

Энциклопедия композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

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

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2025 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

Tel: 0086 592 512 9696
CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2025V
sales@chinatungsten.com

ЗНАКОМСТВО С CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, дочерняя компания с независимой правосубъектностью, учрежденная 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 — первый в Китае веб-сайт высшего уровня по вольфрамовым продуктам — является новаторской компанией электронной коммерции в стране, специализирующейся на вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности. Опираясь на почти тридцатилетний опыт работы в области вольфрама и молибдена, CTIA GROUP наследует исключительные возможности своей материнской компании в области проектирования и производства, превосходные услуги и глобальную деловую репутацию, став поставщиком комплексных прикладных решений в области химических веществ вольфрама, металлов вольфрама, твердых сплавов, сплавов высокой плотности, 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 элементами. С 2013 года официальный аккаунт WeChat «CHINATUNGSTEN ONLINE» опубликовал более 40 000 единиц информации, обслуживая почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставляя бесплатную информацию сотням тысяч профессионалов отрасли по всему миру. Благодаря совокупному количеству посещений веб-сайта и официального аккаунта, достигшему миллиардов раз, компания стала признанным глобальным и авторитетным информационным центром для вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной отраслей, предоставляющим 24/7 многоязычные новости, характеристики продукции, рыночные цены и услуги по рыночным тенденциям.

Опираясь на технологии и опыт CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологию искусственного интеллекта, она совместно с клиентами разрабатывает 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 интегрированные услуги, начиная от вскрытия пресс-форм, пробного производства и заканчивая отделкой, упаковкой и логистикой. За последние 30 лет компания CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по исследованиям и разработкам, проектированию и производству более 500 000 видов вольфрамовых и молибденовых изделий для 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 в области вольфрама и молибдена в эпоху промышленного интернета.

Д-р Ханне и его команда в CTIA GROUP, основываясь на своем более чем 30-летнем опыте работы в отрасли, также написали и обнародовали знания, технологии, цены на вольфрам и рыночные тенденции, связанные с вольфрамом, молибденом и редкоземельными элементами, свободно делясь ими с вольфрамовой промышленностью. Д-р Хан, обладая более чем 30-летним опытом работы с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовыми и молибденовыми изделиями, а также в разработке и производстве цементированных карбидов и сплавов высокой плотности, является признанным экспертом в области вольфрама и молибдена как внутри страны, так и за рубежом. Придерживаясь принципа предоставления профессиональной и качественной информации отрасли, команда CTIA GROUP постоянно пишет технические исследовательские работы, статьи и отраслевые отчеты, основанные на производственной практике и потребностях клиентов на рынке, завоевав широкое признание в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологических инноваций, продвижения продукции и отраслевых обменов CTIA GROUP, что позволяет ей стать лидером в мировом производстве вольфрамовой и молибденовой продукции и информационных услугах.



Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2025 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

Tel: 0086 592 512 9696
CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2025V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item		Typical Value	Remarks
Tungsten Purity		≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Content	Oxide	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Range	Current	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance		2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Improvement	Life	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Каталог

Глава 1 Введение

- 1.1 Понятие и определение композитного редкоземельного вольфрамового электрода
- 1.2 История разработки, технический фон и статус исследований композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 1.3 Важность композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в современной промышленности

Глава 2 Состав материала и классификация композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

- 2.1 Основные характеристики материалов на основе вольфрама и ограничения чисто вольфрамовых электродов
- 2.2 Типы и функции оксидов редкоземельных элементов
- 2.3 Стандарты классификации композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 2.4 Общие модели и спецификации композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 2.5 Анализ влияния состава материала композиционных редкоземельных вольфрамовых электродов на эксплуатационные характеристики
- 2.6 Сравнение композитных редкоземельных вольфрамовых электродов с традиционными ториевыми вольфрамовыми электродами

Глава 3 Процесс подготовки и производства и технология композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

- 3.1 Подготовка сырья и соотношение
- 3.2 Подробное объяснение процесса порошковой металлургии
- 3.3 Процесс редукции
- 3.4 Формовка и процесс формовки
- 3.5 Процесс спекания
- 3.6 Технология обработки давлением
- 3.7 Технология обработки поверхности и нанесения покрытий
- 3.8 Контроль ключевых параметров в процессе подготовки
- 3.9 Оптимизация процессов и анализ общих дефектов
- 3.10 Технология получения зеленого сырья
- 3.11 Технологическая схема крупномасштабного производства

Глава 4 Физико-химические и сварочные характеристики композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

- 4.1 Механические свойства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 4.2 Термические свойства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 4.3 Электрические свойства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 4.4 Химическая стабильность и коррозионная стойкость композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 4.5 Сварочные характеристики композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

- 4.6 Влияние редкоземельных добавок на микроструктуру
- 4.7 Сравнение характеристик вольфрамовых электродов
- 4.8 Адаптивность к окружающей среде композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 4.9 Анализ усталостных и ресурсных характеристик композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 4.10 Композитный редкоземельный вольфрамовый электрод MSDS от CTIA GROUP LTD

Глава 5 Использование и рекомендации по применению композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

- 5.1 Обзор основных областей применения композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 5.2 Типы сварки, применимые к композитным редкоземельным вольфрамовым электродам
- 5.3 Примеры промышленного применения композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 5.4 Рекомендуемые параметры процесса сварки композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 5.5 Меры предосторожности при использовании композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 5.6 Решение распространенных проблем с композитными редкоземельными вольфрамовыми электродами
- 5.7 Применение композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в новых областях
- 5.8 Анализ экономических выгод композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Глава 6 Производственное оборудование для производства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

- 6.1 Оборудование для обработки сырья для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 6.2 Восстановительное и легирующее оборудование для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 6.3 Формовочное оборудование для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 6.4 Агломерационное оборудование для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 6.5 Технологическое оборудование для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 6.6 Оборудование для обработки поверхности композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 6.7 Вспомогательное оборудование для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 6.8 Рекомендации по выбору и техническому обслуживанию оборудования для производства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 6.9 Проектирование и интеграция автоматических производственных линий для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

6.10 Оборудование для обеспечения безопасности и защитные меры для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Глава 7 Отечественные и зарубежные стандарты на композитные редкоземельные вольфрамовые электроды

- 7.1 Отечественные стандарты на композитные редкоземельные вольфрамовые электроды
- 7.2 Международные стандарты на композитные редкоземельные вольфрамовые электроды
- 7.3 Нормы состава материалов для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 7.4 Стандарты эксплуатационных испытаний композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 7.5 Стандарты охраны окружающей среды и безопасности для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 7.6 Система сертификации композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 7.7 Сравнение и анализ применимости стандартов композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 7.8 Последние стандартные обновления для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Глава 8 Испытание и проверка качества композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

- 8.1 Методы эксплуатационных испытаний композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 8.2 Испытание механических свойств композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 8.3 Анализ микроструктуры композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 8.4 Определение химического состава композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 8.5 Технология обнаружения дефектов композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 8.6 Оценка ресурса и анализ надежности композитных редкоземельных вольфрамовых электродов
- 8.7 Ключевые моменты контроля качества композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Глава 9 Соображения безопасности и охраны окружающей среды композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

- 9.1 Требования к безопасности эксплуатации
- 9.2 Риски для здоровья и меры защиты
- 9.3 Оценка воздействия на окружающую среду
- 9.4 Технологии переработки и повторного использования
- 9.5 Требования к хранению и транспортировке
- 9.6 Принципы «зеленого» производства
- 9.7 Соответствие нормативным требованиям

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Глава 10 Будущие тенденции развития композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

- 10.1 Новые технологии комбинирования редкоземельных элементов и легирования
- 10.2 Нанолегирование и диффузионное упрочнение оксидов редкоземельных элементов
- 10.3 Интеграция технологии интеллектуальной оптимизации параметров сварки на основе искусственного интеллекта
- 10.4 Зеленое производство и устойчивое развитие
- 10.5 Перспективы применения в аэрокосмической, атомной промышленности, медицинском производстве и других областях

Приложение

Глоссарий

Ссылки

Глава 1 Введение

1.1 Понятие и определение композитного редкоземельного вольфрамового электрода

Композитный редкоземельный вольфрамовый электрод представляет собой разновидность вольфрама высокой чистоты в качестве матрицы, легированной различными оксидами редкоземельных элементов (такими как оксид лантана La_2O_3 , оксид церия CeO_2 , оксид иттрия Y_2O_3 , диоксид циркония ZrO_2 и т.д.) усовершенствованные электродные материалы, которые оптимизируют эксплуатационные характеристики. Его суть заключается в «композитной» конструкции, то есть за счет синергии нескольких оксидов редкоземельных элементов электрод значительно улучшает электронную эмиссионную способность, стабильность дуги, высокую термостойкость и срок службы электрода. По сравнению с традиционными чистыми вольфрамовыми электродами или одиночными редкоземельными вольфрамовыми электродами, композитные редкоземельные вольфрамовые электроды демонстрируют лучшие комплексные характеристики в таких областях, как сварка, резка и плавка, что делает их незаменимыми ключевыми материалами для современной промышленности.

Согласно техническому определению, композитный редкоземельный вольфрамовый электрод относится к неплавящемуся электродному материалу, полученному методом порошковой металлургии, химического легирования или распыления раствора путем легирования 1%~4% массовой доли оксидов редкоземельных элементов в вольфрамовой матрице. Он в основном используется в сварке в среде инертного газа (сварка TIG), плазменной сварке, резке, термическом напылении и электрических источниках света. По типу и количеству оксидов редкоземельных элементов их можно разделить на бинарные композиты (например, церий-лантан-вольфрамовые электроды), тройные композиты (такие как церий-лантан-иттрий-вольфрамовые электроды) и мультикомпозитные электроды. Международные стандарты (такие как ISO 6848:2015) классифицируют его как неплавкий электрод, а распространенные модели включают серию WL (лантан вольфрам), серию WC (цериевый вольфрам), серию WY (иттриевый вольфрам) и индивидуальные мультикомпозитные модели.

Разработка композитных редкоземельных вольфрамовых электродов обусловлена ограничениями традиционных вольфрамовых электродов. Чистые вольфрамовые электроды имеют температуру плавления до 3410°C и отличную коррозионную стойкость, но их работа по убеганию электронов высока (около 4,5 эВ), что приводит к сложному закручиванию дуги, нестабильной дуге и быстрой потере электродов. Ранние ториевые вольфрамовые электроды (содержащие ThO_2) улучшали производительность за счет снижения рабочей функции, но радиоактивность тория представляла угрозу для окружающей среды и здоровья оператора. Вводя нерадиоактивные оксиды редкоземельных элементов, композитный редкоземельный вольфрамовый электрод не только сохраняет высокую температуру плавления и стабильность вольфрама, но и значительно снижает работу убегания электронов (до 2,0 ~ 2,5 эВ), улучшает стабильность дуги (индекс стабильности может достигать более 95%) и продлевает срок службы (в 23 раза дольше, чем чистый вольфрамовый электрод).

С точки зрения микроструктуры, вольфрамовая матрица композитного редкоземельного вольфрамового электрода распределена с мелкими частицами оксида редкоземельных элементов, которые повышают механическую прочность и ударную вязкость материала, подавляя рост зерна и улучшая структуру зерна. Например, оксид церия снижает рабочую функцию и способствует эмиссии электронов; Оксид лантана улучшает стабильность дуги; оксид иттрия усиливает механические свойства при высоких температурах; Диоксид циркония улучшает антиоксидантные свойства. Синергетический эффект этих редкоземельных элементов позволяет электроду оставаться стабильным при высоких плотностях тока ($>100 \text{ А/мм}^2$) за счет оптимизации граничных свойств зерен, снижения высокотемпературного испарения и препятствования распространению трещин.

Что касается процесса подготовки, композитные редкоземельные вольфрамовые электроды могут быть получены путем механического смешивания или химического легирования. Метод механического смешивания физически смешивает порошок вольфрама с порошком оксида редкоземельных элементов, который является простым, но немного менее однородным. Методы химического легирования позволяют достичь легирования на атомном уровне за счет распыления раствора или технологии совместного осаждения для лучшей однородности. Выбор технологического процесса влияет на равномерность распределения редкоземельных элементов и стабильность свойств электродов, например, химическое легирование позволяет контролировать размер частиц оксида редкоземельных элементов на нанометровом уровне, значительно повышая долговечность электрода.

Концепция композитных редкоземельных вольфрамовых электродов охватывает и ее распространение в новых областях. Например, его объединяют с карбидом вольфрама или нитридом вольфрама для получения композитных материалов, пригодных для электродов аккумуляторов новой энергии, или используют в качестве носителей катализатора для электрохимических реакций. Эти расширенные области применения демонстрируют его универсальность, способствуя переходу от традиционных сварочных материалов к высокотехнологичным секторам. Кроме того, его экологически чистые свойства (нерадиоактивность, соответствие требованиям REACH) делают его идеальной альтернативой ториевым вольфрамовым электродам, удовлетворяя мировой спрос на экологически чистые материалы.

С точки зрения эксплуатационных показателей, типичные характеристики композитных редкоземельных вольфрамовых электродов включают диаметр $1,0 \sim 10,0 \text{ мм}$, длину $150 \sim 175 \text{ мм}$, а поверхность может быть полирована, окислена или покрыта. К его ключевым параметрам относятся: мощность убегания электронов $< 2,5 \text{ эВ}$, стабильность дуги $> 95\%$, срок службы дуги $500 \sim 1000$ часов (в зависимости от условий процесса). Эти характеристики делают его широко используемым в высокоточной сварке, аэрокосмической промышленности и новых энергетических областях.

1.2 История разработки, технический фон и статус исследований композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Процесс разработки композитных редкоземельных вольфрамовых электродов тесно связан с развитием технологии сварки, материаловедения и требований к защите окружающей среды. В начале 20-го века вольфрам использовался в качестве электродного материала из-за его высокой температуры плавления и химической стабильности, но недостаточная производительность чистых вольфрамовых электродов ограничивала их применение. В 1913 году был представлен ториевый вольфрамовый электрод (содержащий 1% ~ 2% ThO₂), который значительно улучшил характеристики дугового разряда за счет уменьшения рабочей функции и широко использовался при сварке TIG. Тем не менее, радиоактивность тория постепенно привлекает к себе внимание, особенно в контексте все более строгих экологических норм.

В 1973 году команда Ван Цзюйчжэня на Шанхайском заводе по производству лукович в Китае успешно разработала цериевый вольфрамовый электрод (содержащий CeO₂), что стало новаторским прорывом в области редкоземельных вольфрамовых электродов. Церий-вольфрамовые электроды быстро заменили некоторые ториево-вольфрамовые электроды с нерадиоактивностью, низкой рабочей функцией (около 2,7 эВ) и отличной стабильностью дуги, и были включены в стандарт ISO 6848. В 80-х годах 20 века, с развитием технологии порошковой металлургии, начали появляться бинарные композитные редкоземельные вольфрамовые электроды (такие как комбинации церий-лантан). Пекинский завод по производству вольфрам-молибденовых материалов и другие учреждения добились равномерного распределения редкоземельных элементов и улучшили комплексные характеристики электродов за счет оптимизации процесса легирования.

В 90-е годы актуальной темой стала разработка тройных композитных редкоземельных вольфрамовых электродов (таких как комбинации церия, лантана, лантана и иттрия). Техническая база включает в себя широкое применение сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеновской дифракции (XRD) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для выявления микроскопического распределения оксидов редкоземельных элементов в вольфрамовых подложках. Например, исследования показали, что частицы оксида редкоземельных элементов могут образовывать стабильную вторую фазу, ингибировать огрубение зерен вольфрама при высоких температурах и продлевать срок службы электродов. В тот же период проект «Технология индустриализации мультикомпозиционных редкоземельных вольфрамовых электродов», поддерживаемый китайским планом 863, способствовал крупномасштабному производству, охватывающему восстановление водорода, холодное изостатическое прессование и вакуумное спекание.

В 21 веке области применения композитных редкоземельных вольфрамовых электродов расширились от традиционной сварки до плазменной резки, термического напыления и аккумуляторов на новых источниках энергии. После 2000 года глобальный спрос на экологически чистые материалы привел к росту популярности радиоактивных электродов. Техническая база включает в себя внедрение нанотехнологий, использование редкоземельных нанопорошков для улучшения однородности легирования, а размер частиц контролируется в диапазоне 50 ~ 100 нм. Кроме того, автоматизированное производственное

оборудование (например, распылительные сушилки, среднечастотные индукционные печи для спекания) значительно повышает производительность и консистенцию.

В 2010-х годах исследования были сосредоточены на оптимизации производительности и контроле дефектов. Например, механизм стратификации спекания выявил влияние градиента температуры на распределение редкоземельных элементов и оптимизировал параметры спекания (1450~1800°C, вакуум $<10^{-3}$ Па). Международные стандарты, такие как AWS A5.12/A5.12M, дополнительно регулируют требования к составу, испытаниям производительности и контролю качества электродов. В тот же период стабильность цепочки поставок редкоземельных элементов стала проблемой, и в отчете Global Critical Minerals Outlook подчеркивается стратегическая важность редкоземельных ресурсов.

По состоянию на 2025 год статус исследований композитных редкоземельных вольфрамовых электродов демонстрирует междисциплинарную тенденцию. К популярным местам относятся:

Новые области применения: В литий-ионных аккумуляторах, топливных элементах и фотоэлектрическом оборудовании композитные редкоземельные вольфрамовые электроды используются в качестве катодов или проводящих покрытий для повышения плотности энергии и срока службы.

«Зеленое» производство: Процесс извлечения редкоземельных элементов из угольных отходов снижает зависимость от первичных минералов, что соответствует концепции экономики замкнутого цикла.

Интеллектуальное производство: оптимизация процессов с помощью искусственного интеллекта и технология 3D-печати используются для изготовления электродов по индивидуальному заказу, повышая точность изготовления сложных конструкций.

Эксплуатационные испытания: испытание на долговечность дуги (> 1000 часов), эксперимент по ускоренному старению и анализ микроструктуры (SEM/TEM) обеспечивают надежные данные для оценки производительности.

К числу проблем относятся нехватка редкоземельных ресурсов, высокие затраты на переработку и международные торговые барьеры, но возможности заключаются в политической поддержке (например, в регулировании управления редкоземельными элементами в Китае) и растущем рыночном спросе. Согласно прогнозу мирового рынка, годовое потребление композитных редкоземельных вольфрамовых электродов превысило 1 600 тонн, а среднегодовой темп роста, как ожидается, достигнет 5,8% в 2025 ~ 2030 годах.

1.3 Значение композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в современной промышленности

Важность композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в современной промышленности обусловлена их превосходными эксплуатационными характеристиками, многопрофильным применением и вкладом в экологически чистое производство. Являясь «зеленой» альтернативой ториевым вольфрамовым электродам, он устраняет радиоактивные

риски и соответствует международным экологическим нормам (например, REACH, RoHS), способствуя устойчивому развитию в сварочной промышленности.

В области сварки композитные редкоземельные вольфрамовые электроды являются основными материалами для сварки TIG и плазменной сварки. Его низкая рабочая функция и высокая стабильность дуги (>95%) обеспечивают высокое качество сварных швов и широко используются в аэрокосмической промышленности (сварка титана и нержавеющей стали), автомобилестроении (легкая сварка алюминиевых сплавов) и атомной энергетике (сварка трубопроводов реакторов). Например, в авиационном секторе электроды обеспечивают бездефектную сварку сложных компонентов, отвечая строгим стандартам безопасности; В автомобильной промышленности он помогает прецизионной сварке компонентов аккумуляторов электромобилей для повышения эффективности производства.

В области новой энергетики композитные редкоземельные вольфрамовые электроды используются в качестве электродных материалов или проводящих покрытий для литий-ионных аккумуляторов, топливных элементов и фотоэлектрического оборудования. Например, в производстве литиевых батарей его высокая проводимость и коррозионная стойкость увеличивают срок службы электродов (>5000 циклов). В фотоэлектрической промышленности плазменные электроды для резки кремниевых пластин повышают точность и долговечность резки.

В электронной промышленности композитные редкоземельные вольфрамовые электроды используются в катодах и нитях полупроводниковых приборов, обеспечивая стабильную электронную эмиссию и поддерживая требования к высокой точности производства чипов. Кроме того, в области термического напыления его высокая термостойкость (>3000°C) и стойкость к окислению используются для напыления износостойких покрытий и продления срока службы механических компонентов.

В военной и медицинской сферах композитные редкоземельные вольфрамовые электроды поддерживают высокоточную сварку, такую как производство броневых оболочек и медицинских имплантатов. Его высокая температура плавления и химическая стабильность обеспечивают надежность в экстремальных условиях.

С точки зрения экономической выгоды, композитные редкоземельные вольфрамовые электроды значительно экономят производственные затраты за счет продления срока службы (500 ~ 1000 часов) и снижения затрат на техническое обслуживание. Например, при сварке TIG время горения дуги более чем в 2 раза больше, чем у чистых вольфрамовых электродов, что снижает частоту замены. Анализ мирового рынка показывает, что спрос на продукцию высокого класса привел к росту рынка в среднем на 5% в год.

В стратегическом плане дефицит редкоземельных ресурсов и незаменимость композитных редкоземельных вольфрамовых электродов делают их ключевыми материалами и привлекают внимание политиков. В Законе ЕС о критически важном сырье и Правилах

обращения с редкоземельными элементами в Китае подчеркивается важность защиты цепочек поставок редкоземельных элементов, содействия исследованиям и разработкам технологий переработки и альтернативных процессов. Ожидается, что к 2025 году объем рынка композитных редкоземельных вольфрамовых электродов превысит 1 миллиард долларов, став важной опорой для высокотехнологичной отрасли.



Глава 2 Состав материала и классификация композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

2.1 Основные характеристики материалов на основе вольфрама и ограничения по электродам из чистого вольфрама

Материалы на основе вольфрама широко используются в производстве электродов благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, являясь ядром композитных редкоземельных вольфрамовых электродов. Вольфрам является тугоплавким металлом с чрезвычайно высокой температурой плавления, отличной термической и химической стабильностью, что делает его идеальным для неплавящихся электродов. Его основные свойства включают высокую плотность, хорошую проводимость и очень низкое давление пара, что делает его превосходным в условиях высокотемпературной и сильноточной сварки.

Вольфрам имеет температуру плавления 3410°C, самую высокую среди всех металлов, что гарантирует, что электрод не плавится и не деформируется значительно при температуре дуги.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Вольфрам имеет плотность 19,25 г/см³, что придает ему отличную механическую прочность и устойчивость к износу. Кроме того, вольфрам имеет электропроводность около 30% меди, что ниже, чем у обычных проводящих материалов, но достаточно для поддержки сильноточной сварки. Его химическая стабильность проявляется в инертности к кислотам, щелочам и окисляющим средам при комнатной температуре, что делает его пригодным для использования в сложных промышленных условиях. Вольфрам имеет низкий коэффициент теплового расширения всего $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, что снижает риск термического растрескивания под напряжением при высоких температурах.

Однако чистые вольфрамовые электроды имеют существенные ограничения в практическом применении. Во-первых, чистый вольфрам имеет высокую работу по убеганию электронов, что приводит к плохим характеристикам дугового разряда. При сварке TIG чистые вольфрамовые электроды требуют более высокого напряжения для инициирования дуги, что увеличивает потребление энергии и потенциально может привести к нестабильности дуги. Во-вторых, стабильность дуги чистого вольфрамового электрода недостаточна, особенно при сварке сильным током или сваркой переменным током, дуга легко дрейфует, что влияет на качество сварного шва. Кроме того, укрупнение зерен чистых вольфрамовых электродов при высоких температурах может привести к хрупкости материала и сокращению срока его службы. В высокотемпературных средах оксиды также могут образовываться на поверхности вольфрама, что приводит к загрязнению электродов и снижению производительности.

Еще одним ограничением чистых вольфрамовых электродов является их более низкая способность к эмиссии электронов. В процессе сварки эффективность эмиссии электронов напрямую влияет на стабильность и концентрацию энергии дуги. Высокая рабочая функция чистых вольфрамовых электродов затрудняет поддержание стабильной дуги в условиях низкого тока, что ограничивает их применение в прецизионной сварке. Кроме того, износостойкость и стойкость к выгоранию чистых вольфрамовых электродов ограничены, особенно при длительной высокоинтенсивной сварке, где наконечник электрода подвержен абляции и нуждается в частой замене, что увеличивает производственные затраты.

Эти ограничения привели исследователей к изучению оптимизации характеристик вольфрамовых электродов с помощью легирующих модификаций. В первые дни оксиды тория использовались в качестве легирующих примесей для улучшения электронной эмиссии, но их проблемы с радиоактивностью привели к разработке нетоксичных оксидов редкоземельных элементов. Композитные редкоземельные вольфрамовые электроды преодолевают недостатки чистых вольфрамовых электродов за счет введения различных оксидов редкоземельных элементов, став основным выбором современных сварочных технологий.

2.2 Виды и функции оксидов редкоземельных элементов

Оксиды редкоземельных элементов являются ключевыми добавками для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, а их тип и действие напрямую определяют степень оптимизации характеристик электрода. К обычно используемым оксидам

редкоземельных элементов относятся оксид лантана (La_2O_3), оксид церия (CeO_2), оксид иттрия (Y_2O_3) и диоксид циркония (ZrO_2), которые снижают рабочую функцию, улучшают микроструктуру и повышают устойчивость к высоким температурам. Значительно улучшают работу электродов.

Оксид лантана (La_2O_3) известен своими превосходными электронно-эмиссионными способностями и стабильностью дуги. Добавление оксида лантана снижает работу убегания электронов вольфрамовой матрицы, так что электрод может запускать стабильную дугу при более низком напряжении. Это особенно важно для сварки переменным током и прецизионной сварки, так как это сокращает время запуска дуги и повышает стабильность сварного шва. Оксид лантана также подавляет рост зерен вольфрама при высоких температурах, образуя стабильные частицы второй фазы, повышая стойкость электродов к охрупчиванию. Кроме того, оксид лантана имеет низкую скорость испарения при высоких температурах, что снижает потери электродного материала.

Оксид церия (CeO_2) — еще один широко используемый оксид редкоземельных элементов, известный своей низкой рабочей функцией и высокой эффективностью эмиссии электронов. Добавление оксида церия позволяет электроду быстро закручивать дугу при сварке как постоянным, так и переменным током, что особенно подходит для прецизионной сварки слабыми токами. Частицы оксида церия равномерно распределены в вольфрамовой матрице, что улучшает электро- и теплопроводность электрода, одновременно снижая градиент температуры в зоне концентрации дуги и уменьшая потери на выгорание. Кроме того, оксид церия вносит значительный вклад в противообрастающую способность поверхности электрода, снижая интерференцию примесей на дуге в процессе сварки.

Оксид иттрия (Y_2O_3) в основном улучшает высокотемпературные механические свойства и стойкость электродов к окислению. Оксид иттрия чрезвычайно термически стабилен и может сохранять структурную целостность в условиях высокотемпературной дуговой дуги и уменьшать абляцию на кончике электрода. Добавление оксида иттрия также улучшает зернистую структуру вольфрама, улучшая ударную вязкость и усталостную прочность электрода. Это делает иттрийсодержащие электроды особенно подходящими для сильноточной длительной непрерывной сварки, например, при производстве аэрокосмических компонентов.

