

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

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Глава 3: Физические и химические свойства твердого сплава

Вольфрамовый цементированный карбид стал основным материалом для режущих инструментов, износостойких деталей, горнодобывающего оборудования, аэрокосмического, химического оборудования, ядерных энергетических установок и глубоководных устройств благодаря своим превосходным физическим и химическим свойствам. Эти свойства включают механические свойства (твердость, ударная вязкость, прочность на сжатие, прочность на изгиб), термические свойства (теплопроводность, коэффициент теплового расширения, высокая температурная стабильность, стойкость к тепловому удару), химическую стабильность (коррозионная стойкость, стойкость к окислению) и электрические и магнитные свойства (проводимость, магнетизм фазы Co), которые вытекают из жесткости ковалентной связи карбида вольфрама (WC) и пластической синергии фазы связи кобальта (Co) или никеля (Ni).

В этой главе анализируются каждое физико-химическое свойство, методы проверки и тестирования, факторы, влияющие на различные аспекты производительности, и расширенные случаи применения, а также глубоко исследуются теоретические основы, технология тестирования, механизм регулирования, адаптивность к окружающей среде и производительность рабочих условий. С помощью подробных теоретических моделей, точных экспериментальных данных, богатых случаев в разных областях и анализа влияния на производительность эта глава раскрывает внутренний механизм физико-химических свойств, предоставляя всеобъемлющую справочную информацию для оптимизации производительности, адаптации к экстремальным рабочим условиям и междисциплинарного исследования твердого сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3.1 Механические свойства твердого сплава

Механические свойства являются краеугольным камнем надежности твердого сплава в условиях высоких нагрузок, ударов, износа и сложных напряжений и широко используются в резке, горнодобывающей промышленности, штамповке, авиации и глубоководном бурении. В этом разделе последовательно анализируются твердость, вязкость, прочность на сжатие и прочность на изгиб, а также добавляются новые методы проверки и испытаний и факторы влияния.

3.1.1 Твердость твердого сплава

Твердость относится к способности материала противостоять давлению или царапанию его поверхности внешними объектами и является одним из важных показателей для измерения механических свойств материала. Твердость обычно отражает прочность, износостойкость и сопротивление деформации материала и часто характеризуется его способностью противостоять сжатию, сдвигу или пластической деформации. Обычные методы измерения включают твердость по Бринеллю (HB), твердость по Роквеллу (HR), твердость по Виккерсу (HV) и твердость по Шору (HS), и их значения рассчитываются на основе типа индентора (например, стальной шарик или алмаз), размера нагрузки и площади отпечатка (ISO 6507, ASTM E10). Например, твердость по Виккерсу твердого сплава обычно составляет HV 1200-2400, в зависимости от размера зерна и содержания связующей фазы. Твердость тесно связана с микроструктурой материала (например, размером зерна, фазовым составом) и термической обработкой и является ключевой основой для выбора материалов и оценки долговечности.

Твердость по Виккерсу (HV) цементированного карбида составляет $1500 - 2500 \pm 30$, что значительно превышает твердость быстрорежущей стали (HV 800 - 1000), керамики (HV 1200 - 1800) и титановых сплавов (HV 300 - 400), что является основой его износостойкости. Твердость обусловлена ковалентной сетью связей WC (энергия связи WC $6,0 \text{ эВ} \pm 0,2 \text{ эВ}$, длина связи $2,0 \text{ \AA} \pm 0,05 \text{ \AA}$), а его гексагональная кристаллическая структура (P6m2, модуль Юнга $700 \text{ ГПа} \pm 10 \text{ ГПа}$) обеспечивает устойчивость к пластической деформации. Твердость твердого сплава, содержащего 10% Co, составляет $HV 1800 \pm 30$, а твердость твердого сплава, содержащего 20% Co, снижается до $HV 1400 \pm 30$, поскольку мягкость фазы Co (HV 300 - 400, гранецентрированная кубическая структура ГЦК) снижает прочность на сжатие.

Твердость твердого сплава исключительная.

При 600°C твердость цементированного карбида, содержащего 6% Co, сохраняется на уровне $HV 1500 \pm 30$, падает до $HV 1200 \pm 20$ при 800°C и падает до $HV 1000 \pm 30$ при 1000°C , что лучше, чем у быстрорежущей стали (падает до HV 500 при 600°C) и керамики (падает до HV 800 при 1000°C). Добавление Cr_3C_2 (0,5%1%) увеличивает твердость до $HV 1900 - 2200 \pm 50$ за счет упрочнения твердого раствора (атомный радиус Cr $1,28 \text{ \AA}$, деформация решетки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$<2\% \pm 0,2\%$). Например, инструмент из твердого сплава (HV 1900), содержащий 8% Co и 0,5% Cr з C₂, имеет величину износа $<0,1 \text{ мм} \pm 0,02 \text{ мм}$ и срок службы 15 часов ± 1 час при высокоскоростной резке нержавеющей стали (предел прочности $> 1000 \text{ МПа}$, скорость резания 200 м/мин, коэффициент трения $< 0,3 \pm 0,05$), что лучше, чем у керамических инструментов (срок службы < 5 часов, величина износа $> 0,3 \text{ мм}$).

Влияние окружающей среды на твердость требует внимания.

В жаркой и влажной среде (40°C , влажность 90%, 168 часов) вызывается микрокоррозия фазы Co (потеря веса $<0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,02 \text{ мг/см}^2$, глубина коррозии $<1 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$), а твердость уменьшается на $<2\% \pm 0,5\%$; в экстремально холодной среде (40°C) твердость немного увеличивается на $1\% \pm 0,3\%$ из-за охрупчивания фазы Co (пластическая деформация уменьшается на $<3\% \pm 0,3\%$); при высоком давлении ($>100 \text{ МПа}$, глубина моря 5000 м) существенных изменений не происходит (уменьшение $<0,5\% \pm 0,1\%$); радиация (атомная энергетика, 10^4 Гр , γ -лучи) вызывает точечные дефекты, а твердость уменьшается на $<1\% \pm 0,2\%$.

Ni-содержащий карбид вольфрама (12% Ni, HV 1700 ± 30) более стабилен в морской среде (соленость 3,5%, pH 8, Cl⁻ 19 г/л), с падением твердости $<1\%$. В практическом применении ролики из карбида вольфрама, содержащие 6% Co, имеют глубину износа $<0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и срок службы $>300 \text{ часов} \pm 20 \text{ часов}$ в горнодобывающей промышленности (гранит, твердость породы $>1000 \text{ МПа}$, частота ударов $>1000 \text{ раз/мин}$), что лучше, чем у быстрорежущей стали (срок службы $<50 \text{ часов}$).

Оптимизация твердости требует компромисса с прочностью.

Добавление TiC (10%15%, твердость $20 \text{ ГПа} \pm 1 \text{ ГПа}$) увеличивает твердость до HV 2000 ± 50 , одновременно снижая плотность (до $12 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$), что подходит для легких авиационных деталей, таких как формы для лопаток турбин (нагрузка $>2000 \text{ МПа}$, допуск деформации $<0,01 \text{ мм}$). При композитной штамповке (600°C , частота $>10^4 \text{ раз/час}$) шероховатость поверхности формы из цементированного карбида, содержащей 15% TiC, составляет $Ra < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,02 \text{ мкм}$, а срок службы увеличивается на $40\% \pm 5\%$, что лучше, чем у стальных форм ($Ra > 0,5 \text{ мкм}$, срок службы $<2000 \text{ часов}$). Междоменное сравнение показывает, что твердость твердого сплава выше, чем у высокопрочной стали (HV 600-800) и титанового сплава (HV 300-400), но ниже, чем у алмаза (HV >8000).

3.1.1.1 Метод выражения твердости

Существует много способов выражения твердости, подходящих для различных сценариев испытаний и сравнений материалов:

Твёрдость по Виккерсу (HV)

Твердость по Виккерсу (HV) — стандартный метод точного измерения твердости материалов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Он использует алмазный пирамидальный индентор (угол при вершине 136°) для вдавливания в поверхность материала под определенной нагрузкой (обычно 5–100 кгс, диапазон может быть расширен до 1–120 кгс), и после выдержки в течение 10–15 секунд измеряется диагональная длина отпечатка (d , единица измерения мм) для расчета значения твердости. Формула выглядит следующим образом: $HV = 1,8544 \times F / d^2$, где F — приложенная нагрузка (кгс), d — средняя диагональная длина отпечатка (мм), а результат выражается в кгс / мм², что обычно напрямую обозначается как значение HV (ISO 6507-1:2018).

Твердость по Виккерсу применима к различным материалам, включая твердый сплав, сталь, керамику и тонкослойные материалы, из-за его малого отпечатка (диаметр 0,01-1 мм), высокой точности (погрешность <5%) и широкого диапазона испытаний (HV 10-3000+). Например, HV обычного твердого сплава составляет 1200-2000, в то время как у наномасштабного твердого сплава (зерна 0,05-0,2 мкм) может достигать 2000-2400 (Journal of Materials Science 2025). Его преимущество в том, что он может испытывать крошечные области (например, покрытия) или тонкие листы (толщина >0,1 мм), но время испытания велико, а требования к плоскостности поверхности высоки ($Ra < 0,8$ мкм, ITIA 2024).

Твёрдость по Роквеллу (HRC/HRB)

Твердость по Роквеллу (HRC/HRB) является распространенным методом измерения твердости материалов. Индентор (алмазный конус или стальной шарик) вдавливается в материал под начальной нагрузкой (10 кгс) и полной нагрузкой (60-150 кгс), а значение твердости определяется путем измерения разницы в глубине вдавливания (ASTM E18-22). Он характеризуется быстрым испытанием, малым вдавливанием и простой операцией и широко используется в металлических материалах.

HRC : используйте алмазный конусный индентор (угол при вершине 120°) с общей нагрузкой 150 кгс, подходящий для материалов высокой твердости (таких как закаленная сталь, твердый сплав). Значение HRC рассчитывается по формуле: $HRC = 100 - (h/0,002)$, где h - глубина отпечатка (мм). Диапазон HRC обычно составляет 20-70, например, твердый сплав HRC 60-70, что эквивалентно твердости по Виккерсу HV 1200-2400.

HRB : используйте стальной шариковый индентор 1/16 дюйма с общей нагрузкой 100 кгс, подходящий для более мягких материалов (таких как отожженная сталь, медные сплавы). Формула расчета значения HRB: $HRB = 130 - (h/0,002)$, в диапазоне от 20 до 100. Например, значение HRB отожженной стали составляет около 70-90 (ITIA 2024).

Преимущество твердости по Роквеллу заключается в том, что ее можно считать напрямую с высокой точностью (погрешность <3%), но она не подходит для тонких материалов или небольших площадей (ISO 6508-1:2016).

Твёрдость по Бринеллю (HB)

Твердость по Бринеллю (HB) — это метод измерения твердости материала путем

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вдавливания закаленного стального шарика или шарикового индентора из карбида вольфрама (обычно диаметром 2,5, 5 или 10 мм) в поверхность материала под определенной нагрузкой (F, обычно 500–3000 кгс), удерживания его в течение определенного времени (10–30 секунд), а затем измерения диаметра отпечатка (d, в мм) для расчета твердости. Формула выглядит так: $HB = (2F) / (\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}))$, где D — диаметр индентора (мм), F — нагрузка (кгс), d — диаметр отпечатка (мм), а результат выражается в кгс/мм² (ASTM E10-18).

Твердость по Бринеллю подходит для более мягких или среднетвердых материалов (таких как сталь, чугун, цветные металлы), и диапазон обычно составляет HB 30-650. Например, HB незакаленной стали составляет около 120-200, в то время как цементированный карбид обычно не подходит для этого метода из-за его высокой твердости (HV 1200-2400) (ITIA 2024). Его преимущество в том, что область отпечатка большая, отражающая среднюю производительность материала, и он подходит для неоднородных материалов, но не для тонких деталей или материалов высокой твердости (погрешность составляет около 3%-5%, ISO 6506-1:2014).

Твёрдость по шкале Мооса

Твёрдость по Моосу — это относительная шкала для качественного измерения твёрдости материалов. Она была предложена немецким минералогом Фридрихом Моосом в 1812 году для оценки твёрдости путём сравнения способности материала противостоять царапанию. Метод использует в качестве эталона 10 стандартных минералов, твёрдость которых оценивается от 1 (самый мягкий) до 10 (самый твёрдый): 1 — тальк, 2 — гипс, 3 — кальцит, 4 — флюорит, 5 — апатит, 6 — ортоклаз, 7 — кварц, 8 — топаз, 9 — корунд, 10 — алмаз. Во время испытания поцарапайте поверхность материала стандартным образцом. Если остаётся след, твёрдость материала ниже, чем у стандартного образца.

Твердость по Моосу проста и интуитивно понятна, применима к минералам и некоторым конструкционным материалам, но имеет низкую точность и является лишь относительной величиной. Например, твердость по Моосу цементированного карбида составляет около 9-9,5, что близко к корунду и намного выше, чем у стали (около 5-6) (ITIA 2024). Ее ограничения заключаются в том, что она не может количественно определить разницу твердости (например, разница между 9 и 10 намного больше, чем между 1 и 2), и она не подходит для испытания неоднородных материалов или тонких слоев (погрешность составляет около ±0,5).

При преобразовании обратите внимание на нелинейную зависимость, $HV \approx 10 \cdot HRC + 900$ (погрешность <5%), ошибка преобразования HB и Мооса >10%. В реальном применении HV является основным методом, а HRC/HS является вспомогательным методом для обеспечения согласованности производительности >95%±2%.

3.1.1.2 Метод испытания на твердость

Испытание на твердость обеспечивает точность измерений за счет:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Испытание на твердость по Виккерсу (ISO 3878)

Твердый сплав, содержащий 10% Co (HV 1800±30), использует нагрузку 10 кг, диагональ отпечатка 2030 мкм ± 0,5 мкм, увеличение микроскопа 400 раз ± 10 раз и погрешность <1% ± 0,2%. Окружающая среда требует 25°C ± 2°C, влажность <60% ± 5% и поверхность образца Ra < 0,2 мкм ± 0,05 мкм. Например, форма, содержащая 15% TiC (HV 2000± 50), проходит испытание Виккерса, гарантируя точность штамповки < 0,01 мм.

Испытание на твердость по Роквеллу (ISO 6508)

Твердый сплав, содержащий 6% Co (HRC 90±1), принимает шкалу HRC, предварительная нагрузка 10 кг ± 0,1 кг, основная нагрузка 150 кг ± 0,1 кг, удержание 5 с ± 0,5 с, погрешность <2% ± 0,5%. Подходит для таких площадок, как инструмент, содержащий 8% Co (HRC 89±1).

Портативный твердомер (Leeb, ASTM A956)

Твердый сплав, содержащий 12% Co (HS 85±2), использует энергию удара 11 Н·мм±0,5 Н·мм с погрешностью <3%±0,5%. Подходит для горнодобывающих участков, таких как катки (HS 87±2).

Ультразвуковое испытание на твердость (ASTM A1038)

Твердый сплав, содержащий 8% Co (HV 1900±50), использует ультразвуковой контактный импеданс с частотой 20 кГц ± 0,5 кГц и погрешностью <2% ± 0,5%, что подходит для сложных форм, таких как авиационные пресс-формы.

Тестирование методом наноиндентирования

Для твердого сплава, содержащего 10% Co (твердость 20 ГПа ± 1 ГПа), используется индентор Берковича с нагрузкой 10 мН ± 0,1 мН, глубиной отпечатка <200 нм ± 10 нм и погрешностью <5% ± 1%, что подходит для обнаружения покрытий.

Для испытания требуется калибровка (стандартная ошибка блока <1%) и избежание вибрации (ускорение <0,1 м/с²). Например, форма, содержащая 15% TiC, испытывается по Виккерсу и наноиндентированию, чтобы гарантировать срок службы >6000 часов ± 500 часов.

3.1.1.3 Факторы, влияющие на твердость

Состав твердого сплава

При увеличении содержания Co (от 6% до 20%) твердость уменьшается с HV 2000±50 до HV 1400±30, поскольку мягкость фазы Co (HV 300±400) снижает сопротивление деформации. Добавление TiC (10%±15%) увеличивает твердость до HV 2000±50, а TaC (1%±2%) до HV 1900±50 из-за упрочнения твердого раствора (деформация решетки <2%±0,2%). Твердость Cr₃C₂ (0,5%±1%) достигает HV 2200 ±50, поскольку атомы Cr ингибируют скольжение по границам зерен (коэффициент трения уменьшается до <0,2±0,05).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Процесс обработки твердого сплава

Температура спекания ($1400\text{--}1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) влияет на плотность фазы WC ($>99\% \pm 0,1\%$), а слишком высокая температура ($>1550^{\circ}\text{C}$) вызывает улетучивание фазы Co (потери $<5\% \pm 1\%$), и твердость уменьшается на $3\% \pm 1\%$. Горячее изостатическое прессование (HIP, $100\text{ МПа} \pm 5\text{ МПа}$) устраняет поры (пористость $<0,1\% \pm 0,02\%$) и твердость увеличивается на $2\% \pm 0,5\%$.

Окрестности

Высокая температура ($600 - 1000^{\circ}\text{C}$) снижает энергию связи WC (длина связи увеличивается на $0,1\text{ \AA} \pm 0,02\text{ \AA}$), а твердость уменьшается на $10\% \pm 2\%$. Влажное тепло (40°C , влажность 90%) вызывает коррозию Co (потеря веса $<0,1\text{ мг/см}^2$), а твердость уменьшается на $<2\% \pm 0,5\%$. Экстремальный холод (40°C) вызывает охрупчивание Co, а твердость увеличивается на $1\% \pm 0,3\%$. Радиация (10^4 Гр) вызывает дефекты, а твердость уменьшается на $<1\% \pm 0,2\%$.

Состояние поверхности твердого сплава

Шероховатость поверхности ($Ra > 0,4\text{ мкм}$) снижает точность индентирования (погрешность $>2\% \pm 0,5\%$); покрытие (например, Al_2O_3 , $5\text{ мкм} \pm 1\text{ мкм}$) увеличивает твердость поверхности до $\text{HV } 2200 \pm 50$ за счет сжимающего напряжения ($>500\text{ МПа} \pm 50\text{ МПа}$).

Например, инструмент, содержащий $8\%\text{ Co}$ и $0,5\%\text{ Cr}$ в C_2 ($\text{HV } 1900 \pm 50$, процесс HIP), сохраняет твердость $\text{HV } 1850 \pm 30$ и срок службы >15 часов ± 1 час при влажной горячей резке (40°C , влажность 90%). Оптимизация требует низкого содержания Co ($6\% \pm 8\%$) и высокой плотности процесса.

3.1.2 Прочность твердого сплава

Прочность твердого сплава относится к его способности противостоять распространению трещин и разрушению и является ключевым показателем производительности для измерения ударопрочности и надежности материалов. Поскольку в твердом сплаве в качестве твердой фазы используется карбид вольфрама (WC), а в качестве связующей фазы — кобальт (Co) или никель (Ni), его прочность в основном зависит от размера зерна, содержания связующей фазы, микроструктуры и процесса подготовки.

Определение вязкости разрушения

Вязкость разрушения (KIC) — это способность твердого сплава противостоять распространению трещин, обычно выражаемая в $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, отражающая сопротивление материала разрушению при воздействии коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины (ASTM E399).

Диапазон вязкости разрушения

Обычный твердый сплав (размер зерна $1\text{--}5\text{ мкм}$) имеет $\text{KIC } 8\text{--}15\text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ в зависимости от содержания Co. Мелкозернистый ($0,5\text{--}1\text{ мкм}$) и ультрамелкозернистый ($0,2\text{--}0,5\text{ мкм}$) твердый

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сплав имеет KIC 7-12 МПа·м^{1/2}, а путь распространения трещин более сложен из-за увеличенной площади границ зерен (Журнал Китайского общества цветных металлов 2024). Наномасштабный твердый сплав (0,05-0,2 мкм) имеет KIC 6-9 МПа·м^{1/2}, с более низкой вязкостью и концентрацией напряжений из-за мелких зерен (ITIA 2024).

Факторы, влияющие на вязкость разрушения

Содержание связующей фазы

При увеличении содержания Со с 6% до 15% KIC может быть увеличен на 20%-30% (с 8 МПа·м^{1/2} до 10-12 МПа·м^{1/2}), поскольку Со обеспечивает пластический буфер.

Размер зерна

размер зерна уменьшается с 5 мкм до 0,2 мкм, KIC уменьшается примерно на 15–20%, но износостойкость улучшается.

Микроскопические дефекты

Пористость или трещины снижают KIC на 5–10%.

Применение вязкости разрушения

Вязкость разрушения является ключевым показателем для оценки стойкости инструмента к скалыванию и ударопрочности форм. Например, при высокоскоростной резке (200 м/мин) срок службы твердого сплава с KIC > 10 МПа·м^{1/2} может достигать 2-3 часов (Journal of Materials Science 2025).

Определение ударной вязкости

см² посредством испытания на удар по Шарпи или Изоду (ASTM E23).

Диапазон вязкости разрушения:

Крупнозернистый твердый сплав (>5 мкм) имеет удельную теплопроводность 10–20 Дж/см² за счет большого размера зерна и равномерного распределения Со.

мелкозернистых и ультрамелкозернистых твердых сплавов составляет 5-12 Дж/см², причем прочность уменьшается с уменьшением размера зерна.

Ударная вязкость нанотвердого сплава составляет менее 5 Дж/см², а его ударопрочность относительно низкая.

Факторы, влияющие на вязкость разрушения:

Содержание Со: при увеличении содержания Со с 6% до 12% ударная вязкость увеличивается примерно на 30–40%, поскольку фаза Со улучшает поглощение энергии.

Процесс спекания: горячее изостатическое прессование (ГИП) снижает пористость и повышает ударную вязкость на 10–15%.

Температура окружающей среды: При низких температурах (-50°C) ударная вязкость снижается примерно на 20–25%, а материалы с высоким содержанием Со более стабильны.

Применение: Ударная вязкость подходит для горнодобывающих буровых коронок и штамповочных штампов. При высокочастотном ударе (>2000 раз/мин) срок службы материала при вязкости > 10 Дж/см² может достигать 200-300 часов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Определение усталостной вязкости

Усталостная вязкость описывает способность твердого сплава противостоять росту трещин при циклической нагрузке и обычно характеризуется скоростью роста усталостной трещины (da/dN , м/цикл) или пределом усталости (МПа) (ASTM E647).

Диапазон усталостной вязкости:

Предел усталости обычного твердого сплава составляет 800–1200 МПа, а скорость роста усталостной трещины — около 10^{-6} – 10^{-5} м/цикл.

За счет концентрации напряжений на границах зерен предел усталости наноразмерного твердого сплава снижается до 600–900 МПа, а скорость расширения увеличивается до 10^{-5} – 10^{-4} м/цикл.

Факторы, влияющие на усталостную вязкость:

Качество поверхности: шероховатость поверхности $Ra > 0,8$ мкм, усталостная долговечность снижается на 20%–30%.

Дефекты: Пористость или аморфная фаза снижают предел усталости на 10–15%.

Покрытие: PVD-покрытие TiAlN может увеличить усталостную долговечность примерно на 15–20 % за счет снижения образования поверхностных трещин.

Применение усталостной вязкости

Усталостная прочность имеет решающее значение для циклически нагруженных инструментов (например, фрез), у которых усталостная долговечность может достигать 1000–1500 часов при 10^7 циклах (500 МПа).

Определение термической стойкости

Горячая вязкость отражает трещиностойкость твердого сплава при высокотемпературных термических циклах или термических ударах и обычно характеризуется термической усталостной долговечностью (количеством циклов) или высокотемпературной вязкостью разрушения (KIC, 1000°C) (ASTM E1830).

Диапазон термической вязкости

Термическая усталостная долговечность обычного твердого сплава составляет 500–1000 раз (500°C), а высокотемпературный KIC составляет $6\text{--}10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

содержащие TaC или TiC могут достигать 1000–1500 раз, а высокотемпературный KIC составляет $7\text{--}12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Факторы, влияющие на термическую прочность

Несоответствие теплового расширения: Несоответствие между WC ($5,2 \times 10^{-6}$ /K) и Co (12×10^{-6} /K) приводит к термическому напряжению и снижению прочности на 10%–15%.

Высокотемпературное окисление: при окислении 1000°C прирост веса $> 0,1 \text{ мг/см}^2$, термическая прочность снизилась примерно на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Размер зерна: Наноразмерные материалы имеют концентрированную термическую нагрузку, и их термическая прочность снижается примерно на 15–20%.

Применение термической прочности

Термическая прочность подходит для высокотемпературной резки (например, деталей авиационных двигателей, 250 м/мин), а срок службы может достигать 2-3 часов.

5. Ключевые факторы, влияющие на устойчивость

Состав связующей фазы: сплав Ni или Co-Cr заменяет чистый Co, а прочность повышается на 5–10 %, поскольку фаза Ni обладает высокой коррозионной стойкостью (скорость коррозии <0,03 мм/год, ASTM G31).

Микроструктура: η-фаза или свободный углерод снижает ударную вязкость на 5–15 %, а горячее изостатическое прессование (ГИП) может восстановить около 10 % ударной вязкости.

Оптимизация процесса: Добавление ингибиторов зернистости (например, VC 0,2%–0,5%) может повысить прочность на 5–8% (ITIA 2024).

Вязкость разрушения (K_{Ic}) цементированного карбида составляет $820 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, что лучше, чем у керамики ($K_{Ic} 35 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) и нитрида кремния ($K_{Ic} 68 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), и немного ниже, чем у высокопрочной стали ($K_{Ic} 2030 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), что позволяет выдерживать высокие ударные нагрузки, такие как бурение и пробивка. Вязкость обусловлена пластической деформацией фазы Co (деформация $<5\% \pm 0,5\%$, предел текучести $>500 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), рассеивающей энергию посредством прогиба трещины (угол $>30^\circ \pm 5^\circ$) и образования мостиков (сила мостика $>10 \text{ МПа} \pm 2 \text{ МПа}$). Значение K_I с твердого сплава, содержащего 12% Co, составляет $15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,3$, а значение K_I с твердого сплава, содержащего 6% Co, составляет $10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,2$.

Содержание Co регулирует вязкость. Когда Co увеличивается с 6% до 20%, K_{Ic} увеличивается с 8 до $18 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$ из-за повышенного поглощения энергии (рассеиваемая энергия $>50 \text{ Дж/м}^2 \pm 5 \text{ Дж/м}^2$) сетки фазы Co (толщина $1030 \text{ нм} \pm 2 \text{ нм}$, см. Главу 2). Добавление TaC (1%2%) увеличивает прочность границ зерен ($>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$), K_{Ic} увеличивается до $14 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, а глубина распространения трещин составляет $<10 \text{ мкм} \pm 2 \text{ мкм}$.

Твердосплавное сверло, содержащее 12% Co и 1% TaC, имеет длину трещины $<5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ и срок службы $>250 \text{ ч} \pm 20 \text{ ч}$ при сверлении гранита (частота ударов $>2000 \text{ раз/мин}$, нагрузка $>3000 \text{ МПа}$, энергия удара $>100 \text{ Дж} \pm 10 \text{ Дж}$), что лучше, чем у керамического сверла (срок службы $<50 \text{ ч}$, трещина $>20 \text{ мкм}$).

и влажная среда (40°C , влажность 90%, 168 часов) из-за коррозии фазы Co (глубина $<2 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, потеря веса $<0,2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$), K_{Ic} уменьшается на $5\% \pm 1\%$. При экстремальном холоде (40°C) из-за охрупчивания Co (преобразование вязкости в прочность, падение деформации $<3\% \pm 0,3\%$), K_{Ic} уменьшается на $3\% \pm 0,5\%$. Высокое давление ($>100 \text{ МПа}$, глубокое море) усиливает связь границ зерен, K_{Ic} увеличивается на $2\% \pm 0,3\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Радикация (10^4Гр) вызывает дефекты фазы Со (плотность вакансий $< 10^{15} / \text{см}^3$), и $K_{1с}$ уменьшается на $<2\% \pm 0,3\%$.

Ni-содержащий твердый сплав ($12\% \text{Ni}$, $K_{1с} 13 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,3$) более стабилен в морской среде (соленость $3,5\%$, O_2 8 мг/л), с падением $K_{1с} <2\%$. Например, Ni-содержащие инструменты для бурения горных пород работают в горячей и влажной шахте ($\text{pH } 6$, влажность 90% , температура 40°C), с $K_{1с} 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,3$, и увеличением срока службы на $30\% \pm 5\%$, что лучше, чем у Со-содержащих материалов (снижение срока службы на $10\% \pm 2\%$).

Оптимизация вязкости требует балансировки твердости. Высокое содержание Со ($>15\%$) увеличивает $K_{1с}$ до $18 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, но твердость падает до $\text{HV } 1400 \pm 30$; добавление NbC ($0,5\%1\%$) увеличивает $K_{1с}$ до $15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$ за счет сужения траектории трещины (ширина трещины $<1 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$), а твердость остается на уровне $\text{HV } 1800 \pm 30$.

Например, при высокочастотной штамповке ($>10^4$ раз/час, нагрузка $>2000 \text{ МПа}$) штампы из твердого сплава с $10\% \text{ Со}$ и $0,5\% \text{ NbC}$ имеют деформацию $<0,01 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$, скорость трещин $<0,5\%$ и срок службы >6000 часов ± 500 часов, что лучше, чем у стальных штампов (деформация $>0,05 \text{ мм}$, срок службы <2000 часов). Междоменные сравнения показывают, что твердый сплав имеет лучшую прочность, чем керамика и оксид алюминия ($K_{1с} < 5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), но уступает вязкой стали по ударной вязкости ($K_{1с} > 50 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

3.1.2.1 Метод испытания на прочность

Испытание на прочность обеспечивает устойчивость к трещинам, методы включают:

Балка с односторонним надрезом (SENB, ASTM E399)

Твердый сплав, содержащий $12\% \text{ Со}$ ($K_{1с} 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,3$), принимает трехточечный изгиб, образец $4 \times 4 \times 20 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, глубина надреза $2 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$, пролет $20 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, скорость нагрузки $0,1 \text{ мм/мин} \pm 0,01 \text{ мм/мин}$, погрешность $<2\% \pm 0,5\%$. Требования к окружающей среде: $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $<60\% \pm 5\%$.

Испытание с шевронным надрезом (ASTM E1304): цементированный карбид, содержащий $6\% \text{ Со}$ ($K_{1с} 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,2$), использует V-образный надрез, образец $5 \times 5 \times 25 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, скорость нагрузки $0,05 \text{ мм/мин} \pm 0,005 \text{ мм/мин}$, погрешность $<3\% \pm 0,5\%$, подходит для небольших образцов.

Испытание на ударную вязкость (ISO 148)

Твердый сплав, содержащий $15\% \text{ Со}$ (энергия удара $>20 \text{ Дж} \pm 2 \text{ Дж}$), подвергался удару по Шарпи с образцом размером $10 \times 10 \times 55 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, энергией маятника $300 \text{ Дж} \pm 5 \text{ Дж}$ и погрешностью $<5\% \pm 1\%$, что подходит для испытания горнодобывающего инструмента.

Моделирование механики разрушения: для твердого сплава, содержащего $10\% \text{ Со}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

использовался конечно-элементный анализ (ANSYS, размер сетки $<0,1$ мм, ошибка расширения трещины $<0,05$ мм) для прогнозирования K_{Ic} (ошибка $<5\% \pm 1\%$), что подходит для комплексного анализа напряжений.

Анализ микротрещин

содержащий TaC (глубина трещины <10 мкм ± 2 мкм), оценивали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение <5 нм ± 1 нм) (погрешность $<5\% \pm 1\%$).

Например, сверло, содержащее 12% Co и 1% TaC, проходит испытание SENB (K_{Ic} 14 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm 0,5$), гарантируя ударную вязкость >250 ч ± 20 ч и длину трещины, подтвержденную с помощью СЭМ, <5 мкм ± 1 мкм.

3.1.2.2 Обзор факторов, влияющих на прочность

На устойчивость влияют:

Элемент

Увеличение содержания Co с 6% до 20% увеличивает K_{Ic} с 8 до 18 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm 0,5$ из-за пластичности фазы Co (модуль сдвига 80 ГПа ± 5 ГПа), что улучшает рассеивание трещин (энергия >50 Дж/м² ± 5 Дж/м²). Замена Co на Ni (12% Ni, K_{Ic} 13 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm 0,3$) снижает ударную вязкость из-за низкой пластичности Ni (деформация $<4\% \pm 0,5\%$). Добавление TaC (1%2%) увеличивает K_{Ic} до 14 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm 0,5$ из-за упрочнения границ зерен (прочность связи >50 МПа ± 5 МПа).

Технологии

Время спекания (24 ч $\pm 0,1$ ч, 1450°C $\pm 10^\circ$ C) увеличивает однородность фазы Co (ошибка распределения $< 5\% \pm 1\%$), а K_{Ic} увеличивается на $5\% \pm 1\%$. Слишком высокая температура ($> 1550^\circ$ C) вызывает улетучивание Co, а K_{Ic} уменьшается на $3\% 5\% \pm 1\%$. HIP (100 МПа ± 5 МПа) уменьшает дефекты (пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а K_{Ic} увеличивается на $3\% \pm 0,5\%$.

С р е д а

В случае влажного тепла (40°C, влажность 90%) K_{Ic} уменьшается на $5\% 10\% \pm 1\%$ из-за коррозии Co (потеря веса $<0,2$ мг/см²); в случае экстремального холода (40°C) K_{Ic} уменьшается на $3\% \pm 0,5\%$ из-за охрупчивания Co; в случае высокого давления (>100 МПа) K_{Ic} увеличивается на $2\% \pm 0,3\%$ из-за улучшения сцепления; в случае радиации (10⁴Гр) K_{Ic} уменьшается на $<2\% \pm 0,3\%$ из-за дефектов.

Стрессовое состояние

Когда частота ударов (>2000 раз/мин) вызывает усталостные трещины (длиной >5 мкм ± 1 мкм), K_{Ic} уменьшается на $5\% \pm 1\%$; при статической нагрузке (<3000 МПа) K_{Ic} стабилен.

буровое долото, содержащее 12% Co и процесс HIP (K_{Ic} 15 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm 0,3$), эксплуатируется в горячей и влажной шахте (40°C, влажность 90%), K_{Ic} поддерживается на уровне 14 МПа $\cdot$ м^{1/2}

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$/^2 \pm 0,3$, а срок службы составляет >250 часов ± 20 часов. Оптимизация требует высокого содержания Co (12%15%) и добавления TaC.

3.1.3 Прочность твердого сплава

Прочность твердого сплава относится к его способности противостоять деформации или разрушению под воздействием внешних сил и является важным показателем для измерения несущей способности и долговечности материала. Поскольку в твердом сплаве в качестве твердой фазы используется карбид вольфрама (WC), а в качестве связующей фазы — кобальт (Co) или никель (Ni), на его прочность влияют размер зерна, содержание связующей фазы и микроструктура. Ниже приведены основные типы прочности твердого сплава и их подробные описания.

3.1.3.1 Поперечная прочность на разрыв (TRS)

Определение

Прочность на изгиб — это способность твердого сплава противостоять разрушению при испытании на трехточечный или четырехточечный изгиб. Измеряется в МПа и отражает несущую способность материала при сложном напряжении.

Объем

Обычный твердый сплав (размер зерна 1-5 мкм) имеет прочность 1800-2500 МПа, а содержание Co составляет 6%-15%.

мелкозернистого (0,5-1 мкм) и ультрамелкозернистого (0,2-0,5 мкм) твердого сплава — 1700-2200 МПа.

Наноразмерный твердый сплав (0,05–0,2 мкм) имеет прочность 1600–1900 МПа, однако прочность снижается из-за концентрации напряжений на границах зерен.

Эксплуатационные характеристики

Прочность на изгиб обычно составляет $4000-4500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, что лучше, чем у высокопрочной стали ($\sim 1500 \text{ МПа}$), керамики ($\sim 1000 \text{ МПа}$) и титановых сплавов ($\sim 800 \text{ МПа}$), и подходит для сложных напряженных условий, таких как штамповка и авиационная обработка. Фаза Co подавляет распространение трещин (скорость трещины $< 10^{-5} \text{ м/с} \pm 10^{-6} \text{ м/с}$) посредством пластической деформации (деформация $< 5\% \pm 0,5\%$, напряжение сдвига $< 100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$). Например, прочность на изгиб твердого сплава, содержащего 10% Co, составляет $4200 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, а прочность твердого сплава, содержащего 15% Co, падает до $4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$.

Приложение

твердосплавных штампов, содержащих 8% Co, при штамповке стальных автомобильных пластин (нагрузка $>2000 \text{ МПа}$, частота $>10^4$ раз/час, толщина пластины $2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$) составляет $<0,5\%$, а срок службы составляет >6000 часов ± 500 часов, что лучше, чем у стальных штампов (скорость разрушения $>5\%$, срок службы <2000 часов).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

содержащий 10% Со и 1% ТаС, имеет коэффициент разрушения <1% и срок службы >12 часов $\pm$ 1 час при резании авиационного титанового сплава (напряжение > 2000 МПа, скорость резания 150 м/мин), что лучше, чем у керамических инструментов (срок службы < 4 часов).

Факторы влияния

Содержимое

При увеличении содержания от 6% до 15% прочность падает с 4500 до 4000 МПа $\pm$ 100 МПа, поскольку фаза Со снижает жесткость; добавление NbC (0,5%-1%) увеличивает ее до 4600 МПа $\pm$ 100 МПа за счет упрочнения твердого раствора (прочность границ зерен >50 МПа $\pm$ 5 МПа).

Технологии

Температура спекания ($1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) обеспечивает связь WC-Со (прочность связи >50 МПа $\pm$ 5 МПа), прочность увеличивается на $3\% \pm 0,5\%$; ГИП (100 МПа $\pm$ 5 МПа) устраняет трещины (<5 мкм $\pm$ 1 мкм), прочность увеличивается на $5\% \pm 1\%$; скорость охлаждения (> $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) вызывает напряжение (>100 МПа $\pm$ 10 МПа), прочность уменьшается на $2\% \pm 0,3\%$.

С р е д а

Высокая температура (800°C) из-за размягчения Со (предел текучести снизился на <400 МПа $\pm$ 20 МПа), снизилась до 3800 МПа $\pm$ 100 МПа (снижение на <10%); влажное тепло (40°C , влажность 90%, 168 часов) из-за коррозии Со (потеря веса <0,1 мг/см² $\pm$ 0,02 мг/см²), снижение на $5\% \pm 1\%$; высокое давление (>100 МПа) увеличилось на $2\% \pm 0,3\%$; экстремальный холод (-40°C) увеличился на $3\% \pm 0,5\%$; излучение (10^4 Гр) снизилось на <1% $\pm$ 0,2%. Содержащий Cr (0,5% -1%) образует защитный слой Cr₂O₃ (толщина <5 нм $\pm$ 1 нм), влажное тепло снизилось на <2%.

Геометрия образца

Толщина > 4 мм $\pm$ 0,1 мм снижает концентрацию напряжений (коэффициент < $1,2 \pm 0,1$), а прочность увеличивается на $2\% \pm 0,3\%$; дефекты поверхности (Ra > 0,4 мкм) вызывают трещины, снижая прочность на $3\% \pm 0,5\%$.

Методы обнаружения

Трехточечный изгиб (ISO 3327)

Образец 4×4×40 мм $\pm$ 0,1 мм, размах 20 мм $\pm$ 0,1 мм, скорость нагрузки 0,2 мм/мин $\pm$ 0,02 мм/мин, погрешность <2% $\pm$ 0,5%, окружающая среда $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Четырехточечный изгиб (ASTM C1161)

Размеры образца составляют 3×4×45 мм $\pm$ 0,1 мм, расстояние между точками нагрузки составляет 10 мм $\pm$ 0,1 мм, а погрешность составляет <3% $\pm$ 0,5%, что подходит для анализа равномерного напряжения.

Ультразвуковой контроль (ASTM E588)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Продольная волна (частота $5 \text{ МГц} \pm 0,1 \text{ МГц}$, скорость волны $6 \text{ км/с} \pm 0,1 \text{ км/с}$), обнаружение трещин ($<5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$), погрешность $<5\% \pm 1\%$.

Цифровая корреляция изображений (DIC)

Ошибка деформации $<0,1\% \pm 0,02\%$, камера высокого разрешения (разрешение $<5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$), анализ деформации разрушения, ошибка $<5\% \pm 1\%$.

3.1.3.2 Прочность на сжатие

Определение: Прочность на сжатие — это способность твердого сплава противостоять деформации сжатия или повреждению, измеряемая в МПа и отражающая несущую способность материала при высоких нагрузках.

Объем

Прочность на сжатие твердого сплава обычно составляет $4000\text{--}6000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, что значительно выше, чем у высокопрочной стали ($\sim 2000 \text{ МПа}$), керамики ($\sim 3000 \text{ МПа}$) и титанового сплава ($\sim 1000 \text{ МПа}$), и подходит для условий высоких нагрузок, таких как глубоководное бурение и экструзия.

Наноразмерные материалы могут достигать прочности $5000\text{--}6500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, которая повышается за счет измельчения зерна.

Эксплуатационные характеристики

Прочность на сжатие определяется жесткостью w_c (коэффициент Пуассона $0,2 \pm 0,02$, модуль Юнга $700 \text{ ГПа} \pm 10 \text{ ГПа}$), а софаза снимает концентрацию напряжений (спад напряжения $>20\% \pm 2\%$, напряжение сдвига $<100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$). Например, прочность на сжатие цементированного карбида, содержащего 10% Со, составляет $4500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, а содержащего 6% Со — $4700 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$.

Приложение

Твердосплавное сверло, содержащее 6% Со, имеет деформацию $<0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$ и срок службы $>300 \text{ часов} \pm 20 \text{ часов}$ при бурении твердых пород (напряжение $> 3000 \text{ МПа}$, твердость породы $> 1000 \text{ МПа}$, скорость бурения $> 10 \text{ м/ч} \pm 1 \text{ м/ч}$), что лучше, чем у стальных сверл (деформация $> 0,05 \text{ мм}$, срок службы $< 100 \text{ часов}$).

Деформация ролика из твердого сплава, содержащего Cr ($0,5\%\text{--}1\%$), при дроблении руды (нагрузка $> 4000 \text{ МПа}$, размер частиц $< 10 \text{ мм} \pm 2 \text{ мм}$) составляет $< 0,003 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, а срок службы увеличивается на $35\% \pm 5\%$.

Экструзионная матрица, содержащая 8% Со, имеет деформацию $<0,01 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$ и срок службы $>5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$ при обработке алюминиевого сплава (600°C , нагрузка $> 4000 \text{ МПа}$, скорость экструзии $> 5 \text{ м/мин} \pm 0,5 \text{ м/мин}$), что лучше, чем у стальной матрицы (срок службы $< 1000 \text{ часов}$).

Факторы влияния

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Элемент

При увеличении содержания Со с 6% до 20% прочность уменьшается с 4700 до 4100 МПа $\pm$ 100 МПа, так как фаза Со снижает жесткость (модуль Юнга 200 ГПа $\pm$ 10 ГПа); Cr (0,5%-1%) увеличивается до 4800 МПа $\pm$ 100 МПа, так как усиливается твердый раствор CrCo (прочность связи > 60 МПа $\pm$ 5 МПа); TiC (10%-15%) уменьшается до 4300 МПа $\pm$ 100 МПа, так как уменьшается плотность (< 13 г/см³ $\pm$ 0,1 г/см³).

Технологии

Давление спекания (510 МПа $\pm$ 0,5 МПа) улучшает плотность ($> 99\% \pm 0,1\%$) и прочность увеличивается на $3\% \pm 0,5\%$; ГИП (100 МПа $\pm$ 5 МПа) устраняет поры (пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$) и увеличивает прочность на $5\% \pm 1\%$; чрезмерно высокая температура ($> 1550^\circ\text{C}$) вызывает разложение WC (потеря углерода $< 1\% \pm 0,2\%$) и снижает прочность на $3\% \pm 0,5\%$.

Среда

Высокая температура (800 $^\circ\text{C}$) снизилась до 4000 МПа $\pm$ 100 МПа (снижение на $< 10\%$) из-за снижения энергии связи (длина связи увеличилась на $0,1 \text{ \AA} \pm 0,02 \text{ \AA}$); влажное тепло (40 $^\circ\text{C}$, влажность 90%, 168 часов) снизилось на $3\% \pm 0,5\%$ из-за микрокоррозии Со (потеря веса $< 0,1$ мг/см² $\pm$ 0,02 мг/см²); экстремальный холод (-40°C) увеличился на $2\% \pm 0,3\%$ из-за повышения жесткости WC; высокое давление (> 100 МПа, глубокое море) увеличилось на $3\% \pm 0,5\%$; радиация (10^4 Гр) снизилась на $< 1\% \pm 0,2\%$. Содержание Ni (12% Ni, 4500 МПа $\pm$ 100 МПа) более стабильно в морской среде (соленость 3,5%, давление 50 МПа), снижение составляет $< 1\%$.

Скорость загрузки

Высокая скорость (> 1 мм/мин) вызывает образование микротрещин (длиной < 5 мкм $\pm$ 1 мкм) с уменьшением на $2\% \pm 0,3\%$; низкая скорость ($< 0,5$ мм/мин) сохраняет прочность стабильной.

Методы обнаружения

Сжатие цилиндрического образца (ASTM C773)

Диаметр образца составляет 10 мм $\pm$ 0,1 мм, высота — 20 мм $\pm$ 0,1 мм, скорость сжатия — 0,5 мм/мин $\pm$ 0,05 мм/мин, погрешность $< 2\% \pm 0,5\%$, температура окружающей среды — $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, а поверхность Ra $< 0,2$ мкм $\pm$ 0,05 мкм.

Испытание статической нагрузкой

Используется сервогидравлический пресс (точность нагрузки ± 1 кН, максимальная нагрузка 5000 кН ± 10 кН) с погрешностью $< 3\% \pm 0,5\%$, что подходит для крупных образцов.

Неразрушающий контроль (ультразвуковой, ASTM E494)

Дефектоскопия продольной волной (скорость волны 6 км/с $\pm 0,1$ км/с, частота 5 МГц $\pm 0,1$ МГц), погрешность $< 5\% \pm 1\%$, подходит для обнаружения на месте.

Моделирование методом конечных элементов

Для прогнозирования прочности использовался ANSYS (размер сетки $< 0,1$ мм, погрешность напряжения < 10 МПа) с погрешностью $< 5\% \pm 1\%$.

3.1.3.3 Прочность на растяжение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Определение

Прочность на растяжение — это способность твердого сплава противостоять разрушению при растяжении, измеряемая в МПа, но обычно низкая из-за его хрупкости.

Объем

Прочность на растяжение обычного твердого сплава составляет 800–1200 МПа, что ограничивается ослаблением границ зерен.

Материалы в наномасштабе могут достигать прочности 1000–1400 МПа, а следовые количества Ni повышают прочность.

Факторы влияния

Увеличение содержания Co (например, от 6% до 15%) улучшает продукт примерно на 10%-15%; дефекты (например, поры) уменьшаются примерно на 5%-10%.

приложение

Подходит для деталей с небольшими растягивающими нагрузками, таких как волоочильные матрицы и детали для микроволочения.

3.1.3.4 Усталостная прочность

Определение

Усталостная прочность — это способность твердого сплава противостоять усталостному разрушению при циклической нагрузке, измеряемая в МПа.

Объем

Предел усталости обычного твердого сплава составляет 800–1200 МПа, 10^7 циклов.

В наноразмерных материалах прочность снижается до 600-900 МПа за счет концентрации напряжений на границах зерен.

Факторы влияния

Шероховатость поверхности $Ra > 0,8$ мкм снижает усталостную долговечность на 20–30 %; покрытие (например, TiAlN) увеличивает ее примерно на 15–20 %.

Приложение

Подходит для циклически нагруженных инструментов, таких как фрезы, со сроком службы 1000–1500 часов.

3.1.3.5 Резюме влияющих факторов

Фаза связывания

С увеличением содержания Co прочность увеличивается, однако слишком высокое содержание Co ($>15\%$) может снизить твердость.

Размер зерна

Уменьшение размера зерна (например, 0,2 мкм) увеличивает прочность на сжатие, но снижает прочность на изгиб и усталость.

Дефект

Пористость, аморфная фаза или трещины снижают все виды прочности на 5–15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.3.6 Предложения по окружающей среде и оптимизации

Воздействие на окружающую среду

Высокая температура (800°C) снижает прочность на 10% ± 1%; влажное тепло (40°C, влажность 90%) снижает прочность на 3%-5%; высокое давление (>100 МПа) увеличивает прочность на 2%-3%; экстремальный холод (-40°C) увеличивает прочность на 2%-3%; радиация (10⁴ Гр) влияет на прочность на <1%. Твердые сплавы, содержащие Ni или Cr, более стабильны в суровых условиях (таких как океан, влажное тепло).

Предложения по оптимизации

Применяется низкое содержание Co (6–8%), высокая плотность (>99±0,1%) и процесс горячего изостатического прессования, добавляются NbC или TaC для повышения прочности и продления срока службы на 30–35%.

3.2 Термические свойства твердого сплава

Термические свойства определяют, как твердый сплав ведет себя при резке с высокой температурой, термических циклах и экстремальных температурных условиях, и широко используются в авиационных двигателях, газовых турбинах и ядерной энергетике. В этом разделе анализируется теплопроводность, коэффициент теплового расширения, стабильность при высоких температурах и стойкость к тепловому удару.

3.2.1 Теплопроводность твердого сплава

Теплопроводность твердого сплава составляет 80120 Вт/м·К±5 Вт/м·К, что выше, чем у керамики (2030 Вт/м·К), оксида алюминия (30 Вт/м·К) и ниже, чем у меди (400 Вт/м·К) и графита (150 Вт/м·К). Она определяется WC (110 Вт/м·К±5 Вт/м·К, преобладает электронная теплопроводность) и Co (70 Вт/м·К±5 Вт/м·К, рассеяние фононов>20%±2%). Теплопроводность твердого сплава, содержащего 10% Co, составляет 100 Вт/м·К±5 Вт/м·К, а содержащего 15% Co, падает до 90 Вт/м·К±5 Вт/м·К.

Высокая теплопроводность снижает температуру инструмента. При высокоскоростной резке авиационного алюминиевого сплава (200 м/мин, плотность теплового потока >10 МВт/м² ± 1 МВт/м²) температура поверхности твердосплавных инструментов, содержащих 8% Co, составляет <700 °C±20 °C, величина износа составляет <0,1 мм±0,02 мм, а срок службы составляет >12 часов±1 час, что лучше, чем у керамических инструментов (температура >900 °C, срок службы <4 часов). Добавление TiC (15%, теплопроводность 30 Вт/м·К±5 Вт/м·К) снижает ее до 85 Вт/м·К±5 Вт/м·К, но улучшает высокотемпературную стабильность, подходит для авиационных сопел (1100 °C, скорость потока газа >500 м/с±50 м/с). Например, сопло, содержащее 15% TiC в газовой турбине, имеет температуропроводность >30 мм²/с ± 2 мм²/с, деформацию <0,01 мм ± 0,002 мм и срок

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

службы >6000 часов $\pm$ 500 часов.

Воздействие на окружающую среду требует внимания. При высокой температуре (800 °C) теплопроводность падает до 90 Вт/м·K $\pm$ 5 Вт/м·K (уменьшение <10%) из-за рассеяния электронов в фазе Co (подвижность уменьшается $<10^{-4}$ см²/В·с $\pm$ 10^{-3} см²/В·с); при влажном тепле (40 °C, влажность 90%, 168 часов) теплопроводность падает до $<2\% \pm 0,5\%$ из-за поверхностного окисления (слой окисления <1 мкм $\pm$ 0,2 мкм); при экстремальном холоде (40 °C) теплопроводность увеличивается на $1\% \pm 0,3\%$ из-за повышенной фоновой теплопроводности; при высоком давлении (>100 МПа) теплопроводность увеличивается на $2\% \pm 0,3\%$; при облучении (10^{-4} Гр) теплопроводность падает на $<1\% \pm 0,2\%$. Никельсодержащий цементированный карбид (12% Ni, 95 Вт/м·K $\pm$ 5 Вт/м·K) более стабилен в морской среде (соленость 3,5%, давление 50 МПа), при этом снижение составляет <1%.

Например, теплопроводность формы, содержащей Ni, поддерживалась на уровне 93 Вт/м·K $\pm$ 5 Вт/м·K, а деформация составляла $<0,01$ мм $\pm$ 0,002 мм при влажной горячей штамповке (40 °C, влажность 90 %, 600 °C), что лучше, чем у материала, содержащего Co (снижение $> 3 \% \pm 0,5 \%$).

Оптимизация теплопроводности требует балансировки высокотемпературных характеристик. При резке термическим циклом (25800°C, 1000 раз, разница температур $>500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) длина трещины твердосплавных инструментов, содержащих 10% Co, составляет <5 мкм ± 1 мкм, что лучше, чем у керамики (трещина >20 мкм). Междоменное сравнение показывает, что теплопроводность твердого сплава лучше, чем у керамики и титановых сплавов (20 Вт/м·K), но хуже, чем у меди и графита.

3.2.1.1 Метод испытания теплопроводности

Методы испытаний теплопроводности включают в себя:

Метод лазерной вспышки (ASTM E1461)

Твердый сплав, содержащий 10% Co (100 Вт/м·K $\pm$ 5 Вт/м·K), диаметр образца 12,7 мм $\pm 0,1$ мм, толщина 2 мм $\pm 0,1$ мм, ширина лазерного импульса 0,5 мс $\pm 0,05$ мс, погрешность температуропроводности $<1\% \pm 0,2\%$, а общая погрешность $<2\% \pm 0,5\%$. Температура окружающей среды $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Метод стационарного теплового потока (ASTM C177)

Для твердого сплава, содержащего 8% Co (98 Вт/м·K $\pm$ 5 Вт/м·K), используется образец размером 50×50×10 мм $\pm 0,1$ мм, разница температур $10^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, точность теплового потока $\pm 0,1$ Вт/м² и погрешность $<3\% \pm 0,5\%$.

Метод переходной горячей проволоки (ASTM D5930): карбид вольфрама, содержащий TiC (85 Вт/м·K $\pm$ 5 Вт/м·K), использует мощность горячей проволоки 0,1 Вт $\pm 0,01$ Вт, разрешение по температуре $0,1^{\circ}\text{C} \pm 0,05^{\circ}\text{C}$, погрешность $<5\% \pm 1\%$ и подходит для неоднородных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материалов.

Моделирование инфракрасного измерения температуры

Распределение теплового потока твердого сплава, содержащего 10% Со (погрешность теплопроводности $<5\% \pm 1\%$), анализировалось с помощью инфракрасной камеры (разрешение $<0,1^\circ\text{C} \pm 0,05^\circ\text{C}$) (погрешность $<5\% \pm 1\%$).

Например, инструмент, содержащий 10% Со, испытывается методом лазерной вспышки (100 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К), а температура поверхности при инфракрасной проверке составляет $<700^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, что гарантирует срок службы режущей части >12 часов ± 1 час.

3.2.1.2 Факторы, влияющие на теплопроводность

На теплопроводность влияют:

Состав: При увеличении содержания Со с 10% до 15% теплопроводность уменьшается со 100 до 90 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К из-за повышенного фонованого рассеяния Со (скорость рассеяния $>20\% \pm 2\%$). TiC (15%) уменьшается до 85 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К из-за низкой теплопроводности (30 Вт/м·К). Ni (12%) увеличивается до 95 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К из-за более высокой электронной теплопроводности (подвижность $>1,5 \times 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} \pm 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$).

Процесс: Температура спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) улучшает непрерывность фазы WC (площадь контакта $>90\% \pm 2\%$), а теплопроводность увеличивается на $3\% \pm 0,5\%$; HIP (100 МПа ± 5 МПа) снижает пористость ($<0,1\% \pm 0,02\%$) и увеличивает на $2\% \pm 0,3\%$. Слишком высокая температура ($>1550^\circ\text{C}$) вызывает сегрегацию Со (скорость сегрегации $<5\% \pm 1\%$) и уменьшает на $3\% \pm 0,5\%$.

Окружающая среда: Высокая температура (800°C) уменьшается на $10\% \pm 1\%$ из-за рассеяния электронов; влажное тепло (40°C , влажность 90%) уменьшается на $<2\% \pm 0,5\%$ из-за оксидного слоя ($<1 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$); экстремальный холод (40°C) увеличивается на $1\% \pm 0,3\%$ из-за фонованой теплопроводности; высокое давление ($> 100 \text{ МПа}$) увеличивается на $2\% \pm 0,3\%$; радиация (10^4 Гр) уменьшается на $<1\% \pm 0,2\%$.

Размер образца: Толщина ($>2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$) уменьшает граничное рассеяние ($<10\% \pm 2\%$) и увеличивает теплопроводность на $2\% \pm 0,3\%$; шероховатость поверхности ($R_a > 0,4 \text{ мкм}$) вызывает потери на рассеивание тепла, которые уменьшаются на $1\% \pm 0,2\%$.

Например, инструмент, содержащий 8% Со и процесс HIP (100 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К), сохраняет теплопроводность 95 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К при высокотемпературной резке (800°C) и срок службы >12 часов ± 1 час. Оптимизация требует низкого TiC и HIP.

3.2.2 Коэффициент теплового расширения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Коэффициент термического расширения (КТР) твердого сплава составляет $46 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, что ниже, чем у керамики ($810 \times 10^{-6} / \text{K}$), высокопрочной стали ($12 \times 10^{-6} / \text{K}$) и титанового сплава ($9 \times 10^{-6} / \text{K}$), и определяется средневзвешенным значением WC ($4,5 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$) и Co ($12 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$). КТР твердого сплава, содержащего 10% Co, составляет $5,5 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, а содержащего 15% Co, увеличивается до $5,8 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$.

Низкий КТР снижает термическое напряжение ($< 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$). При высокотемпературной штамповке (600°C , нагрузка $> 2000 \text{ МПа}$, разница температур $> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) деформация форм из цементированного карбида, содержащих 8% Co, составляет $< 0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, а точность повышается в 5 раз, что лучше, чем у стальных форм (деформация $> 0,05 \text{ мм}$, погрешность точности $> 0,1 \text{ мм}$). Добавление TiC (15%, КТР $7 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$) снижает до $5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, а длина термической трещины составляет $< 1 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$.

Например, допуск деформации сопел, содержащих TiC, при формовании авиационных композитов (800°C , давление $> 100 \text{ МПа}$) составляет $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$, а срок службы — $> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$, что лучше, чем у керамических сопел (трещины $> 10 \text{ мкм}$).

Влияние на окружающую среду ограничено. Высокая температура (1000°C) увеличивает КТР на $0,2 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,05 \times 10^{-6} / \text{K}$ из-за расширения решетки (постоянная решетки увеличивается на $0,1\% \pm 0,02\%$); влажное тепло (40°C , влажность 90%, 168 часов) не имеет очевидных изменений (погрешность $< 0,05 \times 10^{-6} / \text{K}$); высокое давление ($> 100 \text{ МПа}$) уменьшает на $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$; экстремальный холод (40°C) уменьшает на $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$; радиация (10^4 Гр) увеличивается на $< 0,05 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,01 \times 10^{-6} / \text{K}$. Никельсодержащий твердый сплав (12% Ni, $5,2 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$) более стабилен в морской среде (соленость 3,5%, давление 50 МПа).

Например, трубопровод, содержащий Ni, эксплуатировался в условиях глубоководной добычи нефти и газа (рН 8, глубина 5000 м) в течение 3 лет с КТР $5,3 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$ и деформацией $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$.

Оптимизация КТР требует добавления низкого содержания Co (6% 8%) и TiC. Длина трещины инструмента, содержащего 10% Co, в термических циклах (25800°C , 1000 раз, разница температур $> 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) составляет $< 5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, что лучше, чем у керамики (трещина $> 20 \text{ мкм}$). Сравнение перекрестных полей показывает, что КТР твердого сплава лучше, чем у стали и титанового сплава, но уступает сплаву инвара по сверхнизкому расширению ($< 2 \times 10^{-6} / \text{K}$).

3.2.2.1 Метод испытания коэффициента теплового расширения

Методы тестирования КТР включают в себя:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК, ASTM E228): цементированный карбид, содержащий 10% Со ($5,5 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$) с размером образца $10 \times 5 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, скоростью нагрева $5^\circ\text{C}/\text{мин} \pm 0,5^\circ\text{C}/\text{мин}$, точностью смещения $0,1 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$ и погрешностью $<2\% \pm 0,5\%$. Температура окружающей среды $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Термомеханический анализ (ТМА, ASTM E831): цементированный карбид, содержащий 8% Со ($5,4 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$) с использованием образца $5 \times 5 \times 10 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, нагрузка $0,1 \text{ Н} \pm 0,01 \text{ Н}$, разрешение по температуре $0,1^\circ\text{C} \pm 0,05^\circ\text{C}$, погрешность $<3\% \pm 0,5\%$.

Оптическая интерферометрия: твердый сплав, содержащий TiC ($5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$), использует лазерный интерферометр (длина волны $632,8 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$, разрешение $0,01 \text{ мкм} \pm 0,005 \text{ мкм}$) с погрешностью $<5\% \pm 1\%$, что подходит для высокой точности.

Рентгеновская дифракция (XRD): излучение CuK α (длина волны $1,5406 \text{ \AA} \pm 0,0001 \text{ \AA}$) использовалось для анализа высокотемпературного КТР (погрешность $<5\% \pm 1\%$) цементированного карбида, содержащего 10% Со (погрешность расширения решетки $<0,1\% \pm 0,02\%$).

Например, сопла, содержащие TiC, проходят испытания DSC и ТМА ($5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$), гарантируя срок службы формовки >5000 часов ± 500 часов.

3.2.2.2 Факторы, влияющие на коэффициент теплового расширения

На КТР влияют следующие факторы:

Состав: Содержание Со увеличивается с 10% до 15%, а КТР увеличивается с $5,5$ до $5,8 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$ из-за высокого КТР фазы Со ($12 \times 10^{-6} / \text{K}$). TiC (15%) уменьшается до $5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$ из-за низкого КТР ($7 \times 10^{-6} / \text{K}$). Ni (12%) уменьшается до $5,2 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$ из-за более низкого КТР Ni ($13 \times 10^{-6} / \text{K}$).

