация ИИ (скорость резки ±10%).

Геометрия: угол режущей кромки 15°, радиус режущей кромки <0,01 мм, Ra <0,1 мкм.

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, СР 350 МПа, НР 1400°C (150 МПа), 5-осевое шлифование, PVD TiAlN (400°C), встраивание сенсорного лазера.

Параметры: скорость 2000 об/мин, подача 0,1 мм/об, глубина резания 1,5 мм.

тест:

Срок службы: 800 часов (200 часов для традиционных инструментов, в 4 раза больше).

Потери на износ: <0,02 мм³/ч, качество поверхности Ra 0,2 мкм.

Эффективность: время обработки сокращено на 25%, процент брака снижен на 15%.

Интеллектуальный: контроль температуры <200°C, прогнозирование износа ±5%.

Выбор: WCCo+TiAlN, подходит для высоких температур, высокой твердости, сухой резки и обычного неразрушающего контроля.

Преимущества: Высокая термостойкость, интеллектуальная оптимизация и повышение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

эффективности на 20%.

3.2 Автомобильная пресс-форма (обработка быстрорежущей стали)

Условия работы: сталь H13, 3000 об/мин, 150°C, мокрая резка (5% эмульсия), глубина резания 0,51 мм.

Тип: Токарный резец (однолезвийный, стандарт ISO).

Материал: WC10%Co (D50 0,2 - 0,5 мкм, Cr3C2 0,5 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: DLC (3 мкм, твердость 3500 HV, трение <0,1, термостойкость 600°C).

Умный: датчики MEMS (износ, напряжение), ИИ регулирует скорость подачи ($\pm 15\%$).

Геометрия: угол режущей кромки 20°, радиус режущей кромки <0,01 мм, Ra <0,1 мкм.

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 350 МПа, HIP 1400°C (150 МПа), 5-осевое шлифование, PVD DLC (250°C), встраивание датчика.

Параметры: скорость 3000 об/мин, подача 0,08 мм/об, глубина резания 0,8 мм.

тест:

Срок службы: 1200 часов (300 часов для традиционных инструментов, в 4 раза больше).

Скорость износа: <0,02 мм³/ч, коррозионная стойкость <0,01 мм/год.

Качество поверхности: Ra 0,15 мкм, точность $\pm 0,005$ мм.

Интеллект: контроль напряжения <500 МПа, время простоя сокращено на 30%.

Выбор: WCCo+DLC, подходит для влажной резки, высокой точности и регулярной очистки.

Преимущества: низкое трение, антиадгезия, повышение точности обработки на 15%.

3.3 Обработка сплавов на основе никеля (лопатки газовых турбин)

Условия работы: Inconel 718, 1500 об/мин, 400°C, сухая резка, глубина реза 13 мм.

Тип: Сверло (Ø 10 мм, двухстороннее).

Материал: WC8%Ni (D50 0,2 - 0,5 мкм, TaC 0,3 мас. %), твердость 2000 - 2200 HV.

Покрытие: AlCrN (5 мкм, твердость 3400 HV, трение 0,15, термостойкость 1100°C).

Интеллект: датчики MEMS (температура, износ), искусственный интеллект оптимизирует параметры резки.

Геометрия: угол режущей кромки 30°, радиус режущей кромки <0,01 мм, Ra <0,1 мкм.

Процесс: шаровая мельница в течение 22 часов, CIP 350 МПа, HIP 1400°C (150 МПа), EDM (отклонение отверстия $\leq \pm 0,005$ мм), PVD AlCrN (450°C), встраивание датчика.

Параметры: скорость 1500 об/мин, подача 0,05 мм/об, глубина резания 2 мм.

тест:

Срок службы: 600 часов (150 часов для традиционных инструментов, в 4 раза больше).

Скорость износа: <0,03 мм³/ч, стойкость к окислению <0,01 мг/см².

Эффективность: время обработки сокращено на 20%, а процент брака снижен на 10%.

Умный: контроль температуры <400°C, прогнозируемый срок службы $\pm 5\%$.

Выбор: WCNi+AlCrN, подходит для высокотемпературных, труднообрабатываемых материалов, сухой резки и обычного неразрушающего контроля.

Преимущества: Высокая термостойкость, интеллектуальное управление снижает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термическое растрескивание на 15%.

4. Сравнение производительности интеллектуальных твердосплавных инструментов

параметр	Умный карбид (WCCo/Ni)	Традиционный твердый сплав	Ножи из нержавеющей стали
Твёрдость (HV)	1800 - 2200	1600 - 2000	400 - 600
Прочность на изгиб (ГПа)	2.0 - 2.8	1,8 - 2,5	1,5 - 2,0
Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})	12 -- 20	10 - 15	50100
Износостойкость (мм ³ /ч)	<0,03	0,05 - 0,1	0,1 - 0,3
Коррозионная стойкость (мм/год, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Температурная стойкость (°C)	>1000	800 - 1000	400 - 800
Срок службы многократно (по сравнению с нержавеющей сталью)	3 - 5	двадцать три	1
Коэффициент трения (покрытие)	<0,15	0,2 - 0,3	0,3 - 0,5
Умные функции	Мониторинг в реальном времени + самоадаптация	никто	никто

Основные характеристики твердосплавного инструмента Smart:

Интеллектуальная функция: мониторинг в реальном времени + оптимизация на основе ИИ, повышение эффективности на 2030%, снижение процента брака на 15%.

Износостойкость: Сверхмелкозернистое покрытие WC+, износ <0,03 мм³/ч, срок службы увеличен в 35 раз.

Покрывтие: DLC антиадгезионное (мокрая резка), TiAlN / AlCrN устойчивое к высоким температурам (сухая резка).

Коррозионная стойкость: сплавы на основе Ni лучше, чем сплавы на основе Co, и подходят для влажной резки (pH 212).

5. Интеллектуальные предложения по оптимизации для интеллектуальных твердосплавных инструментов

Выбор материала:

Титановый сплав: WC8%Co+TiAlN, высокая термостойкость увеличена на 15%.

Сталь для пресс-форм: WC10%Co+DLC, антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

Сплав на основе никеля: WC8%Ni+AlCrN, коррозионная стойкость повышена на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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:

DLC (3 мкм, 250°C), антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

TiAlN (4 мкм, 400°C), высокая термостойкость увеличена на 15%.

AlCrN (5 мкм, 450°C), эрозионная стойкость увеличена на 20%.

Умная интеграция: датчики MEMS (точность ±1°C), передача данных 5G (задержка <10 мс).

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры ±2°C, 10⁻⁶ Па.

5-осевой ЧПУ: отклонение <±0,005 мм.

Оборудование для нанесения покрытий: скорость осаждения 11,5 мкм/ч, отклонение <±0,05 мкм.

Лазерная обработка: отклонение щели датчика <±0,01 мм.

Адаптация к условиям труда:

Аэрокосмическая промышленность: WCCo+TiAlN, 2000–5000 об/мин, сухая резка.

Автомобильная форма: WCCo+DLC, 1000–3000 об/мин, мокрая резка.

Сплав на основе никеля: WCNi+AlCrN, 1000 - 2000 об/мин, сухая резка.

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,2 - 0,5 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 кромки < ± 0,003 мм).

Умный: точность датчика (температура ±1°C, износ ±0,01 мм), ошибка прогнозирования ИИ <5%.

6. Стандарты и спецификации для интеллектуальных твердосплавных инструментов

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 79972017: 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.

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 1832: Стандарт геометрии инструмента.

Инструменты Smart Carbide достигают высокой твердости (1800 - 2200 HV), износостойкости ($< 0,03 \text{ мм}^3 / \text{ч}$), коррозионной стойкости (рН 212, $< 0,01 \text{ мм} / \text{год}$) и высокой термостойкости ($> 1000^\circ \text{C}$) за счет оптимизации сверхмелкого зерна WC (0,2 - 0,5 мкм), фазы связи Co / Ni (6 - 12 мас. %), покрытия PVD / CVD (DLC / TiAlN / AlCrN, 25 мкм) и интеллектуальной интеграции (датчик MEMS, управление AI). Инструменты подходят для аэрокосмической промышленности (титановый сплав), автомобильных пресс-форм (сталь H13), газовых турбин (сплавы на основе никеля), со сроком службы, увеличенным в 35 раз, Ra 0,1 - 0,2 мкм, эффективностью, увеличенной на 20 - 30%, и снижением процента брака на 15%. Оптимизация размера зерна, толщины покрытия и точности датчика может снизить затраты. Проблемы заключаются в высокоточной обработке (увеличение затрат на 15%) и интеллектуальной стабильности системы (задержка 5G $< 10 \text{ мс}$).

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



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:

Карбидные электронные контакты

Электронные контакты из цементированного карбида изготавливаются из карбида вольфрама (WC) в качестве матрицы (85 - 92 мас. %) в сочетании с Co (6 - 10 мас. %) или Ni (6 - 12 мас. %) в качестве связующей фазы и изготавливаются методом порошковой металлургии (шаровая мельница, СІР, спекание НІР). Они обладают высокой твердостью (1600 - 2000 HV), отличной износостойкостью (потеря износа <0,02 мм³/ч, ASTM G65), стойкостью к дуговой коррозии (<0,01 мм/год, IEC 60068220), низким контактным сопротивлением (<10 мОм, IEC 6051221) и высокой термостойкостью (>800°C, стойкость к окислению). На поверхность наносится PVD-покрытие (например, Au, Ag, Ni, 0,52 мкм, коэффициент трения <0,2) или гальванопокрытие (Au 0,1 - 0,5 мкм) для улучшения проводимости (>90% IACS) и стойкости к окислению. Контакты подходят для высокочастотного переключения (>10⁶ раз), реле, разъемов и новых систем управления аккумуляторными батареями транспортных средств (BMS). Они могут выдерживать высокий ток (10 - 100 А), высокое напряжение (100 - 1000 В) и циклические удары. Срок службы в 51 - 0 раз больше, чем у медного сплава (CuBe, 200 - 400 HV), а шероховатость поверхности составляет Ra 0,05 - 0,2 мкм.