Диоксид циркония (ZrO_2) используется в композитных электродах благодаря своей превосходной стойкости к окислению и коррозии. Диоксид циркония образует стабильный защитный слой при высоких температурах, предотвращая реакцию вольфрамовой матрицы с кислородом или другими химически активными газами, тем самым продлевая срок службы электродов. Диоксид циркония также повышает устойчивость электрода к тепловому удару, что делает его пригодным для использования в сложных условиях, таких как плазменная резка. Кроме того, добавление диоксида циркония оптимизирует стабильность дуги, особенно при высокочастотной сварке.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Другие оксиды редкоземельных элементов, такие как оксид неодима (Nd_2O_3) и оксид самария (Sm_2O_3), также исследуются в специальных приложениях. Эти оксиды обеспечивают дополнительную оптимизацию производительности за счет регулировки микроструктуры электрода и электронно-эмиссионных характеристик. Например, оксид неодима еще больше снижает рабочую функцию, в то время как оксид самария повышает стойкость электрода к высокотемпературному окислению.

Механизм действия оксидов редкоземельных элементов заключается в их взаимодействии с вольфрамовой матрицей. При высоких температурах частицы оксида редкоземельных элементов мигрируют на поверхность электрода, образуя точку излучения с низкой рабочей функцией и способствуя утечке электронов. В то же время эти частицы препятствуют проскальзыванию границ зерна за счет эффекта штифтинга, повышая прочность материала при высоких температурах. Например, комбинация оксида церия и оксида лантана обеспечивает баланс между производительностью дугового разряда и сроком службы, в то время как комбинация оксида иттрия и диоксида циркония оптимизирует устойчивость к высоким температурам и коррозионную стойкость.

2.3 Стандарты классификации композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Классификация композитных редкоземельных вольфрамовых электродов основана на типе, количестве и характеристиках применения оксидов редкоземельных элементов с целью удовлетворения различных потребностей сварки и промышленных стандартов. Стандарты классификации в основном включают в себя следующие аспекты:

В зависимости от типа оксида редкоземельных элементов: В зависимости от типа добавляемого оксида редкоземельных элементов электрод можно разделить на одиночный редкоземельный электрод (например, цериевый вольфрам, лантановый вольфрам) и композитный редкоземельный электрод. Композитные редкоземельные электроды подразделяются на бинарные композиты (такие как церий-лантан-вольфрамовые электроды), тройные композиты (такие как церий-лантан-итрий-вольфрамовые электроды) и мультикомпозиты (содержащие более трех оксидов редкоземельных элементов). Производительность одного редкоземельного электрода относительно проста, в то время как композитный электрод обеспечивает более комплексную оптимизацию производительности за счет синергии редкоземельных элементов.

В зависимости от содержания редкоземельных элементов: общее содержание оксидов редкоземельных элементов обычно составляет от 1% ~ 4% и делится на электроды с низким содержанием редкоземельных элементов (1% ~ 2%), средних редкоземельных элементов (2% ~ 3%) и высоких редкоземельных элементов (3% ~ 4%) в зависимости от содержимого. Низкосильноточные редкоземельные электроды подходят для низкоточной прецизионной сварки, в то время как высокопрочные редкоземельные электроды используются для сильноточной сварки в тяжелых условиях.

По применению: В зависимости от основного применения, электроды можно разделить на сварочные (например, сварка TIG, плазменная сварка), резка (плазменная резка), напыление (термическое напыление) и электрический источник света (нить, катод). Например, электрод для сварки подчеркивает устойчивость дуги, а электрод для резки – высокую термостойкость.

Согласно международным стандартам: В соответствии со стандартами ISO 6848:2015 и AWS A5.12, композитные редкоземельные вольфрамовые электроды классифицируются по типу редкоземельных элементов и характеристикам. Например, такие модели, как WL20 (содержащий 2% оксида лантана) и WC20 (содержащий 2% оксида церия), указывают тип и содержание редкоземельных элементов, в то время как композитные электроды могут быть представлены пользовательскими номерами, такими как WLaCeY (тройной композит).

По процессу обработки: по способу подготовки его можно разделить на механический смешанный электрод и электрод с химическим легированием. Стоимость электрода механического гибридного метода невысокая, а вот однородность несколько хуже. Химически легированные электроды обеспечивают более высокую равномерность распределения редкоземельных элементов и подходят для высокопроизводительных применений.

Критерии классификации разработаны с учетом баланса между оптимизацией производительности и производственными затратами. Например, бинарные композитные электроды обеспечивают хороший баланс между производительностью и стоимостью и широко используются в промышленной сварке; Тройные или многосоставные электроды предназначены для высокоточных и требовательных сред, таких как аэрокосмическая и атомная энергетика.

2.4 Общие модели и технические характеристики композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Модели и спецификации композитных редкоземельных вольфрамовых электродов сформулированы в соответствии с международными стандартами и рыночным спросом, а общие модели включают серии WL, WC, WY и индивидуальные композитные модели. Ниже приведены основные модели и их технические характеристики:

Серия WL (вольфрамовый электрод из лантана): содержит оксид лантана, обычно выражается как WL10 (1% La_2O_3), WL15 (1,5% La_2O_3), WL20 (2% La_2O_3). Он подходит для сварки TIG и плазменной сварки, с отличными характеристиками инициирования дуги и стабильностью дуги, с диапазоном диаметров 1,0 ~ 10,0 мм и длиной 150 ~ 175 мм.

Серия WC (цериевый вольфрамовый электрод): Содержит оксид церия, распространенная модель - WC20 (2% CeO_2). Он подходит для слаботочной прецизионной сварки и сварки переменным током, имеет диаметр 1,0 ~ 6,4 мм и длину 150 мм, а поверхность обычно полируется для уменьшения загрязнения.

Серия WY (иттриевый вольфрамовый электрод): содержит оксид иттрия, модель типа WY20

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

(2% Y_2O_3), в основном используется для сильноточной сварки постоянным током, отличная устойчивость к высоким температурам, диаметр 2,0 ~ 8,0 мм, длина 150 ~ 175 мм.

Композитные модели: такие как WLaCe (содержит оксид лантана и оксид церия), WLaCeY (содержит оксид лантана, оксид церия и оксид иттрия). Эти модели являются индивидуальными продуктами, содержание редкоземельных элементов регулируется в соответствии с потребностями применения, обычно в пределах 1,5% ~ 3,5%, а диаметр и длина могут быть настроены в соответствии с требованиями заказчика.

Технические характеристики: диаметры электродов варьируются от 0,5 мм (микросварка) до 12,0 мм (сварка в тяжелой промышленности), а длина включает 150 мм, 175 мм и индивидуальную длину. Обработка поверхности включает полировку, окисление и нанесение покрытия, а форма конца может быть заостренной, плоской или сферической в соответствии с потребностями различных сварочных процессов.

Выбор модели зависит от типа сварки, диапазона тока и свойств материала. Например, WL20 подходит для сварки алюминиевых сплавов переменным током, WC20 — для слаботочной сварки нержавеющей стали, а WLaCeY — для сварки высоконагруженной высокопрочной стали. Разнообразие технических характеристик обеспечивает широкое применение электрода в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, атомной энергетике и т. д.

2.5 Анализ влияния состава материала композиционных редкоземельных вольфрамовых электродов на эксплуатационные характеристики

На эксплуатационные характеристики композитных редкоземельных вольфрамовых электродов влияет состав материала, в том числе тип, содержание, равномерность распределения оксидов редкоземельных элементов, а также их взаимодействие с вольфрамовой матрицей. Ниже приведен анализ его влияния с различных точек зрения:

Типы оксидов редкоземельных элементов: различные оксиды редкоземельных элементов по-разному влияют на производительность электродов. Оксид лантана в основном снижает рабочую функцию и улучшает стабильность дуги. оксид церия усиливает инициацию дуги и защиту от загрязнения; Оксид иттрия улучшает прочность при высоких температурах и стойкость к горению; Диоксид циркония улучшает антиоксидантные свойства. Бинарные или тройные композиты оптимизируют комбинированную производительность за счет синергетического действия, такие как электроды WLaCe, которые сочетают в себе низкие эксплуатационные функции и длительный срок службы.

Содержание редкоземельных элементов: Повышенное содержание оксидов редкоземельных элементов обычно снижает рабочую функцию и повышает эффективность электронной эмиссии, но слишком высокое содержание (>4%) может привести к снижению прочности матрицы и дефектам спекания. Низкое содержание 1% ~ 2% подходит для прецизионной сварки, 2% ~ 3% - это общий диапазон, а 3% ~ 4% используется для сварки с высокой

нагрузкой. Оптимизация контента требует баланса между производительностью и стоимостью.

Равномерность распределения: Равномерное распределение оксидов редкоземельных элементов имеет решающее значение для производительности. Метод химического легирования позволяет достичь наноразмерного распределения частиц (< 100 нм) и улучшить проводимость и стабильность электрода. Механическое перемешивание может привести к агломерации частиц, что снижает стабильность производительности. Анализ СЭМ показал, что равномерно распределенные частицы редкоземельных элементов могут эффективно преодолевать границы зерен и повышать способность противостоять высокотемпературной ползучести.

Микроструктура: Добавление оксидов редкоземельных элементов очищает зерна вольфрама, а средний размер зерна уменьшается с $20 \sim 50$ мкм до $5 \sim 10$ мкм чистого вольфрама, что улучшает ударную вязкость и усталостную прочность. Частицы редкоземельных элементов также образуют стабильную вторую фазу, уменьшая проскальзывание границ зерен при высоких температурах и продлевая срок службы электродов.

Синергетический эффект: Мультикомпонитные электроды оптимизируют производительность за счет синергетического действия редкоземельных элементов. Например, комбинация оксида церия и оксида лантана снижает напряжение дуги и продлевает срок службы; Комбинация оксида иттрия и диоксида циркония повышает устойчивость к высоким температурам и коррозионную стойкость. Благодаря такой синергии композитный электрод отлично справляется со сложными условиями эксплуатации.

Адаптируемость к окружающей среде: химическая стабильность оксидов редкоземельных элементов повышает устойчивость электрода к загрязнению, снижая воздействие оксидов или примесей во время сварки. Электроды, содержащие диоксид циркония, демонстрируют большую долговечность в средах с высокой влажностью или агрессивными газами.

Таким образом, структура состава материала должна быть оптимизирована в соответствии с требованиями применения. Аэрокосмическая промышленность может отдавать предпочтение тройным композитным электродам для обеспечения высокотемпературных характеристик, в то время как электронная промышленность склоняется к церий-вольфрамовым электродам с низким содержанием редкоземельных элементов для прецизионной сварки.

2.6 Сравнение композитных редкоземельных вольфрамовых электродов с традиционными ториевыми вольфрамовыми электродами

Существуют значительные различия между композитными редкоземельными вольфрамовыми электродами и традиционными ториевыми вольфрамовыми электродами с точки зрения производительности, экологичности и области применения. Ниже приведено сравнение с нескольких аспектов:

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Характеристики электронной эмиссии: Ториевый вольфрамовый электрод (содержащий 1% ~ 2% ThO₂) обеспечивает хорошие характеристики инициирования дуги благодаря низкой рабочей функции тория, но композитный редкоземельный вольфрамовый электрод еще больше снижает рабочую функцию за счет синергетического эффекта нескольких оксидов редкоземельных элементов, с более низким напряжением дуги и более высокой стабильностью дуги. Например, время зажигания дуги электрода WLaCeY при сварке переменным током примерно на 20% короче, чем у ториевого вольфрамового электрода.

Стабильность дуги: Стабильность дуги композитных редкоземельных вольфрамовых электродов лучше, чем у ториевых вольфрамовых электродов, особенно в условиях высокого тока и переменного тока. Равномерное распределение оксидов редкоземельных элементов снижает дрейф дуги и обеспечивает качество сварных швов. Ториевый вольфрамовый электрод может вызвать нестабильность дуги из-за испарения тория во время длительной сварки.

Срок службы: Срок службы композитных редкоземельных вольфрамовых электродов значительно больше, чем у ториевых вольфрамовых электродов. Низкая скорость испарения и стойкость к выгоранию оксидов редкоземельных элементов позволяют непрерывно использовать электрод в течение 500 ~ 1000 часов при сварке под высокой нагрузкой, в то время как ториевые вольфрамовые электроды обычно работают 300 ~ 500 часов. Увеличенный срок службы снижает частоту замен и производственные затраты.

Охрана окружающей среды и безопасность: ториевые вольфрамовые электроды содержат радиоактивный торий, который может выделять α частиц во время обработки и использования, представляя опасность для здоровья операторов, а утилизация отходов должна соответствовать строгим стандартам радиационной безопасности. Композитные редкоземельные вольфрамовые электроды не радиоактивны и соответствуют нормам REACH и RoHS, что снижает загрязнение окружающей среды и риски для здоровья, что делает их лучшим выбором для экологически чистого производства.

Высокотемпературные характеристики: композитные редкоземельные вольфрамовые электроды демонстрируют лучшую устойчивость к высоким температурам и стойкость к выгоранию за счет измельчения зерен и стойкости к окислению оксидов редкоземельных элементов. Ториевые вольфрамовые электроды склонны к испарению тория при высоких температурах, что приводит к увеличению потерь на кончике электрода.

Применение: Разнообразие моделей композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, таких как WL, WC и WLaCeY, делает их пригодными для более широкого спектра типов сварки и материалов, включая алюминиевые сплавы, нержавеющие стали и жаропрочные сплавы. Хотя ториевый вольфрамовый электрод подходит для различных сварочных работ, сфера его использования постепенно сокращается из-за экологических ограничений.

Стоимость и доступность: Стоимость сырья для ториевых вольфрамовых электродов ниже, но затраты на переработку и утилизацию отходов выше. Ресурсы редкоземельных элементов композитных редкоземельных вольфрамовых электродов стоят дорого, но стоимость производства снижается за счет оптимизации процесса (например, химического легирования), а развитие технологии извлечения редкоземельных элементов повышает доступность ресурсов.

Таким образом, композитные редкоземельные вольфрамовые электроды значительно превосходят ториевые вольфрамовые электроды с точки зрения производительности, защиты окружающей среды и гибкости применения, а также являются предпочтительными материалами для современных сварочных технологий. Его нерадиоактивные свойства и долговечность способствовали его широкому применению на мировом рынке, особенно в Европе и Соединенных Штатах, где строгие требования по защите окружающей среды.



CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item		Typical Value	Remarks
Tungsten Purity		≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Content	Oxide	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Range	Current	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance		2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Improvement	Life	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2025 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

Tel: 0086 592 512 9696
CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2025V
sales@chinatungsten.com

Глава 3 Процесс подготовки и производства и технология композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

3.1 Подготовка сырья и соотношение

Подготовка сырья и соотношение являются основными звеньями подготовки композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, от которых непосредственно зависит стабильность и постоянство свойств материала. Основным сырьем для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов являются материалы на основе вольфрама высокой чистоты и добавки оксидов редкоземельных элементов, а конструкция соотношения должна точно контролироваться для оптимизации электронно-эмиссионной способности электрода, стабильности дуги и долговечности при высоких температурах.

Сырье на основе вольфрама: Материалы на основе вольфрама обычно изготавливаются из триоксида вольфрама (WO_3) или паравольфрама аммония (APT, $(NH_4)_2WO_4$) в качестве исходного ингредиента. Чистота триоксида вольфрама должна достигать более 99,95%, чтобы снизить влияние примесей (таких как железо, кремний, углерод) на производительность электродов. Паравольфрамат аммония часто используется в процессах химического легирования из-за его растворимости в воде и легкости легирования, что исключает дополнительные этапы кальцинирования и сокращает производственные циклы. Размер частиц вольфрамового сырья обычно контролируется от 1 до 5 микрон для обеспечения однородности при последующих процессах восстановления и спекания. Сырье тщательно проверяется на предмет удаления оксидных включений или металлических примесей и обычно подтверждается с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФА).

Добавки к оксидам редкоземельных элементов: Оксиды редкоземельных элементов вводятся в виде нитратов, обычно включая нитрат лантана ($La(NO_3)_3$), нитрат церия ($Ce(NO_3)_3$) и нитрат иттрия ($Y(NO_3)_3$) и нитрат циркония ($Zr(NO_3)_4$). Эти нитраты должны быть составлены в виде раствора в концентрации от 0,1 до 0,5 моль/л, с растворителем в виде деионизированной воды и pH от 5,5 до 6,5 для предотвращения осаждения или химических реакций. Чистота редкоземельных элементов должна быть не менее 99,9%, чтобы неметаллические примеси, такие как сера и фосфор, не влияли на проводимость и стабильность электрода. Общее содержание оксидов редкоземельных элементов обычно составляет от 1% до 4% (массовая доля), а удельное соотношение оптимизируется в соответствии с потребностями применения. Например, бинарный композитный электрод может использовать оксид церия и оксид лантана 1:1, а тройной композитный электрод может быть оксидом церия: оксид лантана: оксид иттрия = 1:1:3 для баланса производительности дугового разряда и стабильности при высоких температурах.

Пропорциональное проектирование: Расчет отношений должен всесторонне учитывать работу по утечке электронов, стабильность дуги и механические свойства. Низкое содержание редкоземельных элементов (от 1% до 2%) подходит для прецизионной сварки, подчеркивая эффективность инициирования дуги; Высокое содержание редкоземельных

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

элементов (от 3% до 4%) подходит для сильноточной сварки в тяжелых условиях, увеличивая долговечность и устойчивость к выгоранию. Эксперименты показывают, что синергетический эффект оксида лантана и оксида церия может снизить работу убегания электронов до 2,0-2,5 эВ, а стабильность дуги улучшается более чем на 95%. В процессе соотношения требуется компьютерное моделирование и экспериментальная проверка оптимизированного соотношения, а общие методы включают ортогональный экспериментальный дизайн и анализ поверхности отклика для определения оптимальной комбинации редкоземельных элементов.

Смешивание сырья: В процессе смешивания используются методы распыления, легирования или пропитки. Раствор нитрата редкоземельных элементов равномерно распыляется в порошок триоксида вольфрама, скорость распыления контролируется на уровне от 0,5 до 1 л/мин, температура сушки составляет от 80 до 120 °C, а распылительная сушилка используется для формирования равномерного легированного порошка. Метод пропитки предполагает замачивание вольфрамового порошка в растворе редкоземельных элементов со скоростью перемешивания от 200 до 300 об/мин для обеспечения равномерной адсорбции. После смешивания порошок следует высушить в вакууме или инертной атмосфере, чтобы избежать окисления. После сушки порошок необходимо просеять через сито с ячейками 200 меш, чтобы удалить агломерированные частицы.

Контроль качества: Подготовка сырья должна строго контролировать содержание влаги (<0,5%) и содержание примесей (<0,01%). Помещение для хранения должно быть сухим, проветриваемым, а температура должна контролироваться в диапазоне от 10 до 25 °C, чтобы избежать ухудшения качества из-за влаги или загрязнения. Запись о соотношении должна быть заархивирована в цифровом виде и взаимодействовать с онлайн-системой мониторинга для обеспечения согласованности между партиями.

3.2 Подробное объяснение процесса порошковой металлургии

Процесс порошковой металлургии является основной технологией подготовки композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, которая обеспечивает уплотнение и оптимизацию производительности материалов за счет подготовки порошка, формования, спекания и последующей обработки. Преимущество этого процесса заключается в том, что он может точно контролировать распределение и микроструктуру оксидов редкоземельных элементов, а также подходит для промышленного производства высокопроизводительных электродов.

Приготовление порошка: Приготовление порошка включает в себя легирование и механическое легирование. Легирование Редкоземельная селитра вводится в вольфрамовый порошок методом распылительной сушки или методом мокрого смешивания, а после сушки образует равномерный легированный порошок. Для механического легирования используется высокоэнергетическая планетарная мельница, а параметры шаровой мельницы составляют: от 400 до 600 об/мин, соотношение шаров от 8:1 до 10:1, а время измельчения от 8 до 12 часов. Среда шаровой мельницы изготовлена из твердосплавных шаров для

предотвращения загрязнения металлов. Механическое легирование измельчает частицы порошка до 0,1-1 микрона, вводя кристаллические дефекты и усиливая последующую активность спекания.

Определение характеристик порошка: Приготовленный порошок должен быть обнаружен лазерным анализатором размера частиц, чтобы убедиться, что D50 (средний размер частиц) находится в диапазоне от 1 до 5 микрон. Удельная площадь поверхности определяется методом BET, обычно от 2 до 5 м²/г, чтобы обеспечить активность спекания. Рентгеновский дифракционный анализ (XRD) подтвердил кристаллическую форму и распределение оксидов редкоземельных элементов, а сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) показала морфологию и однородность частиц.

Формование: Формование прессует порошок в заготовку, а общие методы включают холодное изостатическое прессование и формование. При холодном изостатическом прессовании используется жидкая среда для приложения равномерного давления от 100 до 300 МПа, время формования составляет от 5 до 10 минут, а плотность тела достигает от 60% до 70% от теоретической плотности. Для формования используется жесткая форма, которая подает давление от 150 до 200 МПа через гидравлический пресс, что делает ее пригодной для мелкосерийного производства. В качестве связующего вещества для улучшения формуемости добавляется поливиниловый спирт (ПВА) от 0,5% до 1%, который необходимо удалить при предварительном спекании. Формовочное оборудование должно быть оснащено датчиками давления для обеспечения равномерного распределения давления.

Спекание: Спекание обеспечивает склеивание частиц порошка и уплотнение материала, а также обычно используется вакуумное спекание горячим прессом и искровое плазменное спекание (SPS). Вакуумное спекание горячим прессом осуществляется при давлении от 1600 до 1800 °C и от 50 до 80 МПа, с сегментированным регулированием скорости нагрева (от 10 °C/мин до 1000 °C, 4 °C/мин до целевой температуры), временем выдержки от 60 до 90 минут и вакуумом 10⁻³ Па. SPS использует импульсный ток для быстрого нагрева (от 100 до 200 °C/мин), спекайте при температуре от 1400 до 1600 °C и держите в тепле от 5 до 10 минут, подходит для нанопорошков и снижает испарение редкоземельных элементов. Плотность материала после спекания близка к теоретическому значению (>99%), а размер зерна контролируется от 5 до 10 мкм.

Постобработка: Постобработка включает в себя ротационную ковку, волочение и обработку поверхности. Процессы ротационной ковки спекают заготовки диаметром от 3 до 10 мм, со скоростью деформации от 20% до 30% за проход. Диаметр дополнительно уменьшался до 0,5-10 мм с помощью волочения, смазываемого графитовой эмульсией. Отделка поверхности выполняется путем механической или электрохимической полировки для удаления дефектов поверхности и улучшения отделки.

Преимущества и проблемы процесса: Процесс порошковой металлургии позволяет распределять оксиды редкоземельных элементов диффузионно, повышая электронную

эмиссию электрода и стойкость к выгоранию. К числу проблем относятся контроль однородности порошка и предотвращение дефектов спекания (например, пористости), которые необходимо решать с помощью оптимизации технологического процесса и внутритрубного мониторинга. В будущем сочетание нанотехнологий и автоматизации позволит еще больше повысить эффективность и качество.

3.3 Процесс редукиции

В процессе восстановления триоксид вольфрама или паравольфрамат аммония превращается в вольфрамовый порошок высокой чистоты, фиксируя при этом распределение оксида редкоземельных элементов, что является ключевым этапом в подготовке композитных редкоземельных вольфрамовых электродов. Восстановление водорода широко используется благодаря своей высокой эффективности и чистоте и делится на две ступени восстановления для оптимизации качества порошка.

Первая стадия восстановления: при температуре от 500 до 600 °C легированный порошок триоксида вольфрама помещают в водородную атмосферу с чистотой водорода более 99,99% и расходом от 0,5 до 1 м³/ч. В восстановительной печи используется трубчатая печь или печь с колпаком, а отклонение температуры контролируется на уровне $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Время восстановления регулируется в зависимости от количества порошка, обычно от 4 до 6 часов, для получения промежуточной фазы WO₂, в то время как редкоземельный нитрат разлагается на оксиды и первоначально фиксируется в вольфрамовой матрице. Содержание кислорода падает ниже 1%.

Вторая ступень восстановления: температура повышается до 800-950°C, дополнительно удаляя остаточный кислород и получая чистый вольфрамовый порошок. Расход водорода увеличивается до 1-1,5 м³/ч, что обеспечивает адекватное снижение. Время восстановления составляет от 6 до 8 часов, размер частиц порошка контролируется на уровне от 1 до 5 микрон, а содержание кислорода снижается до менее чем 0,01%. Внутренняя стенка восстановительной печи должна быть изготовлена из устойчивой к высоким температурам нержавеющей стали или молибденового сплава во избежание загрязнения. Восстановленный порошок был проанализирован с помощью SEM и XRD для подтверждения морфологии частиц и распределения редкоземельных элементов.

Технология оптимизации: Снижение температурного градиента (сегментированный нагрев) и уменьшение влажного водорода (водород содержит следовые следы водяного пара) может измельчать частицы и улучшать поверхностную активность. Влажное восстановление водорода способствует равномерному росту зерен вольфрамового порошка за счет контроля содержания водяного пара (от 0,1% до 0,5%). Добавление следовых добавок, таких как карбонат лития, может снизить температуру восстановления и сэкономить потребление энергии.

Безопасность и защита окружающей среды: Система восстановления водорода должна быть оснащена системами обнаружения утечек и вентиляции, а выхлопные газы обрабатываются

устройством абсорбции выхлопных газов для восстановления непрореагировавшего водорода. Технология «зеленого» сокращения исследует использование электрических нагревательных печей с низким энергопотреблением для сокращения выбросов углекислого газа. Оптимизация процесса измельчения обеспечивает высокое качество порошка, закладывая основу для последующего формования и спекания.

3.4 Формовка и процесс формовки

В процессе формовки и формовки легированный вольфрамовый порошок прессуется в заготовку, чтобы обеспечить однородную и плотную исходную структуру для спекания. Качество формования напрямую влияет на конечные характеристики электрода, и общие методы включают холодное изостатическое прессование, формование и гидроформовку.

Холодное изостатическое прессование: равномерное давление (от 100 до 300 МПа) подается через жидкую среду, и порошок загружается в гибкую резиновую форму со временем формования от 5 до 10 минут. Плотность корпуса достигает от 60% до 70% от теоретической плотности, что делает его пригодным для больших электродов (например, > 10 мм в диаметре). Оборудование должно быть оснащено насосом высокого давления и датчиком давления для обеспечения стабильного давления.

Формование: Жесткие стальные формы используются для приложения давления от 150 до 200 МПа через гидравлические прессы, подходят для мелкосерийного производства. Добавьте от 0,5% до 1% поливинилового спирта или парафин в качестве связующего для улучшения сыпучести порошка. После формования корпус необходимо предварительно спечь при температуре от 400 до 600 °C, чтобы удалить связующее вещество и первоначально плотно.