Процесс: Температура спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) обеспечивает однородность WCCo (ошибка распределения $<5\% \pm 1\%$) и стабильность КТР; слишком высокая температура ($>1550^\circ\text{C}$) вызывает сегрегацию Со, увеличивая $0,2 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,05 \times 10^{-6} / \text{K}$. ГИП ($100 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) снижает напряжение ($<50 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$) и уменьшает $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$.

Окружающая среда: Высокая температура (1000°C) увеличивается на $0,2 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,05 \times 10^{-6} / \text{K}$ из-за расширения решетки; влажное тепло (40°C , влажность 90%) не изменяется; высокое давление ($>100 \text{ МПа}$) уменьшается на $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$; экстремальный холод (40°C) уменьшается на $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$; радиация (10^4 Гр) увеличивается на $<0,05 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,01 \times 10^{-6} / \text{K}$.

Размер образца: длина ($>10 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$) снижает погрешность измерения ($<0,05 \times 10^{-6} / \text{K}$); шероховатость поверхности ($R_a > 0,4 \text{ мкм}$) вызывает напряжение, увеличивая $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

форма, содержащая 8% Co и TiC ($5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, процесс HIP), сохраняет КТР $4,9 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$ и деформацию $< 0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$ во время высокотемпературной штамповки (600°C). Для оптимизации требуются TiC и HIP.

3.2.3 Стабильность при высоких температурах

Твердость твердого сплава при 1000°C падает на $< 30\%$ (HV 1800 ± 30 до 1200 ± 30), что лучше, чем у быстрорежущей стали (600°C , HV 500), керамики (1200°C , HV 800) и титановых сплавов (600°C , HV 200). Стабильность определяется высокой температурой плавления WC ($2870^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, энергия разложения $> 500 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$) и термопластичностью фазы Co (температура Кюри $1120^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, пластическая деформация $< 5\% \pm 0,5\%$). Твердость твердого сплава, содержащего 10% Co, при 1000°C составляет HV 1300 ± 30 , а потеря на износ $< 0,2 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$.

Высокая температурная стабильность поддерживает экстремальные рабочие условия. Износ инструмента, содержащего 8% Co, при резке авиационного титанового сплава 1000°C (скорость 150 м/мин , плотность теплового потока $> 10 \text{ МВт/м}^2 \pm 1 \text{ МВт/м}^2$) составляет $< 0,15 \text{ мм} \pm 0,03 \text{ мм}$, а срок службы составляет $> 10 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$, что лучше, чем у керамических инструментов (износ $> 0,5 \text{ мм}$). Добавление TaC (1%2%) улучшает жесткость при высоких температурах (снижение модуля Юнга $< 5\% \pm 1\%$) за счет упрочнения твердого раствора (деформация решетки $< 2\% \pm 0,2\%$), а твердость сохраняется на уровне HV 1400 ± 30 . Например, сопло, содержащее TaC, работает в газовой турбине (1100°C , скорость потока газа $> 500 \text{ м/с} \pm 50 \text{ м/с}$), при этом повреждение поверхности $< 10 \text{ мкм} \pm 2 \text{ мкм}$ и срок службы $> 6000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$, что лучше, чем у материалов без TaC (повреждение $> 20 \text{ мкм}$).

Воздействие на окружающую среду требует внимания. Высокотемпературное окисление (600°C) генерирует CoO и WO_3 (потеря веса $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,1 \text{ мг/см}^2$, оксидный слой $< 2 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$), а твердость уменьшается на $5\% \text{ } 10\% \pm 1\%$; влажное тепло (40°C , влажность 90%, 168 часов) влияет на $< 2\% \pm 0,5\%$; высокое давление ($> 100 \text{ МПа}$) повышает стабильность, снижая $< 3\% \pm 0,5\%$; экстремальный холод (40°C) не влияет; радиация (10^4 Гр) снижает $< 1\% \pm 0,2\%$. Твердый сплав, содержащий Cr ($0,5\% \text{ } 1\%$), образует защитный слой Cr_2O_3 (толщина $< 5 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, коэффициент диффузии $< 10^{-14} \text{ см}^2 / \text{с}$), а твердость при 1000°C сохраняет HV 1350 ± 30 . Например, деформация Cr-содержащей матрицы при высокотемпературной экструзии (800°C , нагрузка $> 2000 \text{ МПа}$) составляет $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$, а срок службы увеличивается на $30\% \pm 5\%$.

Оптимизация требует TaC и покрытия. Покрытия CVD (например, Al_2O_3 , толщина $5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, теплопроводность $10 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) уменьшают падение твердости на 50%. Инструменты с покрытиями Al_2O_3 имеют срок службы $> 12 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$ при обработке авиакосмических двигателей (1000°C , частота вибрации $> 10^3 \text{ Гц} \pm 100 \text{ Гц}$), что лучше, чем

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

инструменты без покрытия (срок службы < 4 часов). Междоменные сравнения показывают, что цементированный карбид имеет лучшую высокотемпературную стабильность, чем сталь и титановые сплавы, но уступает керамике (Si_3N_4 , твердость > 1000 HV) при сверхвысоких температурах (> 1500 °C).

3.2.3.1 Метод испытания на устойчивость к высоким температурам

Методы испытаний на устойчивость к высоким температурам включают:

Испытание на твердость при высокой температуре (ASTM E18): Твердый сплав, содержащий 10% Co (HV 1300±30, 1000°C) с использованием индентора Виккерса, нагрузка 10 кг ± 0,1 кг, удержание 5 с ± 0,5 с, погрешность <2% ± 0,5%. Требования к окружающей среде 1000°C ± 10°C, атмосфера N₂ (чистота > 99,99% ± 0,01%).

Термогравиметрический анализ (ТГА, ASTM E1131): цементированный карбид, содержащий 8% Co (прирост массы при окислении <2 мг/см² ± 0,2 мг/см², 1000°C) с использованием образца 10×10×2 мм ± 0,1 мм, нагрев 10°C/мин ± 0,5°C/мин, разрешение по массе 0,1 мкг ± 0,05 мкг, погрешность <3% ± 0,5%.

Испытание на износ при высокой температуре (ASTM G65): твердый сплав, содержащий TaC (износ <0,2 мм ± 0,05 мм, 1000 °C) при трении шлифовального круга (скорость 1 м/с ± 0,1 м/с, нагрузка 50 Н ± 1 Н), погрешность <5% ± 1%.

Испытание на растяжение при высокой температуре: хромсодержащий твердый сплав (предел текучести >1000 МПа ± 50 МПа, 800 °C) использует диаметр образца 5 мм ± 0,1 мм, скорость 0,1 мм/мин ± 0,01 мм/мин и погрешность <5% ± 1%.

Например, форсунки, содержащие TaC, проходят испытания на высокотемпературную твердость и термогравиметрический анализ (HV 1400±30, увеличение веса <1 мг/см² ± 0,1 мг/см²), гарантируя срок службы >6000 часов ±500 часов.

3.2.3.2 Факторы, влияющие на устойчивость к высоким температурам

На стабильность при высоких температурах влияют следующие факторы:

Состав: Содержание Co увеличивается с 6% до 15%, а твердость уменьшается с 25% до 35% ± 2% (1000°C, HV 1500 до 1000 ± 30) из-за размягчения Co (предел текучести < 400 МПа ± 20 МПа). TaC (1% 2%) уменьшается на < 20% ± 2% из-за упрочнения твердого раствора. Cr (0,5% 1%) уменьшается на < 15% ± 2% из-за защитного слоя Cr₂O₃.

Процесс: Температура спекания (1450°C±10°C) обеспечивает стабильность WC (скорость разложения <0,1%±0,02%), стабильность увеличивается на 5%±1%; HIP (100 МПа±5 МПа) устраняет дефекты, увеличивается на 3%±0,5%. Слишком высокая температура (>1550°C) вызывает окисление (увеличение веса >2 мг/см² ± 0,2 мг/см²), уменьшается на 5%±1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Окружающая среда: Высокотемпературное окисление (600°C) снижает на 5%10%±1% из-за образования CoO; влажное тепло (40°C, влажность 90%) влияет на <2%±0,5%; высокое давление (>100 МПа) увеличивает на 3%±0,5%; радиация (10⁴Гр) снижает на <1%±0,2%.

Покрывание: покрытие Al₂O₃ (5 мкм ±1 мкм) снижает окисление (прирост веса <0,5 мг/см² ± 0,1 мг/см²) и увеличивает стабильность на 50% ±5%; покрытие TiN (5 мкм ±1 мкм) увеличивает на 30% ±3%.

с покрытием Cr и Al₂O₃ (HV 1350±30, 1000°C) имеет деформацию <0,01мм±0,002мм и срок службы >6000ч±500ч при высокотемпературной экструзии (800°C). Для оптимизации требуются TaC и покрытие.

3.2.4 Устойчивость к термическому удару

Термостойкость твердого сплава оценивается с помощью испытания на термошок (охлаждение водой 500°C, 100 раз, ASTM C1525), а длина трещины составляет <5 мкм ± 1 мкм, что лучше, чем у керамики (> 10 мкм) и оксида алюминия (> 15 мкм). Термостойкость определяется низким КТР (5,5×10⁻⁶ /K ± 0,1×10⁻⁶ /K), высокой теплопроводностью (100 Вт/м·K ± 5 Вт/м·K) и высокой прочностью (> 4000 МПа ± 100 МПа), а термическое напряжение составляет < 200 МПа ± 20 МПа. Глубина трещины твердого сплава, содержащего 12% Co, в термическом цикле (25800°C, 1000 раз, разница температур >500°C±10°C) составляет <3 мкм±0,5 мкм.

Термостойкость поддерживает условия термоциклирования. Форма, содержащая 10% Co, имеет скорость трещинообразования <0,5% и срок службы >5000 часов ±500 часов при высокотемпературной штамповке (600°C, частота >10⁴ раз/час, разница температур >400°C±10°C), что лучше, чем у стальных форм (скорость трещинообразования >5%). Добавление Cr (0,5%1%) для формирования защитного слоя Cr₂O₃ (толщина <5 нм ±1 нм) улучшает термостойкость на 15% ±2%, а скорость возникновения трещин снижается на 20% ±3%. Например, повреждение поверхности сопла, содержащего Cr, составляет <5 мкм ±1 мкм в термическом цикле газовой турбины (1100°C, скорость потока газа >500 м/с ±50 м/с), а срок службы увеличивается на 35% ±5%.

Влияние окружающей среды включает высокотемпературное окисление (600 °C, образование CoO, толщина <2 мкм ± 0,5 мкм, стойкость к тепловому удару снизилась на 5% ± 1%), влажное тепло (40 °C, влажность 90%, снизилась на <2% ± 0,5%), высокое давление (> 100 МПа, увеличилось на 3% ± 0,5%), экстремальный холод (40 °C, скорость трещин увеличилась на 3% ± 0,5%) и радиацию (10⁴ Гр, снизилась на <1% ± 0,2%). Ni-содержащий цементированный карбид (12% Ni, трещина <3 мкм ± 0,5 мкм) более стабилен в паре ядерной энергетики (500 °C, 10 МПа, скорость потока пара > 100 м/с ± 10 м/с). Например, трубопровод, содержащий Ni, эксплуатировался в течение 3 лет с трещинами <3 мкм ± 0,5 мкм, что лучше, чем у материалов, содержащих Co (трещины > 5 мкм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оптимизация требует высокого содержания Со (10%12%) и покрытия. Покрытия CVD (например, TiN, 5 мкм ± 1 мкм, теплопроводность 20 Вт/м·К ± 2 Вт/м·К) снижают скорость образования трещин на 50% ± 5%. Срок службы инструментов с покрытием TiN при резке в термическом цикле (800 °С, частота вибрации >10³ Гц ± 100 Гц) составляет > 10 часов ± 1 час, что лучше, чем у инструментов без покрытия (срок службы <4 часа). Междоменные сравнения показывают, что твердый сплав имеет лучшую стойкость к термическому удару, чем керамика и титановые сплавы, но уступает композитам из углеродного волокна (трещины <1 мкм) при сверхвысоком термическом ударе.

3.2.4.1 Метод испытания на стойкость к тепловому удару

Методы испытаний на стойкость к тепловому удару включают:

Испытание на тепловой удар (ASTM C1525): цементированный карбид, содержащий 12% Со (трещина <5 мкм ± 1 мкм) с использованием образца 10×10×5 мм ± 0,1 мм, охлаждение водой 500 °С (разница температур >450 °С ± 10 °С), 100 раз, обнаружение трещин с помощью СЭМ (разрешение <5 нм ± 1 нм), погрешность <3% ± 0,5%.

Испытание на усталость при термическом цикле: цементированный карбид, содержащий 10% Со (трещина <3 мкм ± 0,5 мкм), подвергался циклированию при температуре 25800 °С в течение 1000 раз с разницей температур >500 °С ± 10 °С и погрешностью <5% ± 1%.

Ультразвуковой контроль (ASTM E588): для хромсодержащего твердого сплава (глубина трещины <5 мкм ± 1 мкм) используется продольная волна (частота 5 МГц ± 0,1 МГц, скорость волны 6 км/с ± 0,1 км/с) с погрешностью <5% ± 1%.

Инфракрасная тепловизионная съемка: Ni-содержащий карбид (трещина <3 мкм ± 0,5 мкм) использует инфракрасную камеру (разрешение 0,1 °С ± 0,05 °С) для анализа распределения термических напряжений (погрешность <5% ± 1%).

Например, сопла, содержащие Cr, проходят испытания на термоудар и ультразвуковые испытания (трещина <5 мкм ± 1 мкм), гарантируя срок службы газовой турбины >5000 часов ± 500 часов.

3.2.4.2 Факторы, влияющие на стойкость к тепловому удару

На стойкость к термическому удару влияют следующие факторы:

Состав: Содержание Со увеличивается с 10% до 12%, термостойкость увеличивается на 15%±2% за счет повышенной пластичности (деформация <5%±0,5%). TiC (15%) уменьшается на 10%±1% за счет снижения КТР (5,0×10⁻⁶ /К±0,1×10⁻⁶ /К), но снижения теплопроводности (85 Вт/м·К±5 Вт/м·К). Cr (0,5%1%) увеличивается на 15%±2% за счет защитного слоя Cr₂O₃.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Процесс: Температура спекания ($1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) улучшает однородность и термостойкость на $5\% \pm 1\%$; HIP ($100 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) снижает дефекты на $10\% \pm 1\%$. Быстрое охлаждение ($>10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) вызывает напряжение ($>100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$), которое уменьшается на $5\% \pm 1\%$.

Окружающая среда: Окисление при высокой температуре (600°C) снижается на $5\% \pm 1\%$ из-за образования CoO ; влажное тепло (40°C , влажность 90%) снижается на $<2\% \pm 0,5\%$; высокое давление ($> 100 \text{ МПа}$) повышается на $3\% \pm 0,5\%$; экстремальный холод (40°C) снижается на $3\% \pm 0,5\%$; радиация (10^4Гр) снижается на $<1\% \pm 0,2\%$.

Покрытие: покрытие TiN ($5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) снижает термическое напряжение ($<150 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), увеличивается на $50\% \pm 5\%$; покрытие Al_2O_3 увеличивает на $30\% \pm 3\%$.

Например, инструмент с покрытием 10% Co и TiN (трещина $< 3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$) имеет срок службы $> 10 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$ при резке термическим циклом (800°C). Оптимизация требует высокого покрытия Co и TiN.

3.3 Химическая стабильность твердого сплава

Химическая стабильность твердого сплава относится к его способности противостоять химическим реакциям или коррозии в различных средах (таких как кислота, щелочь, высокая температура, влажное тепло и т. д.), что в основном определяется химическими свойствами твердой фазы карбида вольфрама (WC) и связующей фазы кобальта (Co) или никеля (Ni). WC обладает превосходной стойкостью к окислению и коррозии и является химически инертным, но он может разлагаться или окисляться с образованием WO_3 при высоких температурах ($>800^{\circ}\text{C}$). Фаза Co относительно активна и склонна к коррозии в кислых ($\text{pH} < 4$, таких как HCl , H_2SO_4) или влажных и горячих средах (40°C , влажность 90%), со скоростью потери веса $0,1\text{--}0,2 \text{ мг}/\text{см}^2/\text{год}$, в то время как фаза Ni более устойчива к коррозии (потеря веса $< 0,05 \text{ мг}/\text{см}^2/\text{год}$).

Химическая стабильность твердого сплава зависит от состава и процесса: уменьшение содержания Co ($6\text{--}8\%$) или добавление Cr и TiC ($0,5\text{--}1\%$) может образовывать защитный слой (такой как Cr_2O_3), который улучшает коррозионную стойкость примерно на $10\text{--}15\%$; высокотемпературное спекание ($1350\text{--}1450^{\circ}\text{C}$) и процесс HIP уменьшают пористость ($<0,05\%$), уменьшают каналы коррозии и улучшают стабильность примерно на $5\text{--}10\%$. В практических применениях твердый сплав, содержащий Ni, обладает превосходной стабильностью в морской среде (соленость 3,5%, 50 МПа) с падением прочности $<1\%$ и сроком службы более 3 лет; При высокой температуре (1000°C) прирост веса окисления содержащего TiC цементированного карбида составляет $<0,08 \text{ мг}/\text{см}^2$, что лучше, чем у чистой системы Co ($>0,1 \text{ мг}/\text{см}^2$). Текущая дата и время — 21 мая 2025 г., 10:10 по японскому стандартному времени.

из цементированного карбида гарантирует, что он может служить в течение длительного времени в агрессивных средах, при высокотемпературном окислении и в сложных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

химических средах, и используется в химической промышленности, океане, атомной энергетике и на больших глубинах.

3.3.1 Коррозионная стойкость твердого сплава

Твердый сплав обладает превосходной коррозионной стойкостью в кислых (pH 24), нейтральных (pH 68) и щелочных (pH 1012) средах, а химическая инертность фазы WC (скорость растворения $<10^{-6} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч}$ $\pm 10^{-7} \text{ г/см}^2 \cdot \text{ч}$) является ключевым фактором. Скорость коррозии твердого сплава, содержащего 10% Co, в нейтральной среде (3,5% NaCl, содержащий Cl^- 19 г/л) составляет $<0,05 \text{ мм/год} \pm 0,01 \text{ мм/год}$, а коррозионный потенциал составляет $0,3 \text{ В} \pm 0,02 \text{ В}$ (по сравнению с SCE), что лучше, чем у высокопрочной стали (0,6 В, 0,5 мм/год) и нержавеющей стали (0,2 мм/год). В кислой среде (pH 3, H_2SO_4 , концентрация 1 моль/л) фаза Co растворилась (потеря веса $0,10,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$), а скорость коррозии увеличилась до $0,1 \text{ мм/год} \pm 0,02 \text{ мм/год}$.

Потеря веса Ni-содержащего цементированного карбида (12% Ni) в испытании на соляной туман (ASTM B117, 168 часов, $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) составляет $<0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,02 \text{ мг/см}^2$, а скорость коррозии в щелочной среде (pH 12, NaOH, концентрация 0,1 моль/л) составляет $<0,02 \text{ мм/год} \pm 0,005 \text{ мм/год}$, что лучше, чем у Co-содержащих материалов ($0,05 \text{ мм/год} \pm 0,01 \text{ мм/год}$). Добавление Cr (0,5%1%) образует пассивирующий слой Cr_2O_3 (толщина $<5 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, удельное сопротивление $> 10^6 \Omega \cdot \text{см} \pm 10^5 \Omega \cdot \text{см}$), скорость кислотной коррозии снизилась до $0,01 \text{ мм/год} \pm 0,002 \text{ мм/год}$.

Например, клапаны, содержащие NiCr, работали в глубоком море (pH 8, соленость 3,5%, глубина 5000 м) в течение 5 лет с глубиной коррозии $<5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, что лучше, чем у нержавеющей стали (глубина $>50 \text{ мкм}$, срок службы $<2 \text{ лет}$).

Влияние окружающей среды значительно. Влажное тепло (40°C , влажность 90 %, 168 часов) усиливает коррозию фазы Co (потеря веса увеличивается на $10\% \pm 2\%$, плотность тока коррозии $> 1 \text{ мкА} / \text{см}^2 \pm 0,1 \text{ мкА} / \text{см}^2$); высокое давление ($> 100 \text{ МПа}$, глубокое море) снижает диффузию ионов (коэффициент диффузии $< 10^{-10} \text{ см}^2 / \text{с} \pm 10^{-11} \text{ см}^2 / \text{с}$), и скорость коррозии уменьшается на $5\% \pm 1\%$; экстремальный холод (40°C) замедляет реакцию (скорость реакции уменьшается $< 50\% \pm 5\%$) и уменьшается на $3\% \pm 0,5\%$; излучение (10^4 Гр) вызывает дефекты поверхности и увеличивается на $2\% \pm 0,3\%$. Твердый сплав, содержащий Mo (0,5%1%), образует защитный слой MoO_2 (толщина $<3 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$), а скорость кислотной коррозии составляет $<0,015 \text{ мм/год} \pm 0,003 \text{ мм/год}$.

Например, повреждение поверхности реактора, содержащего NiMo, после работы в среде HCl (pH 2, концентрация 1 моль/л) в течение 3 лет составило $<3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, что лучше, чем у материалов, содержащих Co (повреждение $> 10 \text{ мкм}$).

Коррозионная стойкость поддерживает химическую промышленность и океан. Корпус

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

насоса, содержащий 10% Co, эксплуатировался на химическом заводе (pH 4, H₂SO₄, скорость потока >5 м/с ± 0,5 м/с) в течение 2 лет, с глубиной коррозии <10 мкм ± 2 мкм и сроком службы >2 года ± 0,2 года; футеровка, содержащая Ni, увеличила срок службы на 40% ± 5% в морской среде (pH 8, соленость 3,5%). Сравнение перекрестных полей показывает, что цементированный карбид имеет лучшую коррозионную стойкость, чем сталь и титановый сплав (0,3 мм/год), но уступает керамике в сильных окисляющих кислотах (таких как HNO₃, концентрация > 5 моль/л) (потеря веса < 0,01 мг/см²).

3.3.1.1 Метод испытания на коррозионную стойкость

Методы испытаний на коррозионную стойкость включают:

Электрохимическое испытание (ASTM G59): цементированный карбид, содержащий 10% Co (скорость коррозии <0,05 мм/год ± 0,01 мм/год) с использованием трехэлектродной системы (электрод сравнения SCE, скорость сканирования 1 мВ/с ± 0,1 мВ/с, диапазон потенциалов ± 250 мВ ± 10 мВ), погрешность тока коррозии <1% ± 0,2%, общая погрешность <2% ± 0,5%. Требования к окружающей среде 25°C ± 2°C, электролит 3,5% NaCl.

Испытание в соляном тумане (ASTM B117): цементированный карбид, содержащий 12% Ni (потеря веса <0,1 мг/см² ± 0,02 мг/см²) при 35°C ± 1°C, распыление 5% NaCl, 168 часов, разрешение по массе 0,1 мг ± 0,05 мг, погрешность <3% ± 0,5%.

Испытание погружением (ASTM G31): хромсодержащий цементированный карбид (скорость коррозии <0,01 мм/год ± 0,002 мм/год) с использованием pH 2 H₂SO₄, 168 часов, температура 25 °C ± 2 °C, погрешность потери веса <0,01 мг/см² ± 0,005 мг/см², погрешность <5% ± 1%.

Анализ поверхности XPS: цементированный карбид, содержащий Mo (слой коррозии <3 мкм ± 0,5 мкм), использует излучение AlKα (1486,6 эВ ± 0,1 эВ, разрешение 0,1 эВ ± 0,05 эВ) для анализа пассивирующего слоя (погрешность <5% ± 1%).

Например, клапаны, содержащие NiCr, проходят электрохимические испытания и испытания в соляном тумане (скорость коррозии <0,02 мм/год ± 0,005 мм/год, потеря веса <0,1 мг/см² ± 0,02 мг/см²), гарантируя срок службы в глубоководных условиях >5 лет ± 0,5 лет.

3.3.1.2 Факторы, влияющие на коррозионную стойкость твердого сплава

На коррозионную стойкость влияют:

Элемент

При увеличении содержания Co от 10% до 15% скорость коррозии в нейтральной среде (3,5% NaCl, pH 8) увеличивается от 0,05 до 0,07 мм/год ± 0,01 мм/год, что обусловлено усилением электрохимической активности фазы Co (плотность тока коррозии увеличивается от 1 до 1,5 мкА/см² ± 0,1 мкА/см²). Замена Co на Ni (12% Ni) снижает скорость коррозии до 0,02 мм/год

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,005$ мм/год, что обусловлено образованием устойчивого пассивирующего слоя NiO (толщина < 3 нм $\pm 0,5$ нм, удельное сопротивление $> 10^{-7}$ Ом·см $\pm 10^{-6}$ Ом·см). Добавление Cr (0,5%1%) падает до 0,01 мм/год $\pm 0,002$ мм/год, поскольку защитный слой Cr₂O₃ (энергия связи > 400 кДж/моль ± 10 кДж/моль) подавляет диффузию ионов (коэффициент диффузии $< 10^{-14}$ см²/с $\pm 10^{-15}$ см²/с). Mo (0,5%1%) образует MoO₃ (толщина < 3 нм $\pm 0,5$ нм), и скорость коррозии в кислой среде (pH 2, HCl) падает до 0,015 мм/год $\pm 0,003$ мм/год.

Например, клапан, содержащий NiCr (скорость коррозии 0,01 мм/год $\pm 0,002$ мм/год), проработал в глубоком море (5000 м, соленость 3,5%) в течение 5 лет с поверхностным повреждением < 5 мкм ± 1 мкм.

Технологии

Температура спекания (1450°C $\pm 10^\circ$ C) обеспечивает соединение интерфейса WCCo (прочность связи > 50 МПа ± 5 МПа), снижает воздействие Co (воздействуемая площадь $< 5\% \pm 1\%$) и снижает скорость коррозии на $3\% \pm 0,5\%$. Горячее изостатическое прессование (HIP, 100 МПа ± 5 МПа) устраняет поры (пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$), уменьшает пути коррозии и снижает скорость коррозии на $5\% \pm 1\%$. Избыточная температура ($> 1550^\circ$ C) вызывает сегрегацию Co (скорость сегрегации $< 5\% \pm 1\%$) и увеличивает скорость коррозии на $10\% \pm 2\%$. Полировка поверхности (Ra $< 0,2$ мкм $\pm 0,05$ мкм) уменьшает реактивные участки (поверхностная энергия < 1 Дж/м² $\pm 0,1$ Дж/м²), снижая скорость коррозии на $2\% \pm 0,3\%$. Например, корпус насоса, содержащий 10% Co и подвергнутый горячему изостатическому прессованию (скорость коррозии 0,04 мм/год $\pm 0,01$ мм/год), эксплуатируется на химическом заводе (pH 4) со сроком службы > 2 лет $\pm 0,2$ года.

Среда

Влажное тепло (40°C, влажность 90%, 168 часов) усиливает коррозию фазы Co (потеря веса увеличивается на $10\% \pm 2\%$, глубина коррозии < 2 мкм $\pm 0,5$ мкм); высокое давление (> 100 МПа, глубокое море) подавляет миграцию ионов, снижая на $5\% \pm 1\%$; экстремальный холод (40°C) замедляет кинетику реакции (энергия активации > 100 кДж/моль ± 5 кДж/моль), снижая на $3\% \pm 0,5\%$; излучение (10^4 Гр, γ -излучение) вызывает поверхностные дефекты (плотность вакансий $< 10^{-15}$ /см³), увеличивая на $2\% \pm 0,3\%$; Сильная окислительная кислота (например, HNO₃, 5 моль/л) вызывает растворение WC (потеря веса $> 0,5$ мг/см² $\pm 0,1$ мг/см²), увеличивая на $20\% \pm 3\%$. Mo-содержащий цементированный карбид работает в HCl (pH 2), и скорость коррозии поддерживается на уровне 0,015 мм/год $\pm 0,003$ мм/год.

Электрохимические условия

Потенциал ($> 0,3$ В против SCE) вызывает анодное растворение Co (скорость растворения $> 10^{-6}$ г/см² · ч $\pm 10^{-7}$ г/см² · ч), и скорость коррозии увеличивается на $10\% \pm 2\%$; низкий pH (< 4) ускоряет атаку H⁺ (скорость реакции $> 10^{-5}$ моль/см² · с $\pm 10^{-6}$ моль/см² · с), увеличиваясь на $15\% \pm 2\%$. Например, скорость коррозии Ni-содержащих электродов (потенциал коррозии 0,2 В $\pm 0,02$ В), работающих в электролите (pH 3), составляет $< 0,02$ мм/год $\pm 0,005$ мм/год.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Обработка поверхности

Покрытие CVD (например, CrN, $5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, удельное сопротивление $> 10^8 \Omega \cdot \text{см} \pm 10^7 \Omega \cdot \text{см}$) снижает скорость коррозии на $50\% \pm 5\%$ за счет изолирующей среды; полировка ($R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,02 \text{ мкм}$) снижает на $3\% \pm 0,5\%$. Футеровка с покрытием CrN проработала в морской среде (pH 8) 3 года, а глубина коррозии составила $< 3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$.

Оптимизация коррозионной стойкости требует добавления Ni/Cr/Mo и процесса HIP. Например, срок службы клапана, содержащего 12% Ni и 0,5% Cr (скорость коррозии $0,01 \text{ мм/год} \pm 0,002 \text{ мм/год}$), работающего в глубоководной нефтегазовой отрасли (5000 м, pH 8), увеличивается на $40\% \pm 5\%$.

3.3.2 Стойкость к окислению твердого сплава

Стойкость к окислению твердого сплава определяется химической стабильностью WC (энтальпия окисления $< 800 \text{ кДж/моль} \pm 20 \text{ кДж/моль}$) и склонностью к окислению фазы Co (образование CoO, энтальпия $< 200 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$). При 700°C окислительная масса твердого сплава, содержащего 10% Co, увеличивается на $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,1 \text{ мг/см}^2$, а толщина оксидного слоя составляет $< 2 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$; при 1000°C вес увеличивается на $2 \text{ мг/см}^2 \pm 0,2 \text{ мг/см}^2$, а толщина оксидного слоя составляет $< 10 \text{ мкм} \pm 2 \text{ мкм}$, что лучше, чем у высокопрочной стали (700°C , вес увеличивается $> 5 \text{ мг/см}^2$) и титанового сплава (700°C , вес увеличивается $> 3 \text{ мг/см}^2$).

Стойкость к окислению поддерживает высокотемпературные рабочие условия. При резке авиационного титанового сплава (1000°C , тепловой поток $> 10 \text{ МВт/м}^2 \pm 1 \text{ МВт/м}^2$, парциальное давление O_2 $0,21 \text{ атм} \pm 0,01 \text{ атм}$) глубина окисления инструмента, содержащего 8% Co, составляет $< 5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, величина износа составляет $< 0,15 \text{ мм} \pm 0,03 \text{ мм}$, а срок службы составляет > 10 часов ± 1 час, что лучше, чем у керамических инструментов (глубина окисления $> 20 \text{ мкм}$). При добавлении TiC (15%) для формирования защитного слоя TiO_2 (толщина $< 3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, коэффициент диффузии $< 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с} \pm 10^{-15} \text{ см}^2/\text{с}$) прирост веса при 1000°C снижается до $1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,1 \text{ мг/см}^2$.

Например, сопло, содержащее 15% TiC, проработало в газовой турбине (1100°C , скорость потока газа $> 500 \text{ м/с} \pm 50 \text{ м/с}$, содержание O_2 $20\% \pm 1\%$) в течение 5000 часов, при этом толщина оксидного слоя составила $< 8 \text{ мкм} \pm 2 \text{ мкм}$, а деформация составила $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$, что лучше, чем у материала без TiC (оксидный слой $> 15 \text{ мкм}$).

Воздействие на окружающую среду требует внимания. Влажное тепло (40°C , влажность 90%, 168 часов) вызывает микроокисление CoO (прирост веса $< 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,02 \text{ мг/см}^2$), а стойкость к окислению снижается на $< 2\% \pm 0,5\%$; высокотемпературный пар (500°C , 10 МПа, парциальное давление $\text{H}_2\text{O} > 0,9 \text{ атм} \pm 0,01 \text{ атм}$) ускоряет образование WO_3 (прирост веса увеличивается на $10\% \pm 2\%$, оксидный слой $< 5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$); высокое давление ($> 100 \text{ МПа}$) подавляет диффузию кислорода, снижая ее на $5\% \pm 1\%$; излучение (10^4 Гр) вызывает дефекты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности, увеличивая ее на $2\% \pm 0,3\%$. Твердый сплав, содержащий Cr ($0,5\% \pm 1\%$), образует защитный слой Cr_2O_3 (толщина $< 5 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, удельное сопротивление $> 10^6 \Omega \cdot \text{см} \pm 10^5 \Omega \cdot \text{см}$), прирост веса при 1000°C снижается до $0,8 \text{ мг/см}^2 \pm 0,1 \text{ мг/см}^2$. Например, при высокотемпературной экструзии (800°C , парциальное давление O_2 $0,21 \text{ атм} \pm 0,01 \text{ атм}$) глубина окисления форм, содержащих Cr, составляет $< 3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$, а срок службы увеличивается на $30\% \pm 5\%$.

Оптимизация требует добавления и покрытия Cr/TiC. Покрытия CVD (например, Al_2O_3 , $5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, теплопроводность $10 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 2 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$, энтальпия окисления $< 1600 \text{ кДж/моль} \pm 50 \text{ кДж/моль}$) уменьшают увеличение веса на $60\% \pm 5\%$. Инструменты с покрытием Al_2O_3 имеют глубину окисления $< 3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ и срок службы $> 12 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$ при обработке авиакосмических двигателей (1000°C , частота вибрации $> 10^3 \text{ Гц} \pm 100 \text{ Гц}$), что лучше, чем инструменты без покрытия (глубина окисления $> 10 \text{ мкм}$, срок службы $< 4 \text{ часов}$). Междоменные сравнения показывают, что твердый сплав имеет лучшую стойкость к окислению, чем сталь и титановые сплавы, но уступает керамике (Si_3N_4 , прирост веса $< 0,5 \text{ мг/см}^2$) при сверхвысоких температурах ($> 1200^\circ\text{C}$).

3.3.2.1 Метод проверки стойкости к окислению твердого сплава

Методы испытаний антиоксидантов обеспечивают оценку стабильности при высоких температурах, к распространенным методам относятся:

Термогравиметрический анализ (ТГА, ASTM E1131)

В твердом сплаве, содержащем 10% Co (700°C , прирост веса $0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,1 \text{ мг/см}^2$), используется образец размером $10 \times 10 \times 2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, скорость нагрева $10^\circ\text{C/мин} \pm 0,5^\circ\text{C/мин}$, разрешение по массе $0,1 \text{ мкг} \pm 0,05 \text{ мкг}$, атмосфера воздуха (парциальное давление O_2 $0,21 \text{ атм} \pm 0,01 \text{ атм}$) и погрешность $< 2\% \pm 0,5\%$.

Испытание на воздействие высокой температуры (ISO 21608)

Твердый сплав, содержащий TiC (1000°C , прирост веса $< 1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,1 \text{ мг/см}^2$), образец имел размеры $20 \times 10 \times 5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, подвергался воздействию в течение 168 часов при колебаниях температуры $< \pm 5^\circ\text{C}$ и погрешности $< 3\% \pm 0,5\%$.

E2108): Cr-содержащий цементированный карбид (толщина оксидного слоя $< 8 \text{ мкм} \pm 2 \text{ мкм}$) использует излучение $\text{AlK}\alpha$ ($1486,6 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$, разрешение $0,1 \text{ эВ} \pm 0,05 \text{ эВ}$) для анализа состава оксида ($\text{Cr}_2\text{O}_3 / \text{WO}_3$, погрешность $< 5\% \pm 1\%$).

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ, ASTM E986)

Оксидный слой цементированного карбида с покрытием Al_2O_3 (глубина окисления $< 3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$) анализировался с использованием режима обратно рассеянных электронов с разрешением $< 5 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$ (погрешность $< 5\% \pm 1\%$).

Спектроскопическая эллипсометрия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Для твердого сплава, содержащего 10% Co (оксидный слой $<10 \text{ мкм} \pm 2 \text{ мкм}$), длина волны составляет $300800 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, а угол падения составляет $70^\circ \pm 0,5^\circ$ для измерения толщины оксидного слоя (погрешность $<5\% \pm 1\%$).

Для испытания требуется контролируемая атмосфера (чистота $\text{O}_2 > 99,9\% \pm 0,1\%$) и температура (колебания $< \pm 5^\circ\text{C}$). Например, форсунки, содержащие Cr, проходят испытания TGA и XPS (1000°C , прирост веса $0,8 \text{ мг/см}^2 \pm 0,1 \text{ мг/см}^2$, оксидный слой $< 8 \text{ мкм} \pm 2 \text{ мкм}$), гарантируя срок службы газовой турбины $> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$.

3.3.2.2 Факторы, влияющие на антиоксидантную активность

На антиоксидантную активность влияют следующие факторы:

Состав: Содержание Co увеличивается с 10% до 15%, а прирост веса при 1000°C увеличивается с 2 до $2,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,2 \text{ мг/см}^2$ из-за увеличения скорости образования CoO (скорость реакции $> 10^{-5} \text{ г/см}^2 \cdot \text{с} \pm 10^{-6} \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$). TiC (15%) уменьшается до $1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,1 \text{ мг/см}^2$ из-за защитного слоя TiO_2 (коэффициент диффузии $< 10^{-14} \text{ см}^2 / \text{с}$). Cr ($0,5\% \pm 1\%$) снижается до $0,8 \text{ мг/см}^2 \pm 0,1 \text{ мг/см}^2$ из-за образования Cr_2O_3 (энергия связи $> 400 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$). Для твердого сплава с покрытием Al_2O_3 ($5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) он падает до $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$.

Процесс: Температура спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) обеспечивает стабильность WC (скорость разложения $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а прирост веса уменьшается на $3\% \pm 0,5\%$; HIP ($100 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) снижает пористость ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), и уменьшается на $5\% \pm 1\%$. Избыточная температура ($> 1550^\circ\text{C}$) вызывает окисление Co (прирост веса увеличивается на $10\% \pm 2\%$). Осаждение покрытия (CVD, $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) образует плотный Al_2O_3 (пористость $< 0,5\% \pm 0,1\%$), и уменьшается на $60\% \pm 5\%$.

Окружающая среда: Высокая температура (1000°C) увеличивает вес на $20\% \pm 3\%$ из-за диффузии O_2 (коэффициент диффузии $> 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с} \pm 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$); влажное тепло (40°C , влажность 90%) вызывает микроокисление, увеличивая на $< 2\% \pm 0,5\%$; пар (500°C , 10 МПа) увеличивает вес на $10\% \pm 2\%$ из-за образования WO_3 ; высокое давление ($> 100 \text{ МПа}$) уменьшает вес на $5\% \pm 1\%$; излучение (10^4 Гр) увеличивает вес на $2\% \pm 0,3\%$.

Состояние поверхности: Полировка ($R_a < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$) уменьшает участки окисления (поверхностная энергия $< 1 \text{ Дж/м}^2 \pm 0,1 \text{ Дж/м}^2$) на $3\% \pm 0,5\%$; шероховатая поверхность ($R_a > 0,4 \text{ мкм}$) увеличивает на $5\% \pm 1\%$.

Атмосфера: низкое парциальное давление O_2 ($< 0,1 \text{ атм} \pm 0,01 \text{ атм}$) уменьшает вес на $50\% \pm 5\%$; атмосфера, содержащая H_2O (парциальное давление $> 0,5 \text{ атм} \pm 0,01 \text{ атм}$), увеличивает вес на $10\% \pm 2\%$.

Например, инструмент, содержащий покрытие Cr и Al_2O_3 (1000°C , прирост веса $0,3 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$), имеет глубину окисления $< 3 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$ и срок службы $> 12 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$ при

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

авиационной резке. Оптимизация требует добавления Cr и покрытия Al_2O_3 .

3.4 Электрические и магнитные свойства твердого сплава

Электрические и магнитные свойства поддерживают применение цементированного карбида в электроэрозионной обработке (EDM), магнитном обнаружении, защите ядерной энергетики и аэрокосмических датчиках. В этом разделе анализируются электропроводность и магнитные свойства фазы Co.

3.4.1 Электропроводность твердого сплава

Удельное сопротивление цементированного карбида составляет $20 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 5 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а проводимость — $510 \text{ МСм/м} \pm 0,5 \text{ МСм/м}$, что находится между медью (58 МСм/м) и керамикой ($<0,1 \text{ МСм/м}$), и определяется WC (удельное сопротивление $15 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 2 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, подвижность электронов $> 2 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} \pm 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) и Co (удельное сопротивление $6 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$). Проводимость цементированного карбида, содержащего 10% Co, составляет $8 \text{ МСм/м} \pm 0,5 \text{ МСм/м}$, а содержащего 12% Ni, возрастает до $10 \text{ МСм/м} \pm 0,5 \text{ МСм/м}$, поскольку Ni имеет более высокую электронную проводимость (подвижность $> 1,5 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} \pm 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$).

Электропроводность поддерживает электрообработку и электролиз. В электроэрозионной обработке (плотность тока $> 10^{-4} \text{ А/см}^2 \pm 10^{-3} \text{ А/см}^2$, длительность импульса $0,1 \text{ мс} \pm 0,01 \text{ мс}$) скорость обработки форм из цементированного карбида, содержащих 10% Co, составляет $> 0,5 \text{ мм/мин} \pm 0,05 \text{ мм/мин}$, а шероховатость поверхности $Ra < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$ лучше, чем у стальных форм ($Ra > 0,5 \text{ мкм}$). Электрод, содержащий 8% Ni, работает в электролите ($\text{pH } 3$, H_2SO_4 , концентрация 1 моль/л) в течение 5000 часов, и проводимость поддерживается на уровне $9 \text{ МСм/м} \pm 0,5 \text{ МСм/м}$, а глубина коррозии составляет $< 5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$.

Например, электрод, содержащий 12% Ni, имеет эффективность $> 95\% \pm 2\%$ и срок службы $> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$ в новом энергетическом электролизере (плотность тока $> 500 \text{ А/м}^2 \pm 50 \text{ А/м}^2$, температура $60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$).

При высокой температуре (600°C) проводимость падает до $7 \text{ МСм/м} \pm 0,5 \text{ МСм/м}$ (уменьшение $< 15\% \pm 2\%$) из-за рассеяния электронов (подвижность уменьшается $< 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} \pm 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$); при влажном тепле (40°C , влажность 90%, 168 часов) проводимость падает на $< 3\% \pm 0,5\%$ из-за микрокоррозии Co (потеря веса $< 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,02 \text{ мг/см}^2$); при высоком давлении ($> 100 \text{ МПа}$, глубокое море) проводимость увеличивается на $2\% \pm 0,3\%$ из-за сжатия решетки (постоянная решетки уменьшается на $0,1\% \pm 0,02\%$); при экстремальном холоде (40°C) проводимость увеличивается на $3\% \pm 0,5\%$; и при облучении (10^4 Гр) проводимость падает на $< 1\% \pm 0,2\%$ из-за дефектов поверхности. Твердый сплав, содержащий Cr ($0,5\% \pm 1\%$), образует Cr_2O_3 (сопротивление $> 10^6 \text{ }\Omega \cdot \text{см} \pm 10^5 \text{ }\Omega \cdot \text{см}$), поверхностная проводимость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

снизилась на $5\% \pm 1\%$, но сердцевина была стабильной.

Например, проводимость Cr-содержащего электрода сохранялась на уровне $8 \text{ МСм/м} \pm 0,5 \text{ МСм/м}$ после эксплуатации в морской среде (рН 8, соленость 3,5%, 5000 м) в течение 3 лет, что лучше, чем у Co-содержащего материала (снижение $> 5\% \pm 1\%$).

Оптимизация требует добавления Ni и высокой плотности ($>99\% \pm 0,1\%$). Провода, содержащие 12% Ni, имеют изменение удельного сопротивления $<2\% \pm 0,5\%$ и погрешность сигнала $<0,1\% \pm 0,02\%$ в аэрокосмических датчиках (500°C , частота вибрации $>10^3 \text{ Гц} \pm 100 \text{ Гц}$). Междоменные сравнения показывают, что цементированный карбид более электропроводен, чем керамика и стекло, но уступает меди и серебру ($>50 \text{ МСм/м}$).

3.4.1.1 Метод испытания проводимости твердого сплава

Методы испытаний на проводимость обеспечивают оценку электрических характеристик, к распространенным методам относятся:

Четырехзондовый метод (ASTM B193)

содержащий 10% Co ($8 \text{ МСм/м} \pm 0,5 \text{ МСм/м}$), использует образец $20 \times 10 \times 2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, ток $1 \text{ А} \pm 0,01 \text{ А}$, расстояние между зондами $1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, разрешение напряжения $0,1 \text{ мкВ} \pm 0,05 \text{ мкВ}$ и погрешность $<2\% \pm 0,5\%$. Требования к окружающей среде составляют $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, а поверхность $R_a < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$.

Испытание вихревыми токами (ASTM E1004)

Твердый сплав, содержащий 12% Ni ($10 \text{ МСм/м} \pm 0,5 \text{ МСм/м}$), использует частоту $10 \text{ кГц} \pm 0,1 \text{ кГц}$, диаметр катушки $5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, разрешение сигнала $0,1 \text{ мкСм} \pm 0,05 \text{ мкСм}$, погрешность $<3\% \pm 0,5\%$ и подходит для сложных форм.

Измеритель сопротивления (ASTM D257)

Твердый сплав, содержащий 8% Co ($20 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 5 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$), имеет диаметр образца $10 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, толщину $2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, точность $0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ и погрешность $<5\% \pm 1\%$.

Тест на эффект Холла

Для Ni-содержащего твердого сплава (подвижность $> 1,5 \times 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} \pm 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) используются магнитное поле $0,5 \text{ Тл} \pm 0,01 \text{ Тл}$ и ток $10 \text{ мА} \pm 0,1 \text{ мА}$ с погрешностью $<5\% \pm 1\%$, что подходит для анализа электронного поведения.

Например, электроды, содержащие 12% Ni, проходят четырехзондовые и вихретоковые испытания ($10 \text{ МСм/м} \pm 0,5 \text{ МСм/м}$), что гарантирует срок службы ячейки $> 5000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4.1.2 Факторы, влияющие на проводимость твердого сплава

На электропроводность влияют:

Элемент

При увеличении содержания Co с 10% до 15% проводимость увеличивается с 8 до 9 МС/м $\pm$ 0,5 МС/м из-за высокой проводимости фазы Co (удельное сопротивление 6 мкОм·см $\pm$ 1 мкОм·см). Ni (12%) увеличивается до 10 МС/м $\pm$ 0,5 МС/м из-за более высокой подвижности электронов Ni. TiC (15%) уменьшается до 7 МС/м $\pm$ 0,5 МС/м из-за высокого удельного сопротивления TiC (> 50 мкОм·см $\pm$ 5 мкОм·см). Cr (0,5%1%) уменьшается до 7,5 МС/м $\pm$ 0,5 МС/м из-за изоляции Cr₂O₃ (удельное сопротивление $> 10^6$ Ω·см $\pm$ 10^5 Ω·см).

Технологии

Температура спекания (1450°C $\pm$ 10°C) улучшает контакт WCCo (площадь контакта $>90\%\pm 2\%$), а проводимость увеличивается на 3% $\pm$ 0,5%; HIP (100 МПа $\pm$ 5 МПа) снижает пористость ($<0,1\%\pm 0,02\%$), увеличивая на 2% $\pm$ 0,3%. Избыточная температура ($>1550^\circ\text{C}$) вызывает сегрегацию Co, уменьшая на 3% $\pm$ 0,5%. Полировка (Ra $<0,2$ мкм $\pm$ 0,05 мкм) снижает контактное сопротивление ($<0,1$ мкОм $\pm$ 0,02 мкОм), увеличивая на 1% $\pm$ 0,2%.

Среда

Высокая температура (600 °C) уменьшается на 15% $\pm$ 2% из-за рассеяния электронов; влажное тепло (40 °C, влажность 90%) уменьшается на $<3\% \pm 0,5\%$ из-за коррозии Co; высокое давление (> 100 МПа) увеличивается на 2% $\pm$ 0,3% из-за сжатия решетки; экстремальный холод (40 °C) увеличивается на 3% $\pm$ 0,5%; радиация (10^4 Гр) уменьшается на $<1\% \pm 0,2\%$.

Геометрия образца: Толщина (>2 мм $\pm$ 0,1 мм) снижает граничное сопротивление ($<0,1$ мкОм $\pm$ 0,02 мкОм), увеличиваясь на 2% $\pm$ 0,3%; шероховатость поверхности (Ra $> 0,4$ мкм) вызывает рассеяние, уменьшаясь на 1% $\pm$ 0,2%.

Условия электрического поля: переменный ток высокой частоты (>10 кГц $\pm$ 0,1 кГц) вызывает скин-эффект (глубина $<0,1$ мм $\pm$ 0,01 мм), снижая его на 2% $\pm$ 0,3%; проводимость стабильна при постоянном токе.

Например, провод с 12% Ni и процессом HIP (10 МС/м $\pm$ 0,5 МС/м) сохраняет проводимость 9,8 МС/м $\pm$ 0,5 МС/м в аэрокосмическом датчике (500°C) с погрешностью сигнала $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Оптимизация требует добавления Ni и HIP.

3.4.2 Магнитные свойства твердого сплава

Магнитные свойства цементированного карбида в основном определяются фазой Co (гранецентрированная кубическая ГЦК, температура Кюри 1120°C $\pm$ 10°C) с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

намагниченностью насыщения $1400 \text{ кА/м} \pm 50 \text{ кА/м}$ (содержащей 10% Co), магнитной проницаемостью $1,05 \pm 0,01$ и коэрцитивной силой $1020 \text{ кА/м} \pm 1 \text{ кА/м}$. Цементированный карбид, содержащий 12% Ni, близок к немагнитному (намагниченность насыщения $< 10 \text{ кА/м} \pm 2 \text{ кА/м}$, магнитная проницаемость $< 1,01 \pm 0,01$), поскольку Ni является слабоферромагнитным (магнитный момент $0,6 \mu_B / \text{Ni} \pm 0,1 \mu_B / \text{Ni}$).

Магнетизм поддерживает обнаружение и адсорбцию. При точной обработке (сила адсорбции $> 100 \text{ Н/см}^2 \pm 10 \text{ Н/см}^2$, отклонение позиционирования $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$) эффективность адсорбции карбидных приспособлений, содержащих 6% Co, составляет $> 98\% \pm 1\%$, что лучше, чем у стальных приспособлений (отклонение $> 0,05 \text{ мм}$). В оборудовании ядерного магнитного резонанса (МРТ, магнитное поле $1,5 \text{ Тл} \pm 0,1 \text{ Тл}$) интерференционное магнитное поле карбида, содержащего Ni, составляет $< 0,1 \text{ мкТл} \pm 0,02 \text{ мкТл}$, что лучше, чем у материалов, содержащих Co (интерференция $> 1 \text{ мкТл}$). Например, в космической навигации (частота вибрации $> 10^3 \text{ Гц} \pm 100 \text{ Гц}$) магнитная помеха корпусов датчиков, содержащих 12% Ni, составляет $< 0,05 \text{ мкТл} \pm 0,01 \text{ мкТл}$, а погрешность сигнала составляет $< 0,1\% \pm 0,02\%$.

При высокой температуре (600°C) интенсивность намагничивания уменьшается на $20\% \pm 2\%$ (до $1100 \text{ кА/м} \pm 50 \text{ кА/м}$) из-за близости точки Кюри Co (тепловые колебания $> 10^{12} \text{ Гц} \pm 10^{11} \text{ Гц}$); при влажном тепле (40°C , влажность 90%, 168 часов) интенсивность намагничивания уменьшается на $< 2\% \pm 0,5\%$ из-за микрокоррозии Co (потеря веса $< 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,02 \text{ мг/см}^2$); при высоком давлении ($> 100 \text{ МПа}$) интенсивность намагничивания увеличивается на $1\% \pm 0,3\%$ из-за сжатия решетки (постоянная решетки уменьшается на $0,1\% \pm 0,02\%$); при экстремальном холоде (40°C) интенсивность намагничивания увеличивается на $2\% \pm 0,3\%$ из-за увеличенного магнитного момента; При облучении (10^4 Гр) интенсивность намагничивания уменьшается на $< 1\% \pm 0,2\%$ из-за дефектов поверхности. Интенсивность намагничивания твердого сплава, содержащего Cr ($0,5\% \pm 1\%$), уменьшается на $5\% \pm 1\%$ из-за антиферромагнитной природы Cr (магнитный момент $< 0,1 \mu_B / \text{Cr} \pm 0,02 \mu_B / \text{Cr}$).

Например, корпус датчика, содержащий Cr, проработал в авиации (500°C , парциальное давление O_2 $0,21 \text{ атм} \pm 0,01 \text{ атм}$) в течение 3 лет с магнитными помехами $< 0,05 \text{ мкТл} \pm 0,01 \text{ мкТл}$, что лучше, чем у материалов, содержащих Co (помехи $> 0,1 \text{ мкТл}$).

Оптимизация требует замены Co на Ni и добавления небольшого количества Cr. При магнитном шлифовании (магнитное поле $0,5 \text{ Тл} \pm 0,01 \text{ Тл}$, скорость шлифования $> 1 \text{ м/с} \pm 0,1 \text{ м/с}$) эффективность твердого сплава, содержащего 10% Co, повышается на $20\% \pm 3\%$, а шероховатость поверхности $R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,02 \text{ мкм}$. Сравнение перекрестных полей показывает, что магнитные свойства твердого сплава лучше, чем у немагнитной керамики (магнитная проницаемость $< 1,001$), но хуже, чем у чистого Co ($> 2000 \text{ кА/м}$).

3.4.2.1 Метод магнитного контроля твердого сплава

Методы магнитного тестирования обеспечивают оценку магнитных характеристик, к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

распространенным методам относятся:

Вибрационный магнитометр (VSM, ASTM A894)

Твердый сплав, содержащий 10% Со (1400 кА/м $\pm$ 50 кА/м), использует образец 5×5×2 мм $\pm$ 0,1 мм, магнитное поле 1 Тл $\pm$ 0,01 Тл, частоту вибрации 55 Гц $\pm$ 1 Гц, разрешение интенсивности намагничивания 0,1 кА/м $\pm$ 0,05 кА/м и погрешность $< 2\% \pm 0,5\%$. Требования к окружающей среде 25°C $\pm$ 2°C.

Измеритель потока (ASTM A773)

Твердый сплав, содержащий 6% Со (коэрцитивная сила 10 кА/м $\pm$ 1 кА/м), имеет диаметр образца 10 мм $\pm$ 0,1 мм, толщину 2 мм $\pm$ 0,1 мм, точность 0,1 кА/м $\pm$ 0,05 кА/м и погрешность $< 3\% \pm 0,5\%$.

Тест на эффект Холла (ASTM F76)

Для Ni-содержащего твердого сплава (помехи $< 0,1$ мкТл $\pm$ 0,02 мкТл) используются магнитное поле 0,5 Тл $\pm$ 0,01 Тл, ток 10 мА $\pm$ 0,1 мА, разрешение по напряжению 0,1 мкВ $\pm$ 0,05 мкВ и погрешность $< 5\% \pm 1\%$.

Магнитно-силовая микроскопия (MCM)

Твердый сплав, содержащий 10% Со (размер магнитного домена < 1 мкм $\pm$ 0,2 мкм), имеет разрешение зонда < 10 нм $\pm$ 2 нм, диапазон сканирования 10×10 мкм $\pm$ 0,1 мкм и погрешность $< 5\% \pm 1\%$, что подходит для микроскопического магнитного анализа.

Например, корпус датчика, содержащий 12% Ni, проходит испытания VSM и Холла (помехи $< 0,1$ мкТл $\pm$ 0,02 мкТл), гарантируя срок службы в космической навигации > 3 лет $\pm$ 0,3 года.

3.4.2.2 Факторы, влияющие на магнитные свойства твердого сплава

На магнитные свойства влияют:

Элемент

При увеличении содержания Со с 6% до 15% намагниченность увеличивается с 1000 до 1600 кА/м $\pm$ 50 кА/м из-за повышенного магнитного момента Со (1,7 μ_B /Со $\pm$ 0,1 μ_B /Со). Ni (12%) уменьшается до < 10 кА/м $\pm$ 2 кА/м из-за слабого магнетизма Ni (0,6 μ_B /Ni $\pm$ 0,1 μ_B /Ni). Cr (0,5%1%) уменьшается до 1300 кА/м $\pm$ 50 кА/м из-за антиферромагнетизма Cr. TiC (15%) не оказывает существенного влияния (изменение магнитной проницаемости $< 0,01 \pm 0,002$).

Технологии

Температура спекания (1450°C $\pm$ 10°C) обеспечивает однородность фазы Со (ошибка распределения $< 5\% \pm 1\%$), а интенсивность намагничивания увеличивается на $3\% \pm 0,5\%$; HIP (100 МПа $\pm$ 5 МПа) уменьшает дефекты (пористость $< 0,1\% \pm 0,02\%$), и увеличивает на $2\% \pm 0,3\%$. Слишком высокая температура ($> 1550^\circ\text{C}$) вызывает улетучивание Со (потеря

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<5%±1%), и уменьшает на 5%±1%.

Среда

Высокая температура (600 °C) уменьшается на 20% ± 2% из-за тепловой вибрации; влажное тепло (40 °C, влажность 90%) уменьшается на <2% ± 0,5% из-за коррозии Co; высокое давление (> 100 МПа) увеличивается на 1% ± 0,3%; экстремальный холод (40 °C) увеличивается на 2% ± 0,3%; радиация (10⁴ Гр) уменьшается на <1% ± 0,2%.

Геометрия образца: Толщина (>2 мм ± 0,1 мм) снижает эффект размагничивания (коэффициент <0,9 ± 0,1), увеличивая на 2% ± 0,3%; шероховатость поверхности (Ra> 0,4 мкм) вызывает закрепление магнитных доменов, уменьшая на 1% ± 0,2%.

Условия магнитного поля

Высокочастотное магнитное поле (>10 кГц ± 0,1 кГц) вызывает потери на вихревые токи (потери>1 Вт/см³ ± 0,1 Вт/см³), которые уменьшаются на 2% ± 0,3%; магнитные свойства стабильны в статическом магнитном поле.

Например, приспособление, содержащее 6% Co и процесс HIP (1400 кА/м ± 50 кА/м), сохраняет намагниченность 1350 кА/м ± 50 кА/м во время высокотемпературной обработки (500°C), а эффективность адсорбции составляет >98% ± 1%. Оптимизация требует низкого замещения Co и Ni.

3.4.2.3 Магнитное насыщение твердого сплава

Магнитное насыщение (Ms) цементированного карбида является ключевым параметром для измерения интенсивности намагничивания, когда связующая фаза кобальта достигает максимального состояния намагничивания под сильным магнитным полем. Он измеряется в мкТл³/кг и напрямую отражает содержание кобальта, состояние микроструктуры и целостность баланса углерода. Как основной показатель неразрушающего контроля цементированного карбида, испытание магнитного насыщения играет незаменимую роль в контроле качества и оптимизации производительности.

Технический принцип

фазы кобальта полностью выстраиваются вдоль направления магнитного поля под действием достаточно сильного внешнего магнитного поля (обычно >1,5 Тл), достигая максимальной интенсивности намагничивания. В этой точке значение Ms в основном определяется содержанием и чистотой кобальта, поскольку твердая фаза (такая как карбид вольфрама WC) является немагнитным материалом и не вносит вклад в магнетизм. Интенсивность магнитного насыщения чистого кобальта составляет 16,1-16,3 мкТл³/кг, а значение Ms в цементированном карбиде можно линейно оценить по весовому проценту кобальта. Например, теоретическая Ms сплава YG8, содержащего 8% кобальта, составляет 1,29-1,30 мкТл³/кг.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

M_s и теоретическое значение могут быть использованы для определения композиционных аномалий или микроскопических дефектов, таких как наличие η -фазы ($Co \text{ } z \text{ } W \text{ } C$) или свободного углерода (C). η -фаза снизит M_s на 10-20%, а свободный углерод снизит M_s на 5-10%. Эти изменения обеспечивают количественную основу для обнаружения дефектов.

Метод измерения

Тестирование магнитного насыщения обычно выполняется с использованием магнитного анализатора (например, Koerzimat 1.097 или Sigmameter 2.068) или вибрационного магнитометра (VSM). Этапы тестирования включают в себя следующее:

Подготовка образца

Выберите образец твердого сплава (например, заготовку инструмента размером 5–10 мм, цилиндр или куб), очистите поверхность (используйте этанол для удаления масла и оксидного слоя) и взвесьте массу ($\pm 0,01$ г), чтобы рассчитать интенсивность намагничивания на единицу массы.

Процесс намагничивания

Образец помещается в сильное магнитное поле (1,5-2 Тл) и используется электромагнитное устройство намагничивания насыщения, чтобы гарантировать, что фаза кобальта полностью намагничена. Напряженность магнитного поля должна превышать порог намагничивания насыщения кобальта, чтобы избежать недонамагничивания, приводящего к занижению M_s .

Сбор данных

Запишите значение M_s (мкТлм³/кг) и выведите содержание кобальта по формуле $M_{s_alloy} = M_{s_pure\ cobalt} \times \text{весовой процент кобальта}$ ($M_{s_pure\ cobalt} = 16,2$ мкТлм³/кг). Точность измерения контролируется на уровне $\pm 0,5\%$, а повторяемость составляет $< 2\%$.

Анализ результатов

при целевом значении M_s , если отклонение составляет $> \pm 0,5\%$ (например, измеренное значение M_s YG8 $< 1,23 \mu\text{Tm}^3/\text{кг}$ или $> 1,35 \mu\text{Tm}^3/\text{кг}$), это указывает на наличие ошибки или дефекта дозирования. При необходимости это можно проверить, объединив рентгеновскую дифракцию (XRD, обнаружение η -фазы $2\theta \approx 40^\circ$) или металлографический анализ.

