

## Что такое вольфрамово-медный электрод

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

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

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Оглавление

### Глава 1: Введение

- 1.1 Определение вольфрамово-медного электрода
- 1.2 Основные характеристики вольфрамово-медного электрода
- 1.3 История развития вольфрамово-медного электрода

### Глава 2: Основы материалов для вольфрамово-медных электродов

- 2.1 Характеристики вольфрама
- 2.2 Характеристики меди
- 2.3 Механизм из вольфрамово-медного композита
  - 2.3.1 Физическая совместимость вольфрамово-медных электродов
    - 2.3.1.1 Структурная совместимость
    - 2.3.1.2 Термическая совместимость
  - 2.3.2 Синергия производительности вольфрамово-медных электродов
    - 2.3.2.1 Синергия электро- и теплопроводности
    - 2.3.2.2 Синергия между устойчивостью к высоким температурам и структурной стабильностью
- 2.4 Основные требования к сырью для вольфрамово-медных электродов
  - 2.4.1 Требования к вольфрамовому порошку
  - 2.4.2 Требования к медному порошку
  - 2.4.3 Стандарты предварительной обработки сырья

### Глава 3: Физические и химические свойства вольфрамово-медных электродов

- 3.1 Физические свойства вольфрамово-медных электродов
  - 3.1.1 Плотность вольфрамово-медного электрода
    - 3.1.1.1 Метод расчета плотности
    - 3.1.1.2 Соотношение между плотностью и составом
    - 3.1.1.3 Влияние плотности на приложения
  - 3.1.2 Тепловые свойства вольфрамово-медных электродов
    - 3.1.2.1 Теплопроводность
    - 3.1.2.2 Коэффициент теплового расширения
    - 3.1.2.3 Устойчивость к высоким температурам
- 3.2 Функциональные характеристики вольфрамово-медного электрода
  - 3.2.1 Проводящие свойства вольфрамово-медных электродов
    - 3.2.1.1 Проводимость
    - 3.2.1.2 Удельное сопротивление
    - 3.2.1.3 Допустимая нагрузка по току
  - 3.2.2 Стойкость к дуговой эрозии вольфрамово-медных электродов
    - 3.2.2.1 Механизм дуговой эрозии
    - 3.2.2.2 Оценка стойкости к абляции
    - 3.2.2.3 Факторы, влияющие на устойчивость к абляции
- 3.3 Другие свойства вольфрамово-медного электрода

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.1 Твердость вольфрамово-медного электрода
- 3.3.2 Прочность медно-вольфрамового электрода
- 3.3.3 Прочность вольфрамово-медного электрода
- 3.3.4 Износостойкость вольфрамово-медного электрода
- 3.3.5 Коррозионная стойкость вольфрамово-медных электродов
- 3.3.6 Антипригарные и антиадгезионные свойства вольфрамово-медных электродов
- 3.4 Паспорт безопасности медно-вольфрамового электрода CTIA GROUP LTD

#### **Глава 4: Классификация вольфрамово-медных электродов**

- 4.1. Классификация по основному составу и соотношению компонентов. Вольфрамово-медный электрод.
  - 4.1.1 Электроды с высоким содержанием вольфрама (80–95 % вольфрама)
  - 4.1.2 Электроды со средним содержанием вольфрама (50–80 % вольфрама)
  - 4.1.3 Электроды с низким содержанием вольфрама (20–50 % вольфрама)
- 4.2 Классификация вольфрамово-медных электродов по сценарию применения
  - 4.2.1 Электроды для электроэрозионной обработки
  - 4.2.2 Электроды для высоковольтных электроприборов
  - 4.2.3 Электроды в сварочном поле
  - 4.2.4 Специальные электроды для аэрокосмической и военной промышленности
- 4.3 Классификация морфологических и структурных характеристик вольфрамово-медных электродов
  - 4.3.1 Блочные электроды
  - 4.3.2 Стержневой электрод
  - 4.3.3 Листовой электрод
  - 4.3.4 Электроды специальной формы
- 4.4 Классификация вольфрамово-медных электродов по эксплуатационным характеристикам
  - 4.4.1 Высокопроводящие электроды
  - 4.4.2 Электроды, стойкие к дуговой эрозии
  - 4.4.3 Высокопрочные электроды
  - 4.4.4 Высокотермостойкие электроды
- 4.5 Классификация вольфрамово-медных электродов по микроструктуре
  - 4.5.1 Равномерно распределенные электроды
  - 4.5.2 Электроды, заполненные скелетом
  - 4.5.3 Электрод градиентного распределения
- 4.6 Классификация вольфрамово-медных электродов по макроскопической физической форме
  - 4.6.1 Плотный электрод
  - 4.6.2 Пористые электроды
  - 4.6.3 Электроды с композитным покрытием

#### **Глава 5: Процесс изготовления вольфрамово-медного электрода**

- 5.1 Процесс инфильтрации
  - 5.1.1 Изготовление вольфрамового каркаса

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- 5.1.1.1 Формование вольфрамового порошка
- 5.1.1.2 Спекание вольфрамового скелета
- 5.1.1.3 Контроль пор вольфрамового скелета
- 5.1.2 Контроль инфильтрации
- 5.1.2.1 Подготовка медного материала
- 5.1.2.2 Контроль температуры инфильтрации
- 5.1.2.3 Контроль времени инфильтрации
- 5.2 Технология постобработки
- 5.2.1 Резка
- 5.2.2 Шлифование
- 5.2.3 Обработка поверхности
- Контроль точности размеров

## **Глава 6: Сценарии применения вольфрамово-медных электродов**

- 6.1 Применение вольфрамово-медного электрода в электроэрозионной обработке
- 6.1.1 Применение в пресс-формах
- 6.1.2 Применение при переработке труднообрабатываемых материалов
- 6.1.3 Преимущества применения в электроэрозионной обработке
- 6.2 Применение вольфрамово-медных электродов в высоковольтных электроприборах
- 6.2.1 Применение в высоковольтных выключателях
- 6.2.2 Применение в молниезащитных разрядниках
- 6.2.3 Преимущества применения в высоковольтных электроприборах
- 6.3 Применение вольфрамово-медных электродов при сварке и пайке
- 6.3.1 Применение контактной сварки
- 6.3.2 Применение при пайке
- 6.3.3 Преимущества применения в области сварки
- 6.4 Применение вольфрамово-медных электродов в аэрокосмической и военной промышленности
- 6.4.1 Применение в компонентах ракетных двигателей
- 6.4.2 Применение в компонентах наведения
- 6.4.3 Преимущества применения в аэрокосмической и военной промышленности

## **Глава 7: Стандарты контроля качества и испытаний вольфрамово-медных электродов**

- 7.1 Определение основных показателей вольфрамово-медного электрода
- 7.1.1 Испытание физических свойств вольфрамово-медного электрода
- 7.1.1.1 Методы и стандарты определения плотности
- 7.1.1.2 Методы и стандарты испытаний тепловых характеристик
- 7.1.1.3 Методы и стандарты испытаний на проводимость
- 7.1.2 Химические свойства вольфрамово-медных электродов
- 7.1.2.1 Метод анализа состава
- 7.1.2.2 Метод испытания на коррозионную стойкость
- 7.1.2.3 Стандарты испытаний на содержание примесей
- 7.1.3 Механические свойства вольфрамово-медных электродов

### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- 7.1.3.1 Методы и стандарты испытания на твердость
- 7.1.3.2 Методы и стандарты испытаний на прочность
- 7.1.3.3 Методы и стандарты испытаний на прочность
- 7.2 Проверка микроструктуры вольфрамово-медного электрода
  - 7.2.1 Металлографический анализ
    - 7.2.1.1 Подготовка металлографических образцов
    - 7.2.1.2 Критерии оценки равномерности распределения фаз
    - 7.2.1.3 Определение размера зерна
  - 7.2.2 Обнаружение дефектов вольфрамово-медных электродов
    - 7.2.2.1 Метод определения пористости и допустимый диапазон
    - 7.2.2.2 Методы и критерии обнаружения трещин
    - 7.2.2.3 Методы обнаружения включений и стандарты контроля
- 7.3 Отраслевые стандарты для вольфрамово-медных электродов
  - 7.3.1 Соответствующие внутренние стандарты
    - 7.3.1.1 Соответствующие положения китайских стандартов
    - 7.3.1.2 Требования отраслевых стандартов
  - 7.3.2 Соответствующие международные стандарты
    - 7.3.2.1 Международные стандарты на медно-вольфрамовые электроды
    - 7.3.2.2 Стандарты медно-вольфрамовых электродов в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах

## Глава 8: Тенденции рынка и технологий вольфрамово-медных электродов

- 8.1 Анализ производственной цепочки вольфрамово-медных электродов
  - 8.1.1 Поставки сырья для первичной переработки
  - 8.1.2 Среднее производство
  - 8.1.3 Рынок нисходящих приложений
- 8.2 Техническое руководство по вольфрамово-медному электроду
  - 8.2.1 Оптимизация процесса подготовки
  - 8.2.2 Путь повышения производительности
  - 8.2.3 Исследование расширения приложения

### Приложение:

Глоссарий по вольфрамово-медным электродам

Ссылки



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

**Resistance Welding Electrodes:** Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

**Repair Welding Electrodes:** Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

**Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes:** Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

**High-Voltage Discharge Tube Electrodes:** This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Глава 1: Введение

### 1.1 Определение вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медный электрод — это композитный электрод, изготовленный из вольфрама (W) и меди (Cu) методом порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации. Его определение охватывает его состав, способ получения и функциональные свойства в конкретных применениях. В вольфрамово-медных электродах обычно используется вольфрам в качестве основного материала каркаса и медь в качестве наполнителя. Два металла смешиваются в различных пропорциях (например, WCu 70/30, WCu 80/20), что приводит к получению материала с высокой температурой плавления, высокой термостойкостью и отличной электропроводностью. Высокая температура плавления вольфрама, равная 3422 °C, придает электроду исключительную термостойкость и стойкость к дуговой эрозии, в то время как медь с температурой плавления 1083 °C обладает высокой электро- и теплопроводностью, обеспечивая эффективную передачу тока и быстрое рассеивание тепла. Свойства этого композитного материала делают его широко используемым в таких приложениях, как электроэрозионная обработка (EDM), контактная сварка и электрические контакты. Определение вольфрамово-медного электрода также включает его микроструктуру. Electrodes изготавливаются путем смешивания вольфрамовых и медных порошков методами порошковой металлургии, прессования и спекания, либо путем инфильтрации жидкой меди в пористый вольфрамовый каркас методом вакуумной инфильтрации, что обеспечивает равномерное распределение фаз и низкую пористость.

В практическом применении определение вольфрамово-медных электродов дополнительно расширяется, чтобы охватить их функциональные свойства, такие как их использование в качестве электродов-инструментов в электроискровой обработке (ЭИ) для удаления материала заготовки или в качестве электродов для контактной сварки, выдерживающих высокие токи и давления. Соотношение и процесс подготовки могут быть адаптированы к конкретным потребностям. Например, электроды с высоким содержанием вольфрама больше подходят для износостойкости и дугостойкости, в то время как электроды с высоким содержанием меди оптимизируют электропроводность. Определение вольфрамово-медных электродов также охватывает их отличия от традиционных однометалльных электродов. Преимущество композитных материалов заключается в их сбалансированных свойствах вольфрама и меди, что преодолевает ограничения отдельных материалов, такие как низкая температура плавления чистой меди или низкая электропроводность чистого вольфрама. В последние годы, с развитием производственных технологий, определение вольфрамово-медных электродов постепенно расширилось до областей аддитивного производства и нанотехнологий, исследуя более совершенные микроструктуры и новые приложения.

### 1.2 Основные характеристики медно-вольфрамового электрода

Вольфрамово-медные электроды обладают уникальными физическими, механическими и электрическими свойствами композитного материала, что делает их особенно подходящими для

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

различных применений. Во-первых, электропроводность является основной характеристикой вольфрамово-медных электродов. Высокая электропроводность медной фазы (приблизительно  $5,8 \times 10^7$  См/м) обеспечивает эффективный путь передачи тока. Хотя вольфрам имеет более низкую электропроводность (приблизительно  $1,8 \times 10^7$  См/м), за счет оптимизации распределения меди электропроводность вольфрамово-медных электродов может достигать 80%-90% от электропроводности традиционных медных электродов, что соответствует требованиям электроэрозионной обработки и сварки. Теплопроводность является еще одной ключевой характеристикой. Сочетание теплопроводности меди и умеренной теплопроводности вольфрама (около 174 Вт/м·К) приводит к получению сплава с теплопроводностью 180–220 Вт/м·К, что обеспечивает быстрый отвод тепла, выделяющегося во время обработки или сварки, и предотвращает локальный перегрев.

Высокотемпературная стойкость является существенным преимуществом вольфрамово-медных электродов. Сверхвысокая температура плавления вольфрама обеспечивает стабильность в дугах и высокотемпературных средах. Медная фаза после плавления заполняет поры, дополнительно повышая термическую стабильность материала, что делает его пригодным для экстремальных условий до 3000 °С. Высокая твердость вольфрама (около 3430 НВ) и износостойкость способствуют его стойкости к дуговой эрозии. Это значительно снижает абляцию поверхности электрода во время электроэрозионной обработки, продлевая его срок службы. Механическая прочность и твердость также являются важными характеристиками. Вольфрамово-медные электроды обладают прочностью на сжатие более 1000 МПа и твердостью от 200 до 300 НВ, что позволяет им выдерживать высокие давления и частые механические воздействия. Между тем, медная фаза обеспечивает ударную вязкость, снижая риск хрупкого разрушения.

Низкий коэффициент теплового расширения (приблизительно 6-8 ppm/°C) является уникальным преимуществом электродов из вольфрамовой меди. Он соответствует кремниевым или керамическим подложкам, снижает напряжение при термоциклировании и особенно подходит для корпусирования микроэлектроники. Коррозионная стойкость достигается за счет химической стабильности вольфрама и поверхностной обработки меди (например, никелирования), что делает его пригодным для влажных или промышленных сред. С точки зрения микроструктуры равномерное распределение фаз и низкая пористость (обычно менее 1%) электрода из вольфрамовой меди обеспечивают стабильную производительность. Эти основные характеристики в совокупности составляют универсальность электродов из вольфрамовой меди, позволяя им хорошо работать в высокоточной обработке, электрическом контакте и терморегулировании. В будущем, с развитием нанотехнологий и модификации поверхности, ожидается, что эти характеристики будут дополнительно оптимизированы.

### 1.3 История развития вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медные электроды отражают историческую эволюцию материаловедения и промышленных потребностей, берущую свое начало в середине 20-го века, с достижениями в порошковой металлургии и быстрым развитием электротехнической промышленности.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Первоначально исследования и разработки вольфрамово-медных электродов начались в 1940-х годах, что было обусловлено уникальными свойствами вольфрама и меди в военном и промышленном применении. Ранние исследования были сосредоточены на процессах порошковой металлургии, и в 1945 году Американское общество по металлам (ASM) впервые сообщило о получении композитов вольфрам-медь, исследуя их применение в электрических контактах путем смешивания, прессования и спекания вольфрамовых и медных порошков. Вольфрамово-медные электроды на этом этапе в основном использовались в низкопроизводительном электрооборудовании с ограниченными характеристиками, высокой пористостью и возможностями для улучшения проводимости и долговечности.

В 1950-1970-х годах, с внедрением технологии вакуумной инфильтрации, разработка вольфрамово-медных электродов вступила в период быстрого роста. В 1955 году Siemens успешно разработала метод вакуумной инфильтрации, инфильтруя жидкую медь в спеченный вольфрамовый скелет, что значительно уменьшило пористость и улучшило плотность и проводимость материала. Этот технологический прорыв позволил применять вольфрамово-медные электроды в электроэрозионной обработке (EDM), что сделало их идеальными для обработки твердых материалов, таких как карбид вольфрама. В 1960-х годах японские и американские компании, такие как Toshiba и General Electric, дополнительно оптимизировали соотношение и микроструктуру, в результате чего WCu 70/30 и WCu 80/20 стали отраслевыми стандартами, широко используемыми в высоковольтных переключателях и сварочных электродах.

С 1980-х по 2000-е годы области применения вольфрамово-медных электродов расширились до микроэлектроники и аэрокосмической промышленности, что привело к инновациям в технологии подготовки. В 1985 году была внедрена технология горячего изостатического прессования (HIP), которая повысила однородность и механическую прочность материала, удовлетворяя потребности высокоточной обработки. В 1990-х годах внедрение нановольфрамового порошка увеличило степень измельчения зерна, улучшило износостойкость и стойкость к дуговой эрозии. После 2000 года, с развитием аддитивного производства и технологий 3D-печати, изготовление вольфрамово-медных электродов перешло к персонализированной настройке, и стало возможным создание электродов со сложной геометрией. В 2020-х годах, в сочетании с искусственным интеллектом и моделированием материалов, исследования и разработки вольфрамово-медных электродов были сосредоточены на функционально-градиентных материалах и модификации поверхности для удовлетворения потребностей оборудования 5G и высокотемпературных датчиков. К 2025 году вольфрамово-медные электроды станут основными материалами в высокопроизводительной обработке и электронике, а история их развития отражает глубокую интеграцию технологических инноваций и потребностей применения.



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

**Resistance Welding Electrodes:** Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

**Repair Welding Electrodes:** Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

**Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes:** Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

**High-Voltage Discharge Tube Electrodes:** This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Глава 2: Материальная основа вольфрамово-медного электрода

### 2.1 Характеристики вольфрама

Вольфрам, ключевой компонент вольфрамово-медных электродов, обладает свойствами, которые обеспечивают уникальную основу для высокопроизводительных применений. Вольфрам — тугоплавкий металл с температурой плавления 3422 °С, самой высокой из всех известных металлов. Это свойство позволяет ему сохранять структурную стабильность в условиях экстремально высоких температур, что делает его особенно подходящим для выдерживания дуги и высокотемпературных ударов, возникающих при электроэрозионной обработке (ЭЭО) или контактной сварке. Плотность вольфрама 19,25 г/см<sup>3</sup> обеспечивает электроду высокую массу и устойчивость к деформации. Его прочность на сжатие может превышать 1000 МПа, а твёрдость составляет около 3430 HV, что демонстрирует отличную износостойкость и механическую прочность. Эти свойства позволяют ему выдерживать частые механические нагрузки и дуговую эрозию, продлевая срок службы электрода. Хотя его теплопроводность составляет приблизительно 174 Вт/м·К, что ниже, чем у меди, его высокая температура плавления компенсирует этот недостаток, гарантируя сохранение формы при высоких температурах.

Химическая стабильность вольфрама – ещё одна выдающаяся характеристика. Он устойчив к воздействию кислот, щелочей и окислителей, а также к значительной коррозии поверхности во влажных или промышленных условиях. Это гарантирует возможность применения вольфрамово-медных электродов на открытом воздухе или в суровых условиях. Однако вольфрам обладает относительно низкой электропроводностью (примерно  $1,8 \times 10^7$  См/м), что ограничивает его применение в чистом виде и требует использования в смеси с другими высокопроводящими материалами. Коэффициент теплового расширения составляет приблизительно 4,5 ppm/°С, что соответствует показателям многих керамических и полупроводниковых материалов, снижая напряжение при термоциклировании и обеспечивая преимущество в корпусировании микроэлектроники. Вольфрам плохо поддаётся обработке и должен быть получен методами порошковой металлургии или высокотемпературного спекания, но его мелкозернистая структура может улучшить эксплуатационные характеристики за счёт оптимизации процесса. В последние годы внедрение нано-вольфрамового порошка ещё больше повысило однородность и прочность вольфрама, открыв для него новые перспективы применения в высокоточных электродах.

### 2.2 Характеристики меди

Медь, ещё один ключевой компонент вольфрамово-медных электродов, обладает свойствами, которые обеспечивают им исключительные электрические и тепловые характеристики. Хотя температура плавления меди 1083 °С ниже, чем у вольфрама, ее высокая электро- и теплопроводность делают ее идеальным материалом для эффективной передачи тока и рассеивания тепла. В вольфрамово-медных электродах медная фаза включена в вольфрамовый скелет с помощью порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, образуя непрерывную проводящую сеть, которая обеспечивает стабильную передачу тока во время электроэрозионной

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обработки или сварки. При плотности 8,96 г/см<sup>3</sup> медь легче вольфрама, но ее пластичность и вязкость обеспечивают дополнительную механическую гибкость, снижая риск хрупкого разрушения под механическим напряжением.

Коррозионная стойкость меди в чистом состоянии слаба и легко подвержена окислению или сульфидированию. Однако в композитах вольфрам-медь химическая стабильность вольфрама обеспечивает защиту, а медная поверхность может быть дополнительно покрыта покрытием (таким как никель или золото) для повышения ее атмосферостойкости. Медь имеет относительно высокий коэффициент теплового расширения, приблизительно 17 ppm/°C, но в сочетании с вольфрамом она соответствует кремниевым или керамическим подложкам, что делает ее пригодной для микроэлектронных применений. Медь обладает превосходной обрабатываемостью, что облегчает прецизионную резку и формовку, а также позволяет изготавливать электроды сложной формы. Однако склонность меди к размягчению при высоких температурах ограничивает ее применение в одиночку, требуя использования вольфрама в качестве основы. В последние годы для снижения влияния примесей на электропроводность и теплопроводность широко применяется электролитическая медь более высокой чистоты. Свойства меди придают вольфрамово-медным электродам высокую электро- и теплопроводность, что позволяет им эффективно использоваться в системах электро- и терморегулирования.

### 2.3 Механизм из вольфрамово-медного композита

Механизм композита вольфрам-медь является ключом к пониманию основ производительности вольфрамово-медных электродов, включая взаимодействие между вольфрамом и медью на микроскопическом уровне и оптимизацию процесса приготовления. Композитные материалы вольфрам-медь получают с помощью порошковой металлургии или процессов вакуумной инфильтрации. Основной принцип заключается в использовании высокой температуры плавления вольфрама в качестве каркаса и низкой температуры плавления меди в качестве заполняющей фазы для формирования системы с дополнительными эксплуатационными характеристиками. В порошковой металлургии порошок вольфрама и порошок меди смешивают в определенном соотношении, прессуют в заготовку, а затем спекают при высокой температуре. Медь смачивает частицы вольфрама в жидкой фазе, заполняя поры и образуя однородную структуру композита. Вакуумная инфильтрация сначала готовит пористый вольфрамовый каркас, который затем нагревают выше температуры плавления меди в вакуумной среде. Жидкая медь инфильтрует и заполняет заготовку, повышая плотность материала.

В основе механизма композита лежит физическая и химическая несовместимость вольфрама и меди. Между ними не образуются никаких существенных соединений, а интерфейс в основном механически связан и частично диффузионен, что минимизирует фазовые переходы или образование хрупких фаз. Вольфрамовый скелет обеспечивает структурную поддержку и устойчивость к высоким температурам, в то время как медная фаза образует непрерывную сетку, оптимизируя электро- и теплопроводность. В микроструктуре частицы вольфрама обычно распределены в виде неправильных многоугольников размером от 5 до 20 микрон. Медь заполняет

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поры, и пористость можно контролировать ниже 1%. Термическая обработка и процессы под давлением (такие как горячее изостатическое прессование) дополнительно улучшают связь и однородность интерфейса. Механизм композита также включает согласование теплового расширения. Низкое тепловое расширение вольфрама уравнивается высоким тепловым расширением меди посредством пропорциональной регулировки, в результате чего коэффициент теплового расширения составляет 6-8 ppm/°C, что позволяет адаптировать его к различным подложкам.

### 2.3.1 Физическая совместимость вольфрамово-медных электродов

Физическая совместимость вольфрамово-медных электродов является важным компонентом их композитного механизма, включающего координацию тепловых, механических и электрических свойств вольфрама и меди. Во-первых, термическая совместимость отражается в соответствии коэффициента теплового расширения (КТР). КТР вольфрама составляет 4,5 ppm/°C, а меди — 17 ppm/°C. Разница значительна при использовании в одиночку, но, регулируя соотношение компонентов в композите (например, WCu 85/15), можно контролировать конечный КТР до 6–8 ppm/°C, что близко к значению КТР кремниевых или керамических подложек, снижая концентрацию напряжений при термоциклировании.

Механическая совместимость отражается в балансе между твердостью и вязкостью. Вольфрам имеет твердость до 3430 HV, в то время как медь имеет твердость всего около 70 HV. Благодаря компаундированию твердость вольфрамово-медных электродов обычно составляет 200-300 HV, сочетая износостойкость и пластичность. Вольфрамовый скелет обеспечивает механическую поддержку, в то время как медная фаза повышает вязкость, поглощает энергию удара и предотвращает хрупкое разрушение, особенно при электроэрозионной обработке, где износ поверхности электрода снижается. Электрическая совместимость является основой. Высокая проводимость меди и более низкая проводимость вольфрама ( $1,8 \times 10^7$  См/м) координируются через непрерывную сеть медных фаз. Электропроводность близка к 80% -90% чистой меди, что соответствует требованиям передачи большого тока. медью не происходит существенной химической реакции ; интерфейс в основном механически связан и диффузионен, что минимизирует образование хрупких фаз и повышает долговременную стабильность. Процесс вакуумной инфильтрации оптимизирует смачивание интерфейса, уменьшает количество незаполненных пор и повышает плотность. Теплопроводность также отражает совместимость: медная фаза доминирует в теплопроводности, а вольфрамовая фаза обеспечивает термическую стабильность. В будущем нанопорошки или модификация поверхности могут дополнительно повысить совместимость и обеспечить применение в более требовательных средах, таких как высокотемпературные датчики или устройства 5G.

#### 2.3.1.1 Структурная совместимость

Вольфрамово-медные электроды являются ключевым компонентом их физической совместимости. Это включает в себя геометрическое соответствие и стабильность интерфейса

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроструктур вольфрама и меди, что напрямую влияет на механические свойства электрода и долговременную надежность. Структурная совместимость в первую очередь отражается в координации между вольфрамовым каркасом и медным наполнителем, достигаемой с помощью порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации. В порошковой металлургии вольфрамовый порошок (обычно размером 5-20 микрон) и медный порошок смешивают в определенном соотношении (например, WCu 70/30) и прессуют в сырое тело. Во время спекания медь в жидкой фазе смачивает частицы вольфрама и заполняет поры, образуя композитную структуру с вольфрамом в качестве непрерывного каркаса и медью в качестве дисперсной фазы. Процесс вакуумной инфильтрации сначала создает пористый вольфрамовый каркас. Затем вольфрамовый каркас нагревают в вакууме до температуры выше точки плавления меди (1083 °C), что позволяет жидкой меди проникнуть и заполнить поры. Это значительно снижает пористость (обычно менее 1%) и повышает плотность и консистенцию материала.

Частицы вольфрама распределены в виде неправильной полигональной структуры, а медь равномерно заполняет промежутки. Интерфейс в основном механически сцеплен и диффузен, что сводит к минимуму риск образования микротрещин или расслоения. Структурная совместимость также отражается в однородности размера зерен и распределения фаз. Мелкие зерна, достигаемые за счет введения нановольфрамового порошка, повышают механическую прочность и износостойкость, достигая прочности на сжатие более 1000 МПа и твердости от 200 до 300 HV. Непрерывная сеть фаз меди поддерживает целостность токопроводящей дорожки, уменьшая изменчивость сопротивления. Микроскопический анализ показывает, что равномерное распределение фаз улучшает общую стабильность электрода. При электроискровой обработке (ЭИ) структурная однородность снижает изменчивость разряда, повышая точность обработки и качество поверхности. В корпусировании микроэлектроники структурная совместимость обеспечивает низконапряженное соединение с кремниевыми (КТР приблизительно 2,6 ppm/°C) или керамическими подложками, предотвращая деформацию и разрушение при термоциклировании. Механические испытания и сканирующая электронная микроскопия показали, что стабильность межфазных связей является ключом к структурной совместимости, снижая количество отказов, вызванных термическими или механическими напряжениями.

Более того, производственный процесс имеет решающее значение для структурной совместимости. Процесс горячего изостатического прессования (ГИП) использует всенаправленное давление при высоких температурах для дальнейшего сжатия пор, улучшения межфазных связей между вольфрамом и медью и повышения усталостной прочности материала. Ультрадисперсные порошки, полученные с помощью нанотехнологий, повышают прочность границ зерен, что делает их пригодными для высокоточных электродов. Оптимизация структурной совместимости также включает контроль размера частиц порошка и корректировку параметров спекания. Будущие инновации в области динамического моделирования и технологических процессов позволят еще больше улучшить распределение зерен и снизить пористость до уровня ниже 0,5%, что позволит создавать изделия со сложной геометрией или высокой прочностью, например, в компонентах аэрокосмической техники или электродах устройств 5G.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.3.1.2 Термическая совместимость

Тепловая совместимость вольфрамово-медных электродов является ключевым компонентом их физической совместимости. Это включает в себя координацию теплового расширения и теплопроводности между вольфрамом и медью, что влияет на стабильность и надежность электрода при термоциклировании и в условиях высоких температур. Коэффициент теплового расширения (КТР) вольфрама составляет  $4,5 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ , в то время как у меди -  $17 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ . Хотя разница значительна при использовании отдельно, регулируя соотношение композита, КТР вольфрамово-медных электродов можно контролировать до  $6-8 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ . Это значение аналогично значению для кремниевых (приблизительно  $2,6 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ) или алюмооксидных керамических (приблизительно  $7 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ) подложек. Это снижает концентрацию напряжений при термоциклировании, предотвращая коробление или разрушение корпуса, и особенно эффективно в микроэлектронной упаковке и высокотемпературных датчиках. Достижение термической совместимости зависит от оптимизации соотношения вольфрама и меди. Например, соотношение WCu 85/15 хорошо работает при высоких температурах. Тепловое моделирование подтвердило его низконапряженные свойства, а тепловое расширение соответствует кремниевой подложке в пределах 10%.

Теплопроводность является еще одним ключевым аспектом термической совместимости. Медь имеет теплопроводность приблизительно  $400 \text{ Вт/ м} \cdot \text{К}$ , что выше, чем у вольфрама. Теплопроводность композитного вольфрамово-медного электрода составляет от 180 до  $220 \text{ Вт/ м} \cdot \text{К}$ . Медная фаза доминирует в теплопроводности, в то время как вольфрамовая фаза обеспечивает термическую стабильность. В электроэрозионной обработке высокая теплопроводность быстро рассеивает тепло разряда, предотвращая локальный перегрев электрода, который может привести к деформации или прожогам в заготовке, и улучшая качество поверхности. При контактной сварке равномерное распределение тепла уменьшает зону термического влияния, повышая прочность и долговечность сварного соединения. Термическая совместимость также включает в себя различия температур плавления. Температура плавления вольфрама  $3422 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и температура плавления меди  $1083 \text{ }^{\circ}\text{C}$  гармонизируются посредством спекания в жидкой фазе. Медь заполняет вольфрамовый каркас при высоких температурах, повышая термическую стабильность. Экспериментальные данные показывают, что теплопроводность WCu 70/30 обеспечивает стабильную работу при токе 200 А и температуре  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Введение мелкозернистого материала с помощью нанотехнологий дополнительно оптимизирует путь теплопроводности, снижая тепловое сопротивление примерно на 15%.

Тепловая совместимость также зависит от микроструктуры. Низкая пористость и равномерное распределение фаз уменьшают рассеяние при теплопроводности, в то время как горячее изостатическое прессование (ГИП) улучшает теплопроводность интерфейса. Испытания на термическую усталость показывают, что скорость деформации вольфрамово-медных электродов при термоциклировании от  $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет менее 0,1%, что свидетельствует об их превосходной термической стабильности. В будущем, за счет функциональной градиентной конструкции (где содержание вольфрама постепенно уменьшается от внутренней части к

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности) или введения промежуточных фаз (таких как молибден), тепловая совместимость может быть дополнительно оптимизирована для удовлетворения еще более высоких перепадов температур или сложных требований к тепловому управлению, например, в высокотемпературных датчиках давления или энергетическом оборудовании.

### 2.3.2 Синергия производительности вольфрамово-медных электродов

Синергетические свойства вольфрамово-медных электродов являются высшим проявлением их композитного механизма. Эта синергия включает в себя взаимодополняющие эффекты вольфрама и меди в электропроводности, теплопроводности, механической прочности и долговечности, которые в совокупности повышают общие эксплуатационные характеристики электрода в различных приложениях. Эти синергетические свойства основаны на оптимизированных процессах изготовления, таких как порошковая металлургия и вакуумная инфильтрация, для обеспечения равномерного распределения и стабильности интерфейса между вольфрамовым каркасом и медным наполнителем. Высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) обеспечивает стойкость к высоким температурам и дуговой эрозии, в то время как высокая электро- и теплопроводность меди оптимизируют электрические и тепловые характеристики управления. Композитный вольфрамово-медный электрод достигает баланса между коэффициентом теплового расширения 6-8 ppm/°C и теплопроводностью 180-220 Вт/м·К, что соответствует требованиям микроэлектронной упаковки и высокотемпературных датчиков. Низкая пористость и мелкий размер зерен микроструктуры повышают механическую прочность и износостойкость, что приводит к прочности на сжатие более 1000 МПа и твердости от 200 до 300 HV.

#### 2.3.2.1 Синергия электро- и теплопроводности

Вольфрамово-медные электроды являются ключевым проявлением их синергетического эффекта. Этот синергизм обусловлен взаимодополняющими электрическими и термическими свойствами вольфрама и меди, что напрямую повышает эффективность электрода при электроэрозионной обработке, сварке и в микроэлектронике. Электропроводность в основном обеспечивается медной фазой, обладающей высокой проводимостью  $5,8 \times 10^7$  См/м, образуя непрерывную проводящую сеть, обеспечивающую эффективную передачу тока. Несмотря на более низкую проводимость вольфрама в вольфрамово-медных электродах, оптимизация соотношения меди (например, WCu) Электропроводность сплава WCu 70/30 может достигать 80–90% от электропроводности чистой меди, что соответствует требованиям электроэрозионной обработки с высоким током и требованиям к низкому сопротивлению при сварке. Равномерное распределение фазы меди в микроструктуре снижает неравномерность сопротивления и повышает стабильность разряда, особенно при прецизионной обработке, например, при изготовлении микроформ. Экспериментальные данные показывают, что сплав WCu 70/30 достигает электропроводности, близкой к электропроводности чистой меди при высоких токах, что обеспечивает высокоточную и эффективную обработку.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Синергия теплопроводности тесно связана с электропроводностью. Медь имеет теплопроводность приблизительно  $400 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , что значительно выше, чем у вольфрама ( $174 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ). Теплопроводность композитного вольфрамово-медного электрода составляет от 180 до 220  $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$ . Медная фаза доминирует в теплопередаче, в то время как вольфрамовая фаза обеспечивает термическую стабильность. При электроэрозионной обработке теплопроводность быстро рассеивает тепло разряда по внешней поверхности электрода, предотвращая локальный перегрев, который может привести к деформации или прожогам заготовки. При контактной сварке равномерное распределение тепла уменьшает зону термического влияния (ЗТВ), повышая прочность и долговечность сварного соединения и удерживая ЗТВ в пределах 0,1 мм. Высокая температура плавления вольфрама ( $3422 \text{ }^\circ\text{C}$ ) обеспечивает структурную целостность в условиях высокотемпературной дуги, а низкая температура плавления меди ( $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ ) улучшает непрерывность теплопроводности через жидкофазный наполнитель. Теплопроводность меди WCu в соотношении 85/15 обеспечивает стабильную работу при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Эта синергетическая характеристика также отражается в сочетании низкого коэффициента теплового расширения и теплопроводности, что снижает тепловое напряжение и улучшает долговременную стабильность. Нанотехнология вводит мелкое зерно ( $<5$  микрон), дополнительно оптимизируя сеть электро- и теплопроводности, снижая тепловое сопротивление и электрическое сопротивление примерно на 15% и 10% соответственно, что делает его пригодным для рассеивания тепла чипов высокой мощности. В практическом применении синергетическая характеристика вольфрамово-медных электродов превосходит в контактах высоковольтных переключателей и оборудовании 5G, например, поддержание проводящей стабильности и эффективности терморегулирования при токе 500 А. В будущем, регулируя соотношение вольфрама и меди, вводя промежуточную фазу (такую как молибден) или модификацию поверхности (такую как серебрение), синергетический эффект может быть усилен для удовлетворения более высоких токов или сложных требований терморегулирования, например, в высокотемпературных датчиках или оборудовании для передачи энергии.

### 2.3.2.2 Синергия между устойчивостью к высоким температурам и структурной стабильностью

Вольфрамово-медные электроды – ключевой пример синергии их характеристик. Эта синергия обусловлена взаимодополняющим действием вольфрама и меди в высокотемпературных средах, что обеспечивает надежность и длительный срок службы электрода в экстремальных условиях. Высокотемпературная стойкость вольфрама обусловлена, прежде всего, вольфрамом, температура плавления которого составляет  $3422 \text{ }^\circ\text{C}$  – самая высокая среди всех металлов. Это свойство позволяет вольфрамово-медным электродам выдерживать дуговые разряды до  $3000 \text{ }^\circ\text{C}$  при электроэрозионной обработке (ЭЭО) или контактной сварке без существенного плавления или деформации. В композитных конструкциях вольфрам служит каркасным материалом, образуя высокопрочную, термостабильную сеть, устойчивую к термическим напряжениям при высоких температурах. В практических применениях, таких как обработка материалов высокой твердости (например, вольфрамовой стали) или отключение силовых цепей, высокая термостойкость

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама обеспечивает целостность поверхности электрода, снижая абляцию и потерю материала.