В данной статье на основе стандартов (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60512) приводятся рекомендации по проектированию, процессу, производительности, применению и оптимизации электронных контактов из цементированного карбида.

1. Характеристики электронных контактов из цементированного карбида

1.1 Состав материалов для электронных контактов из твердого сплава

Матрица:

Содержание WC: 85–92 мас. %, ультрамелкое зерно (D50 0,10,4 мкм), твердость 1600–2000 HV.

Co: 6 - 10 мас. %, высокая ударная вязкость (K_{IC} 101 - 5 МПа·м^{1/2}), проводимость увеличена на 5%.

Ni: 6–12 % по весу (опционально), коррозионно-стойкий (HCl, SO₄²⁻ - <0,01 мм/год), устойчивый к дуге.

Добавки: Ag (13 мас.%), проводимость увеличилась на 10%; Cr3C2 (0,2-0,5 мас.%), твердость увеличилась на 5%.

Обработка поверхности:

Au (PVD/гальванопокрытие): проводимость >95% IACS, термостойкость 600°C, антиокислительное действие.

Ag (PVD): проводимость >98% IACS, термостойкость 500°C, дугостойкость.

Ni (PVD): твердость 800 - 1000 HV, термостойкость 700°C, коррозионная стойкость.

Градиентная структура: высокое содержание Ag/Ni (2–5 мас. %) на поверхности, высокое содержание Co/Ni (8–12 мас. %) в сердцевине, проводимость увеличена на 15%,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

износостойкость увеличена на 20%.

1.2 Параметры производительности электронных контактов из цементированного карбида

Твердость: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Прочность на изгиб: 1,8 - 2,5 ГПа (GB/T 38512015).

Вязкость разрушения: 1015 МПа·м^{1/2} (на основе Co 1215, на основе Ni 1012).

Износостойкость: Скорость износа <0,02 мм³/ч (ASTM G65).

Стойкость к дуговой коррозии: <0,01 мм/год (IEC 60068220, 10⁶ раз переключения).

Сопротивление контакта: <10 мкОм (IEC 6051221).

Электропроводность: >90% IACS (покрытие Au/Ag).

Высокая термостойкость: >800°C, стойкость к окислению (<0,01 мг/см², 500 часов).

Коэффициент трения: <0,2 (покрытие), антиадгезионные свойства увеличены на 25%.

Шероховатость поверхности: Ra 0,05 - 0,2 мкм, устойчивость контакта увеличена на 20%.

1.3 Преимущества карбидных электронных контактов

Высокая износостойкость: сверхмелкозернистое покрытие WC⁺, срок службы увеличен в 510 раз, отказ контакта снижен на 30%.

Стойкость к дуге: покрытие на основе Ni + Ag/Au, противодуговое, подходит для высокочастотной коммутации.

Низкое сопротивление: покрытие Au/Ag, сопротивление контакта <10 мкОм, затухание сигнала снижено на 15%.

Высокая термостойкость: антиокислительные свойства, подходят для высокотемпературной среды (600 - 800°C, BMS, реле).

Стабильность: низкое трение + высокая твердость, стабильное контактное усилие (±5%) и увеличение производительности цикла на 20%.

2. Процесс изготовления электронных контактов из карбида вольфрама

2.1 Приготовление порошка

Сырье: WC (D50 0,1 - 0,4 мкм, чистота >99,95%), Co/Ni (D50 0,5 - 1 мкм), Ag/Cr3C2 (D50 0,51 мкм).

Шаровая мельница: планетарная шаровая мельница (шары ZrO₂, 15:1), 400 об/мин, 16–20 часов, отклонение размера частиц < ± 0,03 мкм, однородность > 99%.

2.2 Формирование

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

Параметры: 250 - 300 МПа, выдержка под давлением 60 секунд, форма из вольфрамовой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стали (отклонение $< \pm 0,02$ мм), плотность заготовки 8,510,0 г/см³.

Результаты: Отклонение размеров $< \pm 0,03$ мм, частота трещин $< 0,3\%$.

2.3 Спекание

Метод: Вакуумное спекание + ГИП.

параметр:

Депарафинизация: 200 - 500°C, 2°C/мин, атмосфера H₂ (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Па.

Спекание: 1350 - 1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Па, 22,5 часа.

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

Результаты: Плотность 14,8 - 15,0 г/см³, пористость $< 0,0003\%$, твердость 1600 - 2000 HV.

2.4 Прецизионная обработка

Шлифование: 5-координатный шлифовальный станок с ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), 5000 об/мин, подача 0,003 - 0,01 мм/проход, геометрическое отклонение $< \pm 0,005$ мм, Ra 0,05-0,2 мкм.

Электроэрозионная обработка: Электроискровая обработка, контактный паз/отверстие ($\varnothing$ 0,21 мм), отклонение $< \pm 0,003$ мм.

Полировка: Алмазная полировальная паста (0,30,5 мкм), 1200 об/мин, Ra $< 0,05$ мкм, контактное сопротивление снижено на 10%.

2.5 Обработка поверхности

Метод: PVD (мишень Au/Ag/Ni, $> 99,99\%$) или гальванопокрытие (Au 0,10,5 мкм).

Параметры: Au/Ag/Ni (0,52 мкм), 10^{-5} Па, 200-300 °C, смещение 80 В, скорость осаждения 0,51 мкм/ч; гальваническое покрытие Au (плотность тока 12 А/дм²).

Результаты: Адгезия > 80 Н, Коэффициент трения $< 0,2$, Электропроводность $> 90\%$ IACS.

2.6 Обнаружение

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен $< 2\%$).

Производительность: отклонение твердости $< \pm 30$ HV (ISO 6508), износ $< 0,02$ мм³/ч, контактное сопротивление < 10 мкОм, дугостойкость ($< 0,01$ мм/год, 10^6 раз).

Геометрия: КИМ (отклонение $< \pm 0,003$ мм), лазерное сканирование (отклонение паза $< \pm 0,002$ мм).

Неразрушающий контроль: рентген (внутренние дефекты $< 0,005$ мм), ультразвуковой (трещины $< 0,003$ мм).

Электрические свойства: контактное сопротивление (< 10 мкОм, IEC 6051221), выдерживаемое напряжение (> 1000 В, IEC 606641).

3. Сценарии применения электронных контактов из цементированного карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Для сценариев высокой частоты, сильного тока и высокой надежности карбидные электронные контакты предоставляют рекомендации по процессу, испытаниям и выбору:

3.1 Твердосплавное электронное контактное высокочастотное реле (новый энергетический автомобиль BMS)

Условия: 100 А, 400 В, 10^6 циклов, 85 °С, влажность (85 % относительной влажности).

Дизайн:

Тип: Плоский контакт (Ø 5 мм, толщина 1 мм).

Материал: WC8%Co2%Ag (D50 0,10,4 мкм, Cr3C2 0,3 мас. %), твердость 1800 HV.

Покрывание: Au (0,5 мкм, гальваническое, проводимость >95% IACS, термостойкость 600°C).

Геометрия: Отклонение от плоскостности $\leq \pm 0,002$ мм, Ra $< 0,05$ мкм.

Процесс: шаровая мельница в течение 18 часов, СІР 300 МПа, НІР 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, гальваническое покрытие Au (0,5 мкм).

Параметры: ток 100 А, напряжение 400 В, частота коммутации 1 Гц, контактное усилие 5 Н. тест:

Продолжительность жизни: 2×10^6 раз (CuBe 2×10^5 раз, в 10 раз дольше).

Потери на износ: $< 0,01$ мм³/ч, контактное сопротивление < 8 мОм.

Сопротивление дуге: $< 0,01$ мм/год, повышение температуры $< 30^\circ\text{C}$.

Влагостойкость: 85% относительной влажности, 1000 часов, без коррозии.

Выбор: WCCo+Au, подходит для высоких токов, влажной среды, регулярного тестирования сопротивления.

Преимущества: низкое сопротивление, дугостойкость, надежность BMS повышена на 20%.

3.2 Твердосплавный электронный контактный разъем (связь 5G)

Условия эксплуатации: 10 А, 100 В, 10^7 циклов включения и выключения, 70 °С, соляной туман (5% NaCl).

дизайн:

Тип: штыревой контакт (Ø 1 мм, длина 5 мм).

Материал: WC10%Ni1%Ag (D50 0,1 - 0,4 мкм, Cr3C2 0,3 мас. %), твердость 1700 HV.

Покрывание: Ag (1 мкм, PVD, проводимость >98% IACS, термостойкость 500°C).

Геометрия: круглость $\leq \pm 0,002$ мм, Ra $< 0,1$ мкм.

Процесс: шаровая мельница 20 часов, СІР 300 МПа, НІР 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), 5-осевое шлифование, PVD Ag (250°C).

Параметры: ток 10 А, напряжение 100 В, частота включения 0,5 Гц, контактное усилие 2 Н. тест:

Продолжительность жизни: $1,5 \times 10^7$ раз (CuBe 1×10^6 раз, в 15 раз дольше).

Потери на износ: $< 0,02$ мм³/ч, контактное сопротивление < 10 мОм.

Устойчивость к солевому туману: 5% NaCl, 500 часов, увеличение устойчивости $< 5\%$.

Затухание сигнала: $< 0,1$ дБ (10 ГГц).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Выбор: WCNi+Ag, подходит для высокочастотного подключения и отключения, коррозионной среды, регулярной очистки.

Преимущества: Защита от искрения, стабильность сигнала увеличена на 15%.

3.3 Твердосплавный электронный контактный высоковольтный выключатель (промышленное управление)

Условия эксплуатации: 50 A, 1000 В, 5×10^5 времени переключения, 100 °C, сухая среда.

Тип: Дуговой контакт (5×3 мм, толщина 1,5 мм).

Материал: WC8%Co3%Ag (D50 0,10,4 мкм, Cr3C2 0,4 мас. %), твердость 1900 HV.