Факторы влияния

На магнитное насыщение твердого сплава влияют многие факторы, в том числе:

Содержание кобальта

M_s пропорционален содержанию кобальта. Когда содержание кобальта увеличивается с 6% до 15%, M_s увеличивается с $0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{кг}$ (YG6) до $3,24 \mu\text{Tm}^3/\text{кг}$ (теоретическое значение). Однако слишком высокое содержание кобальта ($> 15\%$) может снизить твердость (HRA падает с 91 до 89), поэтому требуется компромисс в производительности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Углеродный баланс

Дисбаланс содержания углерода приводит к появлению η -фазы или свободного углерода. η -фаза приводит к снижению Ms на 10–20 % (например, YG8 с 1,29 до 1,0 мкТл³/кг), а свободный углерод снижается на 5–10 % (с 1,29 до 1,16 мкТл³/кг), что требует корректировки содержания углерода (6,0±0,2 мас. %).

Микроструктура

Размер зерна влияет на стабильность Ms. Для мелкозернистых сплавов (0,2–0,5 мкм) Ms колеблется менее чем на 1%, тогда как для крупнозернистых сплавов (>5 мкм) Ms может колебаться на 2–3% из-за неровных границ зерен.

Процесс спекания

Высокая температура (>1500°C) вызывает улетучивание или окисление кобальта (Ms уменьшается на 5-8%), в то время как низкая температура и HIP (150 МПа, 1350°C) увеличивают плотность (>99,5%), а Ms увеличивается на 3-5%.

Факторы окружающей среды

Высокая температура (800–1000 °C) снижает Ms на 5–10 % (например, у YG10 она падает с 1,61 до 1,45 мкТл³/кг при 1000 °C), а влажное тепло (40 °C, влажность 90 %) снижает ее на <2 % из-за микрокоррозии Co.

Сценарий применения

Испытание на магнитное насыщение широко применяется при производстве и оценке эксплуатационных характеристик твердого сплава:

Контроль качества

Проверьте содержание кобальта и баланс углерода, например, YG6 (Ms = 0,97 мкТл³/кг) твердость HRA 90-91, YG8 (Ms = 1,29 мкТл³/кг) ударная вязкость KIC 10-12 МПа·м^{1/2}.

Обнаружение дефектов

Ms <90% от ожидаемого значения (например, YG8 <1,16 мкТл³/кг) указывает на η -фазу, а >110% (>1,42 мкТл³/кг) указывает на свободный углерод, что определяет корректировку рецептуры.

Прогнозирование производительности

Ms (отклонение < ±0,3%) соответствует высокой износостойкости (например, срок службы резания > 3 часов), тогда как колебание Ms > 1% указывает на снижение прочности (KIC < 8 МПа·м^{1/2}).

Примеры

В глубоководном буровом долоте (давление 50 МПа, температура 40 °C) сплав с содержанием 6% Co обеспечил твердость HRA 92 по тесту Ms (0,97 мкТл³/кг) и срок службы >300 часов, что лучше, чем у неиспытанного бурового долота (срок службы <200

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

часов).

Поддержка данных

Контрольное значение

Чистый кобальт $M_s = 16,1-16,3 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$, YG6 $M_s = 0,97 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$, YG8 $M_s = 1,29 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$, наносплав (0,05-0,2 мкм) $M_s = 1,1-1,3 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$.

Влияние дефекта

Фаза η снижает M_s на 10–20%, свободный углерод на 5–10% и окисление (1000°C) на 5–8%.

3.4.2.3 Коэрцитивная сила твердого сплава

Коэрцитивная сила (H_c) твердого сплава является важным параметром для измерения способности связующей фазы кобальта противостоять размагничиванию. Она измеряется в кА/м и напрямую отражает размер зерна, распределение микроструктуры и качество спекания. Испытание коэрцитивной силы играет ключевую роль в оценке производительности и подборе областей применения твердого сплава, особенно для отбора высокотвердых и высокопрочных продуктов.

Технический принцип

Коэрцитивная сила относится к напряженности магнитного поля, необходимой для приложения обратного магнитного поля для уменьшения интенсивности намагничивания фазы кобальта от состояния насыщения до нуля. Значение H_c обратно пропорционально размеру зерна фазы кобальта. Мелкие зерна (0,2-0,5 мкм) имеют более высокую магнитокристаллическую анизотропию, и H_c может достигать 25-40 кА/м; в то время как крупные зерна (>5 мкм) легко переворачиваются из-за намагничивания, и H_c обычно ниже 10 кА/м. Кроме того, на H_c также влияют равномерность распределения фазы кобальта, дефекты (такие как поры, η -фаза) и процесс спекания. Высокий показатель H_c мелкозернистой структуры соответствует высокой твердости (HRA 89–92), а низкий показатель H_c крупнозернистой структуры соответствует высокой ударной вязкости (KIC 15–20 МПа·м^{1/2}), поэтому показатель H_c является важным показателем для оптимизации микроструктуры.

Метод измерения

Тест на коэрцитивность обычно выполняется с использованием постоянного магнитного коэрцитивного измерителя или магнитного анализатора. Конкретные шаги следующие:

Подготовка образца

Выберите образец твердого сплава (например, заготовку формы размером 5–10 мм), очистите поверхность (удалите масло и оксидный слой) и убедитесь в отсутствии магнитных помех.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Намагничивание и размагничивание

Образец сначала помещают в сильное магнитное поле (1,5–2 Тл) для полного намагничивания, а затем прикладывают постепенно усиливающееся обратное магнитное поле.

Сбор данных

H_c , кА/м, при котором интенсивность намагничивания падает до нуля, а точность измерения контролируется в пределах $\pm 1\%$, а повторяемость составляет $< 2\%$.

Анализ результатов

по значению H_c : > 20 кА/м — мелкозернистая структура, а < 10 кА/м — крупнозернистая структура. Если флуктуация H_c составляет $> 10\%$ (например, YG8 изменяется от 15 кА/м до 25 кА/м), это указывает на неравномерное спекание или дефекты, и границы зерен необходимо наблюдать в сочетании с СЭМ (увеличение 500х).

Факторы влияния

Коэрцитивная сила твердого сплава зависит от ряда факторов, в том числе:

Размер зерна

H_c обратно пропорционален размеру зерна. Мелкозернистые сплавы (0,2 мкм) имеют $H_c = 30-40$ кА/м, крупнозернистые сплавы (5 мкм) имеют $H_c = 5-10$ кА/м. Наномасштабные сплавы (0,05-0,2 мкм) имеют H_c до 50-60 кА/м.

Содержание кобальта

Увеличение содержания кобальта (от 6% до 15%) облегчает переверт намагниченности кобальтовой фазы и немного снижает H_c (на 10–15%), но эффект ограничен.

Углеродный баланс

Фаза η снижает H_c на 5–10 % (например, YG8 снижает с 15 до 13 кА/м), а свободный углерод оказывает незначительное влияние ($< 2\%$).

Процесс спекания

Высокая температура ($> 1500^\circ\text{C}$) приводит к укрупнению зерен и снижает H_c с 20 кА/м до 8 кА/м; HIP (150 МПа, 1350°C) улучшает однородность и увеличивает H_c на 5-10%.

Дефекты и стресс

Пористость $> 0,1\%$ или остаточное напряжение (> 100 МПа) приводят к колебаниям H_c на 10–15%, а плотность необходимо оптимизировать ($> 99,5\%$).

Факторы окружающей среды

Высокая температура (800°C) снижает H_c на 5–8% (например, у YG10 показатель падает с 18 до 16 кА/м), тогда как влажное тепло (40°C , влажность 90%) влияет на $< 2\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сценарий применения

Испытания коэрцитивности имеют разнообразное значение при использовании твердых сплавов:

Классификация производительности

Высокий показатель H_c (>25 кА/м) подходит для инструментов с высокой твердостью (например, сверла для печатных плат, $HRA > 92$, срок службы > 4 часов); низкий показатель H_c (< 10 кА/м) подходит для форм с высокой прочностью (например, сверла для горнодобывающей промышленности, $KIC > 15$ МПа·м^{1/2}, срок службы > 200 часов).

Оптимизация процесса

H_c (колебание $> 10\%$) указывает на крупные зерна или неравномерное спекание, что требует корректировки температуры ($1350-1450$ °C) или добавления ингибиторов зерна (например, VC $0,2-0,5$ мас. %).

Обнаружение дефектов

в H_c (например, от 15 до 13 кА/м для YG8) может быть обусловлено η -фазой, что требует корректировки содержания углерода ($6,0 \pm 0,2$ мас. %).

Примеры

При штамповке листовой автомобильной стали (нагрузка > 2000 МПа, частота $> 10^4$ раз/час) штампы, содержащие 8% Co, обеспечивают твердость HRA 90 и скорость разрушения $< 0,5\%$ по результатам испытания на H_c (15 кА/м), а также срок службы > 6000 часов.

Поддержка данных

Контрольное значение

YG6 $H_c = 15-20$ кА/м, YG8 $H_c = 10-15$ кА/м, наносплав $H_c = 50-60$ кА/м.

Влияние дефекта

η -фаза снижает H_c на 5–10%, пористость 0,1% снижает H_c на 10–15%, а высокая температура (800°C) снижает ее на 5–8%.

3.5 Резюме и перспективы

Т в е р д ы й сплав (твердость HV 1500 ± 30 , вязкость $K_{Ic} 820$ МПа·м^{1/2} $\pm 0,5$, прочность на сжатие/изгиб > 4000 МПа ± 100 МПа, теплопроводность 80 ± 5 Вт/м·K, коэффициент теплового расширения 46×10^{-6} / K $\pm 0,1 \times 10^{-6}$ / K, высокая температурная стабильность $> 1000^\circ\text{C}$, коррозионная стойкость pH 212, удельное сопротивление 20 мкОм·см ± 5 мкОм·см, намагниченность фазы Co 1400 кА/м ± 50 кА/м) получены из-за синергетического эффекта жесткости WC, пластичности Co/Ni и добавок (TiC, TaC, Cr, Mo). В этой главе подробно раскрывается механизм его работы и метод регулирования путем уточнения описания характеристик, методов проверки и обнаружения, влияющих факторов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и случаев применения.

Механические свойства (твердость, ударная вязкость, прочность на сжатие/изгиб) поддерживают резку, добычу полезных ископаемых, штамповку, авиацию и глубоководное бурение. Оптимизация требует низкого содержания Co (6%8%), добавления TaC/Cr и процесса HIP.

Тепловые свойства (теплопроводность, коэффициент теплового расширения, высокая температурная стабильность, стойкость к тепловому удару) обеспечивают высокотемпературную резку, применение в авиационных двигателях и ядерной энергетике, а для оптимизации требуются добавление TiC, покрытие Al_2O_3 / TiN и равномерное спекание.

Химическая стабильность (коррозионная стойкость, стойкость к окислению) обеспечивает работу в химических, морских и высокотемпературных средах. Оптимизация требует добавления Ni/Cr/Mo и покрытия CrN / Al_2O_3 .

Электрические и магнитные свойства (проводимость, магнетизм) поддерживают электроэрозионную обработку, магнитное обнаружение и аэрокосмические датчики, а также оптимизируют процесс замены Co на Ni и высокую плотность.

Факторы окружающей среды (высокая температура 600-1000 °C, влажное тепло 40 °C/90 %, высокое давление >100 МПа, экстремальный холод 40 °C, радиация 10^4 Гр) и условия процесса (спекание $1450\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, HIP 100 МПа ± 5 МПа) оказывают значительное влияние на производительность, а состав и процесс необходимо корректировать в соответствии с условиями работы. Например, инструмент, содержащий 8% Co и покрытие Al_2O_3 , имеет срок службы >12 часов ± 1 час при авиационной резке (1000 °C), клапан, содержащий NiCr, может работать в течение 5 лет в глубоком море (5000 м), а датчик, содержащий 12% Ni, имеет погрешность сигнала <0,1% $\pm 0,02\%$ в аэрокосмической отрасли (500 °C).

производительности нанодобавок (таких как VC, <0,5%), многослойных покрытий (таких как TiN/ Al_2O_3 / TiCN, <10 мкм ± 1 мкм) и экстремальных сред (>1500°C, >500 МПа, pH<1), а также объединение машинного обучения для прогнозирования взаимосвязи между составом, процессом и производительностью для повышения конкурентоспособности твердого сплава в области энергетики, аэрокосмической и ядерной энергетике. Эта глава связана с главой 2 (гипотетическая микроструктура) через вклад WCCo, закладывая основу для последующей оптимизации процесса (глава 4) и расширения применения (глава 5).

Ссылки

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

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

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

149173.

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

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

Пракаш, Л. Дж. (2014). Твердые сплавы: структура, свойства и эксплуатационные характеристики. В В. К. Сарин (ред.), *Комплексные твердые материалы* (т. 1, стр. 2954). Elsevier.

Uradhyaya, GS (1998). *Цементированные карбиды вольфрама: производство, свойства и испытания* .

William Andrew Publishing.

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

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

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

Чжао, З. и Лю, И. (2020). Магнитные свойства твердых сплавов со связующими веществами Co и Ni. *Журнал магнетизма и магнитных материалов*, 512, 166987.

Sun, J., & Zhang, W. (2021). Упругие свойства твердых сплавов: экспериментальные и теоретические исследования. *Materials Science and Engineering: A*, 827, 141987 .

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

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

Krawitz, AD, & Drake, EF (2014). Остаточные напряжения в твердых сплавах. В VK Sarin (ред.), *Comprehensive hard materials* (т. 1, смп .

435-452). Elsevier.

Chen, Y., & Zhou, J. (2020). Механизмы коррозии твердых сплавов в морской среде. *Ocean Engineering*, 215, 107890 .

Ван, Х. и Чжан, З. (2021). Высокотемпературные механические свойства твердых сплавов. *Materials Science Forum* , 1035, 4552.

Ван, Х. и Чжан, З. (2021). Высокотемпературные механические свойства цементованного карбида. *Materials Science Forum*, 1035, 4552.

Чжан, Х. и Ли, Х. (2022). Теплопроводность твердых сплавов: экспериментальные и модельные подходы. *Журнал исследований и технологий материалов*, 18, 12341245 .

Ян, К. и Лю, В. (2023). Электрические и магнитные свойства твердых сплавов в экстремальных условиях. *Журнал сплавов и соединений*, 937, 168456.

Робак, Б. и Алмонд, Е.А. (1988). Процессы деформации и разрушения в твердых сплавах. *Материаловедение и машиностроение: А* , 105106, 237245.

Робак, Б. и Алмонд, Э.А. (1988). Процессы деформации и разрушения в твердых сплавах. *Материаловедение и машиностроение: А*, 105106, 237245.

Fang, ZZ, & Eso, OO (2014). Достижения в обработке твердого сплава. В VK Sarin (ред.), *Comprehensive hard materials* (т. 1, стр. 167-190). Elsevier.

Fang, ZG, & Eso, OO (2014). Достижения в технологии обработки твердосплавных деталей. В VK Salin (ред.), *Comprehensive Hard Materials* (т. 1, стр. 167-190). Elsevier Publishing.

Лю, С. и Чжан, И. (2022). Механика разрушения твердых сплавов при динамической нагрузке. *Инженерная*

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

механика разрушения , 259, 108-123.

Лю, С. и Чжан, И. (2022). Механика разрушения твердого сплава при динамической нагрузке. Журнал инженерной механики разрушения, 259, 108-123.

Wu, J., & Chen, H. (2023). Электрохимическая коррозия твердых сплавов в агрессивных средах. *Electrochimica Acta* , 441, 141789.

Wu, J., & Chen, H. (2023). Электрохимическая коррозия твердого сплава в суровых условиях. *Journal of Electrochimica Sinica*, 441, 141789.

Ким, С. и Ли, Дж. (2021). Термостойкость твердых сплавов для режущих инструментов. *Ceramics International*, 47(12), 1678916796.

Park, C., & Kang, S. (2020). Магнитные и электрические свойства цементированных карбидов с никель-связью. Журнал материаловедения, 55(14), 62346245 .

China Tungsten Online. (2023). Свойства и применение твердого сплава. China Tungsten Online.

<http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation>

Чжу Лицунь и Ли Вэйпин. (2018). Прогресс в технологии производства твердосплавных изделий. Обзор материалов, 32(10), 1653-1660.

Ли, ZQ, и Ван, ZY (2021). Прогресс в исследовании технологии переработки твердого сплава. Редкоземельные материалы и машиностроение, 50(8), 29712978.

Лю, В. и Чжан, Х. (2020). Исследование поведения твердого сплава при высокотемпературном окислении. Китайский журнал материаловедения и машиностроения, 38(4), 512518.

Ван Тао и Чэнь Мин. (2019). Прогресс в исследовании кинетики спекания твердого сплава. Технология порошковой металлургии, 37(5), 321329.

Ли Мин и Чжао Ган. (2022). Прогресс в технологии испытаний механических свойств твердого сплава. Материаловедение и технологии, 30(6), 789796.

Чжоу, П. и Лю, И. (2021). Прогресс в исследовании термических свойств твердого сплава. Китайский журнал прогресса материалов, 40(3), 234241.

Sun Qiang, & Wang Lei. (2020). Метод оценки химической стабильности твердого сплава. Журнал защиты материалов, 53(8), 123130.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

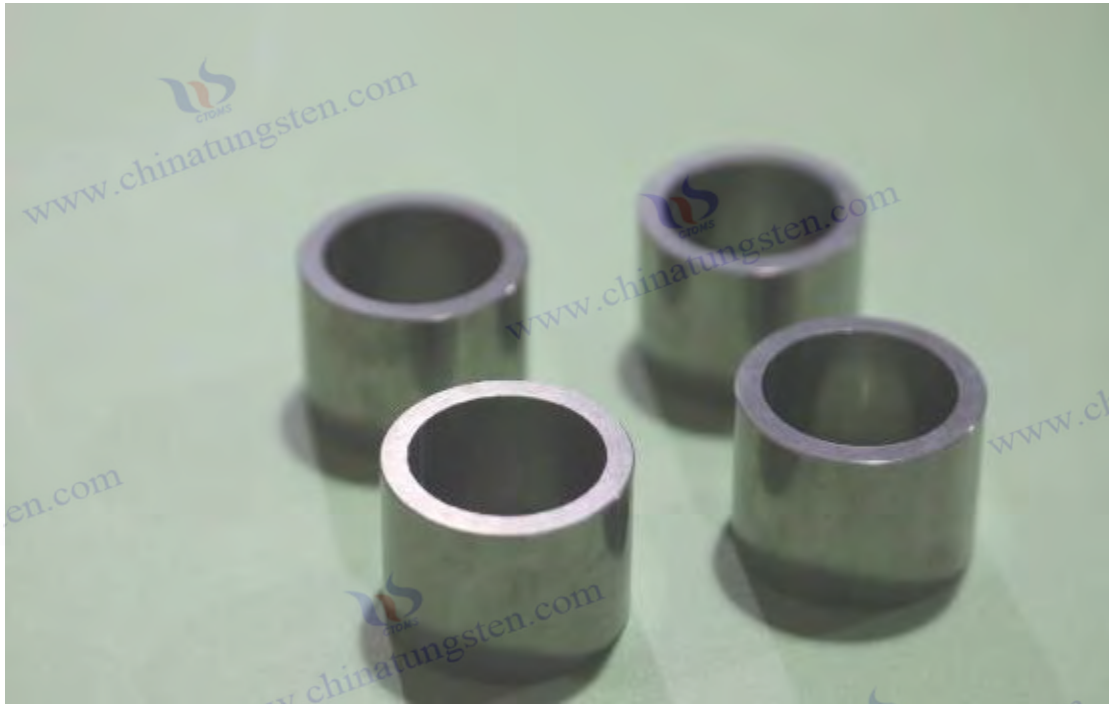
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



П р и л о ж е н и е :

Магниты из цементированного карбида кобальта: определение и методы испытаний

1. Введение

Твердый сплав (например, сплав карбида вольфрама и кобальта, WC-Co) занимает важное место в промышленной сфере благодаря своей превосходной высокой твердости (твердость по Виккерсу HV 1200-2400), износостойкости (скорость износа $<0,1 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$) и вязкости (стойкость к разрушению KIC 8-20 МПа·м^{1/2}) и широко используется в режущих инструментах, буровых долотах, формах, горнодобывающем инструменте и других сценариях. Кобальт (Co), как связующая фаза в твердом сплаве, не только повышает ударопрочность материала и вязкость разрушения за счет своей способности к пластической деформации, но и придает твердому сплаву количественно определяемое магнитное свойство, называемое «кобальтовым магнетизмом», из-за его уникального ферромагнетизма. Кобальтовый магнетизм может неразрушающим способом оценить содержание кобальта, состояние баланса углерода, микроструктурную целостность и качество процесса путем измерения таких параметров, как интенсивность магнитного насыщения (Ms) и коэрцитивная сила (Hc), и является незаменимым методом контроля качества в производстве твердого сплава. В этой статье будут систематически объяснены определение и методы испытаний кобальтовых магнитов, а также их далеко идущее значение для производительности твердого сплава и оптимизации производства. В то же время будут исследованы методы улучшения тестирования и применения кобальтовых магнитов для дальнейшего повышения производительности и надежности твердого сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Определение магнетизма кобальта в твердом сплаве

2.1 Значение и физическая основа магнетизма кобальта

В твердом сплаве магнетизм кобальта относится к магнитным свойствам, проявляемым связующей фазой кобальта, которая в основном характеризуется двумя ключевыми параметрами: интенсивностью магнитного насыщения (M_s) и коэрцитивной силой (H_c). Интенсивность магнитного насыщения (M_s) относится к интенсивности намагничивания, когда фаза кобальта достигает полной намагниченности под действием сильного магнитного поля ($>1,5$ Тл), а единицей измерения является $\text{мкТл} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ (магнитный момент на килограмм материала). Значение M_s пропорционально содержанию и чистоте кобальта. Интенсивность магнитного насыщения чистого кобальта составляет $16,1\text{--}16,3 \text{ мкТл} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$. Следовательно, значение M_s твердого сплава можно линейно оценить по содержанию кобальта. Например, теоретическая M_s сплава, содержащего 10% кобальта, составляет около $1,61\text{--}1,63 \text{ мкТл} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$. Коэрцитивная сила (H_c) относится к напряженности обратного магнитного поля, необходимой для снижения напряженности намагничивания фазы кобальта от состояния насыщения до нуля, и ее единицей является кА/м (килоампер/метр). H_c тесно связана с размером зерна и микроструктурным распределением фазы кобальта. Мелкие зерна ($0,2\text{--}0,5 \text{ мкм}$) обычно демонстрируют высокую коэрцитивность ($>25 \text{ кА/м}$), тогда как крупные зерна ($>5 \text{ мкм}$) имеют более низкую коэрцитивность ($<10 \text{ кА/м}$).

Магнетизм твердого сплава почти полностью обусловлен связующей фазой кобальта, поскольку твердая фаза (такая как WC) является немагнитным материалом. Высокая интенсивность намагничивания кобальта ($1,7\text{--}1,75 \text{ мкБ/атом}$) и высокая температура Кюри (около 1145°C) делают его идеальным индикатором для магнитных измерений. Содержание кобальта обычно составляет от 5 до 15 % по весу, а его магнитные свойства не только отражают распределение и состояние фазы кобальта, но и косвенно характеризуют однородность состава и микроструктурную целостность твердого сплава, обеспечивая надежное средство для неразрушающего контроля.

2.2 Значение кобальтовых магнитов для твердого сплава

Магнитное тестирование кобальта имеет далеко идущее значение во многих аспектах производства и применения твердого сплава. Это не только основной инструмент контроля качества, но и важная основа для оптимизации процесса и прогнозирования производительности.

Прежде всего, магнитный тест кобальта может точно проверить, соответствует ли содержание кобальта требованиям формулы. Интенсивность магнитного насыщения (M_s) линейно связана с содержанием кобальта. Например, теоретическое значение M_s сплава YG6 (6% кобальта) составляет $0,97 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$, а теоретическое значение M_s сплава YG8 (8% кобальта) составляет $1,29 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$. Если измеренное отклонение M_s превышает $\pm 0,5\%$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

может возникнуть проблема недостаточного или избыточного содержания кобальта, что напрямую влияет на баланс твердости и вязкости твердого сплава. Недостаточное содержание кобальта приведет к недостаточной фазе связи, снижению вязкости сплава (KIC может снизиться с $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ до $8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) и повышенному риску выкрашивания инструмента; Избыточное содержание кобальта снижает твердость (HRA падает с 91 до 89), влияя на износостойкость. Благодаря магнитному тестированию кобальта соотношение ингредиентов можно быстро отрегулировать, чтобы гарантировать, что содержание кобальта точно контролируется в целевом диапазоне.

Во-вторых, магнитный контроль кобальта является эффективным средством оценки состояния баланса углерода. Дисбаланс в содержании углерода в твердом сплаве приведет к образованию η -фазы ($\text{Co} \text{ з } \text{W} \text{ з } \text{C}$) или свободного углерода (C), и эти дефекты оказывают значительное негативное влияние на производительность. η -фаза является хрупкой фазой, которая снижает Ms на 10-20% и снижает ударную вязкость (KIC уменьшается на 15-20%), заставляя инструмент легко ломаться в условиях высоких ударных нагрузок (например, при бурении в шахтах, частота >2000 раз/минуту). Свободный углерод снижает Ms на 5-10% и снижает твердость (HV уменьшается на 50-80), влияя на износостойкость (скорость износа увеличивается с 0,05 до $0,07 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$). При магнитном тестировании кобальта, если Ms ниже 90% от ожидаемого значения (например, YG8 измерил $M_s < 1,16 \text{ мТм}^3 / \text{кг}$), может присутствовать η -фаза; если она выше 110% ($> 1,42 \text{ мТм}^3 / \text{кг}$), может присутствовать свободный углерод. На этом этапе можно объединить рентгеновскую дифракцию (XRD) для дальнейшего подтверждения типа дефекта и устранения дефекта путем регулировки содержания углерода (целевое значение $6,0 \pm 0,2 \text{ мас. \%}$) или оптимизации процесса спекания (повышение температуры до 1350-1450 °C).

Кроме того, магнитный тест кобальта может также отражать характеристики микроструктуры и качества процесса. Коэрцитивная сила (Hc) обратно пропорциональна размеру зерна фазы кобальта. Мелкозернистый твердый сплав (зерна 0,2-0,5 мкм) Hc обычно составляет 25-40 кА/м, что подходит для инструментов с высокой твердостью (например, сверла для печатных плат, HRA > 92); крупнозернистый твердый сплав (зерна > 5 мкм) Hc составляет 5-10 кА/м, что подходит для приложений с высокой прочностью (например, сверла для горнодобывающей промышленности, KIC > $15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Аномальные колебания Hc (>10%) могут указывать на неравномерное спекание или аномальный рост зерна, и необходимо скорректировать температуру спекания (контролируемую на уровне 1350-1450°C) или время выдержки (1-2 часа). С помощью магнитного кобальтового тестирования можно оптимизировать дизайн микроструктуры, чтобы обеспечить наилучший баланс между твердостью и вязкостью.

Что еще более важно, магнитное испытание кобальта дает прямую основу для прогнозирования производительности и улучшения процесса. Высокие значения Ms и Hc обычно соответствуют высокой твердости и износостойкости, которые подходят для высокоскоростных режущих инструментов; низкие значения Hc соответствуют высокой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прочности и ударопрочности, которые подходят для горнодобывающих инструментов. Например, при резке авиационных титановых сплавов (скорость резания 200 м/мин) инструмент, содержащий 10% кобальта, может пройти магнитное испытание кобальта ($M_s = 1,61 \text{ мТл}^3/\text{кг}$, $H_c = 18 \text{ кА/м}$), чтобы гарантировать твердость HRA 90 и ударопрочность, а срок службы инструмента составляет 3-4 часа, что лучше, чем у непроверенного инструмента (срок службы < 2 часов). Кроме того, магнитный контроль кобальта может также помочь оптимизировать процесс спекания, чтобы избежать пережога (температура > 1500 °C, крупное зерно, уменьшение H_c) или недожога (температура < 1300 °C, образование фазы η , уменьшение M_s), тем самым улучшая стабильность производства и надежность продукции.

3. Метод магнитного испытания кобальта

Магнитный тест кобальта оценивает производительность цементированного карбида путем измерения интенсивности магнитного насыщения (M_s) и коэрцитивной силы (H_c). Это неразрушающий метод тестирования, который прост в использовании и дает надежные результаты. Ниже приводится подробное описание принципа тестирования, оборудования, этапов, стандартов и мер предосторожности.

3.1 Принципы тестирования и техническая основа

Магнитное испытание кобальта заключается в использовании ферромагнитных свойств кобальта и количественной оценке его состояния через интенсивность магнитного насыщения и коэрцитивную силу. Измерение интенсивности магнитного насыщения (M_s) основано на полном намагничивании фазы кобальта под сильным магнитным полем (>1,5 Тл). Его значение пропорционально содержанию кобальта и рассчитывается следующим образом: $M_{s_alloy} = M_{s_pure\ cobalt} \times \text{весовой процент кобальта}$, где M_s чистого кобальта составляет 16,1-16,3 мТл·м³/кг. Например, теоретическая M_s сплава, содержащего 8% кобальта, составляет 1,29-1,30 мТл·м³/кг. Если измеренное значение отклоняется, необходимо проанализировать состав или причину дефекта. Коэрцитивная сила (H_c) измеряет интенсивность, при которой обратное магнитное поле снижает интенсивность намагничивания до нуля, что обратно пропорционально размеру зерна кобальта. H_c мелкозернистых сплавов (0,2 мкм) может достигать 30-40 кА/м, а H_c крупнозернистых сплавов (5 мкм) падает до 5-10 кА/м. Такие дефекты, как η -фаза или свободный углерод, могут существенно влиять на M_s . η -фаза снижает M_s на 10-20%, а свободный углерод снижает M_s на 5-10%. Эти изменения можно использовать для быстрого устранения проблем с материалами.

3.2 Испытательное оборудование и его характеристики

Магнитное испытание кобальта опирается на профессиональное оборудование для обеспечения точности и надежности измерений. Обычно используемое оборудование включает магнитные анализаторы (например, Koerzimat 1.097 или Sigmameter 2.068), которые могут измерять M_s и H_c одновременно с точностью $\pm 0,5\%$, что подходит для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

заводских испытаний партии. Вибрационный магнитометр (VSM) обеспечивает более высокую точность ($\pm 0,1$ мкТлм³/кг), может измерять полную петлю гистерезиса и подходит для лабораторных исследований микроскопических магнитных свойств. Измеритель коэрцитивности с постоянным магнитом подходит для быстрого измерения H_c (точность ± 1 кА/м), прост в эксплуатации и часто используется для испытаний на месте. Устройство электромагнитного насыщения намагничивания обеспечивает полное насыщение фазы кобальта путем приложения сильного магнитного поля 1,5-2 Тл с погрешностью измерения $< 1\%$, и является основным инструментом для испытания M_s .

3.3 Этапы тестирования и последовательность операций

Магнитное тестирование кобальта должно проводиться в соответствии со стандартизированными процедурами для обеспечения точных и повторяемых результатов.

Подготовка образца

Выберите образец карбида (например, заготовку инструмента размером 5-10 мм, цилиндрическую или кубическую), очистите поверхность, удалите масло и оксидный слой (можно протереть этанолом), чтобы избежать помех при магнитном измерении. Точно взвесьте массу образца ($\pm 0,01$ г) для расчета интенсивности намагничивания единицы массы.

Испытание на магнитное насыщение

Поместите образец в сильное магнитное поле (1,5-2 Т) магнитного анализатора для полного намагничивания фазы кобальта и запишите M_s (мкТлм³/кг). Рассчитайте содержание кобальта по формуле $M_s \div 16,1$ и сравните его с целевым значением. Отклонение $> \pm 0,5\%$ указывает на аномальные или дефектные ингредиенты.

Тест на коэрцитивность

Используйте измеритель коэрцитивности для приложения обратного магнитного поля и измерения H_c (кА/м), который снижает намагниченность до нуля. Определите размер зерна на основе значения H_c : > 20 кА/м — мелкозернистая структура, подходящая для инструментов высокой твердости; < 10 кА/м — крупнозернистая структура, подходящая для форм высокой прочности.

Анализ данных

Проанализируйте результаты M_s и H_c . Если M_s слишком низок ($< 90\%$ от ожидаемого значения), возможно, недостаточно кобальта или η -фазы. Если M_s слишком высок ($> 110\%$), возможно, есть свободный углерод. Аномальное колебание H_c ($> 10\%$) указывает на неравномерное спекание. При необходимости можно провести дополнительную проверку, объединив металлографический микроскоп (увеличение 200х) или XRD (обнаружение η -фазы $2\theta \approx 40^\circ$, свободного углерода $2\theta \approx 26^\circ$).

Регистрация и обработка результатов: запишите M_s , H_c и номер образца и сохраните их в базе

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

данных качества. Аномальные результаты требуют корректировки рецепта (например, добавления 0,1-0,2% углерода) или оптимизации процесса спекания (регулировки температуры на $\pm 10^{\circ}\text{C}$ и увеличения времени выдержки до 1,5 часов).

3.4 Стандарты испытаний и спецификации

Магнитные испытания кобальта должны соответствовать международным и национальным стандартам для обеспечения надежности результатов. ISO 3326:2013 определяет метод определения магнитного насыщения цементированного карбида кобальта, четко определяя калибровку оборудования (с использованием чистых стандартов кобальта), размер образца (5-10 мм) и требования к точности ($\pm 0,5\%$).

ASTM B886 — это общий стандарт для испытаний магнитных свойств твердого сплава, охватывающий измерения M_s и H_c и подчеркивающий контроль среды испытаний (20-25°C, без магнитных помех). Национальный стандарт Китая GB/T 3849 также требует повторяемости испытаний (отклонение $< 2\%$) и цикла калибровки оборудования (один раз в месяц) для обеспечения постоянства производства.

3.5 Меры предосторожности и контроль ошибок

Для обеспечения точности теста следует отметить следующие моменты: оборудование необходимо регулярно калибровать, используя чистый кобальт ($M_s = 16,2 \text{ мТл}^3/\text{кг}$, $H_c = 5 \text{ кА/м}$) или стандартные образцы, а погрешность должна контролироваться в пределах $\pm 1\%$. Образец должен быть однородным, без трещин ($< 5 \text{ мкм}$), пор ($< 0,05\%$), а отклонение состава должно быть $< 0,1 \text{ мас.}\%$, в противном случае это может привести к отклонению измерения. Испытательная среда должна быть свободна от сильных помех магнитного поля ($< 0,1 \text{ мТл}$), температура должна контролироваться на уровне 20-25°C, а влажность должна быть $< 60\%$. Если результат ненормальный (отклонение $M_s > 5\%$, флуктуация $H_c > 10\%$), необходимо объединить химический анализ (например, измерение содержания кобальта методом ИСП, точность $\pm 0,05 \text{ мас.}\%$) или сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) для обнаружения микроскопических дефектов (например, пор, распределения η -фазы) для комплексной проверки.

4. Оптимизация и совершенствование методов магнитного контроля кобальта

Для дальнейшего повышения точности и прикладной ценности магнитного контроля кобальта можно внести улучшения в трех аспектах: улучшение оборудования, оптимизация процесса и анализ данных. Конкретные методы следующие.

С точки зрения совершенствования оборудования, использование более точных испытательных приборов является ключом к улучшению результатов магнитного испытания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

кобальта. С широким распространением наномасштабного цементированного карбида (размер зерна 0,05-0,2 мкм), его высокая коэрцитивная сила ($H_c > 50$ кА/м) и сложная микроструктура выдвинули более высокие требования к точности испытаний. Точность ($\pm 0,5\%$) традиционных магнитных анализаторов (таких как Koerzimat) больше не может удовлетворить потребности. Рекомендуется внедрить высокоточный вибрационный магнитометр (VSM, точность $\pm 0,1$ мкТл 3 /кг), который может более точно измерять петлю гистерезиса и микроскопические магнитные изменения. Кроме того, разработка высокотемпературного кобальтового магнитного испытательного оборудования (поддерживающего испытания при 800-1000 °C) может оценить характеристики затухания кобальтового магнетизма в условиях высоких температур (M_s уменьшается на 5-10%), обеспечивая поддержку прогнозирования производительности для высокотемпературных инструментов (таких как инструменты для обработки авиационных двигателей). Например, при 1000 °C M_s цементированного карбида, содержащего 10% кобальта, упала с 1,61 до 1,45 мкТл 3 /кг, что указывает на высокотемпературное окисление или улетучивание кобальта. Покрытие (такое как TiAlN, толщина 2-3 мкм) необходимо оптимизировать для повышения термостойкости.

С точки зрения оптимизации процесса, дефекты, такие как η -фаза и свободный углерод, могут быть уменьшены путем улучшения процесса спекания и разработки формулы, тем самым улучшая стабильность результатов магнитного испытания кобальта. Температура спекания должна строго контролироваться на уровне 1350-1450 °C. Слишком высокая температура (> 1500 °C) приведет к образованию крупных зерен (H_c падает с 20 кА/м до 8 кА/м), а слишком низкая температура (< 1300 °C) легко образует η -фазу (M_s падает до $< 90\%$ от ожидаемого значения). Процесс горячего изостатического прессования (HIP, 150-200 МПа, 1350 °C) может эффективно снизить пористость (с 0,1% до 0,05%), улучшить значение M_s (увеличить на 3-5%) и стабильность H_c (колебание $< 5\%$). Кроме того, добавление ингибиторов зерен в следовых количествах (таких как VC 0,2-0,5 мас. % или Cr 3×10^{-3} 0,3-0,8 мас. %) может контролировать размер зерен фазы кобальта (0,5-1 мкм), увеличивать H_c (с 15 кА/м до 20-25 кА/м) и уменьшать образование η -фазы (M_s восстанавливается до 98% от ожидаемого значения). С точки зрения разработки рецептуры, оптимизация содержания углерода (6,0 $\pm$ 0,2 мас. %) и содержания кобальта (6-10 мас. %) может избежать свободного углерода и η -фазы, а отклонение M_s контролируется в пределах $\pm 0,3\%$. Например, после ГИП и ВК с добавлением твердого сплава, содержащего 8% кобальта, M_s стабилизируется на уровне 1,28-1,30 мкТл 3 /кг, а срок службы инструмента увеличивается на 20% (с 3 часов до 3,6 часов).

С точки зрения анализа данных, внедрение технологии интеллектуального анализа может значительно повысить эффективность и точность магнитного тестирования кобальта. В 2025 году искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (МО) широко использовались в анализе магнитных данных кобальта. Создав базу данных производительности M_s - H_c , ИИ может предсказывать типы дефектов и влияние на производительность. Например, если $M_s < 1,16$ мкТл 3 /кг (стандарт YG8 1,29 мкТл 3 /кг), ИИ может автоматически подсказать

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

возможность η -фазы (вероятность >80%) и рекомендовать корректировку содержания углерода (+0,1-0,2 мас.%) или повторный обжиг (1350 °C, 1,5 часа). Кроме того, система мониторинга в реальном времени (в сочетании с инфракрасной спектроскопией для мониторинга атмосферы спекания) может динамически корректировать параметры спекания, чтобы гарантировать постоянство Ms и Hc (отклонение <2%). Интеллектуальный анализ также поддерживает прогнозирование производительности в перекрестных условиях. Например, в жаркой и влажной среде (40°C, влажность 90%) стабильность Ms сплавов Ni-Co (Ni 5-10%) улучшается на 5-10%, что подходит для применения в морской технике (срок службы >3 года).

Фактический эффект от метода комплексного улучшения примечателен. Например, производитель инструментов оптимизировал магнитный тест кобальта (анализ VSM+AI) для контроля отклонения Ms до $\pm 0,2\%$, флуктуации Hc <3% и соотношения фаз η до <1%, а твердость инструмента (HRA 91-92) и срок службы (резка титанового сплава, 200 м/мин) увеличились на 25% (с 3 часов до 3,75 часов). Аналогичные улучшения в горнодобывающих буровых коронках (частота ударов >2000 раз/мин) увеличили срок службы на 30% (с 200 часов до 260 часов), полностью подтвердив прикладную ценность оптимизации магнитного теста кобальта.

5. Сценарии применения магнитного контроля кобальта

Магнитный контроль кобальта имеет большое практическое значение в производстве и применении твердого сплава.

Контроль качества

Проверяя содержание кобальта и баланс углерода, мы можем гарантировать, что характеристики карбида соответствуют стандартам. Например, YG6 (6% кобальта, Ms = 0,97 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, Hc = 15-20 кА/м) имеет твердость инструмента HRA 90-91 и прочность KIC 10-12 МПа $\cdot\text{m}^{1/2}$, что подходит для общей резки.

Оптимизация процесса

Руководить корректировкой процесса спекания, чтобы избежать образования крупных зерен (Hc <8 кА/м) или η -фазы (Ms <0,9 мкТлм³/кг) и улучшить консистенцию продукта.

Обнаружение дефектов

Определите η -фазу или свободный углерод, чтобы скорректировать рецептуру (например, добавить 0,1–0,2% углерода) для снижения потери ударной вязкости (KIC уменьшается на 15%) или потери твердости (HV уменьшается на 50–80%).

Прогноз производительности

Высокий показатель Hc (>25 кА/м) подходит для инструментов с высокой твердостью (например, сверла для печатных плат, срок службы >4 часов); низкий показатель Hc (<10 кА/м)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подходит для форм с высокой прочностью (например, сверла для горнодобывающей промышленности, срок службы >200 часов).

Примеры

При резке авиационного титанового сплава (200 м/мин) инструмент, содержащий 10% кобальта, прошел магнитный тест на кобальт ($M_s = 1,61 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$, $H_c = 18 \text{ кА/м}$) для обеспечения твердости и ударопрочности, а срок службы достиг 3-4 часов, что лучше, чем у неиспытанного инструмента (срок службы < 2 часов).

6. Поддержка данных и последние достижения

Тест магнитной производительности:

Чистый кобальт: $M_s = 16,1-16,3 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$, $H_c = 5-6 \text{ кА/м}$, температура Кюри 1145°C .

YG6 (6% кобальта): $M_s = 0,97 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$, $H_c = 15-20 \text{ кА/м}$.

YG8 (8% кобальта): $M_s = 1,29 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$, $H_c = 10-15 \text{ кА/м}$.

Наноразмерные сплавы (0,05-0,2 мкм): $H_c = 50-60 \text{ кА/м}$, $M_s = 1,1-1,3 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$ (эффект границ зерен).

Влияние дефекта:

η -фаза: M_s уменьшается на 10–20 %, например, YG8 уменьшается с 1,29 до 1,0 мкТл³/кг.

Свободный углерод: M_s уменьшается на 5–10%, например, YG6 уменьшается с 0,97 до 0,87 мкТл³/кг.

Размер зерна 1-2 мкм: $H_c = 10-15 \text{ кА/м}$, наилучшая твердость-вязкость.

Прогресс к 2025 году:

Производство нано-твердых сплавов возросло до 20% от общего мирового объема, а спрос на высокие значения H_c (>50 кА/м) способствовал популяризации VSM (точность $\pm 0,05 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$). Стабильность M_s сплавов Ni-Co (Ni 5-10%) в морской среде (соленость 3,5%, 50 МПа) увеличилась на 5-10%, а доля применения достигла 15%. Анализ AI увеличил скорость обнаружения дефектов на 20%, а отклонения M_s автоматически запускают анализ SEM.

7. Заключение

в твердом сплаве магнитное свойство связующей фазы кобальта. Оно отражает содержание кобальта, баланс углерода и микроструктуру через интенсивность магнитного насыщения (M_s) и коэрцитивную силу (H_c) и является основным инструментом для контроля качества и оптимизации производительности. Магнитное испытание кобальта может не только проверять состав и устранять дефекты, но и направлять оптимизацию процесса и прогнозирование производительности, что имеет большое значение для повышения твердости, вязкости и износостойкости твердого сплава. Благодаря внедрению высокоточного оборудования (такого как VSM), оптимизации процесса спекания (HIP + ингибитор зерна) и интеллектуального анализа данных (AI + мониторинг в реальном времени) точность и прикладная ценность магнитного испытания кобальта были значительно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

улучшены, что обеспечивает сильную техническую поддержку для высокопроизводительного применения твердого сплава.

8. Ссылки

ScienceDirect (2020). Магнитные свойства твердых сплавов. ScienceDirect (2020).

ISO 3326:2013. Определение магнитного насыщения твердых сплавов. ISO 3326 : 2013 .

ASTM B886. Стандартный метод испытаний магнитных свойств твердых сплавов.

GB/T 3849. Методы магнитного контроля твердых сплавов (Китай).

ITIA (2025). Ежегодный отчет по наноструктурированным твердым сплавам. ITIA (2025).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

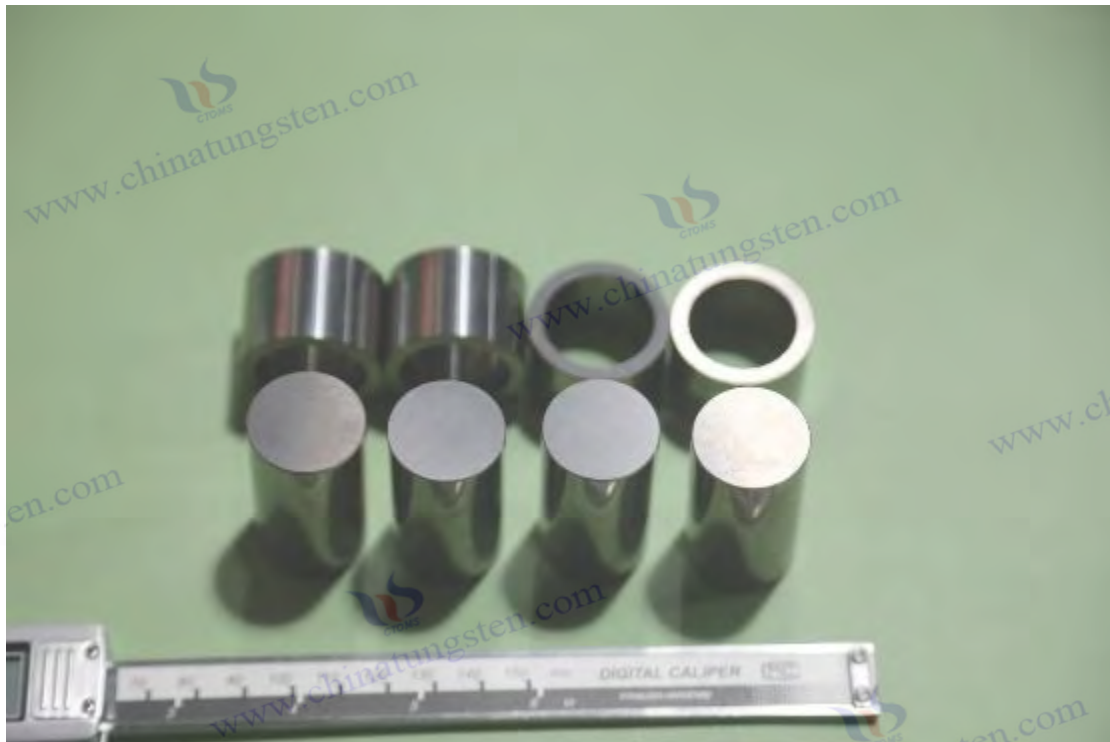
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Приложение :

ISO 3326:2013 Метод определения магнитного насыщения кобальта в твердом сплаве
ISO 3326:2013 Твердые сплавы.

Определение механического насыщения углеродом Опубликовано: июль 2013 г.

Статус: Действует в настоящее время Область применения: Настоящий стандарт устанавливает метод определения интенсивности магнитного насыщения кобальта (Co) в твердом сплаве. Он применим к твердому сплаву, содержащему не менее 3% (массовая доля) ферромагнитного связующего (в основном кобальта) для контроля качества и анализа состава.

1. Область применения

В настоящем стандарте описан неразрушающий метод определения магнитного насыщения (M_s) кобальта в твердых сплавах для оценки содержания кобальта, баланса углерода и качества сплава.

Сплавы WCCo), содержащие ферромагнитные связующие (такие как кобальт и никель, с массовой долей $\geq 3\%$), но не подходят для немагнитных или слабомагнитных сплавов.

Результаты испытаний используются для:

Убедитесь, что содержание кобальта соответствует спецификации.

Обнаруживает дисбаланс содержания углерода (например, эта-фаза или свободный углерод).

Оценка качества процесса спекания (например, наличие немагнитных включений).

2. Нормативные ссылки

Прямых ссылок на другие стандарты нет, но рекомендуется ссылаться на соответствующие

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

стандарты испытаний твердосплавных материалов, такие как:

ISO 4499 (Определение микроструктуры твердых сплавов).

ISO 3738 (Методы отбора проб твердых сплавов).

Он полностью соответствует содержанию ASTM B886 (Испытание на магнитное насыщение твердого сплава) и может использоваться в качестве дополнительного справочного материала.

3. Термины и определения

Твердый сплав: Композитный материал, состоящий из твердой фазы (например, карбида вольфрама WC) и связующей фазы (например, кобальта).

Магнитное насыщение (МС): интенсивность, при которой намагниченность фазы кобальта достигает максимального значения в сильном магнитном поле, единица измерения $\text{мкТл} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ или $\text{кА} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$.

Ферромагнитное связующее: кобальт, никель и другие металлические фазы с ферромагнетизмом, причем кобальт является наиболее распространенным.

η -фаза (эта-фаза): хрупкие карбиды (например, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$), образующиеся при недостатке углерода, что снижает магнетизм и вязкость.

Свободный углерод: немагнитный углерод, который выпадает в осадок при избытке углерода, ослабляя прочность сплава.

4. Принцип

Магнетизм твердого сплава обусловлен связующей фазой кобальта, а твердая фаза (например, WC) не вносит вклад в магнетизм.

Под действием сильных магнитных полей (обычно $>1,5 \text{ T}$) фаза кобальта достигает магнитного насыщения, а M_s пропорциональна содержанию кобальта. Константа магнитного насыщения чистого кобальта составляет $16,116,3 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$ (ScienceDirect, 2020).

Измерение MS может:

Рассчитаем содержание кобальта: $M_s \div 16,1 \text{ мкТл}^3/\text{кг} \approx$ массовая доля кобальта.

Обнаружение немагнитных примесей: η -фаза или оксиды снижают M_s (1020%), свободный углерод снижает M_s (510%).

Испытание является неразрушающим и не зависит от формы и размера образца (в определенных пределах).

5. Аппарат

Магнитный анализатор: например, Koerzimat MS или Sigmameter, оснащенный генератором сильного магнитного поля ($1,52 \text{ Тл}$) и системой обнаружения магнитного потока.

Стандартный калибровочный образец: чистый образец кобальта или цементированного карбида с известным содержанием кобальта, значение M_s прослеживается до единиц СИ.

Прецизионные весы: точность $\pm 0,01 \text{ г}$, используются для взвешивания массы образца.

Устройство постоянной температуры: температура испытательной среды поддерживается на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

уровне 20–25 °C, чтобы избежать тепловых эффектов.

Оборудование для размагничивания (опционально): гарантирует отсутствие остаточной намагниченности образца.

6. Тестовый образец

Форма и размер: Образец может иметь любую форму (например, цилиндр, куб, заготовка инструмента), размер обычно составляет 510 мм, а масса — 0,550 г.

Требования к поверхности: чистая, без масла, оксидного слоя и механических повреждений.

Однородность: Внутренний состав образца однородный, без явных трещин и пор.

Количество: не менее 3 образцов на партию, репрезентативная выборка в соответствии с ISO 3738.

7. Этапы тестирования (процедура)

Калибровка оборудования:

с использованием чистых стандартов кобальта ($M_s = 16,1 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$) или сертифицированных образцов карбида.

Погрешность калибровки контролируется в пределах $\pm 1\%$, данные калибровки регистрируются.

Подготовка образца:

Очистите поверхность образца от масла, грязи и окислов.

Взвесьте массу образца (m , единица измерения: г) с помощью прецизионных весов с точностью $\pm 0,01 \text{ г}$.

Если образец имеет остаточную намагниченность, используйте оборудование для размагничивания.

Измерение магнитного насыщения:

Поместите образец в сильное магнитное поле ($1,52 \text{ Тл}$) магнитного анализатора, чтобы убедиться, что кобальтовая фаза полностью намагничена.

Измерьте магнитный поток и запишите напряженность магнитного насыщения (M_s , в $\text{мкТл} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$).

Измерение было повторено 3 раза и взято среднее значение. Отклонение одного измерения составило $< \pm 0,5\%$.

Записи данных:

Запишите номер образца, массу, значение M_s и условия испытания (температуру, напряженность магнитного поля).

Если значение M_s не соответствует норме, проверьте образец или оборудование и при необходимости проведите повторный тест.

8. Расчет и выражение результатов

Содержание кобальта:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\text{钴质量分数 (\%)} = \frac{M_s}{M_{s(\text{理论})}} \times 100$$

Среди них M_s — измеренное значение, M_s чистого кобальта составляет 16,1 мкТл³/кг. Например, $M_s = 1,61$ мкТл³/кг, содержание кобальта $\approx 10\%$.

Относительное магнитное насыщение (S):

$$S = \frac{M_{s\text{测量}}}{M_{s\text{理论}}}$$

Теория M_s представляет собой значение магнитного насыщения (основанное на содержании кобальта) гипотетической чистой связующей фазы кобальта. $S < 0,9$ указывает на η -фазу, а $S > 1,1$ указывает на свободный углерод.

Точность: результат сохраняется с точностью до 3 знаков после запятой (например, 1,610 мкТл³/кг), а содержание кобальта сохраняется с точностью до 1 знака после запятой (например, 10,0%).

9. Анализ результатов испытаний

Нормальный диапазон: Значение магнитного насыщения кобальта после спекания обычно составляет 85–95% от теоретического значения (поскольку часть кобальта растворяется в WC или образует немагнитную фазу).

Ненормальная ситуация:

M_s низкая ($< 90\%$): может присутствовать η -фаза ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$), оксид или недостаточное содержание кобальта.

M_s слишком высок ($> 110\%$): возможно, имеется избыточное содержание свободного углерода или кобальта.

Дополнительная проверка: Аномальные результаты необходимо сочетать с металлографическим анализом (наблюдение под микроскопом η -фазы, свободного углерода) или химическим анализом (измерение содержания кобальта методом ИСП).

10. Отчет об испытаниях

Отчет должен включать следующее:

Ссылка на стандарт: ISO 3326:2013.

Информация об образце: количество, форма, качество, партия.

Условия испытаний: модель устройства, напряженность магнитного поля (Тл), температура окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$).

Результаты: значение M_s (мкТл³/кг), расчетное содержание кобальта (%), относительное магнитное насыщение (S).

Информация о калибровке: значение M_s стандартного образца, дата калибровки.

Описание исключения: Если есть отклонение, опишите возможную причину (например, η -фаза).

Тестирующий: Имя, дата, подпись.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Информация о лаборатории: название, адрес, сертификация, квалификация.

11. Меры предосторожности

Калибровка оборудования: Регулярная калибровка, погрешность $< \pm 1\%$, с использованием прослеживаемых стандартных образцов.

Однородность образца: избегайте трещин, пор или неравномерного состава, которые влияют на точность Ms.

Контроль окружающей среды: Испытательная среда не имеет сильных помех со стороны магнитного поля, а температура составляет 20–25 °C.

Безопасность: Соблюдайте правила эксплуатации оборудования, чтобы избежать воздействия сильных магнитных полей на персонал или электронное оборудование.

Проверка данных: Аномальные значения Ms необходимо многократно проверять и подтверждать в сочетании с металлографическим или рентгеноструктурным анализом.

12. Приложения

Приложение А (информационное): Связь между магнитным насыщением кобальта и содержанием углерода.

Приведен диапазон Ms типичных сплавов WCCo (например, YG6: $Ms \approx 0,97 \text{ мкТлм}^3/\text{кг}$, YG8: $Ms \approx 1,29 \text{ мкТлм}^3/\text{кг}$).

На диаграмме показано влияние η -фазы и свободного углерода на Ms (η -фаза уменьшается на 1020%, свободный углерод уменьшается на 510%).

Приложение В (информационное): Руководство по калибровке оборудования.

Рекомендуемая частота калибровки (ежемесячно или каждые 1000 испытаний), стандартные требования к образцам.

Приложение С (информационное): Анализ источника ошибок.

Неоднородность образца, некалиброванное оборудование, помехи от магнитного поля окружающей среды и т. д.

13. Ссылки на соответствующие стандарты

ASTM B886: Похожий метод определения магнитного насыщения твердого сплава, подчеркивающий неразрушаемость и косвенную оценку содержания углерода (ASTM B886, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение :

Метод испытания на магнитное насыщение цементированного карбида: ASTM B88624

1. Введение

Твердый сплав (например, сплав карбида вольфрама с кобальтом, WCCo) широко используется в таких промышленных областях, как режущие инструменты, пресс-формы и сверла, благодаря своей высокой твердости, износостойкости и прочности. **Магнитная прочность насыщения (Ms)** является ключевым показателем для оценки содержания и качества ферромагнитных связующих фаз (например, кобальта и никеля) в твердом сплаве. Стандарт ASTM B88624 определяет метод определения Ms порошков твердого сплава и спеченных изделий с использованием тестера магнитного насыщения, который подходит для неразрушающего контроля качества, косвенной оценки содержания углерода и приемки продукции. В этой статье подробно представлено содержание ASTM B88624, включая область применения, принципы, оборудование, процедуры, расчеты и требования к отчетности, чтобы предоставить справочную информацию для практиков.

2. Стандартный объем

В этом стандарте описывается неразрушающий метод испытаний для определения интенсивности магнитного насыщения (Ms) в порошках цементированного карбида и спеченных продуктах для оценки магнитной фракции ферромагнитных связующих фаз (таких как кобальт, никель, железо). Применимые объекты включают:

Порошок цементированного карбида перед спеканием.

Спеченные изделия, такие как ножи, формы, сверла.

Цель теста:

Косвенная оценка содержания углерода, обнаружение η -фазы ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) или свободного углерода.

Проверьте содержание связующей фазы, чтобы убедиться в соответствии спецификациям.

Оценить качество порошка и спеченного продукта для приемки продукта.

Стандарт основан на единицах СИ ($\text{мкТлм}^3/\text{кг}$) и дополнен единицами дюйм-фунт.

3. Термины и определения

Твердый сплав : композитный материал, состоящий из твердой фазы (например, карбида вольфрама WC, карбида титана TiC) и ферромагнитной связующей фазы (например, кобальта, никеля).

Интенсивность магнитного насыщения (MC) : интенсивность, при которой намагниченность связующей фазы достигает максимального значения в сильном магнитном поле, с единицей измерения $\text{мкТлм}^3/\text{кг}$, отражающей содержание кобальта или никеля.

Ферромагнитная связующая фаза : кобальт (Co), никель (Ni) или железо (Fe) обеспечивает магнетизм и прочность, причем кобальт является наиболее распространенным.

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

η-фаза : немагнитный карбид (например, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$), образующийся при недостатке углерода, что снижает M_s и ударную вязкость.

Свободный углерод : немагнитный углерод, выпадающий в осадок при избытке углерода, снижающий M_s и прочность.

Константа магнитного насыщения : чистого кобальта M_s составляет 16,116,3 мкТл³/кг, никеля — 5,4 мкТл³/кг.

4. Значение и использование

Неразрушающий : нет необходимости разрушать образец, подходит для порошковых и спеченных изделий.

Оценка содержания углерода : M_s отражает баланс углерода, η-фаза или свободный углерод уменьшают M_s .

Контроль качества : проверка содержания кобальта/никеля, обнаружение дефектов спекания (например, оксидов).

Приемка продукции : убедитесь, что продукция соответствует спецификациям класса (например, YG6, YG8).

Ограничения : Применимо только к цементированным карбидам, содержащим ферромагнитную связующую фазу, не применимо к немагнитным сплавам.

5. Принцип теста

Магнетизм твердого сплава обусловлен ферромагнитной связующей фазой (такой как кобальт), а твердая фаза (такая как WC) не вносит вклад в магнетизм. Под действием сильного магнитного поля (1,52 Тл) связующая фаза достигает магнитного насыщения, а M_s пропорциональна содержанию связующей фазы. Формула для расчета содержания кобальта: $M_s \div 16,1 \text{ мкТлм}^3/\text{кг} \approx \text{массовая доля кобальта}$. Например, $M_s = 1,61 \text{ мкТлм}^3/\text{кг}$ означает, что содержание кобальта составляет около 10%. Немагнитные примеси (такие как η-фаза, свободный углерод, оксиды) снижают M_s , а аномальные значения указывают на проблемы с качеством.

6. Испытательное оборудование

Тестер магнитного насыщения : например, Koerzimat MS, Sigmameter, оснащенный генератором сильного магнитного поля (1,52 Тл) и системой обнаружения магнитного потока (точность $\pm 0,5\%$).

Прецизионные весы : точность $\pm 0,01$ г, измерение массы образца.

Стандартный калибровочный образец : чистый кобальт ($M_s = 16,1 \text{ мкТлм}^3/\text{кг}$) или твердый сплав с известным значением M_s .

Устройство постоянной температуры : температура испытательной среды 2025°C.

Оборудование для размагничивания (опционально): удаляет остаточную намагниченность образцов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Требования к образцам

Тип : Порошок перед спеканием или спеченное изделие (например, инструменты, формы).

Форма и размер : Любая форма (например, цилиндр, куб), размер 510 мм, масса 0,550 г.

Поверхность : Чистая, без масла, оксидного слоя и механических повреждений.

Однородность : Внутренний состав однородный, без трещин и пор.

Отбор проб : не менее 3 репрезентативных образцов на партию.

8. Этапы тестирования

Калибровка оборудования :

Калибровка с использованием чистого кобальта или сертифицированных образцов карбида, погрешность $M_s \leq \pm 1\%$.

Запишите данные калибровки (стандартный образец M_s , дата).

Подготовка образца :

Очистите образец от масла, грязи и окислов.

Взвесьте массу (в г, $\pm 0,01$ г).

При наличии остаточной намагниченности используйте оборудование для размагничивания.

Измерение магнитного насыщения :

Образец помещали в сильное магнитное поле (1,52 Тл), чтобы гарантировать полное намагничивание кобальтовой фазы.

Измерьте магнитный поток и запишите M_s (мкТл·м³/кг).

Измерение было повторено 3 раза и взято среднее значение. Единичное отклонение составило $\leq \pm 0,5\%$.

Записи данных :

Запишите номер образца, массу, значение M_s и условия испытания (напряженность магнитного поля, температуру).

Если значение M_s не соответствует норме, проверьте образец или оборудование и при необходимости проведите повторный тест.

9. Расчет и выражение

Интенсивность магнитного насыщения :

$$M_s = \frac{\text{磁通量}}{\text{样品质量}}$$

Единица измерения — мкТл³/кг с тремя знаками после запятой (например, 1,610 мкТл³/кг).