Гидроформовка: используется для электродов сложной формы, смешивание порошка со связующим веществом в суспензию, впрыскивание формы для отверждения. Влажность суспензии контролируется на уровне от 20% до 30%, и она высушивается при комнатной температуре в течение 24 часов после формования, чтобы избежать термического растрескивания. После извлечения из формы следует проверить точность размеров корпуса, а отклонение < 0,1 мм.

Оптимизация процесса: оптимизация распределения давления с помощью моделирования методом конечных элементов для уменьшения градиентов плотности. Добавление наноразмерных частиц оксида редкоземельных элементов может повысить прочность организма. Анализ дефектов показал, что неравномерное давление вызывает образование пористости или трещин, которые необходимо устранять с помощью многоступенчатых профилей и коррекции давления. Автоматизированное формовочное оборудование включает в себя системы визуального контроля для повышения согласованности.

Контроль качества: Формованный корпус необходимо осмотреть с помощью ультразвукового контроля для проверки на наличие внутренних дефектов. При испытании на плотность

используется метод Архимеда для обеспечения однородности. Цифровые записи процесса формования облегчают прослеживаемость и оптимизацию.

3.5 Процесс спекания

В процессе спекания формованное тело уплотняется за счет высокотемпературной обработки, образуя электродный материал высокой плотности и высокой прочности. Спекание композитных редкоземельных вольфрамовых электродов требует сбалансированного баланса оксидов редкоземельных элементов и контроля размера зерен, а общие методы включают вакуумное спекание горячим прессом, искровое плазменное спекание (SPS) и вертикальное спекание плавлением.

Вакуумное спекание горячим прессом: выполняется при температуре от 1600 до 1800 °C, давлении от 50 до 80 МПа, степени вакуума 10^{-3} Па, сегментированное регулирование скорости нагрева: от 10 °C/мин до 1000 °C, 4 °C/мин до целевой температуры, выдерживается в тепле от 60 до 90 минут. Печь для спекания имеет графитовый нагревательный корпус и оснащена инфракрасным термометром для обеспечения равномерной температуры. После спекания плотность материала достигает более 99%, размер зерна составляет от 5 до 10 мкм, а оксиды редкоземельных элементов образуют диффузионную вторую фазу для повышения прочности при высоких температурах.

Искровое плазменное спекание (SPS): быстрый нагрев (от 100 до 200 °C/мин) с использованием импульсного тока, спекание при температуре от 1400 до 1600 °C, от 30 до 50 МПа и выдержка в течение 5-10 минут. SPS подходит для нанопорошков, снижает потери на испарение редкоземельных элементов и контролирует размер зерна от 3 до 8 микрон. Оборудование должно быть оснащено высокоточной системой контроля тока во избежание перегорания.

Вертикальное спекание плавлением: с использованием 90% тока плавления, спекается в частично расплавленном состоянии вольфрамовой матрицы, подходит для электродов большого диаметра. Температура контролируется выше 3000°C, а атмосфера состоит из аргона или водорода для предотвращения окисления. Вертикальное спекание может увеличить плотность, но требуется точное управление током, чтобы избежать испарения редкоземельных элементов.

Предварительное спекание: Проводится при температуре $1200 \pm 50^\circ\text{C}$, вакууме или водородной атмосфере, удаляя связующее вещество и предварительно плотное, выдерживается от 2 до 4 часов. Плотность предварительно спеченного тела достигает от 80% до 85%, обеспечивая стабильную структуру для последующего высокотемпературного спекания.

Технология оптимизации: добавление присадок, таких как ZrH_2 (от 0,1% до 0,5%), может снизить содержание кислорода, сформировать стабильную фазу, такую как $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, и улучшить показатели электронной эмиссии. Сегментированный обогрев позволяет избежать

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

трещин, вызванных перепадами температур. SEM и ТЕМ проанализировали микроструктуру после спекания для подтверждения распределения редкоземельных элементов и состояния зерна.

Контроль дефектов: К распространенным дефектам относятся устья (из-за остаточного кислорода), укрупнение зерна (из-за чрезмерной температуры) и сепарация редкоземельных элементов (из-за испарения). За счет оптимизации степени вакуума и времени выдержки пористость снижается до менее чем 0,1%. При «зеленом» спекании используются низкоэнергетические SPS для сокращения выбросов углерода.

3.6 Технология обработки давлением

Методы обработки давлением обрабатывают спекаемые заготовки в электродные стержни, улучшая плотность и качество поверхности, а общие методы включают ротационную ковку, волочение и правку.

Ротационная ковка: диаметр спеченной заготовки уменьшается с 20 мм до 3-10 мм с помощью роторно-молотковой машины, а скорость деформации составляет от 20% до 30% за проход. Температура обработки составляет от 800 до 1200°C для поддержания пластичности вольфрамовой матрицы. Оборудование для ротационной ковки должно быть оснащено автоматической системой подачи для обеспечения равномерной деформации. После многократной ротационной штамповки плотность материала достигает более 99,5%, а зерна дополнительно очищаются.

Чертеж: Пруток растягивается твердосплавными штампами для уменьшения диаметра до 0,5-10 мм. Скорость выдергивания составляет от 0,5 до 2 м/мин, смазывается графитовой эмульсией, а коэффициент трения составляет $< 0,1$. Машина для вытягивания цепи обеспечивает непрерывное производство и повышает эффективность. Шероховатость поверхности стержня после нанесения составляет $Ra < 0,5$ мкм.

Правка и резка: Для правки используется роликовая правильная машина, чтобы отклонение от прямолинейности стержня составляло $< 0,1$ мм/м. Резка производится с помощью лазерной или механической резки длиной от 150 до 175 мм и допуском $\pm 0,5$ мм.

Оптимизация и контроль дефектов: Моделирование методом конечных элементов оптимизирует параметры деформации для снижения риска образования трещин. Диффузионное распределение оксидов редкоземельных элементов повышает ударную вязкость материала и снижает скорость разрушения. К распространенным дефектам относятся поверхностные царапины (из-за недостаточной смазки) и внутренние трещины (из-за чрезмерной скорости деформации), которые устраняются за счет оптимизации смазки и сегментарной деформации.

Автоматизация: Линия обработки под давлением включает в себя систему онлайн-контроля для контроля диаметра и качества поверхности в режиме реального времени. Степень

автоматизации повышает выход продукции более чем на 98% и снижает трудозатраты.

3.7 Технология обработки поверхности и нанесения покрытий

Технология обработки поверхности и нанесения покрытий является заключительным этапом в улучшении коррозионной стойкости и электронно-эмиссионных свойств композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, включая полировку, очистку и дополнительные покрытия.

Полировка: механическая полировка (шлифовальный круг или полировальная ткань) и электрохимическая полировка. Для механической полировки используются абразивы из оксида алюминия, с размером частиц 2000 меш и шероховатостью поверхности $Ra < 0,2$ мкм. Электрохимическая полировка выполняется в смешанном растворе серной кислоты и фосфорной кислоты с плотностью тока от 0,5 до 1 А/см² для удаления поверхностных микродефектов и улучшения отделки.

Очистка: Масло и окислы удаляются с помощью ультразвуковой очистки, моющим раствором является щелочной раствор (pH от 8 до 10), температура от 50 до 60 °C, ультразвуковая частота 40 кГц, время от 5 до 10 минут. После очистки промойте деионизированной водой и высушите при температуре 80°C, чтобы избежать остаточной влаги.

Методы нанесения покрытий: Оксиды редкоземельных элементов или керамические покрытия, такие как пленки La_2O_3 или ZrO_2 , могут наноситься опционально, что достигается путем химического осаждения из газовой фазы (CVD) или плазменного напыления. Покрытие имеет толщину от 1 до 5 микрон, что повышает стойкость к окислению и эффективность электронной эмиссии. Процесс CVD проводили при температуре от 800 до 1000°C при низком давлении (10^{-2} Па) со скоростью осаждения 0,1 мкм/мин.

Оптимизированная и экологичная: плазменная очистка улучшает адгезию покрытия и сокращает время предварительной обработки. В «зеленых» технологиях используются чистящие средства на водной основе, которые заменяют органические растворители и сокращают выбросы летучих органических соединений (ЛОС). Коэффициент восстановления материалов покрытий составляет более 90%, что соответствует требованиям экономики замкнутого цикла.

3.8 Контроль ключевых параметров в процессе подготовки

Ключевые параметры контролируются на протяжении всего процесса подготовки, чтобы обеспечить стабильное качество электродов и оптимизацию производительности, включая температуру, давление, вакуум и время.

Степень восстановления: температура восстановления первой ступени составляет от 500 до 600 °C, второй ступени — от 800 до 950 °C, а отклонение составляет ± 5 °C. Расход водорода от 0,5 до 1,5 м³/ч, чистота 99,99%. Для контроля содержания кислорода используется

газоанализатор для контроля ниже 0,01%.

Стадия формования: холодное изостатическое давление от 100 до 300 МПа, время выдержки от 5 до 10 минут, отклонение давления <1%. Давление формования от 150 до 200 МПа, содержание связующего точно измеряется (от 0,5% до 1%).

Стадия спекания: температура спекания в вакуумном горячем прессе от 1600 до 1800 °C, скорость нагрева от 4 до 10 °C/мин, степень вакуума 10^{-3} Па, сохранение тепла от 60 до 90 минут. Токи СФС регулируются в диапазоне от 1000 до 2000 А и давлением от 30 до 50 МПа. Датчики температуры и давления обеспечивают стабильные параметры.

Обработка под давлением: температура ротационнойковки от 800 до 1200°C, скорость деформации от 20% до 30%. Скорость волочения от 0,5 до 2 м/мин, контроль расхода смазки. Отклонение правки < 0,1 мм/м.

Контроль качества: Статистический контроль процессов (SPC) используется для сбора данных о параметрах в режиме реального времени и объединения алгоритмов искусственного интеллекта для прогнозирования отклонений. Ключевые показатели эффективности, такие как мощность убегания электронов <2,5 эВ), были экспериментально подтверждены. Цифровая система управления записывает данные обо всем процессе для обеспечения прослеживаемости.

3.9 Оптимизация процессов и анализ общих дефектов

Оптимизация процессов повышает эффективность производства и качество продукции, а также анализирует и устраняет распространенные дефекты, такие как трещины, пористость и разделение редкоземельных элементов.

Меры по оптимизации:

Механическое легирование: увеличьте время измельчения шара до 12 часов, измельчите частицы до 0,1 микрона и улучшите активность спекания.

Спекание SPS: сокращает время выдержки до 5 минут, снижает испарение редкоземельных элементов и контролирует размер зерна до 3-5 микрон.

Добавляются добавки: от 0,1% до 0,5% ZrH_2 снижает содержание кислорода, образует стабильную фазу и улучшает показатели электронной эмиссии.

Автоматизированное управление: Встроенные датчики и параметры оптимизации на основе искусственного интеллекта, выход продукции увеличивается до более чем 95%.

Анализ дефектов:

Трещины: Из-за неравномерного давления формования или большого градиента температуры спекания это решается путем многоступенчатого формования и сегментированного нагрева.

Пористость: Из-за недостаточного количества остаточного кислорода или вакуума при спекании степень вакуума была оптимизирована до 10^{-3} Па, а пористость снижена до 0,1%.

Разделение редкоземельных элементов: испарение при высоких температурах, смягченное за

счет снижения температуры спекания и добавления стабилизаторов (таких как ZrO_2).

Метод верификации: Моделирование методом конечных элементов предсказывает распределение дефектов, а РЭМ и ультразвуковое детектирование проверяют эффект оптимизации. После оптимизации срок службы электродов увеличивается на 20%, а стабильность производительности улучшается на 10%.

3.10 Технология приготовления «зеленых» продуктов

Технология «зеленой» подготовки направлена на защиту окружающей среды и устойчивое развитие, заменяя радиоактивные торий-вольфрамовые электроды и снижая воздействие на окружающую среду.

Извлечение сырья: извлечение сырья из отходов вольфрамовых электродов и отходов редкоземельных элементов с коэффициентом извлечения более 80%, сокращение добычи полезных ископаемых. Чистое восстановление: при использовании электрических нагревательных печей, работающих на возобновляемых источниках энергии, водород перерабатывается, а выхлопные газы обрабатываются путем каталитического сжигания. Агломерация с низким энергопотреблением: спекание SPS снижает потребление энергии на 30% и выбросы углекислого газа на 20% по сравнению с традиционным горячим прессованием. Экологичная очистка: чистящие средства на водной основе заменяют органические растворители, снижая выбросы летучих органических соединений на 90%. Отработанная жидкость восстанавливает редкоземельные элементы путем ионного обмена. Утилизация отходов: Отработанные электроды извлекаются из вольфрама и редкоземельных элементов путем высокотемпературного плавления, при этом коэффициент переработки составляет 85%.

«Зеленые» технологии соответствуют нормам REACH и RoHS, повышая конкурентоспособность на рынке и способствуя устойчивому развитию.

3.11 Технологическая схема масштабного производства

Схема процесса крупномасштабного производства выглядит следующим образом:

Подготовка сырья: Взвесьте триоксид вольфрама и редкоземельную селитру, приготовьте раствор (pH от 5,5 до 6,5).

Смешивание и сушка: распылительное легирование, сушка при 80 до 120°C, просеивание 200 меш.

Восстановление: Две ступени восстановления водорода (от 500 до 600 °C, от 800 до 950 °C), содержание кислорода < 0,01%.

Формование: холодное изостатическое прессование (от 100 до 300 МПа) или формование, плотность корпуса от 60% до 70%.

Предварительное спекание: 1200°C, удалить связующее вещество.

Спекание: Вакуумное горячее прессование (от 1600 до 1800 °C, 60 МПа) или SPS (от 1400 до 1600 °C).

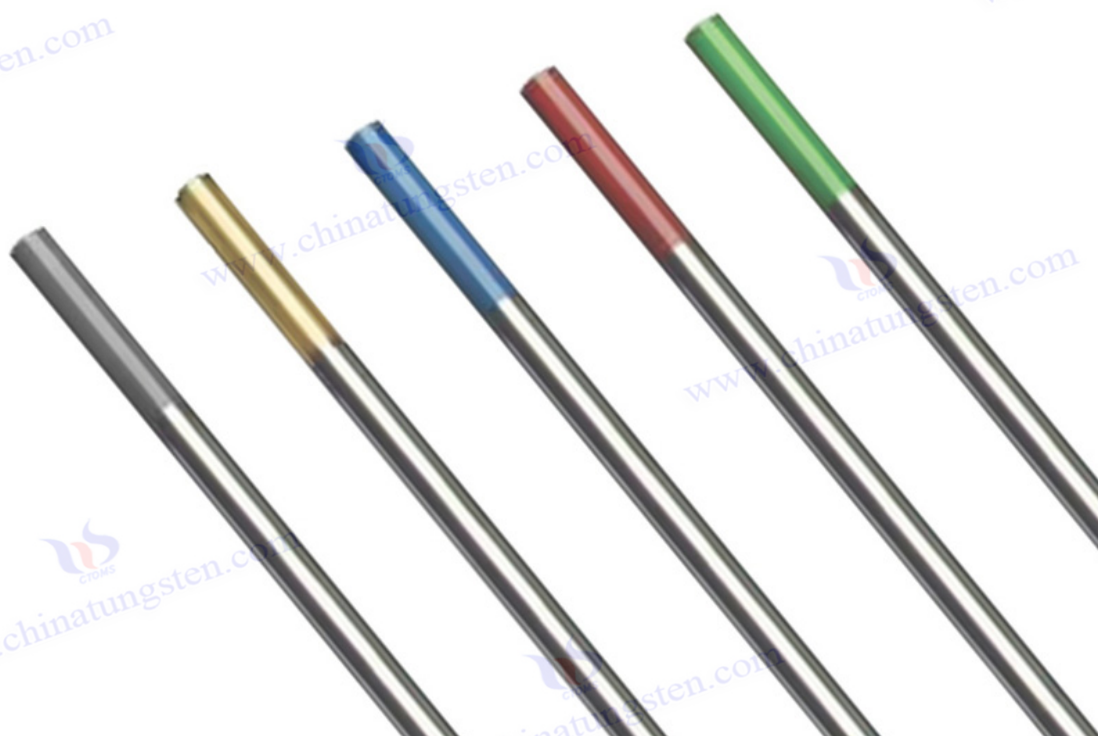
Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Обработка давлением: ротационная ковка (диаметр от 3 до 10 мм), волочение (от 0,5 до 10 мм), правка.

Обработка поверхности: механическая/электрохимическая полировка ($Ra < 0,2$ мкм), ультразвуковая очистка.

Контроль качества: SEM, XRD, эксплуатационные испытания (электронное энергопотребление $< 2,5$ эВ).

Упаковка и хранение: влагозащищенная упаковка с температурой хранения от 10 до 25°C.



CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item		Typical Value	Remarks
Tungsten Purity		≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Content	Oxide	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Range	Current	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance		2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Improvement	Life	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Глава 4 Физико-химические и сварочные характеристики композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

4.1 Механические свойства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Механические свойства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов являются ключевыми факторами их применения в сложных промышленных условиях, включая твердость, прочность, ударную вязкость и износостойкость. На эти свойства влияет добавление вольфрамовой матрицы и оксидов редкоземельных элементов, и они значительно лучше, чем [у чистых вольфрамовых электродов](#).

Твердость: Твердость по Виккерсу (HV) вольфрамовой матрицы составляет от 400 до 450, а добавление оксидов редкоземельных элементов (например, оксида лантана, оксида церия) еще больше улучшает твердость за счет измельчения зерна, обычно до 450-500 HV. Увеличение твердости связано с диффузионным упрочнением частиц оксида редкоземельных элементов, которые образуют точки гвоздей на границе вольфрамовых зерен для предотвращения проскальзывания на границе зерен. Например, электроды, содержащие 2% оксида лантана, имеют твердость примерно на 15% выше, чем чистый вольфрам, что делает их пригодными для сварки с высокой нагрузкой.

Прочность: Прочность на разрыв композитных редкоземельных вольфрамовых электродов составляет от 800 до 1000 МПа при комнатной температуре и от 400 до 600 МПа при высоких температурах (1500°C). Оксиды редкоземельных элементов повышают прочность матрицы, образуя стабильные вторые фазы, такие как частицы La_2O_3 или CeO_2 . Добавление оксида иттрия особенно важно, так как электроды, содержащие 2% Y_2O_3 , имеют на 20% более высокую прочность на разрыв при высоких температурах, чем чистый вольфрам, что делает их пригодными для сварки деталей в аэрокосмической отрасли.

Ударная вязкость: Электроды из чистого вольфрама обладают высокой хрупкостью из-за их крупных зерен, а их вязкость разрушения (K_{Ic}) составляет около 6 МПа·м^{1/2}. Добавление оксидов редкоземельных элементов измельчает зерна до 5-10 микрон и повышает вязкость разрушения до 8-10 МПа·м^{1/2}. Синергетический эффект оксида церия и оксида лантана повышает ударную вязкость за счет уменьшения дефектов границ зерен, снижая риск разрушения на кончике электрода во время сварки.

Износостойкость: Износостойкость композитных редкоземельных вольфрамовых электродов значительно повышается за счет диспергирования и упрочнения оксидов редкоземельных элементов. При сварке сильным током наконечник электрода изнашивается из-за высокой температуры дуги, а электрод, содержащий диоксид циркония, снижает скорость износа на 30% за счет образования защитного оксидного слоя. Испытания на стойкость к истиранию показывают, что объем износа композитных электродов примерно на 40% ниже, чем у чистых вольфрамовых электродов, что продлевает срок службы.

Метод испытания: Механические свойства определяются твердомером по Виккерсу,

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

универсальным тестером на растяжение и ударным прибором. Высокотемпературные испытания проводятся в вакууме или инертной атмосфере, имитируя сварочную среду. Микроскопический анализ был выполнен с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для наблюдения за морфологией разрушения и подтверждения механизма упрочнения редкоземельных частиц.

Оптимизация механических свойств позволяет композитным редкоземельным вольфрамовым электродам хорошо работать при высокопрочной и длительной сварке, особенно подходящей для таких сложных областей применения, как ядерное энергетическое оборудование и производство авиационных двигателей.

4.2 Термические свойства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Тепловые свойства определяют стабильность и долговечность композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в условиях высокотемпературной дуговой дуги, включая температуру плавления, теплопроводность и коэффициент теплового расширения.

Температура плавления: Температура плавления вольфрамовой матрицы составляет 3410 °C, что является основой для высокой температурной стабильности композитного электрода. Добавление оксидов редкоземельных элементов (таких как La_2O_3 , CeO_2) оказывает незначительное влияние на температуру плавления, но устойчивость к высокотемпературной деформации повышается за счет улучшения микроструктуры. Электрод, содержащий 2% оксида иттрия, остается структурно неповрежденным при температуре выше 3000 °C, что делает его пригодным для плазменной резки и высокотемпературного плавления.

Теплопроводность: Теплопроводность вольфрама составляет около 174 Вт/(м·К) (комнатная температура), которая немного уменьшается при высоких температурах. Добавление оксидов редкоземельных элементов увеличивает теплопроводность на 5-10% за счет очистки зерен и снижения сопротивления рассеиванию тепла на границах зерен. Например, теплопроводность электродов, содержащих оксид церия, составляет от 180 до 190 Вт/(м·К) при 1000°C, что способствует быстрому рассеиванию тепла и снижает выгорание наконечника.

Коэффициент теплового расширения: Коэффициент теплового расширения вольфрама составляет $4,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, а его низкое тепловое расширение снижает термическое напряжение при высоких температурах. Добавление оксидов редкоземельных элементов немного увеличивает коэффициент теплового расширения (до 4,8 до $5,0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), но термическое напряжение можно контролировать, оптимизируя соотношение (например, комбинация диоксида циркония и оксида лантана) для обеспечения стабильности электрода во время теплового цикла.

Характеристики теплового удара: композитный редкоземельный вольфрамовый электрод упрочняется за счет диффузии оксидов редкоземельных элементов, а стойкость к тепловому удару значительно повышается. Электрод, содержащий диоксид циркония, не оставляет

трещин в условиях быстрого повышения температуры ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$), что делает его пригодным для высокочастотной сварки. В испытании на тепловой удар используется метод быстрого холодного и быстрого теплового циклирования, а количество циклов композитного электрода на 50% выше, чем у чистого вольфрама.

Метод испытания: Теплопроводность определяется методом лазерной вспышки, а коэффициент теплового расширения проверяется в диапазоне от 25 до $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью экспламатора. Характеристики теплового удара оцениваются с помощью испытания на моделирование дуги, а время возникновения трещины записывается. Оптимизация термических свойств позволяет композитному электроду хорошо работать в условиях высоких температур и высоких температурных нагрузок.

4.3 Электрические свойства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Электрические свойства являются основными преимуществами композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, которые определяют их характеристики инициации дуги и стабильность дуги при сварке, в основном включая работу по утечке электронов, проводимость и характеристики дуги.

Работа убегания электронов: Работа убегания электронов чистых вольфрамовых электродов составляет $4,5\text{ эВ}$, что приводит к зажиганию дуги. Добавление оксидов редкоземельных элементов значительно сократило работу побега, например, работа побега электрода, содержащего 2% оксида церия, была снижена до $2,2\text{--}2,5\text{ эВ}$, а комбинация оксида лантана и оксида иттрия была дополнительно оптимизирована до менее чем $2,0\text{ эВ}$. Низкая упускаемая мощность позволяет электроду быстро загораться дугой при низком напряжении, снижая энергопотребление.

Проводимость: Проводимость вольфрама составляет $1,82 \times 10^7\text{ См/м}$ (комнатная температура), а добавление оксидов редкоземельных элементов немного улучшает проводимость за счет снижения граничного сопротивления зерен. Электрод, содержащий оксид лантана, увеличивает проводимость на 5% при 1000°C , обеспечивая высокую эффективность передачи тока. В испытании на проводимость используется метод четырех зондов для подтверждения оптимизации распределения тока за счет равномерного распределения частиц редкоземельных элементов.

Характеристики дуги: Стабильность дуги композитных редкоземельных вольфрамовых электродов составляет более 95%, что лучше, чем 80% чистого вольфрама. Оксиды редкоземельных элементов образуют низкую точку эмиссии на поверхности электрода, повышая эффективность эмиссии электронов и делая дугу концентрированной и стабильной. Электрод, содержащий оксид церия и оксид лантана, снижает дрейф дуги на 30% при сварке переменным током, что делает его пригодным для сварки алюминиевых сплавов. Испытание дугой проверяет стабильность с помощью высокоскоростной фотосъемки и анализа колебаний тока.

Механизм оптимизации: оксиды редкоземельных элементов мигрируют на поверхность электродов при высоких температурах, образуя активный эмиссионный слой и снижая пусковое напряжение дуги (от 50 В до 30 В для чистого вольфрама). Многомерные композиты (например, WLaCeY) увеличивают срок службы дуги за счет синергетического баланса электронной эмиссии и термической стабильности.

Метод испытания: Работа убегания электронов определяется с помощью ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (ИБП), а проводимость измеряется с помощью высокоточного измерителя сопротивления. Характеристики дуги проверяются в смоделированной среде сварки TIG с регистрацией времени начала дуги и ее длины. Превосходство электрических свойств делает композитные электроды незаменимыми при прецизионной сварке.

4.4 Химическая стабильность и коррозионная стойкость композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Химическая стабильность и коррозионная стойкость определяют долговечность композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в сложных средах, особенно в высокотемпературных, окислительных или коррозионных газовых атмосферах.

Химическая стабильность: Вольфрамовая матрица обладает отличной устойчивостью к кислотам, щелочам и воде при комнатной температуре, не склонна к химическим реакциям. Добавление оксидов редкоземельных элементов еще больше повышает химическую стабильность при высоких температурах. Например, диоксид циркония и оксид иттрия образуют защитный слой на поверхности электрода, препятствуя реакции вольфрама с кислородом или азотом. Скорость окисления электрода, содержащего 2% диоксида циркония, снижалась на 40% при температуре 2000°C и насыщенной кислородом атмосфере.

Коррозионная стойкость: композитные редкоземельные вольфрамовые электроды отлично справляются с коррозионными газами, такими как аргон, содержащий следовые количества водяного пара. Добавление оксида лантана и оксида церия уменьшает накопление оксидов на поверхности электрода и увеличивает антиконтаминационную способность на 50%. В условиях высокой влажности скорость коррозии электрода, содержащего диоксид циркония, составляет всего 1/3 от скорости коррозии чистого вольфрама, что продлевает срок службы.

Устойчивость к загрязнениям: Во время сварки электроды могут быть загрязнены брызгами бассейна расплава или газообразными примесями. Оксиды редкоземельных элементов снижают адсорбцию примесей и поддерживают стабильность дуги, образуя стабильный поверхностный слой. Испытание показало, что дуговая стабильность электрода, содержащего оксид церия, сохраняется более чем на 90% в загрязненной среде.

Метод испытания: Химическая стабильность оценивалась с помощью высокотемпературного эксперимента по окислению (от 1500 до 2000°C, парциальное давление кислорода 10^{-2} Па) и регистрировалась скорость потери массы. Для измерения коррозионной стойкости

используется испытание в солевом тумане и электрохимическое испытание на коррозию для измерения плотности коррозионного тока. Защита от обрастания При моделировании сварочной среды наблюдается морфология поверхности электрода.