Синергия структурной стабильности зависит от степени заполнения медью и оптимизации микроструктуры. Медь имеет температуру плавления 1083 °С. В процессе спекания или вакуумной инфильтрации она заполняет вольфрамовый каркас в жидком виде, повышая плотность материала. Пористость обычно контролируется ниже 1%. Такая низкопористая структура снижает риск образования микротрещин при термоциклировании. Пластичность медной фазы дополнительно поглощает термические напряжения и предотвращает хрупкое разрушение. Равномерное распределение частиц вольфрама и меди в микроструктуре достигается методами порошковой металлургии или горячего изостатического прессования (ГИП). Мелкое зерно повышает усталостную прочность, а прочность на сжатие может достигать более 1000 МПа.

Синергия между высокотемпературной стойкостью и структурной стабильностью также отражается в согласовании коэффициентов теплового расширения. Низкий коэффициент теплового расширения вольфрама пропорционально корректируется с высоким коэффициентом теплового расширения меди, что обеспечивает КТР композита 6-8 ppm/°C, близкий к КТР кремниевых (2,6 ppm/°C) или керамических подложек, что снижает концентрацию термических напряжений. В микроэлектронных корпусах это свойство предотвращает деформацию между кристаллом и электродами; в высокотемпературных датчиках оно обеспечивает длительную работу при высоких температурах. Обработка поверхности (например, никелирование) дополнительно повышает стойкость к окислению и продлевает срок службы во влажных или промышленных условиях.

## 2.4 Требования к основному сырью для вольфрамово-медных электродов

### Требования к чистоте сырья

Поскольку вольфрамово-медные электроды являются ключевым материалом, широко используемым во многих высокотехнологичных областях, их эксплуатационные характеристики тесно связаны с качеством основного сырья — вольфрамового порошка и медного порошка. Высокочистое сырье является краеугольным камнем, обеспечивающим превосходные эксплуатационные характеристики вольфрамово-медных электродов. При изготовлении вольфрамово-медных электродов обычно требуется, чтобы чистота вольфрамового порошка достигала более 99,9%. Даже в некоторых сценариях применения с чрезвычайно высокими требованиями к эксплуатационным характеристикам электрода, таких как сверхточная электроискровая обработка, чистота должна быть выше. Это связано с тем, что присутствие примесей, даже в следовых количествах, может образовывать дефекты внутри электрода и нарушать однородность структуры материала. Например, если вольфрамовый порошок содержит примесные элементы, такие как железо и никель, эти примеси могут реагировать с вольфрамом и медью во время высокотемпературного спекания, образуя хрупкие фазы, что снижает прочность и ударную вязкость электрода, делая его склонным к растрескиванию или даже поломке во время

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

использования.

Аналогично, чистота медного порошка также имеет решающее значение. Чистота высококачественного медного порошка обычно должна быть не менее 99,95%. Нечистый медный порошок может содержать оксиды, влагу или другие примеси, которые серьезно влияют на проводимость и пластичность меди. В вольфрамово-медных электродах медь в основном способствует хорошей электро- и теплопроводности. Если медный порошок нечистый, эффективность электро- и теплопроводности электрода будет значительно снижена. Например, когда в медном порошке много оксида меди, удельное сопротивление оксида меди намного выше, чем у чистой меди, что значительно увеличит сопротивление электрода, что приведет к снижению эффективности преобразования электрической энергии в тепловую в таких приложениях, как электронискровая обработка. Это не только влияет на эффективность обработки, но также может вызвать локальный перегрев электрода и ускорить потерю электрода.

### Контроль размера частиц и распределения размеров частиц

В дополнение к чистоте, размер частиц и распределение порошков вольфрама и меди также являются ключевыми факторами, влияющими на характеристики вольфрамво-медных электродов. Размер частиц должен быть точно выбран на основе различных процессов подготовки и сценариев конечного применения. В традиционном процессе порошковой металлургии для приготовления вольфрамво-медных электродов размер частиц вольфрамового порошка обычно контролируется в диапазоне от 1 до 10 мкм. Более тонкий вольфрамовый порошок может увеличить площадь контакта между вольфрамом и медью, способствовать диффузии и сплавлению между элементами в процессе спекания и способствовать формированию более однородной и плотной микроструктуры, тем самым улучшая прочность и твердость электрода, делая его более подходящим для обработки высокотвердых материалов. Однако слишком тонкий вольфрамовый порошок также может вызвать некоторые проблемы, такие как плохая текучесть, что затрудняет равномерное распределение во время процесса смешивания и формования порошка и легко приводит к неравномерной плотности в сыром теле. Хотя более крупный вольфрамовый порошок обладает лучшей текучестью, он приводит к относительному увеличению внутренних пор спеченного электрода, что снижает плотность и влияет на общие характеристики электрода.

Медный порошок обычно имеет относительно мелкий размер частиц. Это связано с тем, что медь имеет более низкую температуру плавления, что облегчает заполнение промежутков между частицами вольфрама в процессе спекания. Медный порошок подходящего размера частиц обеспечивает хорошую смачиваемость и формирует стабильное соединение с вольфрамом. Например, в электроэрозионных электродах, если размер частиц медного порошка подходит, при локальном нагреве электрода во время разряда медь может быстро отводить тепло, предотвращая чрезмерный износ электрода из-за локального перегрева.

Кроме того, критически важна равномерность распределения размеров частиц. В идеале, как

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамовый, так и медный порошки должны иметь узкий диапазон распределения размеров. Если распределение размеров частиц слишком широкое, частицы разных размеров могут легко сегрегировать в процессе смешивания, что приводит к неравномерному составу и свойствам конечного электродного материала. Например, области, где сосредоточены крупные частицы вольфрамового порошка, могут иметь высокую твёрдость, но недостаточную прочность, в то время как области, где сосредоточены мелкие частицы, могут иметь недостаточную плотность, что приводит к снижению производительности при использовании.

### **Комплексное влияние характеристик сырья на эксплуатационные характеристики электродов**

Свойства вольфрама и меди играют решающую роль в эксплуатационных характеристиках вольфрамово-медных электродов. Чрезвычайно высокая температура плавления вольфрама (3410 °C) и его твёрдость обеспечивают вольфрамово-медным электродам отличную термостойкость и износостойкость. В условиях высоких температур, например, при работе высоковольтных разрядных электродов, где мгновенная температура контактного материала может достигать тысяч градусов Цельсия, вольфрам сохраняет основную форму и структурную целостность электрода, предотвращая размягчение и деформацию под воздействием высоких температур. Кроме того, высокая твёрдость делает электрод менее подверженным износу при обработке высокотвёрдых заготовок, например, при электроэрозионной обработке твёрдых сплавов, обеспечивая точность обработки.

Медь, благодаря своей превосходной электро- и теплопроводности, обеспечивает вольфрамово-медным электродам такие преимущества, как быстрое рассеивание тепла и эффективная электропроводность. Во время электроэрозионной обработки частые разряды между электродом и заготовкой генерируют большое количество тепла. Медь может быстро отводить это тепло, снижая температуру электрода, уменьшая термическую деформацию и термическую усталость, а также продлевая срок службы электрода. Хорошая электропроводность обеспечивает стабильный процесс разряда и повышает эффективность обработки. Когда вольфрамовый порошок и медный порошок смешиваются в определенном соотношении, они дополняют и синергетически действуют, определяя эксплуатационные характеристики вольфрамово-медного электрода. Подходящее соотношение вольфрама и меди обеспечивает оптимальный баланс между прочностью, твердостью, электро- и теплопроводностью, а также стойкостью к абляции. Например, электроды для контактной сварки обычно требуют более высокой твердости и проводимости, и содержание вольфрама может быть соответствующим образом увеличено.

#### **2.4.1 Требования к вольфрамовому порошку**

Вольфрамово-медные электроды имеют решающее значение для обеспечения структурной стабильности и производительности в процессе композитного производства. Эти требования включают чистоту, размер частиц и морфологию. Чистота имеет первостепенное значение, требуя содержания примесей ниже 0,1%, в частности кислорода, углерода и железа. Избыточное

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

количество примесей может ослабить границы зерен и снизить проводимость, влияя на производительность электрода. Международные стандарты, такие как ASTM B702, предусматривают, что высокочистый вольфрамовый порошок должен быть получен путем восстановления водородом или химического осаждения с содержанием кислорода ниже 0,05%. Размер частиц является еще одним ключевым параметром. Размер частиц обычно составляет от 1 до 20 микрон. Мелкие частицы вводятся с помощью нанотехнологий для повышения однородности зерна и механической прочности, в то время как крупные частицы (>20 микрон) используются для грубой обработки электрода. Выбор размера частиц зависит от области применения. Морфология требует сферического или почти сферического вольфрамового порошка для уменьшения пористости и увеличения плотности спекания. Анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии показывает, что сферические порошки обладают лучшей текучестью, чем нерегулярные порошки, и повышают эффективность заполнения примерно на 15%. Химическая стабильность требует, чтобы вольфрамовый порошок выдерживал кислые и щелочные среды для предотвращения окисления в процессе приготовления, а толщина поверхностного оксидного слоя должна контролироваться ниже 10 нм. Текучесть, измеренная методом расхода с использованием эффекта Холла, лучше, чем 20 с/50 г, что обеспечивает равномерное смешивание порошка. Насыпная плотность вольфрамового порошка влияет на уплотнение и должна быть согласована с медным порошком для снижения риска расслоения. Процессы приготовления, такие как плазменная сфероидизация или механическое легирование, могут оптимизировать распределение размеров частиц. В будущем высокочистые нановольфрамовые порошки могут улучшить микроструктурную однородность электродов, что делает их пригодными для высокоточных применений, таких как микроэлектронная упаковка и устройства 5G.

#### 2.4.2 Требования к медному порошку

Вольфрамово-медных электродах основное внимание уделяется проводимости и заполняющим свойствам, что обеспечивает электрические и тепловые возможности композитного материала. Чистота является основным требованием. Содержание примесей в медном порошке должно быть менее 0,05%, а содержание кислорода должно контролироваться на уровне ниже 0,03%. Избыток кислорода может привести к образованию оксида меди, что снижает проводимость и смачиваемость. Электролитический медный порошок или распыленный медный порошок получают путем распыления высокочистого электролита или инертного газа и соответствуют стандартам ASTM B413. Размер частиц обычно составляет от 5 до 15 микрон. Мелкий размер частиц повышает эффективность заполнения, в то время как крупный размер частиц подходит для быстрого спекания. Он должен соответствовать размеру частиц вольфрамового порошка, а соотношение размеров частиц должно контролироваться в диапазоне от 1:2 до 1:3 для оптимизации распределения фаз.

Медный порошок должен иметь сферическую или близкую к сферической форму, чтобы минимизировать пористость и улучшить текучесть. Скорость потока по эффекту Холла должна быть лучше, чем 15 с/50 г, насыпная плотность должна быть приблизительно 4-6 г/см<sup>3</sup>, и порошок

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

должен быть уплотнен скоординированным образом с вольфрамовым порошком. Химическая стабильность требует поверхностного оксидного слоя толщиной менее 5 нм, чтобы предотвратить образование пор во время спекания. Обработка поверхности (например, органическое покрытие) может повысить стойкость к окислению. Электропроводность должна приближаться к чистой меди ( $5,8 \times 10^7$  См/м), а теплопроводность должна быть приблизительно 400 Вт/м·К для поддержания характеристик электрода. Процессы подготовки, такие как распыление водой или газом, могут влиять на свойства порошка. Будущие усилия, такие как использование ультрадисперсных медных порошков или легирования (например, Cu-Ag), могут улучшить смачиваемость и проводящую стабильность, что делает их пригодными для высокоточных применений.

### 2.4.3 Стандарты предварительной обработки сырья

Вольфрамово-медные электроды разработаны для обеспечения равномерного смешивания порошков и контролируемых процессов подготовки, которые напрямую влияют на качество композитного материала. Сушка является критически важным этапом. Вольфрамовые и медные порошки необходимо сушить в вакууме или среде инертного газа (например, аргона) для предотвращения образования пор во время спекания. Равномерность смешивания достигается с помощью шаровой мельницы или V-образного смесителя. Распределение размеров частиц после смешивания контролируется в пределах  $\pm 5\%$ , а фазовое равновесие подтверждается рентгеновской дифракцией (РФА).

Классификация размера частиц осуществляется просеиванием, при этом размер сита регулируется в соответствии с требованиями к размеру частиц для удаления крупных или сверхмелких частиц, а стандартное отклонение распределения размера частиц составляет менее 10%. Обработка поверхности включает раскисление или нанесение покрытия, а оксидный слой удаляется восстановлением водородом. Текучесть порошка проверяется методом Холла со значением лучше, чем 20 с/50 г, что гарантирует равномерное прессование. Хранение и транспортировка требуют герметичной упаковки, защищенной от света и влаги, для предотвращения окисления. Стандарты предварительной обработки должны соответствовать ISO 13320 и ASTM B214. В будущем автоматизированная сортировка и мониторинг в реальном времени повысят точность предварительной обработки и оптимизируют характеристики электрода.



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Глава 3: Физические и химические свойства вольфрамово-медных электродов

Физические и химические свойства вольфрамово-медных электродов обусловлены синергетическим эффектом вольфрама и меди, объединяя основные преимущества двух металлов. С точки зрения физических свойств, его плотность увеличивается с увеличением содержания вольфрама и в целом остается на высоком уровне; температура плавления поддерживается на высоком уровне из-за характеристик высокой температуры плавления вольфрама, который намного превосходит чистую медь и может выдерживать мгновенный тепловой удар в высокотемпературных средах, не легко деформируясь. Электро- и теплопроводность превосходны, и он может эффективно проводить ток и быстро рассеивать тепло, выделяющееся во время работы, эффективно избегая потерь, вызванных локальным перегревом. С точки зрения механических свойств, он обладает умеренной твердостью и высокой прочностью на сжатие, принимая во внимание определенную степень ударной вязкости, и его нелегко сломать при механическом ударе. Кроме того, его коэффициент линейного расширения низкий, а его термическая стабильность превосходна. Даже в условиях больших перепадов температур размер может оставаться стабильным, что делает его пригодным для сценариев прецизионной обработки со строгими требованиями к точности.

#### 3.1 Физические свойства вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медные электроды, такие как плотность, коэффициент теплового расширения, электропроводность и теплопроводность, обеспечивают их превосходные эксплуатационные характеристики в широком спектре применений. Эти свойства непосредственно влияют на стабильность и эффективность электрода при электроэрозионной обработке, сварке и корпусировании микроэлектроники. Физические свойства вольфрамово-медных электродов обусловлены сочетанием свойств вольфрама и меди: вольфрам обеспечивает высокую температуру плавления и механическую прочность, а медь – высокую электро- и теплопроводность. Оптимизация микроструктуры методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации обеспечивает равномерное распределение фаз и низкую пористость. Эти комбинированные характеристики позволяют вольфрамово-медным электродам сохранять надежность при высоких температурах, больших токах и в сложных условиях.

##### 3.1.1 Плотность вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медные электроды являются важным показателем их физических свойств. Он отражает плотность и пористость внутри материала и напрямую влияет на механическую прочность, электропроводность и теплопроводность. Характеристики плотности определяются соотношением вольфрама и меди в композите и оптимизацией процесса приготовления. Высокая плотность вольфрама и низкая плотность меди уравниваются посредством определенного соотношения, образуя композитный материал с определенными массовыми и объемными свойствами. Плотность определяет износостойкость и сопротивление деформации электрода в процессе обработки. В микроэлектронике правильная плотность помогает соответствовать

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подложке и снизить концентрацию напряжений. Процессы приготовления, такие как порошковая металлургия и вакуумная инфильтрация, существенно влияют на однородность конечной плотности, контролируя температуру и давление спекания. Более низкая пористость обычно соответствует более высоким значениям плотности, что улучшает общие характеристики материала.

Измерение и контроль плотности имеют решающее значение при производстве вольфрамомедных электродов, влияя на их эксплуатационные характеристики, такие как скорость съема материала при электроискровой обработке или эффективность терморегулирования при сварке. Различные сценарии применения могут потребовать корректировки соотношения вольфрама и меди для оптимизации характеристик плотности. Например, электроды с высокой плотностью больше подходят для случаев, требующих высокой прочности, в то время как электроды с меньшей плотностью могут использоваться для облегченных конструкций. Распределение фаз и компактность микроструктуры являются ключевыми факторами, определяющими плотность, и будущие исследования могут дополнительно улучшить контролируемость плотности за счет новых процессов. В этом разделе будут более подробно рассмотрены методы расчета плотности и проанализирована их роль в оптимизации производительности.

### 3.1.1.1 Метод расчета плотности

Расчет плотности — это научный подход к определению плотности вольфрамомедных электродов. Он включает в себя как экспериментальные измерения, так и теоретические выводы, направленные на точную оценку внутренней компактности и пористости материала. Обычно используемый метод — метод Архимеда, который измеряет разницу масс между электродом на воздухе и в жидкости и объединяет ее с объемом для расчета плотности. Этот метод использует плавучесть объекта в жидкости. Сухая масса электрода сначала взвешивается, затем погружается в определенную жидкость (например, в дистиллированную воду). Измеряется разница масс после погружения, и объем косвенно рассчитывается с помощью формулы плавучести. Затем плотность рассчитывается как отношение массы к объему. Этот метод подходит для образцов электродов неправильной формы. Важно гарантировать, что жидкость не вступает в химическую реакцию с материалом, и контролировать температуру, чтобы минимизировать ошибки.

Другой подход – теоретический расчёт, использующий правила смешивания для оценки общей плотности композитного материала на основе объёмных долей и соответствующих плотностей вольфрама и меди. Этот метод требует точных данных о соотношении компонентов и предполагает, что вольфрам и медь не претерпевают значительных изменений объёма в процессе композитирования. Плотность представляет собой средневзвешенное значение плотностей компонентов. Расчёт должен учитывать равномерность распределения фаз. Фактические измеренные значения могут отличаться от теоретических из-за пористости или микроскопических дефектов, что требует корректировки посредством микроскопического анализа. Теоретические расчёты подходят для предварительного проектирования и оптимизации процесса, но экспериментальные результаты требуют проверки.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Кроме того, для неразрушающего контроля пористости электродов и распределения плотности можно использовать рентгеновскую томографию (РКТ) или ртутный анализ. Эти методы оценивают плотность внутренней структуры посредством реконструкции изображений или анализа проникновения под давлением и подходят для электродов со сложной геометрией. Выбор метода расчёта зависит от условий эксперимента и требований к точности, и для повышения надёжности часто комбинируют несколько методов.

### 3.1.1.2 Соотношение между плотностью и составом

Соотношение между плотностью и составом является ключом к пониманию физических свойств вольфрамово-медных электродов, отражая влияние соотношения вольфрама и меди на плотность и распределение массы материала. Плотность вольфрамово-медных электродов в основном определяется соотношением их компонентов. Вольфрам имеет более высокую плотность, чем медь. Увеличение содержания вольфрама обычно приводит к увеличению общей плотности, в то время как более низкая плотность меди играет разбавляющую роль при высоком содержании меди. Соотношение составов точно контролируется с помощью порошковой металлургии или процессов вакуумной инфильтрации. Например, в распространенных соотношениях WCu 70/30 и WCu 80/20 доминируют характеристики высокой плотности вольфрама, в то время как заполняющий эффект меди оптимизирует однородность микроструктуры. Изменения состава напрямую влияют на распределение фаз. Вольфрам обеспечивает структурную поддержку как материал каркаса, а медь заполняет поры в виде жидкой фазы. Регулировка соотношения изменяет пористость и плотность материала, тем самым влияя на показатели плотности.

Зависимость плотности от состава также тесно связана с процессом приготовления. В порошковой металлургии соотношение размеров частиц и однородность смешивания порошков вольфрама и меди определяют равномерность распределения компонентов. Температура и давление спекания дополнительно влияют на смачивающее и заполняющее действие меди, влияя на конечную плотность. При вакуумной инфильтрации пористость вольфрамового каркаса и глубина проникновения меди напрямую связаны с соотношением компонентов. Высокое содержание вольфрама может привести к недостаточному заполнению пор и снижению плотности, в то время как высокое содержание меди повышает эффективность заполнения. Микроструктурный анализ показывает, что незначительные изменения соотношения компонентов приведут к изменению площади поверхности раздела фаз, что скажется на общей плотности материала. Теоретически, соотношение между плотностью и составом может быть получено с помощью модели средневзвешенного значения, в которой вклад плотности каждого компонента взвешивается по объемной доле, но фактическое значение зависит от пористости и сцепления на границе раздела и требует проверки в сочетании с экспериментами.

Кроме того, на соотношение состава и плотности влияют примеси и добавки. Небольшие количества примесей могут изменить свойства интерфейса и повлиять на стабильность плотности. Различные области применения предъявляют различные требования к составу и плотности. Например, электроды высокой плотности больше подходят для износостойких изделий, в то время

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

как электроды низкой плотности используются для облегченных конструкций.

### 3.1.1.3 Влияние плотности на приложения

Плотность — один из основных эксплуатационных параметров вольфрамово-медных электродов. Её уровень и распределение напрямую определяют применимость, стабильность и эффективность электрода в различных условиях эксплуатации. Небольшие различия в плотности, особенно в таких высокотехнологичных областях, как электроэрозионная обработка, сварка и корпусирование микроэлектроники, могут привести к значительным колебаниям производительности, что скажется на общем результате процесса.

## 1. Соотношение между плотностью и механическими свойствами и их влияние на применение

Вольфрамово-медные электроды положительно коррелируют с их механической прочностью и износостойкостью. Высокоплотные электроды обладают чрезвычайно низкой внутренней пористостью, а частицы вольфрама и фазы меди прочно связаны, образуя плотную микроструктуру. Это позволяет материалу равномерно распределять напряжения при воздействии внешних сил или высокотемпературных ударов, снижая вероятность локального разрушения или деформации. Эта характеристика особенно важна для электроэрозионной обработки: высокочастотный разряд между электродом и заготовкой генерирует мгновенный высокотемпературный и механический удар. Высокоплотные электроды, обладая более высокой прочностью на сжатие и деформационной стойкостью, способны эффективно выдерживать ударную нагрузку во время разряда, уменьшая образование следов абляции поверхности и риск локального разрушения из-за рыхлой структуры. Например, при прецизионной обработке высокопрочных материалов, таких как литейная сталь, высокоплотные вольфрамово-медные электроды обеспечивают стабильную точность формы и равномерный разрядный зазор, тем самым улучшая качество поверхности и размерную точность заготовки, а также продлевая срок службы одного электрода. Напротив, электроды с низкой плотностью имеют больше внутренних пор, что уменьшает площадь контакта между вольфрамом и медью и снижает общую износостойкость материала. Этот тип электродов больше применим для задач обработки с низкой нагрузкой и коротким циклом, таких как электроэрозионная обработка небольших пластиковых деталей, которая предъявляет относительно низкие требования к точности и долговечности, и может быть отражено преимущество в стоимости электродов с низкой плотностью. Однако в сценариях длительной обработки с высокой энергией поры электродов с низкой плотностью станут точками концентрации напряжений. По мере увеличения времени обработки вокруг пор, вероятно, будут образовываться микротрещины, что в конечном итоге приведет к выходу электрода из строя, увеличению частоты его замены и производственных затрат.

## 2. Влияние плотности на теплопроводность и оптимизацию процесса

Плотность является основным фактором, влияющим на теплопроводность электродов из

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамовой меди. Высокая плотность обычно соответствует лучшей эффективности теплопроводности. Внутри материала медная фаза служит основным проводником тепла, и непрерывность ее распределения напрямую зависит от плотности материала: в электродах с высокой плотностью медная фаза может более равномерно заполнять промежутки между частицами вольфрама, образуя непрерывную сеть теплопроводности, что позволяет теплу, выделяющемуся в зоне обработки (например, мгновенной высокой температуре во время электрического искрового разряда), быстро диффундировать внутрь электрода и отводиться через крепление оборудования, тем самым снижая риск локального перегрева. Эта эффективная способность рассеивания тепла имеет решающее значение для точности обработки - если тепло накапливается на поверхности электрода, это вызывает внезапное повышение локальной температуры, что может не только расплавить или испарить поверхностный материал электрода, вызывая потерю размера электрода, но и повлиять на стабильность разряда, приводя к таким дефектам, как прожоги и трещины на поверхности заготовки. Например, при точной обработке сложных криволинейных поверхностей, таких как лопатки авиационных двигателей, эффективные характеристики рассеивания тепла высокоплотными вольфрамово-медными электродами позволяют обеспечить температурную стабильность при длительной обработке, поддерживать постоянство параметров разряда и в конечном итоге достигать высокоточной формовки заготовки.

Электроды низкой плотности характеризуются прерывистым распределением фазы меди, а поры затрудняют теплопроводность, образуя «зону термического сопротивления» и снижая эффективность теплоотвода. При обработке с низкой мощностью этот дефект может быть неочевиден, но при высокоэнергетической электроэрозионной обработке (например, черновой обработке крупногабаритных форм) накопление тепла значительно увеличивает износ электрода, вынуждая процесс снижать энергию разряда во избежание перегрева, что косвенно снижает эффективность обработки. Поэтому в приложениях с жесткими требованиями к теплоотводу электроды высокой плотности являются ключевым выбором для повышения стабильности процесса.

### 3. Многочисленные роли плотности в сварочных процессах

В области сварки плотность вольфрамово-медных электродов напрямую определяет качество и эффективность сварки, влияя на электропроводность и возможности терморегулирования. Электроды высокой плотности имеют равномерное распределение медных фаз и более низкие значения сопротивления, что может обеспечить стабильный путь передачи тока для процесса сварки и снизить «тепло сопротивления», генерируемое чрезмерным сопротивлением. Это дополнительное тепло не только приводит к потере энергии, но и может привести к перегреву и деформации самого электрода, что влияет на стабильность контакта между электродом и деталью. Например, при контактной точечной сварке автомобильных кузовов электроды высокой плотности из вольфрамово-медной меди могут поддерживать стабильную подачу тока при высоких токах, обеспечивая концентрацию тепла и формирование ядра в точке сварки, предотвращая такие дефекты, как холодные швы или провары. В непрерывных процессах сварки,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

таких как шовная сварка, их превосходная электропроводность также может снизить колебания тока и обеспечить равномерность сварного шва.

Соотношение между плотностью и весом электрода также влияет на сварочное оборудование. Электроды высокой плотности тяжелее и подходят для стационарного автоматизированного сварочного оборудования — роботизированные манипуляторы или оснастка такого оборудования обладают высокой грузоподъемностью, а противовесы можно регулировать для обеспечения точного контакта электрода с заготовкой. Однако в портативном сварочном оборудовании (например, ручных сварочных пистолетах) слишком тяжелые электроды увеличивают нагрузку на оператора. В этом случае преимущество электродов низкой плотности более заметно. Их конструкция должна обеспечивать баланс веса и производительности, как правило, за счет оптимизации соотношения вольфрама и меди для снижения плотности при максимальном сохранении электро- и теплопроводности сердечника.

Кроме того, термоциклирование во время сварки предъявляет особые требования к плотности электродов. Электроды высокой плотности, благодаря своей плотной структуре и более равномерному тепловому расширению, менее подвержены растрескиванию из-за концентрации внутренних напряжений при многократном нагреве и охлаждении, что делает их пригодными для высокочастотной сварки (например, пакетной сварки на линиях по производству бытовой техники). Однако электроды низкой плотности могут подвергаться отслоению поверхности после длительного термоциклирования из-за концентрации напряжений вокруг пор, что сокращает срок их службы.

#### 4. Соотношение между плотностью и надежностью микроэлектронных корпусов

Корпусирование микроэлектроники предъявляет еще более строгие требования к плотности электродов из вольфрамовой меди. Основным требованием является достижение согласования коэффициентов теплового расширения и механической стабильности между электродом и подложкой. При корпусировании микросхем электроды должны быть прочно соединены с такими материалами, как кремниевые пластины и керамические подложки. Однако разные материалы имеют разные коэффициенты теплового расширения. Если плотность электрода слишком высокая, его общий коэффициент теплового расширения может значительно отличаться от коэффициента теплового расширения подложки. При циклическом изменении температуры на границе раздела между электродом и подложкой будут возникать значительные напряжения. Длительное накопление может привести к растрескиванию припоя, разрыву цепи и даже выходу из строя корпуса. Поэтому электроды из вольфрамовой меди для корпуса микроэлектроники должны точно контролировать плотность, чтобы поддерживать коэффициент теплового расширения в диапазоне, близком к коэффициенту теплового расширения подложки. Обычно используются конструкции со средней и высокой плотностью, обеспечивающие как структурную плотность для обеспечения передачи тока, так и снижение теплового напряжения за счет оптимизированного распределения пор (например, небольшого количества равномерно распределенных микропор) для обеспечения долговременной надежности. В то же время механическая стабильность электродов высокой

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

плотности имеет решающее значение при корпусировании микроэлектроники. В процессе корпусирования кристаллов электроды должны выдерживать механические нагрузки, возникающие при склеивании, упаковке и других процессах. Высокая прочность на сжатие электродов высокой плотности предотвращает деформацию или разрушение под воздействием внешних сил, обеспечивая точное совмещение электродов с выводами кристалла. Однако электроды низкой плотности с неравномерным распределением пор могут подвергаться локальному разрушению под действием давления при склеивании, что влияет на стабильность электрического соединения. Например, при высокочастотном корпусировании чипов 5G даже незначительная деформация электрода может привести к увеличению потерь сигнала при передаче.

## 5. Влияние плотности на стоимость производства и адаптацию сценария

Плотность также напрямую связана со стоимостью производства и сложностью обработки вольфрамово-медных электродов. Производство электродов высокой плотности требует более высоких давлений спекания, более длительного времени выдержки и даже вторичных процессов опрессовки для уменьшения внутренней пористости, что, несомненно, увеличивает энергопотребление оборудования и производственные циклы. В то же время обработка материалов высокой плотности (например, прецизионная шлифовка и резка проволокой) сложнее, а износ инструмента происходит быстрее, что еще больше увеличивает производственные затраты. Однако в сценариях высокотехнологичного применения (например, обработка прецизионных компонентов для авиационных двигателей) его преимущества в производительности достаточны, чтобы покрыть увеличение стоимости. Потери, вызванные отказом оборудования или утилизацией продукта, намного выше стоимости электрода, и долговечность электродов высокой плотности становится предпочтительным выбором. Процесс производства электродов низкой плотности относительно прост. Более низкие давления спекания и более короткое время обработки могут снизить затраты, но ограничения производительности делают его более подходящим для чувствительных к стоимости сценариев, не требующих экстремальных характеристик (например, для сварки недорогих компонентов бытовой электроники). Кроме того, в отдельных отраслях промышленности предъявляются особые требования к плотности: для снижения общего веса в авиационном оборудовании, как правило, выбирают вольфрамово-медные электроды низкой плотности для вспомогательных компонентов, сохраняя необходимую прочность при снижении веса за счет структурной конструкции; в то время как электроды для оборудования атомной энергетики требуют высокоплотной конструкции для защиты от старения материала и коррозии в условиях радиационного воздействия, а также для обеспечения долгосрочной стабильной работы.

### 3.1.2 Тепловые свойства вольфрамово-медных электродов

Тепловые свойства вольфрамово-медных электродов являются важной составляющей их физических свойств, охватывающих теплопроводность, коэффициент теплового расширения и высокотемпературную стойкость, которые напрямую влияют на производительность электрода в

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотемпературных средах и термоциклах. Теплопроводность в основном обеспечивается медной фазой. Высокая теплопроводность меди обеспечивает быструю передачу тепла из зоны обработки или эксплуатации наружу, снижая локальные температуры и предотвращая перегрев, деформацию или повреждение заготовки. Умеренная теплопроводность вольфрама и синергетический эффект медной фазы формируют общие возможности терморегулирования композитного материала, который подходит для сценариев высокой тепловой нагрузки при электроэрозионной обработке и сварке. Тепловые свойства также включают коэффициент теплового расширения. Низкие характеристики теплового расширения вольфрама и высокие характеристики теплового расширения меди уравниваются пропорциональной регулировкой. Коэффициент теплового расширения композита соответствует коэффициенту теплового расширения различных подложек для снижения теплового напряжения.

Высокотемпературная стойкость является основой тепловых характеристик. Высокая температура плавления вольфрама придает электроду стабильность при экстремально высоких температурах. Медная фаза заполняет поры в жидкой форме при высоких температурах, повышая теплостойкость и делая его пригодным для использования в дуговых условиях. Низкая пористость и равномерное распределение фаз в микроструктуре дополнительно оптимизируют путь теплопроводности, а процесс горячего изостатического прессования повышает эффективность теплопроводности интерфейса. Испытания на термическую усталость показывают, что вольфрамово-медные электроды сохраняют структурную целостность в широком диапазоне температур, что делает их пригодными для микроэлектронных корпусов и датчиков. В будущем функциональная градиентная конструкция или модификация поверхности могут дополнительно улучшить тепловые характеристики, чтобы выдерживать еще более высокие перепады температур или сложные требования к терморегулированию.

### 3.1.2.1 Теплопроводность

Теплопроводность является основным показателем тепловых характеристик вольфрамово-медных электродов. Она отражает способность материала передавать тепло и напрямую влияет на его характеристики в приложениях с высокой тепловой нагрузкой. Теплопроводность в основном обеспечивается медной фазой. Высокая теплопроводность меди обеспечивает быструю передачу тепла из зоны обработки или рабочей зоны наружу, предотвращая деформацию или повреждение заготовки, вызванные локальным перегревом. Умеренная теплопроводность вольфрама и синергетический эффект медной фазы формируют общую способность композиционного материала к тепловому регулированию, которая подходит для потребностей рассеивания тепла высокоэнергетического разряда при электроискровой обработке. В процессе подготовки порошковая металлургия или технология вакуумной инфильтрации оптимизируют путь теплопроводности, контролируя соотношение вольфрама и меди и условия спекания. Низкая пористость и равномерное распределение фаз в микроструктуре снижают тепловое сопротивление и повышают теплопроводность.

Теплопроводность также тесно связана с микроструктурой и составом электрода. Высокое

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

содержание меди (например, W/Cu 70/30) обычно соответствует более высокой теплопроводности. Непрерывная сеть медных фаз обеспечивает эффективный канал теплопроводности, в то время как вольфрамовый каркас сохраняет структурную стабильность при высоких температурах. В сварочных применениях более высокая теплопроводность обеспечивает равномерное распределение тепла, уменьшает зону термического влияния и улучшает качество соединения. В корпусировании микроэлектроники теплопроводность способствует рассеиванию тепла от кристалла, снижает рабочие температуры и продлевает срок службы. Процесс горячего изостатического прессования (ГИП) оптимизирует межфазное соединение за счет всенаправленного давления, что дополнительно повышает эффективность теплопроводности. Характеристики теплопроводности также зависят от факторов окружающей среды. Например, размягчение медной фазы при высоких температурах может немного снизить теплопередающую способность, но вспомогательная роль вольфрама поддерживает общую стабильность. На практике оптимизация теплопроводности зависит от конкретных условий. Например, для высокопроизводительной обработки требуются электроды с более высокой теплопроводностью, в то время как облегченные конструкции могут жертвовать некоторой теплопроводностью ради снижения плотности. Испытания теплопроводности обычно проводятся с помощью лазерной вспышки или методов стационарного теплового потока. Дальнейшее улучшение теплопроводности может быть достигнуто за счёт внедрения нанотехнологий или функционального градиентного дизайна (например, увеличения содержания меди изнутри наружу) для обеспечения более высоких тепловых нагрузок, например, в устройствах 5G или высокотемпературных датчиках.

### 3.1.2.2 Коэффициент теплового расширения

Коэффициент теплового расширения (КТР) является важнейшим компонентом тепловых характеристик вольфрамово-медных электродов. Он отражает способность материала изменять объем при колебаниях температуры и напрямую влияет на его совместимость с подложкой и стабильностью при термоциклировании. КТР в первую очередь определяется свойствами вольфрама и меди. Низкий КТР вольфрама (приблизительно  $4,5 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ) и высокий КТР меди (приблизительно  $17 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ) уравниваются регулированием соотношения компонентов в композите. КТР вольфрамово-медных электродов обычно контролируется в пределах  $6-8 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ . Это значение близко к значению для кремниевых (приблизительно  $2,6 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ) или алюмооксидных керамических (приблизительно  $7 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ) подложек. Это снижает концентрацию напряжений во время термоциклирования, предотвращая деформацию или разрушение корпуса, что делает его особенно подходящим для корпусирования микроэлектроники и применения в датчиках. Регулировка КТР зависит от соотношения W/Cu и технологии изготовления. Например, соотношение W/Cu 85/15 демонстрирует превосходные характеристики при высоких температурах. Тепловое моделирование подтвердило его низкие характеристики напряжений, а совместимость с тепловым расширением с кремниевой подложкой находится в пределах 10%. Равномерное распределение фаз и низкая пористость в микроструктуре дополнительно минимизируют дифференциальное тепловое расширение. Процесс горячего изостатического прессования улучшает термическую стабильность интерфейса, снижая риск микротрещин при

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термоциклировании. В электроэрозионной обработке умеренный коэффициент теплового расширения обеспечивает способность электрода восстанавливаться после высокоэнергетического разряда. При сварке согласование теплового расширения снижает напряжение в соединении и повышает долговечность. Коэффициент теплового расширения также зависит от температуры окружающей среды и длительного использования. Размягчение фазы меди при высоких температурах может немного увеличить расширение, но поддержка вольфрамового каркаса сохраняет общую стабильность.