Покрытие: Ni (2 мкм, PVD, твердость 1000 HV, термостойкость 700°C).

Геометрия: отклонение развала $< \pm 0,003$ мм, Ra $< 0,1$ мкм.

Процесс: шаровая мельница в течение 20 часов, CIP 300 МПа, HIP 1350°C (120 МПа, 1,5 часа), EDM, PVD Ni (300°C).

Параметры: ток 50 А, напряжение 1000 В, частота коммутации 0,2 Гц, контактное усилие 10 Н.

тест:

Продолжительность жизни: 8×10^5 раз (CuBe 1×10^5 раз, в 8 раз дольше).

Потери на износ: $< 0,01$ мм³/ч, контактное сопротивление < 9 мкОм.

Дуговая стойкость: $< 0,01$ мм/год, выдерживаемое напряжение > 1500 В.

Температурная стойкость: 100°C, 500 часов, без окисления.

Выбор: WCCo+Ni, подходит для высокого напряжения, сухой среды, обычного неразрушающего контроля.

Преимущества: высокая термостойкость, дугостойкость, повышенная на 20% стабильность переключения.

4. Сравнение характеристик электронных контактов из цементированного карбида

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Медный сплав (CuBe)	Серебряный сплав
Твёрдость (HV)	1600 - 2000	200 - 400	100 - 200
Прочность на изгиб (ГПа)	1,8 - 2,5	0,8 - 1,2	0,5 - 0,8
Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})	10 - 15	20 - 30	15 - 20
Износостойкость (мм ³ /ч)	$< 0,02$	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Дуговая стойкость (мм/год, 10 ⁶ раз)	$< 0,01$	0,05 - 0,1	0,02 - 0,05
Контактное сопротивление (мкОм)	< 10	15 - 20	5 - 10
Электропроводность (% IACS)	> 90	> 80	> 95
Температурная стойкость (°C)	> 800	200 - 400	300 - 500
Множественное время жизни (относительно CuBe)	510	1	двадцать три

параметр	Твердый сплав (WCCo/Ni)	Медный сплав (CuBe)	Серебряный сплав
Коэффициент трения (покрытие)	<0,2	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4

Основные характеристики карбидных электронных контактов:

Износостойкость: подложка WC, износ <0,02 мм³/ч, срок службы увеличен в 510 раз.

Стойкость к дуге: покрытие на основе Ni + Ag/Au, антиабляция, лучше, чем у CuBe.

Низкое сопротивление: покрытие Au/Ag, контактное сопротивление <10 мкОм, лучше, чем CuBe.

Устойчивость к высоким температурам: антиокислительный, подходит для высоких температур (>800°C), лучше, чем серебряный сплав.

5. Предложения по оптимизации

Выбор материала:

Реле BMS: WC8%Co+Au, проводимость>95% IACS, сопротивление дуге увеличено на 20%.

Разъем 5G: WC10%Ni+Ag, коррозионная стойкость увеличена на 15%.

Высоковольтный переключатель: WC8%Co+Ni, высокая термостойкость увеличена на 10%.

Добавки: Ag₂ - 3 мас.%, Cr₃C₂ 0,4 мас.%, проводимость увеличена на 10%.

Оптимизация процесса:

Спекание: ГИП 1350°C, 120 МПа, пористость <0,0003%, износостойкость повышена на 15%.

Шлифование: 5-осевое ЧПУ, шлифовальный круг CBN (13 мкм), отклонение <±0,005 мм, Ra <0,05 мкм.

покрытие:

Au (0,5 мкм, гальванопокрытие), контактное сопротивление снижено на 10%.

Ag (1 мкм, PVD), проводимость увеличилась на 5%.

Ni (2 мкм, PVD), коррозионная стойкость увеличена на 15%.

Электроэрозионная обработка: отклонение паза <±0,002 мм, точность увеличена на 5%.

Оптимизация оборудования:

Печь для спекания: регулировка температуры ±1°C, 10⁻⁶ Па.

5-осевой ЧПУ: отклонение <±0,003 мм.

Оборудование для нанесения покрытий: скорость осаждения 0,51 мкм/ч, отклонение <±0,03 мкм.

Адаптация к условиям труда:

BMS: WCCo+Au, 100 A, 400 B, влажная среда.

Разъем 5G: WCNi+Ag, 10 A, 100 B, соляной туман.

Высоковольтный выключатель: WCCo+Ni, 50 A, 1000 B, сухая среда.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тестирование и проверка:

Микроструктура: СЭМ (зерно 0,10,4 мкм), EBSD (напряжение на границах зерен <2%).

Производительность: ASTM G65 (<0,02 мм³/ч), контактное сопротивление (<10 мкОм), сопротивление дуги (<0,01 мм/год, 10⁶ раз).

Геометрия: КИМ (отклонение < ± 0,003 мм), лазерное сканирование (отклонение паза < ± 0,002 мм).

Электрические свойства: выдерживаемое напряжение (>1000 В, IEC 606641), повышение температуры (<30°C, IEC 6051251).

6. Стандарты и спецификации для твердосплавных электронных контактов

GB/T 183762014: Пористость <0,01%.

GB/T 38502015: Отклонение плотности <±0,1 г/см³.

GB/T 38512015: Прочность 1,82,5 ГПа.

GB/T 79972017: Твердость 1600 - 2000 HV.

ASTM G65: Скорость износа <0,02 мм³/ч.

IEC 60068220: Стойкость к дуговой коррозии.

IEC 6051221: Контактное сопротивление <10 мкОм.

IEC 606641: Выдерживаемое напряжение > 1000 В.

Электронные контакты из карбида достигают высокой твердости (1600–2000 HV), износостойкости (<0,02 мм³/ч), стойкости к дуговой коррозии (<0,01 мм/год), низкого контактного сопротивления (<10 мкОм) и высокой термостойкости (>800 °C) за счет оптимизации сверхмелкого зерна WC (0,1–0,4 мкм), фазы связывания Co/Ni (612 мас.%), добавки Ag (13 мас.%) и покрытия PVD/гальванопокрытия (Au/Ag/Ni, 0,52 мкм). Контакты подходят для реле BMS, разъемов 5G и высоковольтных переключателей, со сроком службы, увеличенным в 510 раз, Ra 0,05–0,2 мкм и повышением стабильности контакта на 20%. Оптимизация размера зерна, толщины покрытия и точности электроэрозионной обработки может снизить затраты, но проблемы возникают при сверхточной обработке (увеличение затрат на 10%) и дуговом тестировании (>10⁶ раз).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

Магнитные свойства твердого сплава и их обнаружение
Китайские национальные стандарты, международные стандарты, европейские и американские стандарты

категория	Номер стандарта	Стандартное имя	Обзор
Китайский национальный стандарт	ГБ/Т 17951-2022	Общие технические требования к магнитотвердым материалам	Устанавливает общие технические требования к магнитотвердым материалам, включая испытания производительности и контроль качества, и применим к магнитным испытаниям твердого сплава.
	ГБ/Т 5242-1985	Метод определения магнитных свойств твердого сплава	Метод определения, описывающий магнитные свойства твердых сплавов, такие как намагниченность насыщения и коэрцитивная сила, подходящий для контроля качества и неразрушающего контроля.
Международные стандарты	ИСО 9934-1:2015	Неразрушающий контроль — Магнитопорошковый контроль — Часть 1: Общие принципы	Определяет основные принципы магнитопорошкового контроля, применимые к обнаружению поверхностных и околоповерхностных дефектов ферромагнитных материалов (например, фазы Со в твердом сплаве).
	ИСО 3326:2013	Твердый сплав - Методы испытаний для определения твердости и вязкости разрушения	Сосредоточившись на испытании механических свойств твердого сплава, магнитные испытания можно объединить для косвенной оценки взаимосвязи между микроструктурой и магнитными свойствами.
Европейские и американские стандарты	ASTM E709-21	Руководство по магнитопорошковому контролю	Содержит рекомендации по магнитопорошковому контролю для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов ферромагнитных материалов, таких как цементированный карбид.
	ASTM E1444/ E1444M-22	Стандартная практика магнитопорошкового контроля	Подробные положения по внедрению магнитопорошкового контроля, включая оборудование, процессы и интерпретацию результатов, применимы к контролю качества твердого сплава.
	ЕН 10204:2004	Документы по проверке металлических изделий	Определяет требования к проверке и сертификации металлических изделий (например, твердых сплавов), которые могут использоваться совместно с результатами магнитных испытаний.
	МЭК 61000 -4-8:2020	Электромагнитная совместимость (ЭМС) — Часть 4-8: Испытания на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты	Для испытаний на электромагнитную совместимость он может служить справочным материалом для испытаний производительности магнитных материалов из цементированного карбида в определенных условиях.
Японские и корейские стандарты	JIS G 0551:2005	Сталь — Магнитопорошковый метод контроля	Определяет метод магнитопорошкового контроля ферромагнитных материалов, включая обнаружение фаз Со или Ni в цементированных карбидах.

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

категория	Номер стандарта	Стандартное имя	Обзор
	КС Д 0201:2015	Метод магнитопорошкового контроля (корейский стандарт)	Спецификация магнитопорошкового контроля в корейском стандарте применима к неразрушающему контролю твердого сплава и аналогична стандарту JIS.

проиллюстрировать

Некоторые стандарты (такие как ISO 9934-1, ASTM E709 и JIS G 0551) являются общими стандартами магнитного тестирования и не предназначены специально для твердого сплава. Однако, поскольку твердый сплав содержит ферромагнитные фазы (такие как Co), его можно адаптировать к потребностям магнитного тестирования.

Китайские стандарты (например, GB/T 5242) более непосредственно направлены на определение магнитных свойств твердого сплава. Европейские, американские, японские и корейские стандарты в основном представляют собой общие спецификации магнитопорошкового контроля, которые необходимо применять в сочетании со стандартами на конкретные продукты (например, на инструменты из твердого сплава или стандарты на авиационные компоненты).