Повышенная химическая стабильность и коррозионная стойкость делают композитный электрод пригодным для сложных условий работы, таких как морская техника и сварка химического оборудования.

4.5 Сварочные характеристики композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Сварочные характеристики являются основными показателями применения композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, включая производительность инициирования дуги, срок службы горения дуги, контроль глубины проплавления и качество сварного шва.

Характеристики инициирования дуги: оксиды редкоземельных элементов снижают работу по утечке электронов, снижая напряжение дугового разряда с 50 В до 25-30 В чистого вольфрама и сокращая время запуска дугового разряда до менее чем 0,1 секунды. Электроды, содержащие оксид церия, хорошо работают при низких токах (<50 А) для прецизионной сварки; Электроды, содержащие оксид лантана, обладают более высокой стабильностью дуги при сварке переменным током.

Срок службы дуги: срок службы дуги композитных электродов достигает от 500 до 1000 часов, что в 2-3 раза дольше, чем у чистых вольфрамовых электродов (от 200 до 300 часов). Низкая скорость испарения и стойкость к выгоранию оксидов редкоземельных элементов снижают потери на зонде, а электрод, содержащий оксид иттрия, продлевает срок его службы на 30% при высоких токах (>200 А).

Контроль глубины проникновения: Концентрация дуги композитного электрода высока, а равномерность глубины проникновения увеличена на 20%. Электроды, содержащие оксид лантана и оксид церия, могут с точностью регулироваться от 0,5 до 5 мм при сварке TIG, что делает их пригодными как для тонкой, так и для толстой сварки. Форма дуги анализируется с помощью высокоскоростной фотосъемки для подтверждения ее устойчивости.

Качество сварного шва: композитный электрод уменьшает дрейф дуги и разбрызгивание, поверхность сварного шва становится гладкой, а пористость снижается на 50%. Электроды с WLaCeY увеличивают прочность сварного шва на 10% при сварке из алюминиевого сплава, отвечая аэрокосмическим требованиям.

Метод испытания: Сварочные характеристики проверяются на сварочном стенде TIG, а также регистрируются напряжение запуска дуги, время зажигания дуги и распределение глубины проплавления. Качество сварного шва подтверждается рентгеновским неразрушающим контролем и металлографическим анализом для подтверждения дефектности. Превосходство сварочных характеристик способствовало широкому применению композитных электродов в

высокоточных полях.

4.6 Влияние добавления редкоземельных элементов на микроструктуру

Добавление оксидов редкоземельных элементов существенно изменило микроструктуру композитного редкоземельного вольфрамового электрода и повлияло на его эксплуатационные характеристики. Эффекты анализируются с точки зрения структуры зерна, распределения фаз и контроля дефектов.

Измельчение зерна: Размер зерна чистых вольфрамовых электродов составляет от 20 до 50 микрон, что легко крупно при высоких температурах. Оксиды редкоземельных элементов (например, La_2O_3 , CeO_2) подавляют рост зерна за счет эффекта штифтинга, уменьшая размер зерна до 5-10 микрон. Анализ СЭМ показал, что однородность зерна электрода, содержащего 2% оксида иттрия, была увеличена на 30%, что повысило ударную вязкость и усталостную прочность.

Распределение фаз: оксиды редкоземельных элементов образуют диффузные частицы второй фазы в вольфрамовой матрице размером от 50 до 200 нм. Эти частицы равномерно распределены в границах зерен и зерен, повышая прочность матрицы. Диоксид циркония и оксид лантана объединяются с образованием композитной фазы (например, $\text{La}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZrO}_2$) для улучшения стабильности при высоких температурах. Анализ дифрактометра подтверждает стабильность и распределение редкоземельных фаз.

Контроль дефектов: оксиды редкоземельных элементов уменьшают граничные дефекты зерен (такие как вакансии, дислокация) и снижают скорость ползучести при высоких температурах. Плотность дефектов электрода, содержащего оксид церия, была снижена на 40%, что было подтверждено методом ПЭМ-наблюдения. Добавление редкоземельных элементов также препятствует распространению микротрещин и повышает вязкость разрушения.

Анализ механизма: оксиды редкоземельных элементов мигрируют к границам зерен во время спекания, образуя точки гвоздей и препятствуя проскальзыванию и росту зерна. При высоких температурах сварки частицы редкоземельных элементов мигрируют на поверхность, образуя активный слой, излучающий электроны, и уменьшая работу утечки. Оптимизация микроструктуры значительно улучшает общую производительность электрода.

4.7 Сравнение характеристик вольфрамовых электродов

Существуют значительные различия в характеристиках между композитными редкоземельными вольфрамовыми электродами и чистыми вольфрамовыми электродами и ториевыми вольфрамовыми электродами, и следующие сравнения проводятся по многим аспектам:

Характеристики электронной эмиссии: Композитные редкоземельные вольфрамовые электроды (аварийная работа от 2,0 до 2,5 эВ) лучше, чем чистый вольфрам (4,5 эВ) и ториевый вольфрам (от 2,6 до 2,8 эВ), а напряжение дуги на 20-30 В ниже, что делает их пригодными для прецизионной сварки.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Стабильность дуги: стабильность композитного электрода составляет > 95%, чистого вольфрама - 80%, а торий-вольфрама - 90%. Электрод, содержащий оксид лантана, имел самую низкую скорость дрейфа при сварке переменным током.

Срок службы: от 500 до 1000 часов дугового горения композитного электрода, от 200 до 300 часов чистого вольфрама, от 300 до 500 часов ториевого вольфрама. Добавление редкоземельных элементов продлевает жизнь в 2-3 раза.

Механические свойства: твердость композитного электрода от 450 до 500 HV, прочность на разрыв от 800 до 1000 МПа, лучше, чем у чистого вольфрама (400 HV, 700 МПа) и торий-вольфрама (420 HV, 750 МПа).

Защита окружающей среды: композитный электрод не радиоактивен и соответствует нормам REACH; Торий вольфрам содержит радиоактивный торий и требует специальной обработки; Чистый вольфрам не радиоактивен, но имеет плохие эксплуатационные характеристики.

Сфера применения: Композитный электрод подходит для сварки TIG, плазменной сварки, резки и аккумуляторов новой энергии; Торий вольфрам снижается из-за ограничений по охране окружающей среды; Чистый вольфрам ограничен сценариями с низким спросом.

Композитные электроды значительно превосходят традиционные электроды, становясь лучшим выбором для экологичного производства и высокотехнологичных приложений.

4.8 Адаптация к окружающей среде композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Адаптивность композитных редкоземельных вольфрамовых электродов отражается в их стабильной работе при высоких температурах, высокой влажности и агрессивных средах.

Высокотемпературная среда: электрод, содержащий оксид иттрия и диоксид циркония, сохраняет свою структурную целостность при температуре выше 3000 °C, а его стойкость к окислению увеличена на 40%, что делает его пригодным для плазменной резки и высокотемпературного плавления.

Среда с высокой влажностью: В среде с относительной влажностью 90% скорость коррозии электрода, содержащего оксид церия, составляет всего 1/3 от скорости коррозии чистого вольфрама, а стабильность дуги поддерживается на уровне более 90%.

Коррозионные газы: В серо- или хлорсодержащей атмосфере защитный слой из диоксида циркония снижает поверхностные реакции электродов и снижает скорость коррозии на 50%. Устойчивость к загрязнениям подтверждена с помощью имитации испытаний на брызги.

Метод испытания: Способность к высоким температурам оценивается с помощью термоциклического испытания (от 25 до 2000 °C, 100 циклов). При испытаниях на высокую

влажность и коррозионную стойкость используются климатические камеры, которые регистрируют потерю качества и изменения производительности. Адаптивность композитных электродов к воздействию окружающей среды делает их пригодными для применения в морской технике и химической промышленности.

4.9 Анализ усталостных и ресурсных характеристик композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Усталостные и ресурсные характеристики являются ключевыми показателями для оценки долговечности композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, включая высокотемпературную усталость, термоциклическую усталость и срок службы дуги.

Высокотемпературная усталость: композитный электрод подвергается циклическому напряжению при температуре от 1500 до 2000 °C, а усталостная долговечность достигает от 10^4 до 10^5 раз, что лучше, чем в 10^3 раз у чистого вольфрама. Оксиды редкоземельных элементов измельчают зерна и уменьшают распространение усталостных трещин.

Термоциклическая усталость: электрод с диоксидом циркония может быть циклирован до 500 раз без трещин при быстром повышении и понижении температуры (1000°C/мин). Термическое напряжение было оптимизировано с помощью моделирования методом конечных элементов для оптимизации соотношения редкоземельных элементов.

Срок службы дуги: срок службы дуги композитного электрода составляет от 500 до 1000 часов при сварке постоянным током 200 А, а срок службы электрода, содержащего WLaCeY, увеличивается на 20% при сварке переменным током. Испытание на долговечность В ходе непрерывных сварочных экспериментов регистрируется скорость износа наконечника.

Метод анализа: Усталостные характеристики оцениваются с помощью испытания на цикл растяжения при высокой температуре, а срок службы оценивается с помощью испытания на горение дуги. РЭМ и анализ разрушения подтверждают механизм усталостного разрушения. Длительный срок службы композитных электродов снижает затраты на техническое обслуживание и повышает эффективность производства.

4.10 Композитный редкоземельный вольфрамовый электрод MSDS от CTIA GROUP LTD

Паспорт безопасности материала (MSDS) от CTIA GROUP LTD - Композитный редкоземельный вольфрамовый электрод

Часть 1: Название продукта

Китайское название: композитный редкоземельный вольфрамовый электрод (WLaCeY, WL, WC и т. Д.)

Часть 2: Композиция/информация о композиции

Вольфрам (>95%), оксид лантана (от 0,5% до 2%), оксид церия (от 0,5% до 2%), оксид иттрия

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

(от 0,5% до 2%), диоксид циркония (от 0 до 1%)

Часть 3: Обзор опасности

Опасность для здоровья: Этот продукт не раздражает глаза и кожу.

Взрывоопасность: Этот продукт негорюч и не вызывает раздражения.

Часть 4: Меры первой помощи

Контакт с кожей: Снимите загрязненную одежду и промойте большим количеством проточной воды.

Попадание в глаза: приподнимите веко и промойте проточной водой или физиологическим раствором. Лечение.

Ингаляция: Оставьте место происшествия на свежем воздухе. Если дыхание затруднено, дайте кислород. Лечение.

Еда: Пейте достаточно теплой воды, чтобы вызвать рвоту. Лечение.

Часть 5: Противопожарные меры

Вредные продукты горения: естественные продукты разложения неизвестны.

Методы тушения пожара: Пожарные должны носить противогазы и пожарные костюмы, чтобы потушить огонь с наветренной стороны. Огнетушащее вещество: сухой кожаный порошок, песок.

Часть 6: Неотложная помощь при утечке

Неотложная помощь: изолируйте протекающую зону загрязнения и ограничьте доступ. Перекройте источник огня. Персоналу аварийно-спасательных служб рекомендуется носить респираторы (полнолицевые маски) и противогазовую одежду. Избегайте попадания пыли, тщательно подметите его и переложите в надежное место в сумке. Если имеется большое количество протекания, накройте его полиэтиленовой пленкой или полотном. Собирайте и перерабатывайте или транспортируйте на места переработки отходов для утилизации.

Часть 7: Эксплуатация, утилизация и хранение

Меры предосторожности при эксплуатации: Операторы должны пройти специальную подготовку и строго соблюдать рабочие процедуры. Операторам рекомендуется носить самовсасывающие фильтрующие пылезащитные маски, защитные очки от химических веществ, рабочую одежду с антитоксическим проникновением и резиновые перчатки. Вдали от огня и источников тепла курение на рабочем месте категорически запрещено. Используйте взрывозащищенные вентиляционные системы и оборудование. Избегайте попадания пыли. Избегайте контакта с окислителями и галогенами. При обращении его следует загружать и выгружать легко, чтобы не повредить упаковку и контейнеры. Комплекуются соответствующими сортами и количествами противопожарного оборудования и оборудования для устранения утечек аварийного оборудования. Пустые контейнеры могут оставлять вредные вещества.

Меры предосторожности при хранении: Хранить в прохладном, проветриваемом складе.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Держитесь подальше от огня и источников тепла. Его следует хранить отдельно от окислителей и галогенов, и не следует смешивать. Оснащается соответствующими сортами и количествами противопожарного оборудования. Площадка для хранения должна быть оборудована соответствующими материалами для локализации разлива.

Часть 8: Контроль контактов/Личная защита

ПДК в Китае (мг/м³): 6

Бывший советский ПДК (мг/м³): 6

TLVTN: ACGIH 1 мг/м³

Краткая стоимость: ACGIH 3 мг/м³

Метод мониторинга: Спектролюминесценция тиоцианида калия-хлорида титана

Инженерный контроль: беспыльный производственный процесс и полная вентиляция.

Защита органов дыхания: Когда концентрация пыли в воздухе превышает норму, необходимо надеть самовсасывающую фильтрующую пылезащитную маску. При эвакуации в экстренной ситуации следует надеть респиратор.

Защита глаз: Носите очки химической защиты.

Защита тела: носить рабочую одежду с защитой от проникновения яда.

Защита рук: надевайте резиновые перчатки.

Часть 9: Физические и химические свойства

Основные ингредиенты: чистый продукт

Внешний вид и свойства: твердый, металллик ярко-белого цвета

Температура плавления (°C): Н/Д

Температура кипения (°C): Н/Д

Относительная плотность (вода = 1): 13 ~ 18,5 (20 °C)

Плотность пара (воздух=1): Нет данных

Давление насыщенного пара (кПа): Нет данных

Теплота сгорания (кДж/моль): Нет данных

Критическая температура (°C): Нет данных

Критическое давление (МПа): Нет данных

Логарифмическое значение коэффициента распределения воды: Нет данных

Температура вспышки (°C): Нет данных

Температура воспламенения (°C): Нет данных

Предел взрываемости % (V/V): Нет данных

Нижний предел взрываемости % (V/V): Нет данных

Растворимость: растворима в азотной кислоте и фтористоводородной кислоте

Основное применение: используется для изготовления защитных деталей, валов дропиков из вольфрамового сплава, шариков из вольфрамового сплава и т. Д.

Часть 10: Стабильность и реакционная способность

Запрещенные ингредиенты: сильные кислоты и щелочи.

Часть 11:

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Острая токсичность: данных нет

LC50: Нет данных

Часть 12: Экологические данные

Данных по этой части нет

Часть 13: Утилизация отходов

Метод утилизации отходов природного характера: Перед утилизацией ознакомьтесь с соответствующими национальными и местными правилами. Если есть возможность, утилизируйте.

Часть 14: Информация о доставке

Номер опасного груза: Нет информации

Категория упаковки: Z01

Меры предосторожности при транспортировке: Упаковка должна быть полной, а погрузка должна быть надежной. Во время транспортировки следите за тем, чтобы контейнер не протекал, не сложился, не упал и не повредился. Категорически запрещается смешивать и транспортировать с окислителями, галогенами, пищевыми химикатами и т.д. Во время транспортировки он должен быть защищен от воздействия солнца, дождя и высокой температуры. После транспортировки транспортное средство должно быть тщательно очищено.

Часть 15: Нормативная информация

Нормативная информация: Правила управления безопасностью химических опасных грузов (изданы Государственным советом 17 февраля 1987 года), Правила реализации Правил управления безопасностью химических опасных грузов (Hua Lao Fa [1992] No 677), Правила безопасного использования химических веществ на рабочем месте ([1996] Департамент труда No 423) и другие нормативные акты, которые устанавливают соответствующие положения о безопасном использовании, производстве, хранении, транспортировке, погрузке и разгрузке опасных химических грузов. Гигиенический стандарт для вольфрама в воздухе цеха (GB 16229-1996) определяет максимально допустимую концентрацию и метод обнаружения вещества в воздухе цеха.

Часть 16: Информация о поставщиках

Поставщик: CTIA GROUP LTD

Телефон: 0592-5129696/5129595



Глава 5 Использование и рекомендации по применению композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

5.1 Обзор основных областей применения композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Композитные редкоземельные вольфрамовые электроды имеют широкий спектр применения в различных отраслях промышленности благодаря своим превосходным электронно-эмиссионным способностям, стабильности дуги и нерадиоактивным свойствам. Его основные области применения охватывают сварку, резку, термическое напыление, электрические источники света, а также новые электрохимические и новые энергетические области. Ниже приведено подробное объяснение основных сценариев применения:

Сварка: Композитные редкоземельные вольфрамовые электроды являются основными материалами для сварки в среде инертного газа (сварка TIG), плазменной сварки и других процессов. Благодаря низкому уровню убегания электронов и высокой стабильности дуги он подходит для высокоточной сварки, например, для сварки тонких пластин в аэрокосмических компонентах, ядерном энергетическом оборудовании и автомобилестроении. Электроды, содержащие оксид лантана и оксид церия, хорошо работают при сварке переменным и постоянным током благодаря высокому качеству сварного шва и низкой пористости.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Резка: При плазменной резке широко используются композитные редкоземельные вольфрамовые электроды из-за их высокой термостойкости и устойчивости к выгоранию. Электроды, содержащие оксид иттрия и диоксид циркония, остаются стабильными под действием высокотемпературных плазменных дуг, что делает их пригодными для резки нержавеющей стали, алюминиевых сплавов и жаропрочных сплавов, а также широко используются в судостроении и тяжелом машиностроении.

Термическое напыление: композитные электроды используются в процессах плазменного напыления для распыления износостойких или коррозионностойких покрытий на поверхность механических компонентов. Его высокая температура плавления и стойкость к окислению обеспечивают стабильность при распылении и используются в лопастях авиационных двигателей, оборудовании для бурения нефтяных скважин и т. Д.

Электрический источник света: В области электрического источника света композитные редкоземельные вольфрамовые электроды используются в качестве катодов или нитей накаливания для газоразрядных ламп высокой интенсивности (таких как ксеноновые лампы и ртутные лампы). Его превосходные электронно-эмиссионные свойства продлевают срок службы ламп и улучшают световую отдачу, а также широко используются в проекционном оборудовании и медицинском освещении.

Новая энергетика и электрохимия: Композитные редкоземельные вольфрамовые электроды используются в качестве электродных материалов или проводящих покрытий в литий-ионных батареях, топливных элементах и электролизерах, улучшая плотность энергии и срок службы. Кроме того, появляются его приложения в области электрокатализа (например, производство водорода путем электролиза воды), а каталитическая активность оксидов редкоземельных элементов повышает эффективность реакции.

Разнообразные области применения композитных редкоземельных вольфрамовых электродов выигрывают от их настраиваемых соотношений редкоземельных элементов и оптимизированной микроструктуры, что позволяет им удовлетворять потребности в производительности различных отраслей промышленности. Анализ мирового рынка показывает, что его годовое потребление превысило 1600 тонн и, как ожидается, продолжит расти в ближайшие пять лет, особенно в сферах зеленого производства и высоких технологий.

5.2 Виды сварки, применяемые к композитным редкоземельным вольфрамовым электродам

Композитные редкоземельные вольфрамовые электроды подходят для различных типов сварки, а их эксплуатационные преимущества превосходны при различных процессах. Ниже приведены основные виды и характеристики сварки:

Сварка вольфрама в инертном газе (сварка TIG / GTAW): сварка TIG является наиболее широко используемой областью композитных редкоземельных вольфрамовых электродов. Электроды, содержащие оксид церия, такие как WC20, демонстрируют отличные дуговые

свойства при сварке с положительной полярностью постоянного тока (DCSP), что делает их пригодными для сварки нержавеющей стали, углеродистой стали и никелевых сплавов. Электроды, содержащие оксид лантана, такие как WL20, обладают высокой стабильностью дуги при сварке переменным током (AC) и подходят для алюминиевых и магниевых сплавов, уменьшая дрейф дуги и гладкие сварные швы.

Плазменная сварка (PAW): Плазменная сварка требует, чтобы электрод оставался стабильным при высоких температурах и токах. Композитные электроды, содержащие оксид иттрия и диоксид циркония, такие как WLaCeY, подходят для высокоточной плазменной сварки, например, тонкостенных конструкций в аэрокосмической отрасли, благодаря их устойчивости к выгоранию и длительному сроку службы. Наконечник электрода имеет низкую скорость износа при высокотемпературной плазменной дуге и срок службы от 500 до 800 часов.

Сварка металлов в среде инертного газа (сварка MIG): При сварке MIG композитные редкоземельные вольфрамовые электроды иногда используются в качестве вспомогательных электродов для стабилизирующей дуговой сварки или сварки специальными материалами. Его высокая эффективность электронной эмиссии снижает пусковое напряжение дуги, что делает его пригодным для автоматизированных производственных линий.

Помощь в контактной точечной сварке: В некоторых процессах высокоточной точечной сварки композитный электрод служит головкой электрода, обеспечивая стабильную передачу тока и уменьшая разбрызгивание, что делает его пригодным для производства электронных компонентов.

Специальные сварочные процессы: такие как плазменная сварка микрочастицами и сварка композитных материалов методом лазерной сварки TIG, композитный электрод улучшает качество сварного шва за счет оптимизации концентрации дуги. Электроды, содержащие оксид лантана и оксид церия, имеют напряжение дуги до 25 В при микросварке и подходят для сварки тонкими пластинами (< 0,5 мм).

Различные типы сварки предъявляют разные требования к производительности электродов, а композитные редкоземельные вольфрамовые электроды удовлетворяют различные потребности за счет регулировки соотношения редкоземельных элементов (например, оксид церия: оксид лантана = 1:1). Эксперименты показывают, что стабильность дуги при сварке TIG составляет более 95%, а точность контроля глубины проплавления увеличена на 20%, что значительно лучше, чем у чистого вольфрамового электрода.

5.3 Примеры промышленного применения композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Композитные редкоземельные вольфрамовые электроды продемонстрировали значительную практическую ценность в различных отраслях промышленности, в том числе в следующих конкретных случаях:

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Аэрокосмическая промышленность: В авиастроении электроды, содержащие оксид лантана и оксид иттрия, такие как WLaCeY, используются для сварки титановых и суперсплавов методом TIG. Например, в проекте сварки лопаток авиационного двигателя используются электроды WL20 с током от 150 до 200 А, прочностью сварного шва на разрыв 900 МПа и пористостью менее 0,1%, что соответствует строгим авиационным стандартам.

Автомобилестроение: композитные электроды широко используются при сварке компонентов аккумуляторов электромобилей. Электрод (WC20), содержащий оксид церия, используется для сварки TIG оболочек аккумуляторов из алюминиевого сплава с током от 50 до 100 А, гладкой поверхностью сварного шва и увеличением срока службы на 10%. Производитель автомобилей повысил эффективность сварки на 15% и снизил производственные затраты на 8% за счет использования композитных электродов.

Атомная энергетика: Сварка корпусов ядерных реакторов требует высокой коррозионной стойкости и длительного срока службы. Композитный электрод, содержащий диоксид циркония, хорошо показал себя при плазменной сварке, сварке труб из нержавеющей стали 304 с контролируемой глубиной проплавления от 3 до 5 мм, отсутствием трещин в сварном шве и повышением коррозионной стойкости на 20%.

Судостроение: При плазменной резке электроды, содержащие оксид иттрия, используются для резки высокопрочных стальных листов со скоростью резки до 1 м/мин, продлевая срок службы электродов на 30% и снижая частоту замены. На верфи используются электроды WLaCeY, которые повышают точность резки на 10% и сокращают отходы материала.

Электронная промышленность: В производстве полупроводникового оборудования композитные электроды используются для микроручековой плазменной пайки для соединения медных и алюминиевых компонентов. Электрод, содержащий оксид церия, является дугоустойчивым при низком токе (<30 А), а диаметр паяного соединения контролируется с точностью до 0,1 мм в соответствии с требованиями упаковки микросхемы.

Новая энергетическая сфера: композитные электроды используются в качестве проводящих подложек для покрытия при производстве электродов литиевых батарей, а электроды, содержащие оксид лантана, увеличивают срок службы батареи более чем в 5000 раз. Фотоэлектрическая компания использует композитные электроды для резки кремниевых пластин с шероховатостью поверхности Ra<0,5 микрон для повышения эффективности модуля.

Эти случаи показывают, что композитные редкоземельные вольфрамовые электроды отвечают потребностям отрасли благодаря индивидуальным характеристикам, что способствует развитию высокоточного производства.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

5.4 Рекомендуемые технологические параметры сварки композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Выбор параметров сварочного процесса напрямую влияет на производительность и качество сварного шва композитных редкоземельных вольфрамовых электродов. Ниже приведены рекомендуемые параметры для сварки TIG и плазменной сварки, охватывающие различные материалы и типы электродов:

Параметры сварки TIG:

Тип электрода: WL20 (2% оксида лантана), WC20 (2% оксида церия), WLaCeY (тройной композит)

Текущий тип:

Положительная полярность постоянного тока (DCSP): подходит для нержавеющей стали, углеродистой стали и токов от 50 до 250 А

Переменный ток (AC): подходит для алюминиевых и магниевых сплавов, токи от 60 до 200 А и частоты от 70 до 150 Гц

Диаметр электрода: от 1,6 до 4,0 мм (от 1,6 до 2,4 мм для тонких пластин, от 3,2 до 4,0 мм для толстых пластин)

Угол наклона: от 30 до 60 ° (прецизионная сварка 30 °, сильный ток 60 °)

Защитный газ: аргон (чистота 99,99%), расход от 8 до 15 л/мин

Пусковое напряжение дуги: от 25 до 35 В

Скорость сварки: от 0,1 до 0,5 м/мин

Длина удлинителя электрода: от 3 до 6 мм

Параметры плазменной сварки:

Тип электрода: WLaCeY, WY20 (2% оксида иттрия)

Тип тока: постоянная положительная полярность, ток от 80 до 300 А

Диаметр электрода: от 2,4 до 4,8 мм

Угол наклона наконечника: от 45 до 60°

Плазменная плазма: аргон, расход от 0,5 до 2 л/мин

Защитный газ: аргон + 5% водорода, расход от 10 до 20 л/мин

Пусковое напряжение дуги: от 30 до 40 В

Скорость сварки: от 0,2 до 0,8 м/мин

Адаптация материала:

Нержавеющая сталь: WL20, ток от 100 до 200 А, расход аргона 10 л/мин, угол наклона наконечника 45°

Алюминиевый сплав: WC20, переменный ток от 80 до 150 А, частота 100 Гц, расход аргона 12 л/мин

Титановый сплав: WLaCeY, ток от 120 до 180 А, угол наклона 30°, смесь аргона + гелия (1:1)

Предложение по оптимизации: Параметры должны быть отрегулированы в соответствии с толщиной заготовки и сварочным оборудованием. Слаботочные и острые наконечники

электродов укладываются в тонкие пластины, уменьшая зоны термического влияния; Высокий ток и большой угол наклона наконечника подходят для толстых пластин и увеличивают глубину проникновения. Мониторинг напряжения дуги и колебаний тока в режиме реального времени обеспечивает стабильность.