### 3.1.2.3 Высокая термостойкость

Высокотемпературная стойкость является важной характеристикой тепловых свойств вольфрамово-медных электродов. Она отражает структурную стабильность материала и способность сохранять производительность в экстремально высокотемпературных средах и напрямую определяет его пригодность для применений с высокой тепловой нагрузкой. Эта высокотемпературная стойкость в первую очередь обеспечивается вольфрамом, температура плавления которого составляет 3422 °C, что является самой высокой из всех металлов. Это свойство позволяет вольфрамово-медным электродам сохранять структурную целостность во время дугового разряда или высокотемпературной сварки, сопротивляясь плавлению или деформации. В композитной структуре вольфрам действует как каркасный материал, образуя высокопрочную, термостабильную сеть. Медная фаза заполняет поры в жидкой форме при высоких температурах, повышая общую термостойкость материала, что делает его пригодным для электроэрозионной обработки высокотвердых материалов или операций отключения в высоковольтных выключателях. Стойкость к высоким температурам также зависит от микроструктуры и процесса подготовки. Низкая пористость и равномерное распределение фаз достигаются с помощью процессов порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, что снижает концентрацию термических напряжений при высоких температурах. Горячее изостатическое прессование (ГИП) дополнительно оптимизирует межфазное соединение и повышает сопротивление термической усталости. В электроэрозионной обработке стойкость к высоким температурам снижает абляцию на поверхности электрода при высокоэнергетических разрядах, продлевая срок службы. На стойкость к высоким температурам также влияет медная фаза. Медь имеет низкую температуру плавления (1083 °C) и может размягчаться при экстремально высоких температурах, но поддержка вольфрамового скелета сохраняет структурную целостность. Обработка поверхности дополнительно повышает стойкость к окислению и продлевает срок службы во влажных или промышленных средах.

## 3.2 Функциональные характеристики медно-вольфрамового электрода

Вольфрамово-медные электроды обладают основной ценностью в практическом применении, включая электропроводность, стойкость к дуговой эрозии, механическую прочность и возможности терморегулирования. Эти свойства обусловлены композитными свойствами вольфрама и меди. Благодаря оптимизации процесса подготовки и микроструктуры вольфрамово-медные электроды демонстрируют многофункциональность в электроэрозионной обработке,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сварке и корпусировании микроэлектроники. Электропроводность обеспечивается медной фазой, что гарантирует эффективный перенос тока; стойкость к дуговой эрозии поддерживается высокой температурой плавления и твердостью вольфрама, что снижает поверхностные потери; механическая прочность достигается за счет равномерного распределения фаз и низкой пористости, что позволяет работать при высоких нагрузках; а терморегулирование сочетает теплопроводность меди со стабильностью вольфрама для оптимизации производительности в высокотемпературных средах.

### 3.2.1 Проводящие свойства вольфрамово-медных электродов

Вольфрамово-медные электроды являются основой их функциональной ценности, напрямую определяя их электрическую эффективность и долговременную надежность в таких областях, как электроэрозионная обработка, сварка и корпусирование микроэлектроники. Эта уникальная производительность обусловлена синергетическим эффектом вольфрама и меди: медь, естественно проводящий металл, образует непрерывную сеть передачи тока внутри электрода, обеспечивая путь с низким сопротивлением для потока заряда; в то время как высокая температура плавления и высокая прочность вольфрама образуют прочную структуру, сохраняя структурную стабильность электрода в жестких условиях эксплуатации, таких как высокая температура и механическое напряжение, и предотвращая перегрев или деформацию фазы меди, которые могут привести к разрыву токопроводящей дорожки. Такое сочетание двух сохраняет проводящие преимущества меди, одновременно устраняя недостатки чистой меди в прочности и высокотемпературной стойкости, что делает вольфрамово-медные электроды идеальным выбором для сложных электрических сред.

### Микроструктурные основы электропроводности

Вольфрамово-медные электроды тесно связаны с их микроструктурой, при этом основное внимание уделяется распределению фазы меди и качеству связи на границе раздела вольфрам-медь. Такие процессы, как порошковая металлургия или вакуумная инфильтрация, позволяют точно контролировать микроструктуру. Порошковая металлургия включает смешивание вольфрамового и медного порошков в определенной пропорции, прессование и спекание, в результате чего медная фаза равномерно заполняет промежутки между частицами вольфрама, образуя плотную структуру «вольфрамовый каркас – медный наполнитель». Вакуумная инфильтрация заключается в инфильтрации жидкой меди в предварительно спеченный вольфрамовый каркас при высоких температурах с использованием капиллярного эффекта для достижения равномерного распределения фазы меди. Оба процесса направлены на уменьшение внутренней пористости и дефектов на границе раздела. Пористость может блокировать ток, приводя к резкому увеличению локального сопротивления, в то время как плохое соединение на границе раздела может формировать «контактное сопротивление», увеличивая сопротивление переносу заряда. Таким образом, низкая пористость и равномерное распределение фаз являются предпосылками высокой проводимости. Они обеспечивают равномерное распределение тока внутри электрода, предотвращая концентрацию тепла и флуктуации тока, вызванные локальными

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

различиями в сопротивлении.

Соотношение вольфрама и меди является ключевым параметром для регулирования электропроводности. Теоретически, чем выше содержание меди, тем лучше электропроводность, поскольку большее количество медных фаз может образовывать более плотную проводящую сеть; однако слишком высокое содержание меди ослабит поддерживающую роль вольфрамового каркаса, что приведет к размягчению и легкой деформации электрода при высоких температурах. На практике необходимо сбалансировать соотношение этих двух компонентов в соответствии с потребностями конкретного сценария: например, более высокое содержание меди будет выбрано для сценариев, ориентированных на эффективность электропроводности, в то время как доля вольфрама будет соответствующим образом увеличена для сценариев, требующих учета высокотемпературной стабильности. Регулирование этого соотношения, по сути, направлено на поиск баланса между «проводимостью» и «структурной стабильностью» для адаптации к основным требованиям различных условий эксплуатации.

### **Влияние проводящих свойств на сценарии применения**

В электроэрозионной обработке электропроводность напрямую влияет на точность обработки и срок службы электрода. В процессе обработки между электродом и заготовкой генерируются высокочастотные разряды, образующие высокотемпературный расплавленный материал, и стабильная передача тока является необходимым условием для обеспечения равномерной энергии разряда. Вольфрамово-медные электроды с высокой проводимостью способны равномерно распределять плотность тока, предотвращая явление «переразряда», вызванное избыточным локальным сопротивлением, то есть аномально высокие температуры, вызванные локальной концентрацией тока, которые могут привести к абляции поверхности электрода или образованию дефектов, таких как раковины и трещины, на поверхности заготовки. В то же время, отличная проводимость позволяет снизить потери энергии, преобразовать больше электрической энергии в тепловую, необходимую для обработки, и повысить эффективность обработки; а стабильная передача тока также может снизить «электрохимическую коррозию» электрода, снизить скорость потерь и продлить срок службы.

В области сварки качество электропроводности напрямую определяет стабильность качества сварки. Будь то контактная точечная сварка или шовная сварка, электрод должен эффективно передавать ток в зону сварки и расплавлять контактную поверхность заготовки посредством сопротивления, образуя расплавленное ядро. Вольфрамово-медные электроды с высокой электропроводностью обеспечивают стабильный выход тока в точке контакта электрода с заготовкой, предотвращая неравномерный нагрев, вызванный колебаниями сопротивления: недостаточный нагрев приводит к холодной сварке, а избыточный нагрев может проникнуть в заготовку или привести к прилипанию электрода. Кроме того, в процессе сварки сам электрод нагревается из-за сопротивления. При низкой электропроводности высокая температура электрода может вызвать окисление или деформацию поверхности, что еще больше ухудшает электропроводность и создает замкнутый цикл «перегрев, усугубляющий деградацию».

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

производительности». Низкое сопротивление электродов с высокой электропроводностью позволяет снизить самонагрев и поддерживать долгосрочную стабильность сварочных процессов.

Корпусирование микроэлектроники предъявляет более высокие требования к электропроводности. В соединении между кристаллом и подложкой электрод из вольфрамовой меди, выступающий в качестве проводящего межсоединения, должен обеспечивать низкое сопротивление и стабильную проводимость цепи для обеспечения целостности передачи сигнала. Высокочастотные, высокоскоростные электронные сигналы чрезвычайно чувствительны к изменениям сопротивления. Даже небольшие колебания сопротивления могут вызвать задержку или затухание сигнала. Поэтому электроды из вольфрамовой меди, используемые в корпусировании микроэлектроники, должны обладать чрезвычайно высокой проводимостью, а внутри не должно быть локальных областей с высоким сопротивлением, в противном случае они могут стать «узким местом» для передачи сигнала. В то же время, температурный цикл в среде корпуса приведет к расширению и сжатию материала. Если проводящие характеристики ослабнут из-за структурных изменений, это может привести к плохому контакту цепи и даже к выходу из строя оборудования. Для этого необходимо, чтобы проводящие характеристики электрода оставались стабильными при длительном использовании и не подвергались значительному влиянию окружающей среды.

### **Корреляция и значимость параметров электропроводности сердечника**

Проводимость, удельное сопротивление и токопроводящая способность являются основными параметрами для измерения проводящих свойств вольфрамово-медных электродов. Эти три параметра взаимосвязаны и имеют разные фокусы. Проводимость отражает способность материала проводить ток. Чем выше значение, тем лучше проводимость; удельное сопротивление является обратной величиной проводимости, которая напрямую отражает сопротивление передаче тока. В практических приложениях эти два параметра совместно определяют силу тока электрода при определенном напряжении, что, в свою очередь, влияет на эффективность выходной энергии. Токопроводящая способность описывает максимальный ток, который может непрерывно проходить через электрод без перегрева или структурного повреждения. Она связана не только с проводящими свойствами, но и тесно связана со способностью рассеивать тепло и высокой термостойкостью материала - высокая проводимость может уменьшить джоулево тепло при прохождении тока, а высокая термостойкость вольфрамового скелета обеспечивает структурную поддержку для проведения больших токов.

Баланс этих трёх параметров имеет решающее значение при проектировании вольфрамово-медных электродов. Например, в сильноточных приложениях необходимо поддерживать как высокую проводимость (для минимизации тепловыделения), так и высокую токонесущую способность (для предотвращения разрушения конструкции). Однако в прецизионной микроэлектронике большее внимание уделяется стабильности и однородности проводимости для обеспечения точной передачи сигнала. Глубокие исследования и контроль этих параметров являются основой оптимизации характеристик вольфрамово-медных электродов и технической

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

гарантией их адаптации к различным высокотехнологичным приложениям.

### 3.2.1.1 Проводимость

Проводимость является основополагающим показателем проводящих свойств электродов из вольфрама и меди, отражая способность материала переносить заряд и напрямую влияя на его эффективность в электрических применениях. Проводимость в первую очередь обеспечивается медной фазой, высокая проводимость которой обеспечивает эффективную передачу тока внутри электрода, образуя непрерывную проводящую сеть. Проводимость вольфрама ниже, чем у меди, но благодаря оптимизированным композитным процессам (например, соотношение WCu 70/30) его проводимость может приближаться к проводимости чистой меди, что соответствует высоким требованиям к току электроэрозионной обработки и низкому сопротивлению сварки. Равномерное распределение медной фазы в микроструктуре снижает колебания сопротивления и повышает стабильность разряда. Это особенно актуально в прецизионных приложениях обработки (например, микроформ), где проводимость напрямую определяет точность обработки и качество поверхности.

Достижение высокой электропроводности зависит от производственного процесса. Порошковая металлургия контролирует смачивание и заполнение медью за счет температуры и давления спекания. Вакуумная инфильтрация оптимизирует фазовый интерфейс за счет проникновения жидкой меди, уменьшая пористость и минимизируя эффекты рассеяния. Горячее изостатическое прессование (ГИП) дополнительно улучшает межфазную связь и улучшает постоянство электропроводности. Электропроводность также зависит от соотношения компонентов состава. Высокое содержание меди (например, WCu 60/40) обычно обеспечивает более высокую электропроводность и подходит для высокоэффективной обработки, в то время как высокое содержание вольфрама (например, WCu 90/10) хорошо работает, когда приоритетом является износостойкость. На практике высокая электропроводность обеспечивает стабильный дуговой разряд, снижает потери энергии и продлевает срок службы электродов. В будущем внедрение наномедного порошка или модификация поверхности (например, серебрение) может дополнительно улучшить электропроводность для адаптации к более высоким токам или высокочастотным приложениям, таким как оборудование 5G и передача электроэнергии.

### 3.2.1.2 Удельное сопротивление

Удельное сопротивление является еще одним важным показателем проводящих свойств вольфрамово-медных электродов. Оно отражает сопротивление материала электрическому току и напрямую влияет на эффективность передачи электроэнергии и генерации тепла. Удельное сопротивление в первую очередь определяется композитными свойствами вольфрама и меди. Низкое удельное сопротивление меди обеспечивает эффективный путь тока, в то время как высокое удельное сопротивление вольфрама может увеличить общий импеданс при высоких отношениях. Благодаря оптимизации отношения удельное сопротивление вольфрамово-медных электродов эффективно снижается почти до уровня чистой меди, что делает их подходящими для

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

применений, требующих низких потерь энергии. Низкая пористость и равномерное распределение фаз в микроструктуре уменьшают рассеяние электронов и улучшают постоянство удельного сопротивления, что особенно заметно при передаче тока на большие расстояния. Контроль удельного сопротивления зависит от технологического процесса. Порошковая металлургия оптимизирует непрерывность фазы меди за счёт точного смешивания и спекания, а вакуумная инфильтрация дополнительно снижает удельное сопротивление, заполняя поры жидкой медью. Термическая обработка и процессы, проводимые под давлением (например, горячее изостатическое прессование), повышают плотность материала и уменьшают рост сопротивления, вызванный границами зёрен и дефектами. На удельное сопротивление также влияют температура и окружающая среда. Размягчение фазы меди при высоких температурах может немного повысить сопротивление, но поддержка вольфрамового каркаса сохраняет общую стабильность. При электроискровой обработке низкое удельное сопротивление снижает тепловые эффекты и улучшает качество поверхности. При сварке оно снижает сопротивление соединения и повышает эффективность.

### 3.2.1.3 Допустимая нагрузка по току

Токопроводящая способность является ключевым показателем проводящих свойств вольфрамово-медных электродов. Она отражает стабильность и долговечность электрода в условиях сильного тока и напрямую определяет его пригодность для приложений с высокими нагрузками. Токопроводящая способность в первую очередь поддерживается высокой проводимостью медной фазы и высокой температурой плавления вольфрама. Медь обеспечивает эффективный путь передачи тока, в то время как скелетная структура вольфрама сохраняет стабильность в условиях высокотемпературных дуг, предотвращая плавление или деформацию. Вольфрамово-медные электроды, благодаря оптимизированным соотношениям (например, WCu 80/20), работают исключительно хорошо при высоких токах. Низкая пористость и равномерное распределение фаз в микроструктуре снижают риск локального перегрева и повышают токопроводящую способность.

Достижение токопроводящей способности зависит от производственного процесса. Порошковая металлургия оптимизирует фазовый интерфейс, контролируя температуру и давление спекания. Вакуумная инфильтрация повышает плотность за счёт инфильтрации жидкой меди. Горячее изостатическое прессование дополнительно повышает механическую прочность и проводящую стабильность материала. Высокое содержание вольфрама (например, WCu 90/10) повышает стойкость к дуговой эрозии, что делает его пригодным для высокоэнергетических разрядов, в то время как высокое содержание меди (например, WCu 60/40) оптимизирует передачу тока с низким сопротивлением. В электроэрозионной обработке высокая токопроводящая способность обеспечивает удаление больших объёмов материала; при сварке она обеспечивает качество и долговечность соединения при высоких токах. На практике токопроводящая способность также зависит от температуры окружающей среды и условий теплоотвода. Хорошее терморегулирование (например, воздушное или жидкостное охлаждение) может улучшить предел токопроводящей способности. Повышение токопроводящей способности также зависит от

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

конструкции электрода. Сложная геометрия требует равномерного распределения тока, а обработка поверхности (например, гальванопокрытие) может повысить коррозионную стойкость и продлить срок службы.

### 3.2.2 Стойкость к дуговой эрозии вольфрамово-медных электродов

Характеристики вольфрамово-медного электрода, отражающие его долговечность и стабильность в условиях высокоэнергетического дугового разряда. Эта характеристика даёт ему значительные преимущества в таких областях, как электроэрозионная обработка (ЭЭО), контактная сварка и высоковольтная коммутация. Стойкость к дуговой эрозии обусловлена, прежде всего, высокой температурой плавления и твёрдостью вольфрама в сочетании с проводимостью и заполняющими свойствами меди. Оптимизация микроструктуры с помощью методов порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, наряду с низкой пористостью и равномерным распределением фаз, дополнительно повышает эрозионную стойкость. Под воздействием дуги может происходить испарение или плавление материала на поверхности электрода. Стойкость к дуговой эрозии напрямую влияет на точность обработки, срок службы и экономическую эффективность.

#### 3.2.2.1 Механизм дуговой эрозии

Механизм дуговой эрозии имеет основополагающее значение для понимания стойкости к дуговой эрозии вольфрамово-медных электродов. Он включает в себя тепловые эффекты и потерю материала, вызванные дуговым разрядом на поверхности материала. Дуговая эрозия начинается с разряда при высоком напряжении или большом токе, который генерирует высокотемпературную плазму (достигающую тысяч °C). Этот мгновенный нагрев поверхности электрода вызывает локальное плавление или испарение материала. В вольфрамово-медных электродах действие дуги сначала воздействует на медную фазу. Из-за своей низкой температуры плавления (1083 °C) жидкая медь может испаряться или распыляться при высоких температурах, обнажая вольфрамовый скелет. Высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) обеспечивает структурную стабильность при дуге, но может происходить поверхностное окисление или микроабляция, образуя ямки или трещины. Процесс эрозии также включает в себя термическое напряжение. Быстрый нагрев и охлаждение приводят к концентрации напряжений внутри материала, что может спровоцировать распространение микротрещин.

Механизм дуговой абляции также зависит от микроструктуры. Низкая пористость снижает концентрацию тепла, а равномерное распределение фаз (например, WCu 70/30) оптимизирует теплопроводность и снижает риск локального перегрева. Энергия дуги и частота разряда также влияют на степень абляции. Высокоэнергетические разряды увеличивают потерю материала, в то время как низкочастотные разряды могут вызывать лишь незначительные повреждения поверхности. Продукты абляции, такие как пары металла или оксиды, могут оседать на поверхности заготовки, что влияет на качество обработки. Процессы подготовки, такие как горячее изостатическое прессование (ГИП), повышают стойкость к абляции за счет увеличения плотности и уменьшения количества точек испарения в порах. В будущем, изучая распределение

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

энергии дуги и фазовые превращения материала, можно будет более подробно изучить механизм абляции и оптимизировать конструкцию электрода.

### 3.2.2.2 Оценка стойкости к абляции

Оценка эрозионной стойкости — это научный метод оценки стойкости к дуговой эрозии вольфрамово-медных электродов. Она включает в себя экспериментальные испытания и анализ характеристик для обеспечения надежности электродов в практическом применении. Эта оценка обычно проводится с помощью испытаний на дуговую эрозию, моделирующих условия высокоэнергетического разряда и регистрирующих потерю массы поверхности электрода, изменение размеров и морфологию поверхности. Скорость потери массы является ключевым показателем. Электроды с высокой эрозионной стойкостью демонстрируют значительно меньшую потерю массы, чем электроды из чистой меди или графита после длительных разрядов. Соотношение WCu 80/20 показывает исключительные результаты при 200 А. Изменение размеров измеряется с помощью 3D-сканирования для оценки степени износа вдоль профиля электрода. Низкая скорость износа указывает на высокую стойкость к эрозии. Анализ морфологии поверхности использует сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) для наблюдения за микроструктурой после эрозии, оценки глубины язв, плотности трещин и толщины оксидного слоя. Однородные следы эрозии отражают микроструктурную стабильность. Стойкость к эрозии также оценивается посредством испытаний на долговечность, которые фиксируют ухудшение характеристик электрода после определённого количества разрядов. Высокопрочные электроды сохраняют как проводимость, так и механическую прочность. Международные стандарты, такие как ISO 14132 и IEC 62271-102, содержат рекомендации по испытаниям, включая испытания на дугостойкость и оценку термической стабильности. Экспериментальные результаты показывают, что электроды с оптимизированными процессами изготовления (например, вакуумной инфильтрацией) могут снизить скорость абляции примерно на 30%.

Оценка стойкости к абляции также учитывает условия применения. При электроискровой обработке стойкость к абляции напрямую влияет на точность обработки и качество поверхности деталей, а при сварке — на частоту замены электродов.

### 3.2.2.3 Факторы, влияющие на устойчивость к абляции

Факторы, влияющие на сопротивление абляции, являются ключевыми для оптимизации характеристик вольфрамово-медных электродов и охватывают такие аспекты, как состав материала, микроструктура и условия эксплуатации. Соотношение компонентов в составе является основным фактором. Более высокое содержание вольфрама (например, WCu 90/10) увеличивает сопротивление абляции. Высокая температура плавления и твердость вольфрама защищают от дугового разряда. Высокое содержание меди (например, WCu 60/40) улучшает проводимость, но также снижает сопротивление абляции. Необходимо найти баланс между долговечностью и эффективностью. Микроструктура оказывает существенное влияние. Низкая пористость снижает точки концентрации тепла, а равномерное распределение фаз оптимизирует

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплопередачу. Процесс горячего изостатического прессования (ГИП) улучшает плотность и снижает скорость абляции примерно на 15%.

Производственный процесс имеет решающее значение для стойкости к абляции. В порошковой металлургии смачивающее действие меди определяется температурой и давлением спекания. При вакуумной инфильтрации глубина проникновения влияет на стабильность интерфейса. Высокотемпературная обработка снижает количество дефектов. Поверхностная обработка, такая как никелирование или нанесение покрытий, повышает стойкость к окислению и уменьшает повреждение поверхности, вызванное дугой. Рабочие условия включают энергию дуги и частоту разряда. Высокоэнергетический разряд (например, 500 А) усиливает абляцию, в то время как низкочастотный разряд снижает потери. Факторы окружающей среды, такие как влажность или окислительная атмосфера, могут ускорить деградацию поверхности, что требует оптимизации условий работы. Конструкция электрода также влияет на стойкость к абляции. Сложная геометрия требует равномерного распределения тока для минимизации локального перегрева.

### 3.3 Другие свойства вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медные электроды обладают уникальными преимуществами в различных областях применения, включая твердость, прочность, ударную вязкость, износостойкость, коррозионную стойкость, а также устойчивость к свариванию и адгезии. Эти свойства обусловлены композитными характеристиками вольфрама и меди. Микроструктура оптимизируется с помощью методов порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации для получения материала с низкой пористостью и высокой однородностью. Высокая температура плавления, твердость и химическая стабильность вольфрама обеспечивают высокую термостойкость и износостойкость, а высокая электропроводность, пластичность и теплопроводность меди улучшают электрические свойства и ударную вязкость. Совокупность других свойств напрямую влияет на долговечность, эффективность и надежность электрода при электроэрозионной обработке, сварке и корпусировании микроэлектроники.

#### 3.3.1 Твердость вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медный электрод является ключевым показателем его механических свойств, отражающих его долговечность и стойкость к деформации при высоких нагрузках и абразивном воздействии. Это свойство в первую очередь обеспечивается вольфрамом, высокая твердость которого доминирует в композитном материале. В сочетании с заполняющим эффектом меди, порошковая металлургия или вакуумная инфильтрация оптимизируют микроструктуру, что приводит к равномерному распределению фаз и низкой пористости. Твердость напрямую влияет на эрозионную стойкость электрода во время электроэрозионной обработки, его прочность на сжатие при сварке и стабильность его поверхности в микроэлектронных корпусах. Электроды высокой твердости могут выдерживать частые механические нагрузки или удары дуги, продлевая срок их службы при сохранении точности обработки. Достижение этой твердости зависит от соотношения вольфрама к меди и процесса подготовки. Более высокое содержание вольфрама

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(например, WCu 80/20 или WCu 90/10) приводит к более высокой твердости. Природная твердость вольфрама обеспечивает износостойкость, а пластичность меди заполняет поры при спекании, увеличивая общую плотность материала. Мелкие зерна в микроструктуре, оптимизированные методом горячего изостатического прессования (ГИП), дополнительно повышают твердость и снижают износ поверхности. Испытания твердости обычно проводятся по методам Виккерса или Роквелла. Результаты отражают поверхностную стойкость материала к вдавлению. Процессы подготовки, такие как высокотемпературное спекание и контроль давления, напрямую влияют на равномерность распределения твердости. На практике электроды с более высокой твердостью лучше работают при обработке высокотвердых материалов, сводя к минимуму деформацию электрода.

На твердость также влияют условия окружающей среды и эксплуатации. Хотя размягчение медной фазы при высоких температурах может немного снизить твердость, поддержка, обеспечиваемая вольфрамовым каркасом, поддерживает общую стабильность. Обработка поверхности, такая как полировка или нанесение покрытий, может дополнительно повысить твердость поверхности и коррозионную стойкость. В микроэлектронных корпусах твердость обеспечивает плотный контакт между электродами и подложками, предотвращая механические повреждения.

### 3.3.2 Прочность медно-вольфрамового электрода

Вольфрамово-медный электрод обладает ключевым показателем механических свойств, отражающим его стойкость к разрушению и деформации под высоким давлением и механическими нагрузками. Эта характеристика подкрепляется высокой прочностью на сжатие вольфрама и вязкостью меди. Оптимизация микроструктуры с помощью методов порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации позволяет получить композиционный материал с низкой пористостью и высокой плотностью. Прочность напрямую влияет на ударопрочность электрода при электроэрозионной обработке, его прочность на сжатие при сварке и структурную стабильность при корпусировании микроэлектроники. Высокопрочные электроды выдерживают нагрузки, возникающие при высокоэнергетических разрядах или механическом зажиме, что продлевает срок их службы и повышает эффективность обработки.

Достижение прочности зависит от соотношения вольфрама и меди и процесса подготовки. Высокое содержание вольфрама (например, WCu 85/15) значительно повышает прочность на сжатие. Вольфрамовый каркас обеспечивает высокопрочную структурную поддержку, а медное наполнение оптимизирует микроструктурную однородность и снижает концентрацию напряжений. Низкая пористость и равномерное распределение фаз в микроструктуре улучшаются благодаря горячему изостатическому прессованию (ГИП). Мелкий размер зерна повышает усталостную прочность материала, а испытания на прочность показывают, что прочность на сжатие может достигать относительно высокого уровня. Процессы подготовки, такие как контроль температуры спекания и давления, напрямую влияют на равномерность распределения прочности. Вакуумная инфильтрация улучшает межфазное сцепление за счет проникновения

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

жидкой меди.

Прочность также зависит от условий эксплуатации. Размягчение медной фазы при высоких температурах может немного снизить прочность, но поддержка вольфрамового каркаса сохраняет общую стабильность. В электроэрозионной обработке высокопрочные электроды выдерживают воздействие высокоэнергетических разрядов и уменьшают деформацию. В сварке они способствуют формированию соединений под высоким давлением. В корпусировании микроэлектроники прочность гарантирует, что электроды не разрушатся при термоциклировании, повышая надёжность. Обработка поверхности, такая как гальванопокрытие, может повысить коррозионную стойкость, косвенно повышая прочностные характеристики.

### 3.3.3 Прочность вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медный электрод обладает ключевыми механическими свойствами, отражающими его стойкость к разрушению и поглощению энергии при ударах или нагрузках. Это свойство в первую очередь обеспечивается медью, чья высокая пластичность и вязкость играют ключевую роль в композитных материалах. В сочетании с твёрдостью вольфрама, микроструктура оптимизируется методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, что приводит к получению материала с низкой пористостью и высокой однородностью. Вязкость напрямую влияет на трещиностойкость электрода при электроэрозионной обработке, его ударопрочность при сварке и его структурную гибкость при корпусировании микроэлектроники. Высокопрочные электроды способны поглощать механические и термические напряжения, уменьшать хрупкое разрушение и продлевать срок службы. В этом разделе подробно рассматриваются свойства вязкости вольфрамово-медных электродов и их роль в практическом применении.

Достижение вязкости зависит от соотношения вольфрама и меди и процесса подготовки. Более высокое содержание меди приводит к большей вязкости. Относительное удлинение меди при разрыве обеспечивает поглощение энергии, в то время как вольфрамовый скелет сохраняет структурную стабильность при высоких температурах. Низкая пористость и равномерное распределение фаз в микроструктуре оптимизируются путем горячего изостатического прессования. Мелкий размер зерна повышает сопротивление материала распространению трещин. Испытание на вязкость показывает, что материал проявляет некоторую пластическую деформацию под ударом. Процессы подготовки, такие как температура спекания и контроль давления, напрямую влияют на равномерность распределения вязкости. Вакуумная инфильтрация за счет проникновения жидкой меди улучшает межфазное сцепление и уменьшает точки концентрации напряжений. На вязкость также влияют условия эксплуатации. Размягчение медной фазы при высоких температурах повышает вязкость, но чрезмерные температуры могут привести к снижению прочности. Поддержка, обеспечиваемая вольфрамовым скелетом, поддерживает общий баланс. При электроискровой обработке электроды с высокой прочностью выдерживают воздействие высокоэнергетических разрядов и уменьшают образование трещин. При сварке они поглощают термические напряжения и повышают прочность соединений. В микроэлектронной корпусировке прочность предотвращает хрупкое разрушение при термоциклировании, повышая

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

надёжность. Обработка поверхности, такая как полировка, может уменьшить количество поверхностных дефектов и косвенно повысить прочность.

### 3.3.4 Износостойкость вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медные электроды – ключевой аспект их механических свойств, отражающий их износостойкость и стабильность поверхности при многократном трении или высоких нагрузках. Эта характеристика в первую очередь обеспечивается вольфрамом, высокая твёрдость и износостойкость которого являются определяющими для композитного материала. В сочетании с заполняющим эффектом меди, микроструктура оптимизируется методами порошковой металлургии или вакуумной инфльтрации, что приводит к получению материала с низкой пористостью и высокой однородностью. Износостойкость напрямую влияет на срок службы электрода при электроэрозионной обработке, его стойкость к контактному износу при сварке и целостность поверхности при корпусировании микроэлектроники. Высокоизносостойкие электроды выдерживают механическое трение или удары дуги, снижая потери материала и сохраняя точность обработки.

Износостойкость зависит от соотношения вольфрама и меди и процесса подготовки. Более высокое содержание вольфрама (например, WCu 80/20 или WCu 90/10) приводит к большей износостойкости. Естественная твёрдость вольфрама обеспечивает материалу износостойкую основу, в то время как пластичность меди заполняет поры во время спекания, увеличивая плотность микроструктуры. Мелкие зерна в микроструктуре оптимизируются с помощью процесса горячего изостатического прессования (ГИП), что дополнительно повышает износостойкость и снижает износ и эрозию поверхности. Испытания на износостойкость обычно используют испытания на трение и износ или испытания на дуговую абляцию для измерения изменений шероховатости поверхности и скорости потери массы. Процессы подготовки, такие как высокотемпературное спекание и контроль давления, напрямую влияют на равномерность распределения износостойкости. На практике электроды с высокой износостойкостью показывают исключительно хорошие результаты при обработке высокотвёрдых материалов (например, вольфрамовой стали), снижая деформацию электрода и частоту его замены.

Износостойкость также зависит от условий эксплуатации. Размягчение медной фазы при высоких температурах может немного снизить износостойкость, но вольфрамовая основа сохраняет общую стабильность. Обработка поверхности, такая как полировка или нанесение покрытий (например, CrN), может дополнительно повысить износостойкость и коррозионную стойкость поверхности. В микроэлектронных корпусах износостойкость обеспечивает сохранение качества поверхности электродов при многократной сборке и предотвращает механические повреждения.

### 3.3.5 Коррозионная стойкость вольфрамово-медных электродов

Ключевой эксплуатационной характеристикой вольфрамово-медных электродов является их адаптивность к окружающей среде, отражающая их стойкость к химическому воздействию и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

долговременную стабильность во влажных, кислых, щелочных или промышленных средах. Эта характеристика в первую очередь обеспечивается химической стабильностью вольфрама в сочетании с защитой поверхности меди и оптимизацией микроструктуры посредством процессов порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, что приводит к получению малопористого и высокооднородного материала. Коррозионная стойкость напрямую влияет на качество поверхности заготовки электрода при электроэрозионной обработке, ее стойкость к окислению при сварке и ее надежность в микроэлектронной упаковке. Электроды с высокой коррозионной стойкостью могут противостоять эрозии окружающей среды, уменьшать деградацию поверхности и продлевать срок службы. В этом разделе подробно обсуждаются характеристики коррозионной стойкости вольфрамово-медных электродов и их эксплуатационные характеристики.

Достижение коррозионной стойкости зависит от соотношения вольфрама к меди и процесса подготовки. Более высокое содержание вольфрама (например, WCu 85/15) приводит к большей коррозионной стойкости. Естественная химическая стабильность вольфрама обеспечивает материалу основу для кислото- и щелочестойкости, в то время как пластичность меди заполняет поры во время спекания, сокращая пути коррозии. Низкая пористость микроструктуры, оптимизированная с помощью горячего изостатического прессования (HIP), уменьшает каналы для проникновения коррозионных сред, а мелкий размер зерна повышает трещиностойкость материала. Испытание коррозионной стойкости обычно включает испытания в солевом тумане или погружении в кислоту, измерение скорости поверхностной коррозии и потери массы. Процессы подготовки, такие как вакуумная инфильтрация, улучшают плотность интерфейса за счет инфильтрации жидкой меди, что повышает коррозионную стойкость. На практике электроды с высокой коррозионной стойкостью отлично подходят для обработки химически активных материалов (таких как титансодержащие сплавы), уменьшая загрязнение заготовки.

На коррозионную стойкость также влияют условия эксплуатации. Влажная или окислительная атмосфера может ускорить коррозию медной фазы, но поддержка вольфрамового каркаса и обработка поверхности (например, никелирование или золочение) значительно повышают общую стабильность. В микроэлектронных корпусах коррозионная стойкость гарантирует, что электроды не окисляются во влажной среде, что повышает надёжность.

### 3.3.6 Противопригарные и антиадгезионные свойства вольфрамово-медных электродов

Вольфрамово-медные электроды играют ключевую роль в сварочных процессах. Они отражают способность электрода противостоять адгезии к соединяемым материалам при высоких температурах и давлении, а также чистоту поверхности после сварки. Эта характеристика, прежде всего, обусловлена высокотемпературной стойкостью вольфрама и поверхностными свойствами меди. Оптимизация микроструктуры с помощью методов порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации обеспечивает получение материала с низкой пористостью и высокой однородностью. Сопротивление сварке и адгезии влияют на эффективность электрода при контактной сварке, качество поверхности при точечной сварке и частоту замены при длительном

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

использовании. Электроды с высокой адгезионной стойкостью могут снизить адгезию шлака, улучшить качество сварного соединения и продлить срок службы сварного шва.

Достижение как стойкости к пайке, так и стойкости к адгезии зависит от соотношения вольфрама к меди и процесса подготовки. Более высокое содержание вольфрама (например, WCu 80/20) приводит к более высокой стойкости к адгезии. Высокая температура плавления и твердость вольфрама снижают адгезию во время расплавленного припоя, в то время как теплопроводность меди оптимизирует терморегулирование во время спекания и уменьшает поверхностные остатки. Низкая пористость микроструктуры, оптимизированная с помощью горячего изостатического прессования (ГИП), уменьшает каналы для проникновения шлака, в то время как мелкий размер зерна повышает устойчивость материала к деформации. Адгезионная стойкость обычно проверяется с помощью испытания цикла сварки, измеряющего площадь адгезии шлака и чистоту поверхности. Процессы подготовки, такие как вакуумная инфильтрация, улучшают плотность интерфейса за счет инфильтрации жидкой меди, что повышает стойкость к адгезии. На практике электроды с высокой стойкостью к адгезии превосходят при точечной или шовной сварке, снижая частоту очистки.