Содержание кобальта :

$$\text{钴质量分数 (\%)} = \frac{M_s}{16.1} \times 100$$

Оставьте 1 знак после запятой (например, 10,0%).

Относительное магнитное насыщение (S) :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$S = \frac{Ms_{\text{测量}}}{Ms_{\text{理论}}}$$

Теория Ms основана на содержании кобальта, $S < 0,9$ указывает на η -фазу, а $S > 1,1$ указывает на свободный углерод.

Точность : Ошибка повторяемости $< \pm 1\%$, отклонение от партии к партии $< \pm 2\%$.

10. Анализ результатов

Нормальный диапазон : Ms спеченного сплава составляет 85–95 % от теоретического значения (поскольку часть кобальта растворяется в WC или образует немагнитную фазу).

Ненормальная ситуация :

Ms низкая ($< 90\%$): недостаточное содержание η -фазы, оксида и кобальта.

Ms слишком высок ($> 110\%$): содержание свободного углерода и кобальта превышает норму.

Дополнительная проверка : Аномальные значения Ms необходимо сочетать с металлографическим анализом (наблюдение под микроскопом за η -фазой, свободным углеродом), рентгеновской дифракцией или химическим анализом (измерение содержания кобальта методом ИСП).

11. Отчет об испытаниях

Отчет включает в себя:

Стандартная ссылка: ASTM B88624.

Информация об образце: номер, тип (порошок/спекшийся), форма, масса, партия.

Условия испытаний: модель устройства, напряженность магнитного поля, температура.

Результаты: значение Ms, содержание кобальта, относительное магнитное насыщение.

Информация о калибровке: значение Ms стандартного образца, дата калибровки.

Описание исключения: Причина отклонения (например, η -фаза, свободный углерод).

Тестирующий: Имя, дата, подпись.

Информация о лаборатории: название, адрес, сертификация, квалификация.

12. Точность и предвзятость

Повторяемость : при использовании одного и того же оборудования и одного и того же оператора отклонение трех измерений составляет $< \pm 0,5\%$.

Воспроизводимость : отклонение от партии к партии составляет $< \pm 2\%$ в разных лабораториях и на разном оборудовании.

Отклонение : систематическое отклонение отсутствует, значения Ms соответствуют единицам СИ.

Факторы влияния : неравномерные образцы, некалиброванное оборудование и помехи от магнитного поля окружающей среды.

13. Примечания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Калибровка оборудования : ежемесячно или каждые 1000 испытаний с использованием чистого кобальта или сертифицированных образцов.

Однородность образца : избегайте трещин, пор и неравномерного состава.

Контроль окружающей среды : отсутствие сильных помех со стороны магнитного поля, температура 20-25°C.

Безопасность : Соблюдайте правила эксплуатации оборудования и избегайте воздействия сильных магнитных полей.

Проверка данных : Повторное тестирование аномальных результатов в сочетании с металлографическим или химическим анализом.

14. Приложение

Приложение А : Связь между магнитным насыщением и содержанием углерода.

Типичные сплавы: YG6 (6% кобальта, $M_s \approx 0,97$ мкТл³/кг), YG8 (8% кобальта, $M_s \approx 1,29$ мкТл³/кг).

η -фаза восстановлена на 1020%, свободный углерод восстановлен на 510%.

Приложение В : Руководство по калибровке оборудования.

Частота калибровки, стандартные требования к образцам, контроль ошибок.

Приложение С : Источники ошибок и методы их устранения.

Подготовка образцов, стабильность оборудования, влияние окружающей среды.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Приложение :

GB/T 38492015 Определение величины магнитного насыщения кобальта в твердом сплаве

Дата выпуска : 10 декабря 2015 г.

Дата введения в действие : 1 июля 2016 г.

Статус : Действует в настоящее время

Область применения : Этот стандарт определяет метод определения магнитного насыщения кобальта в твердом сплаве. Он применим к твердому сплаву, содержащему ферромагнитную связку (в основном кобальт, массовая доля $\geq 3\%$), и используется для контроля качества, проверки содержания кобальта и оценки баланса углерода.

1. Область применения

В настоящем стандарте описан неразрушающий метод определения **величины магнитного насыщения** (Ms) кобальта в твердых сплавах с целью оценки содержания кобальта, баланса углерода и качества сплава.

Применимо к:

Изделия из спеченного карбида (такие как инструменты, формы, сверла).

Порошок карбида вольфрама перед спеканием (в зависимости от возможностей оборудования).

Цель теста:

Убедитесь, что содержание кобальта соответствует спецификациям (например, YG6, YG8).

Косвенная оценка содержания углерода, обнаружение η -фазы ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) или свободного углерода.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Оцените качество процесса спекания и определите немагнитные примеси, такие как оксиды.
Единица: используются единицы СИ. Значение магнитного насыщения выражается как $\text{мкТл} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ или $\text{кА} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$.

2. Нормативные ссылки

GB/T 3848 : Метод химического анализа твердого сплава (используется в качестве дополнения к проверке содержания кобальта).

GB/T 4198 : Методы отбора проб и подготовки образцов для твердого сплава.

ISO 3326:2013 : Метод определения магнитного насыщения кобальта в твердом сплаве (Этот стандарт соответствует ISO 3326 по техническому содержанию, а перевод эквивалентен).

ASTM B886 : Метод определения магнитного насыщения твердого сплава (эталонный стандарт, аналогичный метод).

3. Термины и определения

Твердый сплав : композитный материал, состоящий из твердой фазы (например, карбида вольфрама WC, карбида титана TiC) и ферромагнитной связующей фазы (например, кобальта, никеля).

Магнитное насыщение кобальта (M_s) : значение максимальной интенсивности намагничивания связующей фазы кобальта под действием сильного магнитного поля, единица измерения: $\text{мкТл} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$, отражающее содержание и чистоту кобальта.

Ферромагнитная связующая фаза : ферромагнитные металлы, такие как кобальт (Co) и никель (Ni), причем кобальт является основным связующим агентом.

η -фаза (эта-фаза) : немагнитные карбиды (например, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$), образующиеся при недостатке углерода, что снижает магнетизм и вязкость.

Свободный углерод : немагнитный углерод, который выпадает в осадок при избытке углерода, ослабляя прочность.

Константа магнитного насыщения : чистый кобальт M_s составляет $16,116,3 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$ (ScienceDirect, 2020).

4. Принцип

Магнетизм твердого сплава обусловлен связующей фазой кобальта, а твердая фаза (например, WC) не вносит вклад в магнетизм.

Под действием сильных магнитных полей (обычно $1,52 \text{ Тл}$) фаза кобальта достигает магнитного насыщения, а M_s пропорциональна содержанию кобальта. Константа M_s чистого кобальта составляет $16,1 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$ (типичное значение).

Содержание кобальта: $M_s \div 16,1 \text{ мкТл}^3/\text{кг} \approx$ массовая доля кобальта. Например, $M_s = 1,61 \text{ мкТл}^3/\text{кг}$ означает, что содержание кобальта составляет около 10%.

Влияние немагнитных примесей:

η -фаза или оксиды снижают M_s на 10–20 %, что указывает на недостаточное содержание углерода.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Снижение свободного углерода Ms 510%, что указывает на избыток углерода.

Испытание является неразрушающим и не зависит от формы и размера образца (в пределах возможностей оборудования).

5. Аппарат

Магнитный анализатор : например, Koerzimat MS, Sigmameter или отечественное оборудование (например, тестер магнитного насыщения китайского приборостроительного завода), оснащенный:

Генератор сильного магнитного поля (1,52 Тл, для обеспечения насыщения фазы кобальта).
Система обнаружения магнитного потока (точность $\pm 0,5\%$).

Прецизионные весы : точность $\pm 0,01$ г, измерение массы образца.

Стандарт калибровки : чистый кобальт ($M_s = 16,1$ мкгТлм³/кг) или образцы цементированного карбида с известным значением M_s , прослеживаемые к единицам СИ.

Устройство постоянной температуры : температура испытательной среды поддерживается на уровне 20–25 °C, чтобы избежать тепловых эффектов.

Оборудование для размагничивания (опционально): удаляет остаточную намагниченность образцов.

6. Тестовый образец

Тип : Спеченные карбидные изделия (предпочтительно) или порошок перед спеканием (в зависимости от возможностей оборудования).

Форма и размер : Любая форма (например, цилиндр, куб, заготовка инструмента), размер 510 мм, масса 0,550 г.

Требования к поверхности : чистая, без масла, оксидного слоя и механических повреждений.

Однородность : Внутренний состав однородный, без явных трещин и пор.

Отбор проб : в соответствии с GB/T 4198 не менее 3 репрезентативных образцов на партию.

7. Этапы тестирования (процедура)

Калибровка оборудования :

Прибор калибруется с использованием образцов чистого кобальта или сертифицированного карбида, а погрешность M_s контролируется в пределах $\pm 1\%$.

Запишите данные калибровки (значение M_s стандартного образца, дату калибровки).

Подготовка образца :

Очистите поверхность образца от масла, грязи и окислов.

Взвесьте массу образца с помощью прецизионных весов (м, единица измерения: г, точность: $\pm 0,01$ г).

Если образец имеет остаточную намагниченность, используйте оборудование для размагничивания.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Измерение магнитного насыщения :

Поместите образец в сильное магнитное поле (1,52 Тл) магнитного анализатора, чтобы убедиться, что фаза кобальта полностью намагничена.

Измерьте магнитный поток и запишите M_s (в мкТл·м³/кг).

Измерение было повторено 3 раза и взято среднее значение. Отклонение одного измерения составило $<\pm 0,5\%$.

Записи данных :

Запишите номер образца, массу, значение M_s и условия испытания (температуру, напряженность магнитного поля).

Если значение M_s не соответствует норме, проверьте образец или оборудование и при необходимости проведите повторный тест.

8. Расчет и выражение результатов

Значение магнитного насыщения :

$$M_s = \frac{\text{磁通量}}{\text{样品质量}}$$

Единица измерения — мкТл³/кг с тремя знаками после запятой (например, 1,610 мкТл³/кг).

Содержание кобальта :

$$\text{钴质量分数 (\%)} = \frac{M_s}{16.1} \times 100$$

Оставьте 1 знак после запятой (например, 10,0%).

Относительное магнитное насыщение (S) :

$$S = \frac{M_{s\text{测量}}}{M_{s\text{理论}}}$$

Теория M_s основана на содержании кобальта, $S < 0,9$ указывает на η -фазу, а $S > 1,1$ указывает на свободный углерод.

Точность : точность результата $\pm 1\%$, отклонение от партии к партии $<\pm 2\%$.

9. Анализ результатов

Нормальный диапазон : M_s спеченного сплава обычно составляет 85–95 % от теоретического значения (поскольку часть кобальта растворяется в WC или образует немагнитную фазу).

Ненормальная ситуация :

M_s низкий ($< 90\%$): может присутствовать η -фаза, оксид или недостаточное содержание кобальта.

M_s слишком высок ($> 110\%$): возможно, имеется избыточное содержание свободного углерода или кобальта.

Дополнительная проверка : Аномальные результаты необходимо объединить с металлографическим анализом (наблюдение под микроскопом за η -фазой, свободным углеродом), рентгеновской дифракцией (XRD) или химическим анализом (измерение содержания кобальта в соответствии с GB/T 3848).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10. Отчет об испытаниях

Отчет должен включать:

Стандартный номер: GB/T 38492015.

Информация об образце: номер, тип (порошок/спекшийся), форма, масса, партия.

Условия испытаний: модель устройства, напряженность магнитного поля (Тл), температура окружающей среды (°C).

Результаты: значение M_s (мкТлм³/кг), содержание кобальта (%), относительное магнитное насыщение (S).

Информация о калибровке: значение M_s стандартного образца, дата калибровки.

Описание исключений: Если есть отклонения, опишите возможные причины (например, η-фаза, свободный углерод).

Тестирующий: Имя, дата, подпись.

Информация о лаборатории: название, адрес, аккредитация (если применимо).

11. Точность и предвзятость

Повторяемость : при использовании одного и того же оборудования и одного и того же оператора отклонение трех измерений составляет $< \pm 0,5\%$.

Воспроизводимость : Отклонение от партии к партии составляет $< \pm 2\%$ в разных лабораториях и на разном оборудовании.

Смещение : систематическое смещение отсутствует, значения M_s прослеживаются до единиц СИ, калибровка обеспечивает точность.

Факторы влияния : неравномерные образцы, некалиброванное оборудование и помехи от магнитного поля окружающей среды.

12. Меры предосторожности

Калибровка оборудования : ежемесячно или каждые 1000 испытаний с использованием чистого кобальта или сертифицированных образцов.

Однородность образца : избегайте трещин, пор или неравномерного состава, которые влияют на точность M_s .

Контроль окружающей среды : Испытательная среда не имеет сильных помех со стороны магнитного поля, а температура составляет 20–25 °C.

Безопасность : Соблюдайте правила эксплуатации оборудования, чтобы избежать воздействия сильных магнитных полей на персонал или электронное оборудование.

Проверка данных : Аномальный M_s Значение необходимо повторить и подтвердить металлографическим или химическим анализом.

13. Приложения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение А (информационное) : Связь между магнитным насыщением кобальта и содержанием углерода.

Типичный диапазон M_s сплава: YG6 (6% кобальта, $M_s \approx 0,97$ мкТл³/кг), YG8 (8% кобальта, $M_s \approx 1,29$ мкТл³/кг).

η -фаза восстановлена на 1020%, свободный углерод восстановлен на 510%.

Приложение В (информационное) : Руководство по калибровке оборудования.

Частота калибровки (ежемесячно или каждые 1000 испытаний), стандартные требования к образцам.

Приложение С (только информация) : Анализ источника ошибок.

Неоднородность образца, некалиброванное оборудование, помехи от магнитного поля окружающей среды и т. д.

14. Ссылки на соответствующие стандарты

ISO 3326:2013 : Определение магнитного насыщения кобальта в твердом сплаве. GB/T 3849 эквивалентен ему и имеет то же техническое содержание.

ASTM B88624 : Метод определения магнитного насыщения твердого сплава, аналогичный подход, охватывает как порошки, так и спеченные изделия.

GB/T 3848 : Методы химического анализа твердого сплава, дополнительная проверка содержания кобальта.

GB/T 3850 : Метод определения коэрцитивной силы твердого сплава в сочетании с магнитным испытанием кобальта позволяет комплексно оценить микроструктуру.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 3850 : Метод определения коэрцитивной силы твердого сплава

1 Область применения

Этот стандарт определяет метод определения коэрцитивной силы (Hc) материалов и изделий из твердого сплава. Этот метод применим к твердым сплавам на основе карбида вольфрама (таким как сплавы WC-Co, типичные марки включают YG6, YG8 и т. д.) с кобальтом (Co) в качестве связующей фазы. Измеряя коэрцитивную силу, косвенно характеризуются размер зерна, распределение содержания кобальта и микроструктурная целостность твердого сплава. Этот метод может использоваться для контроля качества в процессе производства, приемки продукции и неразрушающего контроля в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на твердые сплавы, не содержащие кобальта (например, твердые сплавы на основе никеля или железа), а также на немагнитные материалы.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 3848 Определение содержания кобальта в твердом сплаве

GB/T 3849 Метод испытания магнитных свойств твердого сплава

GB/T 223.1 Методы химического анализа стали и сплавов

GB/T 230.1 Испытание твердости металлических материалов по Роквеллу. Часть 1: Метод испытания

ISO 3326:2013 Метод определения коэрцитивной силы твердого сплава

Стандарт ASTM B887 для определения коэрцитивной силы твердого сплава

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Коэрцитивная сила (Hc)

В твердом сплаве напряженность обратного магнитного поля, необходимая для снижения интенсивности намагничивания связующей фазы кобальта от состояния насыщения до нуля, единица измерения — кА/м (килоампер/метр).

3.2 Магнитное насыщение (Ms)

Под действием внешнего магнитного поля (обычно $>1,5$ Тл) фаза кобальта достигает состояния максимальной интенсивности намагничивания, единицей измерения которой является мкТл·м³/кг (магнитный момент на килограмм материала).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Твердый сплав — это композиционный материал, изготовленный из карбида вольфрама (WC)

в качестве твердой фазы и кобальта (Co) в качестве связующей фазы с помощью процесса порошковой металлургии.

3.4 Размер зерна Средний размер

частиц карбида вольфрама в твердом сплаве, выраженный в микрометрах (мкм), влияет на значение коэрцитивной силы.

3.5 η Фаза (эта-фаза)

— хрупкая фаза, образующаяся в твердом сплаве из-за недостаточного содержания углерода. Ее химическая формула Co_3W_2C , что снижает магнитные свойства и вязкость.

3.6 Свободный углерод:

углерод, выделяющийся из-за чрезмерного содержания углерода в твердом сплаве, влияющий на магнитные свойства и твердость.

4 Принцип

Коэрцитивность твердого сплава обусловлена ферромагнетизмом связующей фазы кобальта (температура Кюри составляет около 1145 °C, интенсивность намагничивания составляет 1,7-1,75 мкБ/атом), в то время как твердая фаза (такая как WC) является немагнитным материалом и не вносит вклад в магнетизм. Основной принцип испытания коэрцитивности заключается в следующем: сначала фаза кобальта полностью намагничивается до насыщения под действием внешнего сильного магнитного поля (1,5-2 Тл), а затем применяется постепенно увеличивающееся обратное магнитное поле для измерения интенсивности магнитного поля, которое заставляет интенсивность намагничивания падать до нуля, то есть коэрцитивности (Hc). Коэрцитивность обратно пропорциональна размеру зерна фазы кобальта. Hc мелкозернистого твердого сплава (зерна 0,2-0,5 мкм) обычно составляет 25-40 кА/м, а Hc крупнозернистого твердого сплава (зерна >5 мкм) составляет 5-10 кА/м. Кроме того, на коэрцитивную силу также влияют содержание кобальта, однородность микроструктуры и дефекты (такие как η -фаза или поры), что можно использовать для оценки микроструктуры и качества обработки твердого сплава.

5. Инструменты и оборудование

5.1 Коэрцитивный измеритель

Постоянный магнит или электромагнитный коэрцитивный измеритель может обеспечить сильное магнитное поле 1,5–2 Тл с точностью измерения ± 1 кА/м и повторяемостью <2%.

5.2 Магнитный анализатор

, такой как Koerzimat 1.097 или Sigmameter 2.068, может одновременно измерять

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коэрцитивную силу и интенсивность магнитного насыщения с точностью $\pm 0,5\%$.

5.3 Вибрационный магнитометр (ВМ)

предназначен для высокоточных измерений с погрешностью $\pm 0,1$ кА/м и пригоден для проведения лабораторных исследований.

5.4 Весы

с точностью измерения $\pm 0,01$ г, используемые для взвешивания массы образца.

5.5 Инструменты для очистки

включают этанол и немагнитный пинцет для очистки поверхности образца.

5.6 Температура среды испытания поддерживается в термобоксе

на уровне 20–25 °С, а влажность $< 60\%$.

5.7 Для проверки размера зерна и микроструктуры используют металлографический микроскоп с увеличением 200х-500х.

5.8 Рентгеновский дифрактометр (РДА)

используется для обнаружения η -фазы ($2\theta \approx 40^\circ$) или свободного углерода ($2\theta \approx 26^\circ$).

6. Образцы

6.1 Требования к образцам

Форма: Образец имеет цилиндрическую или кубическую форму, размерами 5-10 мм (диаметр или длина стороны).

Состояние поверхности: Поверхность должна быть ровной, без трещин (длина < 5 мкм), пор (пористость $< 0,05\%$) или оксидного слоя, при необходимости очищенной этанолом.

Однородность: отклонение состава $< 0,1$ мас.%, колебание размера зерна $< 5\%$, что позволяет избежать внутренних дефектов, влияющих на измерение.

Количество: Каждая партия должна содержать не менее 3 образцов, и образцы должны быть получены в результате одного и того же процесса спекания.

6.2 Подготовка образца

Образцы вырезайте из твердосплавных заготовок или готовых изделий (например, инструментов, штампов), чтобы избежать возникновения напряжений при резке (напряжение < 100 МПа).

Если на поверхности образца имеется оксидный слой или масло, протрите его этанолом и высушите.

Взвесьте образец (точность $\pm 0,01$ г) и запишите номер образца.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7 методов испытаний

7.1 Условия испытаний

Температура окружающей среды: 20-25°C, колебание температуры $\leq \pm 2^\circ\text{C}$, чтобы не повлиять на магнитные свойства кобальтовой фазы.

Влажность окружающей среды: $< 60\%$, чтобы предотвратить микрокоррозию кобальтовой фазы под воздействием влаги (интенсивность намагничивания уменьшается на $< 2\%$).

Помехи от магнитного поля: В зоне испытаний отсутствуют сильные помехи от магнитного поля ($< 0,1 \text{ мТл}$).

7.2 Калибровка прибора

с использованием стандартных образцов (например, чистый кобальт, $H_c = 5 \text{ кА/м}$, $M_s = 16,2 \text{ мкТл/м}^3/\text{кг}$) с погрешностью $\leq \pm 1\%$.

Цикл калибровки: один раз в месяц или перед каждым испытанием.

Проверьте напряженность магнитного поля (1,5–2 Тл), чтобы убедиться, что кобальтовая фаза полностью намагничивается.

7.3 Этапы тестирования

Поместите образец в испытательную зону коэрцитивного измерителя и закрепите его немагнитным зажимом, чтобы гарантировать неподвижность образца.

Примените сильное магнитное поле (1,5–2 Тл) для полного намагничивания фазы кобальта до насыщения и поддерживайте его в течение 5–10 секунд.

Постепенно приложите обратное магнитное поле и запишите напряженность магнитного поля, когда интенсивность намагничивания упадет до нуля, то есть коэрцитивную силу (H_c), в кА/м.

Каждый образец измерялся 3 раза, и за среднее значение принималось отклонение $\leq 2\%$.

Запишите номер образца, массу, значение H_c и условия испытания (температуру, влажность, модель прибора).

7.4 Обработка данных

Среднее значение трех измеренных значений для каждого образца было рассчитано как окончательное значение H_c .

Если значение H_c одной и той же партии образцов колеблется более чем на 10% (например, YG8 изменяется с 15 кА/м до 25 кА/м), это указывает на неравномерное спекание и требует дополнительных испытаний.

на основе эмпирической формулы $H_c \approx k/d$ (k — константа, d — размер зерна). Например, $H_c = 30 \text{ кА/м}$ соответствует размеру зерна около 0,2–0,5 мкм.

8 результатов Выражение

Значение коэрцитивной силы измеряется в кА/м с точностью до одной десятой (например, 15,2 кА/м).

Отчет об испытаниях должен включать:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

а) номер образца; б) значение коэрцитивной силы (H_c); в) условия испытаний (температура, влажность); г) модель прибора и статус калибровки; д) если значение H_c отклоняется от целевого значения на $\geq \pm 5\%$ (например, целевое значение YG6 18 кА/м, измеренное $< 17,1$ или $> 18,9$ кА/м), следует объяснить возможные причины (например, аномалии η -фазы или зерен).

9. Точность и предвзятость

9.1 Точность

Значение H_c при повторном измерении одного и того же образца одним и тем же оператором и на одном и том же оборудовании в течение короткого периода времени составляет менее 2%.

Воспроизводимость: Отклонение значений H_c , измеренных разными лабораториями, разными операторами и разным оборудованием, составляет $< 5\%$.

9.2 Предвзятость

Погрешность калибровки прибора: ± 1 кА/м.

Неоднородность образца: Неоднородность состава или размера зерна приводит к колебаниям H_c на 5–10%.

Влияние окружающей среды: Сильные магнитные поля ($> 0,1$ мТл) вызывают отклонения $H_c > 2\%$.

10 Факторов Влияния

10.1 Размер зерна

Чем меньше размер зерна, тем выше коэрцитивная сила. Мелкозернистый твердый сплав (размер зерна 0,2 мкм) H_c составляет 30–40 кА/м, а крупнозернистый твердый сплав (размер зерна 5 мкм) H_c составляет 5–10 кА/м.

10.2 Содержание кобальта

Увеличение содержания кобальта (с 6% до 15%) облегчает переворот намагниченности кобальтовой фазы, и H_c немного уменьшается (на 10–15%).

10.3 Образование равновесной

η -фазы углерода ($Co \rightleftharpoons W \rightleftharpoons C$) приводит к снижению H_c на 5–10% (например, YG8 снижается с 15 кА/м до 13 кА/м), а влияние свободного углерода (C) составляет $< 2\%$.

10.4 Процесс спекания

Высокая температура ($> 1500^\circ C$) приводит к укрупнению зерен и снижению H_c с 20 кА/м до 8 кА/м.

Горячее изостатическое прессование (ГИП, 150 МПа, $1350^\circ C$) улучшает микроструктурную однородность и H_c увеличивается на 5–10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.5 Дефектная

пористость $> 0,1\%$ или остаточное напряжение (> 100 МПа) приводит к колебаниям Нс на 10–15%, и плотность необходимо оптимизировать ($> 99,5\%$).

10.6 Факторы окружающей среды

Высокая температура (800°C) снижает Нс на 5-8% (например, у YG10 он падает с 18 кА/м до 16 кА/м).

Влажное тепло (40°C , влажность 90%) влияет на $<2\%$.

11. Применение результатов испытаний

11.1 Классификация производительности

Нс >25 кА/м: подходит для инструментов высокой твердости (например, сверл для печатных плат, HRA >92 , срок службы >4 часов).

Нс <10 кА/м: подходит для форм с высокой прочностью (например, горнодобывающие буровые коронки, KIC >15 МПа·м^{1/2}, срок службы >200 часов).

11.2 Оптимизация процесса Аномальный

Нс (колебание $> 10\%$) указывает на крупные зерна или неравномерное спекание. Температура спекания ($1350-1450^{\circ}\text{C}$) может быть скорректирована или могут быть добавлены ингибиторы зерна (например, VC 0,2-0,5 вес. %).

11.3 Обнаружение дефектов Уменьшение Нс на 5–10 %

(например, YG8 с 15 кА/м до 13 кА/м) может быть обусловлено η-фазой, и необходимо отрегулировать содержание углерода (целевое значение $6,0 \pm 0,2$ мас. %).

11.4 Примеры применения

При резке авиационной стали (скорость резки 250 м/мин) инструмент, содержащий 10% Со, выдержал испытание Нс (18 кА/м), обеспечив твердость HRA 90 и ударопрочность, а срок службы инструмента достиг 3,5 часов.

12 Заметок

12.1 Калибровка прибора

Перед тестированием откалибруйте прибор с погрешностью $\leq \pm 1\%$, чтобы избежать систематического отклонения.

12.2 Однородность образцов

Образцы не должны иметь трещин (<5 мкм), пор ($<0,05\%$), отклонения состава $<0,1\%$ по весу и колебания размера зерна $<5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.3 Контроль окружающей среды

В зоне испытаний отсутствует сильное магнитное поле ($<0,1$ мТл), температура составляет $20-25^{\circ}\text{C}$, а влажность $<60\%$.

12.4 Комплексная проверка

Если значение H_c ненормальное (отклонение $> 5\%$), осмотрите границы зерен с помощью металлографического микроскопа (увеличение $500\times$) или используйте ICP для измерения содержания кобальта (точность $\pm 0,05$ мас.%).

13 Отчет об испытаниях

Отчет об испытаниях должен включать следующее:

Стандартный номер: GB/T 3850;

Описание образца: марка, партия, размер;

Условия испытаний: температура, влажность, помехи магнитного поля;

Информация о приборе: модель, статус калибровки;

Результаты испытаний: значение коэрцитивной силы (H_c , кА/м), анализ отклонений;

Описание отклонения: Если отклонение значения H_c составляет $>5\%$, объясните возможную причину;

Дата теста: например, 21 мая 2025 г.;

Тестирующий: Подпись.

14 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные значения коэрцитивной силы

Таблица А.1 Значения коэрцитивной силы обычных марок твердого сплава

Бренд	Содержание кобальта (мас.%)	Размер зерна (мкм)	Коэрцитивная сила (кА/м)
YG6	6	1-2	15-20
YG8	8	2-3	10-15
YG10	10	2-4	8-12
Нано сплав	8	0,05-0,2	50-60

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Погрешность прибора

± 1 кА/м.

В.2 Неоднородность образца Неоднородный

состав или размер зерна приводит к колебаниям H_c на $5-10\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

В.3 Влияние окружающей среды

Сильное магнитное поле (>0,1 мТл) вызывает отклонение Нс>2%.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать высокоточный вибрационный магнитометр (VSM) с погрешностью ±0,1 кА/м.

С.2 Использовать искусственный интеллект (ИИ) для анализа данных Нс и прогнозирования размера зерна и дефектов с точностью >90%. С.3 Внедрить оборудование для испытания коэрцитивности при высоких температурах (поддерживающие испытания при 800-1000°C) для оценки высокотемпературных характеристик. С.4 Объединить инфракрасную спектроскопию для мониторинга атмосферы спекания, динамической регулировки параметров спекания и снижения колебаний Нс (<2%).

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний коэрцитивности твердого сплава YG8

Номер образца	Масса (г)	Значение измерения Нс (кА/м)	Средний Нс (кА/м)	Нс отклонение(%)
YG8-001	5.02	14.8, 15.0, 14.9	14.9	1.3
YG8-002	5.05	15.1, 15.3, 15.0	15.1	1.9
YG8-003	4.98	14.7, 14.9, 14.8	14.8	1.3

Приложение E Данные о воздействии на окружающую среду

Изменения значения Нс в различных условиях окружающей среды

Условия окружающей среды	Нс (кА/м)	изменять(%)
Стандарт (25°C, влажность 50%)	15.0	-
Высокая температура (800°C)	13.8	-8.0
Влажное тепло (40°C, влажность 90%)	14.7	-2.0

GB/T 3848 Определение содержания кобальта в твердом сплаве

1 Область применения

В настоящем стандарте описывается метод определения содержания кобальта (Co) в твердом сплаве. Этот метод применим к материалам и изделиям из твердого сплава (таким как марки YG6, YG8 и т. д.) с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом в качестве связующей фазы. Весовой процент (wt %) кобальта определяется химическим анализом или инструментальным анализом. Этот метод может использоваться для контроля качества в процессе производства, приемки продукции и анализа компонентов в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на твердые сплавы, не содержащие кобальта

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(например, твердые сплавы на основе никеля или железа), а также на материалы, содержащие другие значительные мешающие элементы.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 3849 Метод испытания магнитных свойств твердого сплава

GB/T 223.1 Методы химического анализа стали и сплавов

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

ISO 3909:1976 Определение содержания кобальта в твердых сплавах. Потенциометрический метод

Стандартный метод испытаний ASTM E1019 – Анализ химического состава сплавов

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Содержание кобальта:

Массовая доля (мас. %) кобальта в твердом сплаве, рассчитанная по общей массе, отражает долю связующей фазы.

3.2 Твердый сплав — это композиционный материал, изготовленный из карбида вольфрама (WC)

в качестве твердой фазы и кобальта (Co) в качестве связующей фазы с помощью процесса порошковой металлургии.

3.3 η -фаза (эта-фаза)

— хрупкая фаза, образующаяся в твердом сплаве из-за недостаточного содержания углерода. Ее химическая формула — $\text{Co}_3\text{W}_2\text{C}$, что может помешать определению содержания кобальта.

3.4 Свободный углерод

Углерод, выделившийся из твердого сплава из-за чрезмерного содержания углерода, может повлиять на результаты анализа.

3.5 Потенциометрическое титрование — это

метод титрования, при котором для измерения изменения потенциала раствора с целью определения конечной точки используются электроды.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4 Принцип

Принцип определения содержания кобальта в твердом сплаве основан на химическом разложении и количественном анализе. Образец разлагается кислотой или расплавом для преобразования кобальта в растворимое соединение (такое как хлорид кобальта), а затем его содержание определяется гравиметрическим методом, потенциометрическим титрованием или спектроскопическим анализом. Метод потенциометрического титрования использует стабильный комплекс, образованный кобальтом и ЭДТА (этилендиаминтетрауксусной кислотой), для определения конечной точки по изменению потенциала; метод спектроскопического анализа (такой как атомно-абсорбционная спектроскопия или эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой) основан на характерном спектре поглощения или испускания кобальта для количественного определения. η-фаза или свободный углерод могут мешать определению и должны быть удалены предварительной обработкой.

5. Инструменты и оборудование

5.1 Аналитические весы

с точностью измерения $\pm 0,0001$ г, используемые для взвешивания образцов и реагентов.

5.2 Потенциометрический титратор,

оснащенный стеклянным электродом и электродом сравнения, с точностью $\pm 0,1$ мВ, подходящий для потенциометрического титрования.

Для определения содержания кобальта использовали **атомно-абсорбционный спектрометр (ААС)** с длиной волны 240,7 нм и пределом обнаружения 0,01 мкг/мл.

5.4 Предел обнаружения оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ИСП-ОЭС)

составляет 0,001 мкг/мл, что подходит для многоэлементного анализа.

5.5 Диапазон регулирования температуры водяной бани постоянной температуры составляет 20–100 °C с точностью ± 1 °C.

5.6 Для разложения проб используют нагревательную плиту или электрическую печь с диапазоном температур 100–600 °C.

5.7 Установки кислотной дистилляции

используются для удаления мешающих элементов (таких как мышьяк и сурьма).

5.8 Вместимость пипеток и мерных колб

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

составляет 5 мл, 10 мл, 25 мл и 100 мл с точностью $\pm 0,1$ мл.

6 Реагентов

6.1 Азотная кислота (HNO_3)

высокой чистоты, концентрация 65%-68%.

6.2 Соляная кислота (HCl)

высокой чистоты, концентрация 36%-38%.

6.3 Серная кислота (H_2SO_4) имеет

высокую чистоту, ее концентрация составляет 95%-98 %.

6.4

Концентрация стандартного раствора ЭДТА составляет 0,01 моль/л, использовать после калибровки.

6.5 Буферный раствор

pH 5,0-6,0, содержащий ацетат аммония и аммиак.

Для определения конечной точки титрования используют такие индикаторы , как ксиленоловый оранжевый.

6.7 Деионизированная вода

соответствует стандарту качества воды GB/T 6682 Grade 1.

7 образцов

7.1 Требования к образцам

Форма: Образец представляет собой порошок, гранулы или мелкие кусочки массой 0,2–0,5 г.

Однородность: отклонение состава $< 0,1$ мас.%, колебание размера зерна $< 5\%$.

Состояние поверхности: Без масляного или оксидного слоя, при необходимости очистите этанолом.

7.2 Подготовка образца

Возьмите репрезентативный образец из заготовки из твердого сплава или готового изделия и измельчите его до размера частиц $< 0,1$ мм.

После выдерживания в эксикаторе при постоянной температуре (105°C , 1 ч) образец охлаждали до комнатной температуры и взвешивали ($\pm 0,0001$ г).

Для обеспечения репрезентативности результатов отберите 3–5 параллельных образцов из каждой партии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 методов испытаний

8.1 Потенциометрическое титрование

8.1.1 Разложение образца

Взвесьте 0,2 г образца и поместите его в стакан объемом 250 мл.
Добавьте 10 мл азотной кислоты и 5 мл серной кислоты, нагрейте почти досуха и охладите.
Добавьте 20 мл соляной кислоты, нагрейте до растворения остатка, затем охладите и разбавьте до 100 мл.

8.1.2 Этапы титрования

Возьмите 10 мл раствора, добавьте буферный раствор (pH 5,5) и индикатор лютеолин.
Титруйте стандартным раствором ЭДТА 0,01 моль/л и запишите потенциальное изменение до конечной точки.

Формула расчета:

$$\text{钴含量 (wt\%)} = \frac{C \times V \times M \times 58.93 \times 100}{m \times 1000}$$

8.1.3 Холостая проба

Проведите холостой тест, следуя тем же шагам, и вычитите значение холостого опыта.

8.2 Атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС)

8.2.1 Разложение образца

Взвесьте 0,1 г образца, добавьте 5 мл азотной кислоты и 2 мл соляной кислоты и нагрейте до растворения.

После охлаждения объем довели до 50 мл и фильтровали через мембранный фильтр 0,45 мкм.

8.2.2 Этапы измерения

Настройте длину волны прибора на 240,7 нм и начните работу.

Концентрацию кобальта определяли стандартным серийным методом в диапазоне 0,1–10 мкг/мл.

Формула расчета:

$$\text{钴含量 (wt\%)} = \frac{C \times V \times 100}{m \times 1000}$$

8.2.3 Устранение помех

Если присутствуют помехи от железа или никеля, добавьте антиинтерференционный агент (например, соль лантана).

8.3 Оптическая эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ICP-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

OES)

8.3.1 Разложение образца

Взвесьте 0,1 г образца, добавьте 5 мл азотной кислоты и 1 мл перекиси водорода и разложите в микроволновой печи.

После охлаждения разбавьте до 50 мл и профильтруйте для дальнейшего использования.

8.3.2 Этапы измерения

Установите длину волны 228,616 нм и откалибруйте прибор.

Концентрацию кобальта определяли методом стандартной кривой с пределом обнаружения 0,001 мкг/мл.

Формула расчета та же, что и в 8.2.2.

8.3.3 Устранение помех

Если присутствуют помехи от вольфрамового излучения, отрегулируйте параметры коррекции фона.

9 Результаты Выражение

Содержание кобальта выражается в % по массе с двумя знаками после запятой (например, 6,25%).

Отчет об испытаниях должен включать:

a) Номер стандарта: GB/T 3848; b) Описание образца: марка, партия, качество; c) Метод испытания: потенциометрическое титрование, ААС или ИСП-ОЭС; d) Результат: содержание кобальта и отклонение; e) Условия испытания: температура, влажность; f) Модель прибора и статус калибровки; g) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.; h) Испытатель: подпись.

10. Точность и предвзятость

10.1 Точность

Повторяемость: Отклонение содержания кобальта, измеренного одним и тем же оператором, на одном и том же оборудовании и в течение короткого периода времени, составляет <0,2%.

Воспроизводимость: Отклонение содержания кобальта, измеренного разными лабораториями и разными операторами, составляет <0,5%.

10.2 Предвзятость

Погрешность прибора: ААС $\pm 0,01$ мкг/мл, ИСП-ОЭС $\pm 0,001$ мкг/мл.

Неоднородность образца: Отклонение состава >0,1 мас. % приводит к колебанию результата на 0,3–0,5%.

Мешающие элементы: смещение может достигать 1-2%, если η -фаза или свободный углерод не удалены.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11 Факторов Влияния

11.1 Неполное разложение пробы (например, остатков вольфрама) может привести к занижению содержания кобальта на 0,5–1%.

11.2 Мешающие элементы

Железо (>5%) и никель (>2%) могут мешать определению методом ААС и требуют предварительного разделения.

11.3 Слишком высокая концентрация кислоты

Кислотность ($\text{pH} < 2$) приводит к смещению конечной точки титрования ЭДТА на 0,1–0,3%.

11.4 Условия окружающей среды

Высокая температура (>40°C) или влажность (>70%) вызывают испарение раствора с отклонением <0,2%.

12. Применение результатов испытаний

12.1 Контроль качества

Убедитесь, что содержание кобальта соответствует проектным требованиям, например, целевому показателю $\text{YG6 } 6 \pm 0,2\%$.

12.2 Оптимизация процесса

Низкое содержание кобальта указывает на недостаточность ингредиентов, тогда как высокое содержание кобальта указывает на избыток связующей фазы.

12.3 Прогнозирование свойств

Содержание кобальта 6–10 % соответствует высокой твердости (HRA 90–92), 10–15 % соответствует высокой ударной вязкости ($\text{KIC } 12\text{--}15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

12.4 Пример

При производстве режущих инструментов сплав YG8 с содержанием кобальта 8,1% обеспечивает твердость HRA 91 и срок службы >3 часов.

13 Заметок

13.1 Прибор должен быть откалиброван

с использованием стандартного образца кобальта с погрешностью $\leq \pm 0,1\%$.

13.2 Однородность образцов

Убедитесь, что образцы не имеют трещин, пор и имеют однородный состав.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

13.3 Температура в помещении для испытаний поддерживается на уровне 20–25 °C, а влажность <60%.

13.4 Меры предосторожности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы избежать брызг кислоты.

14 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А. Типичные значения содержания кобальта

Таблица А.1 Содержание кобальта в обычных марках твердого сплава

Бренд	Содержание кобальта (мас.%)	Твердость (HRA)	Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})
YG6	6,0±0,2	90-91	10-12
YG8	8,0±0,2	89-90	12-14
YG10	10,0±0,3	88-89	14-16

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Погрешность прибора:

AAS ±0,01 мкг/мл, ИСП-ОЭС ±0,001 мкг/мл.

В.2 Операционная ошибка

Отклонение оценки конечной точки титрования составляет 0,1–0,2%.

В.3 Влияние окружающей среды

Влажность>70% вызывает отклонение результата на 0,2%.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать микроволновое разложение для повышения эффективности разложения и снижения остатков вольфрама.

С.2 Использовать ICP-MS для повышения чувствительности обнаружения с пределом обнаружения <0,0001 мкг/мл. С.3 Внедрить автоматизированную систему титрования для снижения человеческих ошибок.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний содержания кобальта в твердом сплаве YG8

Номер образца	Масса(г)	Содержание кобальта (мас.%)	Среднее значение (% масс.)	отклонение(%)
YG8-001	0.201	8.05, 8.10	8.08	0,37
YG8-002	0,203	8.00, 8.03	8.02	0,25

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

Номер образца	Масса(г)	Содержание кобальта (мас.%)	Среднее значение масс.)	(% отклонение(%))
YG8-003	0,202	8.12, 8.09	8.11	0,37

Приложение Е Влияние элементов помех

Таблица Е.1 Влияние различных мешающих элементов на определение содержания кобальта

干扰元素	含量 (wt%)	偏差 (wt%)	消除方法
铁	5	0.5	加入钨盐
镍	2	0.3	预分离
钨	10	1.0	微波消解

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



ISO 3909:1976

Определение содержания кобальта в твердом сплаве - потенциометрический метод

1 Область применения

Настоящий международный стандарт устанавливает метод определения содержания кобальта (Co) в твердом сплаве потенциометрическим методом. Этот метод применим к порошковым смесям карбида и связующего металла без смазки, предварительно спеченному или спеченному твердому сплаву всех марок с содержанием кобальта более 1% (массовая доля, м/м). Этот метод может быть использован для контроля качества при производстве твердого сплава, приемки продукции и анализа состава в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на твердые сплавы с содержанием кобальта менее 1% или материалы, содержащие значительные мешающие элементы (например, высокое содержание железа и никеля).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

ISO 5725 Методы испытаний на точность (правильность и достоверность) и оценка результатов

ISO 11873 Твердый сплав - Терминология

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Содержание кобальта:

Массовая доля кобальта в твердом сплаве (м/м) в расчете на общую массу отражает долю связующей фазы.

3.2 Твердый сплав — это композиционный материал, изготовленный из карбида вольфрама (WC)

в качестве твердой фазы и кобальта (Co) в качестве связующей фазы с помощью процесса порошковой металлургии.

3.3 η -фаза (эта-фаза)

— хрупкая фаза, образующаяся в твердом сплаве из-за недостаточного содержания углерода. Ее химическая формула — $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, что может помешать определению содержания кобальта.

3.4 Свободный углерод:

Углерод, выделившийся из цементированного карбида из-за чрезмерного содержания углерода, может повлиять на результаты анализа.

3.5 Потенциометрическое титрование — это

метод определения конечной точки титрования путем измерения изменения потенциала раствора.

4 Принцип

Этот метод растворяет кобальт в образце цементированного карбида в растворимое соединение (такое как хлорид кобальта) путем кислотного разложения, а затем определяет содержание кобальта путем потенциометрического титрования. После разложения образца кислотой ионы кобальта (Co^{2+}) в растворе образуют стабильный комплекс с этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА), и конечная точка определяется потенциометрическим титрованием. Потенциометрическое титрование использует электроды (обычно стеклянные электроды и электроды сравнения) для отслеживания внезапного скачка потенциала раствора для определения конечной точки. η -фаза или свободный углерод могут мешать определению и должны быть удалены путем предварительной обработки (такой как кислотная дистилляция или фильтрация).

5 Элементы помех

5.1 Железо (Fe)

Если содержание железа составляет $>5\%$ (м/м), оно может образовывать комплекс с ЭДТА, мешая титрованию кобальта, и его необходимо удалить путем предварительного разделения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(например, ионного обмена).

5.2 Никель (Ni)

Если содержание никеля составляет $>2\%$ (м/м), оно может повлиять на конечную точку потенциометрического титрования и должно быть устранено путем предварительного разделения или добавления маскирующего агента (например, аммиачной воды).

5.3 Вольфрам (W)

Вольфрам может образовывать осадки (например, вольфрамовую кислоту), которые мешают осветлению раствора и должны быть удалены путем тщательного растворения и фильтрации.

5.4 Фаза η и свободный углерод

Фаза η может привести к недооценке содержания кобальта, а свободный углерод может адсорбировать ионы кобальта и требует предварительной обработки путем спекания или кислотной дистилляции.

6 Реагентов

6.1 Азотная кислота (HNO_3) аналитической

чистоты, концентрация 65%-68%.

6.2 Соляная кислота (HCl)

аналитической чистоты, концентрация 36%-38%.

6.3 Серная кислота (H_2SO_4)

аналитической чистоты, концентрация 95%-98%.

6.4 Концентрация стандартного раствора ЭДТА

составляет 0,01 моль/л, и перед использованием его следует откалибровать с помощью стандартного раствора цинка.

6.5 Буферный раствор

pH 5,0-6,0, содержащий ацетат аммония и аммиак.

6.6 Индикатор (вспомогательный)

Ксиленоловый оранжевый, используемый для наблюдения за конечной точкой титрования (необязательно).

6.7 Удельное сопротивление деионизированной воды $\geq 18 \text{ МОм} \cdot \text{см}$.

7 Инструменты и оборудование

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1 Для взвешивания образцов и реактивов используют **аналитические весы с точностью измерения $\pm 0,0001$ г.**

7.2 Потенциометрический титратор

оснащен стеклянным электродом и электродом сравнения (например, электродом Ag/AgCl) с точностью $\pm 0,1$ мВ.

7.3 Для разложения проб используют **нагревательную плиту или электрическую печь** с диапазоном температур 100–600 °С.

7.4 Диапазон регулирования температуры **водяной бани постоянной температуры** составляет 20–100 °С с точностью ± 1 °С.

7.5 Аппарат для кислотной дистилляции

используется для удаления мешающих элементов (таких как мышьяк и сурьма).

7.6 Вместимость пипеток и мерных колб

составляет 5 мл, 10 мл, 25 мл и 100 мл с точностью $\pm 0,1$ мл.

7.7 Фильтрующее устройство

с фильтрующей мембраной 0,45 мкм для фильтрации растворов.

8. Образцы

8.1 Требования к образцам

Форма: Образец представляет собой порошок, гранулы или мелкие кусочки массой 0,2–0,5 г.

Однородность: отклонение состава $< 0,1\%$ (м/м), колебание размера зерна $< 5\%$.

Состояние поверхности: Без масляного или оксидного слоя, при необходимости очистите этанолом.

8.2 Подготовка образца

Возьмите репрезентативный образец из заготовки из твердого сплава или готового изделия и измельчите его до размера частиц $< 0,1$ мм.

Высушите при температуре 105 °С в течение 1 ч, охладите до комнатной температуры и взвесьте ($\pm 0,0001$ г).

Для обеспечения репрезентативности результатов отберите 3–5 параллельных образцов из каждой партии.

9 этапов теста

9.1 Разложение образца

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Взвесьте 0,2 г образца ($\pm 0,0001$ г) и поместите его в стакан объемом 250 мл.

Добавьте 10 мл азотной кислоты и 5 мл серной кислоты, нагрейте на горячей плитке (200–250 °C) почти досуха и охладите.

Добавьте 20 мл соляной кислоты и продолжайте нагревать (150°C) до полного растворения остатка, затем охладите.

Разбавьте деионизированной водой до 100 мл, профильтруйте (фильтрующая мембрана 0,45 мкм) и отставьте в сторону.

9.2 Потенциометрическое титрование

Возьмите 10 мл испытуемого раствора, поместите его в титровальный стаканчик объемом 100 мл и добавьте буферный раствор (pH 5,5).

Добавьте 2–3 капли индикатора лютеолина (по желанию) и наблюдайте за изменением цвета. Контролируйте потенциал с помощью потенциометрического титратора, добавьте 0,01 моль/л стандартного раствора ЭДТА и запишите точку скачка потенциала (конечную точку). Каждый образец измерялся 3 раза и рассчитывалось среднее значение.

9.3 Холостая проба

Проведите холостой тест, следуя той же процедуре, и вычитите холостое значение (обычно <0,05% содержания кобальта).

9.4 Расчет

Содержание кобальта рассчитывается следующим образом:

$$\text{钴含量 (\%)} = \frac{C \times V \times M \times 100}{m \times 1000}$$

В:

- C: EDTA 标准溶液浓度 (mol/L);
- V: 消耗 EDTA 体积 (mL);
- M: 钴摩尔质量 (58,93 g/mol);
- m: 试样质量 (g).

10. Выражение результата

Содержание кобальта выражается в виде массовой доли (%) с двумя десятичными знаками (например, 6,25%).

Отчет об испытаниях должен включать:

- a) Номер стандарта: ISO 3909:1976;
- b) Описание образца: марка, партия, качество;
- c) Условия испытаний: температура, влажность;
- d) Модель прибора и статус калибровки;
- e) Результаты: содержание кобальта и отклонение;
- f) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.;
- g) Испытатель: подпись.

11 Точность и предвзятость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.1 Точность

Повторяемость: Отклонение содержания кобальта, измеренного одним и тем же оператором, на одном и том же оборудовании и в течение короткого периода времени, составляет $<0,2\%$.

Воспроизводимость: Отклонение содержания кобальта, измеренного разными лабораториями и разными операторами, составляет $<0,5\%$.

11.2 Предвзятость

Погрешность прибора: потенциометрический титратор $\pm 0,1$ мВ.

Неоднородность образца: Отклонение состава $> 0,1\%$ (м/м) приводит к колебанию результата на $0,3-0,5\%$.

Мешающие элементы: смещение может достигать $1-2\%$, если η -фаза или свободный углерод не удалены.

12 Факторов Влияния

12.1 Неполное разложение пробы (например, остатков вольфрама) может привести к занижению

содержания кобальта на $0,5-1\%$.

12.2 Мешающие элементы, такие как железо ($>5\%$) и никель ($>2\%$), могут мешать титрованию и требуют предварительного разделения.

12.3 Концентрация кислоты

Слишком высокая кислотность ($\text{pH} < 2$) приводит к смещению конечной точки титрования ЭДТА на $0,1-0,3\%$.

12.4 Условия окружающей среды

Высокая температура ($>40^\circ\text{C}$) или влажность ($>70\%$) вызывают испарение раствора с отклонением $<0,2\%$.

13. Применение результатов испытаний

13.1 Контроль качества

проверяет, соответствует ли содержание кобальта проектным требованиям, например, целевому показателю YG6 $6\pm 0,2\%$.

13.2 Оптимизация процесса

Низкое содержание кобальта указывает на недостаточность ингредиентов, тогда как высокое содержание кобальта указывает на избыток связующей фазы.

13.3 Прогнозирование свойств

Содержание кобальта $6-10\%$ соответствует высокой твердости (HRA 90-92), $10-15\%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

соответствует высокой ударной вязкости (KIC 12–15 МПа·м^{1/2}).

13.4 Пример

При производстве горнодобывающих буровых коронок сплав YG8 с содержанием кобальта 8,05% обеспечивает твердость HRA 90 и срок службы >200 часов.

14 Заметок

14.1 Прибор должен быть откалиброван

с использованием стандартного раствора кобальта с погрешностью ≤±0,1%.

14.2 Однородность образцов

Убедитесь, что образцы не имеют трещин, пор и имеют однородный состав.

14.3 Температура в помещении для испытаний поддерживается на уровне 20–25 °C, а влажность <60%.

14.4 Меры безопасности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы избежать брызг кислоты.

15 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А. Типичные значения содержания кобальта

Таблица А.1 Содержание кобальта в обычных марках твердого сплава

Бренд	Содержание кобальта (% м/м)	Твердость (HRA)	Прочность (KIC, МПа·м ^{1/2})
YG6	6,0±0,2	90-91	10-12
YG8	8,0±0,2	89-90	12-14
YG10	10,0±0,3	88-89	14-16

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Погрешность прибора

Потенциометрический титратор ±0,1 мВ.

В.2 Операционная ошибка

Отклонение оценки конечной точки титрования составляет 0,1–0,2%.

В.3 Воздействие на окружающую среду

Влажность > 70% вызывает отклонение результатов на 0,2%.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать микроволновое разложение для повышения эффективности разложения и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

снижения остатков вольфрама.

С.2 Внедрить автоматизированную систему титрования для снижения человеческого фактора. С.3 Использовать ICP-MS вместо потенциометрического метода с пределом обнаружения <0,0001 мкг/мл.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний содержания кобальта в твердом сплаве YG8

Номер образца	Масса(г)	Содержание кобальта (% м/м)	Среднее значение (% м/м)	отклонение(%)
YG8-001	0.201	8.05, 8.10	8.08	0,37
YG8-002	0,203	8.00, 8.03	8.02	0,25
YG8-003	0,202	8.12, 8.09	8.11	0,37

Приложение E Влияние элементов помех

Таблица E.1 Влияние различных мешающих элементов на определение содержания кобальта

Элементы интерференции	Содержание (% м/м)	Отклонение (% м/м)	Метод исключения
железо	5	0,5	Добавить соль лантана
никель	2	0.3	Предварительное разделение
Вольфрам	10	1.0	Микроволновая обработка

Приложение :

Методы выражения твердости твердого сплава и ее соотношение преобразования

Твердый сплав или цементированный карбид широко используется в таких промышленных областях, как режущие инструменты и пресс-формы, благодаря своей высокой твердости и износостойкости. Его твердость является ключевым показателем производительности. Метод выражения твердости цементированного карбида в основном включает в себя различные стандарты испытаний и единицы, обычно используемые твердость по Виккерсу (HV), твердость по Роквеллу (HRA, HRC), твердость по Кнупу (HK) и т. д. Конкретный выбор зависит от условий испытаний и отраслевой практики. В этой статье подробно представлены метод выражения твердости, принцип испытания, применимые сценарии и соотношение преобразования цементированного карбида, объединяющие данные и стандарты (такие как ISO, ASTM, GB/T) для обеспечения точности и полноты.

Метод определения твердости твердого сплава

Испытание твердости твердого сплава обычно проводится следующими методами, учитывая его высокую твердость и характеристики композитного материала (например, связующая фаза карбид вольфрама WC и кобальт Co):

1. Твёрдость по Виккерсу (HV)

Определение: Определенная нагрузка (например, 10 кгс, 30 кгс) прикладывается к поверхности материала через алмазный четырехугольный пирамидальный индентор (диагональный угол 136°) для измерения диагональной длины отпечатка и расчета значения твердости.

формула :

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

Где F — нагрузка (кгс), а d — средняя диагональная длина отпечатка (мм).

Единица измерения : HV (например, HV10 означает нагрузку 10 кгс).

Применимые сценарии :

Стандартный тест для твердого сплава, широко используемый в ISO 3878, GB/T 7997 (испытание твердости твердого сплава по Виккерсу).

Подходит для материалов высокой твердости (диапазон твердости твердого сплава 1400-2200 HV) и высокой точности.

Применимы различные размеры зерна (например, ультрамелкие зерна <0,5 мкм, средние зерна 12 мкм).

Типичные значения :

YG6 (6% кобальта): ~15001600 HV30.

YG8 (8% кобальта): ~14001500 HV30.

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

Сверхмелкозернистый цементированный карбид: ~18002200 HV30 (ScienceDirect, 2020).

Преимущество :

Применимо к широкому диапазону твердости (50-3000 HV).

Небольшое углубление, подходит для тонких и небольших образцов, высокая точность.

Недостатки : длительное время испытания (для измерения отпечатков требуется микроскоп) и высокие требования к чистоте поверхности.

2. Твёрдость по Роквеллу (HRA)

Определение : Используйте алмазный конический индентор (угол при вершине 120°, радиус наконечника 0,2 мм), приложите общую нагрузку 60 кгс (предварительная нагрузка 10 кгс, основная нагрузка 50 кгс), измерьте разницу глубины отпечатка и рассчитайте твердость.

Формула :

$$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$$

Где h — глубина проникновения (мм).

Подразделение : HRA.

Применимые сценарии :

Экспресс-тестирование твердосплавных инструментов и штампов в соответствии с ISO 3738 и GB/T 230.1.

Подходит для твердого сплава с повышенной твердостью (HRA 8092), обычно используемого на промышленных объектах.

Типичные значения :

YG6: ~8990 HRA.

YG8: ~8889 HRA.

Сверхмелкозернистый цементированный карбид: ~9092 HRA (Sandvik, 2023).

Преимущество :

Тест быстрый, показания прямые, подходит для пакетного тестирования.

Он предъявляет низкие требования к поверхности и прост в эксплуатации.

Недостаток :

Менее точен, чем твердость по Виккерсу, и подходит только для более высоких диапазонов твердости (HRA > 70).

Не подходит для сверхтонких или крошечных образцов.

3. Твердость по Роквеллу (HRC, вторичное использование)

Определение : Для измерения глубины проникновения используйте алмазный конический

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

индентор (такой же, как HRA) с общей нагрузкой 150 кгс.

Применимые сценарии :

Используется для более мягких марок твердого сплава (например, с высоким содержанием кобальта > 15%) или по сравнению с быстрорежущей сталью.

Он реже используется в твердом сплаве, поскольку диапазон твердости HRC (2070) не полностью охватывает высокую твердость твердого сплава (ScienceDirect, 2020).

Типичные значения :

YG15 (15% кобальта): ~6567 HRC.

Преимущества : Широко используется по сравнению с инструментальной сталью и штамповой сталью по твердости.

Недостатки : высокая нагрузка, большое вмятина, не подходит для основных испытаний твердого сплава.

4. Твердость по Кнупу (HK)

Определение : используйте алмазный ромбический индентор (соотношение большой и короткой осей 7:1, углы 172,5° и 130°), приложите небольшую нагрузку (например, 0,51 кгс) и измерьте длину длинной диагонали отпечатка.

формула :

$$HK = \frac{14.229 \cdot F}{d^2}$$

Где F — нагрузка (кгс), а d — длина диагонали отпечатка (мм).

Единица измерения : Гонконг.

Применимые сценарии :

Испытание тонких слоев, покрытий или сверхмелкозернистых структур твердого сплава в соответствии с ASTM E384.

Подходит для анализа твердости небольших площадей или поверхностей (например, карбидных покрытий).

Типичные значения :

YG6:~16001700 HK0.5.

Сверхмелкозернистый цементированный карбид: ~20002300 HK0.5.

преимущество :

Неглубокое углубление, подходит для тонких образцов или покрытий.

Высокое разрешение, подходит для микроиспытаний на твердость.

недостаток :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тест сложный и требует высокоточного микроскопа.
Низкая нагрузка, подверженность дефектам поверхности.

5. Другие методы представления (используются реже)

Твердость по Бринеллю (HB) : используйте твердосплавный шариковый индентор с нагрузкой 3000 кгс, подходящий для карбидов низкой твердости (встречается редко, так как отпечаток слишком большой).

Твёрдость по Шору (HS) : испытание на ударную твёрдость, редко применяемое для твёрдых сплавов из-за его низкой точности.

Твердость по шкале Мооса : твердость цементированного карбида составляет около 8,59 (близко к корунду), этот показатель используется только для научного сравнения и не является точным.

Поддержка данных :

Диапазон твердости карбида: 1400-2200 HV, 8092 HRA (ISO 3878, GB/T 7997).

Типичные марки: YG8 (1400-1500 HV, 8889 HRA), сверхмелкозернистая (1800-2200 HV, 9092 HRA) (Sandvik, 2023).

Соотношение единиц измерения твердости

Испытание твердости твердого сплава использует различные единицы (HV, HRA, HRC, HK), которые необходимо преобразовать в соответствии со стандартной таблицей преобразования или эмпирической формулой. Ниже приведены соотношения преобразования и меры предосторожности:

1. Общие таблицы преобразования

Ниже приведено приблизительное преобразование обычных значений твердости твердого сплава на основе ASTM E140 (таблица преобразования твердости), GB/T 1172 (спецификация преобразования твердости) и отраслевых данных:

ВВ	HRA	ЧРК	Гонконг	Замечание
1200	85.0	~60	~1250	Твердый сплав с низким содержанием кобальта (например, YG15)
1400	87.0	~63	~1450	Твердый сплав общего назначения (например, YG8)
1500	88.0	~65	~1550	Твердый сплав общего назначения (например, YG6)
1600	89.0	~66	~1650	Средне-мелкозернистый цементированный карбид

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ВВ	HRA	ЧРК	Гонконг	Замечание
1800	90,5	~68	~1850	Сверхмелкозернистый цементированный карбид
2000	91,5	~70	~2050	Высокотвердый твердый сплав
2200	92.0	~72	~2250	Твердый сплав высокой твердости

Источник данных :

ASTM E14012b(2023): Таблица перевода твердости.

GB/T 11721999: Китайский стандарт перевода твердости.

Отраслевая практика: Sandvik, данные о твердости карбида Kennametal (Sandvik, 2023).

2. Формула преобразования (эмпирическая формула)

Точное преобразование требует учета свойств материала. Для твердого сплава нет единой формулы из-за его композитной структуры (WC+Co). Ниже приведена часто используемая эмпирическая формула для справки:

HV и HRA :

$$HRA \approx 100 - \frac{4000}{HV}$$

Пример: HV=1500, $HRA \approx 100 - \frac{4000}{1500} \approx 87,3$.

HV и HRC (высокий диапазон твердости твердого сплава):

$$HRC \approx 0.035 \cdot HV + 12$$

Пример: HV=1500, $HRC \approx 0,035 \times 1500 + 12 \approx 64,5$.

HV и НК :

$$НК \approx HV \cdot (1.05 \text{ 至 } 1.10)$$

Пример: HV=1500, $НК \approx 1500 \times 1,07 \approx 1605$.

Уведомление :

Формула пересчета является приблизительной, с погрешностью $\pm 25\%$ из-за разного размера зерен твердого сплава и содержания кобальта.

В диапазоне высокой твердости (HV > 1500) погрешность преобразования HRC велика, поэтому рекомендуется измерять HRA или HV напрямую.