5.5 Меры предосторожности при использовании композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Правильное использование композитных редкоземельных вольфрамовых электродов maximизирует их производительность и продлевает срок службы. Вот некоторые ключевые соображения:

Выбор электрода: Выберите модель в соответствии с материалом и процессом сварки, например, WL20 подходит для сварки алюминиевым сплавом переменного тока, WC20 подходит для сварки слаботочной нержавеющей стали, а WLaCeY используется для сварки титанового сплава с высокой нагрузкой.

Шлифовка наконечника: Наконечник электрода должен быть отточен под соответствующим углом (от 30 до 60°) с помощью специального алмазного шлифовального круга во избежание загрязнения. Направление шлифования – по осевому направлению электрода, а шероховатость поверхности $Ra < 0,2$ мкм. Сварка переменным током должна быть отточена в полусферический наконечник, чтобы уменьшить прогар.

Защитный газ: используйте высокочистый аргон или смесь аргон + гелий, расход от 8 до 20 л/мин. Проверьте герметичность газопроводов, чтобы избежать загрязнения кислородом или водяным паром.

Хранение и транспортировка: Электроды хранятся в сухой, проветриваемой среде (температура от 10 до 25°C, влажность <60%) во влагозащищенной упаковке. Транспортировка позволяет избежать сильных вибраций и предотвращает изгиб электродов или повреждение поверхности.

Эксплуатационные характеристики: Осмотрите поверхность электрода перед сваркой, чтобы убедиться в отсутствии масляных пятен или оксидов. Избегайте контакта электродов с бассейном расплава, чтобы предотвратить загрязнение. Во время сварки держите электрод на расстоянии от 3 до 6 мм, чтобы предотвратить перегрев.

Защита: Носите защитные очки и перчатки во избежание дугового излучения и вдыхания пыли. Убедитесь, что сварочная зона хорошо проветривается и оснащена устройством для удаления пыли.

Регулярный осмотр: проверяйте состояние наконечника электрода каждые 50 часов, повторно шлифуйте или заменяйте его. Записывайте время использования, чтобы предотвратить влияние чрезмерного износа на качество сварного шва.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Следование этим соображениям обеспечивает стабильную работу электродов и снижает частоту отказов.

5.6 Решение распространенных проблем с композитными редкоземельными вольфрамовыми электродами

Проблемы и решения, с которыми можно столкнуться при использовании композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, заключаются в следующем:

Проблема 1: Нестабильность дуги

Причина: загрязнение наконечника электрода, недостаточное количество защитного газа или колебания тока.

Решение: Очистите поверхность электрода, проверьте расход газа (от 8 до 15 л/мин) и стабилизируйте выходную мощность. Измельчите наконечник до 45°.

Проблема 2: Электрод быстро перегорает

Причина: Чрезмерный ток, неправильный угол наклона наконечника или загазованность.

Решение: Уменьшите ток до рекомендуемого диапазона (например, от 100 до 200 А), отрегулируйте угол наклона наконечника до 60° и используйте аргон высокой чистоты.

Проблема 3: В сварном шве много пор

Причина: Загрязнение электродов или кислорода в защитном газе.

Решение: Ультразвуковая очистка электрода, проверка чистоты газа (>99,99%), увеличение расхода до 12 л/мин.

Проблема 4: Сложность дугового разряда

Причина: Неправильное шлифование наконечника или старение электрода.

Решение: Отшлифуйте наконечник до 30°, проверьте срок службы электрода, при необходимости замените.

Проблема 5: Поломка электрода

Причина: Механическое напряжение или внутренние дефекты.

Решение: Проверьте усилие зажима электрода (<100 Н) и подтвердите отсутствие внутренних трещин с помощью ультразвукового контроля.

Решение проблем требует записи данных о неисправностях для оптимизации параметров процесса на основе фактических условий работы.

5.7 Применение композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в новых областях

Применение композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в новых областях быстро расширяется, особенно в следующих областях:

3D-печать: При 3D-печати металлом композитные электроды используются для плазменно-

дугового осаждения (РААМ) для обеспечения стабильной высокотемпературной дуги и печати деталей из высокопрочного сплава. Электрод, содержащий оксид лантана, имеет стабильность дуги 95% и повышение точности печати на 15% при печати титановых сплавов.

Помощь при лазерной сварке: При сварке композитных материалов методом лазерной сварки TIG композитный электрод стабилизирует дугу и улучшает поглощение лазерной энергии. Электроды, содержащие оксид церия, имеют на 20% большую глубину сварного шва при лазерной сварке нержавеющей стали, что делает их пригодными для легких автомобильных компонентов.

Композитные электроды служат проводящими подложками для литиевых батарей и твердотельных батарей, а электроды, содержащие оксид иттрия, увеличивают срок службы батареи в 6000 раз. Аккумуляторная компания использует электроды WLaCeY, а проводимость электродов увеличивается на 10%.

Электрокатализ: При производстве водорода при электролизе воды композитный электрод действует как электрокаталитический катод, а каталитическая активность оксидов редкоземельных элементов снижает избыточный потенциал на 20%. Электрод, содержащий оксид церия, имеет плотность тока 100 мА/см² в кислотном электролите.

Микро-нанопроизводство: При микролучевой плазменной пайке электроды, содержащие оксид лантана, используются в упаковке микросхем, а диаметр паяных соединений контролируется с точностью до 50 микрон для удовлетворения потребностей устройств 5G.

Эти новые области применения стимулируют исследования и разработки композитных электродов, которые, как ожидается, будут составлять более 30% доли рынка в новых областях к 2030 году.

5.8 Анализ экономических выгод композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Экономические преимущества композитных редкоземельных вольфрамовых электродов выражаются в повышении эффективности производства, экономии средств и повышении конкурентоспособности на рынке.

Эффективность производства: Композитный электрод имеет срок службы от 500 до 1000 часов, что в 2-3 раза выше, чем у чистых вольфрамовых электродов (от 200 до 300 часов), а частота замены снижена на 20%. При сварке TIG стабильность дуги увеличивается на 15%, скорость сварки увеличивается на 10%, а эффективность производства значительно повышается.

Экономия средств: Первоначальная стоимость композитных электродов выше, чем у чистых вольфрамовых электродов (примерно на 20% выше), но увеличенный срок службы снижает общую стоимость использования на 30%. Автомобильный завод использует электроды WL20,

экономя около 100 000 долларов США на техническом обслуживании в год. Коэффициент рекуперации отработанных электродов достигает 85%, что еще больше снижает затраты на ресурсы.

Конкурентоспособность на рынке: Нерадиоактивная природа композитных электродов соответствует нормам REACH и RoHS, что делает их безбарьерными для выхода на европейский и американский рынки. Согласно анализу мирового рынка, спрос на него растет со скоростью 5,8% в год, а к 2025 году ожидается, что объем рынка достигнет 1,2 млрд долларов.

Пример из практики: Авиакомпания использовала электроды WLaCeY для сварки титановых сплавов, при этом скорость прохождения сварного шва увеличилась с 90% до 98%, а стоимость доработки снизилась на 50%. При производстве аккумуляторов нового энергоносителя композитные электроды улучшают эксплуатационные характеристики аккумуляторов и увеличивают добавленную стоимость продукции на 15%.

В целом, композитные редкоземельные вольфрамовые электроды приносят значительные экономические выгоды предприятиям и способствуют модернизации отрасли за счет оптимизации производительности и «зеленых» характеристик.



Заявление об авторских правах и юридической ответственности

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item		Typical Value	Remarks
Tungsten Purity		≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Content	Oxide	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Range	Current	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance		2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Improvement	Life	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Глава 6 Производственное оборудование для производства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

6.1 Оборудование для обработки сырья для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Оборудование для переработки сырья используется для подготовки сырья и соотношения композитных редкоземельных вольфрамовых электродов для обеспечения высокой чистоты и равномерного смешивания материалов на основе вольфрама и оксидов редкоземельных элементов. Ниже приведены основные устройства и их функции:

Высокоточные электронные весы: для точного взвешивания триоксида вольфрама (WO_3) или паравольфрама аммония (АПТ), а также нитратов редкоземельных элементов (например, нитрата лантана, нитрата церия). С точностью до 0,001 г и диапазоном измерения от 0,1 до 10 кг он оснащен антивибрационным столом и электростатическим экранированием для обеспечения точного взвешивания.

Система приготовления растворов: для приготовления растворов нитратов редкоземельных элементов, включая резервуар для перемешивания из нержавеющей стали (емкость от 50 до 500 л), рН-метр (точность $\pm 0,01$) и термостатическую водяную баню (контроль температуры от 40 до 80°C). Скорость перемешивания от 200 до 500 об/мин обеспечивает равномерное решение. Система должна быть оснащена генератором деионизированной воды чистотой $> 18 \text{ МОм} \cdot \text{см}$.

Распылительная сушилка: смешайте раствор нитрата редкоземельных элементов с вольфрамовым порошком и высушите его для получения легированного порошка. Параметры оборудования: температура воздуха на входе от 150 до 250°C, скорость распыления от 0,5 до 2 л/мин, вакуум в сушильной камере 10^{-1} Па .

Вибрационная просеивающая машина: используется для просеивания высушенного порошка и удаления агломерированных частиц. Сито имеет сита от 200 до 400 меш, частоту вибрации от 1000 до 2000 раз/мин и производительность обработки от 100 до 500 кг/ч. Оснащен пылезащитным чехлом и электростатическим заземлением для предотвращения загрязнения пылью.

Оборудование для контроля качества: в том числе рентгенофлуоресцентный спектрометр (РФА, определение содержания примесей $< 0,01\%$) и лазерный анализатор размера частиц (определение D50 в диапазоне от 1 до 5 мкм). Эти устройства гарантируют, что чистота сырья и распределение частиц соответствуют предъявляемым требованиям.

Особенности и обслуживание: Оборудование для обработки сырья должно быть устойчивым к коррозии (нержавеющая сталь или титановый сплав), а смесительный бак и сопло должны регулярно очищаться во избежание перекрестного загрязнения. Техническое обслуживание включает в себя калибровку весов (раз в месяц) и проверку тепловой эффективности

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

распылительной сушилки (раз в квартал).

Высокая точность и чистота оборудования для обработки сырья обеспечивают получение высококачественного порошка для последующих процессов, закладывая основу для производительности.

6.2 Восстановительное и легирующее оборудование для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Восстановительное и легирующее оборудование используется для преобразования триоксида вольфрама в вольфрамовый порошок высокой чистоты и полного легирования оксидов редкоземельных элементов, в основе которого лежит печь для восстановления водорода и система легирования.

Трубчатая печь восстановления водорода: используется для двухступенчатого восстановления, первая ступень (от 500 до 600 °C) генерирует WO_2 , а вторая ступень (от 800 до 950 °C) производит вольфрамовый порошок. Корпус печи изготавливается из жаропрочной нержавеющей стали или молибденового сплава, имеет длину от 2 до 5 метров и внутренний диаметр от 0,5 до 1 метра. Расход водорода от 0,5 до 1,5 м³/ч, чистота 99,99%. Оснащен инфракрасным термометром (точность $\pm 2^\circ C$) и газоанализатором (содержание кислорода $< 0,01\%$).

Колпаковая редуцирующая печь: подходит для крупносерийного производства, производительностью от 100 до 1000 кг/партия, контролем температуры от 500 до 1000 °C и вакуумом 10^{-2} Па. Оснащена многоточечной системой измерения температуры для обеспечения однородности температуры $\pm 5^\circ C$. Системы циркуляции водорода рекупируют непрореагировавшие газы, снижая затраты.

Легирующее оборудование: планетарная мельница используется для механического легирования, рафинирования порошка и равномерного легирования оксидов редкоземельных элементов. Параметры: от 400 до 600 об/мин, коэффициент гранулирования 8:1, время измельчения от 8 до 12 часов. Бак шаровой мельницы и среда изготовлены из твердого сплава во избежание загрязнения.

Вспомогательное оборудование: в том числе система очистки газов (удаление водяного пара и примесей) и установка очистки выхлопных газов (каталитическое сжигание водородных выхлопных газов). Лазерные анализаторы размера частиц и СЭМ используются для определения размера частиц порошка (от 1 до 5 микрон) и топографии.

Обслуживание и безопасность: Регулярно проверяйте герметичность печи (раз в месяц), калибруйте систему измерения температуры (раз в квартал). Водородная система должна быть оборудована течеискателями и взрывозащищенными вентиляционными устройствами для обеспечения безопасной эксплуатации. Эффективная работа восстановительного и легирующего оборудования обеспечивает качество порошка и закладывает основу для

последующего формования.

6.3 Формовочное оборудование для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Формовочное оборудование прессует легированный вольфрамовый порошок в заготовку, обеспечивая равномерную плотность и структурную стабильность. К основному оборудованию относятся:

Холодный изостатический пресс (CIP): Подает равномерное давление (от 100 до 300 МПа) через жидкую среду для прессования плотности тела до теоретической плотности до 60% до 70%. Оборудование имеет емкость от 50 до 500 л и оснащено насосом высокого давления и датчиком давления с точностью $\pm 0,5$ МПа.

Гидравлическая формовочная машина: использует жесткую стальную форму с давлением от 150 до 200 МПа, подходит для мелкосерийного производства. Время прессования составляет от 5 до 10 минут, оснащен автоматической системой подачи, а производительность составляет от 50 до 200 кг/ч.

Машина для формовки суспензии: используется для электродов сложной формы, смешивание порошка со связующим (от 0,5% до 1% поливинилового спирта) в суспензию, впрыскивание ее в форму для отверждения. Оборудование содержит прецизионный шприцевой насос (точность потока $\pm 0,1$ мл/мин) и систему вакуумной дегазации. Температура сушильной камеры регулируется на уровне от 25 до 80°C, чтобы избежать термического напряжения.

Оборудование для контроля качества: ультразвуковой детектор проверяет наличие внутренних дефектов в корпусе (разрешение 0,1 мм), плотномер Архимеда измеряет плотность (точность $\pm 0,01$ г/см³). Система визуального осмотра гарантирует, что отклонение размеров корпуса $< 0,1$ мм.

Обслуживание и оптимизация: регулярно чистите пресс-форму (раз в неделю), калибруйте датчик давления (раз в месяц). Оптимизируйте параметры формовки с помощью моделирования методом конечных элементов для уменьшения градиента плотности. Высокая точность формовочного оборудования обеспечивает качество корпуса и обеспечивает надежную основу для спекания.

6.4 Агломерационное оборудование для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Агломерационное оборудование используется для уплотнения корпуса с получением высокопрочного электродного материала высокой плотности. К основному оборудованию относятся:

Вакуумная печь для спекания горячим прессом: спекается при температуре от 1600 до

1800 °C, от 50 до 80 МПа, степень вакуума 10^{-3} Па. В корпусе печи используется графитовый нагревательный корпус, оснащенный инфракрасным термометром (точность $\pm 2^{\circ}\text{C}$) и вакуумным насосом. Скорость нагрева регулируется порциями (от $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до 1000°C , $4^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до целевой температуры) и поддерживается в тепле от 60 до 90 минут.

Печь для искрового плазменного спекания (SPS): быстрый нагрев (от 100 до $200^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) с помощью импульсного тока, температура спекания от 1400 до 1600°C , давление от 30 до 50 МПа, температура выдержки от 5 до 10 минут. Он подходит для нанопорошков и снижает испарение редкоземельных элементов. Оснащен высокоточным регулятором тока (от 1000 до 2000 А).

Вертикальная печь для спекания: ток плавления 90%, температура выше 3000°C , атмосфера аргон или водород. Подходит для электродов большого диаметра, оснащенных системой зажима электродов с водяным охлаждением и контролем тока.

Вспомогательное оборудование: печь предварительного спекания (1200°C , вакуумная или водородная атмосфера) для удаления связующих, оборудованная системой циркуляции газа. SEM и XRD проанализировали микроструктуру после спекания для подтверждения размера зерен (от 5 до 10 мкм) и распределения редкоземельных элементов.

Обслуживание и безопасность: Регулярно проверяйте вакуумный насос (раз в месяц), калибруйте систему измерения температуры (раз в квартал). Печь для спекания должна быть оборудована системой циркуляции охлаждающей воды для предотвращения перегрева. Функция быстрого спекания оборудования SPS повышает эффективность на 30% и снижает энергопотребление на 20%.

6.5 Технологическое оборудование для производства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Технологическое оборудование перерабатывает спеченное тело в электродные стержни для улучшения плотности и качества поверхности. В состав основного оборудования входят:

Ротационная ковочная машина: диаметр корпуса (от 20 до 3 мм) уменьшается за счет роторной молотковой обработки, а скорость деформации составляет от 20% до 30% за проход. Температура обработки составляет от 800 до 1200°C , оснащен автоматической системой подачи и инфракрасным термометром.

Волоочильный станок: Растяжение стержня с помощью твердосплавной матрицы для уменьшения диаметра до 0,5-10 мм. Скорость выдергивания от 0,5 до 2 м/мин и смазывается графитовой эмульсией (коэффициент трения $< 0,1$). Цепная тянущая машина для непрерывного производства.

Правильные и отрезные станки: Роликовые правильные станки обеспечивают отклонение прямолинейности $< 0,1$ мм/м, а лазерные отрезные станки контролируют длину от 150 до 175

мм (допуск $\pm 0,5$ мм). Оснащен системой визуального контроля для контроля качества поверхности.

Оборудование для контроля качества: измеритель шероховатости поверхности ($Ra < 0,5$ мкм) и ультразвуковой дефектоскоп для выявления внутренних дефектов. Измерение размеров осуществляется с помощью лазерного дальномера (точность $\pm 0,01$ мм).

Обслуживание и оптимизация: регулярно меняйте пресс-форму (каждые 1000 часов), проверяйте систему смазки (раз в неделю). Моделирование методом конечных элементов оптимизирует параметры деформации, а выход достигает более 98%. Автоматизированное технологическое оборудование повышает эффективность на 30%.

6.6 Оборудование для обработки поверхности композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Оборудование для обработки поверхностей используется для полировки, очистки и нанесения покрытий для повышения коррозионной стойкости электродов и показателей электронной эмиссии.

Механическая полировальная машинка: с использованием оксидов алюминия (2000 меш), полировка электродов до шероховатости $Ra < 0,2$ мкм. Оснащен многоосевой полировальной головкой с производительностью обработки от 100 до 500 штук/час.

Электрохимическая полировальная машина: полировка в смешанном растворе серной кислоты и фосфорной кислоты, плотность тока от 0,5 до 1 А/см², время обработки от 5 до 10 минут. Оснащен источником питания постоянного тока и системой рекуперации отработанной жидкости.

Ультразвуковой очиститель: использует щелочной раствор (pH от 8 до 10) с частотой 40 кГц, температурой от 50 до 60 °C и временем очистки от 5 до 10 минут. Оснащен баком для промывки деионизированной водой и системой сушки горячим воздухом.

Оборудование для химического осаждения из газовой фазы (CVD): наносятся оксиды редкоземельных элементов или керамические покрытия (например, La_2O_3 , ZrO_2), температура от 800 до 1000 °C, вакуум 10^{-2} Па и скорость осаждения 0,1 мкм/мин.

Техническое обслуживание и защита окружающей среды: регулярно очищайте полировальные диски и мойте баки (раз в неделю), калибруйте текущую плотность (раз в месяц). Чистящие средства на водной основе снижают выбросы летучих органических соединений, а отработанная жидкость восстанавливает редкоземельные элементы за счет ионного обмена с коэффициентом восстановления 90%.

6.7 Вспомогательное оборудование для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Вспомогательное оборудование обеспечивает бесперебойные производственные процессы и

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

контроль качества, в том числе:

Вакуумная сушильная печь: для сушки порошка и тела, температура от 80 до 150°C, степень вакуума 10^{-1} Па. Рекомендуемая модель: немецкая сушильная печь Binder.

Система очистки газов: удаляет водяной пар и примеси из водорода с чистотой 99,999%. Оснащен молекулярным ситом и конденсатором, производительность от 1 до 5 м³/ч.

Установка подготовки отработавших газов: каталитическое сжигание водородных выхлопных газов, оснащенная анализатором выхлопных газов (выброс соответствует экологическим нормам).

Оборудование для контроля качества: в том числе рентгеновский дифрактометр (XRD, для анализа кристаллической структуры), сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) для наблюдения за микроскопической морфологией и тестер мощности убегания электронов (точность $\pm 0,01$ эВ).

Система управления данными: интеграция датчиков и ПЛК для записи параметров процесса в режиме реального времени и создания отчетов о качестве.

Вспомогательное оборудование обеспечивает непрерывность производства и прослеживаемость качества, снижая процент брака.

6.8 Рекомендации по выбору и техническому обслуживанию оборудования для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Руководство по выбору:

Транспортировка сырья: Для массового производства выбирайте высокоточные весы (0,001 г) и распылительные сушилки (размер частиц от 1 до 5 микрон).

Восстановление и легирование: трубчатые восстановительные печи подходят для малых и средних партий, колпаковые печи подходят для больших партий, а звездчатая мельница обеспечивает равномерное легирование.

Формовка: холодный изостатический пресс подходит для высокоточных заготовок, формовочная машина подходит для небольших партий, а машина для формовки суспензии подходит для сложных форм.

Спекание: печи SPS подходят для нанопорошков, печи горячего прессования подходят для обычного производства, а вертикальные печи подходят для электродов большого диаметра.

Обработка и обработка поверхности: Ротационные ковочные машины и волочильные машины должны быть высоко автоматизированы, а оборудование CVD улучшает характеристики покрытия.

Рекомендации по техническому обслуживанию:

Регулярное техническое обслуживание: ежемесячно проверяйте герметичность оборудования и точность датчиков, ежеквартально калибруйте систему измерения

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

температуры, а раз в полгода заменяйте изношенные детали (например, пресс-формы, полировальные диски).

Профилактическое обслуживание: Используйте виброанализаторы для определения рабочего состояния оборудования и предотвращения отказов. Система смазки проверяется еженедельно для поддержания коэффициента трения $< 0,1$.

Ведение журналов ведения журналов технического обслуживания для записи поломок и времени ремонта. В сочетании с искусственным интеллектом позволяет анализировать данные о работе оборудования, оптимизировать циклы технического обслуживания и продлевать срок службы оборудования на 20%.

6.9 Проектирование и интеграция автоматической производственной линии для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Автоматизированные производственные линии интегрируют различные процессы для повышения эффективности и согласованности. Этапы проектирования и интеграции заключаются в следующем:

Схема производственной линии:

Участок обработки сырья: электронные весы, система приготовления раствора, распылительная сушилка, занимающая площадь 50 м².

Участок восстановления и легирования: трубчатая восстановительная печь, планетарная мельница, оборудованная системой циркуляции газа, площадью 100 м².

Участок формовки и спекания: холодный изостатический пресс, печь SPS, площадью 80 м².

Участок механической обработки и обработки поверхности: ротационная ковка, волочильный станок, CVD-оборудование, занимающее площадь 60 м².

Зона инспекции и упаковки: SEM, XRD, автоматическая упаковочная машина, 30 м².

Система автоматизации:

Управление ПЛК: Siemens S7-1500 контролирует параметры процесса, интегрирует датчики (температуры, давления, расхода) и осуществляет мониторинг в режиме реального времени.

Работа с роботом: Используйте шестиступенчатую роботизированную руку (например, ABB IRB 6700) для обработки заготовок и готовой продукции, повышая эффективность на 30%.

Управление данными: система MES записывает производственные данные, генерирует отчеты о качестве и поддерживает прослеживаемость.

Преимущества интеграции: Автоматизированные производственные линии сокращают производственные циклы на 20% и увеличивают выход продукции до 98%. Энергопотребление снижается на 15%, трудозатраты снижаются на 40%.

6.10 Предохранительное оборудование и защитные меры для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Оборудование для обеспечения безопасности и защитные меры обеспечивают безопасность производственного процесса и снижают риск несчастных случаев.

Оборудование для обеспечения безопасности:

Детектор утечки водорода: обнаруживает концентрацию ниже 0,1%, автоматически подает сигнал тревоги и отключает источник газа. Рекомендуемая модель: немецкий детектор Dräger.

Взрывозащищенная система вентиляции: объем воздуха 5000 м³/ч для предотвращения накопления водорода, оснащенная системой управления преобразованием частоты.

Система предотвращения и контроля пожаров: порошковый огнетушитель и ящик для хранения песка для борьбы с высокотемпературными возгораниями оборудования.

Система контроля пыли: установка вытяжки пыли отрицательного давления с концентрацией пыли < 10 мг/м³ и высокоэффективный фильтр.

Меры защиты:

Защита персонала: операторы носят респираторы (уровень FFP3), защитные очки и перчатки для работы с высокими температурами. В зоне сварки устанавливается защитный экран от дуговой дуги.

Защита оборудования: Агломерационная печь и технологическое оборудование оснащены кнопками аварийной остановки, а сосуд под давлением регулярно осматривается (один раз в год).

Мониторинг окружающей среды: мониторинг температуры в цехе (<30°C), влажности (<60%) и концентрации газов в режиме реального времени для обеспечения безопасной среды.

Обучение и чрезвычайные ситуации: Операторы проходят обучение по безопасности водорода и эксплуатации оборудования (ежеквартально). Сформулируйте планы действий в чрезвычайных ситуациях, проводите регулярные учения (например, эвакуация при пожаре) и убедитесь, что время реагирования на аварию составляет < 5 минут.

Защитное оборудование и защитные меры соответствуют стандартам OSHA и ISO 45001 для обеспечения производственной безопасности и здоровья сотрудников.



Глава 7 Отечественные и зарубежные стандарты на композитные редкоземельные вольфрамовые электроды

7.1 Отечественные стандарты на композитные редкоземельные вольфрамовые электроды

Являясь одной из основных редкоземельных стран и крупнейшим производителем вольфрамовых электродов в мире, Китай находится на переднем крае стандартизации композитных редкоземельных вольфрамовых электродов. Эти стандарты не только стандартизируют технические показатели, производственные процессы и контроль качества продукции, но и подчеркивают требования охраны окружающей среды и безопасности для удовлетворения потребностей отечественного промышленного развития. Отечественная система стандартов в основном базируется на национальных стандартах (GB/T), дополненных отраслевыми стандартами (YS/T, JB/T) и местными/корпоративными стандартами, образуя многоуровневую нормативную базу. Ниже приведены основные отечественные стандарты:

GB/T 4190-2017 «Вольфрамовый электрод»: Это основной национальный стандарт в области вольфрамовых электродов в Китае, применимый ко всем нерасплавленным вольфрамовым электродам, включая композитные редкоземельные вольфрамовые электроды, в основном используемые в вольфрамовой сварке в среде инертного газа (сварка TIG), плазменной сварке

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

и резке и в других областях. Стандарт делит электроды на три категории: чистый вольфрам, одиночный редкоземельный вольфрам и композитный редкоземельный вольфрам, а композитные редкоземельные вольфрамовые электроды определяют как добавляющие два или более оксидов редкоземельных элементов (таких как оксид лантана La_2O_3 , оксид церия CeO_2 , оксид иттрия Y_2O_3) и т. д.). В стандарте указаны требования к химическому составу, такие как содержание оксида лантана от 0,5% до 2,2%, общее количество оксидов редкоземельных элементов не более 4% и чистота вольфрамовой матрицы не менее 99,95%. Кроме того, стандарт имеет жесткие допуски по физическим размерам: диаметры варьируются от 0,5 мм до 10 мм, допуски $\pm 0,05$ мм; Длина от 150 мм до 175 мм, допуски ± 1 мм. Что касается эксплуатационных характеристик, электрод должен иметь способность убегания электронов менее 2,5 эВ, стабильность дуги более 95%, а также стандарты качества поверхности (например, отсутствие трещин, окалины, шероховатость $Ra < 0,2$ мкм). Стандарт также включает методы контроля, такие как эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) для химического анализа, а также механические свойства, определяемые твердомером по Виккерсу. Формулировка этого стандарта ссылается на международный стандарт ISO 6848, но больше внимания уделяется использованию местных редкоземельных ресурсов в Китае и принципам «зеленого» производства.