На стойкость к пайке и адгезии также влияют условия эксплуатации. Размягчение медной фазы при высоких температурах может увеличить риск адгезии, но поддержка и обработка поверхности вольфрамового каркаса значительно повышают общие эксплуатационные характеристики. При контактной сварке адгезионная стойкость обеспечивает плавное отделение электрода от детали, улучшая качество соединения. В корпусной микроэлектронике стойкость к пайке позволяет проводить многократную пайку без образования остатков.

### 3.4 Паспорт безопасности медно-вольфрамового электрода CTIA GROUP LTD

Вольфрамово-медный электрод – это металлокомпозитный материал, в основе которого лежат вольфрам и медь. Он изготавливается методом порошковой металлургии, вакуумной инфильтрации и другими методами. Он обладает превосходными свойствами как вольфрама, так и меди и широко используется в промышленности.

С точки зрения материала, высокая температура плавления вольфрама (3410 °C) и высокая прочность обеспечивают электроду превосходную термостойкость и структурную стабильность, позволяя ему сохранять форму и противостоять деформации в суровых условиях, таких как высокая температура и высокое давление. С другой стороны, высокая электро- и теплопроводность меди позволяет электроду эффективно передавать и рассеивать тепло, быстро рассеивая тепло, выделяющееся во время работы, и предотвращая локальный перегрев и снижение производительности. Это сочетание «прочный вольфрам, превосходная медь» позволяет электроду из вольфрама и меди преодолеть недостатки чистого вольфрама, связанные с его низкой электро- и теплопроводностью, и компенсировать недостаточную термостойкость чистой меди, что обеспечивает уникальные эксплуатационные преимущества.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вольфрамово-медные электроды можно гибко настраивать в зависимости от условий применения. Распространенные соотношения включают WCu70/30 и WCu80/20. Более высокое содержание меди улучшает электро- и теплопроводность, что делает их пригодными для применений, требующих высоких электрических характеристик. Более высокое содержание вольфрама улучшает термостойкость и механическую прочность, что делает их более подходящими для высокотемпературных и высоконапряжённых рабочих сред. Регулировка соотношения позволяет точно подобрать характеристики.

С точки зрения областей применения, вольфрамово-медные электроды играют ключевую роль в нескольких высокотехнологичных промышленных сценариях: в электроискровой обработке, в качестве разрядного электрода, он может точно обрабатывать высокопрочные материалы, такие как литейная сталь и твердый сплав, благодаря своей стабильной проводимости и стойкости к абляции, обеспечивая точность поверхности заготовки; в области сварки, особенно контактной и дуговой сварки, его эффективная электро- и теплопроводность может обеспечить стабильную передачу сварочного тока, снизить тепловые потери и улучшить качество паяных соединений; в микроэлектронной упаковке, благодаря его хорошей электропроводности и коэффициенту теплового расширения, соответствующему подложке, он может использоваться в качестве соединительного электрода для обеспечения надежного соединения между чипом и подложкой и повышения стабильности электронного оборудования; кроме того, в аэрокосмической, национальной оборонной и других областях он также часто используется в высокотемпературных дуговых контактах, высоковольтных переключателях и других компонентах для удовлетворения требований к производительности в экстремальных рабочих условиях.

Обзор опасности: Данный продукт представляет собой цельный металлокомпозитный материал, нетоксичный по своей природе. При нормальном хранении и использовании токсичные вещества не выделяются. Поскольку материал не имеет порошкообразной формы, риск вдыхания пыли отсутствует, а сам материал не взрывоопасен и не воспламеняется. При экстремальных температурах (например, превышающих температуру плавления меди 1083°C) медная фаза может плавиться, но этот процесс не сопровождается выделением токсичных газов. Избегайте ожогов при контакте с высокотемпературными материалами.

Меры пожаротушения: Данный продукт негорюч и невзрывоопасен. При высоких температурах он претерпевает только физические изменения (например, плавление меди) и не выделяет токсичных газов. В случае пожара для данного продукта не требуются специальные меры пожаротушения; достаточно стандартных мер пожаротушения. При тушении пожара будьте осторожны, чтобы избежать контакта с горячими расплавленными материалами, которые могут вызвать ожоги.

Меры реагирования на утечку: Изделие находится в твёрдом состоянии и не представляет риска утечки. В случае его разрушения или повреждения под воздействием внешних факторов просто соберите осколки; специальные меры защиты не требуются. Осколки можно переработать или утилизировать как обычные промышленные отходы, что гарантирует экологическую

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

безопасность.

Обращение и хранение: При обращении с продуктом не требуется специальных средств защиты; для предотвращения царапин на поверхности достаточно использования промышленных перчаток. Хранить в сухом, хорошо проветриваемом помещении вдали от едких веществ, таких как сильные кислоты и основания, чтобы предотвратить коррозию металлической поверхности. Герметизация или специальная изоляция не требуются; просто храните продукт в сухом месте вместе с другими промышленными материалами.

Меры контроля воздействия и средства индивидуальной защиты: Специальные меры защиты органов дыхания и пылеподавления не требуются (ввиду отсутствия порошка). Во время работы рекомендуется использовать обычные рабочие перчатки для предотвращения травм при трении о твердые поверхности; при работе с высокими температурами необходимы теплоизоляционные перчатки.

Утилизация: Отработанные электроды могут быть переработаны как металлолом и переданы в специализированные организации по переработке для извлечения вольфрама и меди для дальнейшей переработки. Неперерабатываемые материалы утилизируются как обычные твердые промышленные отходы и не загрязняют почву и воду.

Информация о транспортировке: Особых ограничений при транспортировке нет, маркировка опасных материалов не требуется. Просто сохраняйте упаковку в целости и не допускайте её деформации в результате сильных столкновений. Может транспортироваться в одной партии с другими некоррозионными промышленными товарами.

Нормативная информация: Данный продукт соответствует Закону Китайской Народной Республики о предотвращении и контроле загрязнения окружающей среды твердыми отходами, Правилам безопасного обращения с опасными химическими веществами и другим соответствующим законам и нормативным актам. Он не является опасным химическим или токсичным веществом, а его производство, продажа и транспортировка соответствуют национальным стандартам для промышленных материалов.



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Глава 4: Классификация вольфрамово-медных электродов

Вольфрамово-медные электроды можно классифицировать по различным стандартам. Обычные методы включают в себя соотношение состава, сценарии применения и процессы формования. В зависимости от соотношения содержания вольфрама к меди их можно разделить на типы с высоким содержанием вольфрама и с высоким содержанием меди. Высоковольфрамовый тип имеет высокое содержание вольфрама, лучшую высокотемпературную стойкость и твердость, и подходит для сценариев с высокими температурами и высокими напряжениями; высокомедный тип (например, WCu60/40, WCu70/30) имеет высокое содержание меди и более выдающуюся электро- и теплопроводность, и подходит для условий работы с высокими требованиями к электрической эффективности. В зависимости от области применения существуют в основном электроды для электроэрозионной обработки, сварочные электроды, электроды для корпусирования микроэлектроники и т. д. Электроды для электроэрозионной обработки должны иметь как стойкость к абляции, так и проводимость, сварочные электроды фокусируются на стабильности тока, а электроды для корпусирования микроэлектроники предъявляют строгие требования к точности размеров и тепловому согласованию.

### 4.1 Классификация вольфрамово-медных электродов по соотношению компонентов

Классификация вольфрамово-медных электродов по соотношению состава представляет собой метод группировки электродов, основанный на соотношении содержания вольфрама и меди. Этот метод классификации напрямую влияет на физические, механические и электрические свойства электродов и отвечает требованиям различных сценариев применения. Вольфрамово-медные электроды изготавливаются методом порошковой металлургии или вакуумной инфльтрации. Вольфрам обеспечивает высокую температуру плавления, высокую термостойкость и износостойкость, а медь способствует высокой электропроводности и теплопроводности. Регулировка соотношения определяет комплексные эксплуатационные характеристики электрода. Разница в соотношении состава в основном отражается в уровне содержания вольфрама. Он делится на три категории: высокое содержание вольфрама, среднее содержание вольфрама и низкое содержание вольфрама. Каждый тип электрода оптимизирован для определенных целей, таких как электроискровая обработка, контактная сварка или корпусирование микроэлектроники. Основа классификации также учитывает влияние микроструктуры и процесса подготовки. Низкая пористость и равномерное распределение фаз являются общими характеристиками различных типов электродов.

#### 4.1.1 Электроды с высоким содержанием вольфрама (80–95 % вольфрама)

Вольфрамово-медные электроды, состоящие в основном из вольфрама, с содержанием меди, как правило, от 5% до 20%. Эти электроды обладают исключительной высокотемпературной стойкостью и стойкостью к дуговой эрозии благодаря высокой температуре плавления вольфрама (3422 °C) и твердости (около 3430 HV). В процессе порошковой металлургии вольфрамовый порошок смешивается и прессуется с небольшим количеством медного порошка. После спекания

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

медь заполняет поры в жидкой фазе, образуя плотную структуру вольфрамового скелета. Низкая пористость повышает стабильность материала. Процесс вакуумной инфильтрации дополнительно оптимизирует проникновение меди и улучшает межфазное сцепление, что позволяет электродам с высоким содержанием вольфрама сохранять структурную целостность даже в экстремальных условиях.

Характеристики электродов с высоким содержанием вольфрама делают их превосходными для электроискровой обработки (ЭИ) и особенно подходят для обработки материалов высокой твердости. Высокая износостойкость вольфрама снижает потерю поверхности электрода и продлевает срок службы. При контактной сварке высокое содержание вольфрама поддерживает операции отключения при больших токах, а его стойкость к дуговой эрозии значительно лучше, чем у электродов с низким содержанием вольфрама, что снижает налипание шлака. Мелкие зерна в микроструктуре оптимизируются с помощью процесса горячего изостатического прессования, а прочность на сжатие может достигать определенного высокого уровня, что делает его пригодным для сценариев разряда высокой энергии. Однако электро- и теплопроводность электродов с высоким содержанием вольфрама низкая, а низкое содержание меди ограничивает эффективность передачи тока, поэтому их необходимо использовать в сочетании с конструкцией отвода тепла.

Области применения включают компоненты аэрокосмической техники и высоковольтные переключатели. Высокое содержание вольфрама в электродах обеспечивает термостойкость, превышающую 3000 °C, а поверхностная обработка, такая как никелирование, дополнительно повышает стойкость к окислению. В процессе производства чистота вольфрамового порошка должна контролироваться выше 99,9% при размере частиц от 5 до 15 микрон для обеспечения стабильных характеристик.

#### 4.1.2 Электроды со средним содержанием вольфрама (50–80 % вольфрама)

Электроды со средним содержанием вольфрама представляют собой сбалансированный тип вольфрамово-медных электродов с содержанием меди от 20% до 50%. Эти электроды предлагают хороший компромисс между высокотемпературной стойкостью и электропроводностью. Изготовленные методом порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, они имеют микроструктуру, состоящую из однородного вольфрамового скелета и медной фазовой сетки. В процессе спекания медь в жидкой форме заполняет поры между частицами вольфрама. Низкая пористость и малый размер зерна оптимизируются методом горячего изостатического прессования, что повышает механическую прочность и электрические свойства материала. Повышенное содержание меди улучшает как электро-, так и теплопроводность, что делает электроды со средним содержанием вольфрама универсальными для различных применений.

Электроды из средневольфрамового сплава широко используются в электроэрозионной обработке (ЭЭО), подходящей для прецизионной обработки материалов средней твердости. Износостойкость вольфрама в сочетании с проводимостью меди снижает потери электрода и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

повышает эффективность обработки. При контактной сварке электроды из средневольфрамового сплава поддерживают работу на средних токах и обладают превосходными характеристиками терморегулирования по сравнению с электродами из высоковольфрамового сплава, уменьшая зону термического влияния и улучшая качество соединения. Корпусирование микроэлектроники является ещё одной важной областью применения, где их коэффициент теплового расширения совпадает с коэффициентом теплового расширения кремниевых или керамических подложек, что снижает циклическую термонапряженность и повышает надёжность. Характеристики электродов из средневольфрамового сплава также зависят от соотношения и обработки. Например, соотношение WCu 70/30 обеспечивает баланс между прочностью и эффективностью, а соотношение WCu 60/40 способствует проводимости. При высоких температурах размягчение медной фазы может незначительно повлиять на стабильность, но вольфрамовый каркас обеспечивает необходимую поддержку. Поверхностная обработка, такая как полировка или гальванопокрытие, может повысить коррозионную стойкость и продлить срок службы.

#### 4.1.3 Электроды с низким содержанием вольфрама (20–50 % вольфрама)

Low-tungsten электроды (20% -50% вольфрама) - это в первую очередь вольфрамово-медные электроды на основе меди, с содержанием меди от 50% до 80%. Эти электроды демонстрируют превосходные электрические и тепловые свойства управления благодаря высокой электропроводности меди ( $5,8 \times 10^7$  См/м) и теплопроводности (приблизительно  $400 \text{ Вт/ м} \cdot \text{К}$ ). В процессе порошковой металлургии вольфрамовый порошок смешивается с высокой долей медного порошка. После спекания медь образует непрерывную сеть. Низкая пористость и равномерное распределение фаз оптимизируются с помощью горячего изостатического прессования, что повышает общие характеристики материала. Процесс вакуумной инфильтрации посредством инфильтрации жидкой меди дополнительно улучшает целостность токопроводящего пути, что позволяет низковольфрамовым электродам превзойти себя в высокоэффективной проводимости.

Электроды с низким содержанием вольфрама в основном используются в сценариях, требующих высокой электро- и теплопроводности, таких как точечная сварка или шовная сварка при контактной сварке. Высокие характеристики меди снижают тепловой эффект сопротивления и улучшают качество соединения. При электроискровой обработке электроды с низким содержанием вольфрама подходят для черновой обработки материалов с низкой твердостью. Пластичность меди способствует быстрому рассеиванию тепла и снижает локальный перегрев. В корпусировании микроэлектроники коэффициент теплового расширения согласуется с подложкой, а высокая теплопроводность меди способствует рассеиванию тепла от кристалла и продлевает срок службы. Однако высокая термостойкость и стойкость к дуговой эрозии электродов с низким содержанием вольфрама слабы, а низкое содержание вольфрама ограничивает их стабильность в экстремальных условиях. Их необходимо использовать в сочетании с рассеиванием тепла или разрядом с низкой энергией.

В процессе производства чистота медного порошка должна быть выше 99,9%, а размер частиц —

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

от 5 до 15 микрон. Размер частиц вольфрамового порошка немного больше для оптимизации наполнения. Поверхностная обработка, такая как золочение, может повысить коррозионную стойкость и продлить срок службы во влажной среде.

## 4.2 Классификация вольфрамово-медных электродов по сценарию применения

Классификация электродов из вольфрамовой меди, ориентированная на сценарии применения, представляет собой метод группировки электродов на основе конкретных условий использования и функциональных требований. Этот метод классификации делает акцент на целевой конструкции и оптимизации производительности электродов в различных промышленных областях. Электроды из вольфрамовой меди изготавливаются методом порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации. Высокая температура плавления и твердость вольфрама сочетаются с высокой электропроводностью и теплопроводностью меди. Соотношение и микроструктура подбираются в соответствии со сценарием применения для формирования материала с низкой пористостью и высокой однородностью. Основой классификации являются электроэрозионная обработка, высоковольтные электроприборы и сварочные области. Каждый тип электрода оптимизирован для определенных требований к процессу и производительности, таких как стойкость к дуговой эрозии, эффективность электропроводности или возможности терморегулирования.

### 4.2.1 Электроды для электроэрозионной обработки

Электроды, специально разработанные для EDM (электроэрозионной обработки), представляют собой вольфрамово-медные электроды, специально разработанные для обеспечения дуговой эрозии, механической прочности и точности обработки. Эти электроды обычно используют высокое содержание вольфрама (например, WCu 80/20 или WCu 90/10). Вольфрамовый порошок смешивается с небольшим количеством медного порошка с помощью процесса порошковой металлургии. После спекания медь заполняет поры в жидкой фазе, образуя плотную структуру вольфрамового скелета. Низкая пористость повышает стойкость к высокотемпературным ударам. Процесс вакуумной инфильтрации дополнительно оптимизирует проникновение меди и улучшает межфазное соединение, обеспечивая стабильность электрода во время высокоэнергетических разрядов. Мелкие зерна в микроструктуре оптимизируются с помощью горячего изостатического прессования (HIP), что повышает прочность на сжатие и износостойкость.

Основное преимущество электродов для электроэрозионной обработки заключается в их стойкости к дуговой эрозии. Высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) и твердость (около 3430 HV) позволяют выдерживать разрядные температуры в тысячи °C, снижая износ поверхности и делая его пригодным для обработки материалов высокой твердости, таких как карбид вольфрама и титановые сплавы. Гарантируется точность обработки, а шероховатость поверхности контролируется на микронном уровне. Мелкозернистая структура способствует формированию сложных геометрических форм. На практике электроды выдерживают высокоэнергетические разряды, что продлевает срок их службы и снижает частоту замены.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Однако низкое содержание меди может ограничивать электро- и теплопроводность, что требует применения системы отвода тепла для предотвращения локального перегрева. Обработка поверхности, такая как полировка, может улучшить её качество, делая её пригодной для изготовления прецизионных пресс-форм.

#### 4.2.2 Электроды для высоковольтных электроприборов

Вольфрамово-медные электроды, специально разработанные для высоковольтных переключателей и электрических контактов, с упором на высокотемпературную стойкость, стойкость к дуговой эрозии и проводящую стабильность. Эти электроды обычно используют соотношение содержания вольфрама от среднего до высокого (например, WCu 70/30 или WCu 85/15) и производятся с помощью процесса порошковой металлургии. Вольфрамовый порошок смешивается с медным порошком и спекается, причем медь заполняет поры в жидкой фазе, образуя однородную фазовую сетку. Низкая пористость повышает дугостойкость материала. Процесс вакуумной инфильтрации оптимизирует проникновение меди, а горячее изостатическое прессование (HIP) дополнительно улучшает межфазную связь, гарантируя, что электрод сохраняет надежность при высоковольтном отключении. Мелкие зерна в микроструктуре поддерживают высокую прочность на сжатие, что делает его пригодным для частого механического воздействия.

Свойства электродов для высоковольтных электроприборов делают их превосходными в высоковольтных выключателях. Высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) защищает от дугового нагрева, а его стойкость к дуговой эрозии снижает эрозию поверхности и продлевает срок службы. Высокая электропроводность меди обеспечивает эффективную передачу тока, что делает её пригодной для сильноточных отключений. Её коэффициент теплового расширения соответствует коэффициенту расширения подложки, что снижает термоциклические нагрузки. Оптимизированная микроструктура снижает изменчивость сопротивления и обеспечивает стабильные электрические характеристики. На практике электроды выдерживают частые переключения, снижая частоту отказов, и широко используются в энергетическом оборудовании и промышленных системах управления. В процессе производства соотношение размеров частиц вольфрамового и медного порошков должно поддерживаться в пределах от 1:2 до 1:3 для обеспечения равномерного распределения фаз. Поверхностная обработка, такая как никелирование, может повысить стойкость к окислению и способность адаптироваться к влажным или промышленным средам. В будущем, регулируя соотношение компонентов в составе или добавляя межфазные соединения (например, молибден), можно будет дополнительно улучшить дугостойкость и электропроводность для соответствия более высоким напряжениям или сложным электрическим требованиям, например, для интеллектуального сетевого оборудования.

#### 4.2.3 Электроды в сварочном поле

Вольфрамово-медные электроды, разработанные специально для контактной сварки, обладают

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокой электропроводностью, теплопроводностью и антипригарными свойствами. В этих электродах обычно используется вольфрам с низким или средним содержанием (например, WCu 60/40 или WCu 70/30). Вольфрамовый порошок смешивается с высоким содержанием медного порошка методом порошковой металлургии. После спекания медь образует непрерывную сетку. Низкая пористость достигается за счет горячего изостатического прессования, что улучшает теплоотвод и электрические характеристики. Процесс вакуумной инфльтрации улучшает целостность токопроводящей дорожки за счет проникновения жидкой меди. Мелкие зерна в микроструктуре обеспечивают прочность на сжатие и ударную вязкость, что делает их пригодными для сварки под высоким давлением.

Основные преимущества электродов при сварке заключаются в их электро- и теплопроводности. Высокая электропроводность ( $5,8 \times 10^7$  См/м) и теплопроводность (приблизительно 400 Вт/м·К) меди снижают эффекты резистивного нагрева, улучшают качество соединения и равномерно распределяют тепло, уменьшая зону термического влияния (ЗТВ), что делает ее подходящей для точечной или шовной сварки. Высокотемпературная стойкость вольфрама (3422 °C) обеспечивает структурную поддержку, а его антипригарные свойства дополнительно оптимизируются за счет обработки поверхности (например, полировки), которая уменьшает налипание шлака и продлевает срок службы электрода. На практике электроды могут выдерживать умеренные токи, обеспечивая эффективную сварку и широко используются в автомобилестроении и сборке электроники.

В процессе производства чистота медного порошка должна превышать 99,9%, а размер частиц должен составлять от 5 до 15 микрон. Для оптимизации заполнения частицы вольфрамового порошка должны быть немного крупнее. Высокие рабочие температуры, например, высокая температура, могут привести к размягчению медной фазы, что требует применения интегрированных систем теплоотвода. В будущем внедрение наномедного порошка или многофазных конструкций может дополнительно повысить проводимость и антиадгезионные свойства, что позволит применять их в областях, требующих более высокой эффективности или сложной сварки, например, для облегченных конструкционных деталей.

#### 4.2.4 Специальные электроды для аэрокосмического и военного применения

Вольфрамово-медные электроды, разработанные специально для аэрокосмической и военной промышленности, отличаются высокой термостойкостью, механической прочностью и надежностью в экстремальных условиях. Эти электроды обычно содержат большое количество вольфрама и изготавливаются методом порошковой металлургии или вакуумной инфльтрации. Вольфрамовый порошок смешивается с небольшим количеством медного порошка, а затем спекается. Медь заполняет поры в жидком виде, образуя прочную структуру вольфрамового каркаса. В процессе производства микроструктура оптимизируется методом горячего изостатического прессования (ГИП), что приводит к низкой пористости и равномерному распределению фаз, обеспечивая стабильность электрода в условиях высоких напряжений или высоких температур. Добавление меди оптимизирует электропроводность и терморегулирование,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

позволяя адаптировать электрод к сложным рабочим условиям.

Основные области применения специальных электродов в аэрокосмической и военной промышленности включают системы тепловой защиты для космических аппаратов и электрические контакты для военного оборудования. Высокая температура плавления вольфрама обеспечивает превосходную высокотемпературную стойкость, что делает его пригодным для выдерживания высокоэнергетических ударов или экстремальных тепловых нагрузок. Механическая прочность электрода обеспечивает высокоточную обработку и долгосрочное использование, а однородность микроструктуры снижает концентрацию напряжений и повышает усталостную прочность. В военной области электроды часто используются в ключевых компонентах высокопроизводительных радаров или систем оружия, которые должны выдерживать сильные вибрации и коррозионные среды. Обработка поверхности, такая как гальванопокрытие, дополнительно повышает атмосферостойкость. Процесс подготовки фокусируется на чистоте сырья и контроле размера частиц для обеспечения стабильных характеристик. Сценарий использования также требует, чтобы электрод имел превосходную стойкость к дуговой эрозии и термическую стабильность. Теплопроводность меди помогает быстро рассеивать тепло и снижать риск локального перегрева.

#### 4.3 Классификация вольфрамово-медных электродов по морфологическим и структурным признакам

Вольфрамово-медные электроды являются основой их адаптивности к различным условиям применения, охватывая множество параметров, таких как геометрия, микроструктура и макроморфология. Эти характеристики напрямую влияют на технологичность, производительность и технологическую совместимость электрода. Поэтому классификация по морфологическим и структурным характеристикам является одним из наиболее интуитивных методов промышленного выбора.

##### 4.3.1 Блочный электрод

Блочные электроды представляют собой вольфрамово-медные электроды блочной формы, подходящие для применений, требующих большой площади контакта или высокопрочной опоры. Эти электроды изготавливаются методом порошковой металлургии, при котором порошки вольфрама и меди смешиваются в определённом соотношении и прессуются в форму. В процессе спекания медь заполняет поры в жидкой фазе, образуя плотную микроструктуру. Горячее изостатическое прессование дополнительно оптимизирует однородность и низкую пористость блочных электродов, обеспечивая стабильность материала при механических нагрузках. Блочная конструкция облегчает механическую обработку и позволяет резать или формовать электроды различных размеров, адаптируясь к различным требованиям.

Характеристики блочного электрода делают его превосходным в электроэрозионной обработке, подходящим для обработки больших заготовок или деталей сложной геометрии, а большая

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

площадь контакта обеспечивает стабильные условия разряда. Равномерное распределение фаз в микроструктуре повышает стойкость к дуговой эрозии, твёрдость вольфрама обеспечивает долгосрочное использование, а проводимость меди оптимизирует токопередачу. В процессе подготовки однородность смешивания исходных материалов и контроль параметров спекания напрямую влияют на эксплуатационные характеристики блочного электрода, а обработка поверхности, такая как полировка, может повысить точность обработки. В области сварки блочный электрод может использоваться в качестве формы или подложки, выдерживая высокие давления и термические циклы. В будущем механические свойства и область применения блочного электрода могут быть дополнительно улучшены за счёт регулировки процесса прессования или внедрения многофазной конструкции.

#### 4.3.2 Стержневой электрод

Стержневые электроды – это вольфрамово-медные электроды стержневой формы, подходящие для применений, требующих точного позиционирования или деликатной обработки. Эти электроды изготавливаются методом порошковой металлургии или вакуумной инфльтрации. Порошки вольфрама и меди смешиваются и прессуются в стержень. В процессе спекания медь заполняет поры, создавая тонкую, плотную структуру. Горячее изостатическое прессование оптимизирует микроструктуру стержневого электрода, что приводит к низкой пористости и равномерному распределению фаз, обеспечивая стабильность материала при высокоточных операциях. Конструкция стержня облегчает установку и направление, что делает его особенно подходящим для применений, требующих обработки глубоких отверстий или работы в ограниченном пространстве.

Стержневые электроды отлично подходят для электроэрозионной обработки (ЭЭО) и подходят для точной обработки и производства микрокомпонентов. Их тонкая форма обеспечивает высокоточный разряд, а износостойкость вольфрама снижает износ электрода. Медная фаза в микроструктуре обеспечивает электро- и теплопроводность, поддерживая стабильную передачу тока и терморегуляцию. В корпусировании микроэлектроники форма стержневых электродов облегчает совмещение с подложкой, компенсируя тепловое расширение и снижая концентрацию напряжений. В процессе изготовления необходимо контролировать соотношение длины и диаметра стержневых электродов для обеспечения механической прочности и технологичности. Обработка поверхности, такая как шлифование, может улучшить качество поверхности.

#### 4.3.3 Листовой электрод

Листовые электроды представляют собой вольфрамово-медные электроды, выполненные в виде тонких листов, подходящих для применений, требующих большой площади контакта или равномерного разряда. Эти электроды изготавливаются с использованием процесса порошковой металлургии, при котором порошки вольфрама и меди смешиваются в определенном соотношении и прессуются в тонкий лист. Во время спекания медь заполняет поры в жидком виде, образуя плотную микроструктуру. Горячее изостатическое прессование дополнительно

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оптимизирует однородность и низкую пористость листовых электродов, обеспечивая стабильность материала при механических нагрузках и термоциклировании. Конструкция листа обеспечивает большую площадь поверхности, облегчая плотный контакт с заготовкой или подложкой, и подходит для требований обработки, требующих равномерного распределения тепла или высокой передачи тока.

Листовые электроды отлично работают в электроэрозионной обработке и подходят для обработки плоских заготовок или в ситуациях, требующих разрядов большой площади. Тонкая структура листа обеспечивает эффективное распределение дуги, а износостойкость вольфрама и стойкость к дуговой эрозии снижают потери поверхности и продлевают срок службы. Медная фаза в микроструктуре обеспечивает электро- и теплопроводность, гарантируя стабильную передачу тока и рассеивание тепла, снижая риск локального перегрева. В области сварки листовые электроды могут использоваться в качестве электродных пластин или радиаторов, выдерживая высокое давление и тепловые циклы, а также улучшая качество соединения. В процессе подготовки процесс прессования должен контролировать однородность толщины. Однородность смешивания исходных материалов и параметры спекания напрямую влияют на характеристики листового электрода. Обработка поверхности, такая как шлифование или полирование, может улучшить точность контакта. Области применения также включают корпусирование микроэлектроники и терморегулирование. Тонкая конструкция листового электрода облегчает соединение с кристаллом или подложкой, а согласование коэффициента теплового расширения снижает концентрацию напряжений и повышает надежность. Гибкость листового электрода позволяет ему адаптироваться к сложным геометрическим формам, однако в процессе изготовления необходимо соблюдать осторожность, чтобы избежать деформации листа.

#### 4.3.4 Электроды специальной формы

Электроды специальной формы – самый сложный тип вольфрамово-медных электродов. Их форма полностью адаптируется под функциональные требования конкретных условий применения, преодолевая ограничения стандартных форм, таких как блоки и стержни, и охватывая множество нестандартных структур, таких как поверхности специальной формы, ступенчатые формы, пористые формы, полые сетки и композитные поверхности. Конструкция электрода такого типа должна быть тесно связана с рабочими параметрами, пространством для сборки и требуемыми характеристиками конечного продукта. От начального моделирования до окончательного формования требуется многократное моделирование и верификация, а также чрезвычайно высокая точность обработки. Любое незначительное отклонение может напрямую повлиять на стабильность последующих процессов или эксплуатационные характеристики конечного продукта.

С точки зрения морфологического дизайна, суть электродов специальной формы заключается в «функциональной ориентации». Например, для сложной обработки полостей в пресс-формах автомобильных крышек электроды специальной формы из вольфрамовой меди должны полностью повторять контуры криволинейной поверхности полости, включая такие детали, как

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

скругления, глубокие канавки, уклоны, и даже имитировать угол наклона при формировании заготовки. Такая «зеркальная репликация» морфологического дизайна может гарантировать равномерность разрядного промежутка при электроискровой обработке и, в конечном итоге, качество поверхности и точность сборки автомобильных крышек. При обработке жаровой трубы камеры сгорания авиационного двигателя электроды специальной формы часто проектируются в виде изогнутых структур с густыми микроканавками. Эти микроканавки один к одному соответствуют охлаждающим каналам жаровой трубы. Каналы, сформированные электроэрозионной обработкой, должны строго соответствовать размерам, в противном случае это приведет к неравномерному локальному охлаждению и термическому усталостному разрушению во время работы двигателя.

Ступенчатые электроды специальной формы широко используются в сценариях многопозиционной обработки, а их различные ступенчатые секции соответствуют разной глубине обработки или требованиям к точности. Например, при комплексной обработке средней части корпуса мобильного телефона первая секция ступенчатого электрода используется для грубой обработки для удаления большого количества материала, вторая секция обеспечивает тонкую обрезку путем уменьшения диаметра, а третья секция завершает скругление посредством дугового перехода в конце. Такая конструкция «однократного зажима, многоступенчатой формовки» позволяет сократить количество смен инструмента, повысить эффективность обработки и избежать ошибок позиционирования, вызванных многократным зажимом. Разность высот и диаметров ступеней должна быть точно рассчитана на основе твердости материала и припуска на обработку. Отклонение размера определенной ступени может привести к превышению стандарта совокупной погрешности размера последующей обработки.

Конструкция пористых профилированных электродов ориентирована на достижение баланса между эффективным рассеиванием тепла и лёгкостью конструкции. При изготовлении статоров двигателей новых энергетических транспортных средств в электродах требуются сквозные отверстия, похожие на сотовые. Эти отверстия не только уменьшают вес электрода, но и позволяют внутреннему потоку воздуха быстро рассеивать тепло, выделяемое разрядом, предотвращая тепловую деформацию, которая может повлиять на точность обработки. При обработке компонентов теплообменников для атомной энергетики сквозные отверстия пористых профилированных электродов должны точно соответствовать отверстиям в трубном пучке теплообменника. Несоблюдение этого требования приведёт к неравномерным зазорам при последующей сборке труб, что скажется на эффективности теплопередачи.

Процесс формовки электродов специальной формы играет решающую роль в обеспечении морфологической точности. Процесс резки проволокой позволяет осуществлять двухмерную резку сложных контуров и подходит для плоских конструкций специальной формы; процесс электроискровой формовки позволяет обрабатывать трёхмерные криволинейные поверхности, воспроизводить сложные формы посредством синхронного движения электрода и заготовки, обеспечивая при этом чистоту поверхности. Для пористых электродов специальной формы с внутренними каналами также необходимо сочетание глубокого сверления, лазерного сверления и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

других процессов для обеспечения вертикальности и проницаемости отверстий. В процессе обработки морфологическая погрешность должна быть обнаружена в режиме реального времени с помощью прецизионного измерительного оборудования. При обнаружении выхода определённого размера элемента за пределы допуска необходимо немедленно скорректировать параметры обработки, в противном случае весь электрод будет отбракован. Такое стремление к предельной точности значительно повышает стоимость производства электродов специальной формы по сравнению с электродами обычной формы, но в то же время делает их незаменимым компонентом в области высокотехнологичного производства.

#### 4.4 Классификация медно-вольфрамовых электродов по показателям эффективности

Классификация вольфрамово-медных электродов по эксплуатационным характеристикам позволяет группировать электроды в соответствии с конкретными требованиями к эксплуатационным характеристикам, уделяя особое внимание оптимизации таких ключевых показателей, как электропроводность, термостойкость и механическая прочность. Этот метод классификации позволяет разрабатывать специализированные электроды для различных эксплуатационных требований путем корректировки соотношения вольфрама и меди и процесса изготовления. Микроструктура вольфрамово-медных электродов оптимизируется методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, обеспечивая низкую пористость и равномерное распределение фаз. Горячее изостатическое прессование дополнительно повышает стабильность эксплуатационных характеристик. Критерии классификации включают высокую электропроводность, термостойкость или высокую механическую прочность, при этом каждый тип электрода превосходит в определенных областях применения.

##### 4.4.1 Высокопроводящие электроды

Высокопроводящие электроды – это вольфрамово-медные электроды, разработанные для эффективной передачи тока, обеспечивающие оптимальную проводимость и удельное сопротивление. В этих электродах обычно используется низкое содержание вольфрама. Вольфрамовый порошок смешивается с высокой долей медного порошка методом порошковой металлургии, и медь образует непрерывную проводящую сеть при спекании. Микроструктура оптимизируется методом горячего изостатического прессования (ГИП) для достижения низкой пористости и равномерного распределения фаз. Высокая проводимость меди (близкая к уровню чистой меди) обеспечивает эффективную передачу тока. Процесс вакуумной инфильтрации дополнительно повышает целостность токопроводящего пути за счет инфильтрации жидкой меди, что позволяет высокопроводящим электродам превосходно использоваться в электротехнических приложениях. Основные области применения высокопроводящих электродов включают контактную сварку и корпусирование микроэлектроники. Высокая проводимость меди обеспечивает стабильную передачу тока, снижает эффекты нагрева при сопротивлении, а также улучшает качество соединения и эффективность соединения цепей. При контактной сварке электроды выдерживают умеренные токи, равномерно распределяют тепло и уменьшают зону термического влияния, что делает их пригодными для точечной или шовной сварки. В

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

корпусировании микроэлектроники низкое удельное сопротивление высокопроводящих электродов обеспечивает эффективную передачу сигнала, в то время как теплопроводность меди способствует рассеиванию тепла от кристалла и повышает надежность. Однородная фазовая сетка меди в микроструктуре снижает рассеяние электронов. Чистота медного порошка в процессе приготовления должна быть высокой, а размер частиц должен контролироваться в определенном диапазоне для обеспечения стабильных характеристик.

Рабочие условия, такие как высокие температуры, могут размягчить медную фазу, что влияет на стабильность проводимости. Для поддержания рабочих характеристик требуется конструкция с отводом тепла или обработка поверхности (например, золочение). Обработка поверхности также может улучшить коррозионную стойкость и продлить срок службы во влажной среде. Высокопроводящие электроды демонстрируют превосходные характеристики в условиях высоких частот или больших токов и широко используются в электронном оборудовании и автомобилестроении.

#### 4.4.2 Электроды, стойкие к дуговой эрозии

Вольфрамово-медные электроды, разработанные специально для условий высокоэнергетической дуги, отличаются высокой стойкостью к эрозии и стабильностью поверхности. Эти электроды обычно содержат большое количество вольфрама. Вольфрамовый порошок смешивается с небольшим количеством медного порошка методом порошковой металлургии. После спекания медь заполняет поры в жидкой фазе, образуя прочную структуру вольфрамового каркаса. Микроструктура оптимизируется методом горячего изостатического прессования (ГИП) для достижения низкой пористости и равномерного распределения фаз. Высокая температура плавления и твердость вольфрама обеспечивают отличную дугостойкость. Процесс вакуумной инфильтрации, заключающийся в инфильтрации жидкой меди, дополнительно улучшает межфазное сцепление, обеспечивая долговечность электрода при многократных разрядах.