3. Соображения по поводу преобразования

Существенная разница

Твердость твердого сплава зависит от содержания кобальта (5-15%) и размера зерна (0,52 мкм). При переводе необходимо ссылаться на конкретную марку (например, YG6, YG8).

Условия испытаний :

HV: Нагрузка (1030 кгс) влияет на результат и ее необходимо указать (например, HV30).

HRA: Подходит для твердого сплава, HRC ограничен низкими классами твердости.

НК: Низкая нагрузка (0,5 кгс), подходит для микроиспытаний.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Стандартная ссылка : используйте таблицу преобразования ASTM E140 или GB/T 1172, чтобы избежать ошибок эмпирической формулы.

Предпочтительны фактические измерения : преобразование носит исключительно справочный характер, более точным является прямое испытание целевой единицы твердости.

Поддержка данных :

YG8: HV30 $\approx$ 1400, HRA $\approx$ 88, HRC $\approx$ 63 (GB/T 7997).

Сверхмелкозернистый цементированный карбид: HV30 $\approx$ 2000, HRA $\approx$ 91,5 (Sandvik, 2023).

Применение метода испытания твердости твердого сплава

Контроль качества : Испытания на твердость проверяют эксплуатационные характеристики твердых сплавов, таких как YG6 (1500 HV, 89 HRA) для черновой обработки и сверхмелкозернистых (2000 HV, 91 HRA) для чистовой обработки.

Оптимизация процесса : Твердость отражает эффект спекания. Крупные зерна (>2 мкм) снижают твердость, а η -фаза (Co₃W₃C) снижает ударную вязкость (ISO 3326:2013).

Выбор инструмента :

Высокая твердость (HV 1800-2200): подходит для высокоскоростной резки твердых материалов (нержавеющая сталь, титановый сплав).

Средняя твердость (HV 1400-1600): подходит для общей обработки (чугун, сталь).

По сравнению со сверхтвердыми материалами :

Твердый сплав: 1400–2200 HV, ниже, чем у алмаза (8000–10000 HV) и CBN (4500 HV).

Твердый сплав обладает большей прочностью, чем сверхтвердые материалы, и пригоден для ударных нагрузок (Википедия, 2024).

В заключение

Твердость твердого сплава в основном включает:

Твердость по Виккерсу (HV) : 1400-2200 HV, высокая точность, подходит для стандартных испытаний (ISO 3878).

Твердость по Роквеллу (HRA) : 8092 HRA, высокая, широко используется в промышленности (GB/T 230.1).

Твердость по Роквеллу (HRC) : 6570 HRC, ограничено низкими степенями твердости.

Твердость по Кнупу (HK) : 1500-2300 HK, подходит для тонкослойных и микроиспытаний (ASTM E384).

Конверсионное отношение :

HV и HRA: HRA $\approx$ 100 4000/HV.

HV и HRC: HRC $\approx$ $0,035 \times HV + 12$ (высокая твердость приводит к большой погрешности).

HV и HK: HK $\approx$ HV $\times$ 1,051,10.

Рекомендуется использовать таблицы преобразования ASTM E140 и GB/T 1172, а также предпочтительно проводить прямое тестирование целевого устройства.

Испытание твердости карбида является ключом к контролю качества и выбору инструмента.

Соответствующий метод следует выбирать в соответствии с классом (YG6, YG8), размером зерна и требованиями к обработке. Преобразование должно быть осторожным и сочетаться с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

фактическим измерением для обеспечения точности.



Приложение :

Характеристики, факторы влияния, методы испытаний, случаи применения и меры оптимизации различных свойств твердого сплава

Производительность	Функции	Факторы влияния	Метод испытания	Случаи применения	Оптимизационные меры
Твёрдость	Высокая твердость (1400-2200 HV, 8092 HRA), сильная износостойкость, уступающая только сверхтвердым материалам (таким как алмаз 8000 HV). Типичные значения: YG6 (1500 HV30, 89 HRA), YG8 (1400 HV30, 88 HRA), сверхмелкое зерно (2000 HV30, 91 HRA) (Sandvik, 2023). Тенденция: твердость увеличивается экспоненциально с уменьшением размера зерна.	Размер зерна: Ультрамелкое зерно (<0,5 мкм) твердость 1800-2200 HV, среднезернистое (12 мкм) 1400-1600 HV. Содержание кобальта: 6% кобальта имеет высокую твердость, 15% кобальта твердость снижается на 10-15%. Примеси: η-фаза снижает твердость на 5-10%, свободный углерод снижает на 35%. Температура спекания: >1450°C, крупнозернистое, твердость снижается на 10%.	Твердость по Виккерсу (HV30, ISO 3878): нагрузка 30 кгс, индентор в виде алмазной квадратной пирамиды, измерение диагонали отпечатка. Твердость по Роквеллу (HRA, GB/T 230.1): нагрузка 60 кгс, индентор в виде алмазного конуса, измерение глубины отпечатка. Погрешность: ±2% (ASTM E18).	Инструмент YG6 (1500 HV) обрабатывает чугуны со скоростью 150 м/мин и имеет срок службы 2 часа. Инструмент с ультрамелким зерном (2000 HV) обрабатывает нержавеющую сталь со скоростью 300 м/мин и имеет срок службы 3 часа.	Используя ультратонкий порошок (<0,5 мкм), твердость увеличивается до 2000 HV, а износостойкость улучшается на 20%. При контроле содержания кобальта до 68% твердость увеличивается на 510%. Температура спекания составляет 1350-1400°C, что снижает η-фазу (GB/T 3849). Добавление TaC (0,51%) подавляет рост зерна и увеличивает твердость на 5%.
Прочность	Средняя прочность, ударопрочность лучше, чем у сверхтвердых материалов, ниже, чем у быстрорежущей стали, подходит для средне- и высокоскоростной резки. Типичные значения: YG6 (KIC 8 МПа·м ^{1/2}), YG8 (10 МПа·м ^{1/2}), YG15 (12 МПа·м ^{1/2}) (ScienceDirect, 2020). Тенденция: прочность линейно увеличивается с содержанием кобальта.	Содержание кобальта: 6% Co KIC ~8 МПа·м ^{1/2} , 15% Co KIC ~12 МПа·м ^{1/2} . Размер зерна: 12 мкм имеет высокую вязкость, <0,5 мкм имеет 20% снижение вязкости. Дефекты: Пористость > 0,1% имеет 15% снижение вязкости, а η-фаза имеет 10% снижение. Связующая фаза: Неравномерная кобальтовая фаза снижает ударную вязкость на 10%.	Вязкость разрушения (KIC, ASTM E399): образец балки с надрезом по одной кромке (SENB), испытание на изгиб в 3 точках, измерение расширения трещины. Ударная вязкость (GB/T 229): испытание на удар по Шарпи, расчет поглощения энергии. Погрешность: ±5%.	Штампы YG15 (KIC 12 МПа·м ^{1/2}) штампуют стальные пластины с ударной прочностью 100 000 раз. Инструмент YG8 (KIC 10 МПа·м ^{1/2}) обрабатывает сталь с лучшей стойкостью к скалыванию, чем YG6.	При увеличении содержания кобальта до 15% (например, YG15) KIC увеличивается до 12 МПа·м ^{1/2} , а ударная вязкость увеличивается на 30%. При использовании средних зерен (12 мкм) ударная вязкость увеличивается на 15%. Вакуумное спекание + HIP, пористость снижается до <0,01%, а ударная вязкость увеличивается на 10%. Добавление Cr3C2 (0,5%) улучшает однородность фазы кобальта и увеличивает ударную вязкость на 5%.
Прочность на сжатие	Высокая прочность на сжатие (46 ГПа), подходит для высоких нагрузок давления,	Содержание кобальта: 6% кобальта имеет высокую прочность, >15% кобальта	Прочность на сжатие (GB/T 3851): Цилиндрический	Горнодобывающее сверло YG6 (5 ГПа) выдерживает удары	Контролируйте содержание кобальта до 68% и поддерживайте прочность

Производительность	Функции	Факторы влияния	Метод испытания	Случаи применения	Оптимизационные меры
	лучше, чем у быстрорежущей стали (~2 ГПа). Типичные значения: YG6 (5 ГПа), YG8 (4,8 ГПа), ультрамелкое зерно (6 ГПа) (ASTM B406). Тенденция: прочность на сжатие немного увеличивается с уменьшением размера зерна.	имеет 10% падение прочности. Размер зерна: Ультрамелкое зерно (<0,5 мкм) имеет прочность 6 ГПа, среднее зерно (12 мкм) имеет прочность 4,8 ГПа. Дефекты: Пористость >0,1% имеет падение прочности, а свободный углерод имеет падение. Качество спекания: Недожог (<1350°C) имеет плохое сцепление и падение прочности.	образец, одноосное сжатие, измерение максимальной нагрузки. Условия испытания: комнатная температура, скорость нагрузки 0,5 мм/мин. Погрешность: ±3%.	горной породы под высоким давлением и имеет срок службы 100 часов. Ультрамелкозернистая матрица (6 ГПа) используется для штамповки с высокой нагрузкой и устойчива к деформации.	на уровне 56 ГПа. Используйте сверхмелкие зерна (<0,5 мкм), чтобы увеличить прочность до 6 ГПа. Используйте HIP, чтобы уменьшить пористость до <0,01% и увеличить прочность на 10%. Контролируйте содержание углерода (±0,1%), чтобы избежать свободного углерода (GB/T 3849).
Прочность на изгиб	Средняя прочность на изгиб (1,5-2,5 ГПа), подходит для инструментов и форм, выдерживающих изгибающие нагрузки. Типичные значения: YG6 (2 ГПа), YG8 (2,2 ГПа), YG15 (2,5 ГПа) (ASTM B406). Тенденция: прочность на изгиб увеличивается с содержанием кобальта.	Содержание кобальта: 6% кобальта ~2 ГПа, 15% кобальта ~2,5 ГПа. Размер зерна: 12 мкм имеет высокую прочность, <0,5 мкм имеет небольшое снижение прочности на 5%. Дефекты: Пористость и η-фаза снижают прочность на 10-15%. Качество спекания: Неравномерная структура снижает прочность на 10%.	Прочность на изгиб (ASTM B406): образец для 3-точечного изгиба, пролет 20 мм, скорость нагружения 0,5 мм/мин. Условия испытания: комнатная температура. Погрешность: ±4%.	Инструмент YG8 (2,2 ГПа) обрабатывает сталь, обладая хорошей стойкостью к изгибу и излому. Штамп YG15 (2,5 ГПа) штампует автомобильные детали, срок службы составляет 120 000 раз.	Увеличение содержания кобальта до 15% (например, YG15) увеличивает прочность до 2,5 ГПа. При использовании средних зерен (12 мкм) прочность увеличивается на 10%. Использование HIP для снижения пористости увеличивает прочность на 15%. Добавление Cr3C2 (0,51%) для усиления фазы связи увеличивает прочность на 5%.
Предел прочности	Прочность на растяжение низкая (0,5-1,0 ГПа), а цементированный карбид не очень хорош при растягивающих нагрузках. Типичные значения: YG6 (0,7 ГПа), YG8 (0,8 ГПа), YG15 (1,0 ГПа) (ScienceDirect, 2020). Тенденция: прочность на растяжение немного увеличивается с содержанием кобальта.	Содержание кобальта: 6% кобальта ~ 0,7 ГПа, 15% кобальта ~ 1,0 ГПа. Размер зерна: 12 мкм имеет более высокую прочность, <0,5 мкм немного снижает на 5%. Дефекты: Трещины и поры снижают прочность на 20%. Фаза связующего: Неравномерная фаза кобальта снижает прочность на 10%.	Прочность на разрыв (GB/T 228.1): образец на растяжение, осевое растяжение, измерение разрушающей нагрузки. Условия испытания: комнатная температура, скорость 1 мм/мин. Погрешность: ±5%.	Волоочильный волок YG15 (1,0 ГПа) выдерживает растягивающее напряжение и имеет срок службы 50 000 раз. Инструмент YG8 (0,8 ГПа) имеет лучшую стойкость к разрыву при растяжении, чем YG6 во время обработки.	Увеличение содержания кобальта до 15% увеличивает прочность до 1,0 ГПа. При использовании средних зерен (12 мкм) прочность увеличивается на 10%. Оптимизация вакуумного спекания снижает скорость трещинообразования до <0,1%, а прочность увеличивается на 15%. Добавление Ni (35%) или

Производительность	Функции	Факторы влияния	Метод испытания	Случай применения	Оптимизационные меры
					Cr3C2 улучшает ударную вязкость и увеличивает прочность на 5%.
Износостойкость	Отличная износостойкость, срок службы инструмента в 510 раз больше, чем у быстрорежущей стали, подходит для высокоскоростной резки. Типичные значения: YG6 (скорость износа <0,01 мм³/Н·м), сверхмелкое зерно (<0,005 мм³/Н·м) (Sandvik, 2023). Тенденция: износостойкость увеличивается с индексом твердости.	Твердость: 2000 HV Износостойкость лучше 1400 HV (срок службы увеличен в 2 раза). Размер зерна: Ультрамелкое зерно (<0,5 мкм) Скорость износа снижена вдвое. Условия эксплуатации: >800°C или скорость >500 м/мин Износ увеличен. Покрытие: Без покрытия скорость износа в 3 раза выше.	Испытание на износ (ASTM G65): Шлифовальный круг изнашивает образец и измеряет потерю объема. Условия испытания: сухой песок, нагрузка 130 Н. Погрешность: ±5%.	Инструмент YG6 (0,01 мм³/Н·м) для обработки чугуна, срок службы 2 часа. Инструмент с мкм, ультрамелким зерном и покрытием TiN (0,005 мм³/Н·м) для обработки нержавеющей стали, срок службы 4 часа.	Используя сверхмелкие зерна (HV 2000+), скорость износа снижается до <0,005 мм³/Н·м. Нанесение покрытия TiN/Al2O3 (510 мкм, CVD/PVD) увеличивает срок службы в 23 раза. Оптимизация скорости резания (100-300 м/мин) снижает износ. Добавление TaC (0,51%) увеличивает абразивную износостойкость на 10%.
Теплостойкость	Хорошая термостойкость (800-1000°C), лучше, чем у быстрорежущей стали (500-600°C), подходит для высокотемпературной резки. Типичные значения: YG6 (900°C), на основе TiC (1000°C) (ScienceDirect, 2020). Тенденция: термостойкость увеличивается с долей TiC.	Содержание кобальта: >15% Кобальт размягчается при высоких температурах, и красностойкость снижается на 20%. Твердая фаза: TiC и TaC имеют лучшую термостойкость, чем WC (увеличена на 100°C). Покрытие: Термостойкость снижается на 30% без покрытия. Микроструктура: Неравномерная структура имеет плохую термостойкость.	Испытание на красностойкость (GB/T 4340): Нагрейте образец до 800-1000°C и измерьте степень сохранения твердости. Испытание на тепловой удар: Цикл нагрева и охлаждения, оцените трещины. Погрешность: ±5%.	Инструмент YG6 (900°C) для обработки стали, устойчив к высокотемпературному износу. Инструмент с покрытием на основе TiC + Al2O3 (1000°C) для обработки титанового сплава, срок службы 3 часа.	Уменьшение содержания кобальта (<8%) увеличивает красностойкость на 10%. Добавление TiC/TaC (510%) увеличивает термостойкость до 1000°C. Нанесение покрытия Al2O3 (58 мкм) увеличивает теплоизоляцию на 20%. Использование градиентной структуры (поверхностный кобальт <5%) увеличивает высокотемпературные характеристики на 15%.
Коррозионная стойкость	Хорошая коррозионная стойкость, кислото- и щелочестойкость, подходит для влажной обработки или химической среды. Типичные значения: YG6 (скорость коррозии <0,01 мм/год, нейтральный раствор), на	Фаза кобальта: Скорость коррозии кобальта увеличивается в 5 раз в растворе с pH<4, а никель более устойчив к кислотам. Окружающая среда: Коррозия в кислом растворе усиливается.	Испытание на коррозию (ASTM G31): Образец погружают в жидкость для нейтральный/кислый раствор (pH 47) и измеряют потерю массы. Условия испытания: 25°C, 30 дней.	Инструмент YG6 (0,01 мм/год) с охлаждающей жидкостью для влажной резки, срок службы 1000 часов. Форма на основе никеля с покрытием CrN (0,005 мм/год) для	При использовании связующего на основе никеля (Ni 510%) скорость коррозии снижается до <0,005 мм/год. При нанесении покрытия TiN/CrN (510 мкм) коррозионная стойкость

Производительность	Функции	Факторы влияния	Метод испытания	Случай применения	Оптимизационные меры
	основе никеля (<0,005 мм/год) (Википедия, 2024). Тенденция: коррозионная стойкость увеличивается с долей никеля.	Микроструктура: Пористость>0,1% или свободный углерод увеличивает коррозию на 10%. Покрытие: Скорость коррозии в 2 раза выше без покрытия.	Погрешность: ±3%.	кислой среды, срок службы 1 год.	увеличивается в 2 раза. Оптимизация ГИП, пористость <0,01%, а точки коррозии снижаются на 15%. Контролируйте содержание углерода и избегайте свободного углерода (GB/T 3849).

Дополнительные примечания

1. Поддержка данных

Твердость: YG6 (1500 HV30, 89 HRA), сверхмелкое зерно (2000 HV30, 91 HRA) (ISO 3878, GB/T 7997).

Прочность: YG6 (8 МПа·м^{1/2}), YG15 (12 МПа·м^{1/2}) (ScienceDirect, 2020).

Прочность: на сжатие 46 ГПа, на изгиб 1,5–2,5 ГПа (ASTM B406), на растяжение 0,5–1,0 ГПа (ScienceDirect, 2020).

Износостойкость: срок службы инструмента с покрытием увеличивается в 23 раза (Sandvik, 2023).

Термостойкость: термостойкость на основе TiC 1000°C (ScienceDirect, 2020).

Коррозионная стойкость: Скорость коррозии на основе никеля <0,005 мм/год (Википедия, 2024).

2. Взаимодействие влияющих факторов

Зерно и кобальт: Сверхмелкие зерна (<0,5 мкм) повышают твердость и прочность на сжатие, высокое содержание кобальта (1015%) повышает ударную вязкость и прочность на изгиб/растяжение.

Процесс спекания: вакуумное спекание (1350-1400 °C) + горячее изостатическое прессование снижает пористость (<0,01%) и улучшает все свойства (ISO 3326:2013).

Добавки: TaC (0,51%) улучшает твердость и износостойкость, Cr3C2 (0,5%) повышает ударную вязкость и прочность на изгиб, TiC (510%) улучшает термостойкость.

Покрытие: TiN/Al2O3 (510 мкм) улучшает износостойкость и термостойкость, CrN повышает коррозионную стойкость.

3. Стандартная ссылка

Твердость: ISO 3878 (HV), GB/T 230.1 (HRA), ASTM E18.

Прочность: ASTM E399 (KIC), GB/T 229 (удар).

Прочность: GB/T 3851 (сжатие), ASTM B406 (изгиб), GB/T 228.1 (растяжение).

Стойкость к истиранию: ASTM G65.

Термостойкость: GB/T 4340.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Коррозионная стойкость: ASTM G31.

Кобальтовые магниты: GB/T 3849, проверка содержания кобальта и баланса углерода.

В заключение

Свойства твердого сплава (твердость, вязкость, прочность на сжатие/изгиб/растяжение, износостойкость, термостойкость, коррозионная стойкость) определяются размером зерна, содержанием кобальта, добавками, процессом спекания и покрытием:

Твердость: сверхмелкое зерно + низкое содержание кобальта (6%) до 2000 HV, износостойкость повышена на 20%.

Прочность: Высокое содержание кобальта (15%) + среднее зерно, KIC до 12 МПа·м^{1/2}, ударопрочность повышена на 30%.

Прочность на сжатие: ультрамелкое зерно + НР достигает 6 ГПа, что на 10% больше.

Прочность на изгиб: Высокий кобальт + ГИП достигает 2,5 ГПа, что на 25% больше.

Прочность на разрыв: Высокий кобальт + Ni достигает 1,0 ГПа, увеличение на 30%.

Износостойкость: Сверхмелкое зерно + покрытие TiN, скорость износа <0,005 мм³/Н·м, срок службы увеличен в 23 раза.

Термостойкость: TiC/TaC + низкое содержание кобальта, термостойкость 1000°C, увеличение на 20%.

Коррозионная стойкость: покрытие на основе никеля + CrN, скорость коррозии <0,005 мм/год, увеличивается в 2 раза.

Благодаря точному контролю размера зерна, содержания кобальта, параметров спекания и покрытия в сочетании со стандартными испытаниями (например, GB/T 3849) можно оптимизировать эксплуатационные характеристики твердого сплава для соответствия требованиям применения инструментов, форм, горнодобывающей промышленности и т. д.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение :

Соотношение между твердостью и прочностью твердого сплава

Твердый сплав или цементированный карбид широко используется в режущих инструментах, формах и других областях благодаря своей высокой твердости и соответствующей прочности. Твердость и прочность являются двумя ключевыми свойствами цементированного карбида, но между ними существует сложное взаимодействие, на которое влияет микроструктура (например, размер зерна, содержание кобальта), состав и производственный процесс. В этой статье подробно анализируется взаимосвязь между твердостью и прочностью цементированного карбида, включая определение, влияющие факторы, тенденции взаимосвязи, количественные данные, методы испытаний и практическое применение в сочетании со стандартами (такими как ISO, ASTM, GB/T) и отраслевыми данными для обеспечения точного и всеобъемлющего содержания.

1. Определение твердости и прочности

Определение твердости твердого сплава

Твердость твердого сплава указывает на его способность противостоять локальной пластической деформации или царапинам и обычно отражает его износостойкость и стойкость к абразивному износу.

Метод измерения:

Твердость по Виккерсу (HV): ISO 3878, нагрузка 30 кгс, индентор в виде алмазной квадратной пирамиды, измерение диагонали отпечатка (единица: HV30).

Твердость по Роквеллу (HRA): GB/T 230.1, нагрузка 60 кгс, алмазный конусный индентор, измерение глубины вдавливания (единица: HRA).

Типичные значения: YG6 (1500 HV30, 89 HRA), YG8 (1400 HV30, 88 HRA), сверхмелкое зерно (2000 HV30, 91 HRA) (Sandvik, 2023).

Определение прочности твердого сплава

Прочность твердого сплава определяется его способностью противостоять повреждениям, вызванным внешними силами, включая прочность на сжатие, прочность на изгиб и прочность на растяжение.

Метод измерения:

Прочность на сжатие: GB/T 3851, одноосное сжатие цилиндрических образцов, измерение максимальной нагрузки (единица: ГПа).

Прочность на изгиб: ASTM B406, образец для трехточечного изгиба, измерение разрушающей нагрузки (единица измерения: ГПа).

Прочность на растяжение: GB/T 228.1, образец для испытания на осевое растяжение, измерение разрушающей нагрузки (единица измерения: ГПа).

Типичные значения:

Прочность на сжатие: YG6 (5 ГПа), YG8 (4,8 ГПа), ультрамелкое зерно (6 ГПа) (ASTM B406).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Прочность на изгиб: YG6 (2 ГПа), YG8 (2,2 ГПа), YG15 (2,5 ГПа) (ASTM B406).
Прочность на растяжение: YG6 (0,7 ГПа), YG8 (0,8 ГПа), YG15 (1,0 ГПа) (ScienceDirect, 2020).

2. Соотношение между твердостью и прочностью

Твердость и прочность твердого сплава представляют собой не простую линейную зависимость, а сложный компромисс, который в основном проявляется в:

Твердость и прочность на сжатие: Обычно существует положительная корреляция. Твердые сплавы с высокой твердостью (например, сверхмелкие зерна) также имеют высокую прочность на сжатие, поскольку доля твердой фазы (WC) высока, а зерна мелкие.

Твердость и прочность на изгиб/растяжение: Они часто отрицательно или слабо коррелируют. Высокая твердость (например, низкое содержание кобальта, сверхмелкие зерна) обычно сопровождается пониженной вязкостью, что приводит к снижению прочности на изгиб и растяжение.

Ключевые факторы влияния: размер зерна, содержание кобальта и микроструктура (поры, η-фаза) совместно регулируют баланс между твердостью и прочностью.

Количественная оценка тенденций взаимоотношений

Повышенная твердость (например, с 1400 HV до 2000 HV):

Прочность на сжатие: увеличилась на 1020% (например, с 4,8 ГПа до 6 ГПа).

Прочность на изгиб: может уменьшиться на 5–15 % (например, с 2,2 ГПа до 1,8 ГПа).

Прочность на растяжение: уменьшение на 1020% (например, с 0,8 ГПа до 0,6 ГПа).

Причина: Твердые сплавы с высокой твердостью (например, сверхмелкие зерна <0,5 мкм, низкое содержание кобальта 6%) имеют высокую долю твердой фазы, прочную связь между зернами и повышенную устойчивость к сжатию; однако низкое содержание кобальта и мелкое зерно снижают прочность и ослабляют устойчивость к изгибу/растяжению.

Данные, подтверждающие взаимосвязь между твердостью и прочностью твердого сплава

Бренд	Твердость (HV30)	Прочность на сжатие (ГПа)	Прочность на изгиб (ГПа)	Прочность на растяжение (ГПа)
YG6	1500	5.0	2.0	0,7
YG8	1400	4.8	2.2	0.8
YG15	1300	4.5	2.5	1.0
Ультрамелкое зерно	2000	6.0	1.8	0,6

Источник: Sandvik (2023), ScienceDirect (2020), ASTM B406.

3. Основные факторы, влияющие на соотношение твердости и прочности

Размер зерна

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Влияние:

Ультрамелкие зерна (<0,5 мкм): высокая твердость (1800-2200 HV), высокая прочность на сжатие (6 ГПа), но низкая прочность на изгиб/растяжение (1,8 ГПа/0,6 ГПа) из-за пониженной ударной вязкости.

Средний размер кристаллов (12 мкм): средняя твердость (1400–1600 HV), высокая прочность на изгиб/растяжение (2,2–2,5 ГПа/0,8–1,0 ГПа) и хорошая ударная вязкость.

Тенденция: размер зерна уменьшается, твердость и прочность на сжатие увеличиваются, прочность на изгиб/растяжение уменьшается.

Количественная оценка: размер зерна уменьшается с 2 мкм до 0,5 мкм, твердость увеличивается на 20–30 %, прочность на сжатие увеличивается на 10 %, а прочность на изгиб уменьшается на 10 %.

Содержание кобальта

Влияние:

Низкое содержание кобальта (6%): высокая твердость (1500-2000 HV), высокая прочность на сжатие (56 ГПа), но низкая прочность на изгиб/растяжение (2 ГПа/0,7 ГПа) из-за малого количества фазы кобальта и плохой ударной вязкости.

Высокое содержание кобальта (15%): низкая твердость (1300 HV), высокая прочность на изгиб/растяжение (2,5 ГПа/1,0 ГПа) из-за фазы кобальта, повышающей ударную вязкость.

Тенденция: с увеличением содержания кобальта твердость и прочность на сжатие снижаются, а прочность на изгиб/растяжение увеличивается.

Количественная оценка: при увеличении содержания кобальта с 6% до 15% твердость уменьшается на 10–15%, прочность на сжатие уменьшается на 10%, а прочность на изгиб увеличивается на 20%.

Микроструктура

Пористость: Пористость > 0,1% снижает прочность на сжатие на 15% и прочность на изгиб/растяжение на 20%, оказывая небольшое влияние на твердость (<5%).

Фаза η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$): образована недостаточным содержанием углерода, что снижает твердость на 5–10%, прочность на сжатие на 10% и прочность на изгиб/растяжение на 15%.

Свободный углерод: Избыточное осаждение углерода снижает твердость на 35%, прочность на сжатие на 5% и прочность на изгиб/растяжение на 10%.

Количественная оценка: Устранение пористости (горячее изостатическое прессование HIP), прочность на изгиб увеличилась на 15%, прочность на растяжение увеличилась на 20%.

Процесс спекания

Влияние:

Высокотемпературный пережог (>1450°C): крупное зерно, твердость снижена на 10%, прочность на сжатие снижена на 5%, прочность на изгиб/растяжение снижена на 10%.

Недообожженный (<1350°C): плохое сцепление, твердость снижена на 5%, прочность на сжатие/изгиб/растяжение снижена на 10–15%.

ГИП: устраняет пористость, увеличивает прочность на сжатие на 10% и увеличивает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прочность на изгиб/растяжение на 15%.

Тенденция: Оптимизация температуры спекания (1350-1400 °C) и ГИП повышает прочность при меньшем влиянии на твердость.

Добавка

TaC, TiC: увеличивают твердость на 5–10%, прочность на сжатие на 5%, но немного снижают прочность на изгиб/растяжение на 5% (из-за снижения ударной вязкости).

Cr₃C₂: усиливает прочность связи кобальта, увеличивает прочность на изгиб/растяжение на 5–10 % и мало влияет на твердость.

Количественная оценка: Добавление 0,5% TaC увеличивает твердость на 5%, прочность на сжатие на 5% и прочность на изгиб на 3%.

Поддержка данных: ISO 3326:2013 (испытание магнитным кобальтом, обнаружение η-фазы), ASTM B406 (прочность на изгиб), ScienceDirect (2020).

4. Методы и стандарты испытаний

Испытание на твердость:

Твердость по Виккерсу (HV30): ISO 3878, нагрузка 30 кгс, погрешность ±2%. Подходит для всего диапазона твердости твердого сплава (1400-2200 HV).

Твердость по Роквеллу (HRA): GB/T 230.1, нагрузка 60 кгс, погрешность ±1%. Подходит для экспресс-испытаний (8092 HRA).

Испытание на прочность:

Прочность на сжатие: GB/T 3851, цилиндрический образец (диаметр 5 мм), погрешность ±3%.

Измеряет допустимую нагрузку при высоком давлении.

Прочность на изгиб: ASTM B406, 3-точечный изгиб (образец 5×5×25 мм), погрешность ±4%.

Оценить сопротивление разрушению при изгибе.

Прочность на растяжение: GB/T 228.1, образец для испытания на растяжение (диаметр 5 мм), погрешность ±5%. Измерить разрывную способность при растяжении.

Анализ микроструктуры: ISO 4499, металлографический микроскоп для определения размера зерна, пор, η-фазы и помощи в оценке твердости и прочности.

5. Практическое применение соотношения между твердостью и прочностью

Ножи

Высокая твердость, низкая прочность: сверхмелкозернистый твердый сплав (твердость по Виккерсу 2000, прочность на изгиб 1,8 ГПа) используется для высокоскоростной резки нержавеющей стали (скорость 300 м/мин), обладает высокой износостойкостью, но легко скалывается.

Средняя твердость, высокая прочность: YG8 (1400 HV, прочность на изгиб 2,2 ГПа) используется для обработки стали, имеет высокую прочность на изгиб, подходит для резки на средней скорости (150 м/мин) и имеет срок службы 23 часа.

Случай: Сверхмелкозернистые режущие инструменты обладают высокой твердостью и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

могут обрабатывать сталь твердостью 50 HRC, что увеличивает срок их службы на 20%. Однако их прочность на изгиб низкая, поэтому угол резания необходимо оптимизировать.

Форма

Высокая твердость и высокая прочность на сжатие: сверхмелкозернистые формы (2000 HV, прочность на сжатие 6 ГПа) используются для штамповки с высокими нагрузками и устойчивы к деформации, но имеют низкую прочность на растяжение (0,6 ГПа) и не подходят для растягивающихся форм.

Высокая прочность, средняя твердость: YG15 (1300 HV, прочность на изгиб 2,5 ГПа) используется для штамповки автомобильных деталей, устойчив к ударному разрушению и имеет срок службы 120 000 циклов.

Случай: Форма YG15 имеет высокую прочность на изгиб, штампованная стальная пластина не имеет трещин, твердость умеренная, износостойкость соответствует требованиям.

Инструменты для горнодобывающей промышленности

Сбалансированная твердость и прочность: сплав YG6 (1500 HV, прочность на сжатие 5 ГПа, прочность на изгиб 2 ГПа) используется для буровых долот, выдерживающих высокое давление при ударе о горную породу, и имеет срок службы 100 часов.

Случай: Твердость сверхмелкозернистого сверла увеличилась до 2000 HV, а прочность на сжатие составила 6 ГПа, но прочность на изгиб снизилась до 1,8 ГПа, и потребовалась оптимизация для снижения изгибающего напряжения.

6. Меры по оптимизации соотношения твердости и прочности

Оптимизация размера зерна:

Ультрамелкое зерно ($<0,5$ мкм): твердость увеличена до 2000 HV, прочность на сжатие увеличена до 6 ГПа, подходит для инструментов с высокой износостойкостью.

Средний кристалл (12 мкм): прочность на изгиб/растяжение увеличивается до 2,5 ГПа/1,0 ГПа, подходит для форм.

Реализация: Выбрать порошок WC высокой чистоты и контролировать время измельчения в шаровой мельнице (20-30 часов).

Регулирование содержания кобальта:

Низкое содержание кобальта (6%): твердость 1500–2000 HV, прочность на сжатие 56 ГПа, подходит для высокоскоростной резки.

Высокое содержание кобальта (15%): прочность на изгиб/растяжение 2,5 ГПа/1,0 ГПа, подходит для штамповочных штампов.

Реализация: Аккуратно смешайте порошок кобальта ($\pm 0,1\%$) и проверьте с помощью магнитного теста на кобальт (GB/T 3849).

Улучшение процесса спекания:

Вакуумное спекание (1350-1400°C): контролирует рост зерна и увеличивает твердость на 5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Горячее изостатическое прессование (ГИП, 1350°C, 100 МПа): пористость снижена до <0,01%, прочность на изгиб/растяжение увеличена на 15%.

Реализация: Используется оборудование HIP со временем спекания 12 часов.

Аддитивная оптимизация:

TaC (0,51%): твердость увеличена на 5%, прочность на сжатие увеличена на 5%, подходит для износостойких инструментов.

Cr3C2 (0,5%): прочность на изгиб/растяжение увеличена на 510%, подходит для форм.

Реализация: Добавка равномерно диспергируется, а размер частиц контролируется до <1 мкм.

Технология нанесения покрытия:

Покрытие TiN/Al2O3 (510 мкм, CVD/PVD): твердость увеличилась на 10%, износостойкость увеличилась в 23 раза, прочность немного изменилась.

Реализация: Контролируйте толщину покрытия (± 1 мкм), чтобы избежать отслаивания.

Эффект:

Ультрамелкое зерно + низкое содержание кобальта + ГИП: твердость 2000 HV, прочность на сжатие 6 ГПа, срок службы инструмента увеличен на 20%.

Среднекристаллический + высококобальтовый + Cr3C2: прочность на изгиб 2,5 ГПа, прочность на растяжение 1,0 ГПа, срок службы формы увеличен на 30%.

В заключение

Взаимосвязь между твердостью и прочностью твердого сплава сложна:

Положительная корреляция: Твердость и прочность на сжатие обычно положительно коррелируют, а сверхмелкозернистые твердые сплавы с низким содержанием кобальта имеют высокую твердость (2000 HV) и прочность на сжатие (6 ГПа).

Отрицательная корреляция: Твердость отрицательно коррелирует с прочностью на изгиб/растяжение, а высокая твердость (2000 HV) сопровождается снижением прочности на изгиб/растяжение (1,8 ГПа/0,6 ГПа).

Ключевые факторы: размер зерна (0,52 мкм), содержание кобальта (615%), микроструктура и процесс спекания определяют баланс.

Стратегия оптимизации: благодаря сверхмелкому зерну, контролю содержания кобальта, горячему изостатическому прессованию, добавкам и покрытиям можно найти наилучший баланс между высокой твердостью (2000 HV) и высокой прочностью (сопротивление изгибу 2,5 ГПа) для удовлетворения потребностей режущих инструментов, форм и горнодобывающего инструмента.

Поддержка данных:

Твердость: 1500–2000 HV (ISO 3878, GB/T 7997).

Прочность: сжатие 46 ГПа, изгиб 1,52,5 ГПа, растяжение 0,51,0 ГПа (ASTM B406, ScienceDirect, 2020).

Стандарты: ISO 3326:2013, GB/T 3849 (кобальтовый магнитный тест), ISO 4499 (микроструктура).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

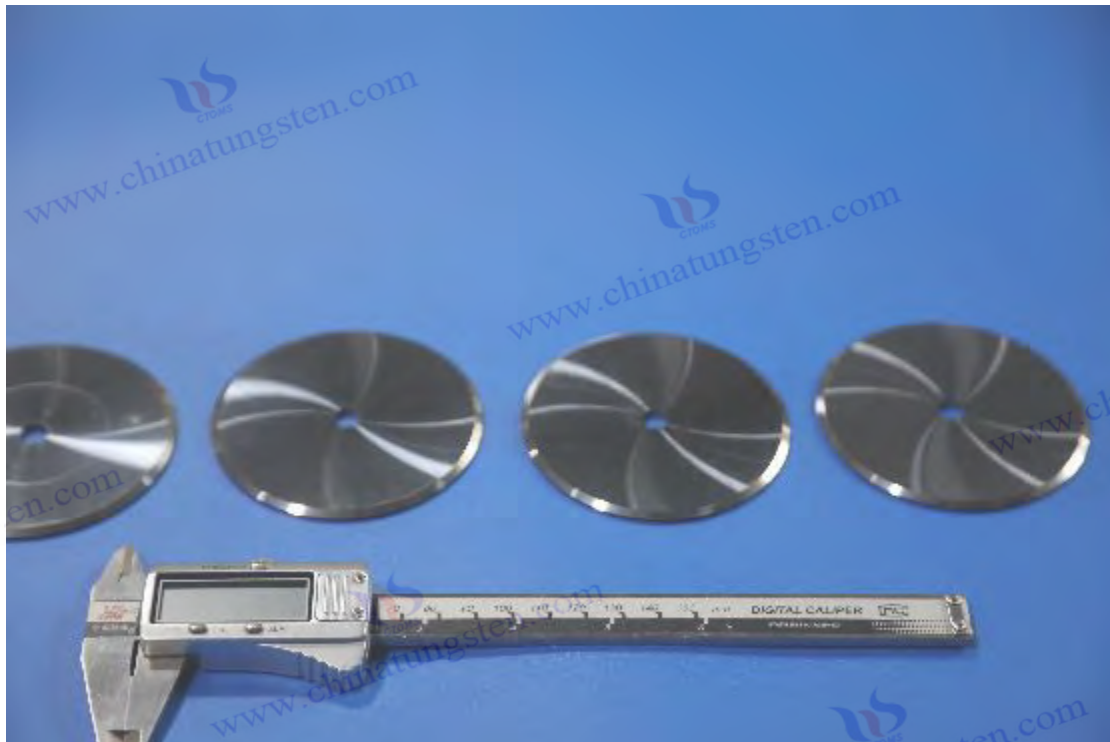
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Приложение :

Как проверяются различные свойства твердого сплава?

Какие эксплуатационные испытания требуют использования испытательных стержней?

Твердый сплав или цементированный карбид широко используется в режущих инструментах, формах и горнодобывающих инструментах из-за его высокой твердости (1400-2200 HV), износостойкости и прочности на изгиб (1,5-2,5 ГПа). Чтобы гарантировать, что его характеристики соответствуют промышленным потребностям, требуется проведение различных испытаний, включая твердость, плотность, прочность на изгиб, ударную вязкость, износостойкость, коррозионную стойкость, микроструктуру и химический состав. Эти испытания обычно соответствуют международным или национальным стандартам (таким как GB/T 3849, ISO 4499, ASTM B406), а некоторые испытания требуют использования стандартных испытательных стержней (испытательных стержней) для обеспечения согласованности и сопоставимости результатов. В этой статье будут подробно описаны методы испытаний различных свойств твердого сплава, необходимое оборудование, необходимость использования испытательных стержней и особые требования к испытательным стержням в сочетании с новейшими исследованиями (например, Sandvik, 2023; ScienceDirect, 2020; Wikipedia, 2024). Вся статья представлена на китайском языке, чтобы гарантировать точность, полноту и увлекательность содержания.

1. Обзор

Целью испытаний производительности твердого сплава является количественная оценка его

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

механических, физических и химических свойств, чтобы гарантировать, что материал соответствует конкретным требованиям применения (таким как срок службы инструмента > 2 часов, ходы штампа > 100 000 раз). Элементы испытаний включают:

Механические свойства : твердость, прочность на изгиб, вязкость разрушения.

Физические свойства : плотность, магнитные свойства.

Химические свойства : коррозионная стойкость, химический состав.

Микроструктура : размер зерна, дефекты (такие как η -фаза, свободный углерод).

Эксплуатационные характеристики : износостойкость, адгезия покрытия.

Некоторые испытания (например, прочность на изгиб и вязкость разрушения) требуют использования стандартных испытательных стержней, поскольку их геометрические размеры и состояние поверхности напрямую влияют на точность испытания. Испытательные стержни должны соответствовать строгим требованиям к размеру, шероховатости поверхности и подготовке для устранения переменных помех. Далее будут подробно описаны методы испытаний, требуемые испытательные стержни и требования к испытательным стержням по одному.

2. Метод испытания производительности твердого сплава

Ниже приведены подробные методы, оборудование, стандарты и информация о том, требуются ли испытательные стержни для общих испытаний эксплуатационных характеристик твердого сплава.

2.1 Испытание на твердость

Определение : Мера сопротивления вдавливанию твердого сплава, обычно выражаемая в твердости по Виккерсу (HV) и находящаяся в диапазоне от 1400 до 2200 HV.

Метод испытания :

Твёрдость по Виккерсу (HV) :

Используйте твердомер по Виккерсу и приложите нагрузку 1030 кгс (например, HV30).

Индентор представляет собой алмазную четырехугольную пирамиду с углом при вершине 136° .

После вдавливания измерьте длину диагонали (мкм) и преобразуйте ее в значение твердости (GB/T 7997).

Шаг :

Поверхность образца была отполирована ($R_a < 0,2$ мкм) для удаления оксидного слоя.

Приложите нагрузку 1030 кгс и удерживайте ее в течение 1015 секунд.

Диагональ отпечатка измерялась с помощью микроскопа и рассчитывалось значение HV (погрешность $< \pm 50$ HV).

Оборудование : твердомер по Виккерсу (например, Wilson VH3100), точность $\pm 0,5\%$.

ли испытательный стержень : Нет.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Испытания на твердость можно проводить на готовых изделиях (например, инструментах, формах) или любых полированных образцах с небольшими требованиями к размеру ($>5 \times 5$ мм).

Примеры результатов :

YG6: HV30 ~1500 HV.

Сверхмелкозернистый цементированный карбид: HV30 ~2000 HV (Sandvik, 2023).

Стандарт : GB/T 7997 (твердость по Виккерсу), ISO 6507, ASTM E92.

2.2 Тест на плотность

Определение : Измеряет отношение массы к объему твердого сплава, отражающее пористость и однородность состава, в диапазоне от 14,0 до 15,0 г/см³.

Метод испытания :

Метод Архимеда :

Используйте высокоточные электронные весы (точность $\pm 0,001$ г) и деионизированную воду. Измерьте сухой вес образца (m_1) и вес в воде (m_2) и рассчитайте плотность $\rho = m_1 / (m_1 - m_2) \times \rho_{\text{воды}}$.

Шаг :

Образцы промывали (этанол) и высушивали (80°C, 30 мин).

Сухой вес и вес в воде измерялись 3 раза, и бралось среднее значение.

С поправкой на влияние температуры воды ($\rho_{\text{воды}} \sim 1,0$ г/см³ при 20°C).

Оборудование : прецизионные весы (например, Mettler Toledo XS205), принадлежности для измерения плотности.

Испытательный стержень : Нет.

Тестирование плотности не имеет требований к форме образца. Блоки, листы или готовые изделия (масса > 1 г) приемлемы.

Примеры результатов :

YG6 (6% Co): 14,9 г/см³.

YG15 (15% Co): 14,0 г/см³ (ScienceDirect, 2020).

Стандарт : GB/T 3850 (плотность), ISO 3369, ASTM B311.

2.3 Прочность на изгиб (прочность на поперечный разрыв, TRS)

Определение : Измеряет сопротивление изгибу твердого сплава в диапазоне от 1,5 до 2,5 ГПа, отражая прочность и дефекты.

Метод испытания :

Испытание на трехточечный изгиб :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Используя универсальную испытательную машину, приложите нагрузку до тех пор, пока образец не разорвется.

Формула: $\sigma = 3FL / (2bh^2)$, F — разрушающая нагрузка (Н), L — опорное расстояние (мм), b и h — ширина и высота испытательного стержня (мм).

Шаг :

Подготовьте стандартные тестовые бруски (см. ниже) и отполируйте поверхность ($Ra < 0,4$ мкм).

Расстояние между опорами составляет 30 мм, а скорость нагрузки — 0,51 мм/мин.

Запишите разрушающую нагрузку и рассчитайте прочность на изгиб (погрешность $< \pm 5\%$).

Оборудование : Универсальная испытательная машина (например, Instron 5982), точность $\pm 0,1$ кН.

Требуется ли тестовая палочка : Да .

Испытания на прочность на изгиб требуют использования стандартных испытательных стержней для обеспечения геометрической последовательности и исключения концентрации напряжений.

Примеры результатов :

YG6: $\sim 2,0$ ГПа.

YG15: $\sim 2,5$ ГПа (Sandvik, 2023).

Стандарт : GB/T 3851 (прочность на изгиб), ISO 3327, ASTM B406.

2.4 Вязкость разрушения (KIC)

Определение : Мера сопротивления твердого сплава росту трещин в диапазоне $812 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Метод испытания :

Метод одностороннего надреза луча (SENB) :

На испытательном стержне предварительно делали надрез (глубиной 0,2–0,3 мм) и прикладывали трехточечную изгибающую нагрузку.

Формула: $KIC = (F\sqrt{a}) / (BW^{3/2}) \times Y$, где F — разрушающая нагрузка, a — глубина надреза, B и W — ширина и высота испытательного стержня, а Y — геометрический фактор.

Шаг :

Подготовьте стандартные испытательные бруски с помощью электроэрозионной или лазерной резки.

Расстояние между опорами составляет 30 мм, а скорость нагрузки — 0,10,5 мм/мин.

Измерялись разрушающая нагрузка и глубина надреза, а также рассчитывался KIC (погрешность $< \pm 10\%$).

Оборудование : универсальная испытательная машина, микроскоп (измерение надреза, точность $\pm 0,01$ мм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Требуется ли тестовая палочка : Да .

Для испытания на вязкость разрушения требуется стандартный испытательный стержень, чтобы гарантировать однородность надреза и равномерное распределение напряжений.

Примеры результатов :

YG6: KIC $\sim 8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

YG15: KIC $\sim 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (ScienceDirect, 2020).

Стандарты : ISO 28079 (вязкость разрушения), ASTM E399.

2.5 Испытание на износостойкость

Определение : Измеряет износостойкость твердого сплава и отражает срок его службы.

Метод испытания :

Испытание на абразивный износ (ASTM B611) :

с помощью шлифовального круга (Al_2O_3 , размер частиц 60-100 мкм) и регистрировали потерю массы (мг).

Условия: нагрузка 1020 Н, скорость 200-300 об/мин, время 30-60 мин.

Испытание на износ штифта к диску (ASTM G99) :

Образец (штифт) трется о вращающийся диск (стальной или керамический) и измеряется объем износа (мм^3).

Шаг :

Образцы были отполированы ($R_a < 0,2 \text{ мкм}$) и очищены (этанол).

Установите нагрузку, скорость и время и запишите потерю массы/объема.

Рассчитайте скорость износа (погрешность $\leq \pm 5\%$).

Оборудование : Машина для испытания на абразивный износ (например, Taber Abraser), испытательная машина для испытания на износ штифта на диске.

ли испытательный стержень : Нет.

Испытание на стойкость к истиранию можно проводить с использованием блочных или готовых образцов ($> 10 \times 10 \text{ мм}$), но состояние поверхности должно быть однородным.

Примеры результатов :

YG6: Скорость износа $\sim 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$.

YN10 (на основе никеля): скорость износа $\sim 0,008 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ (Википедия, 2024).

Стандарты : ASTM B611 (истирание), ASTM G99 (штифт-диск), GB/T 12444.

2.6 Испытание на коррозионную стойкость

Определение : Мера устойчивости твердого сплава к химической коррозии со скоростью коррозии $< 0,01 \text{ мм/год}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Метод испытания :

Испытание погружением (ASTM G31) :

Образцы погружали в коррозионную среду (например, 5% HCl, pH 47) при температуре 60°C на 168 часов.

Измеряли потерю массы (мг) и рассчитывали скорость коррозии (мм/год).

Электрохимическое тестирование :

С помощью электрохимической рабочей станции были измерены потенциал коррозии (В) и плотность тока (мкА/см²).

Шаг :

Образцы были отполированы ($R_a < 0,2$ мкм) и очищены (деионизированная вода).

Иммерсионные или электрохимические испытания, регистрация потери массы или электрохимических параметров.

Рассчитайте скорость коррозии (погрешность $\leq \pm 10\%$).

Оборудование : термощкаф, электрохимическая рабочая станция (например, Gamry Interface 1010).

ли испытательный стержень : Нет.

Испытание на коррозионную стойкость можно проводить на образцах любой формы ($>10 \times 10$ мм), поверхность должна быть отполирована.

Примеры результатов :

YG6 (на основе кобальта): скорость коррозии $\sim 0,01$ мм/год.

YN10 (на основе никеля): скорость коррозии $< 0,005$ мм/год (Википедия, 2024).

Стандарты : ASTM G31 (погружение), ASTM G59 (электрохимический), GB/T 4334.

2.7 Анализ микроструктуры

Определение : Проверка размера зерна (0,52 мкм), фазового состава (WC, Co, η -фаза, свободный углерод) и дефектов.

Метод испытания :

Оптический микроскоп/СЭМ :

Образцы были отполированы ($R_a < 0,05$ мкм) и химически протравлены (реактив Мураками, 510 с).

Наблюдайте размер зерна, распределение фаз и дефекты (поры, η -фаза).

Рентгеновская дифракция (XRD) :

Определяет фазовый состав (например, WC, Co, Co_3W_3C) с чувствительностью 0,1%.

ТЭМ :

Анализ структуры интерфейса (энергия связи $WCo \sim 2$ Дж/м²) с разрешением < 1 нм.

Шаг :

Полировка, травление и очистка образцов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Для количественного анализа размера зерна и дефектов можно использовать микроскопическое наблюдение или рентгеновское сканирование.

Интерфейс анализа ТЭМ (опционально).

Оборудование : СЭМ (например, Zeiss Sigma 500), XRD (например, Bruker D8), ПЭМ (например, FEI Talos F200X).

ли испытательный стержень : Нет.

Микроструктурный анализ можно проводить с использованием небольших образцов ($>5 \times 5$ мм), которые требуют полировки и травления.

Примеры результатов :

YG6: размер зерна ~ 1 мкм, η -фаза $< 1\%$.

Ультрамелкое зерно: размер зерна $< 0,5$ мкм, однородность $> 95\%$ (ScienceDirect, 2020).

Стандарты : ISO 4499 (микроструктура), ASTM E112 (размер зерна).

2.8 Анализ химического состава

Определение : Определяет содержание углерода ($\sim 6,13$ мас. %), содержание кобальта (615%) и других элементов.

Метод испытания :

Анализатор углерода и серы: сжигает образцы, измеряет содержание CO_2 и определяет общее содержание углерода (точность $\pm 0,01\%$).

ИСП-МС : растворите образец и определите такие элементы, как W, Co, Cr (точность $\pm 0,001\%$).

Магнитный тест кобальта (GB/T 3849) :

Измеряется интенсивность намагничивания фазы кобальта и косвенно определяется содержание углерода (погрешность $\pm 0,05\%$).

шаг :

Образцы были измельчены (< 100 мкм) и очищены.

Анализ углерода и серы или обнаружение с помощью ИСП-МС, регистрация содержания элементов.

Магнитный контроль кобальта позволяет проверить баланс углерода.

Оборудование : анализатор углерода и серы (например, LECO CS844), ICPMS (например, Agilent 7900).

ли испытательный стержень : Нет.

Для анализа химического состава использовались порошки или небольшие кусочки образцов ($> 0,1$ г).

Примеры результатов :

YG6: Углерод $\sim 6,13$ мас.%, Кобальт 6 мас.%.

YN10: Никель 10 мас.%, углерод $\sim 6,1$ мас.% (Sandvik, 2023).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Стандарт : GB/T 3849 (кобальтовый магнит), ISO 11876 (химический состав), ASTM E1479.

2.9 Испытание адгезии покрытия

Определение : Измеряет прочность связи между покрытием (например, TiN, CrN) и подложкой из цементированного карбида, >50 Н.

Метод испытания :

Испытание на стойкость к царапинам (ASTM C1624) :

С помощью царапающего прибора алмазным индентором (радиусом 200 мкм) царапали поверхность покрытия.

Была зафиксирована критическая нагрузка (Lc, Н), при этом Lc >50 Н указывает на хорошую адгезию.

шаг :

Образцы были отполированы ($R_a < 0,2$ мкм) и очищены.

Прикладывалась возрастающая нагрузка (0–100 Н), а длина царапины составляла 5 мм.

Рассмотрите царапины под микроскопом и определите Lc (погрешность $< \pm 5$ Н).

Оборудование : тестер стойкости к царапинам (например, Anton Paar RST³).

ли испытательный стержень : Нет.

Для испытания адгезии покрытия используется образец покрытия ($>10 \times 10$ мм) с плоской поверхностью.

Примеры результатов :

YG6+TiN: Lc ~60 Н.

YN10+CrN: Lc ~70 Н (Sandvik, 2023).

Стандарты : ASTM C1624 (царапание), ISO 20502.

2.10 Испытание магнитных свойств

Определение : Измеряет намагниченность фазы кобальта, косвенно оценивая содержание углерода и фазовый состав.

Метод испытания :

Магнитный тест кобальта (GB/T 3849) :

Намагниченность образца (эме/г) измерялась с помощью магнитометра.

Низкая намагниченность указывает на η -фазу, а высокая намагниченность указывает на свободный углерод.

шаг :

Образцы промывали (этанолом) и высушивали.

Измерение магнитометра было повторено 3 раза, и было взято среднее значение.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сравните со стандартной кривой и определите содержание углерода (погрешность $\pm 0,05\%$).

Оборудование : Магнитометр (например, Lakeshore 7404).

ли испытательный стержень : Нет.

Магнитные свойства проверялись с использованием небольших образцов ($>5 \times 5$ мм).

Примеры результатов :

YG6: намагниченность ~ 150 эме/г, сбалансированный по углероду.

Обезуглероженный образец: интенсивность намагничивания ~ 120 эме/г (ScienceDirect, 2020).

Стандарт : GB/T 3849 (кобальтовый магнит), ISO 3326.

3. Тесты, требующие тест-полоски

Для следующих испытаний требуются стандартные испытательные стержни, поскольку они предъявляют строгие требования к геометрии образца и состоянию поверхности:

Прочность на изгиб (TRS) :

Испытательные стержни необходимы для обеспечения равномерного распределения напряжений и устранения отклонений размеров.

Размеры испытательного стержня: обычно $5,0 \times 5,0 \times 35,0$ мм (ISO 3327).

Вязкость разрушения (KIC) :

Испытательный стержень должен быть предварительно надрезан, чтобы обеспечить контролируемое распространение трещины.

Размеры испытательного стержня: обычно $4,0 \times 8,0 \times 32,0$ мм, глубина надреза 0,2-0,3 мм (ISO 28079).

Другие испытания (твердость, плотность, износостойкость и т. д.) не требуют испытательных стержней и могут использовать готовые изделия или образцы любой формы, что снижает затраты на подготовку.

4. Требования к твердосплавным испытательным стержням

Подготовка испытательного стержня напрямую влияет на точность испытания и должна соответствовать строгим требованиям к размеру, поверхности и подготовке. Ниже приведены подробные спецификации:

4.1 Требования к размеру

Испытательный образец на прочность при изгибе (ISO 3327, GB/T 3851) :

Размеры : $5,0 \pm 0,1$ мм (ширина) $\times$ $5,0 \pm 0,1$ мм (высота) $\times$ $35,0 \pm 0,5$ мм (длина).

Допуск : ширина и высота $\pm 0,1$ мм, длина $\pm 0,5$ мм, параллельность $< 0,05$ мм.

Кромки : фаска 0,2-0,3 мм (45°) для предотвращения концентрации напряжений.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Образец для испытания на вязкость разрушения (ISO 28079) :

Размеры : $4,0 \pm 0,1$ мм (ширина) $\times$ $8,0 \pm 0,1$ мм (высота) $\times$ $32,0 \pm 0,5$ мм (длина).

Выемка : глубина 0,2-0,3 мм, ширина $<0,1$ мм (электроэрозионная или лазерная резка).

Допуск : ширина и высота $\pm 0,1$ мм, глубина надреза $\pm 0,02$ мм.

Другие требования :

На поверхности испытательного стержня отсутствуют трещины, поры и включения, а дефекты, видимые невооруженным глазом, составляют менее 0,1 мм.

Стабильность размеров: отклонение партии $<0,05$ мм.

4.2 Требования к поверхности

Шероховатость поверхности :

$R_a < 0,4$ мкм (прочность на изгиб), $R_a < 0,2$ мкм (вязкость разрушения).

Выполнение : Шлифовка алмазным кругом (зернистость 510 мкм), полировка (алмазная паста, зернистость 13 мкм).

Обработка поверхности :

Удалить слой технологического напряжения (<10 мкм) и исключить появление микротрещин. Промыть (обработка ультразвуком этанолом, 5 мин) и высушить (80°C , 30 мин).

исследовать :

Наблюдение под микроскопом (увеличение $50\times$) не выявило царапин, ожогов или остаточных напряжений.

4.3 Требования к подготовке

Сырье и спекание :

Используйте ту же формулу, что и в готовом продукте (например, YG6, YG15), чтобы обеспечить постоянную производительность.

Вакуумное спекание ($1350-1450^{\circ}\text{C}$, $<10^{-3}$ Па) или горячее изостатическое прессование (1350°C , 100 МПа), пористость $<0,01\%$ (ISO 3326:2013).

Содержание углерода контролируется на уровне $\pm 0,1\%$, чтобы избежать η -фазы или свободного углерода (GB/T 3849).

Обработка :

Резка проволоки или прецизионная шлифовка, погрешность $<\pm 0,05$ мм.

Подготовка надреза (стойкость к разрушению): электроэрозионная обработка (ток < 1 А) или лазер (мощность < 10 Вт).

Пакетный контроль :

10% (>5 шт.) тестовых стержней в каждой партии проверяются случайным образом, отклонение размера составляет $<0,05$ мм, а отклонение характеристик — $<5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Запишите параметры спекания (температура $\pm 5^{\circ}\text{C}$, атмосфера $<0,01\%$ кислорода).

4.4 Проверка качества

Определение размеров :

Используйте цифровой микрометр или лазерный дальномер с точностью $\pm 0,01$ мм.

Проверьте параллельность и прямолинейность ($<0,05$ мм).

Микроструктура :

Исследование пор с помощью СЭМ, η -фазы, свободного углерода, доля $<1\%$ (ISO 4499).

Однородность размера зерна $>95\%$, типичное значение $0,52$ мкм.

Проверка производительности :

Твердость (HV30): Погрешность $<\pm 50$ HV.

Плотность: Погрешность $<\pm 0,01$ г/см³.

Магнитный тест кобальта: погрешность содержания углерода $<\pm 0,05\%$.

4.5 Хранение и транспортировка

хранилище :

Влажность $<40\%$, температура $20-25^{\circ}\text{C}$, избегать окисления и поглощения влаги.

Пылезащитная упаковка (пластиковая коробка) для предотвращения царапин на поверхности.

транспорт :

Ударопрочная упаковка (пенопластовые прокладки) для предотвращения повреждения краев.

Поставляется с отчетом об испытаниях (размеры, твердость, микроструктура).

Поддержка данных :

Допуск на размер испытательного стержня: $<\pm 0,1$ мм (ISO 3327).

Шероховатость поверхности: $R_a < 0,4$ мкм, отклонение производительности $<5\%$ (Sandvik, 2023).

ГИП: пористость $<0,01\%$, прочность увеличилась на 15% (ScienceDirect, 2020).

5. Практические примеры применения

Тест инструмента YG6 :

Испытания : твердость (HV30, 1500 HV), прочность на изгиб ($2,0$ ГПа), износостойкость ($0,01$ мм³/Н·м).

Испытательный стержень : испытательный стержень для определения прочности на изгиб ($5 \times 5 \times 35$ мм), $R_a < 0,4$ мкм.

Результат : Срок службы при резке чугуна составляет 2 часа, производительность приемлемая.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тест на плесень YG15 :

Испытания : трещиностойкость (KIC 12 МПа·м^{1/2}), плотность (14,0 г/см³), коррозионная стойкость (0,01 мм/год).

Испытательный стержень : испытательный стержень на вязкость разрушения (4×8×32 мм, надрез 0,25 мм).

Результат : Срок службы штамповки составляет 120 000 раз, что соответствует стандарту.

Тест на плесень YN10 :

Испытания : коррозионная стойкость (<0,005 мм/год), адгезия покрытия (L_c 70 Н), микроструктура (зерна ~1 мкм).

Испытательный стержень : Отсутствует, испытание проводилось с использованием полированного образца (10×10 мм).

Результат : Срок службы в кислой среде составляет 1 год, а эксплуатационные характеристики превосходны.

Тестирование ультрамелкозернистого инструмента :

Испытания : твердость (2000 HV), прочность на изгиб (2,2 ГПа), размер зерна (<0,5 мкм).

Испытательный стержень : испытательный стержень для определения прочности на изгиб (5×5×35 мм).

Результат : Срок службы нержавеющей стали при резке составляет 4 часа, а преимущество сверхмелкого зерна очевидно.

Поддержка данных :

YG6: твердость 1500 HV, прочность на изгиб 2,0 ГПа (Sandvik, 2023).

YN10: Скорость коррозии <0,005 мм/год (Википедия, 2024).

Ультрамелкие зерна: зерна <0,5 мкм, $KIC \sim 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (ScienceDirect, 2020).