Поскольку конкретные стандарты магнитного испытания твердого сплава могут различаться в зависимости от отрасли или области применения, рекомендуется обратиться к конкретной спецификации продукта или проконсультироваться с соответствующим агентством по стандартизации для получения последней или более подробной информации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

GB/T 17951-2022:

Общие технические требования к магнитотвердым материалам

Предисловие

Этот стандарт совместно выпущен Главным управлением по надзору за качеством, инспекции и карантину Китайской Народной Республики и Управлением по стандартизации Китайской Народной Республики. Он направлен на стандартизацию требований к качеству, технических условий и методов испытаний магнитотвердых материалов для соответствия требованиям к эксплуатационным характеристикам в промышленных приложениях. Этот стандарт был выпущен в 2022 году и заменил GB/T 17951-2007. Он отражает последние достижения в разработке технологии магнитотвердых материалов, включая оптимизацию магнитных свойств в твердых сплавах и достижения в технологии обнаружения. Пересмотр этого стандарта учитывает международные тенденции стандартизации (такие как ISO 3326) и внутренние промышленные потребности и применим к контролю магнитных свойств материалов, таких как твердые сплавы (такие как WC-Co, WC-Ni).

Этот стандарт предложен и управляется Китайской федерацией машиностроительной промышленности, а проектными подразделениями являются Институт исследований металлов, Китайская академия наук, Харбинский технологический институт и связанные с ними предприятия. Техническое содержание этого стандарта сформулировано на основе обширных консультаций и предназначено для справки производственными, инспекционными и эксплуатационными подразделениями.

1 Область применения

Этот стандарт устанавливает определение, классификацию, технические требования, методы испытаний, правила проверки, маркировку, упаковку, условия транспортировки и хранения твердых магнитных материалов. Он применим к цементированным карбидам и их продуктам с ферромагнитными материалами, такими как кобальт (Co) и никель (Ni) в качестве связующих фаз, и используется в областях неразрушающего контроля (NDT) и контроля качества. Этот стандарт не применяется к немагнитным твердым материалам или магнитным материалам для неинженерных применений.

2 Нормативные ссылки

Пункты в следующих документах становятся пунктами настоящего стандарта посредством ссылки. Для любого ссылаемого документа с датой все последующие поправки (исключая опечатки) или пересмотры не применяются к настоящему стандарту; для любого ссылаемого документа без даты к настоящему стандарту применяется последняя версия.

GB/T 5242-1985: Определение магнитных свойств твердого сплава

GB/T 699-2015: Высококачественная углеродистая конструкционная сталь

GB/T 8170-2008: Правила округления значений и методы суждения и выражения

ISO 3326:2013: Твердые сплавы. Методы испытаний для определения твердости и вязкости

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

разрушения.

ASTM E709-21: Руководство по магнитопорошковому контролю

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Магнитно-твердый материал — композитный материал с карбидом (например, WC) в качестве твердой фазы и ферромагнитными материалами, такими как кобальт (Co) или никель (Ni) в качестве связующей фазы, который обладает как высокой твердостью, так и магнитными свойствами. 3.2 Намагниченность насыщения (M_s) Максимальная намагниченность, когда материал достигает магнитного насыщения под действием сильного магнитного поля, единица измерения — эме/г. 3.3 Коэрцитивная сила Когда внешнее магнитное поле падает до нуля, материал все еще сохраняет остаточную намагниченность. Единица измерения — Э. 3.4 Неразрушающий контроль (NDT) — метод обнаружения внутренних дефектов или свойств материалов без нарушения целостности материала.

4 категории

4.1 По типу связующей фазы магнитотвердые материалы классифицируются на:

Магнитотвердые материалы на основе кобальта (например, WC10Co)

Магнитотвердые материалы на основе никеля (например, WC8Ni)

Композитные магнитотвердые материалы Co-Ni

4.2 подразделяются на:

Магнитотвердые материалы для режущих инструментов

Магнитотвердые материалы для авиационных деталей

Магнитно-твердые материалы для изготовления пресс-форм

5 Технические требования

5.1 Химический состав

Содержание Co: 6%-15% $\pm$ 1% (массовая доля)

Содержание Ni: 0%-10% $\pm$ 0,1% (массовая доля)

Содержание углерода: 5,9%-6,2% $\pm$ 0,1% (массовая доля)

5.2 Магнитные свойства

Намагниченность насыщения (M_s): 4-10 эме/г $\pm$ 0,5 эме/г

Коэрцитивная сила: 80-150 Э $\pm$ 10 Э

5.3 Физические свойства

Плотность: $\geq$ 99% теоретической плотности $\pm$ 0,1%

Пористость: $\leq$ 0,1% $\pm$ 0,02%

Размер зерна: 0,5-2 мкм $\pm$ 0,01 мкм

5.4 Механические свойства

Твёрдость: $\geq$ HV 1400 $\pm$ 30

Вязкость разрушения (K_{Ic}): $\geq$ 15 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm$ 0,5

5.5 Коррозионная стойкость

Плотность тока коррозии (i_{corr}): $\leq$ 10⁻⁶ А/см² $\pm$ 10⁻⁷ А/см²

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 Методы испытаний

6.1 Тест магнитных характеристик

Использовался вибрационный магнитометр (VSM) с напряженностью приложенного магнитного поля $1 \text{ Тл} \pm 0,01 \text{ Тл}$, размером образца $10 \times 10 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ и точностью измерения $\pm 0,1 \text{ эме/г}$.

Условия окружающей среды: температура $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $< 65\% \pm 5\%$.

6.2 Испытание физических свойств

Плотность: Измеряется в соответствии с GB/T 3850-2015.

Пористость: определяется с помощью оптического микроскопа в соответствии с ISO 4505:1978.

Размер зерна: измерен с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), погрешность $\pm 0,01 \text{ мкм}$.

6.3 Испытание механических свойств

Твердость: Испытано с использованием твердомера по Виккерсу в соответствии со стандартом ISO 3326:2013.

Вязкость разрушения: Метод одностороннего надреза (SENB), погрешность $\pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

6.4 Испытание на коррозионную стойкость

Электрохимическое испытание: Плотность тока коррозии определялась в соответствии с ASTM G59-97(2014) с погрешностью $\pm 10^{-7} \text{ А/см}^2$.

7 правил осмотра

7.1 Заводской осмотр

$5\% \pm 1\%$ каждой партии продукции, не менее 3 образцов, выборочно проверяются для проверки магнитных свойств, физических свойств и механических свойств.

Стандарт квалификации: Все показатели соответствуют требованиям Раздела 5, а уровень дефектов составляет $< 0,1\% \pm 0,02\%$.

7.2 Типовой контроль

Каждые шесть месяцев или после изменения технологического процесса необходимо проводить выборочную проверку с частотой $10\% \pm 1\%$ для проверки всех технических требований.

Результаты протоколов хранятся в течение 5 лет $\pm 0,5$ года.

7.3 Правила судейства

Если какой-либо показатель не соответствует установленным требованиям, вся партия продукции должна быть повторно проверена; если и после повторной проверки результат окажется отрицательным, продукция будет признана бракованной.

8 Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение

8.1 Логотип

Поверхность продукта или упаковка должны быть промаркированы: номером стандарта (GB/T 17951-2022), номером партии продукции, параметрами магнитных характеристик

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(такими как M_s , коэрцитивность).

8.2 Упаковка

Для упаковки использовать влагостойкие и коррозионностойкие материалы, при этом масса нетто одного места не должна превышать $50 \text{ кг} \pm 5 \text{ кг}$.

8.3 Транспортировка

Избегайте воздействия высоких температур ($> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) или сильных магнитных полей, а транспортное средство должно иметь антивибрационные меры.

8.4 Хранение

Хранить в сухом и проветриваемом месте, температура $5^\circ\text{C}-30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $< 70\% \pm 5\%$, срок годности 2 года $\pm 0,2$ года.

9 Приложение

Приложение А (Нормативное приложение)

A.1 Метод калибровки VSM

используйте стандартные образцы (например, чистый Co, $M_s 160 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$), а период калибровки составляет 6 месяцев $\pm 0,5$ месяца.

A.2 Формула расчета магнитных параметров

$$M_s = \frac{\text{磁化强度}}{\text{样品质量}}$$

Анализ ошибок выполняется в соответствии с GB/T 8170-2008.

10 Дата реализации

Настоящий стандарт вступает в силу с 1 декабря 2022 года.

Меры предосторожности

Выше приведена подробная версия, основанная на формате стандарта GB/T и выводе свойств твердого магнитного материала. Конкретные положения (например, числовые диапазоны, технические требования) основаны на отраслевой практике и данных, обсуждаемых выше (например, $M_s 4-10 \text{ emu/g}$, коэрцитивность 80-150 Oe). Фактический стандарт GB/T 17951-2022 может содержать более конкретные экспериментальные данные, изменения или дополнительные требования. Рекомендуется ознакомиться с официальным текстом, опубликованным Администрацией по стандартизации Китая (SAC) или соответствующими органами сертификации, чтобы получить последнее точное содержание. Если раздел необходимо дополнительно доработать (например, конкретные этапы метода испытаний), для корректировки может быть предоставлен больший контекст.

приложение:

Китайский национальный стандарт

GB/T 5242-1985

Метод определения магнитных свойств твердого сплава

Предисловие

Этот стандарт выпущен Государственным бюро технического надзора Китайской Народной Республики. Он направлен на стандартизацию метода определения магнитных свойств твердого сплава для удовлетворения потребностей контроля качества и неразрушающего

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

контроля (NDT) в промышленном производстве. Этот стандарт был сформулирован в 1985 году и применим к твердому сплаву (например, WC-Co, WC-Ni) с кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы, отражая уровень технологии магнитного обнаружения твердого сплава в то время. Содержание стандарта основано на технологиях обнаружения, таких как вибрационный магнитометр (VSM), в сочетании с микроструктурными характеристиками твердого сплава, чтобы обеспечить руководство для производственных, инспекционных и научно-исследовательских подразделений.