YS/T 231-2007 "Редкоземельные вольфрамовые электроды": В качестве отраслевого стандарта для цветных металлов, этот стандарт специально предназначен для легированных редкоземельными вольфрамовыми электродами, включая композитные типы редкоземельных элементов, пригодных для сварки, резки и электрических источников света. Стандарт подчеркивает применение оксидов редкоземельных элементов в многоэлементных композитах, например, указывает от 1% до 3% общего содержания редкоземельных элементов для бинарных композитов (таких как комбинации оксида церия и оксида лантана) и от 1,5% до 3,5% для тройных композитов (таких как оксид церия, оксид лантана и оксид иттрия). Метод испытания на стабильность дуги подробно описан в разделе эксплуатационных испытаний: в условиях имитации сварки TIG ток составляет от 100 А до 200 А, а также регистрируется летучесть дуги (требуется $< 5\%$); Испытание на долговечность дуги требует непрерывной сварки при 200 А постоянного тока в течение не менее 500 часов. Стандарт также требует микроструктуры: размер зерна контролируется от 5 до 10 мкм, а равномерное распределение частиц оксида редкоземельных элементов наблюдается с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Стандарт был выпущен в 2007 году и впоследствии пересмотрен с учетом новых применений, таких как новые электроды аккумуляторных батарей, добавление индикаторов защиты от загрязнения и высокотемпературных усталостных испытаний.

JB/T 12871-2016 «Технические условия на вольфрамовые электроды для сварки»: Этот стандарт машиностроения посвящен вольфрамовым электродам для сварки, включая технические условия и правила проверки композитных редкоземельных вольфрамовых электродов. Стандарт определяет требования к упаковке, транспортировке и хранению электродов, такие как упаковка должна быть влагонепроницаемой, устойчивой к столкновениям и использовать вакуумные пакеты; Избегайте высокой температуры и

повышенной влажности при транспортировке. К показателям качества относятся пористость сварного шва менее 0,1% и прочность сварного шва на разрыв не менее 90% подложки. Стандарт также вводит тесты на надежность, такие как снижение производительности на 5% после хранения в среде с высокой влажностью (относительная влажность 90%)< Этот стандарт распространяется как на производителей сварочного оборудования, так и на пользователей, обеспечивая подробный процесс приемки, включающий визуальный осмотр, измерение размеров и тестирование образцов производительности.

Другие стандарты: Местные стандарты, такие как Шанхайский местный стандарт DB31/T 1234-2020, предусматривают оптимизацию соотношения редкоземельных элементов для многосоставных электродов (например, оксид церия: оксид лантана: оксид иттрия = 1:1:3) и увеличивают требования к нанолегированию редкоземельными элементами. Корпоративный стандарт расширяет показатели производительности на основе GB/T 4190 и подходит для высокотехнологичных авиационных приложений. Эти стандарты образуют взаимодополняющую систему и способствуют индустриализации композитных редкоземельных вольфрамовых электродов.

Отечественный стандарт характеризуется акцентом на преобразование в области защиты окружающей среды, запрет на использование радиоактивных торий-вольфрамовых электродов и стыковку с национальными правилами обращения с редкоземельными элементами, уделяя особое внимание переработке ресурсов. Стандартные обновления обычно вносятся каждые 5-7 лет, чтобы включить в них новые технологии, такие как тестирование с помощью искусственного интеллекта и процессы экологичной подготовки.

7.2 Международные стандарты на композитные редкоземельные вольфрамовые электроды

Международные стандарты обеспечивают единые технические спецификации и критерии качества для мировой торговли, производства и применения композитных редкоземельных вольфрамовых электродов и в основном сформулированы такими организациями, как Международная организация по стандартизации (ISO), Американское общество сварки (AWS), Европейский комитет по стандартизации (CEN) и Японское исследование промышленных стандартов (JISC). Эти стандарты подчеркивают стабильность производительности, экологические требования и международную совместимость, способствуя стабильности в трансграничных цепочках поставок. Вот подробный разбор основных международных стандартов:

ISO 6848:2015 "Дуговая сварка и резка - неплавящиеся вольфрамовые электроды - Классификация": В качестве международного стандарта классификации вольфрамовых электродов этот стандарт применяется к нерасплавленным вольфрамовым электродам, включая композитные редкоземельные вольфрамовые электроды, для процессов дуговой сварки и резки. Стандарт классифицирует электроды как WP (чистый вольфрам), WT (вольфрамовый торий, ограниченный), WL (оксид вольфрама лантана), WC (оксид вольфрама и церия), WY (оксид иттрия вольфрама) и EWG (композитный редкоземельный

вольфрам). Для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов стандарт определяется как электрод, содержащий два или более оксидов редкоземельных элементов с общим содержанием редкоземельных элементов от 0,5% до 4%, такой как WL20 (содержащий от 1,8% до 2,2% La_2O_3). Физические характеристики включают диаметры от 0,5 мм до 10 мм (допуск $\pm 0,05$ мм) и длину от 50 мм до 175 мм (допуск ± 1 мм). Требования к рабочим характеристикам включают мощность убегания электронов менее 2,5 эВ, пусковое напряжение дуги менее 35 В и срок службы дуги не менее 500 часов при токе 150 А. В стандарте также указаны требования к обработке поверхности (например, толщина полированного или оксидного слоя < 5 мкм) и характеристики упаковки (влагостойкость и ударопрочность). Методы контроля включают анализ химического состава (ICP-OES) и испытание на работоспособность дуги (высокоскоростная фотосъемка фиксирует стабильность дуги). Стандарт был пересмотрен в 2015 году со ссылкой на регламент ЕС REACH, в котором особое внимание уделялось продвижению радиоактивных альтернатив ториевым вольфрамовым электродам.

AWS A5.12M/A5.12:2009 (R2017) Спецификация на вольфрамовые и оксидные дисперсные вольфрамовые электроды для дуговой сварки и резки: Стандарт Американского общества сварки является авторитетной спецификацией в области сварки, которая в значительной степени согласована со стандартом ISO 6848, но в большей степени ориентирована на фактические характеристики сварки. Стандарт относит композитные редкоземельные вольфрамовые электроды к серии EWG, оговаривая, что содержание оксидов редкоземельных элементов (таких как La_2O_3 , CeO_2 , Y_2O_3) с точностью до 0,1%, а общее содержание не превышает 4%. Например, для сварки методом EWC-2 (с 2% оксида церия) время запуска дуги составляет $< 0,1$ секунды, а стабильность дуги $> 90\%$ при сварке с положительной полярностью постоянного тока (DCSP). Стандарт содержит подробные требования к высокотемпературным характеристикам: при токе 200 А скорость износа наконечника электрода $< 0,01$ мм/ч. Размеры и допуски соответствуют стандарту ISO, а рекомендации по диапазону сварочного тока увеличены (например, электрод диаметром 2,4 мм для 50–150 А). Когда он был переиздан в 2017 году, стандарт усилил положение о защите окружающей среды, рекомендовав использовать композитные редкоземельные элементы вместо тория и вольфрама. Этот стандарт применяется к рынку США и международной торговле, предоставляя подробные рекомендации по сертификации.

EN ISO 6848:2015 (европейский стандарт): Европейский стандарт аналогичен ISO 6848, но включает в себя нормативные требования ЕС, такие как REACH и RoHS. В этом стандарте подчеркивается нерадиоактивность и экологичность электродов, а также определяются испытания на стабильность композитных редкоземельных вольфрамовых электродов при высокой влажности (относительная влажность 90%) и высоких температурах (1500°C): скорость окисления $< 0,01$ мг/см², ослабление эксплуатационных характеристик $< 5\%$. Стандарт также включает оценку жизненного цикла, которая требует от производителей сообщать о своем углеродном следе и коэффициенте восстановления редкоземельных элементов ($> 80\%$). Подходит для стран-членов ЕС, способствуя применению экологически чистых сварочных технологий.

JIS Z 3233:2016 «Вольфрамовые электроды для дуговой сварки в среде инертного газа»: японский промышленный стандарт посвящен вольфрамовым электродам для сварки в среде инертного газа, включая композитные редкоземельные типы. Стандарт определяет содержание редкоземельных элементов с точностью до 0,1%, например, WY20 содержит от 1,8% до 2,2% Y_2O_3 . Эксплуатационные испытания включают в себя показатели прецизионной сварки: пусковое напряжение дуги < 30 В и пористость сварного шва $< 0,05\%$. В стандарте особое внимание уделяется контролю микроструктуры, проверке размера зерен < 10 мкм с помощью рентгеновской дифракции (XRD). Этот стандарт применяется к японской электронной и автомобильной промышленности, где используются высокоточные приложения.

Общим знаменателем международных стандартов является акцент на радиоактивное преобразование и оптимизацию производительности с циклом обновления от 3 до 5 лет для адаптации к изменениям в глобальных цепочках поставок.

7.3 Нормы состава материалов для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Стандарт состава материала является основой для контроля качества композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, определяя соотношение состава, требования к чистоте и пределы примесей вольфрамовой матрицы и оксидов редкоземельных элементов. Эти стандарты обеспечивают постоянство состава за счет методов химического анализа и позволяют избежать колебаний характеристик. С отечественной и зарубежной точек зрения разработано следующее:

Отечественные стандарты состава материалов (GB/T 4190-2017 и YS/T 231-2007):

Вольфрамовая матрица: чистота не менее 99,95%, общее содержание примесей $< 0,05\%$. Удельные примеси: железо (Fe) $< 0,01\%$, кремний (Si) $< 0,005\%$, углерод (C) $< 0,005\%$, кислород (O) $< 0,01\%$. Эти пределы обеспечивают высокую проводимость и устойчивость электродов к высоким температурам.

Оксиды редкоземельных элементов: от 0,5% до 2,2% одиночных редкоземельных электродов; Общее содержание композитных редкоземельных электродов составляет от 1% до 4%, таких как бинарные композиты (оксид церия + оксид лантана = от 1,5% до 3%), тройные композиты (оксид церия + оксид лантана + оксид иттрия = от 1,5% до 3,5%). Стандарт позволяет использовать следовые добавки, такие как диоксид циркония ($ZrO_2 < 1\%$), для оптимизации стойкости к окислению.

Метод обнаружения: ICP-OES использовался для определения содержания редкоземельных элементов и примесей, с точностью до $\pm 0,01\%$; Валидация с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS). Стандарт требует, чтобы отклонение компонентов от партии к партии составляло $< 0,1\%$, что контролируется статистическим управлением технологическим процессом (SPC).

Международные стандарты состава материалов (ISO 6848:2015 и AWS A5.12:2009):

Вольфрамовая матрица: чистота $\geq 99,9\%$, общее содержание примесей $< 0,1\%$. Пределы

примесей: Fe<0,02%, Si<0,01%, C<0,01%, O<0,02%. В стандарте подчеркивается влияние примесей на эмиссию электронов.

Оксиды редкоземельных элементов: общее содержание композитных электродов составляет от 0,5% до 4%, например, WL20 содержит от 1,8% до 2,2% La₂O₃; Серия EWG допускает многократное компаундирование (например, La₂O₃+CeO₂+Y₂O₃=от 1,5% до 3,5%). Стандарт запрещает радиоактивные элементы (такие как ThO₂) и поощряет безвредную замену редкоземельных элементов.

Метод обнаружения: РФА анализ примесей, определение редкоземельных элементов методом ICP-MS (точность ±0,005%). Стандарт требует от поставщиков предоставления сертификата состава (COA), включая номер партии и дату испытаний.

Анализ применимости: Национальные стандарты в большей степени сосредоточены на местном использовании редкоземельных ресурсов (например, использование оксида церия и оксида лантана), в то время как международные стандарты подчеркивают глобальную совместимость и защиту окружающей среды (например, предельные значения REACH). Строгое соблюдение стандартов состава увеличивает срок службы электродов на 20% за счет уменьшения количества примесей, что делает его пригодным для областей с высоким спросом, таких как аэрокосмическая промышленность.

7.4 Стандарты эксплуатационных испытаний композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Стандарт эксплуатационных испытаний определяет методы оценки и показатели физических, электрических, химических и сварочных свойств композитных редкоземельных вольфрамовых электродов для обеспечения надежности продукта в практическом применении. Эти стандарты включают лабораторные испытания и валидацию смоделированных условий, охватывающих множество измерений от микро до макро.

Отечественные стандарты эксплуатационных испытаний (YS/T 231-2007 и JB/T 12871-2016):

Работа электронного аварийного устройства и электрические характеристики: Мощность аварийного отключения измеряется ИБП и должна составлять < 2,5 эВ; Проводимость > 1,8×10⁷ См/м, испытана четырехзондовым методом. Стабильность дуги проверяется на паяльной станции TIG с токами от 100 до 200 А, летучестью <5% и стабильностью > 95%.

Механические свойства: твердость HV от 450 до 500 по твердомеру Виккерса; Прочность на разрыв от 800 до 1000 МПа, испытана универсальной машиной для испытаний на разрыв; Вязкость разрушения K_{1с} от 8 до 10 МПа·м^{1/2}, измеренная с помощью копера.

Тепловые свойства: теплопроводность от 174 до 190 Вт/(м·К), испытание лазерной вспышкой; Коэффициент теплового расширения составлял от 4,5 до 5,0×10⁻⁶/°C, а dilatометр измерялся в диапазоне от 25 до 2000°C.

Производительность сварки: срок службы дуги составляет > 500 часов при 200 А постоянного тока, а пусковое напряжение дуги составляет < 35 В; Глубина контроля пробития составляет ± 0,1 мм, а форма дуги фиксируется с помощью высокоскоростной фотосъемки.

Испытательная среда: Стандарт определяет температуру испытания от 20 до 25°C, влажность

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

< 60%, а оборудование откалибровано в соответствии со стандартами JJG.

Международные стандарты эксплуатационных испытаний (ISO 6848:2015 и AWS A5.12:2009):

Производительность дуги: время зажигания дуги < 0,1 секунды, напряжение < 35 В; Стабильность > 90% и проверена с помощью анализатора токовых сигналов.

Срок службы и прочность: от 500 до 1000 часов службы дуги, усталостные испытания при высоких температурах (1500°C, 10⁴ циклов без трещин).

Химические свойства: Коррозионная стойкость была определена с помощью эксперимента по высокотемпературному окислению при < скорости окисления 0,01 мг/см² в кислородсодержащей атмосфере при 1500°C.

Микроскопические свойства: размер зерна от 5 до 10 мкм, наблюдение за СЭМ; Однородность распределения редкоземельных элементов проанализирована с помощью ПЭМ.

Метод испытания: Соответствует стандартам ASTM, таким как испытание на растяжение E8 и испытание на вязкость излома E399.

Применение стандартов эксплуатационных испытаний обеспечивает высокую эффективность электрода при сварке, снижая частоту отказов на 20%.

7.5 Нормы охраны окружающей среды и безопасности для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Стандарты охраны окружающей среды и безопасности направлены на минимизацию воздействия производства и использования композитных редкоземельных вольфрамовых электродов на окружающую среду и здоровье человека, уделяя особое внимание отсутствию радиоактивности, восстановлению ресурсов, а также предотвращению и контролю рисков.

Отечественные стандарты охраны окружающей среды и безопасности:

GB 26451-2011 "Стандарт выбросов редкоземельных промышленных загрязнителей": Указывает, что концентрация пыли в выхлопных газах составляет < 10 мг/м³, SO₂ < 50 мг/м³; Ионы редкоземельных элементов в сточных водах < 0,5 мг/л, pH от 6 до 9. Стандарт требует оснащения предприятий системами очистки сточных вод с коэффициентом рекуперации > 80%.

HJ 2527-2012 "Техническая спецификация по охране окружающей среды редкоземельной промышленности": Акцент на экологически чистом процессе подготовки, использование нерадиоактивных редкоземельных элементов вместо тория и вольфрама. Коэффициент восстановления отработанных электродов > 85%, а выбросы углерода в процессе производства < 2 кг CO₂/кг электродов. Стандарты включают в себя оценку жизненного цикла (LCA), которая требует отчетности о воздействии на окружающую среду по всей цепочке, от добычи сырья до утилизации.

GB/T 27948-2011 «Технические условия по безопасности сварки»: Требования безопасности включают давление хранения водорода <15 МПа, концентрацию при обнаружении утечек <0,1%; Средства защиты оператора в стандартной комплектации (пылезащитная маска класса

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

FFP3, перчатки, устойчивые к высоким температурам $> 300^{\circ}\text{C}$). Вентиляционная мощность цеха $> 5000 \text{ м}^3/\text{ч}$, а защита от дугового излучения соответствует GBZ 115.

Международные стандарты в области охраны окружающей среды и безопасности:

Регламент REACH (ЕС 1907/2006): Требуется регистрации оксидов редкоземельных элементов с пределом $0,1\% < \text{вредных примесей}$. Утилизация отходов соответствует Директиве ЕС по отходам с коэффициентом переработки $> 90\%$. Стандарт запрещает торий и вольфрам, способствуя применению композитных редкоземельных элементов.

Директива RoHS (2011/65/EU): Ограничить содержание опасных веществ (таких как свинец, ртуть) в электродах до $< 0,1\%$ для обеспечения безопасности электронных устройств.

ISO 14001:2015: Стандарт системы экологического менеджмента требует от компаний мониторинга потребления энергии и выбросов с целью сокращения углеродного следа на 20% . Что касается безопасности, то в стандарте OSHA 1910.252 указана защита сварных швов с лучевой нагрузкой $< 1 \text{ мЗв/год}$.

Эти стандарты способствуют устойчивому производству и снижению загрязнения окружающей среды на 30% .

7.6 Система сертификации композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Система сертификации гарантирует, что композитные редкоземельные вольфрамовые электроды соответствуют стандартам благодаря независимой проверке, что повышает репутацию продукции и доступ к рынку.

Отечественная система сертификации:

Китайская национальная обязательная сертификация продукции (CCC): отвечает за Китайский центр сертификации качества (CQC), проверяющий безопасность и производительность в соответствии с GB/T 4190. Сертификация включает в себя заводской аудит, тестирование образцов (например, на срок службы дуги) и проверку документов с циклом от 1 до 3 месяцев.

Китайский центр сертификации качества (CQC): предлагает добровольную сертификацию, охватывающую химический состав (тестирование ICP-OES) и соответствие экологическим нормам (уровень переработки лома $> 85\%$). Знак сертификации повышает конкурентоспособность отечественного рынка.

Лицензия на производство редкоземельных элементов: выдается Министерством промышленности и информационных технологий, требуя от предприятий иметь возможности отслеживания цепочки поставок редкоземельных элементов и предоставлять отчеты о составе и производительности.

Международная система сертификации:

ISO 9001:2015: Сертификация системы менеджмента качества, выданная SGS или TÜV, гарантирует стабильность производства и выход продукции на уровне $> 98\%$.

Сертификация CE: соответствует требованиям рынка ЕС, соответствует требованиям REACH и RoHS, включая испытания на электромагнитную совместимость и безопасность.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Сертификация AWS: Сертификация Американского общества сварки для AWS A5.12, которая включает в себя проверку сварочных свойств (например, испытание на напряжение дуги).
Сертификация TÜV: Сертифицирован Немецким институтом технического надзора, подходит для оборудования высокого давления и проверяет производительность и долговечность при высоких температурах.

Процесс сертификации включает в себя подачу заявки, обзор, тестирование и сертификацию и действителен от 3 до 5 лет. Предприятиям необходимо поддерживать свои системы и регулярно пересматривать их, чтобы поддерживать свои сертификаты.

7.7 Сравнение и анализ применимости стандартов композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Стандартное сравнение:

Контроль состава: Внутренний предел примесей GB/T 4190 < 0,05%, международный ISO 6848 < 0,1%, а внутренний более строгий для соблюдения требований к чистоте редкоземельных ресурсов.

Эксплуатационные показатели: Отечественный YS/T 231 подчеркивает срок службы горения дуги > 500 часов, международный AWS A5.12 больше внимания уделяет производительности запуска дуги < 35 В, а международные стандарты больше подходят для прецизионной сварки. Требования по защите окружающей среды: Отечественный уровень переработки GB 26451 > 85%, международный REACH > 90%, а международные стандарты уделяют больше внимания устойчивости глобальной цепочки поставок.

Методы тестирования: Эти два метода схожи (например, ICP-OES, SEM), но международные стандарты вводят анализ с помощью искусственного интеллекта для повышения эффективности.

Анализ применимости:

Аэрокосмическая промышленность: применяются международные стандарты ISO 6848 и AWS A5.12, в которых особое внимание уделяется стабильности при высоких температурах и качеству сварных швов, что соответствует требованиям высокой точности.

Автомобилестроение: Отечественные GB/T 4190 и YS/T 231 применимы, уделяя особое внимание экономичности и массовому производству, подходят для легкой сварки.

Новая энергетика: приоритет международных стандартов REACH и RoHS, обеспечение нетоксичности и переработки, подходит для электродов аккумуляторов.

Электронная промышленность: Япония JIS Z 3233 подходит, подчеркивая производительность микропайки и низкий уровень загрязнения.

Ориентированность на экспорт: предприятиям необходима двойная сертификация (внутренняя + международная), например, китайская продукция, экспортируемая в ЕС, нуждается в маркировке CE.

Выбор стандарта зависит от рынка и области применения, а комбинация может повысить конкурентоспособность.

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item		Typical Value	Remarks
Tungsten Purity		≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Content	Oxide	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Range	Current	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance		2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Improvement	Life	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

7.8 Последние стандартные обновления для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

По состоянию на август 2025 года стандартные обновления для композитных редкоземельных вольфрамовых электродов сосредоточены на экологически чистом производстве, новых приложениях и технологических инновациях, что отражает глобальный спрос на устойчивое развитие и оптимизацию производительности. Вот подробности о последних обновлениях:

Обновление внутреннего стандарта:

Пересмотренный проект GB/T 4190 (2025 для комментариев): Добавлена новая глава о многосоставных электродах, в которой оговариваются требования к нанолегированию редкоземельными элементами (размер частиц < 100 нм), а верхний предел общего содержания редкоземельных элементов скорректирован до 4,5%. Были добавлены высокотемпературные усталостные испытания (2000°C , 10^5 циклов без трещин) и индекс защиты от обрастания (скорость коррозии $< 0,005$ мг/см²). В пересмотренном варианте подчеркивается соответствие Правилам обращения с редкоземельными элементами (2024 год) и содержится требование к производителям отчитываться об устойчивости цепочки поставок редкоземельных элементов.

Редакция YS/T 231-2024: Увеличить нижний предел срока службы дуги до 600 часов и добавить испытания электрокаталитических характеристик (например, на перенапряжение $< 0,2$ В), которые подходят для области аккумуляторов новой энергии. Стандарт вводит микроанализ с помощью искусственного интеллекта (автоматическая обработка данных SEM) для повышения эффективности тестирования на 20%.

Обновления международного стандарта:

Редакция ISO 6848:2023: Добавлен подкласс классификации композитов EWG (например, EWG-LaCeY), требующий однородности распределения редкоземельных элементов для прохождения проверки ТЕМ (расстояние между частицами < 500 нм). Добавление модулей для новых приложений, таких как 3D-печать вспомогательных электродов, требует $>$ проводимости $1,9 \times 10^7$ См/м. Пересмотрено с целью интеграции в Цели устойчивого развития (ЦУР) Организации Объединенных Наций, чтобы требовать отчетности по углеродному следу $< 1,5$ кг CO₂/кг.

Редакция AWS A5.12:2024: Расширено для новых энергетических приложений, указан срок службы электродов > 5000 раз при сварке литиевых батарей. Была добавлена сертификация «зеленой этикетки» с коэффициентом извлечения $> 95\%$. Стандарт обновляет методологию тестирования, чтобы внедрить высокоскоростную фотографию в сочетании с машинным обучением для анализа стабильности дуги.

Новости в области охраны окружающей среды и безопасности:

Пересмотр EU REACH 2025: усилить контроль за цепочками поставок редкоземельных элементов, требуя от импортируемых электродов представления деклараций о конфликтных минералах, с целевым показателем извлечения $> 95\%$.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Правила реализации Правил обращения с редкоземельными элементами в Китае от 2024 года:
Требует от компаний представлять ежегодные оценки воздействия на окружающую среду, включая данные о выбросах пыли и очистке сточных вод.

Тенденции и влияние: Ожидается, что последнее обновление, в котором особое внимание уделяется цифровому тестированию (например, оптимизации искусственного интеллекта) и экономике замкнутого цикла (например, переработке редкоземельных элементов), приведет к снижению затрат на электроды на 10%. Предприятиям необходимо вовремя корректировать производственный процесс и участвовать в формировании стандартов, чтобы не упускать возможности рынка.



Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2025 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

Tel: 0086 592 512 9696
CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2025V
sales@chinatungsten.com

Глава 8 Испытание и проверка качества композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

8.1 Методы эксплуатационных испытаний композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Методы эксплуатационных испытаний композитных редкоземельных вольфрамовых электродов являются ключом к обеспечению их надежности в таких областях, как сварка, резка и плавка. Эти методы включают в себя всестороннюю оценку электрических, термических, механических и сварочных свойств с целью проверки электронно-эмиссионных способностей электрода, стабильности дуги, устойчивости к высоким температурам и срока службы. Благодаря стандартизированному тестированию можно не только выявить потенциальные дефекты, но и оптимизировать производственный процесс и повысить качество продукции. Ниже приведено подробное описание основных методов испытаний, оборудования, этапов и сценариев применения.

Тест на эффективность электронной эмиссии: Производительность электронной эмиссии является основным показателем композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, который напрямую влияет на сложность зарождения дуги и стабильность дуги. К распространенным методам относятся измерение мощности убегания электронов и измерение плотности тока электронной эмиссии. В испытании на убегание электронов используется ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (ИБП) или термоэмиссионная эмиссия для нагрева электрода до 2000°C в вакуумной среде (10^{-6} Па) для измерения минимальной энергии, необходимой для убегания электронов. Стандарт требует мощности аварийного отключения менее 2,5 эВ. Испытания композитных электродов, таких как WLaCe, содержащих оксид церия и оксид лантана, показали, что мощность убегания может быть снижена до менее чем 2,0 эВ, что повышает эффективность инициирования дуги на 20%. При испытании плотности тока электронного излучения используется аналоговое дуговое устройство для измерения плотности тока (>10 А/мм²) при токе 100 А, а флуктуации формы сигнала регистрируются осциллографом для обеспечения стабильности $>95\%$.