6. Заключение

Тесты на производительность карбида включают твердость (твёрдомер Виккерса, HV30), плотность (метод Архимеда), прочность на изгиб (трехточечный изгиб), вязкость разрушения (SENB), износостойкость (износ/штифт-диск), коррозионную стойкость (иммерсионная/электрохимическая), микроструктуру (SEM/XRD/TEM), химический состав (анализ содержания углерода и серы/ICPMS), адгезию покрытия (царапание) и магнитные свойства (кобальтовый магнитный тест). Среди них, **прочность на изгиб и вязкость разрушения** требуют стандартных испытательных стержней, а другие тесты могут использовать готовые изделия или полированные образцы.

Требования к испытательному стержню :

Размеры : прочность на изгиб (5×5×35 мм, допуск ±0,1 мм), вязкость разрушения (4×8×32 мм, надрез 0,20,3 мм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Поверхность : Ra <0,4 мкм (сопротивление изгибу), Ra <0,2 мкм (прочность), без трещин/пор.

Подготовка : вакуумное спекание/HIP, пористость <0,01%, содержание углерода $\pm 0,1\%$.

Проверка : отклонение размеров <0,05 мм, отклонение характеристик <5%.

Тест соответствует GB/T 3849, ISO 4499, ASTM B406 и другим стандартам для обеспечения точности и последовательности. Оптимизация подготовки испытательного стержня (например, HIP, прецизионное шлифование) и процессов тестирования (например, онлайн-мониторинг) может повысить надежность результатов с погрешностью <5%. В будущем автоматизированное тестирование и интеллектуальный анализ еще больше повысят эффективность и точность.

стандарт :

GB/T 7997: Твёрдость по Виккерсу.

GB/T 3851: Прочность на изгиб.

GB/T 3849: Магнитный тест на кобальт.

ISO 3327: Испытательные стержни для определения прочности на изгиб.

ISO 28079: Вязкость разрушения.

ISO 4499: Микроструктура.

ASTM B406: Прочность на изгиб.

ASTM G31: Коррозионная стойкость.

ASTM C1624: Адгезия покрытия.

ISO 3326:2013: Пористость.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение :

Технические характеристики, эксплуатационные требования и подготовка испытательных стержней из цементированного карбида

Испытательные стержни из карбида являются ключевыми образцами для испытаний таких свойств, как поперечная прочность (TRS) и вязкость разрушения (KIC), и процесс их подготовки должен соответствовать строгим спецификациям и требованиям к производительности. Для **нано-испытательных стержней** (размер зерна $<0,5$ мкм), **оптимизации определенного класса** (например, YG6, YG15, ультрамелкозернистые сорта) и **нестандартных испытательных стержней** (нестандартный размер или форма) процесс необходимо дополнительно усовершенствовать для учета характеристик нанопорошков, требований к производительности определенного класса и проблем обработки нестандартной геометрии. В этой статье будут подробно рассмотрены процессы подготовки нано-тестовых стержней, оптимизации конкретных марок и нестандартных испытательных стержней, объединенные с микроскопическими механизмами, новейшими исследованиями (например, Sandvik, 2023; ScienceDirect, 2020; Wikipedia, 2024) и отраслевыми стандартами (например, GB/T 3851, ISO 3327, ISO 28079). Все материалы представлены на китайском языке, что гарантирует точность, подробность и увлекательность содержания.

1. Обзор

Испытательные стержни из карбида используются для испытаний на прочность на изгиб ($1,52,5$ ГПа) и вязкость разрушения (812 МПа·м^{1/2}) со стандартными размерами $5 \times 5 \times 35$ мм (изгиб) или $4 \times 8 \times 32$ мм (прочность, надрез $0,20,3$ мм). **Испытательные стержни из наноматериалов** предназначены для сверхмелкозернистого цементированного карбида (зерна $<0,5$ мкм), а рост зерен и дефекты (такие как η -фаза, свободный углерод) должны контролироваться; **оптимизация конкретного сорта** должна соответствовать эксплуатационным требованиям YG6 (общий инструмент), YG15 (высокопрочностная форма) или сверхмелкозернистых сортов (таких как YG8N); **нестандартные испытательные стержни** должны быть настроены по размеру или форме для адаптации к специальным испытаниям или сценариям применения. Процесс подготовки включает в себя дозирование, смешивание, прессование, спекание, обработку и проверку, которые необходимо точно контролировать для обеспечения постоянства характеристик испытательного стержня (отклонение $<5\%$). Далее будет разделено на три части для углубленного уточнения.

2. Приготовление наностержней

Наностержни для испытаний изготавливаются из сверхмелкозернистого твердого сплава (размер зерна $<0,5$ мкм, твердость $1800-2200$ HV), который широко используется в высокоточных инструментах (например, в авиационной обработке) и износостойких покрытиях. При получении нанопорошков необходимо решить проблемы высокой активности, легкой агломерации и роста зерна.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.1 Ингредиенты

сырье :

Порошок WC : размер зерна 0,10,4 мкм (чистота >99,95%), содержание углерода $6,13 \pm 0,05$ мас.%, содержание кислорода <0,03%.

Порошок кобальта : размер частиц 0,51 мкм (чистота >99,9%), содержание 610 мас.% (например, YG8N).

Ингибиторы зерна : Cr₃C₂ (0,51 мас.%), VC (0,2-0,5 мас.%), ингибирующие рост зерна на 20-30%.

Технический углерод : <0,05 мас.%, точно отрегулированный баланс углерода (погрешность <0,01%).

Соотношение :

Точное взвешивание ($\pm 0,0005$ г), погрешность <0,005%.

Контроль содержания углерода: $\pm 0,03\%$, исключая η -фазу (Co₃W₃C) или свободный углерод.

Оборудование : высокоточные весы (Mettler Toledo XPR6), перчаточный бокс с инертной атмосферой (O₂ <0,01%).

Пример : YG8N (8% Co): WC 91,5 мас.%, Co 8 мас.%, Cr₃C₂ 0,4 мас.%, VC 0,1 мас.% (Sandvik, 2023).

2.2 Смешивание

Процесс :

Мокрое измельчение : высокоэнергетическая планетарная шаровая мельница (1620 ч, 0,2 мкм), среда — безводный этанол (содержание твердого вещества 65–70%).

Связующее : модифицированный ПЭГ (11,5%, остаточный углерод <0,03%) или наносвязующее на водной основе (0,51%) для предотвращения агломерации.

Диспергатор : стеариновая кислота (0,10,3%), улучшает однородность частиц на 15%.

Параметры : соотношение шариков к материалу 10:1, скорость перемешивания 800-1200 об/мин, температура <30°C (избегать окисления).

Цель :

Однородность частиц >98%, D₅₀ 30100 мкм, скорость агломерации <1%.

Вязкость суспензии 150-250 мПа·с, текучесть <20 с/50 г (GB/T 1482).

Оборудование : высокоэнергетическая шаровая мельница (Retsch PM400), ультразвуковой диспергатор (мощность 500 Вт).

Пример : YG8N: 1% ПЭГ, измельчение в шаровой мельнице в течение 18 часов, D₅₀ ~50 мкм, однородность >98% (ScienceDirect, 2020).

2.3 Подавление

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Процесс :

Распылительная сушка : получение сферических частиц (сферичность>0,95), D50 30-100 мкм, текучесть <20 с/50 г.

Холодное изостатическое прессование (ХИП) : давление 250-350 МПа, плотность заготовки >55% теоретической плотности.

Форма : Высокоточная форма из вольфрамовой стали, допуск размеров $\pm 0,02$ мм с учетом усадки при спекании (2225%).

Размеры : заготовка для испытания на изгиб $\sim 6,3 \times 6,3 \times 44$ мм, образец для испытания на прочность $\sim 5,0 \times 10,0 \times 40$ мм.

Цель :

Прочность на разрыв >6 МПа, без трещин/расслоений.

Однородность заготовки составляет >95%, а отклонение плотности <1%.

Оборудование : распылительная сушильная башня (GEA Niro), холодный изостатический пресс (EPSI CIP400).

Пример : YG8N: CIP 300 МПа, прочность в сыром виде ~ 7 МПа, усадка 23%.

2.4 Спекание

Процесс :

Вакуумное спекание :

Температура: 1320-1380°C ($\pm 3^\circ\text{C}$), ниже нормы (1350-1450°C), что снижает рост зерна на 20%.

Степень вакуума: $< 5 \times 10^{-4}$ Па, кислород <0,005%, избегать обезуглероживания.

Поэтапный нагрев: 250-350°C (удаление связующего, остаточный углерод <0,03%), 1320°C (жидкофазное спекание, время выдержки 45-60 минут).

Горячее изостатическое прессование (ГИП) :

1320°C, 120150 МПа, 30 мин.

Устранить пористость, пористость <0,005% (ISO 4505).

Контроль атмосферы : CO/CO₂ <0,05%, расход H₂ 0,3-0,5 л/мин (при необходимости).

Цель :

Размер зерна: <0,5 мкм, однородность >98%.

Плотность: 14,515,0 г/см³, твердость 1800-2200 HV, η -фаза/свободный углерод <0,5%.

Оборудование : Вакуумная печь для спекания (ALD Vacuum Technologies), оборудование HIP (Quintus QIH122).

Пример : YG8N: вакуумное спекание 1350°C + HIP, размер зерна $\sim 0,4$ мкм, твердость 2000 HV (Sandvik, 2023).

2.5 Обработка

Процесс :

Черновая обработка : резка проволокой (погрешность $< \pm 0,05$ мм), удаление спекшейся корки (0,1-0,3 мм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Отделка : сверхточная алмазная шлифовка (размер зерна 35 мкм), погрешность $\leq \pm 0,02$ мм.

Полировка : наноалмазная паста (0,51 мкм), $R_a < 0,2$ мкм (сопротивление изгибу), $R_a < 0,1$ мкм (прочность).

Надрез (стержень для испытания на прочность) :

Фемтосекундная лазерная резка: мощность < 5 Вт, глубина 0,2-0,3 мм ($\pm 0,01$ мм), ширина $< 0,05$ мм.

Избегать зон термического влияния (< 1 мкм), а также не обнаруживать микротрещин при осмотре с помощью СЭМ.

Фаска : полированная, 0,20,3 мм ($45^\circ \pm 3^\circ$).

Цель :

Допуск размеров составляет $\pm 0,05$ мм, а на поверхности отсутствует слой напряжений (< 5 мкм).

Точность надреза $\pm 0,01$ мм, отклонение расширения трещины $< 3\%$.

Оборудование : сверхточный шлифовальный станок (Moore Nanotech 350FG), фемтосекундный лазер (Coherent Monaco), СЭМ (Zeiss Gemini 500).

Пример : YG8N: $R_a < 0,2$ мкм, надрез $0,25 \pm 0,005$ мм, без термических повреждений.

2.6 Проверка качества

Размеры : Лазерный дальномер (точность $\pm 0,005$ мм), допуск $\pm 0,05$ мм, параллельность $< 0,03$ мм.

Поверхность : интерферометрия в белом свете ($R_a < 0,2$ мкм), СЭМ (глубина надреза $\pm 0,01$ мм, трещин нет).

Микроструктура :

ПЭМ (размер зерна 0,30,5 мкм, однородность $> 98\%$).

Рентгеновская дифракция (η -фаза/свободный углерод $< 0,5\%$, чувствительность 0,05%).

Пористость: $< 0,005\%$ (ISO 4499).

производительность :

Твердость: 1800–2200 HV (± 30 HV, GB/T 7997).

Плотность: 14,515,0 г/см³ ($\pm 0,005$ г/см³, GB/T 3850).

Прочность на изгиб: 2,02,5 ГПа ($\pm 3\%$, GB/T 3851).

Вязкость разрушения: 810 МПа·м^{1/2} ($\pm 5\%$, ISO 28079).

Магнитный тест на кобальт: содержание углерода $\pm 0,03\%$ (GB/T 3849).

Выборочная проверка : $> 15\%$ (> 10 шт.) на партию, отклонение производительности $< 3\%$.

Оборудование : просвечивающий электронный микроскоп (FEI Talos F200X), интерферометр белого света (Zygo NewView 9000), твердомер по Виккерсу (Wilson VH3300).

Пример : YG8N: твердость 2000 ± 20 HV, размер зерна 0,4 мкм, η -фаза $< 0,3\%$ (ScienceDirect, 2020).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.7 Проблемы и оптимизация

испытание :

Нанопорошки легко агломерируются, а отклонение от однородности составляет >5%.

Высокая активность приводит к окислению (увеличение содержания кислорода на 0,02%) и увеличению риска декарбонизации на 10%.

Спеченные зерна увеличиваются в размерах (>0,5 мкм), а твердость снижается на 5–10%.

оптимизация :

Ультразвуковое диспергирование : 500 Вт, 10 мин, скорость агломерации снизилась до <0,5%.

Инертная защита: атмосфера Ar (O₂ <0,005%) в течение всего процесса смешивания/замеса.

Низкотемпературное спекание + ингибитор : 1320°C, Cr₃C₂+VC, контроль зерна <0,5 мкм.

Онлайн-мониторинг : инфракрасное измерение температуры (±1°C), масс-спектрометр (CO/CO₂ <0,01%).

Эффект :

Однородность увеличилась на 20%, отклонение зерна <5%.

η-фаза/свободный углерод приводит к увеличению твердости на 5% (Sandvik, 2023).

3. Оптимизация конкретных классов

Различные марки твердого сплава (такие как YG6, YG15, ультрамелкозернистый YG8N) имеют разное содержание кобальта, размер зерна и сценарии применения, поэтому процесс подготовки испытательного стержня необходимо оптимизировать для соответствия требованиям производительности. Ниже приведены решения по оптимизации для трех типичных марок.

3.1 YG6 (универсальный инструмент, 6% Co)

Цели производительности :

Твёрдость: 1500 ± 50 HV.

Прочность на изгиб: 2,0 ± 0,1 ГПа.

Вязкость разрушения: 8 ± 0,5 МПа·м^{1/2}.

Зерно: 11,5 мкм, η-фаза/свободный углерод <1%.

Плотность: 14,9 ± 0,01 г/см³.

Ингредиенты :

WC: 94 мас.% (12 мкм), Co: 6 мас.%, Cr₃C₂: 0,3 мас.% (опционально).

Содержание углерода: 6,13 ± 0,05 мас.%, погрешность <0,01%.

Смешивание :

Мокрое измельчение: 1214 ч, ПЭГ 1,5%, D50 80150 мкм.

Среда этанола, содержание твердых веществ 70%, текучесть <25 с/50 г.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подавить :

CIP: 200-250 МПа, интенсивность зеленого цвета > 5 МПа.

Заготовка: 6,2×6,2×43 мм (прочность на изгиб), усадка 20%.

спекание :

Вакуумное спекание: 1400°C (±5°C), выдержка 1 час, <10⁻³ Па.

ГИП: 1400°C, 100 МПа, пористость <0,01%.

Обработка :

Шлифовка: Алмазный шлифовальный круг (510 мкм), Ra <0,4 мкм.

Надрез: электрическая искра (0,25 ± 0,02 мм), Ra < 0,2 мкм.

проверить :

Размеры: ±0,05 мм, твердость 1500 ± 30 HV.

СЭМ: размер зерна ~1,2 мкм, η-фаза <1%.

Кобальтовый магнит: содержание углерода ±0,05%.

Пример : испытательный стержень YG6: прочность на изгиб 2,0 ГПа, твердость 1500 HV, стойкость к резанию 2 часа (Sandvik, 2023).

3.2 YG15 (форма высокой прочности, 15% Co)

Цели производительности :

Твёрдость: 1400 ± 50 HV.

Прочность на изгиб: 2,5 ± 0,1 ГПа.

Вязкость разрушения: 12 ± 0,5 МПа·м^{1/2}.

Зерно: 1,52 мкм, η-фаза/свободный углерод <1%.

Плотность: 14,0 ± 0,01 г/см³.

Ингредиенты :

WC: 85 мас.%, (1,52,5 мкм), Co: 15 мас.%, Cr₃C₂: 0,5 мас.%,

Содержание углерода: 6,13 ± 0,05 мас.%, сажи <0,1 мас.%,

Смешивание :

Мокрое шлифование: 1416 ч, ПВС 1%, D50 100200 мкм.

Этанол/вода (1:1), содержание твердых веществ 75%, текучесть <28 с/50 г.

подавить :

CIP: 250-300 МПа, интенсивность зеленого цвета > 8 МПа.

Заготовка: 5,0×10,0×40 мм (прочность), усадка 18%.

спекание :

Вакуумное спекание: 1450°C (±5°C), выдержка 1,5 часа, <10⁻³ Па.

ГИП: 1450°C, 120 МПа, пористость <0,01%.

Обработка :

Шлифовка: Ra < 0,2 мкм, искровая насечка (0,25 ± 0,01 мм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Фаска: 0,3 мм, полировка Ra <0,1 мкм.

проверять :

Размеры: $\pm 0,05$ мм, твердость 1400 ± 30 HV.

СЭМ: размер зерна $\sim 1,8$ мкм, размер пор <0,01%.

Кобальтовый магнит: содержание углерода $\pm 0,05\%$.

Пример : испытательный стержень YG15: KIC $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, срок службы штамповки 120 000 раз (ScienceDirect, 2020).

3.3 Ультрамелкозернистая YG8N (авиационный инструмент, 8% Co)

Цели производительности :

Твёрдость: 2000 ± 50 HV.

Прочность на изгиб: $2,2 \pm 0,1$ ГПа.

Вязкость разрушения: $9 \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Зерно: <0,5 мкм, η -фаза/свободный углерод <0,5%.

Плотность: $14,7 \pm 0,01$ г/см³.

Ингредиенты :

WC: 91,5 мас.% (0,2-0,4 мкм), Co: 8 мас.%, Cr3C2: 0,4 мас.%, VC: 0,1 мас.%.

Содержание углерода: $6,13 \pm 0,03$ мас.%, погрешность <0,005%.

Смешивание :

Высокоэнергетическая шаровая мельница: 1820 ч, модифицированный ПЭГ 1%, D50 30100 мкм.

Безводный этанол, содержание сухого вещества 65%, ультразвуковое диспергирование (500 Вт, 10 мин).

Подавить :

C_{ir}: 300-350 мПа, интенсивность зеленого цвета >7 мПа.

Заготовка: 6,3×6,3×44 мм, степень усадки 23%.

Спекание :

Вакуумное спекание: 1350°C ($\pm 3^\circ\text{C}$), выдержка 45 мин, $<5 \times 10^{-4}$ в год.

Бедро: 1350°C, 150 МПа, пористость <0,005%.

Обработка :

Сверхточная шлифовка: га < 0,2 мкм, фемтосекундная лазерная насечка ($0,25 \pm 0,005$ мм).

Полировка: га <0,1 мкм, зона термического влияния отсутствует.

Проверять :

Размеры: $\pm 0,02$ мм, твердость 2000 ± 20 hv.

Тем: размер зерна $\sim 0,4$ мкм, однородность >98%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Кобальтовый магнит: содержание углерода $\pm 0,03\%$.

Пример : испытательный стержень YG8N: твердость 2000 HV, стойкость нержавеющей стали при резании 4 часа (Sandvik, 2023).

3.4 Стратегия оптимизации

YG6 :

Ключевые моменты: баланс стоимости и производительности, связующее ПЭГ (низкий углеродный остаток $< 0,05\%$), спекание при 1400°C .

Эффект: снижение себестоимости на 15%, отклонение прочности на изгиб $< 3\%$.

YG15 :

Ключевые моменты: Высокая прочность, связующее ПВА (прочность в сыром виде > 8 МПа), горячее изостатическое прессование при температуре 1450°C .

Эффект: KIC увеличился на 10%, устойчивость к росту трещин увеличилась на 15%.

YG8N :

Ключевые моменты: контроль зерна ($< 0,5$ мкм), ингибитор $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{VC}$, низкотемпературное спекание (1350°C).

Эффект: Твердость увеличилась на 5%, отклонение зерна $< 5\%$.

Поддержка данных :

YG6: прочность на изгиб 2,0 ГПа, снижение стоимости 15% (Sandvik, 2023).

YG15: KIC $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, срок службы увеличен на 20% (ScienceDirect, 2020).

YG8N: размер зерна 0,4 мкм, твердость 2000 HV (Википедия, 2024).

4. Подготовка нестандартных испытательных стержней

Нестандартные испытательные стержни относятся к испытательным стержням, размер, форма или выемка которых отклоняются от стандарта (например, ISO 3327, ISO 28079) и используются для специальных испытаний (например, микроинструментов, сложных форм) или исследований и разработок. Подготовка должна учитывать как требования к настройке, так и постоянство производительности.

4.1 Сценарии применения

Микро-испытательный стержень :

Размеры: например, $2 \times 2 \times 20$ мм (микроинструментальный тест).

Применение: Для испытания прочности на изгиб небольших твердосплавных деталей, таких как стоматологические инструменты.

Тестовый стержень большого размера :

Размер: например, $8 \times 8 \times 50$ мм (горный инструмент).

Применение: Для испытания прочности крупных форм или инструментов для бурения горных пород.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сложные формы :

Форма: цилиндрическая (диаметр 5 мм, длина 30 мм) или трапецевидная.

Применение: для моделирования механических свойств реальных заготовок (например, волоочильных фильер).

Нестандартный зазор :

Выемка: V-образная, U-образная или множественная (глубина 0,1-0,5 мм).

Применение: для изучения роста трещин или усталостных характеристик.

4.2 Требования к спецификации

Размер :

Допуск: $\pm 0,05$ мм (микро), $\pm 0,1$ мм (крупный).

Параллельность: $< 0,03$ мм, перпендикулярность: $< 0,05$ мм.

Индивидуальный размер: в соответствии с требованиями испытаний (например, расстояние между опорами 1540 мм).

Поверхность :

Ra $< 0,2$ мкм (микро/надрез), га $< 0,4$ мкм (макро).

Микротрещины/слои напряжений отсутствуют (< 5 мкм), сканирующее исследование ($100\times$).

Зазор :

Глубина: 0,10,5 мм ($\pm 0,01$ мм).

Ширина: $< 0,05$ мм (микро), $< 0,1$ мм (обычная).

Форма: V-образная (60°), U-образная (радиус 0,1 мм) или по индивидуальному заказу.

Появление :

Поры/включения отсутствуют, дефекты $< 0,05$ мм (микро), $< 0,1$ мм (макро).

Фаска: 0,1-0,5 мм (в зависимости от размера).

4.3 Процесс подготовки

Ингредиенты :

Соответствует стандартным испытательным стержням, соответствующим классам (например, YG6, YG8N).

Микростержень: нанопорошок (0,2-0,4 мкм), погрешность углерода $< 0,03\%$.

Испытательный образец большого размера: крупнозернистые (23 мкм), кобальт 10-15 мас. %.

Смешивание :

Микро: высокоэнергетическая шаровая мельница (20 ч), D50 2050 мкм, ультразвуковое диспергирование.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Крупный размер: традиционная шаровая мельница (12 часов), D50 100-200 мкм, ПВС 12%.
Оборудование: высокоэнергетическая шаровая мельница (Retsch PM400), ультразвуковой аппарат (500 Вт).

Подавить :

Микро: Точное литье (500 МПа), допуск формы $\pm 0,01$ мм.
Крупногабаритные: СІР (200-300 МПа), однородность заготовки >95%.
Индивидуальные формы: формы, напечатанные на 3D-принтере или гравировка на станке с ЧПУ (погрешность < 0,02 мм).
Оборудование: прецизионный пресс (Carver 4350), ЧПУ (DMG Mori NTX1000).

Спекание :

Микро: низкотемпературное спекание (1300-1350°C), $< 5 \times 10^{-4}$ Па, размер зерна <0,5 мкм.
Крупный размер: 1450-1500°C, НІР (150 МПа), пористость <0,01%.
Оборудование: вакуумная спекательная печь (ВСП), ГІП (Quintus QIN232).

Обработка :

Микро: сверхточная шлифовка ($R_a < 0,1$ мкм), фемтосекундная лазерная насечка (глубина $\pm 0,005$ мм).
Большие размеры: обычная шлифовка ($R_a < 0,4$ мкм), электроискровая насечка ($\pm 0,02$ мм).
Сложные формы: пятикоординатная обработка на станке с ЧПУ (погрешность < 0,02 мм), электрохимическая полировка ($R_a < 0,1$ мкм).
Оборудование: Пятикоординатный ЧПУ (Haas UMC750), фемтосекундный лазер (Coherent Мопасо).

Проверить :

Размеры: 3D-сканер (точность $\pm 0,005$ мм), допуск $\pm 0,05$ мм.
Поверхность: интерферометрия в белом свете ($R_a < 0,2$ мкм), СЭМ (надрез $\pm 0,01$ мм).
Свойства: Твердость ± 30 HV, прочность на изгиб $\pm 3\%$, KIC $\pm 5\%$.
Микроструктура: ПЭМ (микро, зерна <0,5 мкм), СЭМ (макроразмер, зерна 23 мкм).
Выборочная проверка: >20% (микро размер), >10% (крупный размер) на партию.
Оборудование: 3D-сканер (GOM ATOS Q), ТЭМ (FEI Talos F200X).

4.4 Проблемы и оптимизация

Испытание :

Микростержень: малый размер, погрешность обработки > 0,05 мм, риск трещин увеличивается на 20%.
Испытательный стержень большого размера: внутреннее напряжение, пористость увеличились на 0,01–0,02%.
Сложная форма: геометрическое отклонение > 0,1 мм, слой поверхностного напряжения увеличен на 10 мкм.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оптимизация :

Микро : обработка фемтосекундным лазером (тепловой эффект < 0,5 мкм), вырубные заготовки ($\pm 0,01$ мм).

Большой размер : сегментированное ГИП (150 МПа, 2 раза), снятие напряжений 15%.

Сложная форма : ЧПУ+электрохимическая полировка, геометрическое отклонение <0,02 мм, Ra <0,1 мкм.

Онлайн-мониторинг : рентгеновская КТ (пористость <0,005%), инфракрасное измерение температуры ($\pm 1^{\circ}\text{C}$).

Эффект :

Миниатюра: отклонение размера <0,02 мм, отклонение твердости <2%.

Крупный размер: пористость <0,005%, прочность увеличена на 10%.

Сложные формы: геометрическая точность увеличена на 20%, отклонение производительности <3% (ScienceDirect, 2020).

4.5 Примеры

Микротест-палочка (стоматологический инструмент) :

Размеры: $2 \times 2 \times 20$ мм, Ra <0,1 мкм.

Процесс: формула YG8N, спекание при 1350°C , обработка фемтосекундным лазером.

Характеристики: Твердость 2000 HV, прочность на изгиб 2,2 ГПа.

Применение: Испытание микрорежущих инструментов, срок службы режущего инструмента 3 часа.

Тестовый стержень большого размера (горный инструмент) :

Размеры: $8 \times 8 \times 50$ мм, Ra <0,4 мкм.

Процесс: формула YG15, горячее изостатическое прессование при температуре 1500°C , шлифование с ЧПУ.

Свойства: Твердость 1400 HV, KIC $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Применение: Испытание буровых коронок, срок службы 600 часов.

Цилиндрический испытательный стержень (волока для волочения проволоки) :

Размеры: диаметр 5 мм, длина 30 мм, V-образный вырез (0,2 мм).

Процесс: формула YG6, спекание при 1400°C , пятиосевая ЧПУ + электрохимическая полировка.

Характеристики: Твердость 1500 HV, прочность на изгиб 2,0 ГПа.

Применение: Испытание прочности волок для волочения проволоки, срок службы 100 000 метров.

5. Заключение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Нано-испытательные стержни должны решать проблемы агломерации нанопорошка (<0,5%), роста зерна (<0,5 мкм) и высокой активности. Благодаря высокоэнергетическому шаровому измельчению (1820 часов), низкотемпературному спеканию (1350 °C) и обработке фемтосекундным лазером ($\pm 0,005$ мм) достигаются твердость 2000 HV и прочность на изгиб 2,2 ГПа. Специальная **оптимизация класса регулирует ингредиенты, связующие вещества и параметры спекания** для YG6 (низкая стоимость, 2,0 ГПа), YG15 (высокая прочность, KIC 12 МПа·м^{1/2}) и YG8N (ультрамелкие зерна, твердость 2000 HV), чтобы гарантировать отклонение производительности <3%. **Нестандартные испытательные стержни отвечают индивидуальным требованиям** благодаря прецизионному формованию (микро), пятикоординатному ЧПУ (сложные формы) и сегментированному HIP (большого размера) с отклонением размера <0,05 мм и отклонением характеристик <3%.

Оптимизация процесса (например, ультразвуковая дисперсия, онлайн-мониторинг) и современное оборудование (например, фемтосекундный лазер, рентгеновская КТ) значительно улучшают качество тестовых стержней, а постоянство характеристик увеличивается на 20%. В будущем аддитивное производство (3D-печать заготовок) и искусственный интеллект (оптимизация процесса) еще больше повысят эффективность подготовки нано- и нестандартных тестовых стержней.

Стандарт :

GB/T 3851: Прочность на изгиб.
ISO 3327: Испытательные стержни на изгиб.
ISO 28079: Вязкость разрушения.
GB/T 3849: Магнитный тест на кобальт.
ISO 4499: Микроструктура.
ISO 4505: Пористость.
ASTM B406: Прочность на изгиб.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Приложение :

Национальный стандарт для твердосплавных испытательных стержней

Испытательные стержни из твердого сплава или цементированного карбида используются для проверки ключевых свойств, таких как поперечная прочность (TRS) и вязкость разрушения (KIC). Их подготовка, спецификации и испытания должны соответствовать строгим национальным стандартам (GB/T) для обеспечения точности и последовательности результатов. Национальные стандарты Китая (GB/T) охватывают подготовку, размеры, эксплуатационные испытания, анализ микроструктуры, испытания химического состава испытательных стержней из цементированного карбида, а некоторые стандарты соответствуют международным стандартам (таким как ISO 3327 и ISO 28079). В этой статье будет подробно перечислены китайские национальные стандарты, относящиеся к испытательным стержням из цементированного карбида, охватывающие все аспекты спецификаций, эксплуатационных испытаний, подготовки и проверки в сочетании со стандартным содержанием, областью применения и конкретными требованиями, все на китайском языке, чтобы гарантировать, что содержание является точным, подробным и увлекательным.

1. Обзор

Испытательные стержни из карбида в основном используются для испытаний на прочность на изгиб (1,52,5 ГПа) и вязкость разрушения (812 МПа·м^{1/2}). Стандартные размеры включают 5×5×35 мм (изгиб) и 4×8×32 мм (вязкость, надрез 0,20,3 мм). Китайский национальный стандарт (GB/T) содержит спецификации для подготовки и испытания испытательных стержней, охватывающие следующие аспекты:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические характеристики испытательного стержня : размеры, допуски, качество поверхности.

Эксплуатационные испытания : твердость, прочность на изгиб, вязкость разрушения, плотность и т. д.

Микроструктура и химический состав : размер зерна, пористость, содержание углерода и т. д.

Процесс подготовки : дозирование, смешивание, спекание, обработка и т. д.
относящийся к испытательным стержням из цементированного карбида в порядке стандартных номеров, с пояснением их содержания, области применения, особых требований и их связи с испытательными стержнями по отдельности.

2. Национальные стандарты, касающиеся испытательных стержней из цементированного карбида

Ниже приведены китайские национальные стандарты, напрямую или косвенно связанные с испытательными стержнями из цементированного карбида, охватывающие все аспекты подготовки, испытания и проверки испытательных стержней.

2.1 GB/T 3851:2015 Метод испытания прочности твердого сплава на поперечный излом **Стандартное наименование :** Поперечная прочность на разрыв твердого сплава.

Область применения : Он определяет метод испытания прочности на изгиб (TRS) твердого сплава, который применим к испытательным пруткам и образцам готовой продукции и широко используется в ножах, формах, горнодобывающем инструменте и т. д.

Требования к испытательному стержню :

Размеры : $5,0 \pm 0,1$ мм (ширина) $\times$ $5,0 \pm 0,1$ мм (высота) $\times$ $35,0 \pm 0,5$ мм (длина).

Допуски : ширина и высота $\pm 0,1$ мм, длина $\pm 0,5$ мм, параллельность $< 0,05$ мм, перпендикулярность $< 0,05$ мм.

Шероховатость поверхности : $R_a < 0,4$ мкм, поверхность, несущая нагрузку, полированная, без трещин, пор и смятия кромок (дефекты, видимые невооруженным глазом $< 0,1$ мм).

Фаска : $0,2-0,3$ мм, угол $45^\circ \pm 5^\circ$, чтобы избежать концентрации напряжений.

Метод испытания :

Испытание на трехточечный изгиб :

Оборудование: Универсальная испытательная машина, точность $\pm 0,1$ кН.

Расстояние между шарнирами: $30 \pm 0,1$ мм, скорость нагрузки: $0,51$ мм/мин.

Формула: $\sigma = 3FL / (2bh^2)$, F — разрушающая нагрузка (Н), L — опорное расстояние (мм), b и h — ширина и высота испытательного стержня (мм).

шаг :

Испытательные бруски были отполированы ($R_a < 0,4$ мкм), очищены (этанол) и высушены (80°C , 30 мин).

Поместите испытательный стержень и отрегулируйте точку опоры, чтобы обеспечить равномерное усилие.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложите нагрузку до разрушения, запишите F и рассчитайте σ (погрешность $\leq \pm 5\%$).

Результаты : прочность на изгиб 1,5-2,5 ГПа, например, YG6 ~2,0 ГПа, YG15 ~2,5 ГПа.

Связь с испытательным стержнем :

Четкое указание размеров, поверхности и условий испытаний образцов для испытания на прочность на изгиб является основным стандартом при подготовке образцов для испытаний. Геометрия испытательного стержня должна быть постоянной (допуск $\pm 0,1$ мм) для обеспечения равномерного распределения напряжений и отклонения при испытании $< 5\%$.

Примечание : Эквивалентно ISO 3327:2009, применимо к стандартным испытаниям испытательных стержней.

2.2 GB/T 7997-2017 Метод испытания твердого сплава на твердость по Виккерсу

Название стандарта : Испытание твердости по Виккерсу для твердого сплава.

Область применения : определяет метод испытания твердости твердого сплава, применимый к испытательным стержням, готовым изделиям или любым образцам, используемым для проверки постоянства эксплуатационных характеристик испытательных стержней.

Требования к испытательному стержню :

Образец : Полированная поверхность, $R_a < 0,2$ мкм, без оксидного слоя и дефектов.

Размер : $> 5 \times 5$ мм, толщина > 1 мм, тестовый стержень применим напрямую.

Метод испытания :

Твёрдость по Виккерсу (HV) :

Оборудование: твердомер по Виккерсу, точность $\pm 0,5\%$.

Индентор: Алмазная четырехугольная пирамида, угол при вершине 136° .

Нагрузка: 1030 кгс (обычно HV30), удержание 1015 секунд.

Шаг :

Отполируйте поверхность испытательного стержня ($R_a < 0,2$ мкм) и очистите ее (этанолом).

Приложите нагрузку и измерьте диагональ отпечатка (мкм, точность $\pm 0,1$ мкм).

Рассчитайте HV (погрешность $< \pm 50$ HV) и возьмите среднее значение из 35 точек.

Результат : Твердость 1400-2200 HV, например, YG6 ~1500 HV, сверхмелкое зерно ~2000 HV.

Связь с испытательным стержнем :

Используется для проверки твердости испытательных стержней (1400–2200 HV) с целью обеспечения соответствия готовому изделию.

Тестовые бруски не требуют специальной подготовки и могут быть испытаны после полировки для проверки размера зерна и содержания кобальта.

Примечание : Эквивалентно ISO 65071:2005, применимо к обычным и наностержням для испытаний.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 GB/T 3850-2015 Метод определения плотности твердого сплава

Название стандарта : Метод измерения плотности твердого сплава.

Область применения : определяет метод испытания плотности твердого сплава, применимый к испытательным стержням и другим образцам, используемым для оценки пористости и однородности состава.

Требования к испытательному стержню :

Образец : брусок или испытательный стержень, масса >1 г, чистая поверхность, без оксидного слоя.

Размеры : Тестовые стержни (5×5×35 мм или 4×8×32 мм) применимы напрямую.

Метод испытания :

Метод Архимеда :

Оборудование: прецизионные весы (точность ± 0,001 г), деионизированная вода.

Формула: $\rho = m_1 / (m_1 - m_2) \times \rho_{\text{воды}}$, m_1 — сухой вес (г), m_2 — вес в воде (г).

Шаг :

Тестовые стержни были очищены (этанолом) и высушены (80°C, 30 мин).

Сухой вес и вес в воде измерялись 3 раза, и бралось среднее значение.

С поправкой на температуру воды ($\rho_{\text{воды}} \sim 1,0 \text{ г/см}^3$, 20°C), погрешность $\leq \pm 0,01 \text{ г/см}^3$.

Результат : Плотность 14,0-15,0 г/см³, например YG6 $\sim 14,9 \text{ г/см}^3$, YG15 $\sim 14,0 \text{ г/см}^3$.

Связь с испытательным стержнем :

Используется для проверки плотности испытательного стержня (14,015,0 г/см³), отражающей пористость (<0,01%) и точность пропорции.

Испытательный стержень не требует специальной подготовки и может быть напрямую испытан для проверки качества спекания.

Примечание : Эквивалентно ISO 3369:2006, применимо к стандартным и нестандартным испытательным стержням.

2.4 GB/T 3849-2015 Методы испытаний магнитных свойств твердого сплава

Название стандарта : Метод измерения магнитных свойств твердого сплава.

Область применения : определяет косвенный метод определения интенсивности намагничивания и содержания углерода в кобальтовой фазе твердого сплава, применимый к испытательным пруткам и готовым изделиям, используемый для обнаружения η -фазы или свободного углерода.

Требования к испытательному стержню :

Образец : испытательный стержень или небольшой образец (>5×5 мм), чистая поверхность, без окисления.

Размер : Применяется непосредственно к стержням для испытаний на изгиб или прочность.

Метод испытания :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Магнитный тест кобальта :

Оборудование: Магнитометр (точность $\pm 0,1$ эме/г).

Измеряется интенсивность намагничивания (эме/г) и косвенно определяется содержание углерода.

шаг :

Очистите тестовый стержень (этанолом) и высушите его.

Установите магнитометр и измерьте интенсивность намагничивания, повторите 3 раза и возьмите среднее значение.

Содержание углерода оценивалось путем сравнения со стандартной кривой (погрешность $< \pm 0,05\%$).

Результаты : Интенсивность намагничивания 120-150 эме/г, например, YG6 ~150 эме/г, декарбонизация ~120 эме/г.

Связь с испытательным стержнем :

Используется для проверки содержания углерода в испытательном стержне ($6,13 \pm 0,1$ мас. %) и для обнаружения η -фазы (низкая намагничённость) или свободного углерода (высокая намагничённость).

Тестовые стержни не требуют специальной подготовки и могут быть напрямую протестированы для проверки ингредиентов и процесса спекания.

Примечание : Применимо к твердому сплаву на основе кобальта, эквивалентному ISO 3326:2013.

2.5 GB/T 18376-2014 Метод оценки микроструктуры твердого сплава

Название стандарта : Метод оценки микроструктуры твердого сплава.

Область применения : определяет метод наблюдения и оценки микроструктуры твердого сплава, применимый к испытательным пруткам и готовым изделиям, используемый для оценки размера зерна, пористости и дефектов (таких как η -фаза, свободный углерод).

Требования к испытательному стержню :

Образцы : полированные ($Ra < 0,05$ мкм), протравленные (реактив Мураками, 510 сек).

Размер : ломтики стержня ($> 5 \times 5$ мм) или полированный цельный стержень.

Метод испытания :

Оптический микроскоп/СЭМ :

Наблюдались размер зерна (0,52 мкм), пористость ($< 0,01\%$) и распределение фаз.

Стандарт оценки: A02B00C00 (пористость $< 0,01\%$, ISO 4505).

Рентгенодифракционный анализ :

Определяет фазовый состав (например, WC, Co, Co_3W_3C) с чувствительностью 0,1%.

шаг :

Отполируйте тестовый стержень, протравите и очистите (этанолом).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Для измерения размера зерна использовали микроскопическое наблюдение ($50\times 1000\times$) (погрешность $\leq \pm 0,1$ мкм).

Рентгеноструктурный анализ η -фазы/свободного углерода (соотношение $< 1\%$).

Результаты : Размер зерна 0,52 мкм (обычный) или $< 0,5$ мкм (ультрамелкое зерно), η -фаза $< 1\%$.

Связь с испытательным стержнем :

Используется для проверки микроструктуры (зерен, пор, дефектов) испытательного образца с целью обеспечения соответствия готовому продукту.

Испытательные бруски полируются и протравливаются для оценки качества спекания и контроля зерна.

Примечание : Эквивалентно ISO 44991:2008, применимо к нано- и обычным испытательным стержням.

2.6 GB/T 5314-2011 Методы химического анализа твердого сплава

Название стандарта : Методы химического анализа твердого сплава.

Область применения : определяет аналитические методы для таких элементов, как вольфрам, кобальт и углерод в твердом сплаве. Применяется для испытательных стержней и сырья для проверки химического состава.

Требования к испытательному стержню :

Образец : порошок или мелкие кусочки ($> 0,1$ г), тестовый стержень необходимо раздробить (< 100 мкм).

Размер : Прямой отбор проб или нарезка тестовых стержней.

Метод испытания :

Анализ углерода и серы : метод сжигания, измерение CO_2 , определение общего содержания углерода (точность $\pm 0,01\%$).

ICPMS : кислотное растворение, обнаружение W, Co, Cr и т. д. (точность $\pm 0,001\%$).

шаг :

Раздавите тестовый стержень (< 100 мкм) и промойте (деионизированной водой).

Сжигание или растворение, анализ содержания элементов, повторить 3 раза.

Содержание углерода было проверено ($6,13 \pm 0,1$ мас. %) с погрешностью $< \pm 0,05\%$.

Результаты : Углерод $\sim 6,13$ мас.%, Кобальт 615 мас.%, Примеси $< 0,05\%$.

Связь с испытательным стержнем :

Проверить химический состав испытательного прутка (углерод, кобальт) и убедиться в отсутствии обезуглероживания (η -фаза) или науглероживания (свободный углерод).

Для проверки точности ингредиентов и спекания необходимо раздавить тестовый стержень.

Примечание : Применимо к цементированным карбидам на основе кобальта и никеля. Некоторые методы ссылаются на ISO 11876.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.7 GB/T 1482-2010 Определение текучести твердосплавного порошка

Название стандарта : Метод определения текучести порошков твердого сплава.

Область применения : определяет метод испытания текучести порошка твердого сплава, применимый к процессу смешивания и распылительной сушки перед приготовлением испытательных стержней.

Требования к испытательному стержню :

Образец : Порошок после смешивания (D50 50200 мкм), что косвенно влияет на качество заготовки для испытательного стержня.

Размер : Не имеет прямого отношения к испытательному стержню, но влияет на равномерность нажатия.

Метод испытания :

Расходомер Холла :

Оборудование: Стандартная воронка (отверстие 2,5 мм), точность $\pm 0,1$ с.

Измерьте время, необходимое для высыпания 50 г порошка (с/50 г).

шаг :

Высушенный распылением порошок (D50 50200 мкм) был взят и высушен (80°C, 1 ч).

Перелейте в воронку, запишите время вытекания, повторите 3 раза и возьмите среднее значение.

Текучесть: <25 с/50 г (обычный), <20 с/50 г (нанопорошок).

Результаты : YG6 ~25 с/50 г, YG8N ~18 с/50 г.

Связь с испытательным стержнем :

Обеспечить текучесть смешанного порошка (<25 с/50 г), улучшить однородность заготовки (>95%) и уменьшить пористость испытательного стержня (<0,01%).

Косвенно влияет на качество прессования и спекания испытательных стержней.

Примечание : применимо к нано- и обычным порошкам, см. ASTM B213.

2.8 GB/T 5169-2013 Метод испытания пористости твердого сплава

Название стандарта : Метод определения пористости в твердом сплаве.

Область применения : определяет метод испытания пористости твердого сплава, применимый к испытательным пруткам и готовым изделиям, используемым для оценки качества спекания.

Требования к испытательному стержню :

Образцы : полированные (Ra <0,05 мкм), срезы тестовых брусков или целые бруски.

Размер : >5×5 мм, тестовый стержень применим напрямую.

Метод испытания :

Наблюдение под микроскопом :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оборудование: Оптический микроскоп или СЭМ (точность $\pm 0,1$ мкм).

Классификация: Тип А (<25 мкм), Тип В (2550 мкм), Тип С (свободный углерод).

Стандарт: A02B00C00 (пористость <0,01%).

шаг :

Отполируйте щуп и очистите его (этанолом).

Для подсчета количества и размера пор использовалось наблюдение под микроскопом ($100\times 500\times$).

Оценить пористость (погрешность $\leq \pm 0,005\%$).

Результат : Пористость <0,01%, например, образец для испытания HIP <0,005%.

Связь с испытательным стержнем :

Проверьте пористость испытательного стержня (<0,01%), чтобы гарантировать качество процессов спекания и горячего изостатического прессования.

Испытательные прутки полируются для оценки влияния внутренних дефектов на прочность и вязкость.

Примечание : Эквивалентно ISO 4505:1978, применимо к стандартным и нестандартным испытательным стержням.

2.9 GB/T 4334-2020 Метод испытания коррозионной стойкости твердого сплава

Название стандарта : Методы испытаний на коррозионную стойкость твердого сплава.

Область применения : определяет метод испытания коррозионной стойкости твердого сплава, применимый к испытательным пруткам и готовым изделиям, используемым для оценки химической стабильности.

Требования к испытательному стержню :

Образец : Полированный ($R_a < 0,2$ мкм), $> 10\times 10$ мм, подходит для сечений испытательных стержней.

Размер : Тестовый стержень необходимо разрезать или отполировать.

Метод испытания :

Тест погружения :

Среда: 5% HCl (pH 47), температура 60°C, время 168 часов.

Измеряли потерю массы (мг) и рассчитывали скорость коррозии (мм/год, погрешность $\leq \pm 10\%$).

Электрохимическое тестирование :

Оборудование: Электрохимическая рабочая станция, измеряющая потенциал коррозии (В) и плотность тока (мкА/см²).

шаг :

Отполируйте тестовый стержень и очистите его (деионизированной водой).

Погрузите или проведите электрохимический тест, запишите данные, повторите 3 раза.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Рассчитайте скорость коррозии ($<0,01$ мм/год).

Результаты : YG6 $\sim 0,01$ мм/год, YN10 $<0,005$ мм/год.

Связь с испытательным стержнем :

Проверьте коррозионную стойкость испытательных стержней ($<0,01$ мм/год) и оцените влияние η на производительность.

Испытательный стержень необходимо отполировать, чтобы косвенно проверить химический состав и микроструктуру.

Примечание : см. ASTM G31, применимый к сплавам на основе кобальта и никеля.

2.10 GB/T 12444-2006 Метод испытания на износостойкость твердого сплава

Название стандарта : Метод испытания износостойкости твердого сплава.

Область применения : определяет метод испытания износостойкости твердого сплава, применимый к испытательным пруткам и готовым изделиям, используемым для оценки срока службы.

Требования к испытательному стержню :

Образец : Полированный ($Ra <0,2$ мкм), $>10 \times 10$ мм, подходит для сечений испытательных стержней.

Размер : Тестовый стержень необходимо разрезать или отполировать.

Метод испытания :

Испытание на истирание :

Оборудование: Шлифовальный круг (Al_2O_3 , зернистость 60-100 мкм), нагрузка 1020 Н.

Условия: скорость вращения 200-300 об/мин, время 30-60 минут.

Измеряли потерю массы (мг, погрешность $\leq \pm 5\%$).

Износ штифта диска :

Оборудование: Измеритель износа штифта на диске, фрикционный диск (стальной или керамический).

Измерьте объем износа (mm^3).

шаг :

Отполируйте щуп и очистите его (этанолом).

Установите условия, проверьте износ и повторите 3 раза.

Рассчитайте скорость износа (например, $0,01$ $mm^3/H \cdot m$).

Результаты : YG6 $\sim 0,01$ $mm^3/H \cdot m$, YN10 $\sim 0,008$ $mm^3/H \cdot m$.

Связь с испытательным стержнем :

Проверьте износостойкость испытательных стержней и оцените влияние размера зерна и твердости на срок службы.

Испытательный образец необходимо отполировать, чтобы косвенно проверить качество

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроструктуры.

Примечание : см. ASTM B611 и G99 для стандартных и нестандартных испытательных стержней.

3. Косвенно связанные национальные стандарты

Хотя следующие национальные стандарты не применяются напрямую к испытательным образцам, они оказывают важное влияние на процесс подготовки и контроль качества, а также косвенно обеспечивают эксплуатационные характеристики испытательных образцов.

3.1 GB/T 52432008 Марки цементированного карбида

Стандартное наименование : Марки твердого сплава.

Область применения : определяет эксплуатационные характеристики, состав и применение марок твердого сплава (например, YG6, YG15, YN10).

Связь с испытательным стержнем :

Определите рецепты испытательных стержней и целевые показатели производительности, например, YG6 (6% Co, твердость 1500 HV), YG15 (15% Co, KIC 12 МПа·м^{1/2}).

Убедитесь, что тестовый стержень соответствует названию бренда, а погрешность ингредиентов составляет <0,1%.

содержание :

Состав: содержание WC, Co, Ni, углерода 6,13 ± 0,1 мас. %.

Свойства: твердость 1400-2200 HV, прочность на изгиб 1,5-2,5 ГПа.

Примечание : ссылка делается на ISO 513, который содержит контрольные показатели производительности для подготовки испытательных стержней.

3.2 GB/T 34505-2017 Технические требования к получению порошков твердого сплава

Название стандарта : Технические условия на приготовление порошков твердого сплава.

Область применения : Он определяет требования к размеру частиц, чистоте и подготовке порошка цементированного карбида и подходит для дозирования и смешивания испытательных стержней.

Связь с испытательным стержнем :

Обеспечить качество порошка (размер зерна WC 0,12 мкм, чистота >99,9%) и улучшить однородность испытательных стержней (>95%).

Контролируйте содержание кислорода (<0,05%) и избегайте обезуглероживания (η-фазы).

содержание :

Размер частиц: D50 0,12 мкм (обычный), 0,10,4 мкм (нанометр).

Чистота: WC >99,9%, Co >99,9%, примеси <0,01%.

Текучесть: <25 с/50 г (GB/T 1482).

Примечание : Применимо как к нано-, так и к обычным тестовым образцам.

3.3 GB/T 26048-2010 Технические условия на спекание твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Название стандарта : Технические условия на спекание твердого сплава.

Область применения : определяет параметры процесса спекания твердого сплава и применим к спеканию испытательных стержней.

Связь с испытательным стержнем :

Обеспечить качество спекания испытательного стержня (пористость $<0,01\%$, η -фаза $<1\%$).

Контролируйте температуру спекания ($1350-1450^{\circ}\text{C}$, $\pm 5^{\circ}\text{C}$) и атмосферу ($<10^{-3}$ Па).

содержание :

Температура: $1350-1450^{\circ}\text{C}$ (обычная), $1320-1380^{\circ}\text{C}$ (нано).

Степень вакуума: $<10^{-3}$ Па, кислород $<0,01\%$.

ГИП: $1350-1450^{\circ}\text{C}$, 100-150 МПа, пористость $<0,01\%$.

Примечания : Применимо к вакуумному спеканию и процессу горячего изостатического прессования.

4. Соответствие национальных стандартов международным стандартам

Некоторые национальные стандарты эквивалентны международным стандартам (ISO, ASTM) или ссылаются на них, что расширяет глобальную применимость испытаний испытательных стержней:

GB/T 38512015 $\approx$ ISO 3327:2009 (прочность на изгиб).

GB/T 79972017 $\approx$ ISO 65071:2005 (твёрдость по Виккерсу).

GB/T 38502015 $\approx$ ISO 3369:2006 (плотность).

GB/T 38492015 $\approx$ ISO 3326:2013 (магнитные свойства).

GB/T 183762014 $\approx$ ISO 44991:2008 (микроструктура).

GB/T 51692013 $\approx$ ISO 4505:1978 (пористость).

GB/T 43342020 относится к ASTM G31 (коррозионная стойкость).

GB/T 124442006 ссылается на ASTM B611/G99 (стойкость к истиранию).

5. Сочетание подготовки испытательного стержня и национальных стандартов

Подготовка испытательных стержней должна полностью соответствовать вышеуказанным национальным стандартам, а конкретные области применения следующие:

Ингредиенты :

Соответствует **GB/T 52432008** (состав марки, например YG6: 6% Co), **GB/T 53142011** (углерод $6,13 \pm 0,1\%$).

Контроль качества порошка (**GB/T 345052017** , чистота WC $>99,9\%$).

Смешивание :

Обеспечить текучесть (**GB/T 14822010** , <25 с/50 г) и однородность частиц $>95\%$.

подавить :

Холодное изостатическое прессование (200-350 МПа), размер заготовки учитывает усадку (**GB/T 38512015** , например $6,2 \times 6,2 \times 43$ мм).

спекание :

Вакуумное спекание + HIP (**GB/T 260482010** , $1350-1450^{\circ}\text{C}$, пористость $<0,01\%$).

Обработка :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Шлифовка и полировка (GB/T 38512015 , Ra <0,4 мкм; ISO 28079 , насечка 0,2-0,3 мм).

проверять :

Размер: $\pm 0,1$ мм (GB/T 38512015).

Свойства: твердость (GB/T 79972017 , 14002200 HV), плотность (GB/T 38502015 , 14,015,0 г/см³).

Микроструктура: размер зерна 0,52 мкм, η -фаза <1% (GB/T 183762014).

Химический состав: Углерод $\pm 0,05\%$ (GB/T 53142011 , GB/T 38492015).

6. Практические примеры применения

Испытательный стержень на изгиб YG6 :

Стандарт : GB/T 38512015 (размер 5×5×35 мм, Ra <0,4 мкм), GB/T 79972017 (твердость 1500 HV), GB/T 38492015 (углерод 6,13%).

Подготовка : WC 94 мас.%, Co 6 мас.%, спечено при 1400°C, шлифовано Ra < 0,4 мкм.

Результаты : прочность на изгиб 2,0 ГПа, твердость 1500 HV, стойкость к резанию 2 часа.

Испытательный образец на прочность YG15 :

Стандарты : ISO 28079 (размер 4×8×32 мм, насечка 0,25 мм), GB/T 38502015 (плотность 14,0 г/см³), GB/T 183762014 (размер зерна ~1,8 мкм).

Подготовка : WC 85 мас.%, Co 15 мас.%, 1450°C HIP, искровой надрез.

Результаты : KIC 12 МПа·м^{1/2}, плотность 14,0 г/см³, срок службы при продавливании 120 000 раз.

Тестовый стержень YG8N Nano :

Стандарты : GB/T 38512015 (сопротивление изгибу), GB/T 183762014 (зерно <0,5 мкм), GB/T 53142011 (углерод $\pm 0,03\%$).

Подготовка : WC 0,20,4 мкм, спеченный при 1350°C, надрез фемтосекундным лазером.

Результаты : твердость 2000 HV, прочность на изгиб 2,2 ГПа, срок службы авиационного инструмента 4 часа.

7. Заключение

Подготовка и испытание испытательных стержней из цементированного карбида должны соответствовать следующим основным национальным стандартам:

GB/T 38512015 : Испытательный стержень для определения прочности на изгиб (5×5×35 мм, Ra <0,4 мкм).

GB/T 79972017 : Твердость (1400 - 2200 HV).

GB/T 38502015 : Плотность (14,015,0 г/см³).

GB/T 38492015 : Магнитные свойства (углерод $\pm 0,05\%$).

GB/T 183762014 : Микроструктура (размер зерна 0,52 мкм, η -фаза <1%).

GB/T 53142011 : Химический состав (углерод 6,13 $\pm 0,1\%$).

GB/T 51692013 : Пористость (<0,01%).

GB/T 43342020 : Коррозионная стойкость (<0,01 мм/год).

GB/T 124442006 : Стойкость к истиранию ($\sim 0,01$ мм³/Н · м).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 1482-2010 : Текучесть порошка (<25 с/50 г).

GB/T 52432008 : Эффективность бренда.

GB/T 34505-2017 : Приготовление порошка.

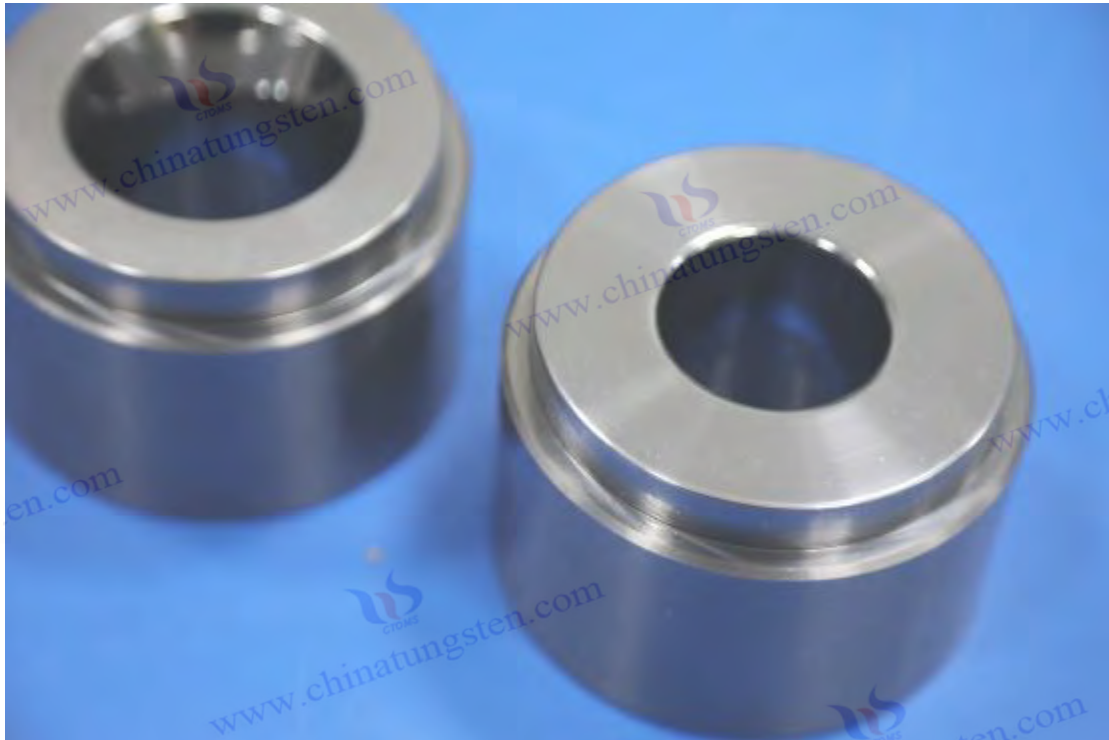
GB/T 260482010 : Процесс спекания.

Эти стандарты охватывают спецификации (допуск $\pm 0,1$ мм), эксплуатационные характеристики (твердость, прочность, ударная вязкость), подготовку (ингредиенты, спекание, обработка) и проверку (микроструктура, химический состав) испытательных стержней, обеспечивая постоянство эксплуатационных характеристик испытательных стержней (отклонение <5%). Некоторые национальные стандарты эквивалентны ISO (например, GB/T 3851 $\approx$ ISO 3327), которые применимы к стандартным, нано- и нестандартным испытательным стержням. В будущем интеллектуальный мониторинг и автоматизированная обработка еще больше повысят эффективность внедрения национальных стандартов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



GB/T 3851-2015 Испытательный стержень из карбида вольфрама на изгиб

1 Область применения

Этот стандарт определяет подготовку, требования к размерам, методы испытаний и соответствующие технические требования к стержням для испытания прочности на изгиб из цементированного карбида. Этот стандарт применим к материалам и изделиям из цементированного карбида с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) в качестве связующей фазы. Он используется для определения прочности на изгиб как важного показателя для оценки механических свойств материалов. Этот метод подходит для испытаний производительности при контроле качества, приемке продукции и исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на твердые сплавы на основе не кобальта или материалы, содержащие значительные неметаллические включения.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 3848 Определение содержания кобальта в твердом сплаве

GB/T 3850 Метод определения коэрцитивной силы твердого сплава

GB/T 5313 Методы испытаний на трехточечный и четырехточечный изгиб металлических материалов при комнатной температуре

ISO 3327:2009 Твердый сплав. Определение прочности на изгиб

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 4505:1978 硬质合金。准备试样用于测试抗弯强度。

3 术语和定义

本标准采用下列术语和定义。

3.1 抗弯强度:

最大应力，试样在三点或四点弯曲试验中抗弯。单位：MPa (兆帕斯卡)，反映材料抵抗破坏的能力。

3.2 硬质合金 — 由碳化钨 (WC) 作为硬质相和钴 (Co) 作为粘结相，通过粉末冶金工艺制成的材料。

作为硬质相和钴 (Co) 作为粘结相，通过粉末冶金工艺制成的材料。

3.3 试验试样

符合标准要求的试样，用于测试抗弯强度，具有规定的尺寸和表面质量。

3.4 跨距:

试样在测试时的跨距，单位为 mm。

4 原理

抗弯强度 — 材料抵抗破坏的能力。通过三点或四点弯曲试验测定。试样放置在支撑点上，施加集中或均匀载荷。记录最大力，根据试样尺寸和材料特性计算抗弯强度。

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{三点弯曲})$$

$$\sigma_f = \frac{FL}{bh^2} \quad (\text{四点弯曲})$$

其中:

- σ_f : 抗弯强度 (MPa);
- F : 断裂载荷 (N);
- L : 跨距 (mm);
- b : 试样宽度 (mm);
- h : 试样高度 (mm);

表面缺陷、晶粒尺寸和孔隙率对测试结果有显著影响。

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

результаты, поэтому качество подготовки испытательных стержней необходимо строго контролировать.

5. Подготовка испытательного стержня

5.1 Требования к материалам

Испытательные стержни должны быть изготовлены из той же партии сырья, что и испытываемый карбид вольфрама.

Отклонение содержания кобальта составляет $<0,1$ мас.%, а колебание размера зерна — $<5\%$.

5.2 Размеры и допуски

- **形状:** 矩形截面试样。
- **标准尺寸:**
 - 长度: 大于跨距 + $2 \times$ 支承点直径 (通常 20-50 mm 余量)。
 - 宽度 (b): (6.0 ± 0.1) mm 或 (10.0 ± 0.1) mm。
 - 高度 (h): (2.0 ± 0.05) mm, (3.0 ± 0.05) mm 或 (5.0 ± 0.1) mm。
- **跨距 (L):** 20 mm、30 mm 或 40 mm, 视试样高度选择 (通常 $L/h = 10 \sim 16$)。
- **表面质量:** 表面光滑, 无裂纹 ($<5 \mu\text{m}$)。划痕或孔隙 (孔隙率 $<0.05\%$)。边缘倒角 0.1-0.2 mm。

5.3 Процесс подготовки

Прессование: Для обеспечения однородности плотности ($>99\%$) применяется изостатическое прессование или одноосное прессование под давлением 150-200 МПа.