Основные области применения электродов, стойких к дуговой эрозии, включают электроискровую обработку и высоковольтные выключатели. Высокая температура плавления вольфрама обеспечивает стойкость к высокотемпературным дугам в тысячи градусов, снижает оплавление или испарение поверхности и продлевает срок службы. При электроискровой обработке электрод может обрабатывать материалы высокой твердости, снижать потери от эрозии и поддерживать точность обработки. В высоковольтных выключателях дугостойкость электрода выдерживает частое отключение тока и снижает повреждение поверхности. Однородная фазовая сетка вольфрама в микроструктуре снижает концентрацию термических напряжений, а поверхностная обработка, такая как полировка или гальванопокрытие, может дополнительно повысить стойкость к окислению и адаптироваться к промышленным условиям. В процессе приготовления чистота вольфрамового порошка должна достигать высокого уровня, а размер частиц должен контролироваться в определенном диапазоне для обеспечения постоянства характеристик. Сценарии использования также включают специальные приложения, требующие высокоэнергетического разряда. Теплопроводность меди способствует рассеиванию тепла и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

снижает риск локального перегрева.

#### 4.4.3 Высокопрочные электроды

Вольфрамово-медные электроды, разработанные специально для сред с высокими механическими нагрузками, с упором на прочность на сжатие и сопротивление деформации. Эти электроды обычно используют среднее или высокое содержание вольфрама (например, WCu 85/15 или WCu 70/30) и производятся методом порошковой металлургии. Порошки вольфрама и меди смешиваются и прессуются, а медь заполняет поры во время спекания, создавая плотную микроструктуру. Горячее изостатическое прессование оптимизирует межфазные связи, что приводит к микроструктуре с низкой пористостью и равномерным распределением фаз. Вольфрамовый скелет обеспечивает высокое сопротивление сжатию. Процесс вакуумной инфильтрации посредством инфильтрации жидкой меди дополнительно повышает общую прочность материала, делая его пригодным для работы с высокими нагрузками.

Основные области применения высокопрочных электродов включают удаление объёмного материала при электроэрозионной обработке (ЭЭО) и сварке под высоким давлением. Высокая твёрдость вольфрама обеспечивает стойкость к механическим ударам, а пластичность меди оптимизирует распределение напряжений и уменьшает образование трещин. В корпусной микроэлектронике высокопрочные электроды выдерживают нагрузки, возникающие при циклических перепадах температур и механическом зажиме, повышая надёжность. Мелкозернистая структура их микроструктуры повышает усталостную прочность. Соотношение размеров частиц вольфрамового и медного порошков должно быть согласовано в процессе производства для обеспечения равномерного распределения фаз. Обработка поверхности, такая как шлифование, может повысить износостойкость и продлить срок службы.

Рабочие условия, такие как высокие температуры, могут влиять на стабильность фазы меди, что требует применения системы отвода тепла для поддержания производительности. Высокопрочные электроды отлично подходят для работы в условиях высоких нагрузок и широко используются в компонентах аэрокосмической промышленности и промышленных пресс-формах.

#### 4.4.4 Высокотермостойкие электроды

Вольфрамово-медные электроды, специально разработанные для экстремально высоких температур, с упором на высокотемпературную стабильность и возможности терморегулирования. Эти электроды обычно используют высокое содержание вольфрама (например, WCu 90/10 или WCu 85/15) и производятся методом порошковой металлургии. Вольфрамовый порошок смешивается с небольшим количеством медного порошка. После спекания медь заполняет поры в жидкой фазе, образуя прочную структуру вольфрамового скелета. Микроструктура оптимизируется с помощью горячего изостатического прессования (ГИП) для достижения низкой пористости и равномерного распределения фаз. Высокая температура плавления вольфрама обеспечивает превосходную термостабильность. Процесс вакуумной

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

инфильтрации, инфильтрация жидкой меди, улучшает целостность пути теплопроводности, гарантируя сохранение электродом производительности при высоких температурах.

Основные области применения высокотемпературных электродов включают высокотемпературные датчики и системы тепловой защиты аэрокосмической техники. Высокая температура плавления вольфрама позволяет эксплуатировать его в условиях высоких температур в тысячи градусов, а теплопроводность меди способствует рассеиванию тепла, снижая риск локального перегрева. В корпусировании микроэлектроники термостойкость электрода обеспечивает надежность кристалла при работе в условиях высоких температур, а согласование коэффициентов теплового расширения снижает концентрацию напряжений. Однородная сетка фаз вольфрама в микроструктуре снижает термическую усталость, а поверхностная обработка, такая как никелирование, может улучшить стойкость к окислению и адаптироваться к влажным или промышленным средам. В процессе приготовления чистота вольфрамового порошка должна достигать высокого уровня, а размер частиц должен контролироваться в определенном диапазоне для обеспечения стабильных тепловых характеристик. Сценарии использования также включают специальные приложения, требующие высоких тепловых нагрузок. Медная фаза может размягчаться при высоких температурах, но вольфрамовый каркас обеспечивает поддержку.

#### 4.5 Классификация вольфрамово-медных электродов по микроструктуре

Микроструктура определяется процессом изготовления и отражает состояние распределения и характер связей двухфазного вольфрама и меди. Она подразделяется на равномерное распределение, скелетное заполнение и градиентное распределение. Различные структуры оказывают существенное влияние на электропроводность, теплопроводность и механические свойства электрода.

##### 4.5.1 Равномерно распределенные электроды

Равномерно распределенные электроды являются наиболее микроструктурно сбалансированным типом вольфрамово-медных электродов. Их основная характеристика заключается в высокоравномерном распределении частиц вольфрама и фаз меди. В этой структуре мельчайшие частицы вольфрама равномерно внедрены в медную матрицу в дискретной форме. Не происходит ни локальной агломерации частиц вольфрама, ни сегрегации и агрегации фаз меди. Интерфейс между двумя фазами прочно связан посредством высокотемпературного спекания в процессе порошковой металлургии, представляя микроскопическую морфологию «ты во мне, я в тебе». Такая структура снимает ограничения свойств одного металла, позволяя высокотемпературной стойкости вольфрама синергетически сочетаться с электро- и теплопроводностью меди, а также избегать недостатков производительности, вызванных неравномерным распределением компонентов.

Ключ к достижению этой однородной структуры дисперсии заключается в точном контроле процесса приготовления. Во-первых, вольфрамовый и медный порошки должны быть

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подвергнуты глубокой обработке посредством смешивания в шаровой мельнице, чтобы оба порошка полностью соприкасались и измельчались под действием механического усилия до образования смешанного порошка однородного состава; затем смешанный порошок прессуется в заготовку посредством равномерного процесса прессования, чтобы обеспечить равномерную передачу давления на все части заготовки и избежать локальных различий в плотности; наконец, на этапе спекания температура и время выдержки точно контролируются для обеспечения диффузии и сплавления вольфрама и меди на границе раздела для формирования стабильного состояния связи. Весь процесс должен строго избегать смешивания примесей или колебаний параметров процесса, в противном случае однородность может быть нарушена. Например, недостаточное время измельчения в шаровой мельнице приведет к неравномерному перемешиванию порошков, а слишком низкая температура спекания повлияет на прочность связи на границе раздела, что приведет к дефектам в микроструктуре.

Основным преимуществом электрода, обеспечиваемым однородной дисперсионной структурой, является постоянство характеристик. На макроуровне проводимость, теплопроводность, твердость и другие показатели электрода остаются стабильными в различных областях и не будут существенно колебаться из-за изменения положения. Эта характеристика делает его выдающимся в сценариях со строгими требованиями к однородности характеристик, таких как область прецизионной электроэрозионной обработки: когда электрод и заготовка выполняют высокочастотный разряд, однородная микроструктура может гарантировать равномерное распределение плотности тока по поверхности электрода, избегая концентрации энергии разряда из-за разницы локальных сопротивлений, тем самым уменьшая неровности или прижоги на поверхности заготовки и обеспечивая постоянство чистоты обработанной поверхности. Даже при длительной непрерывной обработке эта однородность может поддерживать стабильность параметров разряда и уменьшать отклонения процесса, вызванные колебаниями характеристик электрода.

При высокочастотной сварке преимущества равномерно распределенных электродов также существенны. В процессе сварки электрод должен стабильно передавать высокочастотный ток в зону сварки и обеспечивать сплавление материала за счет сопротивления. При неравномерной микроструктуре электрода локальные области с высоким сопротивлением будут генерировать избыточное тепло, что приведет к перегоранию или даже пригоранию шва; в то время как области с низким сопротивлением могут не получить достаточного тепла, что приведет к образованию холодного шва. Равномерно распределенная структура обеспечивает равномерное распределение тока в процессе передачи через непрерывную и однородную проводящую сеть медной фазы, что обеспечивает стабильное тепловыделение в области сварки, обеспечивая полное формирование расплавленного ядра и предотвращая повреждения от перегрева. В то же время равномерно распределенные частицы вольфрама обеспечивают надежную механическую поддержку электрода, предотвращая локальную деформацию при многократном контакте под давлением и продлевая срок его службы. Нельзя игнорировать преимущества такой структуры в плане терморегулирования. В мощных электронных устройствах вольфрамово-медные электроды часто служат в качестве теплопроводов. Равномерная теплопроводящая сеть быстро и равномерно

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рассеивает тепло от горячих точек по всему электроду, рассеивая его через радиатор, предотвращая локальное накопление тепла и снижение производительности устройства. Даже в условиях резких колебаний температуры равномерная микроструктура снижает внутренние напряжения, вызванные дифференциальным тепловым расширением, снижая риск растрескивания электрода.

#### 4.5.2 Электроды, заполненные скелетом

Электрод с каркасным заполнением представляет собой композитный материал вольфрам-медь, синергетический эффект которого достигается благодаря уникальной конструкции. Его основной особенностью является образование взаимопроникающей сетчатой структуры «вольфрамовый каркас – медное заполнение». В этой структуре вольфрам образует несущий каркас электрода в виде непрерывного каркаса, подобно стальному каркасу здания, обеспечивая прочную структурную основу для всей конструкции; в то время как медная фаза полностью заполняет поры вольфрамового каркаса, образуя непрерывный токопроводящий путь. Два компонента не только сохраняют свои эксплуатационные преимущества, но и достигают функциональной синергии благодаря структурной взаимодополняемости. Такая конструкция снимает ограничения, присущие одному металлическому материалу, позволяя электроду одновременно обладать композитными свойствами: высокой прочностью, высокой термостойкостью, высокой электро- и теплопроводностью.

Ключ к изготовлению электродов с заполненным каркасом заключается в точном контроле процесса вакуумной инфильтрации, который делится на два основных этапа. Первый - это предварительное изготовление вольфрамового каркаса: после того, как вольфрамовый порошок смешивается в соответствии с определенной формулой, он прессуется в форму через форму, а затем спекается при высокой температуре для образования пористого каркаса с определенной пористостью. В процессе спекания частицы вольфрама прочно соединяются диффузионной сваркой, создавая непрерывную трехмерную сеть, а поры внутри каркаса резервируют пространство для последующего заполнения медной фазой. В это время вольфрамовый каркас уже обладает высокой механической прочностью и устойчивостью к высоким температурам, но его проводимость плохая, что необходимо компенсировать последующими этапами.

Второй этап - инфильтрация медной фазы: предварительно изготовленный вольфрамовый скелет помещают в вакуумную среду, вокруг него укладывают медный материал и нагревают выше температуры плавления меди. Под совместным действием высокой температуры и вакуума твердая медь превращается в жидкость, и с помощью капиллярного действия и проникновения под действием силы тяжести она равномерно заполняет поры вольфрамового скелета, пока не будут заполнены все зазоры. Роль вакуумной среды имеет решающее значение. Она может предотвратить смешивание воздуха с образованием пузырьков и гарантировать, что медная фаза образует непрерывную и непрерывную проводящую сеть в порах. После охлаждения вольфрамовый скелет и медная фаза образуют плотно интегрированную взаимопроникающую структуру - вольфрамовый скелет обеспечивает антидеформационную способность и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотемпературную поддержку, а медная фаза отвечает за передачу тока и рассеивание тепла. Эти две среды дополняют друг друга и придают электроду превосходные комплексные характеристики.

Преимущества электродов с каркасным наполнением особенно очевидны в условиях высоких температур и давления. Непрерывная структура вольфрамового каркаса обеспечивает механическую прочность и термостойкость, значительно превосходящие показатели чистой меди. Даже в экстремальных температурных условиях электрод сохраняет структурную стабильность, не размягчается и не деформируется. Медное наполнение обеспечивает отличную электро- и теплопроводность, быстро отводя тепло от высокотемпературных зон и предотвращая снижение производительности, вызванное локальным перегревом. Эта характеристика делает электроды идеальным выбором для экстремальных условий эксплуатации в аэрокосмической промышленности, атомной энергетике и других областях.

В качестве электродов сопел ракетных двигателей каркасные электроды демонстрируют уникальные преимущества. Будучи ключевым компонентом ракетной двигательной установки, сопло должно выдерживать непрерывную эрозию под воздействием высокотемпературного газа во время работы, а также требовать зажигания и контроля пламени через электроды. Вольфрамовый каркас, обладающий чрезвычайно высокой температурой плавления и структурной прочностью, противостоит высокотемпературной эрозии под воздействием газа, предотвращая плавление или деформацию электрода под воздействием высокой температуры. Медная фаза, заполняющая каркас, быстро рассеивает большое количество тепла, выделяемого газовой эрозией, по непрерывному пути, предотвращая структурное разрушение, вызванное локальным перегревом. Этот синергетический механизм «вольфрам противостоит абляции, а медь проводит тепло» обеспечивает долговременную стабильную работу электрода сопла в экстремальных условиях.

Электроды с каркасным наполнением также играют важную роль в высокотемпературных электродных компонентах оборудования ядерной энергетики. При работе ядерного реактора внутренняя среда не только чрезвычайно горячая, но также сопровождается высоким давлением и радиацией, что предъявляет строгие требования к стабильности материала. В таких сценариях вольфрамовый скелет служит основным структурным телом, которое может противостоять ползучести и коррозии при длительном воздействии высоких температур и сохранять размерную стабильность электрода; в то время как медная фаза обеспечивает проводимость электрода при высоком токе, своевременно отводя тепло в реакторе в систему охлаждения, чтобы предотвратить риски безопасности, вызванные накоплением тепла. Кроме того, поскольку и вольфрам, и медь обладают хорошей радиационной стойкостью, электроды с такой структурой также могут сохранять стабильные характеристики в радиационной среде, избегая функциональной деградации, вызванной старением материала.

При применении электродов в промышленных дуговых электропечах преимущества электродов с каркасным наполнением также весьма очевидны. При работе электродной печи

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотемпературная дуга, образующаяся между электродом и шихтой, чрезвычайно горячая, и электрод должен выдерживать частые механические удары и термические удары. При этом высокие прочностные характеристики вольфрамового каркаса могут предотвратить разрушение электрода под ударом, а его высокая термостойкость может противостоять прямому горению дуги; высокая проводимость медной фазы обеспечивает стабильное генерацию дуги, быстро рассеивая тепло дуги, избегая потери конца электрода из-за перегрева. По сравнению с другими типами электродов, электроды с каркасным заполнением показывают более длительный срок службы и более стабильные рабочие характеристики в таких высокочастотных и высокоинтенсивных рабочих условиях.

Короче говоря, каркасно-заполненный электрод обеспечивает идеальный баланс механических и функциональных свойств благодаря структурной конструкции «вольфрамовый каркас – фазовая функция меди». Его эксплуатационные характеристики особенно выдающиеся в экстремальных условиях, таких как высокие температуры и давление, что делает его незаменимым ключевым материалом в высокотехнологичной промышленности.

#### 4.5.3 Электрод градиентного распределения

Электрод с градиентным распределением представляет собой высокоспециализированную структурную конструкцию из композитов вольфрам-медь. Его основной особенностью является непрерывно изменяющееся распределение соотношения вольфрама и меди по поперечному сечению электрода. От одного конца электрода к другому содержание вольфрама может постепенно увеличиваться, а содержание меди уменьшаться, или наоборот, что приводит к микроструктуре с плавным переходом характеристик. Такая конструкция отходит от равномерного распределения компонентов, характерного для традиционных композитных материалов. Благодаря тщательному контролю градиента состава, различные области электрода отдают приоритет эксплуатационным преимуществам либо вольфрама, либо меди, в то время как буферный эффект переходной области предотвращает проблемы с межфазным напряжением, вызванные резкими изменениями характеристик.

С точки зрения эксплуатационных характеристик, электрод с градиентным распределением демонстрирует значительные характеристики «региональной функционализации». Область с высоким содержанием вольфрама обладает превосходной термостойкостью и износостойкостью благодаря высокой температуре плавления и высокой прочности вольфрама, а также может сохранять структурную стабильность в условиях экстремально высоких температур; в то время как область с высоким содержанием меди опирается на высокую электро- и теплопроводность меди для достижения эффективной передачи тока и рассеивания тепла. Что ещё более важно, состав промежуточной переходной области изменяется медленно, благодаря чему два свойства плавно соединяются в месте соединения. Не наблюдается ни резкого падения электропроводности из-за внезапного увеличения содержания вольфрама, ни резкого снижения термостойкости из-за внезапного увеличения содержания меди. Такое постепенное изменение характеристик эффективно решает распространённую проблему концентрации напряжений при соединении

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

разнородных материалов и значительно повышает надёжность электрода в сложных условиях эксплуатации.

Процесс изготовления электродов с градиентным распределением состава чрезвычайно сложен с технической точки зрения и требует точного контроля распределения состава. К распространённым методам изготовления относятся слоистая порошковая металлургия и градиентное спекание: метод слоистой порошковой металлургии заключается в укладке смешанных порошков с различным соотношением вольфрама и меди слоями в соответствии с заданным порядком градиента и достижении непрерывного перехода состава посредством однократного прессования и спекания. Необходимо точно контролировать разницу в составе каждого слоя порошка для обеспечения гладкости переходной области; метод градиентного спекания заключается в направленной диффузии вольфрама или меди внутри материала путём регулирования температурного или атмосферного поля во время процесса спекания, формируя тем самым естественный градиент состава. Независимо от используемого метода, необходимо использовать передовые технологии моделирования для предварительного проектирования кривой распределения состава и обеспечения соответствия фактического распределения проектному посредством точного управления параметрами процесса. Любое незначительное отклонение может привести к изменению характеристик в переходной области.

Тепловые структурные компоненты в аэрокосмической промышленности. Например, когда космический аппарат возвращается в атмосферу из космоса, поверхность спускаемой капсулы испытывает интенсивное трение об атмосферу, создавая чрезвычайно высокие температуры. Это требует от материала поверхности капсулы превосходной термостойкости и стойкости к окислению. Между тем, прецизионные приборы внутри капсулы чрезвычайно чувствительны к температуре и требуют эффективной системы отвода тепла для поддержания подходящей рабочей температуры. В этом случае градиентно-распределённые электроды служат ключевым компонентом, соединяющим поверхность капсулы с внутренней системой отвода тепла. Внешний конец, обращенный к капсуле, выполнен из материала с высоким содержанием вольфрама, что обеспечивает высокую термостойкость и позволяет выдерживать интенсивное тепло, выделяющееся при возвращении, предотвращая плавление или окисление поверхности. Внутренний конец, обращенный к капсуле, выполнен из материала с высоким содержанием меди, которая благодаря своей превосходной теплопроводности быстро передает тепло, поглощенное поверхностью, внутреннему радиатору, предотвращая рассеивание тепла к находящимся внутри приборам. Переходная зона обеспечивает плавный переход характеристик, рассеивая значительные напряжения, вызванные внутренней и внешней разницей температур и разницей свойств материалов, предотвращая растрескивание или отслоение электрода при многократных термоциклах.

Электроды с градиентным распределением также играют незаменимую роль в компонентах камеры сгорания высокоскоростных авиационных двигателей. Внутренняя часть камеры сгорания во время работы подвергается воздействию высоких температур и давления. Высокотемпературный поток воздуха, образующийся при сгорании топлива, оказывает сильное

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

абразивное воздействие на стенки камеры, что требует от стороны, подверженной воздействию высокой температуры, исключительно высокой термостойкости и стойкости к истиранию. Внешняя часть камеры сгорания должна быть подключена к системе охлаждения для быстрого отвода тепла и предотвращения общего перегрева, что, в свою очередь, требует от материала внешней поверхности хорошей теплопроводности. Электроды с градиентным распределением, благодаря рациональной конструкции с градиентом соотношения вольфрама и меди, обладают высокими свойствами вольфрама внутри камеры сгорания, что обеспечивает стойкость к высокотемпературному истиранию, в то время как высокие свойства меди снаружи обеспечивают эффективное рассеивание тепла. Промежуточная переходная область устраняет конфликты рабочих характеристик и противоречия напряжений между внутренней и внешней частями, обеспечивая сохранение структурной целостности и стабильной работы камеры сгорания при длительной высокочастотной работе.

Кроме того, градиентно-распределенные электроды также демонстрируют уникальные преимущества в качестве теплоотводящих электродов для мощных полупроводниковых приборов. При работе полупроводникового прибора в области ядра кристалла выделяется большое количество тепла, что требует от электрода эффективной теплопроводности для его рассеивания. Участок электрода, подключенный к внешней цепи, должен обладать хорошей электропроводностью для снижения потерь при передаче сигнала. Благодаря постепенному распределению меди от контактного конца кристалла до конца цепи, электрод может одновременно отвечать двум требованиям: эффективному теплоотводу и низкоомной электропроводности, избегая при этом проблем недостаточного теплоотвода или низкой электропроводности, вызванных ограничениями производительности одного материала.

#### 4.6 Классификация вольфрамово-медных электродов по макроскопической физической форме

Макроскопическая физическая морфология в основном фокусируется на состоянии поверхности, плотности и композитном режиме электрода, который подразделяется на плотный тип, пористый тип и тип композитного покрытия в зависимости от различных функциональных требований.

##### 4.6.1 Плотный электрод

Плотные электроды – наиболее широко используемая базовая категория вольфрамово-медных электродов. Их основной особенностью является чрезвычайно низкая внутренняя пористость. Частицы вольфрама и фазы меди прочно связаны, образуя непрерывную и плотную микроструктуру, что обеспечивает гладкую и ровную поверхность. Такая структура не только обеспечивает электроду превосходные общие характеристики, но и обеспечивает его стабильную и надежную работу в различных промышленных условиях, что делает его основополагающим материалом для прецизионного производства.

Ключ к достижению этой плотной структуры кроется в передовых процессах подготовки, при

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

этом наиболее часто используемыми техническими подходами являются спекание под высоким давлением и горячее изостатическое прессование. Спекание под высоким давлением применяет постоянное высокое давление к смешанному порошку вольфрама и меди при высокой температуре, заставляя частицы полностью соприкасаться, диффундировать и сплавляться, устраняя поры, образовавшиеся между частицами. Горячее изостатическое прессование идет дальше, прикладывая равномерное давление во всех направлениях к заготовке через жидкую среду в условиях высокой температуры, полностью уплотняя мельчайшие поры внутри материала и в конечном итоге формируя почти бездефектную плотную структуру. Основные цели обоих процессов одинаковы: за счет синергетического эффекта давления и температуры физические барьеры между частицами разрушаются, достигая тесной связи между двумя фазами вольфрама и меди и закладывая структурную основу для высоких характеристик электрода .

Преимущество плотных электродов в производительности обусловлено их структурной целостностью. Во-первых, низкая пористость гарантирует, что медная фаза образует непрерывную и непрерывную проводящую сеть. Ток не будет вызывать локальные изменения сопротивления из-за закупорки пор во время передачи, а проводящие характеристики стабильны и эффективны. В то же время, плотно интегрированная микроструктура обеспечивает плавный путь для теплопроводности, так что тепло, выделяющееся во время обработки или работы, может быстро рассеиваться, избегая ухудшения производительности, вызванного локальным перегревом. Во-вторых, плотная структура придает электроду более высокую механическую прочность и устойчивость к деформации. При воздействии механического давления или термического напряжения он нелегко треснет или сломается и может сохранять стабильную форму в течение длительного времени, продлевая срок его службы. Кроме того, гладкая и ровная поверхность снижает колебания сопротивления при контакте с заготовкой, а также снижает вероятность прилипания примесей во время обработки, что способствует повышению стабильности процесса.

В области электроэрозионной обработки преимущества плотных электродов особенно очевидны. Электроэрозионная обработка основана на высокочастотном разряде между электродом и заготовкой для удаления материала. Структурная плотность электрода напрямую влияет на равномерность распределения энергии разряда. Если внутри электрода есть поры, во время процесса разряда может возникнуть локальная концентрация энергии, что приводит к нерегулярным следам абляции на поверхности заготовки, влияя на точность обработки; однородная структура плотного электрода может обеспечить стабильное высвобождение энергии разряда и поддерживать постоянную шероховатость поверхности заготовки. Это особенно подходит для сценариев со строгими требованиями к точности, таких как изготовление пресс-форм. Например, при обработке прецизионных пресс-форм для зубчатых передач плотные электроды могут точно воспроизводить профиль зуба шестерни за счет стабильной производительности разряда, обеспечивать размерную точность и качество поверхности пресс-формы, а также предоставлять надежные гарантии для последующего массового производства зубчатых передач.

При контактной сварке электроды с высокой плотностью также играют незаменимую роль. В

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

процессе сварки электрод должен обеспечивать передачу тока через плотный контакт с заготовкой, выдерживая при этом определённое давление. Низкая пористость электрода с высокой плотностью позволяет избежать «эффекта пустоты» при передаче тока, то есть разрыва пути тока или резкого увеличения сопротивления, вызванного порами. Это обеспечивает равномерное распределение тока по зоне сварки, что обеспечивает стабильное выделение тепла в месте сварки и гарантирует равномерность формирования сварного шва. При сварке зубчатых передач автомобилей эта стабильность имеет решающее значение: прочность сварного шва напрямую влияет на общие характеристики трансмиссии. Электрод с высокой плотностью обеспечивает равномерную прочность каждой сварной точки благодаря стабильной передаче тока и допустимому давлению, предотвращая риск выхода из строя зубчатой передачи из-за локальных дефектов сварки .

В области корпусирования микроэлектроники также широко используются плотные электроды. Микроэлектронные устройства предъявляют чрезвычайно высокие требования к точности размеров и стабильности характеристик электродов. Гладкая поверхность и однородная структура плотных электродов обеспечивают хороший контакт с кристаллом или подложкой, снижают контактное сопротивление и повышают эффективность передачи сигнала. В то же время, их превосходная теплопроводность позволяет быстро рассеивать тепло, выделяемое кристаллом во время работы, предотвращая снижение производительности устройства из-за чрезмерной температуры. Например, в корпусировании чипов смартфонов плотные вольфрамово-медные электроды служат двойной средой для электропроводности и теплоотвода, обеспечивая стабильную передачу электрических сигналов при эффективном контроле температуры кристалла, что обеспечивает высокопроизводительную работу устройства.

#### 4.6.2 Пористые электроды

Пористые электроды представляют собой тип вольфрамово-медного электрода с особыми структурными характеристиками. Они распределены большим количеством регулярных или нерегулярных пор. Эти поры не являются дефектами материала, а структурными особенностями, активно формируемыми в процессе проектирования. В отличие от плотных электродов, которые стремятся к низкой пористости, распределение пор и доля пористых электродов являются основными параметрами проектирования. Регулируя такие параметры, как давление, температура и время выдержки в процессе спекания, можно точно контролировать морфологию и плотность пор, в конечном итоге формируя особый материал с функциональными и структурными свойствами. Такая конструкция позволяет электроду сохранять основные свойства композиционных материалов вольфрам-медь, получая при этом уникальные преимущества, такие как малый вес и высокая удельная площадь поверхности, тем самым адаптируясь к потребностям конкретных сценариев.

Ключ к процессу приготовления пористых электродов кроется в обратном регулировании процесса спекания. Традиционные процессы уплотнения способствуют слиянию частиц за счет высокого давления и длительного сохранения тепла, в то время как формирование пористых

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

структур требует соответствующего снижения давления спекания и сокращения времени сохранения тепла, так что порошок вольфрама и порошок меди образуют каркасную структуру в неполностью уплотненном состоянии, а промежутки между частицами сохраняются в виде пор. Кроме того, образованию регулярных пор может способствовать добавление порообразователей: летучих или растворимых веществ, добавляемых в смешанный порошок. В процессе спекания эти вещества испаряются или впоследствии растворяются и удаляются, оставляя после себя поровые каналы заданной формы. Независимо от метода, требуется точный контроль параметров процесса, чтобы гарантировать, что распределение пор равномерно и соответствует проектным ожиданиям, избегая недостатков производительности, вызванных локальной концентрацией пор.

Основное преимущество пористой структуры электрода заключается в балансе между малым весом и эффективностью теплоотвода. Наличие большого количества пор значительно снижает общую плотность материала, а вес значительно уменьшается по сравнению с плотными электродами того же объема, что критически важно в ситуациях, когда необходимо контролировать нагрузку на устройство. В то же время сложная сеть каналов, образованная порами, значительно увеличивает удельную площадь поверхности электрода. При передаче тепла через материал большая площадь поверхности может ускорить теплообмен с окружающей средой, а в сочетании с циркуляцией воздуха, которая может образовываться в порах, повышает эффективность теплоотвода. Такое сочетание «малый вес + высокая теплопроводимость» делает пористые электроды незаменимыми в таких областях, как мобильные устройства и компоненты аэрокосмической техники, чувствительные к весу и предъявляющие высокие требования к теплоотводу.

При применении коммутационных электродов для двигателей дронов в полной мере проявляются преимущества пористых электродов. Прочность дронов напрямую связана с весом оборудования. Легкая конструкция является ключом к повышению долговечности. Поскольку двигатель является основным компонентом, оптимизация веса его электродов особенно важна. Пористый вольфрамово-медный электрод снижает вес за счет своей внутренней пористой структуры, в то же время обеспечивая стабильную передачу тока во время коммутации из-за высокой проводимости медной фазы. Что еще более важно, двигатели дронов генерируют много тепла при работе на высоких скоростях. Если тепло не рассеивается вовремя, это может привести к перегреву двигателя и выходу его из строя. Высокая удельная площадь поверхности пористой структуры может быстро рассеивать тепло в воздух. В сочетании с конструкцией рассеивания тепла корпуса двигателя это образует эффективную систему рассеивания тепла, гарантируя, что двигатель будет поддерживать стабильную работу во время длительного полета. В области электролитической обработки пористая структура пористых электродов играет уникальную роль в хранении и передаче среды. Электролитическая обработка обеспечивает электрохимическое растворение материалов через электролит между электродом и заготовкой. Традиционные электроды требуют внешних труб для непрерывной транспортировки электролита, в то время как внутренние поры пористых электродов могут непосредственно служить хранилищами электролита и каналами, медленно высвобождая электролит во время процесса обработки, обеспечивая постоянную влажность зоны обработки и непрерывное охлаждение и смазку. Такая

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

конструкция упрощает систему трубопроводов обрабатывающего оборудования и особенно подходит для электролитической обработки сложных поверхностей или глубоких полостей - когда электрод проникает в узкое пространство, электролит, высвобождающийся из пор, может точно воздействовать на зону обработки, избегая проблемы неравномерного распределения электролита, вызванного внешней транспортировкой, и улучшая точность обработки и качество поверхности.

Среди компонентов электродов топливных элементов пористые вольфрамово-медные электроды также представляют особую ценность. Топливные элементы должны использовать электроды для достижения каталитических реакций между топливом и окислителем при проведении генерируемого тока. Это требует, чтобы электроды обладали как хорошей электропроводностью, так и достаточной площадью контакта для реакции. Пористая структура пористого электрода обеспечивает пространство для диффузии газа и реакции, а высокая проводимость композитного материала вольфрам-медь обеспечивает быструю передачу электронов. Оптимизируя размер и распределение пор, можно сбалансировать эффективность реакции и проводимость, что позволяет топливному элементу поддерживать стабильную работу при высокой выходной мощности. Кроме того, пористая структура обладает хорошей прочностью, что может буферизировать изменения объема во время работы батареи и продлить срок службы электрода .

Стоит отметить, что конструкция пористых электродов требует корректировки параметров пор в соответствии с конкретными условиями применения. Чрезмерно большие поры могут снизить прочность конструкции, а слишком маленькие – повлиять на теплоотдачу или эффективность диэлектрической проницаемости. Поэтому морфология пор, их равномерность распределения и пропорции должны многократно проверяться посредством моделирования и экспериментов. Хотя такая индивидуальная конструкция усложняет изготовление, она также позволяет пористым электродам удовлетворять особые требования, недоступные для обычных электродов, что делает их одной из самых универсальных категорий в семействе вольфрамово-медных электродов.

#### 4.6.3 Электроды с композитным покрытием

Электроды с композитным покрытием представляют собой особую категорию вольфрамово-медных электродов, достигающих прорывных характеристик благодаря функциональной суперпозиции. Основная концепция конструкции заключается в нанесении одного или нескольких функциональных покрытий на поверхность вольфрамово-медной подложки, что позволяет использовать синергетический эффект покрытия и подложки для компенсации недостатков одного материала. Выбор материала покрытия чрезвычайно гибок, и в зависимости от требований к применению могут быть выбраны различные материалы, такие как серебро, никель, алмаз и керамика. С помощью гальванопокрытия, осаждения из паровой фазы, термического напыления и других процессов достигается тесная связь с подложкой, в конечном итоге образуя композитную структуру «вольфрамово-медная подложка, обеспечивающая структурную поддержку, и поверхностное покрытие, оптимизирующее специфические функции». Такая конструкция не только сохраняет основные преимущества вольфрамово-медных материалов, такие как высокая прочность и высокая электро- и теплопроводность, но и придает

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электроду новые эксплуатационные характеристики благодаря покрытию, значительно расширяя области его применения .

Ключевым фактором в изготовлении композитных электродов с покрытием является качество связи между покрытием и подложкой, и различные технологические процессы имеют разные фокусы. Процесс гальванизации подходит для получения металлических покрытий. В результате электролиза ионы металла равномерно осаждаются на поверхности вольфрамово-медной подложки, образуя плотное покрытие. Его преимуществами являются контролируемая толщина покрытия и прочная связь с подложкой. Он особенно подходит для получения проводящих металлических покрытий, таких как серебро и никель. Метод осаждения из паровой фазы испаряет материал покрытия в вакууме и наносит его в виде пленки на поверхность подложки. Он позволяет получать тонкие слои с нанометровой точностью. Он подходит для неметаллических покрытий, таких как алмаз и керамика, и позволяет точно контролировать состав и структуру покрытия. Процесс термического напыления нагревает материал покрытия до расплавленного или полурасплавленного состояния и распыляет его на поверхность подложки высокоскоростным потоком воздуха для формирования покрытия. Он подходит для нанесения толстых покрытий или покрытий большой площади и широко используется для нанесения износостойких и термостойких покрытий. Независимо от используемого процесса, поверхность подложки должна быть предварительно обработана (полировкой, очисткой и активацией), чтобы гарантировать отсутствие загрязнений и оксидных слоёв между покрытием и подложкой. В противном случае покрытие может отслоиться или ухудшиться его эксплуатационные характеристики .

Преимущество электродов с композитным покрытием заключается в их целенаправленном усовершенствовании функциональных характеристик. Вольфрамово-медная матрица, выступающая в качестве основы, обеспечивает стабильную механическую прочность, электро- и теплопроводность, а также структурную стабильность, гарантируя сохранение формы и основных эксплуатационных характеристик электрода в процессе эксплуатации. Поверхностное покрытие оптимизирует эксплуатационные характеристики для конкретных задач, таких как снижение контактного сопротивления, повышение износостойкости и повышение стойкости к окислению, что позволяет электроду превосходить характеристики материалов из чистого вольфрама и меди в конкретных условиях эксплуатации. Эта модель «базовая гарантия + усовершенствование функциональных характеристик» позволяет электроду адаптироваться к комплексным требованиям сложных условий эксплуатации, достигая при этом высочайшего уровня ключевых эксплуатационных показателей.

В разьемах для высокочастотного коммуникационного оборудования посеребрённые композитные покрытия показывают превосходные результаты. Передача высокочастотного сигнала чрезвычайно чувствительна к контактному сопротивлению, и даже незначительные колебания сопротивления могут вызвать затухание или искажение сигнала. Вольфрамово-медная подложка обладает хорошей проводимостью, а поверхностное серебряное покрытие может дополнительно снизить контактное сопротивление, поскольку серебро является одним из самых

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проводящих металлов, а его поверхность нелегко окисляется и может сохранять низкие характеристики сопротивления в течение длительного времени. Когда электрод используется в качестве разъема, слой серебряного покрытия может обеспечить эффективную передачу сигнала на контактом интерфейсе, уменьшить отражение и потери и особенно подходит для сценариев со строгими требованиями к качеству сигнала, таких как спутниковая связь и базовые станции 5G. В то же время высокая прочность вольфрамово-медной подложки гарантирует, что разъем не деформируется во время процесса подключения и отключения, избегая плохого контакта из-за рыхлой структуры.