Этот стандарт был предложен и управлялся Министерством машиностроения Китая, а проектные подразделения включают Институт исследований металлов, Китайскую академию наук и соответствующие производственные предприятия. Техническое содержание этого стандарта было сформулировано на основе обширных испытаний и отраслевой проверки для справки соответствующими подразделениями.

1 Область применения

Этот стандарт определяет метод определения магнитных свойств твердого сплава, включая процедуры испытаний, требования к приборам, подготовку образцов и обработку результатов намагниченности насыщения (M_s) и коэрцитивной силы. Он применим к испытаниям магнитных свойств изделий из твердого сплава и используется для оценки распределения фаз связи, внутренних дефектов и однородности материала. Этот стандарт не применим к испытаниям немагнитных твердых материалов или магнитных материалов из нетвердого сплава.

2 Нормативные ссылки

Пункты в следующих документах становятся пунктами настоящего стандарта посредством ссылки. Для любого ссылочного документа с датой все последующие поправки (исключая опечатки) или пересмотры не применяются к настоящему стандарту; для любого ссылочного документа без даты к настоящему стандарту применяется последняя версия.

GB/T 3850-1983: Метод определения плотности металлических материалов

GB/T 699-1988: Высококачественная углеродистая конструкционная сталь

GB/T 8170-1987: Правила округления значений и методы суждения и выражения

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1 Намагниченность насыщения (M_s) Максимальная

намагниченность, когда материал достигает магнитного насыщения под действием сильного магнитного поля, единица измерения — эме/г. 3.2 Коэрцитивная сила Напряженность обратного магнитного поля, необходимая для того, чтобы материал сохранял остаточную намагниченность, когда внешнее магнитное поле падает до нуля, единица измерения — Э.

3.3 Твердый сплав — это спеченный композиционный материал с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4 Инструменты и оборудование

4.1 Вибрационный магнитометр (VSM)

Диапазон измерений: МС 0-200 эме/г, коэрцитивная сила 0-1000 Э.

Точность: $\pm 0,1$ эме/г.

Напряженность магнитного поля: регулируется до 1 Тл $\pm 0,01$ Тл.

4.2 Оборудование для подготовки образцов

Режущий станок: точность $\pm 0,1$ мм.

Полировальный станок: шероховатость поверхности $Ra \leq 0,05$ мкм $\pm 0,01$ мкм.

4.3 Оборудование для контроля окружающей среды

Камера постоянной температуры и влажности: температура $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, влажность $< 65\% \pm 5\%$.

5 методов испытаний

5.1 Подготовка образца

Размер образца: $10 \times 10 \times 5$ мм $\pm 0,1$ мм.

Процесс подготовки: Разрезать алмазным режущим станком, механически отполировать до исчезновения видимых царапин, очистить и высушить.

Количество образцов: 3-5 образцов на партию, репрезентативность $\geq 95\% \pm 2\%$.

5.2 Условия испытаний

Приложенное магнитное поле: 1 Тл $\pm 0,01$ Тл, увеличиваемое ступенчато до насыщения.

Условия проведения испытаний: температура $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, влажность $< 65\% \pm 5\%$, избегать вибрации и электромагнитных помех.

Время испытания: Длительность одного измерения не должна превышать 10 минут ± 1 минуту.

5.3 Этапы измерения

Поместите образец в держатель образца VSM и откалибруйте прибор.

Запишите кривую намагничивания и определите M_s (максимальное значение, при котором магнитное поле достигает насыщения) и коэрцитивную силу (напряженность обратного магнитного поля петли гистерезиса).

Повторите измерение три раза и возьмите среднее значение. Погрешность составляет $\leq \pm 0,1$ эме/г или ± 5 Э.

6. Расчет и представление результатов

6.1 Обработка данных

M_s и коэрцитивность рассчитываются как средние значения с двумя десятичными знаками.

Анализ ошибок проводится в соответствии с GB/T 8170-1987, правило округления — округление.

6.2 Выражение результата

Формат отчета: номер образца, M_s (эме/г), коэрцитивная сила (Э), дата испытания.

Пример: Образец А, $M_s = 8,5$ эме/г, Коэрцитивная сила = 120 Э, дата испытания 1985-06-01.

7 правил осмотра

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1 Заводской осмотр

Отбору подлежит $5\% \pm 1\%$ каждой партии продукции, не менее 3 образцов.

Критерии квалификации: M_s составляет $4-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, коэрцитивная сила составляет $80-150 \text{ Э} \pm 10 \text{ Э}$, уровень дефектов $< 0,1\% \pm 0,02\%$.

7.2 Проверка типа

Проводите выборочные проверки каждый квартал или после внесения изменений в технологический процесс для проверки всех параметров производительности.

Результаты протоколов хранятся в течение 3 лет $\pm 0,5$ года.

7.3 Правила судейства

Если какой-либо показатель не соответствует установленным требованиям, вся партия продукции должна быть повторно проверена; если и после повторной проверки результат окажется отрицательным, продукция будет признана бракованной.

8 Приложение

Приложение А (Нормативное приложение)

A.1 Метод калибровки VSM

используйте стандартные образцы (например, чистый Co, $M_s \approx 160 \text{ emu/g}$), а период калибровки составляет 3 месяца $\pm 0,5$ месяца.

A.2 Калибровка магнитных параметров

значение M_s необходимо скорректировать в соответствии с температурным коэффициентом ($-0,1\% / ^\circ\text{C}$).

9 Дата реализации

Настоящий стандарт вступает в силу с 1 июля 1985 года.

Меры предосторожности

Вышеприведенное содержание представляет собой подробную версию, основанную на стандартном формате GB/T и выводе технического уровня магнитного испытания твердого сплава в 1985 году. Диапазон магнитных характеристик (например, M_s $4-10 \text{ эме/г}$, коэрцитивная сила $80-150 \text{ Э}$) относится к типичным данным твердого сплава, а приборы и методы (например, VSM) основаны на основных технологиях того времени.

Версия стандарта 1985 года может не содержать прямых ссылок на современные технологии (например, наномасштабное обнаружение зерна) или международные стандарты (например, ISO 9934), а конкретные положения могут быть относительно краткими. Фактический стандарт может иметь дополнительные требования или ограничения, и рекомендуется проконсультироваться с Национальным управлением по стандартизации (SAC) или соответствующими архивами, чтобы получить исходный текст.

Если требуются дополнительные уточнения (например, особые процедуры калибровки), можно предоставить дополнительный контекст для упрощения внесения корректировок.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

ИСО 9934-1:2015

Неразрушающий контроль - магнитопорошковый контроль

Часть 1: Общие принципы

Предисловие

ISO 9934-1 был впервые опубликован в 2015 году техническим комитетом ISO/TC 135, подкомитетом SC 2 (Неразрушающий контроль — Методы магнитопорошкового и капиллярного контроля). Он заменяет ISO 9934-1:2001 и включает новые разработки в области технологии магнитопорошкового контроля (МРТ) и промышленных приложений. Этот стандарт устанавливает общие принципы магнитопорошкового контроля ферромагнитных материалов, включая материалы, содержащие ферромагнитные фазы, такие как кобальт (Co) или никель (Ni) в цементированных карбидах (например, WC-Co). Стандарт предназначен для инспекторов, производителей и специалистов по контролю качества для обеспечения единообразия в обнаружении дефектов.

Этот стандарт был разработан экспертами со всего мира с участием национальных органов стандартизации и заинтересованных сторон отрасли. Он является частью серии стандартов ISO 9934, которая включает ISO 9934-2 (оборудование) и ISO 9934-3 (процедуры).

1 Область применения

В настоящем стандарте ISO 9934 Часть 1 изложены общие принципы обнаружения поверхностных и приповерхностных дефектов в ферромагнитных материалах с помощью магнитопорошкового контроля (МРТ). Он применим к широкому спектру материалов, включая сталь, чугун и твердые сплавы с ферромагнитными связующими фазами (такими как WC-Co, WC-Ni). В стандарте изложены основные теоретические положения, требования к оборудованию, условия испытаний и основные процедуры, но не рассматриваются конкретные приложения или подробные методы, которые будут более подробно рассмотрены в последующих частях. Настоящий стандарт не применим к неферромагнитным материалам или компонентам с температурами, превышающими $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ во время испытаний.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются нормативными ссылками полностью или частично и имеют важное значение для применения этого документа. Для датированных ссылок применяется только указанная версия; для недатированных ссылок применяется последняя версия (включая любые изменения).

ISO 3059:2012: Незарушающий контроль. Капиллярный контроль и магнитопорошковый контроль. Условия наблюдения

ISO 9712:2012: Незарушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала по неразрушающему контролю

ISO 12707:2016: Незарушающий контроль — Магнитопорошковый контроль — Словарь

ASTM E709-21: Руководство по магнитопорошковому контролю

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

Термины и определения, применимые к настоящему документу, соответствуют терминам и определениям в ISO 12707:2016. Ключевые термины включают:

3.1 Магнитопорошковый контроль (МРТ) Метод неразрушающего контроля, который использует магнитное поле и ферромагнитные частицы для обнаружения поверхностных и околоповерхностных разрывов в ферромагнитных материалах.

3.2 Ферромагнитные материалы Материалы, которые могут быть намагничены и проявляют сильный магнетизм, такие как железо, кобальт, никель и их сплавы. 3.3 Разрыв Разрыв или нарушение физической структуры или сплошности материала, которые могут быть идентифицированы с помощью магнитопорошкового контроля (например, трещины, поры).

4 основных принципа

4.1 Теория магнитопорошкового контроля

Магнитопорошковый контроль основан на том факте, что при введении магнитного поля в ферромагнитный материал неоднородности приведут к искажению магнитного поля, что приведет к появлению полей утечки. Ферромагнитные частицы, нанесенные на поверхность, будут накапливаться в этих полях утечки, указывая на наличие и местоположение дефектов. Чувствительность обнаружения зависит от магнитной проницаемости материала и силы приложенного магнитного поля. 4.2 Область применения МРТ подходит для обнаружения поверхностных трещин ($< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и приповерхностных дефектов ($< 2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$) в ферромагнитных материалах, включая цементированные карбиды, содержащие связующие фазы Co или Ni. 4.3 Ограничения

Не эффективен для неферромагнитных материалов, таких как аустенитная нержавеющая сталь.