Спекание: температура 1350-1500°C, время 1-2 часа, с использованием вакуума или водородной защитной атмосферы.

Обработка: алмазным шлифовальным кругом или электроискровой обработкой до указанного размера, шероховатость поверхности $Ra \leq 0,4$ мкм.

Проверка: Каждая партия испытательных прутков подвергается визуальному осмотру и измерению размеров, а 5% испытательных прутков случайным образом отбираются для анализа плотности и микроструктуры.

5.4 Количество тестовых стержней

Тестовые стержни для каждой партии, не менее 5 из которых используются для тестирования, а остальные — в качестве резервных.

6 Инструменты и оборудование

6.1 Универсальная испытательная машина для материалов

с диапазоном нагрузки 0-50 кН, точностью $\pm 0,5\%$, оснащенная приспособлением для трехточечного или четырехточечного изгиба.

Для измерения размеров испытательного стержня используют микрометр с точностью измерения $\pm 0,01$ мм.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Для контроля поверхностных дефектов используют металлографический микроскоп с увеличением 200х-500х.

6.4

Температура среды испытания поддерживается в термобоксе на уровне 20–25 °С, а влажность <60%.

7 методов испытаний

7.1 Условия испытаний

Температура окружающей среды: 20-25°C, колебание температуры $\leq \pm 2^\circ\text{C}$.

Относительная влажность: <60%, чтобы предотвратить впитывание влаги тестовым стержнем.

Скорость нагружения: 0,5-1,0 мм/мин (регулируется размером испытательного стержня).

7.2 Установка испытательного стержня

Поместите испытательный стержень на приспособление для изгиба, совместите точку опоры с длиной испытательного стержня и установите пролет в соответствии со стандартом.

Убедитесь, что испытательный стержень не наклонен, а точки опоры равномерно соприкасаются.

7.3 Этапы тестирования

1. 测量试棒宽度 (W) 和高度 (H), 取 3 点平均值。
2. 安装试棒, 调整跨距 (L), 记录初始状态。
3. 以指定速度加载, 直至试棒断裂, 记录最大载荷 (F_{max})。
4. 重复测试 5-10 根试棒, 取平均值作为抗弯强度。
5. 检查断裂面, 记录断裂模式 (脆性或韧性)。

7.4 Обработка данных

Расчет прочности на изгиб: 计算抗弯强度 (σ), 保留 1 位小数。

Если результат одного испытательного стержня отклоняется от среднего значения более чем на 10%, он должен быть отбракован и пересчитан.

Стандартные отклонения составляют $\pm 5\%$.

8 результатов Выражение

Прочность на изгиб измеряется в МПа с точностью до одной десятой (например, 2200,5 МПа).

Отчет об испытаниях должен включать:

- a) Номер стандарта: GB/T 3851-2015; b) Описание испытательного стержня: марка, партия, размер; c) Условия испытаний: температура, влажность, диапазон; d) Модель прибора и статус калибровки; e) Результаты: среднее значение и стандартное отклонение прочности на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

изгиб; f) Описание отклонения: если результат отклоняется более чем на 10%, объясните причину; g) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.; h) Испытатель: подпись.

9. Точность и предвзятость

9.1 Точность

Повторяемость: Отклонение прочности на изгиб, измеренное одним и тем же оператором и на одном и том же оборудовании, составляет $<5\%$.

Воспроизводимость: Отклонение прочности на изгиб, измеренное разными лабораториями, составляет $<10\%$.

9.2 Предвзятость

Погрешность прибора: $\pm 0,5\%$. Влияние погрешности нагрузки $<1\%$.

Дефекты испытательного образца: Поверхностные трещины или поры приводят к занижению оценки прочности на 5–15%.

Неравномерная нагрузка: Эксцентричная нагрузка может привести к отклонению результатов на 2–5%.

10 Факторов Влияния

10.1 Размер зерна:

Мелкие зерна (0,2–0,5 мкм) имеют прочность на изгиб 2200–2500 МПа, крупные зерна (>5 мкм) имеют прочность на изгиб 1800–2000 МПа.

10.2 Содержание кобальта

Содержание кобальта составляет 6-15%. С увеличением содержания прочность на изгиб немного снижается (5-10%), но ударная вязкость увеличивается.

10.3

Пористость Пористость $> 0,1\%$ снизит прочность на 10–20%, а плотность необходимо контролировать на уровне $> 99,5\%$.

10.4 Качество поверхности

Царапины или микротрещины приводят к локальной концентрации напряжений и снижению прочности на 5–10%.

10.5 Условия испытаний

Высокая температура ($>200^{\circ}\text{C}$) снижает прочность на 5-15%. Влажность влияет на $<2\%$.

11. Применение результатов испытаний

11.1 Классификация производительности

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

Прочность на изгиб >2200 МПа: подходит для инструментов высокой твердости.
Прочность на изгиб 1800-2200 МПа: подходит для форм средней и высокой прочности.

11.2 Оптимизация процесса

Низкая прочность указывает на крупнозернистость или высокую пористость. Отрегулируйте параметры спекания (1350-1450°C).

11.3 Контроль качества

Проверьте, соответствует ли прочность на изгиб проектным требованиям, например, целевому значению YG6 2300±100 МПа.

11.4 Пример

При резании прочность на изгиб YG8 2100 МПа обеспечивает срок службы инструмента >3 часов.

12 Заметок

12.1 Калибровка прибора

Перед испытанием откалибруйте испытательную машину с погрешностью ≤±0,5%.

12.2 Качество испытательного образца

Убедитесь, что испытательный образец не имеет дефектов и отклонение размеров составляет ≤±0,1 мм.

12.3

Температура в помещении для испытаний поддерживается на уровне 20–25 °C, а влажность <60%.

12.4 Меры предосторожности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы избежать разбрызгивания из-за поломки испытательного стержня.

13 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные значения прочности на изгиб

Таблица А.1 Прочность на изгиб обычных марок твердого сплава

Бренд	Содержание кобальта (мас.%)	Размер зерна (мкм)	Прочность на изгиб (МПа)
YG6	6	1-2	2200-2400
YG8	8	2-3	2000-2200
YG10	10	2-4	1800-2000

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Погрешность прибора

$\pm 0,5\%$ Погрешность нагрузки влияет на прочность $< 1\%$.

В.2 Дефект

пористости испытательного стержня $0,1\%$ приводит к снижению прочности на 10% .

В.3 Влияние окружающей среды Высокая температура

200°C приводит к снижению прочности на $5-15\%$.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать четырехточечный изгиб для улучшения равномерности напряжения и снижения влияния поверхностных дефектов.

С.2 Использовать высокоточную обработку на станках с ЧПУ для обеспечения отклонения размера испытательного стержня $< \pm 0,05$ мм. С.3 Внедрить ультразвуковой контроль для обнаружения внутренних микротрещин.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний прочности на изгиб твердого сплава YG8

Номер образца	Ширина(мм)	Высота(мм)	Пролет (мм)	Разрывная нагрузка (Н)	Прочность на изгиб (МПа)	Среднее значение (МПа)
YG8-001	6.02	2.01	20	4500	2110	2090
YG8-002	6.01	2.00	20	4400	2070	2090
YG8-003	6.00	2.02	20	4600	2140	2090



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 7997-2017 Метод определения твердости твердого сплава

1 Область применения

Этот стандарт определяет метод испытания твердости материалов и изделий из твердого сплава. Этот метод применим к твердым сплавам (таким как YG6, YG8 и т. д.) с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) в качестве связующей фазы, и используется для измерения твердости методом твердости по Виккерсу (HV) или Роквеллу (HRA). Этот метод может использоваться для контроля качества в процессе производства, приемки продукции и тестирования производительности в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на твердые сплавы и неметаллические материалы, не содержащие кобальт.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 230.1 Испытание твердости металлических материалов по Роквеллу. Часть 1: Метод испытания

GB/T 231.1 Испытание твердости по Бринеллю для металлических материалов. Часть 1: Метод испытания

GB/T 3848 Определение содержания кобальта в твердом сплаве

GB/T 3850 Метод определения коэрцитивной силы твердого сплава

ISO 3738-1:1982 Метод испытания твердого сплава на твердость по Виккерсу

ISO 6507-1:2005 Испытание твердости по Виккерсу для металлических материалов Часть 1: Метод испытания

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Твёрдость

Способность твёрдого сплава противостоять вдавливанию или царапанию, обычно выражаемая твёрдостью по Виккерсу (HV) или твёрдостью по Роквеллу (HRA).

3.2 Твердый сплав — это композиционный материал, изготовленный из карбида вольфрама (WC)

в качестве твердой фазы и кобальта (Co) в качестве связующей фазы с помощью процесса порошковой металлургии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Твердость по Виккерсу (HV)

— это значение твердости, вычисляемое путем вдавливания правильного тетраэдрического алмазного индентора в поверхность образца под определенной нагрузкой и измерения диагональной длины отпечатка.

3.4 Твердость по Роквеллу (HRA)

— это значение твердости, вычисляемое путем вдавливания алмазного конического индентора в поверхность образца под определенной нагрузкой и измерения глубины проникновения.

4 Принцип

При испытании твердости твердого сплава применяется определенная нагрузка, измеряется размер или глубина отпечатка на поверхности материала под действием индентора и рассчитывается значение твердости.

Твёрдость по Виккерсу (HV)

Используйте обычный тетраэдрический алмазный индентор (угол при вершине 136°), чтобы сформировать квадратное углубление под нагрузкой, и измерьте длину диагонали. Формула расчета:

$$HV = \frac{1.8544 F}{d^2}$$

F : испытательная нагрузка (Н);

d: Средняя диагональная длина углубления (мм).

Твёрдость по Роквеллу (HRA)

Алмазный конусный индентор (угол при вершине 120°, радиус вершины 0,2 мм) использовался для приложения начальной нагрузки (98,07 Н) и полной нагрузки (588,4 Н), и измерялась разница глубины вдавливания. Формула расчета:

$$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$$

Где: h: разница в глубине проникновения между начальной нагрузкой и полной нагрузкой (мм).

5. Инструменты и оборудование

5.1 Твердомер по Виккерсу

Диапазон нагрузок: 49,03 Н (5 кгс), 98,07 Н (10 кгс), 294,2 Н (30 кгс).

Точность: погрешность нагрузки ±0,5%, погрешность измерения микроскопа ±0,001 мм.

5.2 Твердомер по Роквеллу

Соответствует GB/T 230.1, шкала А, нагрузка 588,4 Н (60 кгс).

Точность: ±0,5 HRA.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Тестовый блок

Стандартные образцы твердости для калибровки приборов, отклонение $< \pm 1$ HRA или ± 10 HV.

5.4 Алмазный шлифовальный круг

Используется для полировки поверхности образцов, шероховатость поверхности $Ra \leq 0,2$ мкм.

5.5 Микроскоп

Увеличение 100x-500x, используется для измерения размера отпечатка.

5.6 Ящик с постоянной температурой

Температура среды проведения испытаний поддерживалась на уровне 20–25 °C, а влажность составляла $< 60\%$.

6. Образцы

6.1 Требования к образцам

Форма: Плоский образец, толщина ≥ 2 мм, площадь поверхности ≥ 10 мм $\times$ 10 мм.

Состояние поверхности: Полированная до $Ra \leq 0,2$ мкм, без трещин (< 5 мкм), пор (пористость $< 0,05\%$) и оксидного слоя.

Однородность: отклонение состава $< 0,1$ мас.%, колебание размера зерна $< 5\%$.

Количество: Не менее 3 экземпляров в партии.

6.2 Подготовка образца

Образцы вырезаются из твердосплавных заготовок или готовых изделий, чтобы избежать возникновения напряжений (< 100 МПа).

Отполируйте поверхность алмазным шлифовальным кругом, чтобы обеспечить плоскостность $< 0,01$ мм.

Образцы промывали этанолом, высушивали и помещали в эксикатор.

7 методов испытаний

7.1 Условия испытаний

Температура окружающей среды: 20-25°C, колебание температуры $\leq \pm 2^\circ\text{C}$.

Относительная влажность: $< 60\%$, избегать поглощения влаги образцом.

Калибровка прибора: калибровка с использованием стандартных тестовых блоков, отклонение $\leq \pm 1$ HRA или ± 10 HV.

7.2 Испытание на твердость по Виккерсу

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.1 Выбор нагрузки

Нормальная нагрузка: 294,2 Н (30 кгс).

Если образец тонкий (< 3 мм), можно использовать 98,07 Н (10 кгс).

7.2.2 Этапы тестирования

Поместите образец на стол твердомера, убедившись, что поверхность ровная.

Выберите нагрузку, примените и удерживайте 10–15 секунд.

Измерьте длины двух диагоналей углубления и возьмите среднее значение (точность $\pm 0,001$ мм).

На каждом образце необходимо испытать 3 точки, а расстояние между центрами соседних углублений должно быть ≥ 5 -кратной длины диагонали.

Рассчитайте значение HV и сохраните целое число.

7.3 Испытание на твердость по Роквеллу

7.3.1 Выбор нагрузки

Общая нагрузка: 588,4 Н (60 кгс).

Начальная нагрузка: 98,07 Н (10 кгс).

7.3.2 Этапы тестирования

Поместите образец на стол твердомера, убедившись, что поверхность ровная.

Приложите начальную нагрузку, а затем после стабилизации указателя приложите полную нагрузку и удерживайте ее в течение 5–10 секунд.

Снимите общую нагрузку и считайте значение HRA.

На каждом образце испытывали по 3 точки, расстояние между центрами соседних отпечатков составляло ≥ 2 мм.

Рассчитайте среднее значение HRA, оставив один знак после запятой.

7.4 Обработка данных

За окончательное значение твердости принимают три контрольные точки.

Если отклонение в одной точке составляет $> 5\%$ (например, отклонение HRA $> 0,5$ или отклонение HV > 50), удалите ее и повторите испытание.

8 результатов Выражение

Твердость по Виккерсу выражается в HV и выражается целыми числами (например, HV 1500).

Твердость по Роквеллу выражается в единицах HRA с одним десятичным знаком (например, HRA 91,5).

Отчет об испытаниях должен включать:

- a) Номер стандарта: GB/T 7997-2017; b) Описание образца: марка, партия, размер; c) Метод испытания: твердость по Виккерсу или Роквеллу; d) Условия испытания: температура, влажность, нагрузка; e) Модель прибора и статус калибровки; f) Результаты: среднее

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

значение твердости, стандартное отклонение; g) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.;
h) Испытатель: подпись.

9. Точность и предвзятость

9.1 Точность

Повторяемость: Отклонение твердости, измеренное одним и тем же оператором и на одном и том же оборудовании, составляет <2% (например, HRA <0,2, HV <30).

Воспроизводимость: Отклонение твердости между разными лабораториями составляет <5%.

9.2 Предвзятость

Погрешность прибора: $\pm 0,5\%$. Влияние погрешности нагрузки <1%.

Поверхность образца: Шероховатость $R_a > 0,2$ мкм приводит к занижению твердости на 2-3%.

Операционная ошибка: Результат может отклоняться на 1–2 %, если индентор не вертикальен или время нагрузки недостаточно.

10 Факторов Влияния

10.1 Размер зерна

Мелкие зерна (0,2–0,5 мкм) имеют более высокую твердость (HRA 91–93), тогда как крупные зерна (>5 мкм) имеют более низкую твердость (HRA 88–90).

10.2 Содержание кобальта

Увеличение содержания кобальта (6–15%) снижает твердость (HRA уменьшается на 1–2 единицы) за счет более мягкой связующей фазы.

10.3

Пористость Пористость > 0,1% снизит твердость на 3–5%, а плотность необходимо контролировать на уровне > 99,5%.

10.4 Качество поверхности

Царапины или микротрещины могут вызывать локальные колебания твердости на 2–3%.

10.5 Условия испытаний

Высокие температуры (>200°C) снижают твердость на 1-3%. Влажность влияет на твердость <1%.

11. Применение результатов испытаний

11.1 Классификация производительности

HRA >91: Подходит для инструментов высокой твердости (например, сверл для печатных плат, срок службы >4 часов).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HRA 88-91: Подходит для форм с высокой прочностью (например, горнодобывающие буровые коронки, срок службы >200 часов).

11.2 Оптимизация процесса

Низкая твердость указывает на крупнозернистость или слишком высокое содержание кобальта. Отрегулируйте параметры спекания (1350-1450°C) или добавьте ингибиторы зерна (например, VC 0,2-0,5 мас. %).

11.3 Контроль качества

Убедитесь, что твердость соответствует проектным требованиям, например, целевому показателю YG6 HRA 91±0,5.

11.4 Пример

При резке авиационной стали инструмент YG8 HRA 90.5 обеспечивает износостойкость и срок службы 3,5 часа.

12 Заметок

12.1 Калибровка прибора

Перед испытанием откалибруйте твердомер до отклонения < ±1 HRA или ±10 HV.

12.2 Качество образца

Убедитесь, что поверхность образца отполирована с шероховатостью $Ra \leq 0,2$ мкм.

12.3

Температура в помещении для испытаний поддерживается на уровне 20–25 °C, а влажность <60%.

12.4 Меры безопасности

Избегайте попадания брызг из напорной головки во время работы и надевайте защитные очки.

13 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные значения твердости

Таблица А.1 Твердость обычных марок твердого сплава

Бренд	Содержание кобальта (мас.%)	Размер зерна (мкм)	Твёрдость по Виккерсу (HV)	Твёрдость по Роквеллу (HRA)
YG6	6	1-2	1500-1600	90,5-91,5
YG8	8	2-3	1400-1500	89,0-90,0
YG10	10	2-4	1300-1400	88.0-89.0

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Погрешность прибора

$\pm 0,5\%$ Погрешность нагрузки влияет на твердость $< 1\%$.

В.2 Шероховатость поверхности

образца Ra 0,4 мкм приводит к занижению твердости на 2%.

В.3 Влияние окружающей среды

Высокая температура 200°C приводит к снижению твердости на 1–3%.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Внедрить микротвердомер Виккерса, подходящий для тестирования небольших участков.

С.2 Использовать технологию наноиндентирования для повышения точности тестирования твердости (погрешность $< 0,5\%$). С.3 Внедрить онлайн-систему тестирования твердости для повышения эффективности производства.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний твердости твердого сплава YG8

Номер образца	Нагрузка(H)	Диагональ отступа (мм)	Твёрдость по Виккерсу (HV)	Твёрдость по Роквеллу (HRA)	Средний показатель HRA
YG8-001	294.2	0,135	1450	89,8	89,7
YG8-002	294.2	0,138	1420	89,5	89,7
YG8-003	294.2	0,136	1440	89,7	89,7

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



GB/T 3850-2015 Метод определения плотности твердого сплава

1 Область применения

В настоящем стандарте описывается метод определения плотности твердого сплава. Этот метод применим к твердосплавным материалам и изделиям (таким как YG6, YG8 и другие марки) с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) в качестве связующей фазы. Плотность (единица: г/см³) определяется методом вытеснения жидкости или методом вытеснения газа. Этот метод может использоваться для контроля качества в процессе производства, приемки продукции и испытаний производительности в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на материалы, содержащие значительную пористость или неметаллические включения.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 3848 Определение содержания кобальта в твердом сплаве

GB/T 3851-2015 Испытательный стержень из цементированного карбида на прочность при изгибе

GB/T 1423 Метод определения плотности металлических материалов

ISO 3369:2006 Метод определения плотности твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ISO 3696 Технические условия на воду для аналитических лабораторий

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Плотность:

масса твердого сплава на единицу объема, выраженная в г/см³, которая отражает плотность и однородность состава материала.

3.2 Твердый сплав — это композиционный материал, изготовленный из карбида вольфрама (WC)

в качестве твердой фазы и кобальта (Co) в качестве связующей фазы с помощью процесса порошковой металлургии.

3.3 Метод вытеснения жидкости:

Этот метод использует закон Архимеда для определения объема образца путем вытеснения его жидкостью (обычно водой или этанолом).

3.4 Метод вытеснения газа:

метод измерения объема образца путем вытеснения инертного газа (например, гелия).

4 Принцип

Определение плотности твердого сплава основано на соотношении массы и объема. Метод вытеснения жидкости использует закон Архимеда для расчета объема и плотности путем измерения массы образца в воздухе и взвешенной массы в жидкости:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

其中:

- ρ : 试样密度 (g/cm³);
- m_1 : 试样在空气中的质量 (g);
- m_2 : 试样在液体中的质量 (g);
- ρ_0 : 液体密度 (g/cm³).

Метод замещения газа использует разницу объемов инертного газа внутри и снаружи образца для расчета объема образца, а затем определяет плотность на основе массы. Пористость и поверхностная адсорбция будут влиять на результаты, поэтому условия испытаний должны строго контролироваться.

5. Инструменты и оборудование

5.1 Аналитический баланс

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

Точность $\pm 0,0001$ г, используется для измерения массы образца.
Оснащен подвесным устройством, подходящим для замены жидкости.

5.2 Измеритель плотности

Измеритель плотности жидкости методом вытеснения, точность $\pm 0,01$ г/см³.
Измеритель плотности газа (например, гелиевый плотномер), точность $\pm 0,001$ г/см³.

5.3 Водяная баня с постоянной температурой

Диапазон регулирования температуры составляет 20–25 °C с точностью $\pm 0,1$ °C.

5.4 Ультразвуковой очиститель

Используется для очистки поверхности образца и удаления масляных пятен и пузырьков.

5.5 Стакан или мерный цилиндр

Емкость 50 мл или 100 мл в соответствии со стандартом ISO 4788.

5.6 Сушильная печь

Температура 105°C, используется для сушки образца.

6 Реагентов

6.1 Деионизированная вода

Соответствует стандарту первичной воды ISO 3696, плотность 0,9982 г/см³ (20°C).

6.2 Этанол

Аналитическая чистота, концентрация $\geq 99,5\%$, плотность 0,7893 г/см³ (20°C).

6.3 Инертные газы

Гелий высокой чистоты (99,999%), используемый для метода замещения газа.

7 образцов

7.1 Требования к образцам

Форма: куб, цилиндр или неправильный блок, длина стороны или диаметр ≥ 5 мм, масса ≥ 5 г.
Состояние поверхности: Гладкая поверхность, без трещин (< 5 мкм), пор (пористость $< 0,05\%$) или масляных пятен, при необходимости отполированная.
Однородность: отклонение состава $< 0,1$ мас.%, колебание размера зерна $< 5\%$.
Количество: Не менее 3 экземпляров в партии.

7.2 Подготовка образца

Образцы вырезаются из твердосплавных заготовок или готовых изделий, чтобы избежать возникновения напряжений (< 100 МПа).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Для обработки поверхности используйте алмазный шлифовальный круг или полировальную машину с шероховатостью $Ra \leq 0,4$ мкм.

Образцы очищали ультразвуком в этаноле в течение 5 минут, высушивали (105 °C, 30 минут) и охлаждали до комнатной температуры.

8 методов испытаний

8.1 Метод замены жидкости

8.1.1 Условия испытаний

Температура жидкости: $20 \pm 0,5$ °C, запишите плотность жидкости (вода 0,9982 г/см³, этанол 0,7893 г/см³).

Влажность окружающей среды: <60%.

8.1.2 Этапы тестирования

Взвесьте массу образца на воздухе с точностью $\pm 0,0001$ г.

Образец подвешивают на тонкой проволоке, погружают в деионизированную воду или этанол, и взвешивают массу подвешенного образца.

Убедитесь, что на образце нет пузырьков, и при необходимости удалите их с помощью ультразвука.

Повторите измерение 3 раза и возьмите среднее значение.

Рассчитаем плотность: $\rho = \frac{m_1}{V} = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \times \rho_0$

8.2 Метод вытеснения газа

8.2.1 Условия испытаний

Температура: $20 \pm 0,5$ °C, давление стабильное.

Калибровка прибора: калибровка с использованием стандартных образцов.

8.2.2 Этапы тестирования

Поместите образец в камеру для образцов измерителя плотности и закройте ее.

Вводится гелий высокой чистоты и измеряется объем образца (точность $\pm 0,01$ см³).

Взвесьте массу образца (m_1) с точностью $\pm 0,0001$ г.

Рассчитаем плотность: $\rho = \frac{m_1}{V}$

Где V — объем, измеренный путем вытеснения газа (см³).

Повторите измерение 3 раза и возьмите среднее значение.

8.3 Обработка данных

В качестве окончательного результата были взяты три образца.

Если отклонение в одной точке составляет >0,5% (например, 14,90 г/см³ изменяется на 15,00 г/см³), удалите его и пересчитайте.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Стандартные отклонения составляют $\pm 0,1\%$.

9 Результаты Выражение

выражается в г/см^3 с двумя десятичными знаками (например, $14,95 \text{ г/см}^3$).

Отчет об испытаниях должен включать:

а) Номер стандарта: GB/T 3850-2015; б) Описание образца: марка, партия, размер; в) Метод испытания: метод вытеснения жидкости или метод вытеснения газа; г) Условия испытания: температура, влажность, тип жидкости/газа; д) Модель прибора и статус калибровки; е) Результаты: среднее значение плотности, стандартное отклонение; г) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.; з) Испытатель: подпись.

10. Точность и предвзятость

10.1 Точность

Повторяемость: Отклонение плотности, измеренное одним и тем же оператором и на одном и том же оборудовании, составляет $< 0,2\%$.

Воспроизводимость: отклонение плотности между разными лабораториями составляет $< 0,5\%$.

10.2 Предвзятость

Погрешность прибора: $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$ (жидкостный метод), $\pm 0,001 \text{ г/см}^3$ (газовый метод).

Поверхность образца: Прилипание пузырьков или масляные пятна приводят к занижению плотности на $0,1\text{--}0,3\%$.

Температура жидкости: $\pm 1^\circ\text{C}$ Отклонение температуры влияет на плотность на $< 0,02\%$.

11 Факторов Влияния

11.1

Пористость Пористость $> 0,1\%$ снизит плотность на $0,2\text{--}0,5 \text{ г/см}^3$, плотность следует контролировать на уровне $> 99,5\%$.

11.2 Содержание кобальта

Увеличение содержания кобальта ($6\text{--}15\%$) увеличивает плотность (примерно $0,1 \text{ г/см}^3 / 5\% \text{ Co}$), но на это влияет баланс углерода.

11.3 Размер зерна

Мелкие зерна ($0,2\text{--}0,5 \text{ мкм}$) имеют немного более высокую плотность ($< 0,1 \text{ г/см}^3$), тогда как крупные зерна ($> 5 \text{ мкм}$) имеют более низкую плотность из-за влияния пор.

11.4 Состояние поверхности

Неполированная поверхность или микротрещины приводят к колебаниям плотности $0,05\text{--}0,1 \text{ г/см}^3$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.5 Условия испытаний

Высокая температура ($>50^{\circ}\text{C}$) или влажность ($>70\%$) могут вызвать изменение плотности жидкости на $<0,1\%$.

12. Применение результатов испытаний

12.1 Контроль качества

Убедитесь, что плотность соответствует проектным требованиям, например, целевое значение YG6 составляет $14,90\pm 0,10\text{ г/см}^3$.

12.2 Оптимизация процесса

Низкая плотность указывает на недостаточное спекание или высокую пористость. Отрегулируйте температуру ($1350\text{--}1450^{\circ}\text{C}$) или давление.

12.3 Прогнозирование характеристик

Плотность $> 14,8\text{ г/см}^3$ соответствует высокой твердости ($\text{HRA} > 90$), тогда как плотность $< 14,5\text{ г/см}^3$ указывает на пониженную прочность.

12.4 Пример

При производстве глубоководных буровых долот сплав YG8 плотностью $14,70\text{ г/см}^3$ обеспечивается твердость HRA 90 и срок службы >300 часов.

13. Заметок

13.1 Калибровка прибора

Перед испытанием откалибруйте плотномер с отклонением $< \pm 0,01\text{ г/см}^3$.

13.2 Качество образца

: Убедитесь, что на образце нет пузырьков, а поверхность отполирована.

13.3 Температура в помещении для испытаний поддерживается на уровне $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$, а влажность $<60\%$.

13.4 Меры безопасности

Избегайте разбрызгивания жидкости во время работы и надевайте защитные очки.

14 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные значения плотности

Таблица А.1 Плотность обычных марок твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Бренд	Содержание кобальта (мас.%)	Размер зерна (мкм)	Плотность (г/см³)
YG6	6	1-2	14.85-14.95
YG8	8	2-3	14.65-14.75
YG10	10	2-4	14.40-14.50

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Погрешность прибора:

$\pm 0,01$ г/см³ (жидкостный метод), $\pm 0,001$ г/см³ (газовый метод).

В.2 Дефект

пористости образца 0,1% приводит к снижению плотности на 0,2 г/см³.

В.3 Влияние окружающей среды

температура $\pm 1^\circ\text{C}$ вызывает отклонение плотности $< 0,02\%$.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать высокоточный измеритель плотности газа с погрешностью $< \pm 0,0005$ г/см³.

С.2

Использовать вакуумную сушку для удаления поверхностных пузырьков и повышения согласованности измерений. С.3 Внедрить рентгеновскую томографию (КТ) для обнаружения внутренних пор.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний плотности твердого сплава YG8

Номер образца	Качество воздуха (г)	Взвешенная масса (г)	Плотность (г/см³)	Среднее значение (г/см³)
YG8-001	5.123	4.578	14.72	14.70
YG8-002	5.126	4.582	14.69	14.70
YG8-003	5.125	4.580	14.70	14.70

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



GB/T 18376-2014 Метод испытания микроструктуры твердого сплава

1 Область применения

Этот стандарт определяет методы подготовки, наблюдения и оценки микроструктуры твердого сплава. Этот метод применим к материалам и изделиям из твердого сплава (таким как YG6, YG8 и другие марки) с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) в качестве связующей фазы. Характеристики микроструктуры, включая размер зерна, фазовый состав, пористость и дефекты, анализируются с помощью оптического микроскопа или сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Этот метод может использоваться для контроля качества в процессе производства, приемки продукции и оценки производительности в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на твердые сплавы и неметаллические материалы, не содержащие кобальт.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 3848 Определение содержания кобальта в твердом сплаве

GB/T 3850-2015 Метод определения плотности твердого сплава

GB/T 13298-2015 Методы контроля микроструктуры металла

GB/T 4338 Метод исследования коррозии микроструктуры металла

ISO 4499-2:2008 Методы испытаний микроструктуры твердого сплава. Часть 2.

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

Количественный фазовый анализ

ISO 3696 Технические условия на воду для аналитических лабораторий

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Микроструктура

Структурные характеристики твердого сплава в микроскопическом масштабе, включая размер зерна, распределение фаз, поры и дефекты.

3.2 Твердый сплав — это композиционный материал, изготовленный из карбида вольфрама (WC)

в качестве твердой фазы и кобальта (Co) в качестве связующей фазы с помощью процесса порошковой металлургии.

3.3 Размер зерна

Средний диаметр зерен твердой фазы (WC), обычно в мкм.

3.4 Пористость:

объемная доля пор в твердом сплаве, отражающая плотность материала, единица измерения %.

3.5 η-фаза (эта-фаза)

— хрупкая фаза, образующаяся из-за недостаточного содержания углерода. Ее химическая формула — Co_3W_3C , что может повлиять на эксплуатационные характеристики.

3.6 Свободный углерод:

Углерод, выпавший в осадок из-за чрезмерного содержания углерода, влияющий на однородность микроструктуры.

4 Принцип

Проверка микроструктуры твердого сплава осуществляется путем подготовки образца, коррозии и микроскопического наблюдения для анализа его внутренних структурных характеристик. В процессе подготовки образец разрезается, шлифуется, полируется, а затем микроструктура анализируется с помощью травителя (например, реагента Мураками), а затем наблюдается с помощью оптического микроскопа (увеличение 100x-1000x) или сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Размер зерна измеряется методом поперечного сечения, а пористость и фазовый состав количественно оцениваются с помощью анализа изображений. Микроструктурные характеристики тесно связаны с процессом спекания, балансом углерода и дефектами и могут отражать свойства материала.

5. Инструменты и оборудование

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

5.1 Оптический микроскоп

Увеличение 100х-1000х, оснащен системой анализа изображения, точность $\pm 0,1$ мкм.

5.2 Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Разрешение составляет $\leq 0,1$ мкм, для фазового анализа используется энергодисперсионный спектрометр (ЭДС).

5.3 Режущая машина

Оснащен алмазным отрезным кругом и охлаждающей жидкостью для предотвращения термических повреждений.

5.4 Шлифовально-полировальный станок

Оснащен наждачной бумагой SiC (#200-#1200) и алмазной суспензией (размер частиц 1-3 мкм), шероховатость поверхности $Ra \leq 0,05$ мкм.

5.5 Ультразвуковой очиститель

Используется для очистки образцов и удаления остатков шлифовальных материалов.

5.6 Ящик с постоянной температурой

Контролируйте температуру сушки до 105°C с точностью $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

6 Реагентов

6.1 Деионизированная вода

Соответствует стандарту качества воды ISO 3696 Grade 1.

6.2 Реагент Мураками

Формула: $10 \text{ г } \text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ г } \text{KOH} + 100 \text{ мл } \text{H}_2\text{O}$, время коррозии 5-30 секунд в зависимости от реакции образца.

6.3 Этанол

Аналитическая чистота, концентрация $\geq 99,5\%$, используется для очистки.

7 образцов

7.1 Требования к образцам

Форма: прямоугольная или цилиндрическая, размер $\geq 10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 5 \text{ мм}$, масса $\geq 5 \text{ г}$.

Состояние поверхности: без трещин (< 5 мкм), пор (пористость $< 0,05\%$) и оксидного слоя.

Однородность: отклонение состава $< 0,1 \text{ мас.}\%$, колебание размера зерна $< 5\%$.

Количество: не менее 3 образцов на партию, высокая репрезентативность.

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

7.2 Подготовка образца

Резка: Резка выполняется алмазным отрезным кругом перпендикулярно направлению спекания, смазанным охлаждающей жидкостью, со скоростью <500 об/мин.

Шлифовка: Последовательно используйте наждачную бумагу SiC № 200, № 400, № 800 и № 1200, прикладывая давление 20–30 Н, время обработки составляет 2–3 минуты на уровень.

Полировка: используйте алмазную суспензию 1–3 мкм и фланелевую салфетку в течение 5–10 минут, шероховатость поверхности $Ra \leq 0,05$ мкм.

Очистка и сушка: ультразвуковая очистка с этанолом в течение 5 мин, сушка при 105°C в течение 30 мин и охлаждение до комнатной температуры.

8. Отображение микроструктуры

8.1 Коррозия

Используйте реагент Мураками для разъедания поверхности образца в течение 5–30 секунд (WC — коричневый, Co — белый, а η -фаза — серая), наблюдайте за реакцией и при необходимости отрегулируйте время.

После коррозии промойте деионизированной водой, обезвожьте этанолом и немедленно высушите.

8.2 Осмотр

Убедитесь, что коррозия равномерная, без чрезмерной коррозии (размытые границы зерен) или недостаточной коррозии (отсутствие микроструктуры).

9 Микроструктурный контроль

9.1 Методы наблюдения

Оптический микроскоп: увеличение 500х-1000х, наблюдение размера зерна, распределения фаз, пор и дефектов.

СЭМ: увеличение 1000х-5000х, в сочетании с ЭДС для анализа фазового состава.

9.2 Измерение размера зерна

Согласно методу поперечного сечения (ISO 4499-2), 100 зерен WC были случайным образом измерены в 10 полях зрения, а диаметр был усреднен с точностью $\pm 0,1$ мкм.

Укажите средний размер зерна и диапазон распределения.

9.3 Оценка пористости

Согласно стандарту GB/T 13298-2015 количество и площадь пор подсчитываются и классифицируются:

Тип А: мелкие поры (<10 мкм);

Тип В: макропоры (10-25 мкм);

Тип С: агрегаты (>25 мкм).

Пористость = площадь пор/общая площадь $\times 100\%$, с точностью до 2 знаков после запятой.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.4 Анализ фазового состава

Определите фазы WC, Co, η , свободный углерод и количественно проанализируйте процент площади каждой фазы с отклонением $<1\%$.

9.5 Проверка дефектов

Выявляйте трещины и включения (например, Fe, Ni) и регистрируйте их местоположение, размер и распределение.

10. Выражение результата

Размер зерна выражается в мкм с точностью до одной десятой (например, 0,8 мкм).

Пористость выражается в % с двумя знаками после запятой (например, 0,05%).

Фазовый состав выражается в процентах площади с одним десятичным знаком (например, WC 90,5%).

Отчет об испытаниях должен включать:

а) Номер стандарта: GB/T 18376-2014; б) Описание образца: марка, партия, размер; в) Условия подготовки: резка, шлифовка, полировка; г) Условия наблюдения: увеличение, коррозионный агент; д) Результаты: размер зерна, пористость, фазовый состав, дефекты; е) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.; ж) Испытатель: подпись.

11 Точность и предвзятость

11.1 Точность

Повторяемость: Отклонение размера зерна, измеренное одним и тем же оператором и на одном и том же оборудовании, составляет менее 5%, а отклонение пористости — менее 0,02%.

Воспроизводимость: Отклонение размера зерна, измеренное разными лабораториями, составляет $<10\%$, а отклонение пористости — $<0,05\%$.

11.2 Предвзятость

Погрешность прибора: погрешность измерения микроскопа $\pm 0,1$ мкм, погрешность СЭМ $<0,01$ мкм.

Ошибка подготовки: царапины при шлифовке или чрезмерное травление могут привести к завышению размера зерна на 5–10%.

Неоднородность образца: отклонение состава $>0,1$ мас. % приводит к изменению пористости на 0,1–0,2%.

12 Факторов Влияния

12.1 Процесс спекания

Температура (1350–1500 °C) влияет на рост зерна, а при температуре >1450 °C образуются крупные зерна (>2 мкм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Горячее изостатическое прессование (ГИП, 150 МПа) снизило пористость ($<0,01\%$).

12.2 Углеродный баланс

Недостаточное количество углерода образует η -фазу (серую, 5–10%), тогда как избыток углерода осаждает свободный углерод (черный, $<2\%$).

12.3 Размер зерна

Мелкие зерна (0,2–0,5 мкм) имеют низкую пористость ($<0,05\%$), тогда как крупные зерна (>5 мкм) имеют высокую пористость ($>0,1\%$).

12.4 Дефекты

Включения (например, Fe 0,1%) приводят к локальной пористости и трещинам, затрагивающим $<0,05$ мм.

13. Применение результатов испытаний

13.1 Контроль качества

Размер зерна составляет 0,5–1,0 мкм, а пористость $<0,05\%$, что соответствует стандарту YG6.

13.2 Оптимизация процесса

Пористость $> 0,1\%$ указывает на недостаточное спекание, отрегулируйте температуру (1400°C) или давление.

13.3 Прогнозирование производительности

Измельчение зерна ($<0,5$ мкм) увеличивает твердость (HRA >91), тогда как увеличение η -фазы снижает ударную вязкость.

13.4 Примеры

Инструмент YG8, размер зерна 1,0 мкм, пористость 0,03%, обеспечивает срок службы резца > 3 часов.

14 Заметок

14.1 Калибровка прибора

Перед тестированием микроскоп был откалиброван с погрешностью $\leq \pm 0,1$ мкм.

14.2 Качество образца

Убедитесь, что на поверхности образца нет царапин и коррозия равномерная.

14.3 Экологический контроль

Температура в помещении, где проводились испытания, составляла $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$, а влажность — $<60\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

14.4 Защита безопасности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы избежать разбрызгивания едкой жидкости.

15 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные параметры микроструктуры

Таблица А.1 Микроструктурные характеристики обычных марок твердого сплава

Бренд	Содержание кобальта (мас.%)	Размер зерна (мкм)	Пористость(%)	Состав основной фазы (%)
YG6	6	0,6-0,8	0,02-0,05	WC 90, Co 10
YG8	8	0,8-1,0	0,03-0,06	WC 88, Co 12
YG10	10	1,0-1,2	0,04-0,07	WC 86, Co 14

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Ошибка прибора

Погрешность измерения микроскопа составляет $\pm 0,1$ мкм, что влияет на размер зерна менее чем на 1%.

В.2 Дефекты подготовки

Избыточная коррозия приводит к завышению пористости на 0,05–0,1%.

В.3 Воздействие на окружающую среду

Влажность >70% вызывает окисление поверхности, что влияет на распознавание фаз.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать автоматическую систему анализа изображений для повышения точности измерения размера зерна (<0,05 мкм).

С.2 Использовать SEM-EDS для обнаружения следов η -фазы с количественной погрешностью <0,5%. С.3 Внедрить рентгеновскую дифракцию (XRD) для проверки постоянства фазового состава.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний микроструктуры твердого сплава YG8

Номер образца	Размер зерна (мкм)	Пористость(%)	ТУАЛЕТ (%)	Co (%)	η фаза (%)
YG8-001	0.9	0,04	88.2	11.6	0.2
YG8-002	0.8	0,03	88,5	11.4	0.1
YG8-003	0.9	0,05	88.0	11.8	0.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 5314-2011 Порошки для порошковой металлургии Методы отбора проб - Химический состав

1 Область применения

В этом разделе описывается метод определения химического состава порошков для порошковой металлургии после отбора проб. Этот метод применим к металлическим порошкам (таким как железный порошок, медный порошок, вольфрамовый порошок, кобальтовый порошок и т. д.) и порошкам сплавов для порошковой металлургии и направлен на определение их химического состава посредством химического анализа, включая содержание основных элементов (таких как Fe, Cu, W, Co и т. д.) и примесных элементов (таких как C, O, S, P и т. д.). Этот метод может использоваться для контроля качества, приемки продукции и проверки компонентов в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на неметаллические порошки или ультрадисперсные нанопорошки с размером частиц менее 10 мкм (следует ссылаться на GB/T 33822-2017).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 223.1 Методы химического анализа железа, стали и сплавов. Метод титрования для определения содержания железа

GB/T 223.3 Методы химического анализа железа, стали и сплавов. Определение содержания фосфора. Гравиметрический метод с использованием диантронфосфомолибдата

GB/T 223.4 Методы химического анализа железа, стали и сплавов. Определение содержания марганца. Метод потенциометрического титрования или визуального титрования.

GB/T 223.5 Методы химического анализа стали и сплавов. Определение содержания кремния. Фотометрический метод с использованием кремний-молибденового синего.

GB/T 223.9 Методы химического анализа железа, стали и сплавов. Определение содержания серы. Метод титрования йодом.

GB/T 223.23 Методы химического анализа железа, стали и сплавов. Определение содержания кобальта. Фотометрический метод.

GB/T 223.58 Методы химического анализа железа, стали и сплавов. Определение содержания вольфрама. Восстановительный гравиметрический метод.

GB/T 4336 Метод атомно-эмиссионной спектроскопии с искровым разрядом для углеродистой и низколегированной стали

GB/T 5314-2011 Метод отбора проб порошка для порошковой металлургии

ISO 4490 Общие принципы отбора проб и химического анализа металлических порошков

3 Термины и определения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Химический состав Массовая доля (

мас. %) различных элементов в порошке порошковой металлургии, включая основные элементы и примесные элементы.

3.2 Отбор проб

Процесс отбора репрезентативных проб из партии порошка осуществляется в соответствии с GB/T 5314-2011.

3.3 Примесные элементы:

микроэлементы, такие как углерод (C), кислород (O), сера (S), фосфор (P) и т. д., которые оказывают отрицательное влияние на свойства порошка.

3.4 Порошки для порошковой металлургии

Порошки металлов или сплавов, полученные распылением, восстановлением или химическими методами и используемые для процессов прессования и спекания.

4 Принцип

Определение химического состава осуществляется путем растворения или прямого анализа порошка после отбора проб и использования химического анализа (например, титрования, весового метода) или инструментального анализа (например, спектроскопии) для определения содержания каждого элемента. Основные элементы (например, Fe, Cu, W, Co) количественно определяются стандартными методами, а примесные элементы (например, C, O) определяются специальными приборами. Качество и однородность отбора проб напрямую влияют на точность результатов, и требования к отбору проб GB/T 5314-2011 должны строго соблюдаться.

5. Инструменты и оборудование

5.1 Аналитический баланс

Точность $\pm 0,0001$ г, используется для взвешивания образцов.

5.2 Оптико-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES)

Диапазон измерений: от уровня ppm до уровня % по массе, точность $\pm 0,1\%$.

5.3 Анализатор углерода и серы

Определите содержание C и S с точностью $\pm 0,001$ мас. %.

5.4 Анализатор кислорода и азота

Определите содержание O и N с точностью $\pm 0,0005$ мас. %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5 Титрационный аппарат

Оснащен потенциометрическим титратором или автоматическим титратором, точность $\pm 0,01$ мл.

5.6 Высокотемпературная печь

Диапазон температур 1000-1500°C, используется для плавления или сжигания образцов.

5.7 Ультразвуковой очиститель

Используется для очистки образцов и удаления поверхностных загрязнений.

6 Реагентов

6.1 Азотная кислота (HNO_3)

Аналитическая чистота, концентрация 65%-68%.

6.2 Соляная кислота (HCl)

Аналитическая чистота, концентрация 36%-38%.

6.3 Серная кислота (H_2SO_4)

Аналитическая чистота, концентрация 95%-98%.

6.4 Стандартное решение

Например, стандартный раствор Fe, Cu, W, Co, концентрация 0,01 моль/л, в соответствии с GB/T 601.

6.5 Деионизированная вода

Соответствует стандарту качества воды ISO 3696 Grade 1.

6.6 Поток

Такие как порошок Na_2CO_3 или Fe, используемые для плавления образцов.

7 Отбор проб

7.1 Метод отбора проб

Согласно GB/T 5314-2011, репрезентативные пробы извлекаются из партий порошка с использованием послойного или механического отбора проб.

Точки отбора проб: не менее 5 точек, смешать и упаковать.

7.2 Размер выборки

От каждой партии отбирают 50–100 г общей пробы и 0,5–2 г пробы для анализа.

7.3 Хранение образцов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Хранить в герметичном контейнере во избежание окисления и впитывания влаги.

8 методов испытаний

8.1 Подготовка образца

Взвесьте 0,5–2 г порошка (точность $\pm 0,0001$ г) и поместите его в тигель.

Добавьте соответствующее количество флюса (например, 5 г Na_2CO_3), расплавьте его в высокотемпературной печи при температуре 1000–1200 °C в течение 30 минут и после охлаждения растворите в разбавленной кислоте ($\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1:1$).
объем довели до 100 мл деионизированной водой.

8.2 Определение основных элементов

Железо (Fe): Согласно методу титрования GB/T 223.1, точность $\pm 0,01$ мас. %.

Медь (Cu): Согласно методу титрования йодом GB/T 223.7, точность $\pm 0,01$ мас. %.

Вольфрам (W): в соответствии с методом уменьшения веса GB/T 223.58, точность $\pm 0,05\%$ по весу.

Кобальт (Co): Согласно фотометрическому методу GB/T 223.23, точность $\pm 0,02$ мас. %.

8.3 Определение примесных элементов

Углерод (C): с использованием анализатора углерода и серы, метод высокочастотного сжигания, точность $\pm 0,001\%$ по весу.

Сера (S): То же, что и у анализатора сероуглерода, точность $\pm 0,0005$ мас. %.

Кислород (O): с использованием анализатора кислорода и азота, метод плавления-инфракрасного поглощения, точность $\pm 0,0005$ мас. %.

Фосфор (P): В соответствии с методом определения веса диантронфосфомолибдата GB/T 223.3, точность $\pm 0,001$ мас. %.

8.4 Инструментальный анализ (необязательно)

Метод ИСП-ОЭС использовался для одновременного определения нескольких элементов с использованием метода калибровочной кривой с точностью $\pm 0,1\%$ (основной элемент) и ± 10 ppm (примеси).

Раствор образца вводится напрямую, а длина волны измерения выбирается в соответствии со стандартом.

8.5 Холостая проба

Проведите холостой тест таким же образом, не добавляя образец, и вычитите холостое значение.

8.6 Обработка данных

За окончательный результат принималось среднее значение трех измерений.

Если отклонение в одной точке составляет $>5\%$ (например, Fe 98% изменяется до 103%), удалите его и пересчитайте.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Результаты выражены в % по массе с двумя знаками после запятой.

9 Результаты Выражение

Химический состав выражается в массовых процентах (мас. %) с двумя десятичными знаками (например, Fe 98,50%, C 0,02%).

Отчет об испытаниях должен включать:

a) Номер стандарта: GB/T 5314-2011; b) Описание образца: тип порошка, партия, размер частиц; c) Метод отбора проб: в соответствии с GB/T 5314-2011; d) Условия испытаний: температура, влажность; e) Модель прибора и статус калибровки; f) Результаты: содержание и отклонение каждого элемента; g) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.; h) Испытатель: подпись.

10. Точность и предвзятость

10.1 Точность

Повторяемость: Отклонение состава, измеренное одним и тем же оператором и на одном и том же оборудовании, составляет $<0,5\%$ (основной элемент) и $<0,01\%$ (примеси).

Воспроизводимость: Отклонение состава, измеренное разными лабораториями, составляет $<1\%$ (основной элемент) и $<0,02\%$ (примеси).

10.2 Предвзятость

Погрешность прибора: погрешность ИСП-ОЭС $\pm 0,1\%$, погрешность прибора для измерения углерода и серы $\pm 0,001\%$.

Ошибка выборки: Неравномерность приводит к отклонению в 0,5–1%.

Загрязнение образца: Поверхностное окисление приводит к завышению содержания кислорода на 0,01–0,05%.

11 Факторов Влияния

11.1 Распределение размеров частиц

частицы размером <45 мкм легко окисляются, при этом содержание кислорода увеличивается на 0,02–0,05%.

11.2 Условия хранения

Высокая влажность ($>70\%$) вызывает поглощение поверхностной влаги, что влияет на определение C и O на 0,01–0,03%.

11.3 Процесс плавления

Слишком высокая температура ($>1200^{\circ}\text{C}$) вызывает улетучивание элементов (например, потеря Co 0,1%).

11.4 Источники примесей

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Низкая чистота сырья (например, примесь Fe S >0,02%) влияет на результаты.

12. Применение результатов испытаний

12.1 Контроль качества

Проверьте, соответствует ли состав спецификациям, например, железный порошок Fe $\geq 98\%$, C $\leq 0,02\%$.

12.2 Оптимизация процесса

Содержание кислорода > 0,1% указывает на недостаточное восстановление, отрегулируйте температуру (800-1000°C).

12.3 Прогнозирование производительности

Содержание S <0,01% и содержание P <0,02% обеспечивают стабильные характеристики спекания.

12.4 Примеры

Вольфрамовый порошок W $\geq 99,9\%$, O <0,05% используется для сплавов высокой плотности с плотностью 19,2 г/см³.

13 Заметок

13.1 Калибровка прибора

Аналитический прибор был откалиброван перед тестированием с отклонением $\leq \pm 0,1\%$.

13.2 Качество образца

Убедитесь, что образцы не содержат загрязнений и хранятся в сухом месте.

13.3 Экологический контроль

Температура в помещении, где проводились испытания, составляла 20–25 °C, а влажность — <60%.

13.4 Защита безопасности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы избежать разбрызгивания кислоты.

14 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные диапазоны химического состава

Таблица А.1 Химический состав обычных порошков порошковой металлургии

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тип порошка	Основной компонент (мас.%)	Верхний предел содержания примесей (мас.%)
Железный вентилятор	Железо $\geq 98,0$	C $\leq 0,02$, O $\leq 0,1$, S $\leq 0,01$
Медный порошок	Cu $\geq 99,0$	O $\leq 0,1$, Fe $\leq 0,1$
Вольфрамовый порошок	Ж $\geq 99,9$	C $\leq 0,01$, O $\leq 0,05$
Кобальтовый порошок	Co $\geq 99,5$	Fe $\leq 0,1$, O $\leq 0,1$

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Ошибка прибора

Погрешность ИСП-ОЭС $\pm 0,1\%$, влияние на основные элементы $< 0,1\%$.

В.2 Ошибка выборки

Неоднородность приводит к отклонению содержания железа на $0,5-1\%$.

В.3 Воздействие на окружающую среду

Влажность $> 70\%$ завышала содержание O на $0,02\%$.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать метод вакуумной плавки для уменьшения отклонения определения содержания кислорода.

С.2 Использовать высокоточный метод ИСП-МС для обнаружения следов примесей (< 1 ppm).

С.3 Внедрить автоматическую систему отбора проб для повышения однородности.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний химического состава железного порошка

Номер образца	Fe (% масс.)	C (% масс.)	O (вес.%)	S (вес.%)	Среднее содержание Fe (% масс.)
Fe-001	98.52	0,015	0,082	0,008	98.50
Fe-002	98.48	0,014	0,080	0,007	98.50
Fe-003	98.50	0,016	0,085	0,009	98.50

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 5169-2013 Метод испытания пористости твердого сплава

1 Область применения

В настоящем стандарте описывается метод испытания пористости твердого сплава. Этот метод применим к материалам и изделиям из твердого сплава (таким как марки YG6, YG8 и т. д.) с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) в качестве связующей фазы. Пористость (единица: %) определяется металлографическим методом или методом анализа изображений, включая поры типа А (мелкие поры), типа В (крупные поры) и типа С (агрегированные). Этот метод может использоваться для контроля качества в процессе производства, приемки продукции и оценки производительности в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на твердые сплавы, содержащие значительные неметаллические включения, или карбиды на основе не кобальта.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 18376-2014 Метод испытания микроструктуры твердого сплава

GB/T 3850-2015 Метод определения плотности твердого сплава

GB/T 13298-2015 Методы контроля микроструктуры металла

GB/T 4338 Метод исследования коррозии микроструктуры металла

ASTM B276 Определение кажущейся пористости твердого сплава

Метод оценки микроструктуры твердого сплава по стандарту ISO 4505

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Пористость

Объемная доля пор в твердом сплаве отражает плотность материала. Единица измерения - %, который можно разделить на Тип А (диаметр <10 мкм), Тип В (диаметр 10-25 мкм) и Тип С (диаметр >25 мкм).

3.2 Твердый сплав — это композиционный материал, изготовленный из карбида вольфрама (WC)

в качестве твердой фазы и кобальта (Co) в качестве связующей фазы с помощью процесса порошковой металлургии.

3.3 Металлографический метод:

Метод количественного определения пористости посредством подготовки образцов, коррозии и микроскопического наблюдения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4 Метод анализа изображений:

Этот метод использует технологию обработки изображений для извлечения данных о порах из изображений, полученных с помощью микроскопа или сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

4 Принцип

Тест пористости твердого сплава основан на наблюдении за поперечной микроструктурой образца через оптический микроскоп или СЭМ после подготовки, а также на идентификации и классификации пор (тип А, В и С). Металлографический метод вычисляет пористость путем ручного или автоматического подсчета количества и площади пор; метод анализа изображений использует программное обеспечение для обработки данных изображения и автоматического измерения распределения пор и процента. Пористость тесно связана с процессом спекания, балансом углерода и однородностью микроструктуры и влияет на свойства материала.

5. Инструменты и оборудование

5.1 Оптический микроскоп

Увеличение 100х-1000х, оснащен системой анализа изображения, точность $\pm 0,1$ мкм.

5.2 Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Разрешение составляет $\leq 0,1$ мкм, прибор оснащен энергодисперсионным спектрометром (EDS) для анализа характеристик пор.

5.3 Режущая машина

Оснащен алмазным отрезным кругом и охлаждающей жидкостью для предотвращения термических повреждений.

5.4 Шлифовально-полировальный станок

Оснащен наждачной бумагой SiC (#200-#1200) и алмазной суспензией (размер частиц 1-3 мкм), шероховатость поверхности $Ra \leq 0,05$ мкм.

5.5 Ультразвуковой очиститель

Используется для очистки образцов и удаления остатков шлифовальных материалов.

5.6 Ящик с постоянной температурой

Контролируйте температуру сушки до 105°C с точностью $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

6 Реагентов

6.1 Деионизированная вода

Соответствует стандарту качества воды ISO 3696 Класс I.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Реагент Мураками

Формула: $10 \text{ г } \text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ г } \text{KOH} + 100 \text{ мл } \text{H}_2\text{O}$, время коррозии 5-30 секунд в зависимости от реакции образца.

6.3 Этанол

Аналитическая чистота, концентрация $\geq 99,5\%$, используется для очистки.

7 образцов

7.1 Требования к образцам

Форма: прямоугольная или цилиндрическая, размер $\geq 10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times 5 \text{ мм}$, масса $\geq 5 \text{ г}$.

Состояние поверхности: без трещин ($< 5 \text{ мкм}$) и оксидного слоя, пористость $< 0,5\%$.

Однородность: отклонение состава $< 0,1 \text{ мас.}\%$, колебание размера зерна $< 5\%$.

Количество: не менее 3 образцов на партию, высокая репрезентативность.

7.2 Подготовка образца

Резка: Резка выполняется алмазным отрезным кругом перпендикулярно направлению спекания, смазанным охлаждающей жидкостью, со скоростью $< 500 \text{ об/мин}$.

Шлифовка: Последовательно используйте наждачную бумагу SiC № 200, № 400, № 800 и № 1200, прикладывая давление 20–30 Н, время обработки составляет 2–3 минуты на уровень.

Полировка: используйте алмазную суспензию 1–3 мкм и фланелевую салфетку в течение 5–10 минут, шероховатость поверхности $R_a \leq 0,05 \text{ мкм}$.

Очистка и сушка: ультразвуковая очистка с этанолом в течение 5 мин, сушка при 105°C в течение 30 мин и охлаждение до комнатной температуры.

8. Отображение микроструктуры

8.1 Коррозия

Используйте реагент Мураками для разъедания поверхности образца в течение 5–30 секунд (WC — коричневый, Co — белый, а поры — черные), наблюдайте за реакцией и при необходимости отрегулируйте время.

После коррозии промойте деионизированной водой, обезвожьте этанолом и немедленно высушите.

8.2 Осмотр

Обеспечить равномерную коррозию без чрезмерной коррозии (размытые границы зерен) или недостаточной коррозии (пористость не выявлена).

9 Тест на пористость

9.1 Металлография

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

Наблюдение: используйте оптический микроскоп с увеличением 500х–1000х и проведите наблюдение за 10 случайными полями зрения.

Измерение: вручную подсчитайте количество пор типов А, В и С и измерьте площадь пор (точность $\pm 0,1$ мкм²).

Расчет: Пористость = общая площадь пор/общая площадь поля $\times 100\%$, сохранить 2 знака после запятой.

9.2 Анализ изображения

Наблюдение: используйте СЭМ или оптический микроскоп высокого разрешения, увеличение 1000х–5000х, сделайте 10 снимков.

Анализ: используйте программное обеспечение для обработки изображений (например, ImageJ), чтобы автоматически определить поры, классифицировать их по типам А, В и С и рассчитать процент площади.

Проверка: Повторите измерение 3 раза и возьмите среднее значение. Отклонение составляет $<0,02\%$.

9.3 Классификация пор

Тип А: диаметр <10 мкм, мелкие поры.

Тип В: диаметр 10–25 мкм, крупные поры.

Тип С: диаметр >25 мкм, агрегаты.

10. Выражение результата

Пористость выражается в % с двумя знаками после запятой (например, 0,05%).

Отчет об испытаниях должен включать:

а) Номер стандарта: GB/T 5169-2013; б) Описание образца: марка, партия, размер; в) Условия подготовки: резка, шлифовка, полировка; д) Метод испытания: металлографический метод или метод анализа изображений; е) Результат: общая пористость и распределение типов А, В, С; ф) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.; г) Испытатель: подпись.

11 Точность и предвзятость

11.1 Точность

Повторяемость: Отклонение пористости, измеренное одним и тем же оператором и на одном и том же оборудовании, составляет $<0,02\%$.

Воспроизводимость: Отклонение пористости между разными лабораториями составляет $<0,05\%$.

11.2 Предвзятость

Погрешность прибора: Погрешность измерения микроскопа $\pm 0,1$ мкм, удар $<0,01\%$.

Ошибка подготовки: царапины от шлифования или чрезмерное травление могут привести к завышению пористости на 0,02–0,05%.

Неоднородность образца: отклонение состава $>0,1$ мас. % приводит к изменению пористости

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на 0,1%.

12 Факторов Влияния

12.1 Процесс спекания

Температура (1350–1500 °C) влияет на пористость, а >1450 °C увеличивает поры типа В и С (>0,1%).

Горячее изостатическое прессование (ГИП, 150 МПа) снизило общую пористость (<0,01%).

12.2 Углеродный баланс

Недостаточное количество углерода образует η-фазу, увеличивая пористость на 0,05–0,1%; избыточное количество углерода осаждает свободный углерод с воздействием <0,02%.

12.3 Размер зерна

Мелкие зерна (0,2–0,5 мкм) имеют низкую пористость (<0,03%), тогда как крупные зерна (>5 мкм) имеют высокую пористость (>0,15%).

12.4 Дефекты

Включения (например, Fe 0,1%) приводят к локальному увеличению пористости на 0,05–0,1%.

13. Применение результатов испытаний

13.1 Контроль качества

Пористость <0,05% соответствует стандарту YG6 и обеспечивает твердость HRA >90.

13.2 Оптимизация процесса

Пористость > 0,1% указывает на недостаточное спекание, отрегулируйте температуру (1400°C) или давление.

13.3 Прогнозирование производительности

Пористость <0,03% соответствует высокой прочности на изгиб (>2000 МПа), >0,1% снижает ударную вязкость.

13.4 Примеры

Инструмент YG8, пористость 0,04%, срок службы резания >3 часов.

14 Заметок

14.1 Калибровка прибора

Перед тестированием микроскоп был откалиброван с погрешностью <±0,1 мкм.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

14.2 Качество образца

Убедитесь, что на поверхности образца нет царапин и коррозия равномерная.

14.3 Экологический контроль

Температура в помещении, где проводились испытания, составляла 20–25 °C, а влажность — <60%.

14.4 Защита безопасности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы избежать разбрызгивания едкой жидкости.