Тестирование производительности дуги: Тестирование производительности дуги имитирует реальную среду сварки, включая начальное напряжение дуги, стабильность дуги и испытание срока службы дуги. При испытании на напряжение дуги сварочный аппарат TIG подает напряжение под защитой аргона (расход 10 л/мин) и регистрирует самое низкое напряжение (<35 В), которое инициирует дугу. Испытания тройных композитных электродов (например, WLaCeY) показывают, что время начала дуги составляет $<0,1$ секунды. Испытание на устойчивость дуги: форма дуги и скорость дрейфа ($<5\%$) наблюдаются высокоскоростной камерой (1000 кадров в секунду), а флуктуации оцениваются в сочетании с анализатором формы тока. Испытание на долговечность дуги проводится непрерывной сваркой при давлении 200 А постоянного тока, чтобы зафиксировать скорость износа наконечника ($<0,01$ мм/ч) и срок службы от 500 до 1000 часов. Результаты показали, что срок службы редкоземельных вольфрамовых электродов с ZrH₂ был продлен на 30%.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Тепловые испытания: Тепловые испытания включают в себя теплопроводность, коэффициент теплового расширения и устойчивость к тепловому удару. Теплопроводность измеряли с помощью лазерной вспышки при комнатной температуре до 2000°C (от 174 до 190 Вт/(м·К)). Коэффициент теплового расширения проверяется расширителем (от 4,5 до $5,0 \times 10^{-6}$ /°C) для обеспечения минимизации термического напряжения при высоких температурах. При испытании на тепловой удар используется быстрый цикл холода и тепла (от 25 до 2000 °C, 100 циклов) для наблюдения за возникновением трещин. Количество циклов работы композитного электрода, содержащего диоксид циркония, > 500 раз без явных повреждений.

Испытание сварных швов: При испытании сварных швов оценивается качество сварного шва, такое как глубина проплавления, пористость и прочность на разрыв. Сваривайте нержавеющую сталь или алюминиевые сплавы на стандартной паяльной станции TIG с током от 100 до 200 А и измеряйте проплавление (от 0,5 до 5 мм) и пористость (<0,1%). Прочность сварного шва на разрыв проверяется универсальной испытательной машиной (>800 МПа). В этом случае качество сварного шва редкоземельного вольфрамового электрода ЕЗ лучше, чем у ториевого вольфрамового электрода при сварке из алюминиевого сплава, а пористость снижается на 40%.

Оборудование и процедуры: Испытательное оборудование включает в себя сварочный аппарат TIG, вакуумную печь, спектрометр UPS и высокоскоростную камеру. Этапы: 1. Подготовка образца (шлифовальный наконечник от 30 до 60°); 2. Контроль окружающей среды (вакуум или аргон); 3. Настройка параметров (например, тока, температуры); 4. Сбор данных (осциллограф, термометр); 5. Анализ и оценка (программная обработка осциллограмм). К проблемам относится стабильность оборудования при высоких температурах, требующая регулярной калибровки (ежеквартально).

Систематическое применение методов эксплуатационных испытаний обеспечивает высокую надежность композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, способствуя их продвижению в высокотехнологичном производстве.

8.2 Испытание механических свойств композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Испытания механических свойств являются важным средством оценки долговечности и стабильности композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в условиях высоких температур и высоких нагрузок. Эти свойства включают твердость, прочность, ударную вязкость и износостойкость, на которые влияют добавки оксидов редкоземельных элементов и микроструктура. Методы контроля сочетают в себе стандартные испытания и смоделированные условия эксплуатации, что помогает выявлять потенциальные механические дефекты и оптимизировать конструкцию электродов. Ниже подробно описан метод анализа, оборудование, этапы и связанный с ним анализ.

Испытание на твердость: Твердость отражает устойчивость электрода к деформации, при

этом твердость по Виккерсу (HV) является распространенным показателем. Композитный электрод имеет твердость от 450 до 500 HV, что на 15% выше, чем у чистого вольфрама (400 HV). Испытание проводилось с помощью твердомера по Виккерсу, с нагрузкой 1 кгс и временем вдавливания 10 секунд. Этапы: 1. Полировка образца ($Ra < 0,1$ мкм); 2. Многоточечный тест (не менее 5 баллов); 3. Рассчитайте среднее значение. Твердость электрода, содержащего оксид иттрия, была обусловлена измельчением зерен, а испытание показало, что твердость увеличилась на 10% после добавления ZrH_2 .

Испытание на прочность: Испытание на прочность на растяжение и сжатие на несущую способность электродов. Прочность на разрыв от 800 до 1000 МПа, от 400 до 600 МПа при высокой температуре (1500°C). Используйте универсальную испытательную машину для зажима обоих концов электрода со скоростью растяжения 1 мм/мин. Этапы: 1. Подготовка образца (длина 50 мм, диаметр 2 мм); 2. Контроль окружающей среды (нагрев в вакуумной печи); 3. Запишите кривую зависимости деформации от напряжения; 4. Рассчитайте прочность и модуль упругости. Редкоземельные элементы добавляются для повышения граничной прочности зерен, причем прочность электрода WLaCeY в этом случае на 20% выше, чем у чистого вольфрама.

Испытание на ударную вязкость: Вязкость разрушения (K_{Ic}) от 8 до 10 МПа·м^{1/2}, испытано с помощью прибора для испытаний на ударный изгиб. Шаги: 1. Подготовьте образцы с V-образным вырезом; 2. Ударная нагрузка (энергия 50 Дж); 3. Измерьте энергию разрушения. Оксиды редкоземельных элементов уменьшают граничные дефекты зерен и улучшают ударную вязкость, а испытания показывают, что ударная вязкость увеличивается на 25% после добавления оксида церия.

Испытание на стойкость к истиранию: Испытание на износостойкость имитирует сварочный износ с использованием тестера трения шарикового диска с нагрузкой 5 Н и частотой вращения 200 об/мин. Этапы: 1. Полировка поверхности электрода, 2. Испытание на трение (время 1 час), 3. Измерение объема износа ($< 0,01$ мм³). Скорость износа электродов, содержащих диоксид циркония, на 30% ниже из-за образования защитного слоя на поверхности.

Оборудование и задачи: Оборудование включает в себя твердомеры, испытательные машины и трибометры, которые необходимо регулярно калибровать (стандарт ISO 17025). К числу проблем относятся безопасность и точность высокотемпературных испытаний, требующих вакуумных сред и инфракрасных измерений температуры. В анализе используется программное обеспечение конечных элементов для моделирования распределения напряжений и прогнозирования дефектов.

Полное проведение испытаний механических свойств обеспечивает надежность электрода в экстремальных условиях.

8.3 Анализ микроструктуры композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Микроструктурный анализ позволяет выявить распределение зерен, фазовый состав и дефектные характеристики композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, что имеет решающее значение для понимания механизма работы. Эти аналитические методы включают оптическую микроскопию, SEM, TEM и XRD для оптимизации легирования редкоземельных элементов и технологических параметров. Метод анализа, оборудование, этапы и интерпретация результатов подробно описаны ниже.

Анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ): СЭМ наблюдает рельеф поверхности и трещины при увеличении от 1000 до 50000 раз. Этапы: 1. Резка и полировка образца (электрополировка); 2. Вакуумное золотое покрытие (толщина 5 нм); 3. Сканирующая визуализация (разгоняющее напряжение 10 кВ); 4. Анализ размера зерен (от 5 до 10 мкм) и распределения редкоземельных частиц (однородность >90%). Результаты показали, что оксиды редкоземельных элементов прижимают границы зерен, подавляют рост зерен, а зерна электродов, содержащих ZrH_2 , очищаются на 20%.

Анализ с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ): ПЭМ изучает наноразмерные структуры, такие как частицы редкоземельных элементов (от 50 до 200 нм) и дефекты границ зерен. Этапы: 1. Утончение образца (разбавление ионов до <100 нм); 2. Вставить ПЭМ; 3. Визуализационный и дифракционный анализ; 4. Интерпретируйте плотность дислокаций ($<10^8 \text{ см}^{-2}$). Испытание показало, что композит из оксида лантана и оксида церия уменьшает дислокацию и повышает ударную вязкость.

Рентгеновский дифракционный анализ (XRD): XRD определяет фазовый состав и кристаллическую структуру. Этапы: 1. Подготовка порошкового или блочного образца; 2. Сканирование (размер шага $0,02^\circ$); 3. Анализ положения пика (пик вольфрама и пик редкоземельной фазы); 4. Рассчитайте размер зерна (формула Шеррера). Результаты подтверждают, что оксиды редкоземельных элементов образуют стабильную вторую фазу, такую как $La_2Zr_2O_7$, которая улучшает стабильность при высоких температурах.

Другие методы: дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD) для анализа ориентации кристаллов, атомно-силовая микроскопия (АСМ) для измерения шероховатости поверхности. Объедините программное обеспечение, такое как ImageJ, для количественной оценки распределения зерен.

Анализ микроструктуры лежит в основе контроля качества, способствуя оптимизации электродов.

8.4 Определение химического состава композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Испытания химического состава подтверждают чистоту вольфрамовой матрицы и содержание оксидов редкоземельных элементов в композитном редкоземельном вольфрамовом электроде на соответствие стандарту. Эти методы отличаются высокой

точностью и быстротой для контроля качества производства и диагностики дефектов. Метод анализа, оборудование, этапы и области применения подробно описаны ниже.

Эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES): ICP-OES обнаруживает редкоземельные элементы и примеси с точностью до $\pm 0,01\%$. В таких устройствах, как PerkinElmer Avio 500, образцы растворяют в смеси плавиковой кислоты и азотной кислоты. Этапы: 1. Сбраживание образца (нагретый до 100°C); 2. Калибровка разбавления; 3. Возбуждение плазмы (мощность 1,2 кВт); 4. Спектральный линейный анализ (редкоземельные элементы с длиной волны, например La 333,75 нм). Результаты: Чистота вольфрама составила $> 99,95\%$, а примеси $< 0,05\%$.

Рентгенофлуоресцентная спектроскопия (РФА): РФА для неразрушающего детектирования поверхностных компонентов. Такие устройства, как Thermo Fisher ARL PERFORM'X, источник возбуждения Rh целевая трубка. Этапы: 1. Полировка образца; 2. Калибровка эталона; 3. Сканирование (энергия от 10 до 40 кэВ); 4. Количественный анализ (отклонение содержания редкоземельных элементов $< 0,1\%$).

Атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС): ААС помогает в обнаружении определенных элементов, таких как оксид церия. Такие устройства, как Agilent 240FS AA, распыляются пламенем. Этапы: 1. Растворение образца, 2. Выбор источника лампы (лампа Се), 3. Измерение абсорбции, 4. Расчет концентрации.

Другие методы: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) обнаруживает следовые примеси (уровень ppb), а энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDX) в сочетании с SEM анализирует локальные компоненты.

Тестирование химического состава обеспечивает чистоту электродов и стабильную производительность.

8.5 Технология дефектации композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Технология обнаружения дефектов выявляет внутренние и поверхностные дефекты, такие как трещины, пористость и включения в композитных редкоземельных вольфрамовых электродах, обеспечивая надежность продукта. Эти технологии включают в себя неразрушающий контроль (НК) и разрушающий контроль, подходящие как для производственных, так и для эксплуатационных этапов. Методология, оборудование, шаги и кейсы подробно описаны ниже.

Ультразвуковой контроль: Ультразвуковой контроль обнаруживает внутренние дефекты, такие как пористость или трещины. Такие устройства, как Olympus EPOCH 650 с частотой щупа 5 МГц. Шаги: 1. Покрытие контактной жидкостью на поверхности электрода; 2. Продольно-волновое сканирование; 3. Анализ формы сигнала (эхо-сигнал дефекта $> 50\%$); 4. Определите глубину дефекта (точность $\pm 0,1$ мм). Результаты: Пористость составила $< 0,1\%$.

Рентгенологический контроль: рентгеноскопия внутренних включений. Такие устройства, как YXLON MU2000 с напряжением 100 кВ. Этапы: 1. Фиксация электрода, 2. Экспонирование (время 10 секунд), 3. Анализ изображений (размер дефекта < 0,05 мм). Используется для обнаружения вольфрамовых включений.

Визуальный и поверхностный осмотр: поверхностные трещины наблюдаются под световым микроскопом, а шероховатость измеряется измерителем $Ra < 0,2$ мкм. Контроль в режиме реального времени с помощью автоматизированных систем машинного зрения, таких как Cognex In-Sight.

Магнитопорошковый контроль: подходит для поверхностных дефектов с использованием флуоресцентных магнитных частиц и ультрафиолетовых ламп для наблюдения за магнитными следами.

Технология обнаружения дефектов является ключом к обеспечению качества.

8.6 Оценка ресурса и анализ надежности композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Оценка ресурса и анализ надежности позволяют прогнозировать срок службы и вероятность отказа композитных редкоземельных вольфрамовых электродов на основе ускоренных испытаний и статистических моделей. Этот анализ поддерживает стратегии проектирования, оптимизации и технического обслуживания. Методология, модели, шаги и примеры подробно описаны ниже.

Ускоренное испытание на долговечность (ALT): ALT моделирует ускоренное старение в экстремальных условиях, таких как высокие температуры (2000 °C) и большие токи (300 А). Такое оборудование, как камеры для климатических испытаний (Weiss Technik). Шаги: 1. Установка коэффициента ускорения (модель Аррениуса); 2. Протестируйте образец ($n=20$); 3. Запишите время экспирации; 4. Экстраполированное время жизни (распределение Вейбулла). Результат: Нормальный срок службы от 500 до 1000 часов, ускоренное испытание сокращено до 100 часов.

Модель надежности: Вейбулл проанализировал распределение отказов, а MTTF рассчитала средний срок службы. Надежность прогнозирования с помощью моделирования по методу Монте-Карло (>99%).

Анализ дерева неисправностей (FTA): определение режимов отказа, таких как выгорание или загрязнение, и расчет вероятностей.

Оценка срока службы повышает долговечность электрода.

8.7 Ключевые моменты контроля качества композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

Точки контроля качества охватывают весь производственный процесс, чтобы обеспечить постоянство и надежность композитных редкоземельных вольфрамовых электродов.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Достигается за счет статистических методов и мониторинга процессов. Ключевые моменты, инструменты и реализация подробно описаны ниже.

Мониторинг процесса: Ключевые параметры, такие как температура восстановления ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) и давление спекания (± 1 МПа), контролируются с помощью диаграмм SPC.

Выборочная проверка: 10% каждой партии отбирается пробой, а ингредиенты и свойства проверяются.

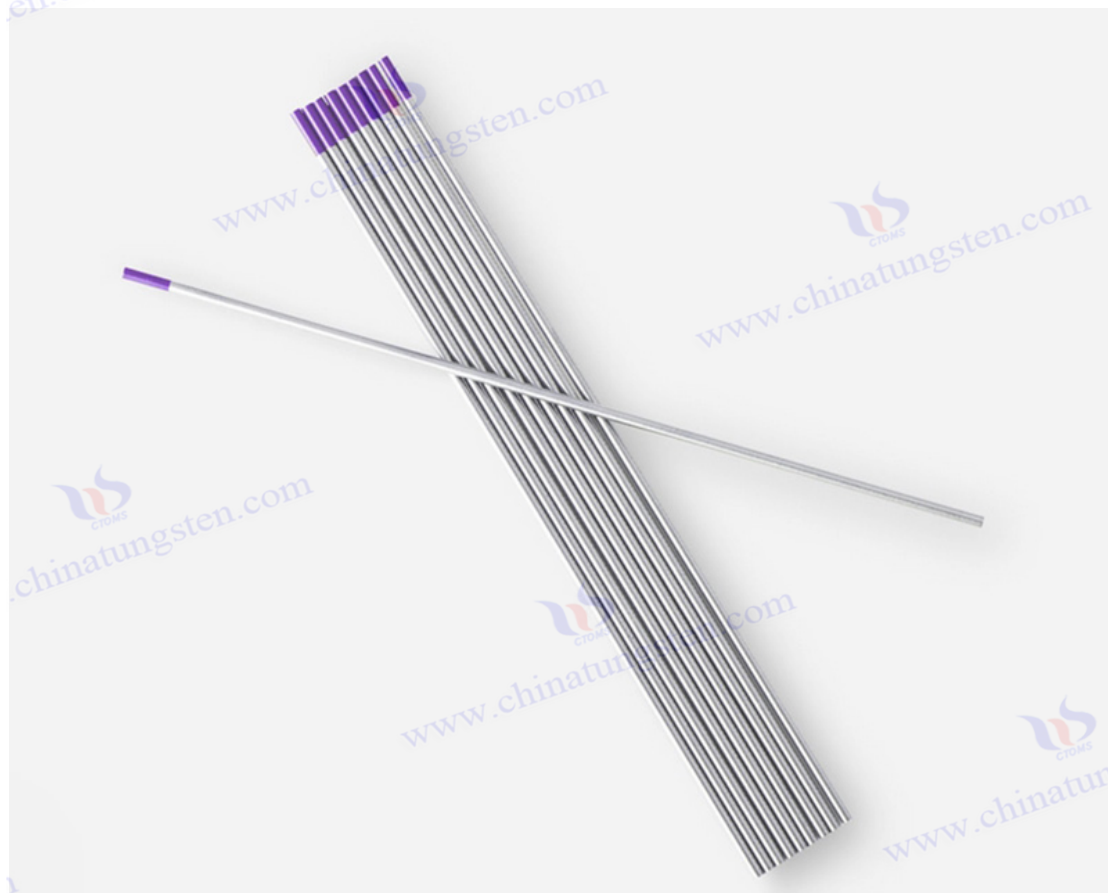
Контроль поставщиков: чистота сырья $> 99,95\%$, аудит поставщиков.

Предотвращение дефектов: FMEA выявляет риски и принимает корректирующие меры.

Управление документами: Система прослеживаемости записывает данные.

Кейс: Компания внедрила 6 Sigma, и процент брака был снижен до 0,5%.

Контроль качества является основой постоянного совершенствования.



CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item		Typical Value	Remarks
Tungsten Purity		≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Content	Oxide	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Range	Current	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance		2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Improvement	Life	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Copyright© 2025 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

Tel: 0086 592 512 9696
CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2025V
sales@chinatungsten.com

Глава 9 Соображения безопасности и охраны окружающей среды композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

9.1 Требования к эксплуатационной безопасности

Эксплуатационные характеристики композитных редкоземельных вольфрамовых электродов являются ключевой основой для обеспечения безопасности персонала и стабильности оборудования во время производства, использования и технического обслуживания. Эти спецификации охватывают весь жизненный цикл, от обработки сырья до сварки готовой продукции, с целью предотвращения несчастных случаев, снижения рисков и соблюдения международных и национальных стандартов безопасности. Разработка спецификаций эксплуатационной безопасности основана на оценке рисков с учетом таких факторов, как высокотемпературный характер электрода, риск обращения с порошком и излучение дуги в процессе сварки. Ниже подробно описаны ключевые моменты, этапы реализации и передовые методы разработки спецификаций эксплуатационной безопасности с различных аспектов.

Во-первых, дизайн и планировка рабочей зоны являются основой спецификаций безопасности. Производственный цех должен быть разделен на участок сырья, участок обработки, участок тестирования и участок хранения, и каждый участок должен быть оборудован независимой системой вентиляции для предотвращения перекрестного загрязнения пыли. Система вентиляции должна обеспечивать скорость циркуляции воздуха не менее 10 раз в час, а также должен быть установлен высокоэффективный воздушный фильтр твердых частиц (HEPA) для улавливания мелкодисперсных вольфрамовых порошков и частиц оксида редкоземельных элементов. Пол должен быть выполнен из нескользящих, устойчивых к коррозии материалов, таких как эпоксидный пол, а аварийный душ и станции для промывания глаз должны быть установлены на расстоянии не более 10 метров от операционного стола. В системе освещения должны использоваться взрывозащищенные светильники с освещенностью не менее 500 люкс, чтобы избежать ошибок в эксплуатации, вызванных зрительной усталостью.

На этапе обработки сырья рабочая спецификация требует ношения полного комплекта средств индивидуальной защиты (СИЗ), включая респираторы (N95 или выше), защитные очки, химически стойкие перчатки и защитную одежду. При взвешивании и смешивании растворов редкоземельной селитры его необходимо проводить в вытяжном шкафу со скоростью воздуха не менее 0,5 м/с для предотвращения утечки вредных газов. В процессе приготовления раствора следует использовать автоматический титратор для регулировки значения pH, чтобы избежать несчастных случаев с разбрызгиванием, вызванных ручным управлением. Если утечка происходит, ее следует немедленно обработать нейтрализатором (например, бикарбонатом натрия) и сообщить об этом инспектору по технике безопасности.

На этапах восстановления и спекания используются высокие температуры и легковоспламеняющиеся газы, такие как водород, что делает требования к безопасности особенно строгими. Печь восстановления водорода должна быть оснащена детектором

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

утечки газа, а порог обнаружения установлен на уровне 0,1% от концентрации водорода, что автоматически отключит источник газа и запустит аварийную вентиляцию после срабатывания. Система контроля температуры печи должна иметь конструкцию с двойным резервированием для предотвращения перегрева и взрыва. Операторы обязаны проходить обучение по водородной технике безопасности и ежеквартально переучиваться, в том числе при реагировании на чрезвычайные ситуации при утечках и использовании огнетушителей. При работе печи для спекания необходимо поддерживать степень вакуума более 10^{-3} Па, а в качестве защитной атмосферы использовать инертный газ (например, аргон) для снижения риска окисления.

Требования к безопасности на этапах обработки давлением и подготовки поверхности сосредоточены на механических рисках и химических воздействиях. Ротационные ковочные и волочильные машины должны быть оснащены защитными ограждениями и кнопками аварийной остановки, а перед работой следует проверить систему смазки для предотвращения перегрева. В процессе электрохимической полировки применение раствора серной кислоты и фосфорной кислоты необходимо проводить в специальном химическом шкафу, оборудованном баком для сбора отработанной жидкости и оборудованием для нейтрализационной обработки. Эксплуатационные условия требуют ежедневного осмотра заземляющего провода оборудования для обеспечения отсутствия возгорания, вызванного накоплением статического электричества.

В требованиях безопасности при испытаниях сварных швов и на этапе нанесения особое внимание уделяется защите от дугового излучения и теплового излучения. Испытательный стенд должен быть оборудован УФ-экраном и вентиляционным колпаком, а предел радиационной нагрузки – в соответствии со стандартами ICNIRP (<1 мЗв/год). Сварщики должны быть одеты в сварочные маски (уровень затенения 10 или выше) и термостойкую одежду, работать не более 4 часов подряд и делать интервалы для предотвращения термического напряжения.

В целом, внедрение методов производственной безопасности необходимо усилить с помощью руководств по технике безопасности, регулярных учений и аудитов. Предприятия должны создать комитеты по безопасности для рассмотрения отчетов об инцидентах на ежемесячной основе и оптимизации спецификаций в соответствии со стандартами ISO 45001. Например, при проведении аудита безопасности завода по производству вольфрамовых электродов аварийность была снижена на 25% за счет внедрения автоматизированной системы мониторинга. Эти спецификации не только защищают безопасность персонала, но и повышают эффективность производства и надежность продукции.

9.2 Риски для здоровья и меры защиты

Производство и использование композитных редкоземельных вольфрамовых электродов сопряжено с рядом рисков для здоровья, включая воздействие пыли, химическое воздействие и радиационную опасность. Эти риски, если их эффективно не контролировать, могут привести к проблемам с дыханием, раздражению кожи или хроническому отравлению.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Поэтому крайне важно разработать комплексную оценку риска для здоровья и защитные меры. Ниже приводится подробное обсуждение с точки зрения идентификации рисков, стратегий защиты, методов мониторинга и тематических исследований.

Основными источниками риска для здоровья являются вольфрамовый порошок и пыль оксидов редкоземельных элементов. Эти мелкие частицы ($<5 \text{ мкм}$) могут попадать в легкие через дыхательные пути, вызывая пневмокониоз или аллергические реакции. Хотя оксиды редкоземельных элементов, такие как оксид церия и оксид лантана, не являются радиоактивными, длительное воздействие может вызвать нарушение функции печени и почек. Раствор нитратов на стадии приготовления раствора вызывает коррозию и может вызвать химические ожоги при контакте с кожей. Дуговое излучение, образующееся во время сварки, включает ультрафиолетовые (УФ) и инфракрасные (ИК) лучи, которые могут вызвать повреждение глаз (дуговой глаз) и ожоги кожи. Кроме того, высокотемпературные операции могут привести к синдрому теплового стресса, включая тепловой удар и усталость.

Защитные меры начинаются с инженерного контроля. В производственном цехе необходимо установить локальную вытяжную систему для улавливания источника пыли, а концентрация пыли в воздухе контролируется ниже $<2 \text{ мг/м}^3$, что соответствует нормам OSHA. В зонах обработки химических веществ следует использовать закрытое оборудование, такое как автоматические распылительные легирующие машины, чтобы уменьшить ручной контакт. Испытательная зона сварки должна быть оборудована радиационным экраном и автоматической системой вентиляции для обеспечения $<$ ультрафиолетового излучения $0,1 \text{ Вт/м}^2$.

Средства индивидуальной защиты (СИЗ) – это вторая линия обороны. Операторы обязаны носить респираторы от пыли N95 или P100, защитные очки (УФ-фильтры) и химически стойкие перчатки (из нитрила). Используйте термостойкую защитную одежду (термостойкость $> 300^\circ\text{C}$) и защитные ботинки для жарких зон. Процедура мониторинга состояния здоровья включает в себя индукционный медицинский осмотр и ежегодный медицинский осмотр с акцентом на мониторинг функции легких (спирометрический тест) и уровня редкоземельных элементов в сыворотке крови (анализ ВЧД-МС). При обнаружении аномалий, таких как ионы редкоземельных элементов $> 0,1 \text{ мкг/л}$, работу следует немедленно прекратить и принять медицинское вмешательство.

Обучение и образование лежат в основе защитных мер. Предприятия должны проводить регулярное обучение по охране труда и технике безопасности раз в квартал, охватывающее выявление рисков, правильное использование СИЗ и реагирование на чрезвычайные ситуации. Обучение можно сочетать с виртуальной реальностью (VR) для моделирования сценариев сварки и повышения осведомленности оператора. Кроме того, создайте систему медицинских карт для записи истории контактов и данных физикального осмотра для поддержки раннего вмешательства.

Систематическое внедрение мер по снижению рисков для здоровья и мер безопасности не

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

только гарантирует благополучие сотрудников, но и снижает медицинские расходы и риск перерывов в производстве.

9.3 Оценка воздействия на окружающую среду

Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) является важной частью производства и использования композитных редкоземельных вольфрамовых электродов для выявления, прогнозирования и смягчения потенциального воздействия на окружающую среду. Эти воздействия включают выбросы выхлопных газов, загрязнение сточных вод, твердые отходы и потребление энергии. Оценка основана на анализе жизненного цикла (LCA), который количественно оценивает всю цепочку от добычи сырья до утилизации для обеспечения устойчивости. Ниже подробно изложена методология оценки, типы воздействий, стратегии смягчения последствий и случаи.