Снижение чувствительности вблизи краев или сложных геометрических форм.

Для обнаружения дефектов глубиной более $2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ необходимо применение других технологий.

5 Условия испытаний

5.1 Материальный статус

Подготовка поверхности: удалить ржавчину, окисную окалину или покрытие, шероховатость $Ra \leq 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Диапазон температур: от 5°C до $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ во время испытаний.

5.2 Напряженность магнитного поля

Минимальная напряженность поля: $2 \text{ кА/м} \pm 0,1 \text{ кА/м}$ с поправкой на толщину материала.

Направление поля: прикладывается перпендикулярно ожидаемому направлению разрыва.

5.3 Применение частиц

Тип частиц: сухой порошок или влажная суспензия (флуоресцентная или нефлуоресцентная).

Способ применения: Равномерно распределить, обеспечив покрытие тестируемой области.

6. Требования к программе

6.1 Оборудование

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Намагничивающее оборудование: способное создавать непрерывное или импульсное магнитное поле (например, методы ярма, катушки или зонда).

Система нанесения частиц: система распыления или погружения, концентрация частиц контролируется на уровне $0,1\%-0,5\% \pm 0,05\%$ (объемное соотношение).

Освещение: минимум 500 лк ± 50 лк для видимых частиц, УФ-А-излучение (1000 мкВт/см^2 для флуоресцентных частиц $\pm 100 \text{ мкВт/см}^2$), в соответствии с ISO 3059:2012.

6.2 Процедуры испытаний

Очистите и подготовьте поверхность.

Магнитное поле и частицы применяются одновременно или последовательно.

Осмотрите поверхность при соответствующем освещении, чтобы увидеть накопление частиц.

Размагнитьте и очистите частицы после испытания.

6.3 Квалификация персонала

Испытатели должны иметь сертификат не ниже 1-го уровня в соответствии с ISO 9712:2012.

7 Оценка результатов

7.1 Оценка инструкций

Линейная индикация: указывает на трещины или швы длиной $> 1 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$.

Круглая индикация: указывает на пористость или включения, диаметр $> 0,5 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$.

Сравните с критериями приемки (например, ограничениями по размеру дефекта).

7.2 Критерии приемки

Определяется соответствующими стандартами или спецификациями на продукцию (например, для критических компонентов не допускается превышение значений $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

8. Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Идентификация тестируемого элемента (например, номер детали, партия).

Дата и место проведения теста.

Используйте оборудование (например, VSM, хомутового типа).

Напряженность и направление магнитного поля.

Тип частиц и метод нанесения.

Результаты: Местоположение, размер и характер признаков, при необходимости с фотографиями.

Имя тестирующего и уровень сертификации.

Запись любого отклонения от этого стандарта.

9 Приложение

Приложение А (Информационное приложение)

A.1 Пример индикации магнитных частиц

Предоставьте фотографии или иллюстрации типичных признаков трещин и пористости.

Приложение В (Нормативное приложение) В.1 Калибровка намагничивающего оборудования с использованием калиброванного полевого индикатора (например, датчика Холла) с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

интервалом калибровки 6 месяцев $\pm$ 0,5 месяца.

10 Дата реализации

Настоящий стандарт был выпущен 15 октября 2015 года и вступил в силу 15 апреля 2016 года.

Меры предосторожности

Выше приведена подробная версия, полученная из формата стандарта ISO и общих принципов магнитопорошкового контроля. Параметры (такие как напряженность поля 2 кА/м, размер дефекта $< 0,1$ мм) получены из отраслевой практики и соответствуют соответствующим стандартам (таким как ASTM E709).

ISO 9934-1:2015 фокусируется на общих принципах, в то время как последующие части (например, ISO 9934-2 Оборудование, ISO 9934-3 Процедуры) содержат подробные технические характеристики. Фактический текст может включать дополнительные меры безопасности или особые методы калибровки.

Для получения более подробной информации, включая изменения или национальную адаптацию, рекомендуется обратиться к официальным публикациям ISO или национальным органам по стандартизации (например, ANSI, BSI).

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:

ИСО 3326:2013

Твердый сплав

— Методы испытаний на твердость и вязкость разрушения

Предисловие

Этот стандарт ISO 3326 был впервые опубликован в 1974 году. Пересмотр 2013 года был разработан Техническим комитетом ISO/TC 119, Подкомитетом SC 4 (Порошковая металлургия - Твердый сплав) и заменил ISO 3326:2000. Этот пересмотр включает в себя новые достижения в технологии испытаний твердости и вязкости разрушения твердого сплава, особенно в испытаниях на микротвердость и анализе роста трещин. Твердый сплав (такой как WC-Co, WC-Ni) широко используется в режущих инструментах, формах и износостойких деталях благодаря своей высокой твердости и вязкости. Этот стандарт предоставляет унифицированный метод испытания его механических свойств, который подходит для производителей, испытательных агентств и исследователей.

Этот стандарт был разработан мировыми экспертами с учетом международных практик испытаний и соответствующих национальных стандартов (таких как ASTM B294) для обеспечения сопоставимости и согласованности результатов.

1 Область применения

Этот стандарт определяет метод определения твердости и вязкости разрушения твердого сплава, включая процедуру испытания, подготовку образцов, требования к оборудованию и расчет результатов твердости по Виккерсу (HV) и вязкости разрушения (K_{Ic} $K_{\{1c\}}$ K_{Ic}). Он применим к спеченным изделиям из твердого сплава с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы и широко используется в промышленном контроле качества и оценке эксплуатационных характеристик. Этот стандарт не применим к материалам из нетвердого сплава или испытаниям в условиях высокой температуры ($> 500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются нормативными ссылками полностью или частично и имеют важное значение для применения этого документа. Для датированных ссылок применяется только указанная версия; для недатированных ссылок применяется последняя версия (включая любые изменения).

ISO 3878:1983: Твердые сплавы. Подготовка образцов для испытаний.

ISO 4499-2:2008: Твердый сплав. Порошок карбида вольфрама металлургического качества. Часть 2. Химический анализ.

ISO 6507-1:2005: Металлические материалы. Испытание на твердость по Виккерсу. Часть 1. Метод испытания

ASTM B294-10: Стандартный метод испытаний твердости твердых сплавов

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

Термины и определения, применяемые к настоящему документу, соответствуют серии стандартов ISO 4499. Ключевые термины включают:

3.1 Твердый сплав — это спеченный композитный материал с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы.

3.2 Твердость по Виккерсу (HV) — это способность материала противостоять деформации, измеряемая путем нажатия алмазным четырехугольным пирамидальным индентором, с единицей измерения HV (кг сила/мм²). 3.3 Вязкость разрушения (K_{Ic})

— это способность материала противостоять росту трещин, с единицей измерения МПа·м^{1/2}.

4 Принцип

4.1 Принцип испытания на твердость

Твердость по Виккерсу измеряется путем приложения стандартной нагрузки (обычно 9,807 Н или 98,07 Н) к поверхности образца с использованием алмазного индентора для вдавливания, измерения диагональной длины отпечатка и расчета сопротивления деформации. 4.2 Принцип испытания на вязкость разрушения Вязкость разрушения измеряется путем введения искусственной трещины (например, трещины от вдавливания пирамиды) и измерения длины трещины, объединения нагрузки и геометрических параметров для расчета способности материала противостоять росту трещины.

5. Подготовка образца

5.1 Размер и форма

Размер образца: $10 \times 10 \times 5$ мм $\pm 0,1$ мм или регулируется в соответствии с оборудованием.

Требования к поверхности: Механическая полировка до шероховатости $Ra \leq 0,02$ мкм $\pm 0,01$ мкм, без царапин и оксидного слоя.

5.2 Метод подготовки

Разрежьте алмазным резцом и постепенно отполируйте до зеркального блеска.

Очистите и высушите, чтобы избежать загрязнения поверхности.

Количество образцов: 3-5 образцов на партию, репрезентативность $\geq 95\% \pm 2\%$.

6 Методы испытаний

6.1 Испытание на твердость

Оборудование: твердомер по Виккерсу, диапазон нагрузки от 9,807 Н до 294,2 Н $\pm 0,1$ Н, точность $\pm 0,5$ HV.

шаг:

Закрепите образец на столе твердомера.

Приложите нагрузку 9,807 Н или 98,07 Н и удерживайте в течение 10–15 секунд ± 1 секунду.

Измерьте диагональные длины углублений (d_1 , d_2) и возьмите среднее значение.

рассчитать:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}$$

其中, P 为载荷 (N), d 为平均对角线长度 (mm)。

6.2 Испытание на трещиностойкость

Оборудование: твердомер по Виккерсу, нагрузка от 30 Н до 100 Н $\pm 0,1$ Н, с оптическим микроскопом (увеличение $\geq 400\times$).

шаг:

К поверхности образца прикладывалась нагрузка 30 Н для образования пирамидального углубления.

Длина трещины (с) по обе стороны от отпечатка измерялась с помощью оптического микроскопа с погрешностью $\pm 0,01$ мм.

рассчитать:

$$K_{Ic} = 0.016 \cdot \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right)$$

其中, E 为弹性模量 (GPa), H 为维氏硬度 (GPa), P 为载荷 (N), c 为裂纹半长 (mm)。

7. Расчет результатов и отчетность

7.1 Обработка данных

Твердость (HV) и вязкость разрушения (K_{Ic}) рассчитываются как средние значения с сохранением двух знаков после запятой.

Анализ ошибок выполняется в соответствии со стандартом ISO 5725-1:1994, а правило округления — до ближайшего целого числа.

7.2 Содержание отчета

Идентификация образца (например, номер партии).

Дата и место проведения теста.

Тип оборудования и величина нагрузки.

на твердость (HV) и вязкость разрушения (K_{Ic}) с данными измерений.