Композитные электроды с алмазным покрытием на поверхности демонстрируют уникальную ценность в области обработки материалов высокой твердости. В электроэрозионной обработке таких материалов, как литейная сталь и твердый сплав, Электроды должны часто выдерживать высокотемпературные разряды и механическое трение. После длительного использования поверхность электродов из чистого вольфрамово-медного сплава склонна к износу или абляции, что приводит к снижению точности обработки. Благодаря чрезвычайно высокой твердости и износостойкости, алмазное покрытие может образовывать защитный барьер на поверхности электрода, предотвращая механический износ и высокотемпературную эрозию в процессе обработки, значительно продлевая срок службы электрода. В то же время, превосходная теплопроводность алмаза способствует быстрому рассеиванию тепла электродом и предотвращает разрушение покрытия, вызванное локальным перегревом. Это двойное преимущество «износостойкость + теплоотвод» делает этот тип электродов очень популярным в таких областях, как прецизионная обработка пресс-форм и производство лопаток авиационных двигателей.

В сценариях высокотемпературной защиты от окисления ключевую роль играют композитные электроды с никелевым или керамическим покрытием. Например, в электродах дуговых печей металлургической промышленности электроды должны работать непрерывно в высокотемпературной окислительной среде. На поверхности чистых вольфрамово-медных материалов легко образуется оксидный слой, что приводит к снижению электропроводности. Никелевые покрытия могут образовывать плотную оксидную пленку при высоких температурах, предотвращая дальнейшую коррозию подложки кислородом и защищая проводящую сеть электрода от разрушения; керамические покрытия (такие как оксид алюминия и диоксид циркония) обладают более высокой высокотемпературной стойкостью и стойкостью к окислению и подходят для высокотемпературных рабочих условий. Они предотвращают контакт подложки с агрессивными средами благодаря физической изоляции. Этот тип композитного электрода не только сохраняет высокую электро- и теплопроводность вольфрамовой меди, но также обладает высокотемпературной стойкостью и стойкостью покрытия к окислению, что значительно расширяет границы применения вольфрамово-медных материалов в высокотемпературных отраслях промышленности.

Кроме того, технология композитных покрытий позволяет добиться многофункциональной интеграции. Например, в прецизионных электродах медицинских устройств композитные

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

биосовместимые покрытия (например, покрытия из титанового сплава) могут использоваться для обеспечения превосходной электропроводности вольфрамово-медных электродов и предотвращения побочных реакций при контакте с тканями человека, что соответствует особым требованиям, предъявляемым к малоинвазивным хирургическим инструментам. Эта функциональная адаптация, достигаемая с помощью покрытий, позволяет композитным покрытиям удовлетворять различным нестандартным требованиям, что делает их категорией с самым высоким инновационным потенциалом в семействе вольфрамово-медных электродов.

Стоит отметить, что толщина и равномерность покрытия существенно влияют на эксплуатационные характеристики электрода. Слишком толстое покрытие может вызвать чрезмерное внутреннее напряжение, приводящее к растрескиванию или отслоению; слишком тонкое покрытие не обеспечит эффективной защиты или улучшения функциональных характеристик. Поэтому параметры процесса нанесения покрытия необходимо точно контролировать в соответствии с характеристиками материала покрытия и подложки, а также проводить предварительное моделирование и последующие испытания для обеспечения соответствия характеристик покрытия установленным стандартам. Хотя это уточнение требований к производству увеличивает производственные затраты, оно также позволяет электродам с композитным покрытием создавать незаменимую ценность в сфере высокотехнологичного производства.



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

**Resistance Welding Electrodes:** Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

**Repair Welding Electrodes:** Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

**Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes:** Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

**High-Voltage Discharge Tube Electrodes:** This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Глава 5: Технология изготовления вольфрамово-медного электрода

### 5.1 Процесс инфильтрации

Процесс инфильтрации является основной технологией в изготовлении вольфрамово-медных электродов. Путем инфильтрации жидкой меди в пористый вольфрамовый каркас получается композиционный материал с превосходными характеристиками. Этот процесс включает в себя два основных этапа: предварительное изготовление вольфрамового каркаса и инфильтрацию меди с целью достижения низкой пористости и равномерного распределения фаз. Процесс инфильтрации основан на порошковой металлургии в сочетании с вакуумом или инертной атмосферой для обеспечения высокой плотности и стабильности материала. В процессе изготовления ключевыми этапами являются формование, спекание и контроль пор вольфрамового порошка, которые напрямую влияют на механическую прочность, проводимость и долговечность конечного электрода. Оптимизация параметров процесса, таких как температура, давление и время, существенно определяет микроструктуру и характеристики электрода.

#### 5.1.1 Изготовление каркаса из вольфрама

Предварительное изготовление вольфрамового каркаса является первым шагом в процессе инфильтрации, целью которого является создание пористой вольфрамовой структуры, которая служит основой для последующей инфильтрации медью. На этом этапе создается каркасная структура с определенной прочностью путем формования, спекания и контроля пористости вольфрамового порошка. Качество вольфрамового каркаса напрямую влияет на эффект заполнения медью и эксплуатационные характеристики конечного электрода. Процесс подготовки требует точного контроля чистоты сырья, размера частиц и параметров процесса. Пористость и однородность микроструктуры являются ключом к успешному предварительному изготовлению. Для оптимизации плотности и стабильности каркаса часто используется горячее изостатическое прессование. Предварительное изготовление вольфрамового каркаса закладывает основу для процесса инфильтрации, гарантируя, что электрод будет иметь хорошие механические свойства при последующей обработке.

##### 5.1.1.1 Формование вольфрамового порошка

Формование вольфрамового порошка является фундаментальным этапом в предварительном изготовлении вольфрамовых каркасов. Прессование вольфрамового порошка в определенную форму подготавливает тело к последующему спеканию и инфильтрации. Этот процесс обычно использует методы холодного или изостатического прессования, помещая высокочистый вольфрамовый порошок в форму и механически формируя предварительное сырое тело. В процессе формования размер частиц и морфология вольфрамового порошка должны быть постоянными. Сферические или близкие к сферическим порошки помогают улучшить эффективность заполнения и однородность сырого тела. Равномерность смешивания достигается с помощью шаровой мельницы или V-образных смесителей, гарантируя распределение порошка

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

без значительного расслоения. Давление формования и конструкция формы напрямую влияют на распределение плотности и пористости сырого тела. Правильное давление может уменьшить внутренние дефекты.

Сформированный сырец должен обладать определённой механической прочностью, чтобы выдерживать последующее высокотемпературное спекание. Обработка поверхности, такая как предварительное прессование, может дополнительно повысить стабильность сырца. В процессе формования необходимо контролировать влажность, чтобы предотвратить поглощение влаги порошком, что может привести к снижению качества формовки. Формовка вольфрамового порошка является отправной точкой всего процесса подготовки, и её качество определяет плавность последующих этапов.

### 5.1.1.2 Спекание вольфрамового скелета

Спекание вольфрамового скелета является ключевым этапом в преобразовании вольфрамового порошка в пористый скелет. Высокотемпературная обработка повышает прочность и стабильность сырца. Этот процесс обычно проводится в вакууме или атмосфере водорода. Температура спекания подбирается в соответствии с характеристиками вольфрамового порошка, способствуя росту шейки и связыванию между частицами. Первоначально частицы вольфрамового порошка образуют начальные связи посредством диффузии и рекристаллизации. По мере повышения температуры микроструктура постепенно уплотняется, и начинает формироваться пористая структура. Время спекания и скорость нагрева должны точно контролироваться, чтобы избежать чрезмерного нагрева, который может привести к растрескиванию или перегреву. Процесс спекания также включает контроль атмосферы. Восстановительная водородная среда удаляет поверхностный оксидный слой и улучшает межчастичные связи. Горячее изостатическое прессование (ГИП) может дополнительно оптимизировать спекание, повышая однородность и прочность скелета за счет всенаправленного давления. Спеченный вольфрамовый каркас должен обладать достаточной механической прочностью и соответствующей пористостью для обеспечения каналов инфильтрации меди. Корректировка параметров процесса влияет на микроструктуру каркаса. Дальнейшие исследования, включая динамическое моделирование и многостадийные методы спекания, позволят повысить эффективность спекания и качество каркаса для удовлетворения требований высокоточных электродов.

### 5.1.1.3 Контроль пор вольфрамового скелета

Пористость вольфрамового каркаса является критически важным этапом для обеспечения успешной инфильтрации. Цель состоит в том, чтобы отрегулировать пористость каркаса и распределение пор по размерам для создания оптимальных условий инфильтрации меди. Этот процесс достигается за счет давления формования, условий спекания и использования добавок. Пористость напрямую влияет на эффективность заполнения медью и характеристики готового электрода. На этапе формования регулировка давления может изменить начальную плотность

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

заготовки. Более низкое давление сохраняет больше пор, в то время как более высокое давление уменьшает их количество. Во время спекания контроль температуры и времени влияет на закрытие и соединение пор. Правильные параметры спекания поддерживают структуру с открытыми порами. Добавки, такие как органические связующие или порообразователи, могут способствовать контролю пор. После спекания добавки удаляются пиролизом, образуя равномерную сеть пор. Микроструктурный анализ показывает, что равномерное распределение пор по размеру является основой контроля пор. Чрезмерно большие или неравномерные поры могут привести к недостаточному проникновению меди. Процесс горячего изостатического прессования оптимизирует структуру пор за счёт всенаправленного давления, уменьшая долю закрытых пор и повышая эффективность проникновения. Контроль пор также должен учитывать последующую смачиваемость меди. Обработка поверхности может улучшить межфазное сцепление между вольфрамовым скелетом и жидкой медью.

### 5.1.2 Контроль инфильтрации

Контроль инфильтрации является решающим этапом процесса инфильтрации, направленным на производство высокопроизводительных вольфрамово-медных электродов путем точного управления процессом инфильтрации меди. Этот этап включает три ключевых этапа: подготовку медного материала, контроль температуры инфильтрации и контроль времени инфильтрации, гарантируя, что жидкая медь полностью заполняет поры вольфрамового скелета, образуя однородную композитную структуру. Контроль инфильтрации напрямую влияет на скорость заполнения пор, прочность межфазных связей и плотность конечного электрода. Низкая пористость и равномерное распределение фаз в микроструктуре являются основой обеспечения качества. Вакуумная или инертная атмосфера дополнительно оптимизируют эффект инфильтрации, а горячее изостатическое прессование может помочь повысить стабильность материала. Оптимизация контроля инфильтрации обеспечивает надежную поддержку производительности при применении электродов в электроискровой обработке, сварке и корпусировании микроэлектроники.

#### 5.1.2.1 Подготовка медного материала

Подготовка медного материала является основополагающим этапом в управлении инфильтрацией, целью которого является обеспечение высококачественного медного сырья и создание условий для инфильтрации жидкой меди. Этот процесс обычно включает в себя выбор, очистку и предварительную обработку медного порошка или медных блоков для обеспечения хорошей текучести и смачиваемости при высоких температурах. Чистота медного материала является ключевым фактором. Высокочистая электролитическая медь или распыленная медь выбирается для снижения содержания примесей, таких как кислород и сера, чтобы избежать образования пор или дефектов в процессе инфильтрации. Медный материал может быть в форме порошка или кусков в соответствии с требованиями процесса. Форма порошка способствует равномерному распределению, в то время как форма кусков подходит для крупномасштабной инфильтрации. Размер частиц или размер блоков должен соответствовать пористости вольфрамового скелета.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Предварительная обработка включает сушку и очистку поверхности. Медный материал сушат в вакууме или среде инертного газа для удаления поверхностной влаги и оксидных слоёв, что улучшает межфазную связь с вольфрамовым каркасом. Для равномерного смешивания и равномерного распределения медного материала в процессе инфильтрации используется механическое перемешивание или шаровая мельница. При подготовке медного материала также необходимо учитывать его температуру плавления. Соответствующий предварительный нагрев может повысить эффективность инфильтрации. В процессе подготовки осуществляется контроль условий окружающей среды для предотвращения окисления и обеспечения качества медного материала.

#### 5.1.2.2 Контроль температуры инфильтрации

Контроль температуры инфильтрации является ключевым этапом в управлении инфильтрацией, обеспечивая эффективное проникновение меди в вольфрамовый каркас в жидком состоянии, избегая при этом повреждения материала, вызванного чрезмерным нагревом. Этот процесс обычно выполняется в вакуумной печи или в инертной атмосфере. Температура устанавливается выше точки плавления меди для достижения жидкой фазы, что позволяет меди полностью смочить и заполнить поры. Точный контроль температуры имеет решающее значение. Слишком низкая температура может помешать полному расплавлению меди, в то время как слишком высокая температура может вызвать локальное плавление вольфрамового каркаса или рост зерен, что повлияет на микроструктуру. Скорость нагрева следует регулировать постепенно, чтобы избежать растрескивания, вызванного концентрированными термическими напряжениями.

Контроль температуры также включает управление атмосферой. Вакуумная среда снижает окислительные реакции, а инертные газы, такие как аргон, обеспечивают дополнительную защиту материала. Горячее изостатическое прессование может помочь в контроле температуры, улучшая проникновение меди и повышая эффективность заполнения за счет всестороннего давления. Стабильность температуры инфильтрации напрямую влияет на качество межфазного соединения. Чрезмерные колебания температуры могут привести к переливу меди или ее неравномерному распределению. Распределение температуры внутри печи необходимо контролировать в ходе процесса для обеспечения постоянства температуры во всех деталях. В будущем внедрение интеллектуальных систем контроля температуры или технологии многоступенчатого нагрева позволит дополнительно оптимизировать контроль температуры инфильтрации, повышая плотность электродов и стабильность рабочих характеристик.

#### 5.1.2.3 Контроль времени инфильтрации

Время инфильтрации является ключевым параметром управления инфильтрацией, обеспечивающим полное проникновение жидкой меди в вольфрамовый каркас и образование стабильной композитной структуры. Этот процесс определяется пористостью вольфрамового каркаса, количеством медного материала и температурой. Слишком короткое время может

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

привести к неполному заполнению, а слишком большое – к чрезмерному растеканию меди или деформации каркаса. На начальном этапе инфильтрации меди требуется достаточно времени для смачивания поверхности вольфрама и проникновения в глубокие поры. Последующий контроль времени фокусируется на процессе затвердевания, чтобы избежать перелива меди и образования пор.

Контроль времени также необходимо координировать с температурой и давлением. Горячее изостатическое прессование (ГИП) может сократить время инфильтрации и ускорить течение меди за счет всестороннего давления. При этом время инфильтрации обычно устанавливается поэтапно: начальный этап для обеспечения инфильтрации, этап стабилизации для улучшения сцепления и этап охлаждения для затвердевания структуры. Микроструктурный анализ показывает, что правильное время инфильтрации может уменьшить количество незаполненных пор и улучшить межфазное сцепление. Стабильность окружающей среды и производительность оборудования напрямую влияют на эффективность контроля времени. В будущем для оптимизации времени инфильтрации и повышения однородности и долговечности электродов будут использоваться технологии мониторинга в реальном времени или динамической регулировки.

## 5.2 Технология постобработки

Постобработка — заключительный этап изготовления вольфрамово-медных электродов. Она направлена на оптимизацию геометрии, качества поверхности и функциональных характеристик электрода посредством резки, шлифовки, обработки поверхности и контроля точности размеров. Этот этап выполняется после процесса инфильтрации, чтобы гарантировать соответствие электрода требованиям конкретного применения. Постобработка вольфрамово-медных электродов использует высокую твердость вольфрама и пластичность меди для корректировки микроструктуры и повышения долговечности посредством механической обработки и модификации поверхности. Точный контроль параметров процесса имеет решающее значение, включая выбор инструмента, условия обработки и контроль качества, что напрямую влияет на эксплуатационные характеристики электрода при электроэрозионной обработке, сварке или корпусировании микроэлектроники.

### 5.2.1 Резка

Резка является начальным этапом постобработки, удаляя излишки материала для придания формы вольфрамово-медному электроду. Этот процесс обычно включает точение или фрезерование с использованием твердосплавных или алмазных инструментов для удаления инфильтрованной грубой заготовки. Высокая твердость вольфрама требует инструментов с высокой износостойкостью, в то время как пластичность меди требует контролируемых скоростей резания и подачи для предотвращения заедания или разрыва. Резка подходит для электродов сложной формы, таких как стержни или блоки. Во время процесса необходимо обеспечить использование охлаждающей жидкости, чтобы минимизировать тепловыделение и повреждение поверхности.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Процесс резки включает несколько этапов: черновая обработка для удаления излишков материала и чистовая обработка для достижения точности контура, постепенно приближаясь к проектным размерам. Низкая пористость микроструктуры обеспечивает равномерную резку материала, а электроды, оптимизированные с помощью процесса горячего изостатического прессования, демонстрируют хорошую механическую стабильность. Шероховатость поверхности должна проверяться после резки для обеспечения плавной обработки на последующих этапах. Контроль окружающей среды, такой как борьба с пылью, может предотвратить загрязнение пылью. Дальнейшие усовершенствования станков с ЧПУ или лазерной резки могут повысить эффективность обработки и точность сложных форм, отвечая требованиям высокоточных электродов.

### 5.2.2 Шлифование

Шлифование — это деликатный этап постобработки, на котором абразивные инструменты удаляют стружку, улучшают качество поверхности и геометрическую точность вольфрамово-медных электродов. В этом процессе обычно используются алмазные шлифовальные круги или инструменты из карбида кремния для точной шлифовки высокой твердости вольфрама. Пластичность меди требует смазки для предотвращения чрезмерного износа. Шлифование подходит для улучшения качества контактной поверхности электрода, особенно в таких применениях, как электроискровая обработка (ЭИ) или корпусирование микроэлектроники, где требуется высокая плоскостность. Равномерное распределение фаз в микроструктуре обеспечивает стабильные результаты шлифования. Процесс шлифования состоит из двух этапов: грубого шлифования для удаления следов стружки и тонкого шлифования для достижения зеркальной поверхности. Давление и скорость шлифования необходимо регулировать в ходе процесса, чтобы предотвратить термические трещины или ожоги поверхности. Для снижения температуры и сохранения свойств материала используется охлаждающая жидкость. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования, обладают превосходной износостойкостью. После шлифования проверяются поверхностные дефекты, такие как микротрещины или раковины, чтобы убедиться в соответствии качества стандартам.

### 5.2.3 Обработка поверхности

Обработка поверхности – это этап постобработки, позволяющий улучшить свойства поверхности вольфрамово-медных электродов, такие как коррозионная стойкость, стойкость к окислению и адгезионная прочность, химическими или физическими методами. Этот процесс включает полировку, гальванопокрытие или нанесение покрытий для изменения высокой твердости вольфрама и химической активности меди. Полировка удаляет микроскопические дефекты поверхности, никелирование или золочение повышают атмосферостойкость, а покрытия, такие как нитрид титана, – износостойкость. Низкая пористость микроструктуры способствует равномерной обработке поверхности.

Процесс обработки поверхности должен быть адаптирован к условиям применения. Для

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электроэрозионных электродов полировка может быть предпочтительнее для повышения стабильности разряда, в то время как для сварочных электродов может потребоваться нанесение покрытия для снижения адгезии шлака. Необходимо контролировать температуру и время обработки, чтобы избежать повреждения внутренней структуры. Оптимизированные процессы горячего изостатического прессования (ГИП) улучшают адгезию поверхности электрода. Контроль условий окружающей среды, например, инертная атмосфера, может снизить окисление. После обработки необходимо проверить адгезию и износостойкость поверхности.

#### 5.2.4 Контроль точности размеров

Контроль точности размеров – это заключительный этап постобработки, гарантирующий соответствие вольфрамово-медного электрода проектным требованиям посредством измерений и регулировки. Этот процесс включает в себя использование координатно-измерительных машин или оптического контрольного оборудования для контроля длины, ширины и геометрических допусков электрода, обеспечивая тонкую настройку с учетом высокой твердости вольфрама и пластичности меди. После резки и шлифовки электрод проходит финишную обработку, контролирующую отклонения размеров до микронного уровня и обеспечивающую однородность микроструктуры для высокоточной обработки.

Контроль точности размеров включает в себя многократные проверки и корректировки. После того, как первоначальные испытания выявляют отклонения, они корректируются тонкой шлифовкой или локальной резкой. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования, демонстрируют превосходную размерную стабильность. Необходимо учитывать факторы окружающей среды, такие как колебания температуры, поскольку они влияют на тепловое расширение материала, что требует поддержания постоянной температуры. Данные контроля регистрируются для обеспечения однородности партии. В будущем интеллектуальные системы контроля или технология 3D-сканирования позволят осуществлять контроль точности в режиме реального времени, отвечая требованиям к высокоточным электродам или сложным конструктивным элементам.



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Глава 6: Сценарии применения вольфрамово-медных электродов

Вольфрамово-медные электроды широко используются в электроэрозионной обработке (ЭЭО) благодаря своей превосходной электропроводности, стойкости к высоким температурам, дуговой эрозии и хорошей обрабатываемости. В производстве прецизионных пресс-форм они используются для формирования сложных полостей и тонких структур благодаря низким потерям и высокой точности обработки, что делает их особенно подходящими для обработки твердосплавных пресс-форм. Для труднообрабатываемых материалов, таких как титановые сплавы и жаропрочные сплавы в аэрокосмической промышленности, они выдерживают высокие температуры, возникающие при высокочастотном разряде, обеспечивая качество поверхности и размерную точность прецизионных деталей.

Вольфрамово-медные электроды также играют ключевую роль в сварке, резке и коммутации электрических соединений. При контактной сварке они снижают износ электродов и обеспечивают стабильную прочность сварного шва, что делает их пригодными для таких отраслей, как автомобилестроение и производство бытовой техники. При плазменной резке они выдерживают высокотемпературную эрозию, повышая эффективность и качество резки. Кроме того, их стойкость к дуговой эрозии и сварке плавлением, используемая в качестве контактных компонентов в высоковольтных выключателях, реле и другом оборудовании, обеспечивает безопасную и стабильную работу энергосистем и электротехнического оборудования.

Вольфрамово-медные электроды также находят важное применение в оборонной, аэрокосмической и специализированной отраслях. В системах наведения ракет их стабильность обеспечивает надлежащую работу в экстремальных условиях. В системах энергоснабжения космических аппаратов они выдерживают суровые условия космоса, обеспечивая эффективную и безопасную передачу энергии. В ядерном испытательном оборудовании и медицинских приборах их радиационная стойкость, электропроводность и биосовместимость способствуют повышению точности результатов испытаний и безопасности процессов лечения. С развитием технологий их потенциальные области применения будут продолжать расширяться.

### 6.1 Применение вольфрамово-медных электродов в электроэрозионной обработке

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) – одно из ключевых применений вольфрамово-медных электродов. Благодаря уникальным свойствам материала эта технология широко используется в прецизионном производстве. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) удаляет материал дуговым разрядом, а вольфрамово-медные электроды являются идеальным инструментом благодаря высокой температуре плавления и твердости вольфрама в сочетании с высокой электропроводностью меди. Такие методы изготовления, как порошковая металлургия или вакуумная инфильтрация, обеспечивают низкую пористость и равномерное распределение фаз в электродах, а горячее изостатическое прессование дополнительно оптимизирует их микроструктуру, повышая долговечность и стабильность. Преимущества вольфрамово-медных электродов при обработке пресс-форм и штампов, обработке труднообрабатываемых материалов

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и электроэрозионной обработке демонстрируют их важнейшую роль в производстве высокоточных и сложных деталей.

### 6.1.1 Применение при обработке пресс-форм

Вольфрамово-медные электроды в обработке пресс-форм демонстрируют свою важность в высокоточном производстве, особенно при электроэрозионной обработке сложных пресс-форм. Производство пресс-форм требует точной геометрии и гладкой поверхности, и вольфрамово-медные электроды отвечают этим требованиям благодаря высокой твердости и стойкости к дуговой эрозии. В процессе производства электроды обычно используют сплавы со средним или высоким содержанием вольфрама (например, WCu 70/30 или WCu 80/20). Порошковая металлургия создаёт плотную микроструктуру, а горячее изостатическое прессование оптимизирует прочность на сжатие и стабильность поверхности. Низкая пористость электрода обеспечивает стабильные характеристики разряда, а высокая проводимость меди способствует эффективному переносу тока, сокращая время обработки.

В обработке пресс-форм вольфрамово-медные электроды особенно подходят для точной обработки штамповочных, пластиковых и ковочных пресс-форм. Износостойкость электрода позволяет ему сохранять целостность формы при многократных разрядах и снижать потери. Равномерное распределение фаз в микроструктуре способствует формированию сложных контуров, таких как глубокие ребра или небольшие отверстия, а точность обработки может достигать микронного уровня. Поверхностная обработка, такая как полировка, дополнительно улучшает качество контакта электрода и улучшает качество поверхности пресс-формы. В производстве электрод может обрабатывать высокотвердую или легированную сталь для удовлетворения потребностей производства автомобильных деталей и пресс-форм для электронных компонентов. Сценарии использования также включают многоэлектродную совместную обработку, а прочность вольфрамово-медного электрода позволяет выполнять многочисленные регулировки и установки.

Контроль окружающей среды, такой как использование охлаждающей жидкости, снижает тепловое воздействие и продлевает срок службы электрода, а процессы последующей обработки, такие как шлифование, обеспечивают точность размеров. В будущем внедрение функционально-градиентной конструкции или нанотехнологий может дополнительно повысить долговечность и эффективность обработки вольфрамово-медных электродов при обработке пресс-форм, отвечая требованиям более сложного и ответственного производства пресс-форм, например, для компонентов аэрокосмической отрасли.

### 6.1.2 Применение при переработке труднообрабатываемых материалов

Вольфрамово-медные электроды при обработке труднообрабатываемых материалов продемонстрировали свои превосходные эксплуатационные характеристики в экстремальных условиях, что делает их особенно подходящими для обработки материалов с высокой твердостью или высокими температурами плавления. Труднообрабатываемые материалы, такие как

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамовая сталь, титановые сплавы и керамика, трудно резать традиционными методами из-за их высоких механических свойств, что делает электроискровую обработку (ЭИ) предпочтительной технологией. Вольфрамово-медные электроды, благодаря своей высокотемпературной стойкости и стойкости к дуговой эрозии, стали основным инструментом. В процессе производства электроды изготавливаются из стали с высоким содержанием вольфрама (например, WCu 90/10), а процесс вакуумной инфильтрации формирует прочный вольфрамовый каркас. Горячее изостатическое прессование (ГИП) оптимизирует микроструктуру, что приводит к низкой пористости и равномерному распределению фаз. Высокая электропроводность меди способствует эффективному разряду.

При обработке труднообрабатываемых материалов вольфрамово-медные электроды выдерживают высокоэнергетические разряды. Высокая температура плавления вольфрама (более 3000 °C) защищает от воздействия дуги и снижает износ поверхности, что делает их пригодными для обработки таких материалов, как карбид вольфрама и титановые сплавы. Мелкозернистая микроструктура электродов обеспечивает высокоточную обработку, а износостойкость электродов обеспечивает долговременную стабильность формы, что позволяет использовать их для формования деталей сложной геометрии, таких как турбинные лопатки или медицинские имплантаты. Поверхностная обработка, такая как нанесение покрытий, повышает стойкость к окислению и улучшает эксплуатационные характеристики во влажной среде, а последующие процессы обработки, такие как резка и шлифование, оптимизируют геометрическую точность.

Области применения также включают аэрокосмическую и оборонную промышленность. Механическая прочность вольфрамово-медных электродов позволяет работать при высоких нагрузках, а использование охлаждающей жидкости снижает риск термического растрескивания и продлевает срок службы электрода.

### 6.1.3 Преимущества применения в электроэрозионной обработке

Вольфрамово-медные электроды для электроэрозионной обработки (ЭЭО) отличаются композитными свойствами материала и оптимизированным производственным процессом, что позволяет им обеспечивать высокую точность и эффективность производства. Электроэрозионная обработка основана на стойкости электрода к дуговой эрозии, электропроводности и терморегулирующих свойствах. Вольфрамово-медные электроды с высоким содержанием вольфрама (например, WCu 80/20) обладают высокой термостойкостью. Твёрдость вольфрама защищает от ударов при разряде, а высокая электропроводность меди (близкая к электропроводности чистой меди) обеспечивает стабильную передачу тока. Порошковая металлургия создаёт низкопористую микроструктуру, а горячее изостатическое прессование улучшает межфазную связь. Обработка поверхности, такая как полировка, улучшает стабильность разряда.

Преимущества применения в первую очередь отражаются в долговечности. Стойкость к дуговой эрозии вольфрамово-медных электродов снижает потери поверхности, продлевает срок службы и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

снижает производственные затраты, особенно при высокоэнергетических разрядах. Во-вторых, сочетание электро- и теплопроводности оптимизирует эффективность обработки. Рассеивание тепла в медной фазе снижает локальный перегрев, улучшая качество поверхности деталей и делая её пригодной для изготовления прецизионных форм и микрокомпонентов. В-третьих, механическая прочность и вязкость позволяют обрабатывать изделия сложной формы, а низкая пористость электродов снижает риск образования трещин, что делает их пригодными для формирования глубоких отверстий или тонких структур.

Области применения включают автомобильную промышленность и производство электроники. Согласование коэффициентов теплового расширения вольфрамово-медных электродов снижает напряжение между деталями, а контроль охлаждающей жидкости и окружающей среды дополнительно повышает стабильность.

## 6.2 Применение вольфрамово-медных электродов в высоковольтных электроприборах

Вольфрамово-медные электроды в высоковольтном электрооборудовании демонстрируют превосходные эксплуатационные характеристики в экстремальных электрических условиях и используются в условиях, требующих высокой прочности и стабильности. Высокая температура плавления и твёрдость вольфрама в сочетании с высокой электро- и теплопроводностью меди делают его идеальным материалом для такого оборудования, как высоковольтные выключатели и молниеотводы. Такие методы изготовления, как порошковая металлургия или вакуумная инфильтрация, обеспечивают низкую пористость и однородную микроструктуру электрода, а горячее изостатическое прессование дополнительно оптимизирует его дугостойкость и механическую прочность. Применение вольфрамово-медных электродов в высоковольтном электрооборудовании отвечает требованиям систем передачи электроэнергии, промышленного управления и оборонной промышленности, а их эксплуатационные преимущества особенно заметны в условиях высокого напряжения и больших токов.

### 6.2.1 Применение в высоковольтных выключателях

Применение вольфрамово-медных электродов в высоковольтных распределительных устройствах является ключевым аспектом их применения в высоковольтном электрооборудовании, особенно в случаях, когда требуется частое отключение больших токов. Высоковольтные распределительные устройства используются для управления и защиты цепей в энергосистемах. Вольфрамово-медные электроды используют среднее или высокое содержание вольфрама (например, WCu 70/30 или WCu 85/15). Вольфрамовый порошок смешивается с медным порошком методом порошковой металлургии. После спекания медь заполняет поры в жидкой фазе, образуя плотную микроструктуру. Горячее изостатическое прессование оптимизирует межфазные связи, а низкая пористость микроструктуры повышает стойкость к дуговой эрозии. Высокая электропроводность меди способствует эффективной передаче тока.

В высоковольтных коммутационных устройствах высокая термостойкость вольфрамово-медных

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электродов является ключевым преимуществом. Высокая температура плавления вольфрама позволяет выдерживать дуговые разряды в тысячи градусов Цельсия, снижая оплавление и износ поверхности, а также продлевая срок службы. Дугостойкость электродов обеспечивает частые переключения, а теплопроводность меди способствует рассеиванию тепла, снижая риск локального перегрева и улучшая электрическую стабильность. Равномерное распределение фаз в микроструктуре снижает концентрацию напряжений, а поверхностная обработка, такая как никелирование, повышает стойкость к окислению, что делает их пригодными для использования во влажных и промышленных условиях. В процессе производства вольфрамовый порошок должен быть высокой чистоты и с контролируемым размером частиц для обеспечения стабильных характеристик.

Области применения включают электроподстанции и промышленные системы распределения электроэнергии. Вольфрамово-медные электроды выдерживают высоковольтные отключения, снижая частоту отказов. Последующая обработка, такая как шлифование, может оптимизировать качество контактной поверхности.

### 6.2.2 Применение в молниезащитных разрядниках

Вольфрамово-медные электроды в молниеотводах демонстрируют свою уникальную ценность в области молниезащиты, особенно хорошо подходящие для поглощения и рассеивания мощных ударов молнии. Электроды молниеотводов, используемые для защиты электрооборудования от перенапряжения, содержат большое количество вольфрама (например, WCu 80/20) и изготавливаются методом вакуумной инфильтрации. Вольфрамовый порошок образует прочный каркас, а медь проникает в материал посредством жидкой инфильтрации, что обеспечивает низкую пористость и однородную микроструктуру. Горячее изостатическое прессование повышает ударопрочность и стабильность материала, а высокая проводимость меди способствует быстрому разряду тока.

В молниеотводах стойкость вольфрамово-медных электродов к высоким температурам является ключевым преимуществом. Высокая температура плавления вольфрама защищает от высокотемпературной дуги в момент удара молнии, снижая потери материала и продлевая срок службы. Устойчивость электродов к дуговой эрозии обеспечивает сохранение их работоспособности после многократных ударов молнии, а теплопроводность меди быстро рассеивает тепло, предотвращая повреждение оборудования от перегрева. Мелкозернистая структура электродов обеспечивает высокую механическую прочность, а поверхностная обработка, такая как гальваническое покрытие, повышает коррозионную стойкость и адаптируемость к внешним условиям. Равномерное смешивание исходных материалов и контролируемый размер пор в процессе производства напрямую влияют на эффективность проникновения. Области применения включают высоковольтные линии электропередачи и базовые станции связи. Вольфрамово-медные электроды эффективно поглощают токи молнии, а процессы постобработки, такие как резка и полировка, оптимизируют геометрическую точность.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.2.3 Преимущества применения в высоковольтных электроприборах

Вольфрамово-медные электроды в высоковольтном электрооборудовании обусловлены композитными свойствами их материала и оптимизированным процессом изготовления, что позволяет им работать исключительно хорошо в условиях высокого напряжения и сильного тока. Высоковольтное электрооборудование требует электродов со стойкостью к дуговой эрозии, электропроводностью и термической стабильностью. Вольфрамово-медные электроды, с их высоким содержанием вольфрама, обеспечивают высокую термостойкость, в то время как твердость вольфрама обеспечивает стойкость к удару дуги, а высокая электропроводность меди (близкая к проводимости чистой меди) обеспечивает эффективную передачу тока. Порошковая металлургия создает микроструктуру с низкой пористостью, в то время как горячее изостатическое прессование укрепляет межфазные связи. Обработка поверхности, такая как гальванопокрытие, повышает атмосферостойкость.

Преимущества вольфрамово-медных электродов заключаются в первую очередь в их дугостойкости. Дугостойкость вольфрамово-медных электродов снижает износ поверхности и продлевает срок службы, особенно при частой эксплуатации высоковольтных выключателей и молниеотводов. Во-вторых, их комбинированная электро- и теплопроводность оптимизирует электрические характеристики. Рассеивание тепла в медной фазе снижает локальный перегрев, повышая стабильность оборудования и делая их пригодными для отключения силовых устройств или защиты от молний. В-третьих, их механическая прочность и коррозионная стойкость обеспечивают работу в сложных условиях.

Однородность микроструктуры снижает риск растрескивания, а обработка поверхности повышает долговечность. Области применения включают энергетические системы и промышленное оборудование. Согласование теплового расширения вольфрамово-медных электродов снижает напряжение в подложке, а системы охлаждения и контроля окружающей среды дополнительно повышают производительность.

### 6.3 Применение медно-вольфрамовых электродов при сварке и пайке

Вольфрамово-медные электроды при сварке и пайке демонстрируют уникальные эксплуатационные характеристики в условиях высоких температур и сильных токов и широко используются в промышленных условиях, где требуются эффективные соединения и надежные соединения. Высокая температура плавления и твердость вольфрама в сочетании с высокой электро- и теплопроводностью меди делают его идеальным инструментом для контактной сварки и пайки. Такие методы подготовки, как порошковая металлургия или вакуумная инфильтрация, обеспечивают низкую пористость и однородную микроструктуру электрода, а процесс горячего изостатического прессования дополнительно оптимизирует его термическую усталостную стойкость и стабильность поверхности. Применение вольфрамово-медных электродов в области сварки отвечает потребностям таких отраслей, как автомобилестроение, сборка электроники и металлообработка. Его эксплуатационные преимущества особенно заметны при создании

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокопрочных соединений и в сложных условиях эксплуатации.

### 6.3.1 Применение в контактной сварке

Вольфрамово-медные электроды в контактной сварке демонстрируют свою важнейшую роль в эффективном соединении металлических деталей, что делает их особенно подходящими для таких процессов, как точечная сварка и шовная сварка. Контактная сварка обеспечивает сплавление металла за счет использования электрического тока и давления. Вольфрамово-медные электроды используют низкое или среднее содержание вольфрама. Вольфрамовый порошок смешивается с высокой долей медного порошка посредством процесса порошковой металлургии. После спекания медь образует непрерывную проводящую сеть. Горячее изостатическое прессование оптимизирует микроструктуру, обеспечивая низкую пористость и равномерное распределение фаз. Высокая проводимость меди обеспечивает стабильный путь тока, в то время как высокотемпературная стойкость вольфрама поддерживает стабильность электрода в условиях высоких температур. Поверхностная обработка, такая как полировка, снижает адгезию сварочного шлака.