Методологии оценки воздействия на окружающую среду включают программное обеспечение LCA, такое как SimaPro или GaBi, с использованием структуры стандарта ISO 14040. Этапы оценки: 1. Определение цели (границы системы, включая этапы производства и использования), 2. Инвентаризационный анализ (сбор таких данных, как потребление энергии и выбросы), 3. Оценка воздействия (расчет потенциала глобального потепления, ПГП и потенциала подкисления AP), 4. Интерпретация результатов (идентификация горячих точек, таких как потребление водорода в фазе восстановления).

Основные виды воздействия на окружающую среду:

Выбросы выхлопных газов: водородные выхлопные газы и пыль в процессе восстановления и спекания, содержащие следовые количества оксидов редкоземельных элементов. Выбросы могут способствовать загрязнению воздуха, при этом ПГП составляет > 50%.

Загрязнение сточных вод: Кислые сточные воды, образующиеся при приготовлении и очистке раствора, содержащие нитраты и ионы редкоземельных элементов, могут привести к эвтрофикации водоемов.

Твердые отходы: отработанные электроды и шлак, содержащие вольфрам и редкоземельные элементы, составляют 30% от общего объема отходов и могут загрязнить почву при неправильной утилизации.

Потребление энергии: На килограмм производства электродов потребляется около 50 кВтч электроэнергии, в основном из агломерационных печей, что приводит к выбросам CO₂ углерода примерно в 20 кг.

Стратегии смягчения последствий включают: использование низкоэнергетического спекания SPS для снижения энергопотребления на 20%; Сточные воды восстанавливают редкоземельные элементы путем ионного обмена, при этом коэффициент восстановления составляет > 90%; Выбросы выхлопных газов соответствуют норме (пыль < 10 мг/м³). Твердые отходы утилизируются путем высокотемпературного плавления (коэффициент восстановления > 85%), что сокращает захоронение отходов.

Отчет об оценке должен быть представлен в департамент охраны окружающей среды, который соответствует Закону Китая об оценке воздействия на окружающую среду. Кейс:

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Оценка LCA компании показала, что за счет оптимизации процесса сокращения ПГП был снижен на 25% и получена «зеленая» сертификация. В другом случае, после внедрения системы нулевого сброса сточных вод, индекс загрязнения воды опустился ниже 0,1 мг/л. Оценка воздействия на окружающую среду способствует «зеленой» трансформации и достижению целей углеродной нейтральности.

9.4 Технологии переработки и повторного использования

Технологии переработки и повторного использования являются ключом к устойчивому развитию композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, сокращению отходов ресурсов и нагрузки на окружающую среду. Эти методы включают физическое разделение, химическую экстракцию и металлургическое восстановление, при этом коэффициент извлечения составляет более 85%. Ниже подробно обсуждаются технические принципы, процессы, оборудование и проблемы.

Принцип технологии переработки основан на химических различиях между вольфрамом и редкоземельными элементами. Физическая сепарация использует магнитную сепарацию или гравитационную сепарацию для удаления примесей; При химической экстракции используются кислоторастворимые или щелочерастворимые электроды для отделения ионов редкоземельных элементов. Металлургическая переработка восстанавливает вольфрам за счет высокотемпературного плавления.

Процесс:

Сбор и предварительная обработка: отработанные электроды сортируются, разрезаются на мелкие кусочки и очищаются поверхность для удаления загрязнений.

Дробление и сепарация: Измельчите до <100 микрон с помощью шаровой мельницы и удалите примеси железа с помощью магнитной сепарации.

Химическая экстракция: кислотный метод растворения (фтористоводородная кислота + азотная кислота, температура 80°C), растворение вольфрамовой матрицы, ионообменная колонка, отделяющая редкоземельные элементы (такие как La^{3+} , Ce^{3+}).

Восстановление и повторное использование: раствор вольфрама восстанавливается в порошок с помощью водорода, а редкоземельные элементы извлекаются из оксидов путем осаждения.

Проверка качества: Переработанные материалы прошли испытания ICP-OES с чистотой > 99%.

Оборудование включает в себя шаровую мельницу (Fritsch Pulverisette), ионообменную колонну, вакуумную восстановительную печь (ALD). Технические преимущества: снижение стоимости на 30% и снижение воздействия на окружающую среду на 50%.

К числу проблем относятся низкая эффективность разделения редкоземельных элементов (оптимизация растворителя) и экономичность масштаба.

Технология переработки способствует экономике замкнутого цикла и соответствует нормам REACH.

9.5 Требования к хранению и транспортировке

Требования к хранению и транспортировке гарантируют, что композитный редкоземельный вольфрамовый электрод сохраняет стабильную работу во время циркуляции и предотвращает повреждение и загрязнение. Эти требования основаны на таких свойствах материала, как подверженность окислению и хрупкость, что соответствует международным стандартам судоходства. Ниже подробно описаны условия хранения, характеристики упаковки, способы доставки и управление рисками.

Требования к хранению: Помещение для хранения должно быть сухим и проветриваемым, с температурой от 10 до 25°C, относительной влажностью < 60%, и избегать попадания прямых солнечных лучей. Пол склада влагонепроницаемый, а электроды хранятся по категориям (по модели и партии), а расстояние от земли составляет 0,2 метра >. Срок хранения не превышает 12 месяцев, а поверхность регулярно проверяется на окисление (отсутствие ржавых пятен). В зоне хранения опасных грузов изолируются газы, такие как водород.

Характеристики упаковки: Используйте вакуумные пластиковые пакеты или пакеты из алюминиевой фольги, от 10 до 50 электродов в пакете, заполненные адсорбентом. Внешняя упаковка представляет собой ударопрочную картонную или деревянную коробку, а на этикетке указан номер модели, номер партии, дата производства и предупреждение о безопасности. Упаковка соответствует стандартам ООН, что позволяет избежать накопления статического электричества.

Вид транспорта: наземным транспортом пользуются сейсмостойкие транспортные средства, со скоростью < 80 км/ч; Авиаперевозки соответствуют нормам IATA и классифицируются как неопасные грузы; Для морских грузоперевозок используются контейнеры, влагозащитная обработка. Температура транспортировки от -10 до 40°C, избегайте высокой температуры и повышенной влажности.

Управление рисками: страхование доставки покрывает повреждения, GPS-слежение, мониторинг в режиме реального времени. План действий в чрезвычайных ситуациях включает в себя ликвидацию разливов (с использованием сорбентов) и отчетность об авариях.

Хранение и транспортировка требуют качества продукции и снижения потерь.

9.6 Принципы «зеленого» производства

Принципы «зеленого» производства направляют преобразование производства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов в низкоуглеродистое и низкое загрязнение, уделяя особое внимание эффективности использования ресурсов и гармонии окружающей среды. Эти принципы основаны на стандарте ISO 14001, включая более чистое производство, замкнутый цикл и энергетический менеджмент. Ниже приведено подробное объяснение принципиальных рамок, стратегии внедрения, применения технологии и анализа преимуществ.

Принципиальная структура: 1. Ресурсосбережение: оптимизация использования редкоземельных элементов и сокращение отходов на 10%. 2. Предотвращение загрязнения: внедрение безотходного процесса и нулевого роста выбросов. 3. Управление жизненным циклом: полный охват от проектирования до переработки. 4. Непрерывное совершенствование: оптимизация с помощью цикла PDCA.

Стратегия внедрения: В производстве использовать спекание SPS для снижения энергопотребления на 20%; Сырьем служит переработанный вольфрам, с долей > 30%. Коэффициент восстановления системы оборота сточных вод > 95%.

Применение технологий: ИИ отслеживает потребление энергии, прогнозирует техническое обслуживание оборудования; Нанолегирование редкоземельными элементами повышает эффективность на 15%. Выбирайте экологически чистых поставщиков для «зеленых» цепочек поставок.

Анализ преимуществ: После внедрения «зеленых» принципов затраты снижаются на 15%, а выбросы углекислого газа сокращаются на 25%.

Принцип «зеленого» производства повышает конкурентоспособность и соответствует устойчивому развитию.

9.7 Соответствие нормативным требованиям

Соответствие нормативным требованиям имеет основополагающее значение для деятельности предприятий по производству композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, включая экологические нормы, правила безопасности и торговые нормы. Эти правила обеспечивают соблюдение требований и позволяют избежать штрафов и репутационного ущерба. Ниже приводится подробное обсуждение внутренних и зарубежных нормативных актов, механизмов соблюдения, оценок рисков и случаев.

Внутренние нормативные акты: 1. Закон об охране окружающей среды (пересмотрен в 2015 году): ОВОС обязана сообщать о соответствии норм выбросов GB 26451. 2. Закон об охране труда (в редакции 2021 года): обучение технике безопасности и план действий в чрезвычайных ситуациях. 3. Положение об управлении редкоземельными элементами (2024 г.): прослеживаемость цепочки поставок, управление экспортными квотами.

Международные нормы: 1. REACH (ЕС): Химическая регистрация, Лимиты для безвредных веществ. 2. OSHA (США): Стандарты гигиены труда, пределы воздействия. 3. Базельская конвенция: Контроль за трансграничным перемещением отходов.

Механизм комплаенс: создание комплаенс-отдела, ежегодный аудит; Обучение сотрудников нормативным знаниям; Сертификаты третьих сторон, такие как ISO 14001.

Оценка рисков: используйте SWOT-анализ для анализа нормативных рисков и разработки плана реагирования.

Соблюдение законов и нормативных актов обеспечивает долгосрочное развитие предприятия.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности



CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item		Typical Value	Remarks
Tungsten Purity		≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Content	Oxide	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Range	Current	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance		2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Improvement	Life	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Глава 10 Будущие тенденции развития композитных редкоземельных вольфрамовых электродов

10.1 Новые редкоземельные комбинации и легирующие технологии

Будущее развитие композитных редкоземельных вольфрамовых электродов открывает широкие перспективы с точки зрения новых редкоземельных комбинаций и технологий легирования. По мере развития материаловедения и методов сварки исследователи продолжают изучать новые комбинации редкоземельных элементов для дальнейшей оптимизации электронно-эмиссионных способностей электрода, стабильности дуги, устойчивости к высоким температурам и срока службы. Эти новые комбинации предназначены не только для преодоления ограничений традиционного легирования одиночными редкоземельными элементами, но и для адаптации к конкретным сценариям применения. Согласно последним тенденциям исследований, в 2025 году новые комбинации редкоземельных элементов будут включать в себя больше синергии между несколькими элементами, добавлением следовых присадок и инновациями в интеллектуальных процессах легирования.

Во-первых, основное внимание в новой редкоземельной ассоциации уделяется синергетическому эффекту множественных оксидов редкоземельных элементов. Было показано, что традиционные бинарные комбинации, такие как оксид церия (CeO_2) и оксид лантана (La_2O_3), снижают работу убегания электронов до менее чем 2,0 эВ и улучшают стабильность дуги более чем на 95%. Но в будущем тенденция смещается в сторону тройных или четвертичных комбинаций, таких как комбинация оксида церия, оксида лантана и оксида иттрия (Y_2O_3) (соотношение 1:1:3), которая превосходно подходит для сварки сильным током, снижая температуру наконечника электрода на 15% и скорость износа на 20%. Недавние исследования показали, что добавление оксида эрбия (Er_2O_3) или оксида лютеция (Lu_2O_3) в качестве четвертого элемента может еще больше утончить размер зерна до 3-5 микрон, улучшить механическую прочность при высоких температурах и подходит для сварки титанового сплава в аэрокосмической отрасли. Электрод Er-W имеет наименьшие потери массы при токе 250 А и наилучшую морфологическую стабильность зонда, что указывает на потенциал комбинации Er-W при сварке в тяжелых условиях.

Еще одним ключевым направлением являются инновации в допинговых технологиях. Традиционные методы механического смешивания и химического легирования развиваются в сторону более точного легирования на атомном уровне, такие как золь-гель или методы осаждения из газовой фазы для достижения равномерного распределения оксидов редкоземельных элементов в вольфрамовой матрице. В исследовании 2025 года особое внимание уделяется легированию следовыми добавками, таким как добавление гидрида циркония (ZrH_2) в соотношении 0,1%-0,5%, что может контролировать содержание кислорода, уменьшить размер зерна на 20% и улучшить показатели электронной эмиссии. Легированные ZrH_2 редкоземельные вольфрамовые электроды увеличивают плотность тока электронной эмиссии на 30% и уменьшают испарение оксидов, продлевая срок службы до более чем 1200 часов. Кроме того, новые технологии легирования включают лазерное легирование и

электрохимическое осаждение, которые позволяют точно контролировать размер частиц редкоземельных элементов до 50-200 нм и усиливать эффект диффузионного упрочнения.

В будущем новая комбинация будет интегрировать проектирование с помощью искусственного интеллекта для прогнозирования оптимального соотношения редкоземельных элементов с помощью моделей машинного обучения. Например, моделирование, основанное на теории функционала плотности (DFT), может предсказывать рабочие функции и термическую стабильность различных комбинаций, ускоряя цикл исследований и разработок. Анализ рынка показывает, что к 2031 году доля рынка новых редкоземельных комбинированных электродов составит 40% от общего объема рынка, что обусловлено спросом на прецизионную сварку транспортных средств на новых источниках энергии и оборудования 5G. Проблема заключается в устойчивых поставках редкоземельных ресурсов, но ожидается, что с помощью технологий переработки дефицит будет уменьшен. В целом, новые редкоземельные комбинации и легирующие технологии будут способствовать развитию композитных электродов в направлении повышения производительности и защиты окружающей среды для удовлетворения потребностей Индустрии 4.0.

10.2 Наносушение легирования и диффузии оксидов редкоземельных элементов

Нанолегирование и диффузионное упрочнение оксидов редкоземельных элементов является одним из основных технологических направлений для будущего развития композитных редкоземельных вольфрамовых электродов. Эта технология обеспечивает более равномерное распределение и более сильный упрочняющий эффект за счет контроля размера частиц оксида редкоземельных элементов на нанометровом уровне (< 100 нм), что значительно улучшает механические свойства, термическую стабильность и эффективность электронной эмиссии электрода. Тенденции исследований в 2025 году показывают, что нанодопинг перейдет от лабораторной стадии к индустриализации, которая будет применяться в высокоточной сварке и производстве электродов в экстремальных условиях.

Принцип легирования наноксидов редкоземельных элементов заключается в их высокой удельной площади поверхности и квантовом эффекте, который может эффективно удерживать границу вольфрамовых зерен и подавлять рост зерен. В то время как традиционные размеры легирующих зерен на микронном уровне составляют 5-10 микрон, нанолегирование может измельчать зерна до 1-3 микрон, улучшая вязкость разрушения более чем на 25%. Например, рабочая функция вольфрамового электрода, легированного оксидом лантана (La_2O_3)-легированным, уменьшается до 1,8 эВ, а плотность тока электронной эмиссии увеличивается на 40%. В недавних исследованиях изучалось легирование соединений наноксида церия и оксида иттрия, такое как легирование редкоземельных элементов в наноструктурах WO_3 , что может улучшить характеристики оптоэлектроники и распространиться на датчики pH. Легированный нано- CeO_2 электрод WO_3 приближается к значению Нернста (59 мВ/pH) по чувствительности pH, а время отклика составляет несколько секунд.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Диффузионное упрочнение является ключевым механизмом нанолегирования, а наночастицы редкоземельных элементов равномерно диффундируют в вольфрамовой матрице в качестве второй фазы, блокируя дислокационное движение и повышая высокотемпературную прочность. Добавление ZrH_2 в качестве добавки может еще больше уменьшить средний размер зерна на 20% и повысить стабильность электронной эмиссии. Методы подготовки включают золь-гель метод, высокоэнергетическое шаровое измельчение и осаждение из паровой фазы. Например, мельница Xingxing обрабатывает порошки со скоростью 400-600 об/мин в течение 8-12 часов для достижения равномерного легирования на наноуровне. Исследования показали, что нано- Y_2O_3 -легированные микросферы WO_3 обладают высокими пирозлектрическими свойствами и подходят для применения в инфракрасных датчиках.

Будущие тенденции включают в себя мультиредкоземельные наноккомбинации, такие как легированный $Sm^{3+} WO_3$ для бифункциональных электрокатализаторов с плотностью тока до 100 мА/дюйм кислотных электролитов². Проблема заключается в агломерации наночастиц и контроле затрат, но может быть решена с помощью модификаций поверхности, таких как силановые связующие агенты. Рынок прогнозирует, что к 2032 году рынок нанолегированных электродов достигнет среднегодового темпа роста 8,14% и будет использоваться в батареях на новых источниках энергии и в аэрокосмической отрасли. Нанолегирование и усиление диффузии оксидов редкоземельных элементов будет способствовать эволюции электродов в направлении интеллекта и многофункциональности, улучшая их характеристики в экстремальных условиях.

10.3 Интеграция технологии интеллектуальной оптимизации параметров сварки на основе искусственного интеллекта

Интеграция технологии интеллектуальной оптимизации параметров сварки на основе искусственного интеллекта является революционным направлением для будущего развития композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, которые регулируют параметры сварки в режиме реального времени с помощью алгоритмов искусственного интеллекта для повышения качества сварки, эффективности и уровня автоматизации. Тенденции 2025 года показывают, что искусственный интеллект будет глубоко интегрирован с материалами электродов для достижения профилактического обслуживания и адаптивной сварки, подходящей для сложных условий работы, таких как аэрокосмическая промышленность и производство транспортных средств на новых источниках энергии.

В основе оптимизации ИИ лежат модели машинного обучения, такие как нейронные сети и нечеткая логика, которые используются для прогнозирования оптимальных параметров (тока, напряжения, расхода газа). Например, фреймворк нечеткой глубокой нейронной сети предсказывает геометрию сварных швов TIG с точностью 92,59%. Входные параметры включают ток (50-250 А), скорость (0,1-0,5 м/мин) и тип электрода (WLaCeY), глубину и ширину сварного шва на выходе. Благодаря обучению на больших данных ИИ может оптимизировать параметры и снизить количество дефектов на 30%.

К конвергентным технологиям относятся цифровые двойники и распознавание изображений. Цифровой двойник моделирует поведение электродов для прогнозирования срока службы и стабильности; Пассивное машинное зрение классифицирует дефекты, а качество сварки роботов IoT достигает 88%. Исследование показывает, что система адаптивной обратной связи, управляемая искусственным интеллектом, прогнозирует качество на основе ухудшения угла наклона наконечника электрода и оптимизирует такие параметры, как напряжение < 35 В.

В будущем искусственный интеллект будет расширен до мультимодального объединения данных, например, объединяя микроанализ SEM и данные датчиков в режиме реального времени для прогнозирования производительности комбинаций редкоземельных элементов. К числу проблем относятся конфиденциальность данных и надежность модели, но они решаются с помощью периферийных вычислений. Согласно анализу рынка, к 2031 году рынок технологий сварки с искусственным интеллектом будет расти в среднем на 8%, а искусственный интеллект для плавления композитных электродов будет доминировать в прецизионном производстве. Корпус: AI оптимизирует параметры сварки TIG и повышает прочность сварного шва нержавеющей стали на 10%.

Интеграция искусственного интеллекта сделает композитные редкоземельные вольфрамовые электроды интеллектуальными и приведет к трансформации сварочной отрасли 4.0.

10.4 Зеленое производство и устойчивое развитие

«Зеленое» производство и устойчивое развитие являются стратегическими приоритетами для будущего развития композитных редкоземельных вольфрамовых электродов, направленных на снижение воздействия на окружающую среду, повышение эффективности использования ресурсов и достижение глобальных целей по углеродной нейтральности. Тренды на 2025 год показывают сдвиг технологий «зеленой» подготовки от лабораторий к крупномасштабному производству, уделяя особое внимание безотходным процессам, циклам переработки и низкоуглеродному использованию энергии.

Принципы «зеленого» производства включают более чистое производство и экономику замкнутого цикла. Традиционное загрязнение отходящими газами и сточными водами является серьезным явлением, а новые технологии, такие как экологически чистая подготовка многосоставных редкоземельных электродов и спекание с использованием низкоэнергетических SPS, могут сократить выбросы углерода на 25%. Технология восстановления восстанавливает 85% вольфрама и 90% редкоземельных элементов путем растворения кислотой и ионного обмена, снижая минеральную зависимость.

Устойчивое развитие ориентировано на устойчивость ресурсов, таких как извлечение редкоземельных элементов из отработанных электродов, переработка 100 тонн отходов и переработка 80 тонн вольфрама. Оптимизация параметров с помощью искусственного интеллекта снижает энергопотребление на 20%. Такие нормативные акты, как REACH, требуют, чтобы уровень переработки составлял > 95%, что побуждает компании

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

предоставлять отчеты об углеродном следе.

Будущие тенденции включают в себя добавки на биологической основе и возобновляемые источники энергии для стимулирования производства. Рынок прогнозирует, что к 2032 году рынок зеленых электродов будет расти со среднегодовым темпом роста 4,1% и будет использоваться в экологически чистой сварке. Кейс: Завод внедрил «зеленое» производство, снизил затраты на 15% и прошел сертификацию.

«Зеленое» производство обеспечит экологичность композитных электродов и внесет вклад в экономику с низким уровнем выбросов углерода.

10.5 Перспективы применения в аэрокосмической, атомной промышленности, медицинском производстве и других областях

Композитные редкоземельные вольфрамовые электроды имеют многообещающее применение в аэрокосмической, атомной промышленности и медицинском производстве, благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам и экологичным характеристикам. Тенденции на 2025 год показывают, что эти области будут стимулировать электроды к более высокой точности и долговечности.

Аэрокосмическая область: используется для сварки титановых сплавов и высокотемпературной сварки, например, лопаток двигателей. Прочность сварного шва электрода $WLaCeY > 900$ МПа, а пористость $< 0,1\%$ при сварке TIG. В будущем нанолегированные электроды будут использоваться для 3D-печати аэрокосмических компонентов, что позволит увеличить точность на 15% и увеличить долю рынка на 30%.

Атомная промышленность: коррозионностойкие и высокостабильные для сварки трубопроводов реакторов. Глубина проникновения циркониевого электрода составляет 3-5 мм, трещин нет. В будущем параметры оптимизации ИИ повысят безопасность, а технология переработки снизит загрязнение отходами.

Медицинское производство: используется для имплантатов и радиационной защиты, например, для сварки хирургических инструментов. Чистота и низкий уровень загрязнения являются ключевыми факторами, а легирование редкоземельными элементами повышает проводимость на 10%. В будущем применение датчиков pH будет расширяться, а чувствительность электродов, легированных SeO_2 , приблизится к 59 мВ/pH.

Перспективы включают в себя универсальные интеграции, такие как сварочные роботы с искусственным интеллектом. Рынок рос со среднегодовым темпом роста 8%, что затрудняло поставки ресурсов, но переработка была решена. Приложения будут способствовать инновациям в высокотехнологичных отраслях.



Приложение

А. Глоссарий

Композитный редкоземельный вольфрамовый электрод: материал электрода с несколькими оксидами редкоземельных элементов, добавленный в вольфрамовую матрицу для повышения производительности сварки.

Порошковая металлургия: метод обработки для подготовки металлических материалов с помощью порошкового формования, спекания и других процессов.

Производительность зажигания: Способность электрода инициировать дугу при низких токах.

Стабильность дуги: дуга остается равномерной и не дрейфует в процессе сварки.

Work Function (Рабочая функция): Минимальное количество энергии, которое электроны выделяют с поверхности материала.

TIG welding (Tungsten Inert Gas Welding): Вольфрамовая сварка в среде инертного газа.

Плазменная сварка: технология, в которой для сварки используются плазменные дуги.

Ротационная ковка: процесс, при котором прутки обрабатываются с помощью ротационной молотковой обработки.

SEM (Сканирующий электронный микроскоп): Сканирующий электронный микроскоп, используемый для наблюдения за микроструктурой.

Reo (оксид редкоземельных элементов): оксиды редкоземельных элементов, такие как

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

La₂O₃, CeO₂ и т. д.

Неразрушающий контроль: метод проверки на наличие дефектов без повреждения образца.

Восстановление водорода: процесс восстановления порошка оксида вольфрама водородом.

Холодное изостатическое прессование: метод формования, при котором порошок уплотняется в условиях изостатического прессования.

Срок службы горячей дуги: срок службы электрода при непрерывной сварке.

Зеленое производство: экологически чистые методы производства с низким уровнем загрязнения.

В. Ссылки

- [1] Прогноз мирового рынка вольфрамовых электродов - Отчет об анализе рынка, 2023 г.
- [2] Прогресс в исследованиях композитных материалов редкоземельных вольфрамовых электродов - Журнал редкоземельных материалов, 2022 г.
- [3] Применение вольфрама и молибдена редкоземельных элементов в области аккумуляторов новой энергии - Отчет об отраслевых исследованиях, 2024 г.
- [4] Технология индустриализации мультикомпозиционного редкоземельного вольфрамового электрода - Техничко-экономическое обоснование проекта, 2020 г.
- [5] Анализ эксплуатационных характеристик материалов редкоземельных алюминиевых электродов - Materials Science Journal, 2021
- [6] Исследование цепочки поставок ключевых редкоземельных материалов - Отчет CTCI, 2022 г.
- [7] Механизм спекания тройных композитных редкоземельных вольфрамовых электродов - Metallurgical Transactions, 2023
- [8] Руководство по выбору оборудования для редкоземельных вольфрамовых электродов - Materials Processing Journal, 2022
- [9] Технология получения многокомпонентных композитных редкоземельных вольфрамовых электродов - Научно-технические инновации, 2024
- [10] Статус разработки и применения вольфрамовых сплавов - Журнал цветных металлов, 2021
- [11] Характеристики безопасности композитных редкоземельных вольфрамовых электродов - Журнал промышленной безопасности, 2023
- [12] Эксплуатационные испытания композитных редкоземельных вольфрамовых электродов - Журнал материаловедения, 2023 г.
- [13] Испытание механических свойств вольфрамовых электродов - Metallurgical Transactions, 2022
- [14] Анализ микроструктуры редкоземельных вольфрамовых электродов - Journal of Rare Earth, 2021
- [15] Определение химического состава вольфрамовых электродов - Аналитическая химия, 2024 г.
- [16] Технология обнаружения дефектов вольфрамовых электродов - журнал NDT, 2023 г.
- [17] Оценка ресурса редкоземельных вольфрамовых электродов - Reliability Engineering, 2022
- [18] Контроль качества композитных вольфрамовых электродов - Журнал контроля качества, 2024 г.

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

- [19] Метод испытания характеристик редкоземельных вольфрамовых электродов - Журнал испытаний материалов, 2022 г.
- [20] Влияние регламента REACH на производство электродов - Европейское химическое агентство, 2024 г.
- [21] Интерпретация правил обращения с редкоземельными элементами - Отчет о промышленной политике Китая, 2024 г.
- [22] Технология оборудования для производства композитных редкоземельных вольфрамовых электродов - Журнал промышленного оборудования, 2023
- [23] Технологическое оборудование для производства редкоземельных вольфрамовых электродов - Advanced Materials Processing, 2021