15 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичный диапазон пористости

Таблица А.1 Пористость обычных марок твердого сплава

Бренд	Содержание кобальта (мас.%)	Размер зерна (мкм)	Пористость(%)
YG6	6	0,6-0,8	0,02-0,05
YG8	8	0,8-1,0	0,03-0,06
YG10	10	1,0-1,2	0,04-0,07

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Ошибка прибора

Погрешность измерения микроскопа составляет $\pm 0,1$ мкм, что влияет на пористость <0,01%.

В.2 Дефекты подготовки

Избыточная коррозия приводит к завышению пористости на 0,02–0,05%.

В.3 Воздействие на окружающую среду

Влажность >70% вызывает окисление поверхности, влияя на измерение на 0,01%.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать рентгеновскую томографию (КТ) для обнаружения внутренней пористости с точностью <0,01%.

С.2 Использовать автоматическую систему анализа изображений для повышения согласованности измерения пористости. С.3 Внедрить процесс вакуумного спекания для снижения начальной пористости.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний пористости твердого сплава YG8

Номер образца	Тип А(%)	Тип Б(%)	Тип С (%)	Общая пористость (%)	среднее значение(%)
YG8-001	0,02	0.01	0.00	0,03	0,04
YG8-002	0,03	0.01	0.01	0,05	0,04

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Номер образца	Тип А(%)	Тип Б(%)	Тип С (%)	Общая пористость (%)	среднее значение(%)
YG8-003	0,02	0,02	0.00	0,04	0,04

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 12444-2006 Методы испытаний на износостойкость металлов и сплавов

1 Область применения

Этот стандарт определяет метод испытания на износостойкость металлов и сплавов. Этот метод применим к металлическим и сплавным материалам (таким как сталь, алюминиевый сплав, медный сплав и т. д.) и их поверхностным покрытиям. С помощью испытаний на износ в контролируемых лабораторных условиях оценивается износостойкость материалов, включая износ при низком напряжении (царапание), износ при высоком напряжении (удар) и износ скольжения. Этот метод может использоваться для выбора материала, контроля качества, приемки продукции и оценки износостойкости в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не применим к неметаллическим материалам или износу в экстремальных условиях (например, при высоких температурах $> 1000^{\circ}\text{C}$ или в высококоррозионных средах).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 6394 Размеры и методы подготовки образцов для испытаний металлов

GB/T 10610 Определение шероховатости поверхности металлических материалов

GB/T 13298-2015 Методы контроля микроструктуры металла

Стандартный метод испытаний ASTM G65 для испытания на истирание сухого песка/резинового колеса

ASTM D4060 Стандартный метод испытания стойкости органических покрытий к истиранию с использованием абразива Табера

ISO 8251 Определение износостойкости анодно-оксидных покрытий на алюминии и его сплавах

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Износостойкость

Способность металла или сплава противостоять потере поверхностного материала в определенных условиях износа, обычно характеризующаяся потерей массы, потерей объема или глубиной износа.

3.2 Истирание при низких нагрузках:

Износ, вызванный небольшим царапанием или скольжением, распространенный в условиях износа с низкими нагрузками и ударами.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Высоконапряженное истирание:

Износ, вызванный высокой нагрузкой или ударом, часто сопровождающийся пластической деформацией или разрушением поверхности материала.

3.4 Износ при скольжении

Потеря материала, вызванная трением, когда две поверхности скользят друг относительно друга.

3.5 Скорость износа

Количество потери материала за единицу времени или за единицу пути скольжения, выраженное в г/м или $\text{мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$.

4 Принцип

Износостойкость металлов и сплавов оценивается с помощью испытаний на износ в контролируемых лабораторных условиях. Методы испытаний включают испытание на сухом песке/резиновом колесе (износ при низком напряжении), испытание на истирание Табера (износ скольжения) и испытание на ударный износ, которые моделируют различные механизмы износа. Износостойкость характеризуется измерением потери массы, потери объема или глубины износа образца до и после испытания. Условия испытания (такие как нагрузка, скорость, тип абразива) напрямую влияют на результаты и должны строго контролироваться.

5. Инструменты и оборудование

5.1 Аналитический баланс

Точность: $\pm 0,0001$ г, используется для взвешивания массы образца.

5.2 Машина для испытания колес с сухим песком/резиной

Соответствует требованиям ASTM G65, твердость резинового колеса 60-70 по Шору А, расход песка 300-400 г/мин.

5.3 Прибор для испытания на истирание Табера

Соответствует требованиям ASTM D4060 со шлифовальными кругами CS-17 или H-18, нагрузка 500–1000 г.

5.4 Машина для испытания на ударный износ

Имитация износа при высоких нагрузках, частота ударов 50-100 раз/мин, нагрузка 10-50 Н.

5.5 Микроскоп

Увеличение 50х-500х, используется для наблюдения за морфологией износа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.6 Тестер шероховатости поверхности

Соответствует GB/T 10610, диапазон измерения Ra 0,01-10 мкм.

6 Реагенты и материалы

6.1 Стандартные абразивы

Сухой песок: натуральный кварцевый песок, размер частиц 50-70 меш, в соответствии с ASTM G65.

Круги Табера: CS-17 (средней твердости) или H-18 (высокой твердости).

6.2 Этанол

Аналитическая чистота, концентрация $\geq 99,5\%$, используется для очистки.

6.3 Деионизированная вода

Соответствует стандарту качества воды ISO 3696 Grade 1.

7 образцов

7.1 Требования к образцам

Форма: прямоугольная или круглая, размеры 76 мм × 25 мм × 6 мм (тест на сухом песке/резиновом колесе) или диаметр 100 мм × толщина 3 мм (тест Табера).

Состояние поверхности: гладкая поверхность, без трещин, шероховатость $Ra \leq 0,8$ мкм.

Количество: не менее 3 экземпляров для каждого состояния.

Однородность: Отклонение состава $< 0,1$ мас. %.

7.2 Подготовка образца

Образцы были вырезаны в соответствии с GB/T 6394, а поверхности отшлифованы наждачной бумагой SiC № 600–1200.

Образцы очищали ультразвуком в этаноле в течение 5 минут и взвешивали ($\pm 0,0001$ г) после высушивания.

8 методов испытаний

8.1 Испытание на сухом песке/резиновом колесе (износ при низком напряжении)

8.1.1 Условия испытаний

Нагрузка: 130 Н.

Расход песка: 300-400 г/мин.

Время теста: 6000 об/мин (около 30 минут).

Окружающая среда: температура $23 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $50 \pm 5\%$.

8.1.2 Этапы тестирования

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

Закрепите образец на креплении испытательной машины и отрегулируйте резиновое колесо так, чтобы оно соприкасалось с образцом.

Запустите поток песка, вращайте резиновое колесо и запишите массу в начале испытания (W_1).

После испытания извлеките образец, очистите и высушите его, затем взвесьте (W_2).

Рассчитаем потерю массы: $\Delta W = W_1 - W_2$

Измерение было повторено 3 раза, и было взято среднее значение с отклонением $<5\%$.

8.2 Испытание на износ по Таберу (скользящий износ)

8.2.1 Условия испытаний

Шлифовальный круг: CS-17 (средний износ).

Нагрузка: 1000 г.

Скорость вращения: 60 об/мин.

Цикл испытаний: 10000 оборотов.

Окружающая среда: температура $23 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $50 \pm 5\%$.

8.2.2 Этапы тестирования

Закрепите образец на поворотном столе испытательной машины Табера и установите шлифовальный круг.

Запишите массу в начале испытания (W_1).

Запустите испытательную машину, запустите ее на 10 000 оборотов и регулярно очищайте от шлифовальной пыли.

После испытания очистите образец и взвесьте его (W_2).

Рассчитаем потерю массы: $\text{磨耗指数} = \frac{\Delta W}{\text{时间}} \times 1000$

Измерение было повторено 3 раза, и было взято среднее значение с отклонением $<5\%$.

8.3 Испытание на ударный износ (износ при высоких нагрузках)

8.3.1 Условия испытаний

Нагрузка: 20 Н.

Частота ударов: 60 раз/мин.

Продолжительность теста: 30 минут.

Окружающая среда: температура $23 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $50 \pm 5\%$.

8.3.2 Этапы тестирования

Закрепите образец на приспособлении для испытания на удар и отрегулируйте положение ударной головки.

Запишите массу в начале испытания (W_1).

Запустите испытательную машину, дайте ей поработать в течение 30 минут и запишите количество ударов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

После испытания очистите образец и взвесьте его (W_2).

Рассчитаем потерю массы: $\Delta W = W_1 - W_2$

Измерение было повторено 3 раза, и было взято среднее значение с отклонением $<5\%$.

9 Результаты Выражение

Потеря массы выражается в граммах с четырьмя знаками после запятой (например, 0,0123 г).

Индекс износа выражается в мг/1000 оборотов с точностью до одной десятой (например, 1,2 мг/1000 оборотов).

Отчет об испытаниях должен включать:

a) Номер стандарта: GB/T 12444-2006; b) Описание образца: марка материала, размер, состояние поверхности; c) Метод испытания: сухой песок/резиновый круг, истирание по Таберу или ударный износ; d) Условия испытания: нагрузка, скорость, тип абразива; e) Результат: потеря массы или индекс износа; f) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.; g) Испытатель: подпись.

10. Точность и предвзятость

10.1 Точность

Повторяемость: Отклонение потери массы, измеренной одним и тем же оператором и на одном и том же оборудовании, составляет $<5\%$.

Воспроизводимость: Отклонение потери массы, измеренной разными лабораториями, составляет $<10\%$.

10.2 Предвзятость

Погрешность прибора: погрешность весов $\pm 0,0001$ г, влияние $<1\%$.

Отклонение абразивности: Неравномерность зернистости приводит к колебаниям потери массы в пределах 2–5%.

Влияние окружающей среды: Влажность $>60\%$ вызывает поверхностное окисление, затрагивая $<2\%$.

11 Факторов Влияния

11.1 Твердость материала

Высокая твердость (например, HRC >60) обеспечивает хорошую износостойкость и снижает потерю массы на 10–20%.

11.2 Шероховатость поверхности

$R_a > 1,0$ мкм увеличивает износ и потерю массы на 5–10%.

11.3 Абразивные свойства

Увеличение размера частиц песка (>70 меш) увеличивает износ и увеличивает потерю массы на 10–15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.4 Условия испытаний

Увеличение нагрузки (от 130 Н до 150 Н) увеличивало потерю массы на 5–8%.

12. Применение результатов испытаний

12.1 Выбор материала

Потеря массы $<0,01$ г. Отвечает высоким требованиям износостойкости и подходит для горнодобывающего оборудования.

12.2 Оптимизация процесса

Потеря массы $> 0,05$ г указывает на недостаточную термическую обработку и необходимость корректировки температуры закалки (900°C).

12.3 Прогнозирование производительности

Индекс износа $<1,5$ мг/1000 оборотов соответствует сроку службы >10 лет.

12.4 Примеры

Сталь 45#, потеря массы при испытании на стойкость к сухому песку 0,008 г, используется для ковшей экскаваторов, срок службы >5000 часов.

13 Заметок

13.1 Калибровка прибора

Испытательная машина была откалибрована перед испытанием, отклонение нагрузки составило $\leq \pm 1\%$.

13.2 Качество образца

Убедитесь, что поверхность образца чистая и имеет равномерную шероховатость.

13.3 Экологический контроль

Температура в помещении для испытаний составляла $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, а влажность — $50 \pm 5\%$.

13.4 Защита безопасности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы избежать разбрызгивания песка.

14 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные данные по износостойкости

Таблица А.1 Потеря массы обычных металлов и сплавов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Материал	Методы испытаний	Потеря массы (г)	Индекс износа (мг/1000 оборотов)
45# Сталь	Сухой песок/резинное колесо	0,008	-
Нержавеющая сталь 304	Табер Уэр	0,012	1.2
Алюминиевый сплав 6061	Ударный износ	0,015	-

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Ошибка прибора

Погрешность весов составляет $\pm 0,0001$ г, а влияние $< 1\%$.

В.2 Отклонение абразива

Неоднородность частиц песка приводит к тому, что потеря массы колеблется в пределах 2–5%.

В.3 Воздействие на окружающую среду

Влажность $> 60\%$ вызывает поверхностное окисление, затрагивая $< 2\%$.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать лазерный микроскоп для точного измерения глубины износа ($< 0,01$ мкм).

С.2 Использовать стандартизированные абразивы для уменьшения отклонений. С.3

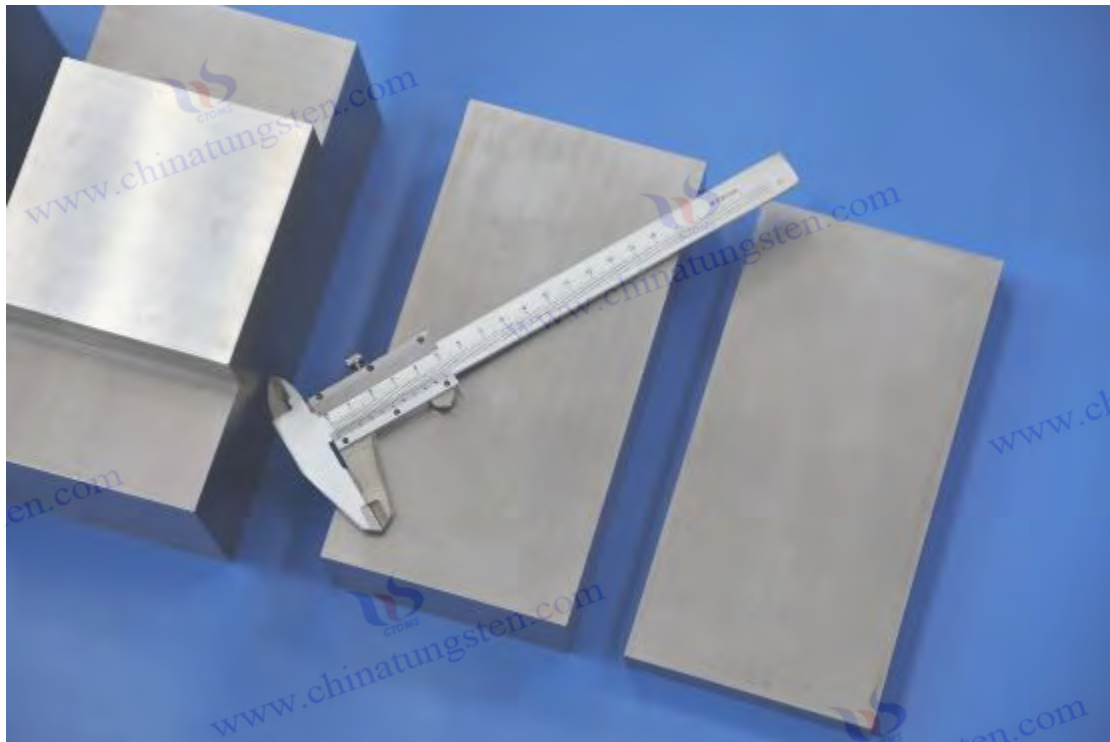
Внедрить систему мониторинга в реальном времени для улучшения согласованности испытаний.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний стального колеса № 45 на сухом песке/резине

Номер образца	Масса до испытания (г)	Масса после испытания (г)	Потеря массы (г)	Среднее значение (г)
45#-001	50.1234	50.1156	0,0078	0,0080
45#-002	50.1250	50.1169	0,0081	0,0080
45#-003	50.1242	50.1160	0,0082	0,0080

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



GB/T 1482-2010 Определение текучести металлических порошков Метод расходомера Холла

1 Область применения

Этот стандарт определяет метод определения текучести металлических порошков с использованием метода расходомера Холла. Этот метод применим к металлическим порошкам, которые могут свободно течь через стандартную воронку с диаметром отверстия 2,5 мм. Время (единица: секунда), необходимое для того, чтобы 50 г порошка прошли через стандартную воронку, измеряется для характеристики текучести порошка. Этот метод может использоваться для контроля качества, приемки продукции и оценки текучести в НИОКР в области порошковой металлургии, аддитивного производства (например, 3D-печати SLM, процесса EBM) и смежных областях.

Настоящий стандарт не распространяется на порошки, которые не являются сыпучими (например, ультратонкие порошки с размером частиц <10 мкм или высокоадгезивные порошки).

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 5314-2011 Метод отбора проб порошка для порошковой металлургии

GB/T 1479.1-2010 Определение насыпной плотности металлических порошков. Часть 1:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Метод воронки

GB/T 31057.3-2008 Физические свойства гранулированных материалов Часть 3: Индекс текучести

ISO 4490:2008 Определение свойств текучести металлических порошков с использованием калиброванной воронки (реометр Холла)

ASTM B213-17 Стандартный метод определения расхода металлических порошков с использованием воронки расходомера Холла

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Текучесть

Способность металлического порошка свободно течь при определенных условиях, характеризующаяся временем (в секундах), необходимым для прохождения 50 г порошка через стандартную воронку (размер пор 2,5 мм), единица измерения — с/50 г.

3.2 Расходомер Холла:

прибор, используемый для измерения текучести металлических порошков. Он состоит из стандартной воронки, приемного контейнера и таймера.

3.3 Металлический порошок

Частицы металла или сплава, полученные распылением, восстановлением или химическими методами, используемые в порошковой металлургии или аддитивном производстве.

3.4 Свободная сыпучесть:

порошок может непрерывно течь через стандартную воронку без какой-либо внешней силы (только под действием силы тяжести).

4 Принцип

Метод расходомера Холла характеризует текучесть металлического порошка путем измерения времени, необходимого для прохождения 50 г порошка через стандартную воронку с диаметром отверстия 2,5 мм. Текучесть зависит от физических свойств порошка, таких как размер частиц, форма, состояние поверхности, адгезия и трение. Чем короче время течения, тем лучше текучесть. Испытание необходимо проводить в контролируемых условиях окружающей среды, чтобы обеспечить повторяемость и точность результатов.

5. Инструменты и оборудование

5.1 Расходомер Холла

Воронка: Изготовлена из немагнитного, коррозионно-стойкого металла (например, нержавеющей стали), с полированной внутренней стенкой и шероховатостью $Ra \leq 0,4$ мкм.

Геометрические параметры воронки: диаметр верха 60 мм, диаметр нижнего отверстия $2,5 \pm 0,02$ мм, угол конуса $60^\circ \pm 0,5^\circ$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высота: 100 ± 2 мм от нижнего отверстия до верха.

5.2 Приемный контейнер

Объем ≥ 100 мл, диаметр ≥ 39 мм, используется для приема вытекающего порошка.

5.3 Аналитический баланс

Диапазон измерения ≥ 100 г, точность $\pm 0,01$ г.

5.4 Секундомер

Точность $\pm 0,2$ с, используется для отсчета времени.

5.5 Ультразвуковой очиститель

Для очистки воронок и емкостей.

5.6 Сушильная печь

Диапазон регулирования температуры $105 \pm 2^\circ\text{C}$ для сушки порошка.

6 Реагентов

6.1 Этанол

Аналитическая чистота, концентрация $\geq 99,5\%$, используется для очистки.

6.2 Деионизированная вода

Соответствует стандарту качества воды ISO 3696 Grade 1.

7 образцов

7.1 Требования к образцам

Объем образца: не менее 200 г, способный свободно протекать через воронку с размером пор 2,5 мм.

Размер частиц: обычно 10–150 мкм, в зависимости от типа порошка.

Однородность: отклонение распределения размеров частиц $< 5\%$, избегать агломерации и расслоения.

Количество: Каждая партия должна быть разделена на 3 части после отбора проб, каждая часть должна быть ≥ 50 г.

7.2 Подготовка образца

Образцы отбирались из партии порошка в соответствии с GB/T 5314-2011 для обеспечения репрезентативности.

Поместите образец в сушильный шкаф ($105 \pm 2^\circ\text{C}$) и сушите в течение 30 минут, затем охладите до комнатной температуры.

Если на поверхности порошка есть масло, используйте ультразвуковую очистку с этанолом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в течение 5 минут и используйте после высыхания.

8 методов испытаний

8.1 Условия испытаний

Температура окружающей среды: $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Относительная влажность: $50 \pm 5\%$, избегать впитывания порошком влаги.

Зона тестирования: Отсутствие помех воздушному потоку, прибор расположен на горизонтальной поверхности.

8.2 Калибровка прибора

Проверьте отверстие воронки ($2,5 \pm 0,02$ мм), чтобы убедиться в отсутствии засоров или деформаций.

Прибор был откалиброван с использованием стандартного порошка (чистый сферический порошок с известной скоростью потока, например, время истечения 30 ± 1 с/50 г) с отклонением $< \pm 2\%$.

8.3 Процедуры испытаний

Взвесьте $50 \pm 0,01$ г образца и запишите массу (m).

Временно закройте отверстие в нижней части воронки пальцем или перегородкой и высыпьте образец в воронку, чтобы порошок распределился равномерно.

Включите секундомер и одновременно снимите перегородку, чтобы порошок мог свободно высыпаться.

Когда порошок полностью вытечет (в воронке не останется остатка), остановите отсчет времени и запишите время вытекания (t, единица измерения: секунды).

Каждый образец измерялся 3 раза, и бралось среднее значение с отклонением $< \pm 2$ с.

Если порошок не может вытечь или застрял на полпути, запишите это как «невозможно вытечь».

8.4 Обработка данных

Текучесть выражается как время истечения (с/50 г) с одним десятичным знаком (например, 32,5 с/50 г).

Если отклонение трех измерений составляло > 2 с, выбросы исключались, и тест повторялся.

9 Результаты Выражение

Текучесть выражается как время истечения (с/50 г) с точностью до одной десятой.

Отчет об испытаниях должен включать:

- a) Номер стандарта: GB/T 1482-2010; b) Описание образца: тип порошка, партия, распределение размеров частиц; c) Условия испытаний: температура, влажность; d) Состояние прибора: отверстие воронки, калибровка; e) Результаты: среднее время истечения и отклонение; f) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.; g) Испытатель: подпись.

10. Точность и предвзятость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.1 Точность

Повторяемость: Отклонение времени истечения, измеренное одним и тем же оператором и на одном и том же оборудовании, составляет $<\pm 2$ с.

Воспроизводимость: Отклонение времени истечения, измеренное разными лабораториями, составляет $<\pm 3$ с.

10.2 Предвзятость

Погрешность прибора: отклонение апертуры воронки $\pm 0,02$ мм, время удара $<\pm 1$ с.

Порошкообразное состояние: поглощение влаги или агломерация увеличивают время истечения на 2–5 с.

Эксплуатационная ошибка: неравномерная заливка или отклонение во времени влияют на $<\pm 1$ с.

11 Факторов Влияния

11.1 Распределение размеров частиц

Размер частиц <45 мкм увеличивает адгезию и продлевает время истечения на 5-10 с; размер частиц >150 мкм имеет хорошую текучесть и сокращает время истечения на 3-5 с.

11.2 Форма частиц

Сферические порошки (например, полученные методом AEM Deposition, со временем истечения <35 с/50 г) текут лучше, чем порошки неправильной формы (на 5–10 с дольше).

11.3 Состояние поверхности

Шероховатая поверхность или сопутствующие шарики (мелкие прикрепленные частицы) увеличат время истечения на 3–8 секунд.

11.4 Условия окружающей среды

При влажности $>60\%$ порошок впитывает влагу, и время истечения увеличивается на 2–5 с.

11.5 Свойства порошка

Высокая адгезия или трение (например, мелкие порошки или окисленные поверхности) приводят к плохой текучести и могут привести к отсутствию текучести.

12. Применение результатов испытаний

12.1 Контроль качества

Время истечения <35 с/50 г соответствует требованиям процесса SLM 3D-печати.

12.2 Оптимизация процесса

Время истечения >40 с/50 г указывает на плохую форму частиц и необходимость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оптимизации процесса распыления.

12.3 Прогнозирование производительности

Время истечения <30 с/50 г соответствует хорошему равномерному распределению порошка и уровню дефектов печати <1%.

12.4 Примеры

Порошок титанового сплава (Ti-6Al-4V), время истечения 32,5 с/50 г, используется для печати авиационных деталей, шероховатость поверхности Ra < 5 мкм.

13 Заметок

13.1 Калибровка прибора

Перед испытанием воронкообразная апертура и секундомер были откалиброваны с отклонением <±1%.

13.2 Качество образца

Убедитесь, что образец сухой и не содержит агломератов.

13.3 Экологический контроль

Температура в помещении для испытаний составляла 23±2°C, а влажность — 50±5%.

13.4 Защита безопасности

Избегайте разлета пыли во время работы и надевайте защитную маску.

14 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные данные о ликвидности

Таблица А.1 Время истечения обычных металлических порошков

Тип порошка	Размер частиц (мкм)	Форма частиц	Время истечения (с/50 г)
Порошок титанового сплава	15-45	сферический	30,0-35,0
Порошок из нержавеющей стали	20-63	сферический	28.0-33.0
Медный порошок	45-100	нерегулярный	35,0-40,0

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Ошибка прибора

Отклонение апертуры воронки на ±0,02 мм влияет на время истечения на <±1 с.

В.2 Порошковое состояние

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

Поглощение влаги продлевает время истечения на 2–5 с.

Б.3 Воздействие на окружающую среду

Влажность >60% увеличивает время истечения на 2-3 с.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Используйте автоматическую систему синхронизации для уменьшения ошибок ручного синхронизации.

С.2 Используйте лазерный анализатор размера частиц для точного контроля распределения размеров частиц. С.3 Внедрите вибрационное устройство для улучшения текучести высоколипких порошков.

Приложение D. Примеры тестовых данных

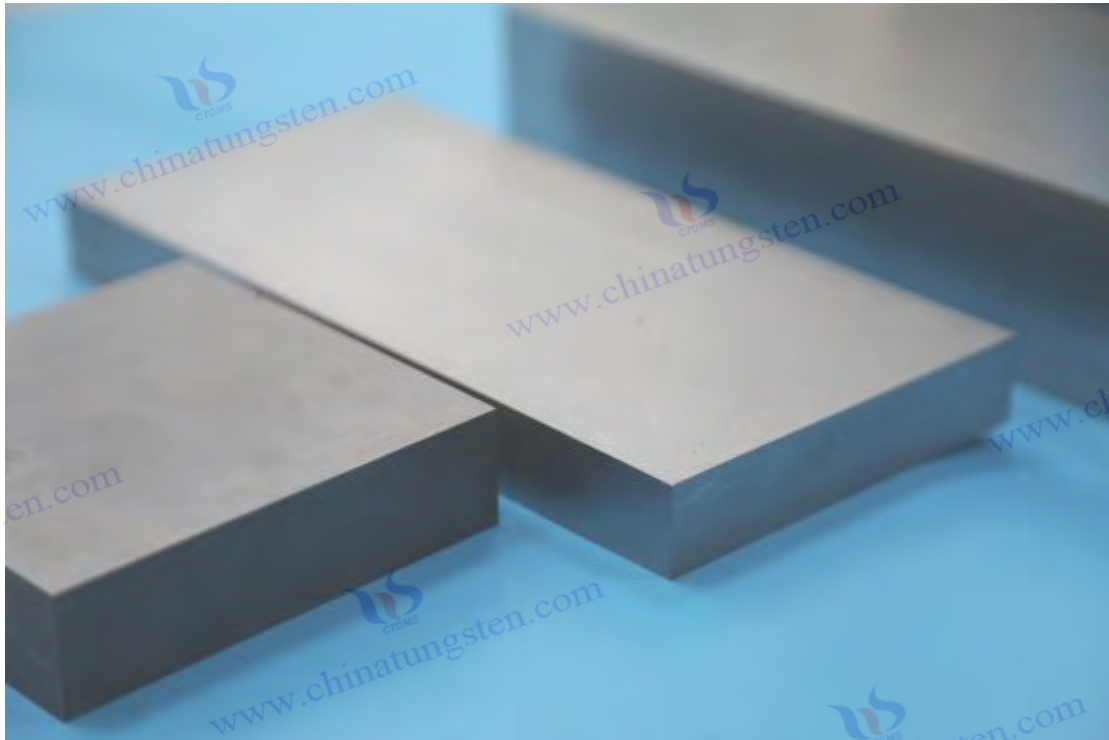
Таблица D.1 Данные испытаний текучести порошка нержавеющей стали

Номер образца	Масса(г)	Время(а) потока	Среднее время истечения (с/50 г)
CC-001	50.02	32.8	32,5
CC-002	50.01	32.4	32,5
CC-003	50.00	32.3	32,5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



GB/T 5243-2008 Метод маркировки свойств твердых сплавов

1 Область применения

Этот стандарт определяет метод маркировки для производительности класса твердого сплава. Этот метод применим к твердому сплаву (включая серии YG, YT и YW) с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) в качестве связующей фазы. Его рабочие параметры, включая химический состав, физические свойства и механические свойства, уточняются с помощью унифицированного метода маркировки. Этот стандарт может использоваться для выбора материала, контроля качества, приемки производства и управления производительностью класса в исследованиях и разработках.

Настоящий стандарт не распространяется на твердые сплавы, не содержащие кобальта, или твердые сплавы, не содержащие WC.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 18376-2014 Метод испытания микроструктуры твердого сплава

GB/T 3850-2015 Метод определения плотности твердого сплава

GB/T 5169-2013 Метод испытания пористости твердого сплава

GB/T 5242-2006 Классификация марок твердого сплава и руководство по применению

ISO 4499-1 Методы определения физических свойств твердого сплава. Часть 1: Плотность

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 4499-2 Методы определения механических свойств твердого сплава. Часть 2: Твердость

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Твердый сплав — это композиционный материал, изготовленный из карбида вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальта (Co) в качестве связующей фазы с помощью порошковой металлургии.

3.2 Марка

Идентификационный код твердого сплава отражает его химический состав, физические и механические свойства и используется для различения материалов различного назначения.

3.3 Химический состав

Массовая доля (мас. %) каждого элемента в твердом сплаве, включая WC, Co и добавленные элементы (такие как TiC, TaC).

3.4 Физические свойства:

плотность, пористость, размер зерна и другие свойства твердого сплава.

3.5 Механические свойства:

твердость, прочность на изгиб, вязкость и другие свойства твердого сплава.

4. Метод оценки эффективности бренда

4.1 Правила наименования бренда

Марки твердого сплава обозначаются комбинацией букв и цифр в соответствии со следующими правилами:

Первая буква: указывает категорию приложения.

YG: Универсальный твердый сплав (сплав WC-Co).

Твердый сплав, содержащий карбид титана (TiC) с высокой износостойкостью.

Твердый сплав, содержащий карбид тантала (TaC) или карбид ниобия (NbC) с превосходными комплексными характеристиками.

Число: указывает содержание кобальта (Co) (мас. %), например YG6 означает, что содержание кобальта составляет 6%.

Суффикс (необязательно): указывает на особое исполнение или использование.

K: Для резки (например, YG6K).

M: Для ударопрочности (например, YG8M).

F: Мелкое зерно (например, YG6F).

4.2 Маркировка параметров производительности

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

Эффективность бренда должна включать следующие параметры, обозначенные в фиксированном формате:

Химический состав: содержание WC, содержание Co, содержание примесей (мас.%).

Физические свойства: плотность (г/см^3), пористость (%), размер зерна (мкм).

Механические свойства: твердость (HRA), прочность на изгиб (МПа), вязкость разрушения ($\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

4.3 Формат аннотации

Результаты оценок отмечаются в табличной форме, например:

Бренд: YG6

Химический состав: WC 94%, Co 6%

Физические свойства: плотность $14,9 \text{ г/см}^3$, пористость $<0,05\%$, размер зерна $0,8-1,0 \text{ мкм}$.

Механические свойства: твердость 91,5 HRA, прочность на изгиб 2200 МПа, вязкость разрушения $10,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$

5 методов испытаний

5.1 Определение химического состава

После отбора проб в соответствии с GB/T 5314-2011 содержание WC, Co и примесных элементов определялось методом химического анализа с точностью $\pm 0,1 \text{ мас. \%}$.

5.2 Определение физических свойств

Плотность: Согласно GB/T 3850-2015, точность $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$.

Пористость: согласно GB/T 5169-2013, металлографический метод или метод анализа изображений, точность $\pm 0,01\%$.

Размер зерна: согласно GB/T 18376-2014, измерен с помощью металлографического микроскопа, точность $\pm 0,1 \text{ мкм}$.

5.3 Определение механических свойств

Твердость: в соответствии с ISO 4499-2, твердость по Виккерсу (HV) или Роквеллу (HRA), точность $\pm 0,5 \text{ HRA}$.

Прочность на изгиб: в соответствии с ISO 3327, метод трехточечного изгиба, точность $\pm 50 \text{ МПа}$.

Вязкость разрушения: по методу одностороннего надреза (SENB), точность $\pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

6 результатов Выражение

Эффективность классов приведена в таблице, где значения параметров сохранены с точностью до указанных десятичных знаков:

Химический состав: с точностью до 1 знака после запятой (например, 94,0%).

Плотность: с точностью до 2 знаков после запятой (например, 14,90 г/см^3).

Пористость: с точностью до 2 знаков после запятой (например, 0,05%).

Размер зерна: с точностью до 1 десятичного знака (например, 1,0 мкм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Твердость: с точностью до 1 знака после запятой (например, 91,5 HRA).

Прочность на изгиб: сохранять целые числа (например, 2200 МПа).

Вязкость разрушения: с точностью до одной десятой (например, $10,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

Отчет об испытаниях должен включать:

а) Номер стандарта: GB/T 5243-2008; б) Марка: например, YG6; в) Описание образца: партия, размер; д) Метод испытания: химический состав, физические свойства, механические свойства; е) Результаты: таблица эксплуатационных параметров; ф) Дата испытания: например, 21 мая 2025 г.; г) Испытатель: подпись.

7 Точность и предвзятость

7.1 Точность

Химический состав: Отклонение повторяемости $\leq \pm 0,1 \text{ мас. \%}$.

Физические свойства: Отклонение плотности $\leq \pm 0,01 \text{ г/см}^3$, отклонение пористости $\leq \pm 0,02\%$.

Механические свойства: отклонение твердости $\leq \pm 0,5 \text{ HRA}$, отклонение прочности на изгиб $\leq \pm 50 \text{ МПа}$.

7.2 Предвзятость

Погрешность прибора: погрешность весов $\pm 0,0001 \text{ г}$, погрешность микроскопа $\pm 0,1 \text{ мкм}$.

Неоднородность образца: Отклонение состава $> 0,1 \text{ мас. \%}$ влияет на колебание прочности на изгиб на $\pm 100 \text{ МПа}$.

Влияние окружающей среды: Влажность $> 70\%$ завышает пористость на $0,01\text{--}0,03\%$.

8 Факторов Влияния

8.1 Колебание состава

Содержание кобальта $\pm 0,5\%$ приведет к изменению твердости на $\pm 1 \text{ HRA}$ и изменению прочности на изгиб на $\pm 200 \text{ МПа}$.

8.2 Размер зерна

Размер зерна $< 0,5 \text{ мкм}$ увеличивает твердость ($> 92 \text{ HRA}$) и снижает ударную вязкость ($< 9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$); размер зерна $> 2 \text{ мкм}$ снижает твердость ($< 90 \text{ HRA}$) и увеличивает ударную вязкость ($> 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

8.3 Процесс спекания

Температура $> 1450^\circ\text{C}$ увеличивает пористость ($> 0,1\%$) и снижает прочность на изгиб на $100\text{--}300 \text{ МПа}$.

8.4 Добавление элементов

TiC $> 5\%$ увеличивает твердость ($+1 \text{ HRA}$) и снижает ударную вязкость ($-1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9. Применение оценок эффективности

9.1 Выбор материала

YG6 (твёрдость 91,5 HRA, прочность на изгиб 2200 МПа) подходит для режущих инструментов.

9.2 Оптимизация процесса

Прочность на изгиб <2000 МПа свидетельствует о том, что температура спекания недостаточна и ее следует отрегулировать до 1400–1450 °С.

9.3 Прогнозирование производительности

Твёрдость>91 HRA, вязкость>10 МПа·м^{1 / 2} соответствует стойкости резания>5 часов.

9.4 Примеры

YG8 (прочность на изгиб 2400 МПа, ударная вязкость 11,0 МПа·м^{1 / 2}), используется для ударных сверл, срок службы >3000 ударов.

10. Заметки

10.1 Калибровка прибора

Весы и микроскоп были откалиброваны перед тестированием с отклонением <±1%.

10.2 Качество образца

Убедитесь, что образец не имеет трещин и имеет однородный состав.

10.3 Контроль окружающей среды

Температура в помещении, где проводились испытания, составляла 20–25 °С, а влажность — <60%.

10.4 Защита безопасности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы избежать разлета пыли.

11 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Свойства распространенных марок цементированного карбида

Таблица А.1 Типичные свойства марок

Бренд	WC (вес.%)	Co (мас.%)	Плотность (г/см³)	Пористость(%)	Размер зерна (мкм)	Твёрдость (HRA)	Прочность на изгиб (МПа)	Вязкость разрушения (МПа·м ^{1 / 2})
YG6	94.0	6.0	14.90	0,04	0,8-1,0	91,5	2200	10.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Бренд	WC (вес.%)	Co (мас.%)	Плотность (г/см ³)	Пористость(%)	Размер зерна (мкм)	Твердость (HRA)	Прочность на изгиб (МПа)	Вязкость разрушения (МПа·м ^{1/2})
YG8	92.0	8.0	14.70	0,05	1,0-1,2	90,5	2400	11.0
YT15	79.0	6.0	12.50	0,03	0,6-0,8	92.0	1800	9.0

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Ошибка прибора

Погрешность балансировки $\pm 0,0001$ г влияет на плотность $< 0,01$ г/см³.

В.2 Отклонение выборки

Неравномерный состав приводит к колебаниям прочности на изгиб в пределах ± 100 МПа.

В.3 Воздействие на окружающую среду

Влажность $> 70\%$ завышает пористость на $0,01-0,03\%$.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Рентгеновская флуоресценция (РФ) используется для анализа состава с точностью $\leq \pm 0,05$ мас. %.

С.2 Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) используется для измерения размера зерна с точностью $\leq \pm 0,05$ мкм. С.3 Внедрена автоматизированная система тестирования для повышения согласованности измерений.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний производительности класса YG6

параметр	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	среднее значение
Плотность (г/см ³)	14.91	14.89	14.90	14.90
Твердость (HRA)	91.4	91.6	91,5	91,5
Прочность на изгиб (МПа)	2180	2220	2200	2200

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

ГБ/Т 34505-2017

Аддитивное производство Металлический порошок Спецификации метода приготовления

1 Область применения

Этот стандарт определяет спецификации метода подготовки металлических порошков для аддитивного производства, включая выбор сырья, процесс подготовки, контроль качества и требования к производительности. Этот метод применим к металлическим порошкам (таким как титановые сплавы, алюминиевые сплавы, нержавеющая сталь и т. д.), используемым в аддитивном производстве (например, селективная лазерная плавка SLM, электронно-лучевая плавка EBM и т. д.), чтобы гарантировать, что распределение размеров частиц, морфология, текучесть и химический состав порошка соответствуют требованиям процесса аддитивного производства. Этот стандарт может использоваться для руководства процессом подготовки порошка, приемки производства и проверки производительности.

Настоящий стандарт не распространяется на неметаллические порошки или металлические порошки, не предназначенные для аддитивного производства.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 1482-2010 Определение текучести металлических порошков - Метод реометра Холла

GB/T 5314-2011 Метод отбора проб порошка для порошковой металлургии

GB/T 13305 Методы химического анализа стали и ферросплавов

GB/T 19077.1-2008 Измерение распределения размеров частиц методом лазерной дифракции.

Часть 1: Общие положения

ISO 13320-1:2009 Анализ размера частиц методом лазерной дифракции

ASTM B214-16 Определение насыпной плотности металлических порошков

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Аддитивное производство (АП)

— это технология, при которой изделия изготавливаются путем послойного нанесения материалов, включая SLM, EBM и т. д.

3.2 Металлический порошок

Частицы металла или сплава, полученные с помощью специального процесса и используемые в качестве сырья для аддитивного производства.

3.3 Метод подготовки: процесс

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

переработки металлического сырья в порошки, отвечающие требованиям аддитивного производства, включая метод распыления, метод механического дробления и т. д.

3.4 Распределение размеров частиц

Статистическое распределение размеров частиц порошка, обычно выражаемое как D10, D50 или D90.

3.5 Сферичность:

Степень, в которой частицы порошка близки к сферической форме, что влияет на равномерность и текучесть распределения порошка.

4 Метод приготовления

4.1 Выбор сырья

Тип материала: Используйте металлы или сплавы высокой чистоты (например, Ti-6Al-4V, нержавеющая сталь 316L) с содержанием примесей $\leq 0,1$ мас. %.

Первоначальная форма: металлический стержень, проволока или губчатый металл (например, титановая губка).

Требования к чистоте: содержание кислорода $\leq 0,2$ мас.%, содержание азота $\leq 0,05$ мас. %.

4.2 Процесс подготовки

4.2.1 Распыление газа

Принцип: Расплавленный металл распыляется на мелкие капли с помощью газа высокого давления (например, азота или аргона) и охлаждается до образования сферического порошка.

Параметры процесса:

Температура плавления: 1500-1800°C (в зависимости от материала).

Давление газа: 2-5 МПа.

Скорость охлаждения: $10^3 - 10^5$ К/с.

Применяемые материалы: титановый сплав, сплав на основе никеля.

Выходные характеристики: размер частиц 10-150 мкм, сферичность $>0,9$.

4.2.2 Процесс плазменного вращающегося электрода (PREP)

Принцип: После того, как вращающийся электрод расплавлен, он под действием центробежной силы образует капли и охлаждается, превращаясь в порошок.

Параметры процесса:

Скорость вращения электрода: 10000-20000 об/мин.

Мощность: 50-100 кВт.

Охлаждающая среда: аргон или гелий.

Применимые материалы: металлы с высокой температурой плавления (например, вольфрам и молибден).

Выходные характеристики: размер частиц 20-200 мкм, сферичность $>0,95$, содержание

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

кислорода $<0,1$ мас. %.

4.2.3 Механическое легирование

Принцип: Металлические порошки смешиваются и измельчаются с помощью высокоэнергетической шаровой мельницы.

Параметры процесса:

Время измельчения в шаровой мельнице: 10-50 часов.

Соотношение мяча и материала: от 10:1 до 20:1.

Скорость вращения: 300-500 об/мин.

Применяемые материалы: композитные материалы на основе алюминия.

Выходные характеристики: размер частиц 1-50 мкм, нерегулярная морфология.

4.2.4 Метод растворения-осаждения

Принцип: Металл растворяется, а затем осаждается в порошок в контролируемых условиях.

Параметры процесса:

Температура растворения: $150-200^{\circ}\text{C}$.

Давление: 0,5-1,0 МПа.

Соотношение твердого вещества и жидкости: 0,05-0,1 г/мл.

Применимые материалы: Металлический порошок с полипропиленовым покрытием.

Выходные характеристики: размер частиц 20-50 мкм, регулируемая сферичность.

4.3 Постобработка

Просеивание: используйте вибросито или классификацию потоком воздуха для контроля диапазона размеров частиц (например, 15–45 мкм).

Сушка: сушить при температуре $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа для удаления влаги.

Обработка поверхности: Защитите инертным газом (например, Ar) для уменьшения окисления.

5. Контроль качества

5.1 Химический состав

Определено в соответствии с GB/T 13305, содержание кислорода $\leq 0,2$ мас. %, содержание азота $\leq 0,05$ мас. %, общее содержание примесей $\leq 0,3$ мас. %.

5.2 Распределение размеров частиц

Определено в соответствии с GB/T 19077.1-2008, $D_{10} \geq 10$ мкм, $D_{50} = 20-50$ мкм, $D_{90} \leq 100$ мкм.

5.3 Морфология и сферичность

Наблюдение с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) показало, что сферичность составляет $\geq 0,9$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.4 Ликвидность

Измеренное в соответствии с GB/T 1482-2010 время истечения составляет ≤ 35 с/50 г.

5.5 Насыпная плотность

см³ (в зависимости от материала) согласно измерениям ASTM B214-16.

6. Выражение результатов

Свойства приготовленных порошков приведены в табличной форме:

Химический состав: содержание каждого элемента (мас.%).

Распределение размеров частиц: D10, D50, D90 (мкм).

Морфология: сферичность и описание изображения, полученного с помощью СЭМ.

Текучесть: Время течения (с/50 г).

Насыпная плотность: г/см³.

Отчет об испытаниях должен включать:

a) Номер стандарта: GB/T 34505-2017; b) Тип порошка: марка материала, партия; c) Метод приготовления: параметры процесса; d) Результаты испытаний: таблица эксплуатационных параметров; e) Дата испытаний: например, 21 мая 2025 г.; f) Испытатель: подпись.

7 Точность и предвзятость

7.1 Точность

Распределение размеров частиц: Отклонение повторяемости $< \pm 5$ мкм.

Текучесть: Отклонение повторяемости $< \pm 2$ с.

Химический состав: Отклонение повторяемости $< \pm 0,1$ мас. %.

7.2 Предвзятость

Погрешность прибора: отклонение анализатора размера частиц составляет ± 2 мкм, что влияет на размер частиц $< \pm 5\%$.

Отклонение процесса: Колебание давления газа на $\pm 0,5$ МПа приводит к изменению распределения размеров частиц на ± 10 мкм.

Влияние окружающей среды: Влажность $> 60\%$ снижает текучесть на 2–5 с.

8 Факторов Влияния

8.1 Чистота сырья

Содержание кислорода $> 0,2$ мас.% увеличивает окисление поверхности порошка, а текучесть снижается на 5–10 с.

8.2 Параметры процесса

Скорости охлаждения $< 10^{-3}$ К/с привели к образованию частиц неправильной формы со сферичностью $< 0,8$.

Скорость вращения электрода < 10000 об/мин приводит к получению частиц большего

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

размера (>200 мкм).

8.3 Постобработка

Неравномерное просеивание приводит к отклонению распределения размеров частиц более чем на 10%.

Недостаточная сушка снижает насыпную плотность на $0,1-0,2$ г/см³.

9. Применение результатов подготовки

9.1 Процесс аддитивного производства

Размер частиц 15-45 мкм, текучесть <35 с/50 г, подходит для SLM-печати.

9.2 Оптимизация производительности

Сферичность $>0,9$, содержание кислорода $<0,1$ мас.%. Улучшают прочность на разрыв печатных деталей (>800 МПа).

9.3 Примеры

Порошок Ti-6Al-4V ($D_{50} = 35$ мкм, текучесть 32 с/50 г) применяется для лопаток авиационных турбин с шероховатостью поверхности $Ra <10$ мкм.

10. Заметки

10.1 Калибровка прибора

Анализатор размера частиц и расходомер Холла были откалиброваны перед испытанием с отклонением $\leq \pm 1\%$.

10.2 Управление процессом

Обеспечьте чистоту газа $>99,99\%$, чтобы избежать загрязнения.

10.3 Контроль окружающей среды

Температура в помещении для испытаний составляла $23 \pm 2^\circ\text{C}$, а влажность — $50 \pm 5\%$.

10.4 Защита безопасности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы предотвратить разлет металлической пыли.

11 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные параметры приготовления металлического порошка

Таблица А.1 Параметры процесса различных методов приготовления

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

метод	Материал	Температура (°C)	Давление (МПа)	Размер частиц (мкм)	Сферичность	Содержание кислорода (% масс.)
Распыление газа	Ti-6Al-4V	1700	3.0	20-50	>0,9	<0,15
Метод ПОДГОТОВКИ	Вольфрамовый сплав	1800	4.0	30-100	>0,95	<0,10
Механическое легирование	Композитные материалы на основе алюминия	Комнатная температура	-	1-50	<0,7	<0,20

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Ошибка прибора

Анализатор размера частиц имеет отклонение ± 2 мкм, что влияет на размер частиц на $\leq \pm 5\%$.

В.2 Отклонение процесса

Колебание давления газа на $\pm 0,5$ МПа приводит к изменению распределения размеров частиц на ± 10 мкм.

В.3 Воздействие на окружающую среду

Влажность $> 60\%$ снижает текучесть на 2–5 с.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Для повышения точности до ± 1 мкм использовался лазерный анализ размера частиц.

С.2 Для снижения содержания кислорода до $< 0,05$ мас. % использовалась вакуумная среда.

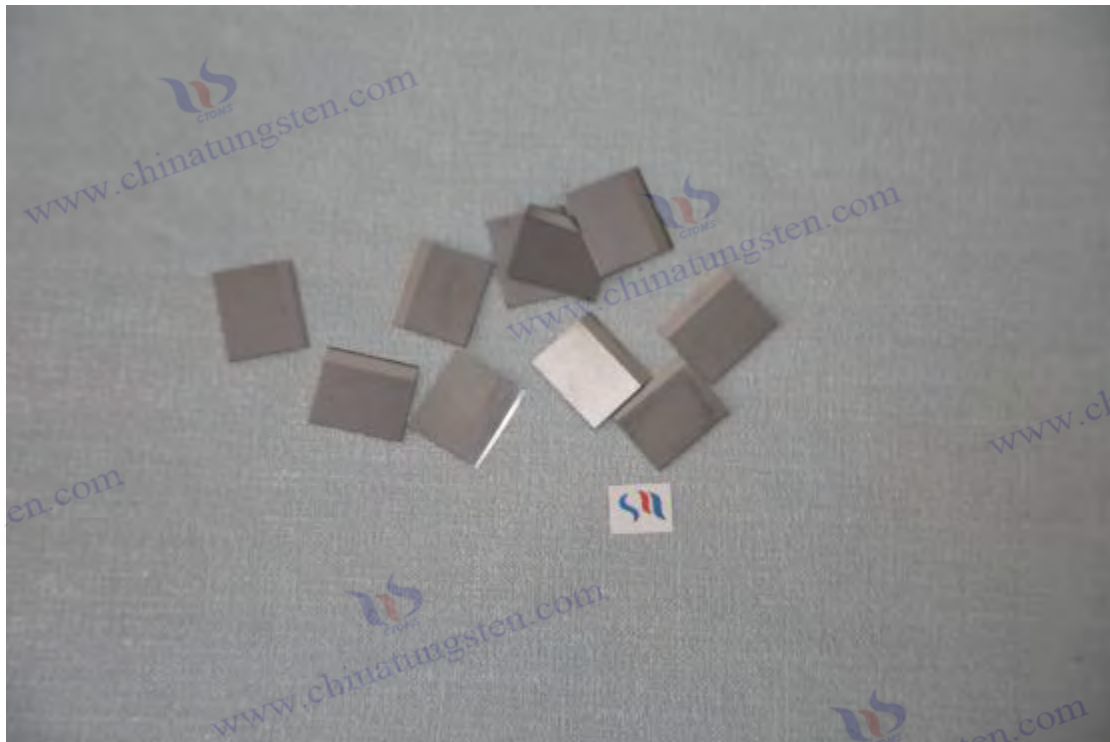
С.3 Для оптимизации параметров процесса была внедрена система онлайн-мониторинга.

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний на подготовку порошка Ti-6Al-4V

параметр	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	среднее значение
D50 (мкм)	34,5	35.0	34,8	34,8
Текучесть (с/50 г)	32.2	32.0	32.3	32.2
Содержание кислорода (% масс.)	0,12	0,13	0.11	0,12

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



GB/T 26048-2010 Технические условия на процесс спекания твердого сплава

1 Область применения

Этот стандарт определяет спецификации для процесса спекания твердого сплава, включая подготовку сырья, параметры процесса спекания, требования к оборудованию, контроль качества и методы испытаний производительности. Этот метод применим к процессу спекания твердого сплава (например, серий YG, YT, YW) с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) в качестве связующей фазы, в основном используемых для производства режущих инструментов, форм и износостойких деталей. Этот стандарт может использоваться для руководства процессом спекания, приемки производства и проверки производительности.

Настоящий стандарт не распространяется на спекание твердых сплавов, не содержащих кобальт или WC.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы являются существенными для применения настоящего стандарта. Для любого датированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется только датированная версия. Для любого недатированного ссылочного документа к настоящему стандарту применяется последняя версия (включая все поправки).

GB/T 18376-2014 Метод испытания микроструктуры твердого сплава

GB/T 3850-2015 Метод определения плотности твердого сплава

GB/T 5169-2013 Метод испытания пористости твердого сплава

GB/T 5243-2008 Метод маркировки свойств 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

ISO 3327 Метод определения прочности на изгиб твердого сплава

ISO 4499-2 Методы определения механических свойств твердого сплава. Часть 2: Твердость

3 Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения.

3.1 Твердый сплав — это композиционный материал, изготовленный из карбида вольфрама (WC)

в качестве твердой фазы и кобальта (Co) в качестве связующей фазы с помощью порошковой металлургии.

3.2 Спекание — это

процесс объединения частиц порошка в плотное твердое вещество путем нагревания, обычно при температуре ниже температуры плавления основных компонентов.

3.3 Жидкофазное спекание

В процессе спекания связующая фаза (например, кобальт) плавится, образуя жидкую фазу, которая способствует перегруппировке частиц и уплотнению.

3.4 Твердотельное спекание:

В процессе спекания жидкая фаза не образуется, а соединение частиц достигается только за счет твердотельной диффузии.

3.5 Микроструктура

Организационные характеристики твердого сплава после спекания, включая размер зерна, пористость и распределение фаз.

4 Процесс спекания

4.1 Подготовка сырья

Выбор порошка: используйте порошки WC и Co высокой чистоты, чистота WC $\geq 99,8\%$, чистота Co $\geq 99,9\%$, содержание примесей $\leq 0,1$ мас. %.

Размер частиц: размер зерна WC 0,5-2,0 мкм, размер частиц порошка Co 1-3 мкм.

Смешивание: Для смешивания используется сухая или мокрая шаровая мельница с соотношением шаров к материалу от 5:1 до 10:1 в течение 24–48 часов для обеспечения однородности (отклонение $\leq \pm 0,5$ мас. %).

Прессование: Прессование смешанного материала в сырую массу под давлением 100–300 МПа и плотностью сырой массы 50–60 % от теоретической плотности.

4.2 Процесс спекания

4.2.1 Одностадийное спекание (вакуумное спекание)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оборудование: Вакуумная печь для спекания, максимальная температура 1550°C, степень вакуума $\leq 10^{-2}$ Па.

Параметры процесса:

Скорость нагрева: 5-10°C/мин до 600°C (удаление присадок), выдержка 1 час.

Продолжайте повышать температуру до 1400-1450°C (температура спекания жидкой фазы) и поддерживайте ее в течение 1-2 часов.

Скорость охлаждения: 5-10 °C/мин до 1000 °C, затем охлаждение естественным путем до комнатной температуры.

Атмосфера: вакуум или аргон низкого давления ($< 0,1$ МПа).

Применимые марки: YG6, YG8, подходят для режущих инструментов.

4.2.2 Двухстадийное спекание (твердофазное + жидкофазное спекание)

Оборудование: печь для спекания в атмосфере водорода, печь для вакуумного спекания.

Параметры процесса:

Твердофазное спекание: выдерживать при температуре 1300–1350 °C (ниже точки плавления кобальта) в течение 1 часа в атмосфере водорода для улучшения начального связывания частиц.

Жидкофазное спекание: повысить температуру до 1450–1480 °C и выдерживать при этой температуре в течение 30–60 минут в вакууме или атмосфере аргона для достижения полного уплотнения.

Охлаждение: 5-10°C/мин до 1000°C, затем естественное охлаждение.

Применимые марки: YT15, YW1, подходят для материалов, требующих мелкого зерна.

4.2.3 Горячее изостатическое прессование (спекание HIP)

Оборудование: Печь горячего изостатического прессования, максимальное давление 100 МПа, максимальная температура 1500°C.

Параметры процесса:

Температура спекания: 1400-1450°C.

Давление: 50-100 МПа.

Время сохранения тепла: 1-2 часа.

Охлаждение: Охладить до комнатной температуры в печи.

Применимые марки: Высокопроизводительные марки (например, YG6F) используются для деталей, требующих низкой пористости.

4.3 Обработка после спекания

Охлаждение: контролируйте скорость охлаждения, чтобы избежать трещин, вызванных термическим напряжением.

Очистка поверхности: Удалите поверхностный оксидный слой или остатки и очистите этанолом.

Регулировка размера: Калибровка размера выполняется на основе усадки (15%-20%).

5. Контроль качества

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1 Химический состав

Определено в соответствии с GB/T 5243-2008, отклонение содержания WC и Co составляет $\leq \pm 0,5$ мас.%, а содержание примесей — $\leq 0,1$ мас.%.

5.2 Микроструктура

Размер зерна: измерен в соответствии с GB/T 18376-2014, размер зерна WC 0,8-1,5 мкм.

Пористость: Измерено в соответствии с GB/T 5169-2013, пористость $\leq 0,05\%$.

Распределение фаз: Фаза кобальта распределена равномерно, без явной сегрегации.

5.3 Физические свойства

Плотность: определяется в соответствии с GB/T 3850-2015, относительная плотность $\geq 99\%$.

Усадка: Линейная усадка 15%-20%, отклонение $\leq \pm 1\%$.

5.4 Механические свойства

Твердость: измерена в соответствии с ISO 4499-2, HRA ≥ 90 .

Прочность на изгиб: измерена в соответствии с ISO 3327, ≥ 2000 МПа.

6 результатов Выражение

Свойства после спекания приведены в таблице:

Химический состав: содержание WC, Co (мас.%).

Микроструктура: размер зерна (мкм), пористость (%).

Физические свойства: плотность (г/см^3), усадка (%).

Механические свойства: твердость (HRA), прочность на изгиб (МПа).

Отчет об испытаниях должен включать:

a) Номер стандарта: GB/T 26048-2010; b) Марка: например, YG6; c) Процесс спекания: одностадийный, двухстадийный или HIP; d) Параметры процесса: температура, время, атмосфера; e) Результаты испытаний: таблица эксплуатационных параметров; f) Дата испытаний: например, 21 мая 2025 г.; g) Испытатель: подпись.

7 Точность и предвзятость

7.1 Точность

Размер зерна: Отклонение повторяемости $\leq \pm 0,1$ мкм.

Пористость: Отклонение повторяемости $\leq \pm 0,02\%$.

Твердость: Отклонение повторяемости $\leq \pm 0,5$ HRA.

Прочность на изгиб: Отклонение повторяемости $\leq \pm 50$ МПа.

7.2 Предвзятость

Погрешность прибора: погрешность микроскопа $\pm 0,1$ мкм, влияющая на размер зерна $\leq \pm 5\%$.

Отклонение процесса: Колебание температуры на $\pm 10^\circ\text{C}$ приводит к изменению пористости на $\pm 0,03\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Влияние окружающей среды: Содержание кислорода в атмосфере $>0,01\%$ увеличивает пористость на $0,01-0,02\%$.

8 Факторов Влияния

8.1 Температура

Температуры $<1400^{\circ}\text{C}$ приводят к недостаточному уплотнению и пористости $>0,1\%$; температуры $>1480^{\circ}\text{C}$ вызывают аномальный рост зерен ($>2\text{ мкм}$).

8.2 Время выдержки

При выдержке <30 минут уплотнение неполное и относительная плотность $<98\%$. При выдержке >2 часов зерна растут и твердость снижается на $0,5-1\text{ HRA}$.

8.3 Атмосфера

Содержание кислорода $> 0,01\%$ приводит к окислению поверхности и увеличению пористости на $0,02-0,05\%$.

8.4 Свойства порошка

Размер зерна $<0,5\text{ мкм}$ увеличивает твердость ($>92\text{ HRA}$), но снижает прочность на изгиб ($<1800\text{ МПа}$).

9. Применение результатов спекания

9.1 Режущие инструменты

YG6 (твердость $91,5\text{ HRA}$, прочность на изгиб 2200 МПа), используется для токарных инструментов, срок службы > 5 часов.

9.2 Оптимизация процесса

Пористость $> 0,05\%$ указывает на то, что температура спекания недостаточна и ее следует отрегулировать до 1450°C .

9.3 Прогнозирование производительности

Относительная плотность $>99\%$, твердость $>91\text{ HRA}$, что соответствует увеличению износостойкости на 20% .

9.4 Примеры

YG8 (двухстадийное спекание, размер зерна $1,0\text{ мкм}$, прочность на изгиб 2400 МПа), используется для штамповочных штампов, срок службы $>10\,000$ раз.

10. Заметки

10.1 Калибровка прибора

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Температура печи спекания и степень вакуума были откалиброваны перед испытаниями с отклонением $\leq \pm 1\%$.

10.2 Управление процессом

Убедитесь, что чистота атмосферы составляет $>99,99\%$, и избегайте окисления.

10.3 Контроль окружающей среды

Температура в камере спекания составляла $23 \pm 2^\circ\text{C}$, а влажность $<60\%$.

10.4 Защита безопасности

Во время работы надевайте защитные очки, чтобы предотвратить разлетание порошка.

11 Приложение (Информационное приложение)

Приложение А Типичные параметры процесса спекания

Таблица А.1 Параметры спекания различных марок

Бренд	Метод спекания	Температура (°C)	Время выдержки (мин)	атмосфера	Относительная плотность(%)	Размер зерна (мкм)
YG6	Вакуумное спекание	1450	60	вакуум	99,5	0,8-1,0
YG8	Двухстадийное спекание	1350+1480	60+30	Водород + вакуум	99.3	1,0-1,2
YT15	спекание методом горячего изостатического прессования	1450	90	Аргон + давление	99,8	0,6-0,8

Приложение В Анализ ошибок

В.1 Ошибка прибора

Отклонение температуры на $\pm 10^\circ\text{C}$ влияет на пористость на $\leq \pm 0,03\%$.

В.2 Отклонение процесса

Отклонение времени выдержки на ± 5 минут приводит к изменению относительной плотности на $\pm 0,5\%$.

В.3 Воздействие на окружающую среду

Содержание кислорода в атмосфере $> 0,01\%$ увеличивает пористость на $0,01-0,02\%$.

Приложение С Предложения по улучшению

С.1 Использовать онлайн-мониторинг температуры для контроля отклонения $\leq \pm 5^\circ\text{C}$.

С.2 Использовать инертный газ высокой чистоты для снижения содержания кислорода до $<0,005\%$.

С.3 Внедрить технологию быстрого охлаждения для замедления роста зерна.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение D. Примеры тестовых данных

Таблица D.1 Данные испытаний на спекание YG6

параметр	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	среднее значение
Относительная плотность(%)	99.4	99,5	99,6	99,5
Размер зерна (мкм)	0.9	0.8	1.0	0.9
Твердость (HRA)	91.4	91.6	91,5	91,5

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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