В контактной сварке вольфрамово-медные электроды в основном используются для точечной сварки автомобильных кузовных панелей или электронных компонентов. Теплопроводность электрода обеспечивает быстрое рассеивание тепла, уменьшает зону термического влияния и улучшает качество соединения. Стойкость вольфрама к дуговой эрозии обеспечивает сохранение формы электрода при многократной сварке, продлевая его срок службы и особенно подходит для высокочастотной сварки. Равномерная структура медной фазы в микроструктуре обеспечивает эффективную передачу тока, а прочность электрода позволяет многократно корректировать и устанавливать его для обработки деталей различной толщины. В процессе подготовки однородность смешивания исходных материалов и параметры спекания напрямую влияют на эксплуатационные характеристики электрода, а процессы последующей обработки, такие как шлифование, оптимизируют контактную поверхность. Области применения включают автомобилестроение и производство бытовой техники. Антиадгезионные свойства вольфрамово-медных электродов сокращают частоту очистки, а система охлаждения улучшает возможности терморегулирования.

### 6.3.2 Применение при пайке

Вольфрамово-медные электроды для пайки демонстрируют свою уникальную ценность при низком тепловом вложении, что делает их особенно подходящими для прецизионных соединений металлов и керамики. Пайка достигается за счёт расплавления присадочного материала. Вольфрамово-медные электроды изготавливаются методом вакуумной инфильтрации со средним содержанием вольфрама. Вольфрамовый порошок образует каркас, а медь пропитывает присадочный материал посредством жидкофазной инфильтрации. Горячее изостатическое прессование оптимизирует микроструктуру, обеспечивая низкую пористость и равномерное распределение фаз. Высокая электро- и теплопроводность меди способствует стабильному

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нагреву, а высокая термостойкость вольфрама предотвращает деформацию электрода. Поверхностная обработка, такая как гальванопокрытие, повышает коррозионную стойкость.

В пайке вольфрамово-медные электроды используются для соединения электронных компонентов или деталей аэрокосмической техники. Тепловые характеристики электрода позволяют равномерно распределять тепло, снижать термическое напряжение в соединении и повышать его прочность. Твёрдость вольфрама позволяет электроду сохранять форму при высоких температурах, а однородность микроструктуры обеспечивает равномерный нагрев, что делает его особенно подходящим для микросварки или создания многослойных конструкций. В процессе изготовления контроль пор и смачиваемость меди напрямую влияют на эффективность проплавления, а этапы постобработки, такие как резка и полировка, оптимизируют геометрию электрода. Области применения включают корпусирование микроэлектроники и аэрокосмическую промышленность. Согласование коэффициентов теплового расширения вольфрамово-медных электродов снижает напряжение в подложке, а контроль условий окружающей среды, такой как инертная атмосфера, предотвращает окисление.

### 6.3.3 Преимущества применения в области сварки

Вольфрамово-медные электроды, используемые в сварке, обладают композитными свойствами и оптимизированным процессом производства, что позволяет им эффективно работать в условиях высоких температур и больших токов. Сварка требует от электродов электропроводности, теплопроводности и долговечности. Вольфрамово-медные электроды обеспечивают эту электропроводность благодаря низкому или среднему содержанию вольфрама. Высокая электропроводность меди обеспечивает эффективную передачу тока, а высокая температура плавления вольфрама обеспечивает стойкость к высокотемпературным ударам. Порошковая металлургия создает низкопористую микроструктуру, а горячее изостатическое прессование улучшает межфазные связи. Обработка поверхности, такая как гальванопокрытие, повышает атмосферостойкость.

Преимущества применения, во-первых, отражаются в электро- и теплопроводности. Сеть медных фаз вольфрамово-медного электрода снижает эффект резистивного нагрева, улучшает качество соединения и равномерно распределяет тепло, уменьшая зону термического влияния, что делает его особенно подходящим для высокочастотной сварки. Во-вторых, высокая термостойкость и стойкость к дуговой эрозии увеличивают срок службы. Твёрдость вольфрама обеспечивает многократную эксплуатацию, снижает потери поверхности и адаптируется к сложным условиям эксплуатации. В-третьих, антиадгезионные свойства и механическая прочность позволяют использовать электрод в различных условиях. Прочность микроструктуры снижает риск образования трещин, а обработка поверхности уменьшает адгезию сварочного шлака.

Области применения включают автомобильную промышленность и производство электроники. Возможности терморегулирования вольфрамово-медных электродов повышают эффективность сварки, а системы охлаждения и контроля микроклимата дополнительно оптимизируют

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производительность.

#### 6.4 Применение вольфрамово-медных электродов в аэрокосмической и военной промышленности

Вольфрамово-медные электроды в аэрокосмической и военной отраслях демонстрируют превосходные эксплуатационные характеристики в экстремальных условиях и широко используются в критически важных компонентах, требующих высокой прочности и надежности. Высокая температура плавления и твердость вольфрама в сочетании с высокой электро- и теплопроводностью меди делают его идеальным материалом для ракетных двигателей и компонентов систем наведения. Такие методы изготовления, как порошковая металлургия или вакуумная инфильтрация, обеспечивают низкую пористость и однородную микроструктуру электродов, а горячее изостатическое прессование дополнительно оптимизирует их термическую усталостную стойкость и механическую прочность. Применение вольфрамово-медных электродов в аэрокосмической и военной отраслях отвечает потребностям исследования дальнего космоса, ракетной техники и оборонной техники, а их эксплуатационные преимущества особенно заметны в условиях высоких температур и высоких напряжений.

##### 6.4.1 Применение в компонентах ракетных двигателей

Вольфрамово-медные электроды в компонентах ракетных двигателей демонстрируют свою уникальную ценность в условиях высоких температур и давлений, что делает их особенно подходящими для изготовления двигательных установок и камер сгорания. Ракетные двигатели должны сохранять стабильность при экстремальных тепловых нагрузках. Вольфрамово-медные электроды изготавливаются с высоким содержанием вольфрама методом вакуумной инфильтрации. Вольфрамовый порошок образует прочный каркас, а медь проникает в материал посредством жидкой инфильтрации. Горячее изостатическое прессование оптимизирует микроструктуру, обеспечивая низкую пористость и равномерное распределение фаз. Высокая электро- и теплопроводность меди способствует эффективному терморегулированию, а высокотемпературная стойкость вольфрама предотвращает плавление. Поверхностная обработка, такая как гальванопокрытие, повышает коррозионную стойкость.

В ракетных двигателях вольфрамово-медные электроды используются в соплах или камерах сгорания. Их высокая термостойкость защищает от воздействия высокотемпературного газового потока, сохраняя структурную целостность. Однородность микроструктуры обеспечивает равномерное распределение тепла и снижает термические напряжения. Твердость вольфрама обеспечивает длительный срок службы, а теплопроводность меди способствует рассеиванию тепла, продлевая срок службы компонентов и делая их особенно подходящими для двигателей большой тяги. В процессе производства контроль пористости и чистота исходного материала напрямую влияют на эффективность проплавления. Методы постобработки, такие как резка и шлифовка, оптимизируют геометрическую точность и позволяют создавать изделия сложной формы. Сценарии использования включают запуски космических аппаратов и исследование

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дальнего космоса. Механическая прочность вольфрамово-медных электродов позволяет использовать их в условиях высокого давления, а контроль окружающей среды, такой как инертная атмосфера, предотвращает окисление.

#### 6.4.2 Применение в компонентах наведения

Вольфрамово-медные электроды в компонентах наведения играют ключевую роль в обеспечении точности управления и виброустойчивости, что делает их особенно подходящими для производства радиолокационных антенн и навигационных систем. Компоненты наведения требуют высокой точности и надежности. Вольфрамово-медные электроды изготавливаются методом порошковой металлургии со средним содержанием вольфрама. Вольфрамовый порошок смешивается с медным порошком и спекается для формирования проводящей сети. Горячее изостатическое прессование оптимизирует микроструктуру, обеспечивая низкую пористость и равномерное распределение фаз. Высокая проводимость меди способствует передаче сигнала, а твердость вольфрама повышает виброустойчивость. Обработка поверхности, такая как полировка, улучшает качество контакта.

В компонентах систем наведения вольфрамово-медные электроды используются в качестве электрических контактов или теплопроводов. Теплопроводность электродов равномерно распределяет тепло, снижая перегрев электронных компонентов. Прочность их микроструктуры обеспечивает устойчивость к механическим ударам, что делает их особенно подходящими для высокоскоростных самолетов. Износостойкость вольфрама обеспечивает долговременную стабильность, а проводимость меди оптимизирует качество сигнала и адаптируется к сложным электромагнитным условиям. В процессе производства параметры смешивания исходного материала и спекания напрямую влияют на характеристики электродов, а этапы последующей обработки, такие как шлифование, обеспечивают точность размеров. Сценарии использования включают наведение ракет и спутниковую навигацию. Согласование теплового расширения вольфрамово-медных электродов снижает напряжение в подложке, а контроль окружающей среды, такой как обработка против пыли, повышает надежность.

#### 6.4.3 Преимущества применения в аэрокосмической и военной промышленности

Вольфрамово-медные электроды, применяемые в аэрокосмической и военной промышленности, отличаются композитными свойствами материала и оптимизированным процессом изготовления, что позволяет им эффективно работать в условиях высоких температур и напряжений. Для аэрокосмической и военной промышленности требуются электроды с высокой термостойкостью, электропроводностью и механической прочностью. Высокое содержание вольфрама в вольфрамово-медных электродах обеспечивает термостойкость, твердость вольфрама обеспечивает устойчивость к экстремальным условиям, а высокая электропроводимость меди обеспечивает эффективную передачу тока и сигнала. Порошковая металлургия создаёт низкопористую микроструктуру, а горячее изостатическое прессование улучшает межфазные связи. Обработка поверхности, такая как гальванопокрытие, повышает атмосферостойкость.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Преимущества применения, во-первых, отражаются в высокой термостойкости. Термостойкость вольфрамово-медных электродов обеспечивает стабильную работу ракетных двигателей и компонентов систем наведения в условиях высоких температур, снижает потери материала и продлевает срок службы. Во-вторых, сочетание электропроводности и теплопроводности оптимизирует производительность. Рассеивание тепла медной фазы снижает локальный перегрев, повышает эффективность электронных компонентов или передачи сигналов и особенно подходит для высокоточных приложений. В-третьих, механическая прочность и вибростойкость позволяют работать в сложных условиях, прочность микроструктуры снижает риск образования трещин, а обработка поверхности повышает долговечность. Сценарии использования включают космические запуски и оборонное оборудование. Возможности терморегулирования вольфрамово-медных электродов повышают надежность компонентов, а системы контроля окружающей среды и охлаждения дополнительно оптимизируют производительность.



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Глава 7: Стандарты контроля качества и испытаний вольфрамово-медных электродов

Производство вольфрамово-медных электродов – это строгий процесс на протяжении всего производственного процесса, от отбора сырья до обработки готовой продукции. Чистота, размер частиц и однородность вольфрамового и медного порошков должны контролироваться на этапе подготовки сырья, чтобы предотвратить влияние чрезмерного количества примесей на электропроводность и термостойкость электрода. В процессе формовки и спекания необходимо контролировать плотность прессования, температуру спекания и время выдержки для обеспечения плотной внутренней структуры без значительных пор и трещин, а также минимизировать риск износа в процессе эксплуатации.

Что касается стандартов испытаний, вольфрамово-медные электроды должны проходить многочисленные эксплуатационные испытания для подтверждения их качества. Для подтверждения соответствия основным эксплуатационным требованиям к условиям эксплуатации проверяются физические характеристики, плотность, твёрдость и электропроводность. Структурная целостность проверяется с помощью металлографического микроскопа или ультразвукового контроля, а наличие внутренних дефектов, влияющих на прочность, строго запрещено. В особых случаях также требуется проведение испытаний на стойкость к дуговой эрозии и высокотемпературную стабильность для имитации износа в реальных условиях эксплуатации. Международные стандарты часто используются в качестве международных стандартов ASTM, в то время как внутренние стандарты GB/T используются в США. В некоторых высокотехнологичных приложениях также применяются специальные стандарты для соответствия более строгим требованиям.

### 7.1 Определение основных показателей вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медные электроды имеют решающее значение для обеспечения их производительности и надежности, охватывая такие аспекты, как физическая, тепловая и электропроводность. Благодаря научным методам испытаний и стандартизированным процессам производители могут подтвердить соответствие электродов конкретным требованиям к применению. Вольфрамово-медные электроды производятся методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, и их микроструктура и распределение состава напрямую влияют на эксплуатационные характеристики. Горячее изостатическое прессование дополнительно оптимизирует их стабильность. Процесс испытаний включает в себя использование различных приборов и контроль условий окружающей среды для оценки плотности, теплопроводности и электрических свойств электрода, что критически важно в таких областях, как электроэрозионная обработка, высоковольтное электрооборудование и сварка. В будущем развитие технологий испытаний приведет к еще более точному контролю качества.

#### 7.1.1 Испытание физических свойств вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медные электроды играют ключевую роль в контроле качества, оценивая их

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

плотность, структурную целостность и механические свойства, которые закладывают основу для последующего применения. Физические свойства отражают качество подготовки электродов и микроструктурные характеристики. Высокая твёрдость вольфрама в сочетании с пластичностью меди усложняет испытания. Испытания обычно проводятся в лабораторных условиях с использованием специализированного оборудования и стандартизированных процедур, охватывающих множество параметров, таких как плотность, пористость и морфология поверхности. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования, демонстрируют высокую физическую стабильность, и результаты этих испытаний служат ориентиром для совершенствования процесса, обеспечивая надёжность электродов в условиях высоких нагрузок и температур.

#### 7.1.1.1 Методы и стандарты определения плотности

Методы и стандарты определения плотности являются отправной точкой для определения физических свойств вольфрамово-медных электродов. Они направлены на измерение массы электрода на единицу объема, отражающей его компактность и распределение пор. Плотность напрямую влияет на механическую прочность и проводимость электрода. Для определения плотности обычно используется архимедов метод или метод вытеснения, при котором плотность рассчитывается путем погружения электрода в жидкость и измерения изменения веса. Архимедов метод требует чистой поверхности электрода, чтобы остатки жидкости не повлияли на результаты. Для обеспечения согласованности измерений во время работы необходимо контролировать температуру и влажность. Метод вытеснения, реализуемый посредством точного взвешивания и вытеснения жидкости, подходит для электродов сложной формы и требует высокоточных весов.

Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и многоточечные измерения. Образцы отбираются случайным образом из разных партий, и для оценки однородности вырезаются репрезентативные участки. Условия испытаний должны быть стабильными, чтобы исключить внешние помехи. Результаты испытаний коррелируются с параметрами процесса, такими как температура и давление спекания. Специалисты по контролю качества устанавливают диапазоны плотности на основе отраслевых стандартов. Электроды, выходящие за эти диапазоны, требуют отслеживания процесса производства и корректировки условий смешивания порошка или инфильтрации. Обработка поверхности, такая как полировка, может помочь в определении плотности и снизить влияние поверхностных дефектов.

#### 7.1.1.2 Методы и стандарты испытаний тепловых характеристик

Методы и стандарты испытаний тепловых характеристик играют ключевую роль в оценке возможностей терморегулирования вольфрамово-медных электродов. Эти испытания измеряют их теплопроводность и характеристики теплового расширения. Тепловые характеристики напрямую влияют на стабильность электрода и эффективность теплоотвода в условиях высоких температур. Испытания обычно проводятся с использованием измерителя теплового потока или метода лазерной вспышки. Метод измерения теплового потока измеряет теплопередачу с

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

помощью датчика теплового потока и подходит для оценки теплопроводности массивных электродов, требующих поддержания постоянной температуры. Метод лазерной вспышки нагревает поверхность образца коротким импульсом и измеряет время термодиффузии. Он подходит для тонких листов или хрупких компонентов и требует высокочувствительного оборудования.

Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и контроль условий окружающей среды. Образцы должны быть отполированы до плоской поверхности, чтобы шероховатость поверхности не влияла на результаты измерений. Условия испытаний должны имитировать реальные рабочие условия, такие как высокие температуры, а многоточечные измерения обеспечивают репрезентативность данных. Результаты тепловых характеристик коррелируют с микроструктурой. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования, демонстрируют хорошую термостабильность, а данные испытаний позволяют корректировать процесс. Специалисты по контролю качества устанавливают пороговые значения тепловых характеристик на основе отраслевых стандартов. Для электродов, выходящих за эти пределы, требуется оптимизация содержания меди или распределения пористости.

#### 7.1.1.3 Методы и стандарты испытаний на проводимость

Методы и стандарты испытаний на проводимость играют ключевую роль в оценке электрических свойств вольфрамово-медных электродов. Они измеряют их удельное сопротивление и проводимость для обеспечения эффективной передачи тока. Проводимость напрямую влияет на характеристики электрода при электроэрозионной обработке (ЭЭО) или в высоковольтных электрических системах. Для испытаний обычно используется четырёхэлектродный или мостовой метод. Четырёхэлектродный метод минимизирует влияние контактного сопротивления, контактируя с образцом в нескольких точках электрода, что делает его пригодным для высокоточных измерений и требует работы в режиме постоянного тока. Мостовой метод сравнивает значения сопротивления с помощью мостовой схемы и подходит для электродов сложной формы, требующих высокочувствительного оборудования. Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и контроль условий окружающей среды. Образцы должны быть вырезаны по стандартным размерам, чтобы исключить влияние геометрических факторов на результаты. Испытательная среда должна быть защищена от электромагнитных помех, а температура и влажность должны поддерживаться на стабильном уровне. Многоточечное измерение обеспечивает постоянство проводимости. Результаты измерений проводимости тесно связаны с микроструктурой и содержанием меди. Электроды, оптимизированные методом горячего изостатического прессования (ГИП), демонстрируют хорошую однородность проводимости, а данные испытаний позволяют корректировать соотношения.

#### 7.1.2 Испытание химических свойств вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медные электроды являются важнейшим компонентом контроля качества. Он

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оценивает распределение их состава, коррозионную стойкость и содержание примесей для обеспечения химической стабильности и срока службы электрода в различных средах. Химические свойства напрямую влияют на стойкость электрода к окислению, коррозионную стойкость и долговременную надежность. Испытания обычно проводятся в лабораторных условиях с использованием передовых аналитических методов и стандартизированных рабочих процедур. Высокая химическая стабильность вольфрама и активные свойства меди позволяют использовать разнообразные методы испытаний. Electrodes, оптимизированные для горячего изостатического прессования, демонстрируют превосходную химическую однородность. Результаты испытаний помогают выбрать сырье и усовершенствовать технологический процесс.

#### 7.1.2.1 Метод компонентного анализа

Методы анализа состава лежат в основе испытаний химических свойств вольфрамово-медных электродов. Они направлены на определение соотношения вольфрама и меди, а также содержания других микроэлементов, чтобы гарантировать соответствие этого соотношения проектным требованиям. Этот процесс обычно использует спектроскопический анализ или химическое титрование. Спектроскопические методы анализа, такие как рентгенофлуоресцентная спектроскопия (РФС) или оптическая эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-ОЭС), определяют элементный состав по спектральным сигнатурам, испускаемым образцом, и подходят для экспресс-анализа. Методы химического титрования позволяют точно определить содержание вольфрама и меди посредством реакции стандартного раствора с образцом, что требует высокоточного титрационного оборудования.

Стандартизированный процесс испытаний включает в себя подготовку образцов и многоточечный отбор проб. Образцы необходимо резать из разных частей электрода и измельчать в однородный порошок для обеспечения репрезентативности. Влажность среды испытаний необходимо контролировать, чтобы избежать окисления или поглощения влаги образцом, а операторы должны соблюдать правила техники безопасности при работе с химическими реагентами. Результаты анализа состава связаны с процессом подготовки. Например, однородность смешивания порошков и условия инфильтрации напрямую влияют на конечное соотношение. Сотрудники отдела контроля качества устанавливают диапазон состава в соответствии со спецификациями продукта. Electrodes, выходящие за пределы диапазона, должны отслеживать партию сырья или корректировать параметры процесса. Обработка поверхности, такая как полировка, может снизить влияние поверхностного загрязнения. В будущем эффективность и точность определения состава могут быть улучшены за счет внедрения портативных спектрометров или автоматизированных систем анализа.

#### 7.1.2.2 Метод испытания на коррозионную стойкость

Методы испытаний на коррозионную стойкость играют ключевую роль в оценке химической стабильности вольфрамово-медных электродов в кислых, щелочных или влажных средах, обеспечивая их долгосрочную эксплуатацию в промышленных условиях. Этот процесс обычно

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

включает испытание в солевом тумане или испытание на погружение. Испытание в солевом тумане имитирует коррозионную атмосферу и позволяет наблюдать изменения на поверхности электрода. Это испытание должно проводиться в специальной камере для солевого тумана. Испытание на погружение, в свою очередь, предполагает помещение электрода в специальный коррозионный раствор, например, разбавленную серную кислоту или раствор хлорида натрия, и регулярный контроль степени поверхностной коррозии и потери массы. Для этого испытания требуется оборудование с постоянной температурой.

Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и контроль условий окружающей среды. Образцы должны быть отполированы до однородной поверхности, чтобы предотвратить влияние начальных дефектов на результаты. Цикл испытаний устанавливается в соответствии с требованиями к применению, и для проверки однородности проводятся параллельные испытания нескольких групп образцов. Результаты испытаний на коррозионную стойкость связаны с микроструктурой и обработкой поверхности. Электроды, оптимизированные методом горячего изостатического прессования, демонстрируют хорошую однородность коррозионной стойкости. Данные испытаний определяют процесс нанесения гальванического или другого покрытия. Специалисты по контролю качества оценивают скорость коррозии в соответствии с отраслевыми стандартами. Для электродов, не соответствующих заданному диапазону, требуется оптимизация содержания меди или проведение антикоррозионной обработки.

### 7.1.2.3 Стандарты испытаний на содержание примесей

Стандарты испытаний на содержание примесей играют ключевую роль в обеспечении химической чистоты вольфрамово-медных электродов. Они направлены на выявление и контроль влияния кислорода, серы и других микроэлементов для предотвращения их негативного влияния на эксплуатационные характеристики. Этот процесс обычно использует сжигание или масс-спектрометрию. Метод сжигания предполагает разложение образца при высоких температурах и измерение количества выделяющегося кислорода или азота с использованием инфракрасного абсорбционного спектрометра. Масс-спектрометрия анализирует элементный состав путем ионизации образца и подходит для обнаружения следов примесей, требуя использования масс-спектрометра высокого разрешения.

Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и контроль условий окружающей среды. Образцы случайным образом отбираются из разных партий, измельчаются и высушиваются для удаления поверхностной влаги. Среда испытаний должна быть свободна от внешних загрязнений, а операторы должны соблюдать правила техники безопасности при работе с высокотемпературным оборудованием. Результаты определения содержания примесей зависят от чистоты сырья и условий подготовки. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования, демонстрируют низкий уровень примесей. Данные испытаний позволяют проводить отбор сырья и оптимизировать процесс. Специалисты по контролю качества устанавливают пороговые значения содержания примесей на основе отраслевых стандартов. Для

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электродов, превышающих этот диапазон, требуется корректировка чистоты порошка или введение этапов очистки.

### 7.1.3 Испытание механических свойств вольфрамово-медного электрода

Вольфрамово-медные электроды являются важнейшим компонентом контроля качества, поскольку оцениваются их твёрдость, прочность и ударная вязкость для обеспечения надёжности при высоких нагрузках и ударных нагрузках. Механические свойства отражают устойчивость электрода к деформации, разрушению и поглощению энергии. Испытания обычно проводятся в лабораторных условиях с использованием специализированного оборудования и стандартизированных методик. Высокая твёрдость вольфрама и пластичность меди позволяют использовать разнообразные методы испытаний. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования, демонстрируют превосходную механическую однородность, и эти результаты испытаний служат руководством для совершенствования процесса и выбора области применения.

#### 7.1.3.1 Методы и стандарты испытания на твердость

Методы и стандарты испытаний на твёрдость имеют основополагающее значение для испытаний механических характеристик вольфрамово-медных электродов. Они направлены на измерение их поверхностной стойкости к вдавливанию и износу, обеспечивая долговечность электрода в процессе обработки или эксплуатации. Этот процесс обычно использует методы определения твёрдости по Виккерсу или Роквеллу. Метод Виккерса включает вдавливание алмазного индентора в поверхность образца и наблюдение за геометрией отпечатка. Этот метод подходит для испытаний твёрдых материалов и требует высокоточного микроскопа. Метод Роквелла измеряет глубину проникновения индентора для быстрой оценки изменения твёрдости. Он подходит для крупномасштабных испытаний и требует использования стандартной испытательной машины.

Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и многоточечное измерение. Образцы необходимо вырезать из разных частей электрода и отполировать до плоской поверхности, чтобы избежать начальных дефектов, влияющих на результаты. В испытательной среде необходимо контролировать температуру и влажность, чтобы предотвратить помехи от теплового расширения или окисления поверхности. Операторы должны соблюдать правила техники безопасности при работе с оборудованием. Результаты твердости связаны с микроструктурой и содержанием вольфрама. Электроды после оптимизации процесса горячего изостатического прессования показывают хорошую однородность твердости, и данные испытаний определяют корректировку соотношения. Персонал по контролю качества устанавливает диапазон твердости в соответствии с отраслевыми стандартами. Электроды, выходящие за пределы диапазона, должны оптимизировать процесс спекания или постобработки. Обработка поверхности, такая как шлифование, может помочь в испытании на твердость. В будущем внедрение автоматизированных твердомеров или анализ изображений может повысить

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

эффективность и точность обнаружения.

### 7.1.3.2 Методы и стандарты испытаний на прочность

Методы и стандарты испытаний на прочность играют ключевую роль в оценке прочности на сжатие и растяжение вольфрамово-медных электродов, обеспечивая их устойчивость к высоким механическим нагрузкам. Этот процесс обычно включает испытания на сжатие или растяжение. Испытание на сжатие измеряет предел деформации образца путем приложения давления и подходит для блочных электродов, требуя универсальной испытательной машины. Испытание на растяжение оценивает прочность на растяжение путем приложения растягивающего усилия до разрушения, подходит для стержневых или листовых электродов и требует использования специализированных приспособлений.

Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и контроль условий окружающей среды. Образцы должны быть обработаны до стандартных размеров для обеспечения стабильности геометрии, а надрезы должны быть гладкими для предотвращения концентрации напряжений. В испытательной среде должна поддерживаться постоянная температура, чтобы предотвратить влияние температурных колебаний на свойства материала, а для проверки однородности используются многоточечные измерения. Результаты испытаний на прочность связаны с микроструктурой и процессом подготовки. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования (ГИП), демонстрируют высокую стабильность при сжатии, а данные испытаний позволяют корректировать параметры давления и спекания. Специалисты по контролю качества устанавливают пороговые значения прочности на основе отраслевых стандартов. Для электродов, выходящих за пределы этого диапазона, требуется оптимизация размера частиц порошка или условий инфильтрации.

### 7.1.3.3 Методы и стандарты испытаний на прочность

Методы и стандарты испытаний на вязкость разрушения играют ключевую роль в оценке стойкости к разрушению и способности вольфрамово-медных электродов поглощать энергию, обеспечивая их надежность при ударных нагрузках или термоциклировании. Этот процесс обычно включает в себя испытания на удар или испытание на вязкость разрушения. Испытание на удар заключается в ударе образца маятником и измерении поглощенной энергии. Этот метод подходит для оценки ударной стойкости и требует использования стандартной маятниковой машины. Испытание на вязкость разрушения, в свою очередь, включает в себя нагружение предварительно созданной трещины и анализ характера ее распространения. Этот метод подходит для испытания прецизионных компонентов и требует использования высокоточного нагрузочного оборудования.

Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и контроль условий окружающей среды. Образцы должны быть обработаны на станке до заданной формы, предварительные трещины должны соответствовать стандартным требованиям, а поверхность

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

должна быть отполирована для уменьшения количества начальных дефектов. Условия испытаний должны быть стабильными, чтобы исключить влияние вибрации или температурных колебаний на результаты. Для обеспечения репрезентативности проводятся параллельные испытания нескольких групп образцов. Результаты испытаний на ударную вязкость связаны с микроструктурой и содержанием меди. Электроды, оптимизированные методом горячего изостатического прессования, демонстрируют высокую однородность ударной вязкости. Данные испытаний позволяют корректировать распределение фаз.

## 7.2 Микроструктурный контроль вольфрамово-медного электрода

Микроструктурные испытания вольфрамово-медных электродов – важнейший этап контроля качества, направленный на оценку эффективности производственного процесса и свойств материала посредством анализа их внутренних структурных характеристик. Микроструктура напрямую влияет на механическую прочность, проводимость и долговечность электрода. Испытания обычно проводятся в лабораторных условиях с использованием передовых методов микроскопии и стандартизированных операционных процедур. Вольфрамово-медные электроды изготавливаются методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации. Их микроструктура состоит из вольфрамового каркаса и распределения фаз меди. Горячее изостатическое прессование дополнительно оптимизирует их однородность и плотность. Процесс контроля включает металлографический анализ, оценку равномерности распределения фаз и измерение размера зерна – все эти показатели имеют решающее значение в таких областях, как электроэрозионная обработка, высоковольтное электрооборудование и сварка.

### 7.2.1 Металлографический анализ

Металлографический анализ – основа микроструктурного исследования вольфрамово-медных электродов, целью которого является оценка качества и однородности материала путем наблюдения за внутренними структурными особенностями. В этом процессе используются микроскопические методы, обычно оптическая микроскопия или сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), для определения фазовой структуры электрода, распределения пор и межфазных связей. Металлографический анализ помогает выявить дефекты, возникающие в процессе производства, такие как незаполненные поры или расслоение фаз. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования, демонстрируют превосходную структурную однородность. Результаты анализа позволяют корректировать процесс для обеспечения стабильной работы электрода при высоких нагрузках и температурах.

#### 7.2.1.1 Подготовка металлографических образцов

Подготовка металлографических образцов – основополагающий этап металлографического анализа, направленный на получение гладкого поперечного сечения, пригодного для микроскопического исследования, посредством обработки образца. Этот процесс обычно включает несколько этапов: резку, шлифовку и полировку. Резка осуществляется

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

металлографическим резаком для нарезания электрода на тонкие пластины. Для предотвращения повреждения материала необходимо выбрать соответствующий режущий инструмент. Шлифовка осуществляется наждачной бумагой различной зернистости для постепенного удаления шероховатостей поверхности, контролируя давление и направление для обеспечения гладкого поперечного сечения. Полировка производится с использованием алмазной суспензии или полировальной пасты на основе оксида алюминия для дальнейшего улучшения качества поверхности и должна проводиться в беспыльной среде во избежание загрязнения.

Подготовка образцов также включает травление поперечного сечения с использованием соответствующих химических реагентов для выявления фазовой структуры вольфрама и меди. Время травления и концентрация реагентов корректируются в зависимости от свойств материала. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования (ГИП), требуют особого внимания к защите поверхности во избежание чрезмерной коррозии, которая может повлиять на результаты наблюдений. Контроль условий окружающей среды, таких как температура и влажность, имеет решающее значение во время подготовки, а образцы должны храниться в сухом месте для предотвращения окисления. Специалисты по контролю качества проверяют качество подготовки в соответствии с отраслевыми стандартами; такие дефекты, как царапины или трещины, могут исказить результаты анализа.

#### 7.2.1.2 Критерии оценки равномерности распределения фаз

Оценка фазовой однородности — ключевой этап металлографического анализа, направленный на оценку распределения вольфрама и меди в электроде для обеспечения стабильных характеристик. Этот процесс включает в себя наблюдение изображений поперечного сечения под микроскопом и анализ однородности фазовой структуры с помощью программного обеспечения для обработки изображений. Количественная оценка обычно выполняется с использованием метода сетки или метода подсчёта точек. Метод сетки делит поперечное сечение на несколько областей и рассчитывает фазовые соотношения в каждой области. Метод подсчёта точек позволяет рассчитать плотность распределения вольфрама и меди путём случайной выборки с использованием системы визуализации высокого разрешения.

Стандартизированный процесс оценки включает отбор образцов и многоточечный анализ. Образцы необходимо отбирать из разных партий и мест для обеспечения репрезентативности, а анализ должен охватывать несколько областей поперечного сечения для проверки однородности. Электроды, оптимизированные с помощью процесса горячего изостатического прессования, демонстрируют лучшее распределение фаз. Результаты испытаний связаны с процессом инфильтрации и смешиванием порошка. Дефекты, такие как локальное обогащение или пустоты, могут повлиять на характеристики. Персонал по контролю качества устанавливает пороговые значения однородности на основе отраслевых стандартов. Для электродов, которые превышают диапазон, необходимо скорректировать размер частиц сырья или условия спекания. Контроль окружающей среды, такой как предотвращение вибрации, обеспечивает четкие изображения. В будущем точность и полнота оценки распределения фаз могут быть улучшены за счет внедрения

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

анализа искусственного интеллекта или технологии трехмерной визуализации.

### 7.2.1.3 Определение размера зерна

Определение размера зерна – важнейший компонент металлографического анализа, направленного на измерение размера зерен вольфрама и меди и оценку их влияния на характеристики электрода. Этот процесс включает наблюдение за протравленным поперечным сечением под микроскопом, используя либо стандартный метод пересечения линий, либо автоматизированный анализ изображений. Стандартный метод пересечения линий использует случайные прямые линии для построения поперечных сечений зерен, в то время как автоматизированный метод анализа изображений использует программное обеспечение для определения границ зерен, что требует использования микроскопа с большим увеличением.

Стандартизированный процесс контроля включает подготовку образцов и многозонное измерение. Образцы необходимо полировать и травить, чтобы обеспечить четкую видимость границ зерен. Измерение должно охватывать различные части поперечного сечения для оценки однородности. Размер зерна электрода после оптимизации процесса горячего изостатического прессования становится более стабильным. Результаты испытаний тесно связаны с температурой и временем спекания. Чрезмерно большое или неравномерное зерно может снизить производительность. Персонал по контролю качества устанавливает диапазон размера зерна в соответствии с отраслевыми стандартами. Электроды, которые превышают диапазон, должны оптимизировать параметры спекания или внедрять технологию измельчения. Контроль окружающей среды, такой как постоянная температура, исключает влияние теплового расширения. В будущем точность и производительность определения размера зерна в реальном времени могут быть улучшены за счет внедрения наномасштабных микроскопов или технологии динамической визуализации.

### 7.2.2 Обнаружение дефектов вольфрамово-медных электродов

Вольфрамово-медные электроды являются ключевым компонентом микроструктурного контроля, направленного на выявление и оценку таких дефектов, как поры, трещины и включения, для обеспечения качества и надежности электродов. Дефекты могут привести к снижению производительности или сокращению срока службы. Испытания обычно проводятся в лабораторных условиях с использованием неразрушающих или разрушающих методов контроля в сочетании со стандартизированными процедурами определения. Процессы подготовки вольфрамово-медных электродов, такие как порошковая металлургия или вакуумная инфильтрация, могут привести к появлению дефектов. Горячее изостатическое прессование (ГИП) уменьшает эти дефекты за счет оптимизации микроструктуры.

#### 7.2.2.1 Метод определения пористости и допустимый диапазон

Методы и допуски обнаружения пористости имеют основополагающее значение для обнаружения дефектов в вольфрамово-медных электродах. Они направлены на выявление внутренних пустот и

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оценку их влияния на свойства материала. Пористость может образовываться в процессе спекания или инфильтрации, влияя на плотность и проводимость электрода. Обнаружение обычно выполняется с помощью рентгеновского или ультразвукового контроля. Рентгеновский контроль использует просвечивающую визуализацию для визуализации распределения внутренних пор. Он подходит для сложных электродов и требует системы визуализации высокого разрешения. Ультразвуковой контроль анализирует внутренние пустоты посредством отражения звуковой волны и подходит для больших электродов, требуя специализированных датчиков и оборудования для обработки сигналов.

Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и многоракурсное сканирование. Поверхность образца должна быть чистой для снижения помех, а испытание охватывает различные части электрода для обеспечения полноты результатов. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования (ГИП), обладают меньшей пористостью. Результаты испытаний зависят от процесса подготовки, например, размера частиц порошка и условий инфильтрации, которые напрямую влияют на образование пор. Специалисты по контролю качества устанавливают допустимый диапазон пористости на основе отраслевых стандартов. Для электродов, превышающих этот диапазон, требуется корректировка температуры спекания или проведение вакуумной обработки.