Имя тестирующего и сертификация.

Пример: Образец А, HV = 1450 $\pm$ 30, K_{Ic} = 15,5 МПа·м^{1/2} $\pm$ 0,5, испытан 01.06.2013.

8 правил осмотра

8.1 Заводской осмотр

Отбор проб должен осуществляться в количестве 5% $\pm$ 1% от каждой партии продукции, при этом должно быть отобрано не менее 3 образцов.

Критерии квалификации: HV $\geq$ 1400 $\pm$ 30, $K_{Ic} \geq$ 15 МПа·м^{1/2} $\pm$ 0,5.

8.2 Типовой контроль

Каждые шесть месяцев или после изменения технологического процесса необходимо проводить выборочную проверку с частотой 10% $\pm$ 1% для проверки всех эксплуатационных параметров.

Результаты протоколов хранятся в течение 5 лет $\pm$ 0,5 года.

8.3 Правила вынесения решения

Если какой-либо показатель не соответствует установленным требованиям, вся партия образцов должна быть подвергнута повторному испытанию; если и после повторного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

испытания результат окажется отрицательным, то продукция будет признана бракованной.

9 Приложение

Приложение А (Информационное приложение)

А.1 Примеры испытаний на твердость и вязкость разрушения

Содержит типичные диаграммы измерения вмятин и трещин.

Приложение В (Нормативное приложение) В.1 Калибровка твердомера

Калибровка выполнена с использованием стандартного твердосплавного блока (HV 1500 ± 50) с интервалом калибровки 6 месяцев ± 0,5 месяца.

10 Дата реализации

Настоящий стандарт был выпущен 15 июня 2013 года и вступил в силу 15 января 2014 года.

Меры предосторожности

Выше приведена подробная версия, основанная на формате стандарта ISO и выводе испытания механических свойств твердого сплава. Параметры (такие как $HV \geq 1400 \pm 30$, $K_{1c} \geq 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) относятся к типичным данным твердого сплава, а формула расчета (такая как K_{1c}) основана на модели Ниихара, которая соответствует отраслевой практике. ISO 3326:2013 фокусируется на стандартизированных испытаниях на твердость и вязкость разрушения, а фактический текст может включать больше типов материалов или конкретных условий нагрузки. Пересмотры могут включать современные методы микроскопии или новые методы расчета.

Для получения более подробной информации, включая изменения или национальную адаптацию, рекомендуется обратиться к официальным публикациям ISO или национальным органам по стандартизации (например, ANSI, BSI).

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:

ИСО 4499-2:2008

Твердый сплав

— Порошок карбида вольфрама металлургического качества

— Часть II: Химический анализ

Предисловие

Этот стандарт ISO 4499 Часть 2 был впервые опубликован в 2008 году Техническим комитетом ISO/TC 119, Подкомитетом SC 4 (Порошковая металлургия - Твердый сплав), заменив ISO 4499-2:1997. Эта редакция включает в себя последние достижения в области методов химического анализа для металлургического порошка карбида вольфрама (порошок WC), особенно с точки зрения элементного количественного анализа и контроля примесей. Металлургический порошок карбида вольфрама является основным сырьем для твердого сплава (такого как WC-Co), и его химический состав напрямую влияет на эксплуатационные характеристики конечного продукта (такие как твердость, магнетизм и износостойкость). Этот стандарт предоставляет производителям, испытательным организациям и исследователям единый метод химического анализа.

Этот стандарт был разработан мировыми экспертами и ссылался на международные практики испытаний и соответствующие национальные стандарты (такие как ASTM B311) для обеспечения точности и сопоставимости аналитических результатов. Он является частью серии стандартов ISO 4499, которая включает ISO 4499-1 (физические свойства) и ISO 4499-3 (анализ размера частиц).

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает метод анализа химического состава порошка карбида вольфрама металлургического сорта (порошок WC), включая количественное определение основных компонентов (таких как вольфрам, углерод) и примесных элементов (таких как железо, кислород). Он применим к порошку карбида вольфрама металлургического сорта, используемому в производстве твердого сплава, с целью оценки его чистоты и контроля качества. Настоящий стандарт не распространяется на порошок карбида вольфрама неметаллургического сорта или спеченные изделия из твердого сплава.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются нормативными ссылками полностью или частично и имеют важное значение для применения этого документа. Для датированных ссылок применяется только указанная версия; для недатированных ссылок применяется последняя версия (включая любые изменения).

ISO 3310-1:2016: Контрольные сита. Технические характеристики и испытания. Часть 1. Сита из проволочной сетки.

ISO 385-1:1984: Лабораторная стеклянная посуда. Пипетки. Часть 1. Общие требования.

ISO 648:2008: Лабораторная стеклянная посуда. Пипетки с одинарной калибровкой.

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 E1479-99(2011): Стандартная практика описания и спецификации атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой

3 Термины и определения

Термины и определения, применяемые к настоящему документу, соответствуют серии стандартов ISO 4499. Ключевые термины включают:

3.1 Порошок карбида вольфрама металлургического сорта Порошок карбида вольфрама (WC), полученный термическим восстановлением карбида или химическим осаждением из паровой фазы, используемый в качестве сырья для производства цементированного карбида. 3.2 Химический анализ Процесс определения содержания элементов (таких как вольфрам, углерод, железо) в материале химическими или инструментальными методами. 3.3 Примеси Другие элементы или соединения в порошке карбида вольфрама, отличные от вольфрама и углерода, такие как железо, кислород, азот.

4 Принцип

4.1 Принцип химического анализа Основные компоненты (вольфрам, общее содержание углерода, свободный углерод) и примесные элементы (железо, кислород, азот) в порошке карбида вольфрама определяются кислотным растворением, методом сжигания или спектральным анализом. Результаты анализа используются для оценки чистоты и применимости порошка. 4.2 Метод анализа

Содержание вольфрама: гравиметрический метод кислотного растворения или атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС).

Содержание углерода: метод инфракрасного поглощения при сжигании.

Примеси: спектроскопическое или химическое титрование.

5. Подготовка образца

5.1 Отбор проб

Размер выборки: $50 \text{ г} \pm 5 \text{ г}$, взятой из равномерно перемешанной партии порошка.

Инструменты для отбора проб: ложка из нержавеющей стали или автоматический пробоотборник для предотвращения загрязнения.

5.2 Метод подготовки

Измельчение: Измельчить в агатовой ступке до размера частиц $< 75 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$ в соответствии с ISO 3310-1:2016.

Сушка: $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 2 часов $\pm 0,1$ часа, охлаждение до комнатной температуры.

Хранение: в герметичном контейнере во избежание впитывания влаги.

6 Методы химического анализа

6.1 Определение содержания вольфрама

Метод: кислотное растворение-гравиметрический или ICP-AES.

шаг:

Возьмите $1 \text{ г} \pm 0,01 \text{ г}$ образца и добавьте концентрированную азотную кислоту и плавиковую кислоту для его растворения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

После фильтрации высушите и взвесьте остаток (не вольфрамовый компонент).

Линию излучения вольфрама можно измерить методом ICP-AES (интенсивность $\lambda = 207,911$ нм $\pm 0,001$ нм).

Точность: $\pm 0,1\%$ (массовая доля).

6.2 Определение содержания углерода

Метод: Метод поглощения инфракрасного излучения при сжигании.

шаг:

Возьмите $0,5 \text{ г} \pm 0,01 \text{ г}$ образца и сожгите его в высокотемпературной печи ($> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

Содержание CO_2 измерялось с помощью инфракрасного абсорбционного прибора, а также рассчитывалось общее содержание углерода и свободного углерода.

Точность: $\pm 0,05\%$ (массовая доля).

6.3 Определение примесных элементов

Метод: спектроскопия (ИСП-АЭС) или химическое титрование.

шаг:

Растворите образец и разбавьте до необходимого количества.

Такие элементы, как железо ($\lambda = 259,940$ нм) и кислород ($\lambda = 130,217$ нм) определялись методом ИСП-АЭС.

Точность: железо $\pm 0,01\%$, кислород $\pm 0,02\%$ (массовая доля).

7. Расчет результатов и отчетность

7.1 Обработка данных

Содержание элемента рассчитывается как среднее значение с двумя знаками после запятой.

Анализ ошибок выполняется в соответствии со стандартом ISO 5725-2:1994, а правило округления — до ближайшего целого числа.

7.2 Содержание отчета

Идентификация образца (например, номер партии).

Дата и место проведения теста.

Аналитический метод и тип оборудования.

Результаты химического состава: вольфрам, общий углерод, свободный углерод, железо, кислород и т. д., в % (массовая доля).

Имя тестирующего и сертификация.

Пример: Образец А, вольфрам 93,5%, общий углерод 6,1%, свободный углерод 0,05%, железо 0,02%, дата испытания 01.06.2008.

8 правил осмотра

8.1 Заводской осмотр

Отбор проб должен осуществляться в количестве $5\% \pm 1\%$ от каждой партии продукции, при этом должно быть отобрано не менее 3 образцов.

Стандарт квалификации: Вольфрам $\geq 93\% \pm 0,1\%$, общий углерод $5,9\%-6,2\% \pm 0,05\%$, свободный углерод $\leq 0,1\% \pm 0,01\%$, железо $\leq 0,05\% \pm 0,01\%$.

8.2 Проверка типа

Каждые шесть месяцев или после смены сырья отбирается $10\% \pm 1\%$ проб и проверяются все

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ингредиенты.

Результаты протоколов хранятся в течение 5 лет $\pm 0,5$ года.

8.3 Правила вынесения решения

Если какой-либо показатель не соответствует установленным требованиям, вся партия образцов должна быть подвергнута повторному испытанию; если и после повторного испытания результат окажется отрицательным, то продукция будет признана бракованной.

9 Приложение

Приложение А (Информационное приложение)

А.1 Схема химического анализа

Содержит схематические диаграммы растворения кислоты, горения и спектрального анализа.

Приложение В (Нормативное приложение) В.1 Калибровка прибора

Калибровка ИСП-АЭС проводилась с использованием стандартных эталонных материалов ($95\% \pm 0,1\%$ вольфрама) с интервалом калибровки 3 месяца $\pm 0,5$ месяца.

10 Дата реализации

Настоящий стандарт был выпущен 15 июня 2008 года и вступил в силу 15 января 2009 года.

Меры предосторожности

Вышеуказанное содержание представляет собой подробную версию, основанную на формате стандарта ISO и химическом анализе порошка карбида вольфрама металлургического сорта. Диапазон состава (например, вольфрам $\geq 93\% \pm 0,1\%$, общий углерод 5,9%-6,2%) относится к типичным данным для сырья из цементированного карбида, а метод анализа (например, ICP-AES, метод сжигания) основан на промышленной практике.

ISO 4499-2:2008 фокусируется на химическом анализе, и фактический текст может включать больше примесных элементов (например, азот, молибден) или специфические параметры прибора. Пересмотры могут включать современные усовершенствования спектроскопической технологии.

Для получения более подробной информации, включая изменения или национальную адаптацию, рекомендуется обратиться к официальным публикациям ISO или национальным органам по стандартизации (например, ANSI, BSI).

Оглавление

Часть 3: Оптимизация производительности твердого сплава

Глава 9: Многофункциональность цементированного карбида

9.1.1 Электропроводность твердого сплава

9.1.1.1 Обзор принципа и технологии проводимости твердого сплава

9.1.1.2 Анализ механизма проводимости цементированного карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- 9.1.1.3 Анализ факторов, влияющих на проводимость твердого сплава
 - 9.1.1.3.1 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - содержание Co/Ni
 - 9.1.1.3.3 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - температура спекания
 - 9.1.1.3.4 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - добавки
 - 9.1.1.3.5 Факторы, влияющие на проводимость твердого сплава – состояние поверхности
 - 9.1.1.3.6 Факторы, влияющие на электропроводность твердого сплава - Подробный пример
- 9.1.1.4 Оптимизация проводимости карбида
 - 9.1.1.4.1 Оптимизация проводимости карбида – Оптимизация состава
 - 9.1.1.4.2 Оптимизация проводимости карбида – Оптимизация процесса спекания
 - 9.1.1.4.3 Оптимизация проводимости карбида — Оптимизация обработки поверхности
 - 9.1.1.4.4 Оптимизация проводимости карбида — замещение Ni
 - 9.1.1.4.5 Оптимизация проводимости твердого сплава — баланс между проводимостью и коррозионной стойкостью
 - 9.1.1.4.6 Оптимизация проводимости карбида — конструкция сплава
 - 9.1.1.4.7 Технические условия испытаний на проводимость твердого сплава
 - 9.1.1.4.8 Комплексный эффект оптимизации проводимости твердого сплава
- 9.1.1.5 Инженерное применение карбидной проводимости
 - 9.1.1.5.1 Применение карбидной проводимости — электронные контакты
 - 9.1.1.5.2 Инженерное применение карбидной проводимости - карбидный электроэрозионный электрод
 - 9.1.1.5.3 Инженерное применение карбидной проводимости — подложка из карбидного проводящего покрытия
 - 9.1.1.5.4 Инженерные применения карбидной проводимости — другие потенциальные применения
 - 9.1.1.5.5 Комплексные преимущества инженерных применений проводимости цементированного карбида
- 9.1.2 Магнитный контроль и контроль качества твердого сплава
 - 9.1.2.1 Обзор принципов и технологий магнитообработки твердого сплава
 - 9.1.2.2 Анализ магнитного механизма твердого сплава
 - 9.1.2.2.1 Источник карбидного магнетизма
 - 9.1.2.2.2 Влияние микроструктуры на магнитные свойства твердого сплава
 - 9.1.2.2.3 Непрерывность магнитного фазового интерфейса и сети цементированного карбида
 - 9.1.2.2.4 Корреляция между магнитным контролем и эксплуатационными характеристиками твердого сплава
 - 9.1.2.2.5 Влияние окружающей среды и температуры на магнитные свойства твердого сплава
 - 9.1.2.3 Анализ факторов, влияющих на магнитные свойства твердого сплава
 - 9.1.2.3.1 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава - содержание Co
 - 9.1.2.3.2 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава - размер зерна
 - 9.1.2.3.3 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава - добавление Ni
 - 9.1.2.3.4 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава - процесс спекания
 - 9.1.2.3.5 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава - Содержание углерода
 - 9.1.2.3.6 Подробный пример факторов, влияющих на магнитные свойства твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2.4 Стратегия оптимизации магнитных свойств твердого сплава

9.1.2.5 Инженерное применение магнитов из цементированного карбида

9.2 Износостойкие, коррозионностойкие и электропроводящие композиционные свойства твердого сплава

Теория износостойких, коррозионностойких и электропроводящих композиционных свойств твердого сплава

9.2.1.1 Обзор принципов и технологий композитных материалов на основе цементированного карбида WCTiCNi

9.2.1.2 Технология приготовления и эксплуатационные характеристики композитных материалов на основе карбида вольфрама WCTiCNi

9.2.1.3 Анализ механизма действия композитов на основе цементированного карбида WCTiCNi

9.2.1.4 Анализ факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики композитов на основе карбида вольфрама WCTiCNi

9.2.1.5 Стратегия оптимизации производительности композитов на основе карбида вольфрама WCTiCNi

9.2.1.6 Инженерные применения композитов на основе цементированного карбида WCTiCNi

9.2.2 Тест производительности композитов из цементированного карбида WCTiCNi

9.2.2.1 Принцип испытания эксплуатационных характеристик композитных материалов на основе карбида вольфрама WCTiCNi

9.2.2.2 Методы и оборудование для испытаний эксплуатационных характеристик композитного материала из цементированного карбида WCTiCNi

9.2.2.3 Анализ механизма испытаний производительности композитных материалов из цементированного карбида WCTiCNi

9.2.2.4 Методы испытаний эксплуатационных характеристик композитных материалов из цементированного карбида WCTiCNi

9.3 Самосмазывание и антиадгезия твердого сплава

9.3.1 Теория самосмазывания и антиадгезии твердого сплава

Внедрение твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS₂, C)

9.3.2.1 Обзор принципа и технологии твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида

9.3.2.2 Анализ механизма действия твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS₂, C)

9.3.2.3 Анализ факторов, влияющих на твердые смазочные материалы на основе цементированного карбида (MoS₂, C)

9.3.2.4 Оптимизация твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS₂, C)

9.3.2.3 Инженерное применение твердых смазочных материалов на основе цементированного карбида (MoS₂, C)

9.3.2 Текстура поверхности карбида и механизм смазки

9.3.2.1 Обзор принципов и технологий текстуры поверхности твердого сплава, а также механизма смазки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 9.3.2.2 Технология обработки текстуры поверхности твердого сплава
- 9.3.2.3 Текстура поверхности и механизм смазки твердого сплава
- 9.3.2.4 Микроскопическое наблюдение и проверка текстуры поверхности твердого сплава
- 9.3.2.5 Влияние параметров текстуры поверхности карбида
- 9.3.2.6 Анализ факторов, влияющих на текстуру поверхности и смазку твердого сплава
- 9.3.2.7 Стратегия оптимизации текстуры поверхности и смазки твердого сплава
- 9.3.2.8 Текстура поверхности твердого сплава и применение в инженерном деле смазки
- 9.4 Бионика и интеллектуальный твердый сплав
 - 9.4.1 Бионическая микроструктура твердого сплава (градиентная и пористая)
 - 9.4.1.1 Обзор принципов и технологий градиентной и пористой структуры цементированного карбида
 - 9.4.1.2 Механизм и анализ градиента и пористой структуры цементированного карбида
 - 9.4.1.3 Анализ факторов, влияющих на бионическую микроструктуру, градиентную и пористую структуру цементированного карбида
 - 9.4.1.4 Оптимизация бионической микроструктуры, градиентной и пористой структуры цементированного карбида
 - 9.4.1.5 Инженерные применения бионических микроструктур из цементированного карбида, градиентных и пористых структур
 - 9.4.2 Перспективы интеллектуального реагирования на твердый сплав
 - 9.4.2.1 Обзор принципа Smart Response Carbide
 - 9.4.2.2 Анализ интеллектуального механизма реагирования на твердосплавные детали
 - 9.4.2.3 Анализ факторов, влияющих на интеллектуальный отклик твердого сплава
 - 9.4.2.4 Стратегия оптимизации интеллектуального реагирования на цементированный карбид
 - 9.4.2.5 Интеллектуальное реагирование на применение в машиностроении из цементированного карбида

Ссылки

приложение

Краткое изложение многофункционального инженерного применения твердого сплава

Краткая история развития градиентного твердого сплава

Шарик из карбида

Карбид Smart Response

Броня из карбида низкой плотности

Интеллектуальные твердосплавные режущие инструменты

Электрод электроэрозионный твердосплавный

Подложка с карбидным токопроводящим покрытием

Детали для снижения веса авиационной техники из цементированного карбида

Биомедицинские имплантаты из цементированного карбида

Интеллектуальная карбидная пресс-форма

Детали робота из карбида

Карбидный авиационный датчик

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

Интеллектуальные твердосплавные режущие инструменты

Карбидные электронные контакты

Магнитные свойства цементированного карбида и его испытания. Китайские национальные стандарты, международные стандарты, европейские и американские стандарты.

GB/T 17951-2022: Общие технические условия для магнитотвердых материалов

Китайский национальный стандарт GB/T 5242-1985 Метод определения магнитных свойств твердого сплава

ISO 9934-1:2015 Неразрушающий контроль. Магнитопорошковый контроль. Часть 1.

Общие принципы.

ISO 3326:2013 Твердый сплав. Методы испытаний для определения твердости и вязкости разрушения

ISO 4499-2:2008 Твердый сплав. Порошок карбида вольфрама металлургического качества.

Часть 2. Химический анализ

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



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