#### 7.2.2.2 Методы и критерии обнаружения трещин

Методы и критерии обнаружения трещин играют ключевую роль в оценке риска внутреннего разрушения вольфрамово-медных электродах. Они направлены на выявление дефектов, вызванных термическим или механическим напряжением. Трещины могут образовываться во время спекания, охлаждения или последующей обработки, влияя на механическую прочность и срок службы электрода. Обнаружение обычно выполняется с помощью капиллярного или магнитопорошкового контроля. Капиллярный контроль выявляет поверхностные трещины посредством проникновения красителя и подходит для поверхностей сложной геометрии, требующих очистки. Магнитопорошковый контроль, при котором для выявления внутренних трещин используются магнитное поле и магнитные частицы, подходит для ферромагнитных материалов и требует использования намагничивающего оборудования.

Стандартизированный процесс испытаний включает предварительную обработку образцов и многоточечный контроль. Необходимо удалить поверхностные загрязнения и осмотреть критические участки электрода для подтверждения целостности. Электроды, оптимизированные для горячего изостатического прессования (ГИП), имеют меньше трещин. Результаты испытаний коррелируют со скоростью охлаждения и условиями давления, а такие дефекты, как микротрещины, могут потребовать увеличения. Специалисты по контролю качества устанавливают критерии определения трещин на основе отраслевых стандартов. Для электродов, превышающих эти критерии, требуется оптимизация процесса спекания или внедрение процедуры снятия напряжений.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 7.2.2.3 Методы обнаружения включений и стандарты контроля

Методы обнаружения включений и стандарты контроля играют ключевую роль в обеспечении чистоты вольфрамово-медных электродов. Они направлены на выявление посторонних веществ, внесенных в сырье или в процессе изготовления. Включения могут включать оксиды или нерасплавленный порошок, которые влияют на проводимость и коррозионную стойкость электрода. Обнаружение обычно проводится с помощью спектрального анализа или электронной микроскопии. Спектроскопический анализ позволяет обнаружить элементы включений, анализируя спектральную сигнатуру, испускаемую образцом. Он подходит для быстрого скрининга и требует высокочувствительного оборудования. Электронная микроскопия, с другой стороны, анализирует морфологию включений с помощью визуализации с большим увеличением и подходит для детального анализа. Для этого требуется энергодисперсионный спектрометр.

Стандартизированный процесс испытаний включает подготовку образцов и многозонный анализ. Образцы необходимо нарезать и отполировать до плоской поверхности, а испытание должно охватывать различные части электрода для обеспечения репрезентативности. После оптимизации процесса горячего изостатического прессования электрод содержит меньше включений. Результаты испытаний зависят от чистоты сырья и однородности смеси. Дефекты, такие как локальные посторонние включения, могут потребовать дополнительного анализа поперечного сечения. Специалисты по контролю качества устанавливают стандарты контроля включений в соответствии с отраслевыми стандартами. Для электродов, превышающих допустимый диапазон, необходимо скорректировать источник порошка или ввести процесс фильтрации. Контроль окружающей среды, такой как пылепредотвращение, позволяет избежать вторичного загрязнения. В будущем точность обнаружения включений в режиме реального времени может быть улучшена за счет внедрения технологий онлайн-мониторинга или автоматизированного обнаружения.

### 7.3 Отраслевые стандарты для вольфрамово-медных электродов

Вольфрамово-медные электроды имеют решающее значение для обеспечения стабильного качества и производительности, охватывая весь процесс производства, испытаний и применения. Разработанные соответствующими авторитетными организациями, эти стандарты, в сочетании с требованиями к процессу производства и применению вольфрамово-медных электродов, служат руководством для производителей и пользователей в достижении технических характеристик и обеспечении безопасности. Вольфрамово-медные электроды производятся методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, а их микроструктура и эксплуатационные характеристики должны соответствовать отраслевым требованиям.

Горячее изостатическое прессование дополнительно оптимизирует их стабильность. Отраслевые стандарты охватывают соответствующие национальные стандарты и специальные требования, охватывающие состав материала, эксплуатационные показатели и контроль дефектов, обеспечивая техническую поддержку для таких областей, как электроэрозия обработка (ЭЭО), высоковольтное электрооборудование и сварка.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 7.3.1 Соответствующие внутренние стандарты

Соответствующие внутренние стандарты обеспечивают единую техническую основу для производства и применения вольфрамово-медных электродов, отражая последние достижения Китая в области материаловедения и промышленного производства. Эти стандарты, разработанные совместно Национальным управлением по стандартизации Китая и отраслевыми ассоциациями, охватывают подготовку, испытания и применение электродов, направленные на повышение качества продукции и международной конкурентоспособности. Процессы изготовления вольфрамово-медных электродов, такие как порошковая металлургия и вакуумная инфильтрация, должны соответствовать этим стандартам. Электроды, оптимизированные методом горячего изостатического прессования (ГИП), должны проходить испытания для подтверждения соответствия.

#### 7.3.1.1 Соответствующие положения китайских стандартов

Китайские стандарты, в первую очередь выпускаемые Администрацией по стандартизации Китая, обеспечивают конкретную правовую и техническую основу для контроля качества и применения вольфрамово-медных электродов. Эти правила, включая национальные стандарты, такие как «Медно-вольфрамовые и серебряно-вольфрамовые электрические контакты» и «Методы обнаружения дефектов в медно-вольфрамовых электрических контактах», регулируют требования к составу, эксплуатационным показателям и спецификациям обнаружения дефектов. Производственный процесс должен гарантировать, что соотношение вольфрама и меди соответствует стандартам. Испытания охватывают физические, химические и механические свойства, а электроды, оптимизированные путем горячего изостатического прессования, должны проходить микроструктурные испытания. Стандарты требуют от производителей внедрения системы менеджмента качества, регулярных испытаний сырья и готовой продукции, а также обеспечения соответствия обработки поверхности, такой как нанесение покрытий, требованиям коррозионной стойкости. Эти правила применяются в области электротехнических сплавов, подчеркивая стабильность электродов в высоковольтном электрооборудовании и электроэрозионной обработке, а также поощряя компании внедрять передовые технологии для снижения количества дефектов. Разработкой стандартов занимаются отраслевые ассоциации, такие как Национальный технический комитет по стандартизации электротехнических сплавов. Ключевыми организациями являются Гуйлиньский научно-исследовательский институт электротехники и компания Wenzhou Hongfeng Electrical Alloy Co., Ltd., представляющие технологический потенциал Китая. Стандарты также требуют четкой маркировки продукции и сопроводительных инструкций по технике безопасности для обеспечения совместимости с различными вариантами применения.

#### 7.3.1.2 Требования отраслевых стандартов

Отраслевые стандарты содержат подробные технические характеристики для конкретных областей применения вольфрамово-медных электродов, разработанные, главным образом,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Министерством промышленности и информационных технологий или соответствующими отраслевыми ассоциациями. Эти требования, включая такие отраслевые стандарты, как «Пластина из вольфрамово-медного сплава», фокусируются на свойствах материала, методах обработки и условиях эксплуатации, помогая компаниям производить электроды, отвечающие рыночному спросу. Процесс изготовления требует контролируемого размера частиц порошка и параметров спекания. Электроды, оптимизированные методом горячего изостатического прессования, должны соответствовать требованиям к прочности и электропроводности. Последующая обработка, такая как резка и шлифовка, должна обеспечивать геометрическую точность.

Отраслевые стандарты требуют, чтобы электроды были устойчивы к дуговой эрозии при электроэрозионной обработке, обеспечивали эффективную теплопроводность при сварке и сохраняли стойкость к высоким температурам в высоковольтном электрооборудовании. Испытания должны охватывать микроструктуру, дефекты и эксплуатационные показатели, а производители обязаны внедрить систему контроля партий для регистрации параметров процесса и результатов испытаний. Стандарты также стимулируют экологичное производство, сокращение выбросов отходов и соблюдение требований по охране окружающей среды. Участие в разработке стандарта соответствующих организаций, таких как Guilin Jinge Electrical and Electronic Materials Technology Co., Ltd., отражает технологический уровень отрасли.

### 7.3.2 Соответствующие международные стандарты

Международные стандарты обеспечивают единую техническую основу для глобального применения вольфрамово-медных электродов, отражая сотрудничество и консенсус между различными странами и регионами в области материаловедения и промышленного производства. Эти стандарты разрабатываются такими организациями, как Международная организация по стандартизации (ИСО), или независимо выпускаются крупными промышленно развитыми странами, такими как Европа, США, Япония и Южная Корея, на основе их собственных потребностей и уровней развития. Они направлены на содействие международной торговле и технологическому обмену. Процессы производства вольфрамово-медных электродов, такие как порошковая металлургия и вакуумная инфильтрация, должны соответствовать этим стандартам. Электроды, оптимизированные с помощью процессов горячего изостатического прессования (ГИП), должны проходить испытания для подтверждения их международной совместимости. Международные стандарты охватывают требования к составу, испытания производительности и спецификации применения, предоставляя руководство для многонациональных компаний и обеспечивая стабильное качество и надежность на мировых рынках.

#### 7.3.2.1 Международные стандарты вольфрамово-медных электродов

Международные стандарты на вольфрамово-медные электроды в первую очередь разрабатываются Международной организацией по стандартизации (ИСО) с целью установления унифицированных спецификаций для мирового производства и применения вольфрамово-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

медных электродов. Эти стандарты объединяют свойства вольфрамово-медных материалов с разнообразными требованиями различных промышленных применений, охватывая весь процесс от выбора сырья до испытаний конечного продукта. Стандарты ИСО часто основаны на широком международном сотрудничестве и включают в себя технический опыт таких стран, как Европа, США, Япония и Южная Корея, что обеспечивает их глобальную применимость. Вольфрамово-медные электроды производятся методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации. Их микроструктура и свойства должны соответствовать указанным ИСО соотношениям состава и физическим свойствам. Электроды, оптимизированные с помощью горячего изостатического прессования (ГИП), должны проходить строгие испытания производительности для соответствия международным требованиям. Стандарты ИСО, относящиеся к вольфрамово-медным электродам, в первую очередь касаются подготовки материала, оценки производительности и контроля качества. Например, стандарты указывают, что соотношение вольфрама и меди должно регулироваться в зависимости от области применения для баланса проводимости, стойкости к высоким температурам и механической прочности. В процессе производства размер частиц порошка, условия спекания и методы инфильтрации должны точно контролироваться для обеспечения низкой пористости и равномерного распределения фаз в электроде. Что касается испытаний, стандарты ISO требуют комплексной оценки плотности, проводимости, твердости и коррозионной стойкости электрода с использованием передовых методов неразрушающего контроля, таких как рентгеновский или ультразвуковой контроль, для выявления внутренних дефектов. Процесс горячего изостатического прессования играет ключевую роль в повышении плотности материала и стабильности характеристик, а результаты испытаний должны сравниваться с международно признанными пороговыми значениями характеристик.

Эти стандарты особенно применимы к таким областям, как электроэрозионная обработка, высоковольтное электрооборудование и сварка, подчеркивая стабильность и долговечность электродов в экстремальных условиях. Стандарты ISO также поощряют использование экологически безопасных процессов, сокращение выбросов отходов в процессе производства и адаптацию к глобальным тенденциям устойчивого развития.

### 7.3.2.2 Стандарты вольфрамово-медных электродов в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах

Стандарты на вольфрамово-медные электроды в Европе, США, Японии, Южной Корее и других странах отражают уникальные особенности развития промышленных технологий и потребности в их применении в каждом регионе. Эти стандарты разрабатываются соответствующими национальными органами по стандартизации и отражают различные технические традиции и рыночные ориентации. Стандарты США в основном выпускаются Американским обществом сварки (AWS) и Американским обществом по испытаниям и материалам (ASTM), европейские стандарты разрабатываются Европейским комитетом по стандартизации (CEN), японские стандарты выпускаются Японским комитетом по промышленным стандартам (JISC), а южнокорейские стандарты ссылаются на японские стандарты, включая местные потребности.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Эти стандарты предоставляют подробные рекомендации по подготовке, испытаниям и применению вольфрамово-медных электродов. Электроды, оптимизированные с помощью горячего изостатического прессования (HIP), должны соответствовать эксплуатационным характеристикам, указанным в каждом регионе.

В Соединенных Штатах стандарт AWS фокусируется на применении вольфрамово-медных электродов при сварке TIG и электроискровой обработке и определяет требования к составу, геометрии и обработке поверхности электродов. Стандарт ASTM больше фокусируется на механических свойствах и долговечности материала и подходит для аэрокосмической и оборонной отраслей. Процесс подготовки должен обеспечивать равномерное распределение вольфрама и меди, а испытания охватывают твердость, проводимость и стойкость к дуговой эрозии. Электроды, оптимизированные с помощью процесса горячего изостатического прессования, должны пройти несколько партий испытаний. Европейский стандарт CEN подчеркивает защиту окружающей среды и безопасность, охватывает использование электродов в высоковольтных электроприборах, фокусируется на испытаниях теплопроводности и коррозионной стойкости, а процесс подготовки требует использования технологий с низким уровнем загрязнения. Методы испытаний включают металлографический анализ и неразрушающий контроль. Электроды, оптимизированные с помощью процесса горячего изостатического прессования, должны соответствовать унифицированным требованиям доступа на рынок.

Японские стандарты JIS, известные своей высокой точностью и контролем процесса, особенно подходят для электронной и автомобильной промышленности. Они регламентируют микроструктуру и качество поверхности электродов, требуют использования прецизионного оборудования для подготовки, а испытания включают анализ размера зерна и дефектов. Горячее изостатическое прессование (ГИП) имеет решающее значение для повышения однородности материала, и результаты испытаний должны соответствовать высоким японским стандартам. Стандарты Южной Кореи во многом зависят от японских стандартов и, в соответствии с местными производственными потребностями, ориентированы на характеристики электродов при сварке и производстве аккумуляторов. Процесс подготовки требует оптимизированных условий смешивания и спекания порошка, а испытания охватывают проводимость и прочность. Электроды, оптимизированные для ГИП, должны адаптироваться к быстро меняющейся производственной среде.

Различия между этими стандартами отражают технологические преимущества и приоритеты применения в каждом регионе. США отдают приоритет практичности, Европа – защите окружающей среды, Япония – точности, а Южная Корея – эффективности. Транснациональные компании должны выбирать применимые стандарты, исходя из своих целевых рынков. Оптимизация процесса горячего изостатического прессования открывает возможность соответствия нескольким стандартам. В будущем, благодаря глобальной технологической интеграции, эти стандарты, вероятно, будут ещё больше сближаться, особенно в областях интеллектуального производства и новой энергетики.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

**Resistance Welding Electrodes:** Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

**Repair Welding Electrodes:** Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

**Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes:** Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

**High-Voltage Discharge Tube Electrodes:** This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Глава 8: Тенденции рынка и технологий вольфрамово-медных электродов

### 8.1 Анализ промышленной цепочки вольфрамово-медных электродов

Цепочка производства вольфрамово-медных электродов является ключом к пониманию развития рынка и технологического прогресса, охватывая весь процесс от приобретения сырья до производства конечного продукта. Этот анализ выявляет взаимозависимость между каждым звеном в отраслевой цепочке, обеспечивая важную основу для оптимизации эффективности производства и рыночной конкурентоспособности. Вольфрамово-медные электроды изготавливаются с помощью процессов порошковой металлургии или вакуумной инфльтрации. Их производительность зависит от качества исходного сырья и совершенствования производственных процессов среднего звена. Горячее изостатическое прессование играет важную роль в улучшении стабильности продукта. Каждый этап отраслевой цепочки зависит от технологических инноваций, рыночного спроса и политической среды. В будущем, по мере продолжения глобальной модернизации промышленности, скоординированное развитие отраслевой цепочки будет и дальше способствовать применению и расширению использования вольфрамово-медных электродов.

#### 8.1.1 Поставки сырья для первичной переработки

Поставки сырья на начальных этапах производства вольфрамово-медных электродов являются основой цепочки производства, включающей добычу вольфрама и переработку меди, обеспечивая высококачественное сырье для последующего производства. Это звено напрямую определяет чистоту состава электрода и стабильность его характеристик. Вольфрамовая руда, основной источник сырья, обычно добывается подземным или открытым способом и требует обогащения и очистки для получения высокочистого вольфрамового порошка. Медь получают путем плавки медной руды или переработки медного лома, который затем перерабатывается в медный порошок или сыпучие материалы, пригодные для порошковой металлургии. Надежность поставок сырья зависит от распределения минеральных ресурсов и технологий добычи. В процесс вовлечены многочисленные регионы по всему миру, что образует сложную сеть поставок.

Процесс подготовки сырья требует строгого контроля качества. Размер частиц, чистота и морфология вольфрамовых и медных порошков должны тщательно проверяться для обеспечения однородности смешивания и плавной последующей обработки. Поставщикам необходимо тесно сотрудничать с производителями, работающими на последующих этапах, для оперативной корректировки стратегий поставок с учетом колебаний рыночного спроса. Экологические факторы, такие как воздействие добычи полезных ископаемых на окружающую среду, также привлекают внимание, побуждая отрасль к переходу к устойчивой добыче и восстановлению ресурсов. Процесс горячего изостатического прессования требует более высокой чистоты сырья, что побуждает компании, работающие на начальном этапе, постоянно совершенствовать технологии очистки и уровни технологических процессов. В будущем, с развитием новых видов энергии и высокотехнологичных производственных отраслей, поставщики сырья, работающие на

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

начальном этапе, столкнутся с более высокими требованиями к чистоте и необходимостью более широкого международного сотрудничества.

### 8.1.2 Среднее производство

Производство и изготовление электродов средней стадии является ключевым звеном в цепочке производства вольфрамово-медных электродов, отвечая за переработку сырья, предоставленного на начальном этапе, в готовую продукцию, соответствующую требованиям к применению. Этот этап включает в себя множество процессов, таких как смешивание порошков, формование, спекание и инфльтрация, и выполняется с использованием технологии порошковой металлургии или вакуумной инфльтрации. Производственный процесс требует точного контроля таких параметров процесса, как температура, давление и атмосфера, для обеспечения микроструктурной плотности и равномерности распределения фаз электрода. Процесс горячего изостатического прессования играет ключевую роль на этом этапе, оптимизируя свойства материала за счет всенаправленного давления, уменьшая количество дефектов и улучшая однородность продукции. Производственные компании, как правило, оснащены передовым оборудованием и профессиональными техническими командами для удовлетворения индивидуальных потребностей различных вариантов применения.

Производство также включает в себя постобработку, такую как резка, шлифовка и обработка поверхности, для улучшения геометрии и качества поверхности электрода. Эти операции требуют высокоточного инструмента и строгого контроля качества, чтобы гарантировать соответствие продукции отраслевым стандартам. Производственный процесс основан на технологических инновациях, включая новые технологии, такие как формование, близкое к заданной форме, и использование нанопорошков, появившиеся в последние годы для повышения эффективности и снижения затрат. Меняющиеся требования рынка также требуют гибкой адаптации производственных линий, например, к специфическим требованиям аэрокосмической или электронной промышленности.

### 8.1.3 Рынок нисходящих приложений

Рынок конечного применения является конечным звеном в цепочке производства вольфрамово-медных электродов, охватывая практическое использование электродов в различных высокотехнологичных областях, отражая их эксплуатационные преимущества и рыночный спрос. Этот этап включает в себя такие отрасли, как электроэрозионная обработка, высоковольтное электрооборудование, сварка и пайка, а также аэрокосмическая и военная промышленность. Вольфрамово-медные электроды широко распространены благодаря своей высокотемпературной стойкости, электропроводности и механической прочности. Процессы подготовки, такие как порошковая металлургия и вакуумная инфльтрация, гарантируют, что микроструктура и эксплуатационные характеристики электрода соответствуют различным требованиям. Электроды, оптимизированные с помощью горячего изостатического прессования, демонстрируют большую стабильность и долговечность в конечных применениях. Изменения рыночного спроса напрямую

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стимулируют расширение конечного рынка и внедрение инноваций в продукцию.

В области электроискровой обработки вольфрамово-медные электроды широко используются при изготовлении пресс-форм и обработке труднообрабатываемых материалов, особенно в автомобильной и электронной промышленности, где их возможности высокоточной обработки являются предпочтительными. Компании настраивают форму и характеристики электродов в соответствии с потребностями клиентов, а процессы постобработки, такие как шлифование и полирование, еще больше повышают качество продукции. Рынок высоковольтных электроприборов использует стойкость к дуговой эрозии вольфрамово-медных электродов, в первую очередь обслуживая оборудование для передачи электроэнергии и промышленного управления. Производители должны гарантировать надежность электродов в условиях высокого напряжения. Сварка и пайка зависят от теплопроводности и антиадгезионных свойств электродов и широко используются при сборке автомобилей и корпусировании микроэлектроники. Спрос на рынке стимулирует гибкую настройку производственных линий.

Аэрокосмический и военный секторы являются ещё одним ключевым направлением рынка. Вольфрамово-медные электроды используются в ракетных двигателях и компонентах систем наведения, что требует от них соответствия эксплуатационным требованиям в экстремальных условиях. Техническое сотрудничество в масштабах всей отрасли и инвестиции в НИОКР стимулируют производителей разрабатывать высокопроизводительные продукты. Электроды, оптимизированные методом горячего изостатического прессования (ГИП), отлично подходят для этих применений. Рыночные тенденции также зависят от государственной поддержки и экологических норм, при этом ключевыми трендами становятся экологичное производство и возможность вторичной переработки.

## 8.2 Техническое направление вольфрамово-медных электродов

Вольфрамово-медные электроды играют ключевую роль в повышении производительности и расширении рынка, уделяя особое внимание оптимизации производственных процессов, разработке новых материалов и интеллектуальных приложений. Это направление направлено на удовлетворение всё более сложных промышленных требований путём сочетания новейших производственных технологий с достижениями материаловедения для повышения эффективности и долговечности электродов. Вольфрамово-медные электроды изготавливаются методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации. Оптимизация их микроструктуры и свойств лежит в основе технологического развития, при этом горячее изостатическое прессование играет важную роль в повышении качества продукции.

### 8.2.1 Оптимизация процесса подготовки

Оптимизация процесса является ключевым направлением развития технологии вольфрамово-медных электродов. Она направлена на повышение производительности электродов, снижение затрат и повышение эффективности производства за счет совершенствования существующих

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

процессов. Этот процесс включает несколько этапов, включая подготовку порошка, формовку, спекание и инфильтрацию. В основе лежат методы порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, а ключевым инструментом оптимизации является горячее изостатическое прессование (ГИП). Целью оптимизации процесса является снижение количества дефектов, повышение микроструктурной однородности и увеличение плотности материала для соответствия строгим требованиям таких областей, как электроэрозионная обработка (ЭЭО), высоковольтное электрооборудование, а также аэрокосмическая и военная промышленность.

Подготовка порошка является отправной точкой для оптимизации. Благодаря совершенствованию технологии шаровой мельницы и процессов распыления, повышается последовательность размера частиц и чистота порошков вольфрама и меди, что обеспечивает однородность во время процесса смешивания. На этапе формования внедряется технология близкой к чистой формы, чтобы сократить объем последующей обработки. Давление прессования и конструкция пресс-формы оптимизированы для увеличения плотности сырца. Оптимизация процесса спекания фокусируется на контроле температуры и управлении атмосферой. Пористость и окисление снижаются за счет многоступенчатого нагрева и вакуумной среды. Горячее изостатическое прессование дополнительно усиливает эффект спекания. Оптимизация этапа инфильтрации обеспечивает идеальное сплавление вольфрамового скелета и медной фазы за счет регулирования смачиваемости и времени инфильтрации меди, что уменьшает незаполненные области.

Не менее важна и оптимизация процессов постобработки. Усовершенствования методов резки и шлифования повысили геометрическую точность и качество поверхности электродов, а достижения в обработке поверхности, такой как гальванопокрытие, повысили коррозионную стойкость и долговечность. Для оптимизации производственных процессов требуется современное оборудование, такое как автоматизированные производственные линии и системы мониторинга в режиме реального времени, чтобы снизить человеческий фактор. В будущем оптимизация производственных процессов будет включать в себя технологии искусственного интеллекта и моделирования для прогнозирования оптимальных параметров процесса и разработки функционально-градиентных материалов или наноструктурированных электродов, отвечающих требованиям повышенной точности и экстремальных условий, что будет способствовать применению вольфрамово-медных электродов на развивающихся рынках.

### 8.2.2 Путь повышения производительности

Повышение эксплуатационных характеристик является основной целью разработки технологии вольфрамово-медных электродов, направленной на повышение их термостойкости, электропроводности, механической прочности и долговечности за счет совершенствования материалов и внедрения инновационных технологических процессов. Этот подход включает оптимизацию состава, контроль микроструктуры и модификацию поверхности, стремясь к прорывным решениям для удовлетворения потребностей таких областей, как электроэрозионная обработка, высоковольтное электрооборудование, а также аэрокосмическая и военная промышленность. Вольфрамово-медные электроды изготавливаются методами порошковой

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

металлургии или вакуумной инфльтрации. Их эксплуатационные характеристики зависят от соотношения вольфрама и меди и точности контроля процесса производства. Горячее изостатическое прессование играет ключевую роль в повышении однородности и стабильности материала.

Оптимизация состава — важный способ повышения производительности. Регулируя соотношение вольфрама и меди, можно улучшить проводимость или термостойкость в зависимости от условий применения. Например, увеличение содержания меди может улучшить проводимость и подходит для сварки, а увеличение содержания вольфрама повышает высокотемпературную стойкость и подходит для деталей ракетных двигателей. Регулирование микроструктуры может быть достигнуто путем введения нанопорошков или многофазных материалов для измельчения размера зерна, уменьшения пор и дефектов, а также путем использования процессов горячего изостатического прессования для дальнейшей оптимизации силы сцепления в зоне контакта и повышения общей механической прочности. Технологии модификации поверхности, такие как гальванопокрытие или нанесение покрытий, позволяют использовать коррозионно-стойкие или антиоксидантные материалы для продления срока службы электродов во влажных или высококоррозионных средах.

Более того, повышение производительности зависит от механизмов обнаружения и обратной связи. Металлографический анализ и обнаружение дефектов позволяют выявить слабые места, влияющие на производительность, и скорректировать параметры процесса для постоянного улучшения. Команда НИОКР сотрудничает с производителями, изучая использование легирующих или композитных материалов, внедряя межфазные элементы для повышения прочности. Достижения в области технологий терморегулирования также способствуют повышению производительности за счёт оптимизации пути теплопередачи в электродах для снижения риска локального перегрева.

### 8.2.3 Исследование расширения приложения

Расширение и исследование областей применения находятся на переднем крае развития технологии вольфрамово-медных электродов, направленного на освоение новых сегментов рынка за счет инновационного использования их уникальных свойств. Это исследование охватывает развивающиеся отрасли, такие как новая энергетика, медицинское оборудование и интеллектуальное производство, исследуя новые сценарии применения, основанные на высокой термостойкости, электропроводности и механической прочности вольфрамово-медных электродов. Вольфрамово-медные электроды изготавливаются методами порошковой металлургии или вакуумной инфльтрации. Оптимизированная микроструктура и свойства создают основу для расширения областей применения, а горячее изостатическое прессование повышает их адаптируемость к сложным условиям. Разнообразие рыночных потребностей и технологический прогресс будут способствовать продвижению вольфрамово-медных электродов в более ценные секторы. Новая энергетика является ключевой областью для расширения применения. Вольфрамово-медные электроды могут использоваться в качестве соединителей для

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

аккумуляторов электромобилей или электрических контактов для зарядного оборудования, где их проводимость и термостойкость способствуют эффективной передаче энергии. Сектор медицинских приборов изучает возможности применения в прецизионных хирургических инструментах или диагностическом оборудовании, где высокоточная обработка и стабильность электродов отвечают требованиям миниатюризации. Интеллектуальное производство фокусируется на их потенциале в роботизированных сочленениях или датчиках, где механическая прочность и вибростойкость вольфрамово-медных электродов хорошо подходят для высокочастотных сред. Технологическое сотрудничество и инвестиции в НИОКР в отрасли побуждают производителей разрабатывать индивидуальные продукты, отвечающие уникальным требованиям этих развивающихся рынков.

Расширение сферы применения также предполагает поддержку инноваций в технологических процессах. Благодаря функционально-градиентному дизайну и нанотехнологиям можно изготавливать электроды с многофункциональными свойствами, отвечающие потребностям различных отраслей. Внедрение методов постобработки, таких как лазерное травление и 3D-печать, повысило геометрическую сложность и гибкость производства электродов. Маркетинговые исследования и отзывы пользователей играют важнейшую роль в поиске решений, и производителям необходимо сотрудничать с компаниями, работающими в сфере переработки, для подтверждения возможности внедрения новых технологий.



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

**Resistance Welding Electrodes:** Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

**Repair Welding Electrodes:** Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

**Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes:** Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

**High-Voltage Discharge Tube Electrodes:** This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение :

Глоссарий по вольфрамово-медным электродам

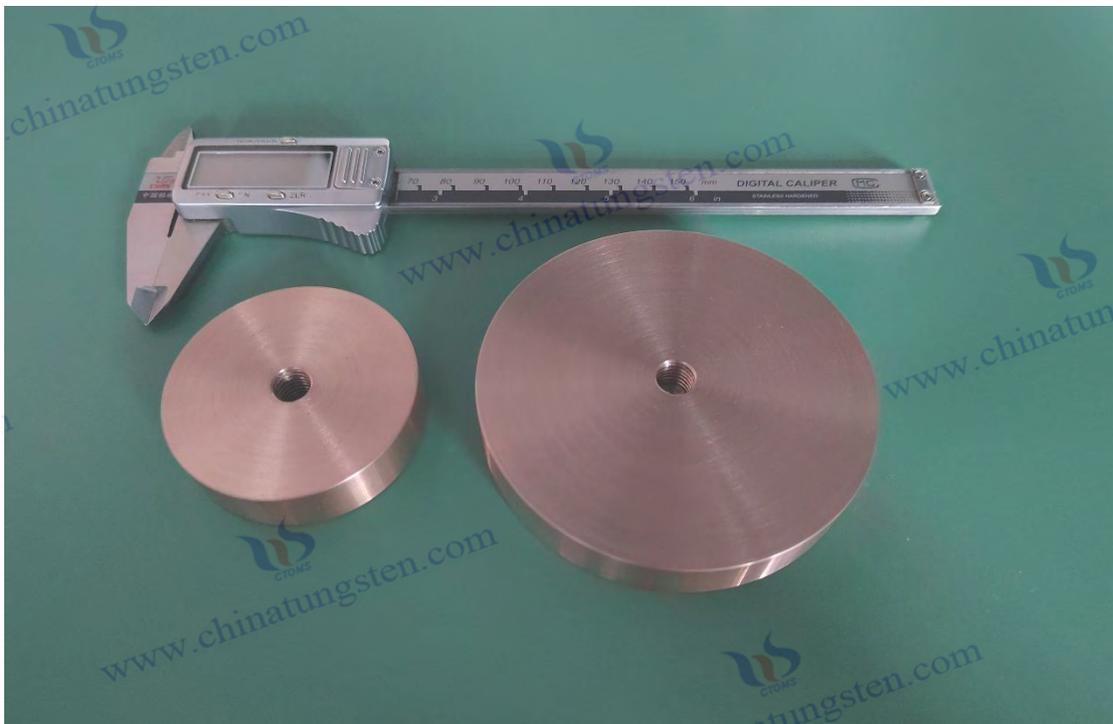
термин	определение
Вольфрамово-медный электрод	Сплав вольфрама и меди в определённом соотношении сочетает высокую температуру плавления, термостойкость и твёрдость вольфрама с высокой электропроводностью, теплопроводностью и пластичностью меди. Он широко используется в таких областях, как электроэрозионная обработка (ЭЭО), производство высоковольтного электрооборудования, сварка и пайка, а также в аэрокосмической и военной промышленности. Его эксплуатационные характеристики оптимизируются методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, а горячее изостатическое прессование дополнительно улучшает микроструктурную стабильность и прочность.
Порошковая металлургия	Производство вольфрамово-медных электродов осуществляется путем смешивания порошков вольфрама и меди, прессования их в компактную форму и последующего спекания при высоких температурах. Этот процесс обеспечивает однородность материала, снижает пористость и позволяет достичь желаемых механических и электрических свойств за счет контроля параметров спекания. Это одна из основных технологий в производстве вольфрамово-медных электродов.
Вакуумная инфильтрация	Технология изготовления вольфрамово-медных электродов путем инфильтрации жидкой меди в предварительно изготовленный пористый вольфрамовый каркас в вакууме. Этот метод включает плавление меди при высоких температурах и заполнение пор вольфрамового каркаса, оптимизируя плотность материала и распределение фаз. Этот метод особенно подходит для электродов, требующих высокой проводимости и стойкости к высоким температурам.
Горячее изостатическое прессование	Процесс, в котором используется высокая температура и изобарический газ для приложения всестороннего давления к вольфрамово-медным электродам. Этот процесс устраняет внутренние дефекты, повышает плотность материала и улучшает стабильность характеристик. Он широко используется для повышения механической прочности и термической стабильности электродов.
микроструктура	Внутренние микроструктурные характеристики вольфрамово-медных электродов, включая вольфрамовый каркас, распределение фаз меди, размер зерна и пористость, напрямую влияют на их проводимость, механическую прочность и долговечность. Качество микроструктуры можно оценить с помощью металлографического анализа и обнаружения дефектов, а горячее изостатическое прессование (ГИП) оказывает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	существенное влияние на оптимизацию качества микроструктуры.
<b>EDM</b>	Технология обработки, использующая дуговой разряд для удаления материала с поверхности заготовки. Вольфрамово-медные электроды широко используются в качестве электродов-инструментов. Их преимущество заключается в способности обрабатывать материалы высокой твёрдости, такие как штамповая сталь и титановые сплавы. Ключевыми свойствами вольфрамово-медных электродов являются стойкость к дуговой эрозии и электропроводность.
<b>Высоковольтные электроприборы</b>	В области электрооборудования высокого напряжения и тока вольфрамово-медные электроды используются в выключателях, молниеотводах и других компонентах. Благодаря своей дугостойкости и электропроводящей стабильности они обеспечивают надёжную работу в условиях высоких энергий.
<b>контактная сварка</b>	Метод сварки, при котором соединение металлов осуществляется посредством нагрева электрическим током и давления. Вольфрамово-медный электрод обеспечивает электро- и теплопроводность. Благодаря антиадгезионной способности и высокой термостойкости он отлично подходит для точечной и шовной сварки.
<b>Аэрокосмическая и военная промышленность</b>	Вольфрамово-медные электроды используются в соплах ракетных двигателей, элементах наведения и т.д., в том числе в производстве космических аппаратов и военной техники. Они должны выдерживать экстремально высокие температуры, механические нагрузки и требования к надёжности. Их основными преимуществами являются термостойкость и механическая прочность.
<b>Постобработка</b>	Вольфрамово-медные электроды режутся, шлифуются, полируются и подвергаются обработке поверхности для оптимизации их геометрии, качества поверхности и эксплуатационных характеристик. Этот процесс гарантирует соответствие электродов требованиям конкретных областей применения, например, высокоточной обработки или устойчивости к коррозионным средам.
<b>Компонентный анализ</b>	Содержание вольфрама и меди, а также содержание микроэлементов в вольфрамово-медных электродах определяется химическими или спектральными методами с целью оценки чистоты сырья и влияния процесса подготовки для обеспечения соответствия характеристик электрода проектным требованиям.
<b>Обнаружение дефектов</b>	Выявление и оценка дефектов, таких как поры, трещины и включения в медно-вольфрамовых электродах, включая рентгеновский контроль и металлографический анализ, направлены на улучшение качества продукции и срока службы.
<b>Отраслевые стандарты</b>	Спецификации, разработанные национальными или международными организациями, такими как стандарты ISO и китайские национальные

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

стандарты, определяют состав, эксплуатационные характеристики и требования к испытаниям вольфрамово-медных электродов, обеспечивая стабильное качество на мировых рынках.



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Ссылки

### Китайские ссылки

- [1] Ли Мин, Чжан Цян. Исследование технологии изготовления и характеристик вольфрамово-медного электрода [J]. Журнал материаловедения и машиностроения, 2023, 39(5): 45-52.
- [2] Ван Фан, Лю Вэй. Анализ применения композиционных материалов вольфрам-медь при электронской обработке [J]. Современные производственные технологии, 2024, 12(3): 78-85.
- [3] Чжао Цзюнь, Чэнь Ли. Микроструктура и контроль качества вольфрамово-медных электродов [J]. Металлические материалы и процессы, 2022, 18(4): 33-40.

### Ссылки на английском языке

- [1] Чжан, Х. и Лю, Дж. Изготовление и эксплуатационные характеристики вольфрамово-медных электродов [J]. Журнал материаловедения, 2023, 58(12): 123-130.
- [2] Смит, Р. и Браун, Т. Применение композитов вольфрам-медь при электроэрозионной обработке [J]. Advanced Manufacturing Review, 2024, 15(6): 89-96.
- [3] Джонсон, К. и Ли, С. Анализ микроструктуры и контроль качества вольфрамово-медных электродов [J]. Materials Engineering Journal, 2022, 10(3): 55-62.



CTIA GROUP LTD Медно-вольфрамовый электрод

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT