

# Энциклопедия вольфрамово-медного прутка

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

**CTIA GROUP LTD**

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

[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

## ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, дочерняя компания, полностью принадлежащая компании CHINATUNGSTEN ONLINE и имеющая статус независимого юридического лица, стремится содействовать интеллектуальному, комплексному и гибкому проектированию и производству вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета. CHINATUNGSTEN ONLINE, основанная в 1997 году с сайта [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) — первого в Китае веб-сайта, посвященного вольфрамовой продукции, — является новаторской в стране компанией в сфере электронной коммерции, специализирующейся 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, сплавов высокой плотности, молибдена и молибденовых сплавов.

За последние 30 лет компания CHINATUNGSTEN ONLINE создала более 200 многоязычных профессиональных веб-сайтов, посвященных вольфраму и молибдену, охватывающих более 20 языков. На сайте размещено более миллиона страниц новостей, цен и анализа рынка вольфрама, молибдена и редкоземельных металлов. С 2013 года в официальном аккаунте компании в WeChat «CHINATUNGSTEN ONLINE» было опубликовано более 40 000 информационных материалов, что позволило привлечь почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставлять бесплатную информацию сотням тысяч специалистов отрасли по всему миру. Благодаря миллиардам посещений веб-сайта и официального аккаунта, компания стала признанным глобальным и авторитетным информационным центром для вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной отраслей, предоставляя круглосуточные многоязычные новости, информацию о характеристиках продукции, рыночных ценах и тенденциях рынка.

Опираясь на технологии и опыт CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологии искусственного интеллекта (ИИ), компания совместно с клиентами разрабатывает и производит изделия из вольфрама и молибдена с заданным химическим составом и физическими свойствами (такими как размер частиц, плотность, твердость, прочность, размеры и допуски). Компания предлагает комплексные интегрированные услуги, охватывающие весь процесс: от вскрытия пресс-форм и опытного производства до финишной обработки, упаковки и логистики. За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по НИОКР, проектированию и производству более 500 000 видов изделий из вольфрама и молибдена более чем 130 000 клиентам по всему миру, заложив основу для индивидуального, гибкого и интеллектуального производства. Опираясь на эту основу, CTIA GROUP продолжает углублять интеллектуальное производство и комплексные инновации в области вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного интернета.

Доктор Ханнс и его команда в CTIA GROUP, основываясь на 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 работы с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовой и молибденовой продукцией, а также в проектировании и производстве твердых сплавов и высокоплотных сплавов, является признанным 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, завоеывая широкое признание в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологическим инновациям CTIA GROUP, продвижению продукции и отраслевому обмену, позволяя ей стать лидером в сфере мирового производства и информационных услуг в области продукции из вольфрама и молибдена.



### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## CTIA GROUP LTD Tungsten Copper Rod Introduction

### 1. Overview of Tungsten Copper Rod

Tungsten copper rod is composite materials produced by infiltrating high-purity tungsten powder with copper through a vacuum infiltration process. It possesses a unique microstructure that combines the high strength and high melting point of tungsten with the excellent electrical and thermal conductivity of copper. This results in a high-performance material with outstanding thermal stability, wear resistance, and electrical conductivity.

### 2. Characteristics of Tungsten Copper Rod

**High Thermal Conductivity:** The excellent thermal conductivity of copper ensures rapid heat dissipation, making it suitable for high-power devices and laser systems.

**High Strength and High-Temperature Resistance:** The stable mechanical properties of tungsten allow the material to remain reliable under extreme high-temperature conditions.

**Resistance to Arc Erosion:** The tungsten-copper composite structure provides exceptional resistance to arc erosion in electrical applications, significantly extending electrode service life.

**Low Thermal Expansion Coefficient:** Effectively reduces thermal stress and improves structural stability.

**Excellent Machinability:** Can be precisely fabricated into electrodes, heat sinks, or complex parts to meet diversified application requirements.

### 3. Performance Parameters of Tungsten Copper Rod

Product Name	Chemical Composition (%)		Physical and Mechanical Properties			
	Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (mΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
W50Cu	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
W60Cu	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
W70Cu	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
W80Cu	0.5	Balance	15.15	220	5	980
W90Cu	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

### 4. Advantages of Tungsten Copper Rod

**High-Performance Combination:** A balanced integration of strength, electrical conductivity, thermal conductivity, and high-temperature resistance.

**Customized Solutions:** Tungsten-to-copper ratio and dimensions can be tailored to meet specific customer requirements.

**Long Service Life and Stability:** Significantly reduces maintenance and replacement costs.

### 5. Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

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

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## Каталог

### Глава 1. Обзор вольфрамово-медного прутка

- 1.1 Определение и основные понятия вольфрамово-медного прутка
- 1.2 История развития и технологическая эволюция композиционных материалов вольфрам-медь
- 1.3 Статус и роль вольфрамово-медного прутка в системе материалов
- 1.4 Состояние исследований и применения вольфрамово-медных материалов в стране и за рубежом

### Глава 2. Основные типы вольфрамово-медного прутка

- 2.1 Классификация по соотношению вольфрама и меди
  - 2.1.1 Вольфрамовый медный стержень W-Cu 50/50
  - 2.1.2 Вольфрамовый медный стержень W-Cu 70/30
  - 2.1.3 Вольфрамовый медный стержень W-Cu 75/25
  - 2.1.4 Вольфрамовый медный стержень W-Cu 80/20
  - 2.1.5 Вольфрамовый медный стержень W-Cu 85/15
  - 2.1.6 Вольфрамовый медный стержень W-Cu 90/10
  - 2.1.7 Пруток из вольфрамовой меди со специальным соотношением
- 2.2 Классификация по области применения
  - 2.2.1 Вольфрамово-медный пруток для электротехнических и электронных применений
    - 2.2.1.1 Высоковольтные выключатели и дугогасительные контакты
      - 2.2.1.2 Разрядный электрод и электрод свечи зажигания
      - 2.2.1.3 Корпусирование полупроводников и проводящие соединители
    - 2.2.2 Вольфрамово-медный стержень для отвода тепла и терморегулирования
      - 2.2.2.1 Микроэлектроника и радиаторы интегральных схем
        - 2.2.2.2 Подложки для рассеивания тепла лазеров и мощных устройств
        - 2.2.2.3 Компоненты охлаждения для аэрокосмической техники
      - 2.2.3 Вольфрамово-медный пруток для военного и аэрокосмического применения
        - 2.2.3.1 Электромагнитное оружие и материалы защитной брони
        - 2.2.3.2 Электроды и компоненты для высокоэнергетического оружия
        - 2.2.3.3 Компоненты сопла ракеты и двигательной установки
    - 2.2.4 Вольфрамово-медный пруток для машиностроения и производства пресс-форм
      - 2.2.4.1 Электрод для электроэрозионной обработки (ЭЭО)
      - 2.2.4.2 Штампы и износостойкие детали
    - 2.2.5 Вольфрамово-медный стержень для медицинских и научных исследований
      - 2.2.5.1 Медицинские электроды и специальные зонды
      - 2.2.5.2 Эксперименты по физике высоких энергий и применение в атомной промышленности

### Глава 3. Технология получения и производства вольфрамово-медного прутка

- 3.1 Подготовка сырья
  - 3.1.1 Подготовка и требования к качеству вольфрамового порошка
  - 3.1.2 Получение и характеристики электролитической меди

#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

- 3.1.3 Влияние размера, морфологии и чистоты порошка вольфрама на процесс
- 3.2 Процесс формования заготовки на основе вольфрама
  - 3.2.1 Прессование (одноосное прессование, изостатическое прессование)
  - 3.2.2 Уплотнение спеканием (вакуум или атмосфера водорода)
  - 3.2.3 Контроль пористости и связности преформ
- 3.3 Процесс вакуумной инфильтрации
  - 3.3.1 Основные принципы вакуумной инфильтрации
  - 3.3.2 Конструкция и принцип работы инфильтрационной печи
  - 3.3.3 Температура инфильтрации меди, степень вакуума и динамика инфильтрации
  - 3.3.4 Реакция на границе раздела и эволюция микроструктуры во время инфильтрации
  - 3.3.5 Равномерность инфильтрации и контроль качества
- 3.4 Постобработка и обработка
  - 3.4.1 Термическая обработка и снятие напряжений
  - 3.4.2 Прецизионная обработка и контроль размеров
  - 3.4.3 Технология модификации поверхности и нанесения покрытий
- 3.5 Исследование новых процессов
  - 3.5.1 Технология изготовления нано-вольфрамовых медных заготовок и ультратонкой медной инфильтрации
  - 3.5.2 Сочетание вакуумной инфильтрации и аддитивного производства
  - 3.5.3 Процесс оптимизации высокой однородности и низкой пористости

#### **Глава 4 Физические и химические свойства вольфрамово-медного прутка**

- 4.1 Основные физические свойства вольфрамово-медного прутка
  - 4.1.1 Плотность и удельный вес вольфрамово-медного прутка
  - 4.1.2 Температура плавления и термическая стабильность вольфрамово-медного прутка
  - 4.1.3 Коэффициент теплового расширения и теплопроводность вольфрамово-медного прутка
  - 4.1.4 Проводимость и удельное сопротивление вольфрамово-медного стержня
- 4.2 Механические свойства вольфрамово-медного прутка
  - 4.2.1 Твердость и прочность вольфрамово-медного прутка
  - 4.2.2 Пластичность и вязкость вольфрамово-медного прутка
  - 4.2.3 Износостойкость и ударопрочность вольфрамово-медного прутка
- 4.3 Химические свойства вольфрамово-медного прутка
  - 4.3.1 Стойкость к окислению и коррозии вольфрамово-медного прутка
  - 4.3.2 Высокотемпературная химическая стабильность вольфрамово-медного прутка
  - 4.3.3 Совместимость вольфрамово-медного прутка с другими металлами
- 4.4 Микроструктура и организационные характеристики вольфрамово-медного прутка
  - 4.4.1 Кристаллическая структура и фазовый состав вольфрамово-медного прутка
  - 4.4.2 Характеристики распределения фаз вольфрама и меди
  - 4.4.3 Механизм межфазного связывания и анализ микроструктуры
- 4.5 Паспорт безопасности медно-вольфрамового прутка для интеллектуального производства в Китае

## **Глава 5. Основные области применения вольфрамово-медного прутка**

- 5.1 Электрика и электроника
- 5.2 Аэрокосмическая и оборонная промышленность
- 5.3 Машиностроение и производство пресс-форм
- 5.4 Устройства терморегулирования и отвода тепла
- 5.5 Другие области применения

## **Глава 6. Оборудование для производства и контроль процесса изготовления вольфрамово-медного прутка**

- 6.1 Оборудование для подготовки и формования порошков
- 6.2 Оборудование для вакуумного спекания и подготовки преформ
- 6.3 Оборудование для вакуумной инфильтрации (Core)
- 6.4 Оборудование для последующей обработки и механической обработки
- 6.5 Оборудование для испытаний и контроля качества

## **Глава 7. Методы контроля и оценки качества вольфрамово-медного прутка**

- 7.1 Проверка внешнего вида и размеров прутка из вольфрамовой меди
- 7.2 Испытание физических свойств вольфрамово-медного прутка
- 7.3 Испытание механических свойств прутка из вольфрамовой меди
- 7.4 Испытание химических свойств вольфрамово-медного прутка
- 7.5 Микроструктура и структурный анализ вольфрамово-медного прутка
- 7.6 Сравнение общепринятых международных стандартов и методов испытаний

## **Глава 8 Стандарты и спецификации для вольфрамово-медного прутка**

- 8.1 Национальные и отраслевые стандарты Китая для вольфрамово-медного прутка
- 8.2 Международные стандарты на вольфрамовую медную катанку (ISO, ASTM, IEC и т. д.)
- 8.3 Американские стандарты для вольфрамово-медного прутка (ASTM, ANSI, SAE)
- 8.4 Европейские стандарты на вольфрамовую медную катанку (EN, DIN, BS)
- 8.5 Японский стандарт (JIS) для вольфрамово-медного прутка
- 8.6 Сравнительный анализ и анализ применимости стандартов на вольфрамовую медную катанку

## **Глава 9. Оптимизация производительности вольфрамово-медного стержня**

- 9.1 Влияние соотношения легирующих элементов на свойства
  - 9.1.1 Соотношение вольфрама и меди, электро- и теплопроводность
  - 9.1.2 Соотношение вольфрама и меди и механические свойства
  - 9.1.3 Соотношение вольфрама и меди и коэффициент теплового расширения
  - 9.1.4 Стратегия оптимизации
- 9.2 Термическая обработка и повышение производительности
  - 9.2.1 Отжиг
  - 9.2.2 Обработка раствором и старение
  - 9.2.3 Горячее изостатическое прессование (ГИП)
  - 9.2.4 Примечания

### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

- 9.3 Взаимосвязь между микроструктурой и свойствами
  - 9.3.1 Размер и распределение частиц вольфрама
  - 9.3.2 Взаимосвязь между микроструктурой и свойствами
  - 9.3.3 Состояние связывания интерфейса
  - 9.3.4 Технология анализа микроструктуры
- 9.4 Оптимизация износостойкости и коррозионной стойкости
  - 9.4.1 Оптимизация износостойкости
  - 9.4.2 Оптимизация коррозионной стойкости
  - 9.4.3 Комплексный вариант оптимизации
  - 9.4.4 Примечания

## **Глава 10. Руководство по выбору и использованию вольфрамово-медного прутка**

- 10.1 Как правильно выбрать вольфрамово-медный пруток
  - 10.1.1 Уточнение сценариев применения и требований к производительности
  - 10.1.2 Понимание спецификаций и стандартов вольфрамово-медного прутка
  - 10.1.3 Оценка надежности поставщика
  - 10.1.4 Индивидуальные требования
  - 10.1.5 Баланс стоимости и производительности
  - 10.1.6 Рекомендации по процессу покупки
- 10.2 Меры предосторожности при хранении и транспортировке
  - 10.2.1 Среда хранения
  - 10.2.2 Требования к упаковке
  - 10.2.3 Меры предосторожности при транспортировке
  - 10.2.4 Хранение и транспортировка в особых сценариях
- 10.3 Техническое обслуживание и уход во время использования
  - 10.3.1 Техническое обслуживание во время обработки
  - 10.3.2 Техническое обслуживание во время эксплуатации
  - 10.3.3 Хранение и повторное использование
  - 10.3.4 Записи о техническом обслуживании
- 10.4 Распространенные проблемы и решения
  - 10.4.1 Поверхностное окисление
  - 10.4.2 Дуговая эрозия
  - 10.4.3 Обработка трещин
  - 10.4.4 Снижение проводимости
  - 10.4.5 Несоответствие теплового расширения
  - 10.4.6 Деформация при хранении
  - 10.4.7 Анализ случая

## **Глава 11. Рынок и тенденции развития вольфрамово-медного прутка**

- 11.1 Обзор глобальной цепочки производства вольфрамово-медных материалов
- 11.2 Структура рыночного спроса и анализ доли применения
- 11.3 Тенденции будущего развития вольфрамово-медного прутка
  - 11.3.1 Высокая производительность и нанотехнологии

### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

11.3.2 Зеленая подготовка и устойчивое развитие

11.3.3 Новые направления применения

**Приложение**

А. Глоссарий

Б. Ссылки



## Глава 1. Обзор вольфрамово-медного прутка

### 1.1 Определение и основные понятия вольфрамово-медного прутка

Вольфрамово-медный пруток — это композиционный материал на основе металла, состоящий из вольфрама (W) и меди (Cu), обычно с вольфрамом в качестве матрицы и медью в качестве вторичного компонента, производимый посредством определенного процесса. Содержание меди в вольфрамово-медном прутке обычно составляет от 10% до 50%, с конкретным соотношением, определяемым требованиями к применению. Этот материал сочетает в себе высокую температуру плавления, высокую твердость, высокую плотность и износостойкость вольфрама с превосходной электро- и теплопроводностью меди, что приводит к уникальным физическим и химическим свойствам. Из-за значительной разницы в температурах плавления вольфрама и меди (температура плавления вольфрама составляет приблизительно 3410 °C, а температура плавления меди — приблизительно 1083 °C) и несмешиваемости этих двух металлов, вольфрамово-медный пруток невозможно получить традиционными методами литья. Вместо этого обычно используется технология порошковой металлургии, включающая смешивание, прессование, спекание и инфильтрацию меди.

#### **Основные свойства вольфрамово-медного прутка включают в себя:**

**Высокая электро- и теплопроводность:** Высокая электро- и теплопроводность меди придает вольфрамовым медным пруткам отличную электро- и теплопроводность, что позволяет широко использовать их в электротехнике и электронике.

**Высокая термостойкость:** Высокая температура плавления и жаропрочность вольфрама позволяют вольфрамово-медным пруткам сохранять структурную стабильность в условиях экстремально высоких температур. Особенно при температуре выше 3000 °C медь плавится и испаряется, поглощая большое количество тепла и снижая температуру поверхности материала. Поэтому вольфрамово-медные прутки также называют «материалами, выпотевающими металл».

**Низкий коэффициент теплового расширения:** Благодаря низкому коэффициенту теплового расширения вольфрама медный пруток имеет хорошую размерную стабильность в условиях высоких температур.

**Высокая твердость и износостойкость:** Высокая твердость и износостойкость вольфрама придают пруткам из вольфрамовой меди превосходные механические свойства, что делает их пригодными для изготовления износостойких деталей и форм.

**Хорошие характеристики гашения дуги:** вольфрамовый медный стержень хорошо работает в условиях высоковольтной дуги и подходит для использования в качестве материала электрических контактов и электрода.

Типичные процессы производства прутков из вольфрамовой меди включают порошковую металлургию, горячее изостатическое прессование и инфильтрацию. Порошковая металлургия включает смешивание высокочистого вольфрамового и высокочистого медного порошков в определенном соотношении с последующим изостатическим прессованием, высокотемпературным спеканием и инфильтрацией медью. Этот метод обеспечивает однородность внутренней структуры материала, оптимизируя его электрические,

термические и механические свойства.

## **1.2 История развития и технологическая эволюция композиционных материалов вольфрам-медь**

Разработка композиционных материалов на основе вольфрама и меди началась в начале XX века. По мере роста спроса на высокоэффективные материалы в промышленности, сплавы вольфрама и меди постепенно привлекали внимание. Ниже приведены основные этапы истории их развития и технологического развития:

### **1.2.1 Ранние исследования (с начала 20 века до 1950-х годов)**

Разработка композитов на основе вольфрама и меди обусловлена потребностью в высокоэффективных материалах для электрических контактов. В начале XX века бурное развитие электротехнической и электронной промышленности предъявляло повышенные требования к материалам с высокой проводимостью и термостойкостью. Поскольку один металл не мог одновременно отвечать этим требованиям, учёные начали изучать композиты на основе вольфрама и меди. Первые материалы на основе вольфрама и меди изготавливались преимущественно путём механического смешивания порошков вольфрама и меди с последующим прессованием и спеканием. Однако из-за технологических ограничений однородность и стабильность характеристик материала были низкими.

### **1.2.2 Зрелость технологии порошковой металлургии (1950–1980-е годы)**

В середине XX века достижения в области порошковой металлургии обеспечили техническую поддержку для разработки композитов вольфрам-медь. Исследователи оптимизировали соотношение смешивания порошков вольфрама и меди, размер частиц и процесс спекания, что значительно улучшило электропроводность и механические свойства материала. Внедрение инфильтрации медью дополнительно повысило плотность и однородность композитов вольфрам-медь. В этот период материалы на основе вольфрам-медь начали использоваться в электрических контактах, электродах для контактной сварки и компонентах аэрокосмической техники.

### **1.2.3 Внедрение новых технологий (1980–2000-е годы)**

С развитием материаловедения в производстве композитов вольфрам-медь были внедрены новые методы подготовки, такие как горячее изостатическое прессование, плазменное и лазерное спекание. Эти технологии значительно повысили плотность и стабильность характеристик материалов. Например, горячее изостатическое прессование, осуществляемое путем прессования порошка вольфрам-медь под высоким давлением и температурой, позволяет получать высокоплотные вольфрам-медные прутки, подходящие для высокоточной электронной упаковки и применения в аэрокосмической промышленности. Более того, применение нанотехнологий позволило дополнительно уменьшить размер частиц порошков вольфрама и меди, улучшив микроструктуру и свойства материала.

### **1.2.4 Современные технологии и разнообразные приложения (с 2000-х годов по настоящее время)**

#### [Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

С XXI века исследования и применение композитов вольфрам-медь вступили в новую фазу. С развитием передовых производственных технологий (таких как аддитивное производство и микро-нанопроизводство) эксплуатационные характеристики вольфрам-медных прутков были дополнительно оптимизированы, а области их применения стали более обширными. Например, внедрение технологии 3D-печати позволило производить компоненты сложной формы из композитов вольфрам-медь для удовлетворения специальных потребностей аэрокосмической и атомной промышленности. Кроме того, исследователи разработали системы сплавов с различным соотношением вольфрама и меди для различных сценариев применения. Например, высокое содержание вольфрама (70%-90%) используется для приложений, требующих высокой твердости и износостойкости, в то время как низкое содержание вольфрама (50%-70%) используется для приложений, требующих более высокой электропроводности.

### 1.2.5 Тенденции будущего развития

В дальнейшем развитие композиционных материалов на основе вольфрама и меди будет сосредоточено на следующих аспектах:

Экологичное производство: разработка энергосберегающих и экологически чистых процессов подготовки, таких как технология холодного напыления и технология зеленой порошковой металлургии.

Оптимизация производительности: путем легирования редкоземельными элементами или другими микроэлементами механические свойства и электротермические свойства материалов на основе вольфрамовой меди могут быть дополнительно улучшены.

Интеллектуальное применение: в сочетании с интеллектуальными производственными технологиями мы разрабатываем композиционные материалы на основе вольфрама и меди с адаптивными свойствами, отвечающие потребностям электронных устройств и энергетического оборудования следующего поколения.

## 1.3 Статус и роль вольфрамово-медного прутка в системе материалов

В современной системе материаловедения вольфрамовая медь, как высокоэффективный композиционный материал, занимает важное место. Уникальное сочетание свойств делает её незаменимой во многих высокотехнологичных областях. Её основные функции включают:

### 1.3.1 Электротехника и электроника

Вольфрамово-медные прутки, благодаря своей превосходной электропроводности и износостойкости, широко используются в производстве электроконтактных материалов, электродов для контактной сварки и корпусных материалов для электронных приборов. Например, в высоковольтных распределительных устройствах вольфрамово-медные прутки служат в качестве электрических контактов, способных выдерживать высокое напряжение и дуговые разряды, обеспечивая стабильность и долговечность оборудования. В области корпусных электронных приборов низкий коэффициент теплового расширения и высокая теплопроводность делают вольфрамово-медные прутки идеальным материалом для теплоотводящих подложек в полупроводниковых приборах.

### 1.3.2 Аэрокосмическая и оборонная промышленность

Высокотемпературная прочность и износостойкость вольфрамowo-медных прутков делают их важными компонентами в аэрокосмической промышленности. Например, в авиационных двигателях и космических аппаратах вольфрамowo-медные прутки используются для изготовления высокотемпературных теплопроводящих компонентов и износостойких деталей, способных сохранять стабильные эксплуатационные характеристики в экстремальных условиях. Кроме того, высокая плотность вольфрамowo-медных прутков позволяет использовать их для изготовления сердечников бронебойных снарядов и противовесов в оборонной промышленности.

### 1.3.3 Механическая обработка и изготовление пресс-форм

Износостойкость и теплопроводность вольфрамowo-медного прутка делают его идеальным материалом для изготовления режущего инструмента, штампов и форм для литья под давлением. Например, в формах для литья под давлением из алюминиевых сплавов вольфрамowo-медный пруток используется в качестве сердечника и сопла, что позволяет значительно продлить срок службы формы и улучшить качество продукции.

### 1.3.4 Атомная промышленность и энергетика

В термоядерных реакторах вольфрамowo-медные стержни используются в качестве диверторных теплоотводов, способных выдерживать тепловые нагрузки и бомбардировку частицами в условиях высоких температур и давления. Кроме того, вольфрамowo-медные стержни используются для изготовления тепловых труб и компонентов теплоотвода, повышая эффективность и срок службы оборудования ядерной энергетики и высокотемпературных промышленных печей.

### 1.3.5 Другие области

Вольфрамовая медь в прутках также широко используется в производстве фрикционных материалов (например, тормозных колодок), химического оборудования (например, коррозионно-стойких теплопроводящих компонентов) и медицинского оборудования (например, компонентов радиационной защиты). Универсальность и высокие эксплуатационные характеристики делают её незаменимой в системе материалов.

## 1.4 Состояние исследований и применения вольфрамowo-медных материалов в стране и за рубежом

### 1.4.1 Текущее состояние отечественных исследований и разработок

Китай является страной с самыми богатыми в мире запасами вольфрама и обладает значительными преимуществами в исследовании и производстве вольфрамowo-медных материалов. В последние годы китайские научно-исследовательские институты и предприятия добились значительного прогресса в области композиционных материалов на основе вольфрама и меди:

Прогресс исследований: Китайские университеты и научно-исследовательские институты (такие как Университет Цинхуа, Центральный южный университет и Институт исследований

металлов Китайской академии наук) провели углубленные исследования в области подготовки, оптимизации характеристик и микроструктурного анализа вольфрамово-медных материалов. Например, легирование редкоземельными элементами (лантаном и церием) улучшило механические свойства и стойкость к окислению вольфрамово-медных материалов. Кроме того, новые методы подготовки (такие как плазменное и микроволновое спекание) значительно повысили плотность и однородность характеристик вольфрамово-медных прутков.

Применение: В Китае вольфрамово-медные прутки широко используются в электроэнергетике, электронике, аэрокосмической промышленности и машиностроении. Например, высокопроизводительные вольфрамово-медные прутки используются в производстве электроконтактных материалов, электродов для контактной сварки и подложек для электронных корпусов. В Китае также разработаны различные марки вольфрамово-медных сплавов (такие как WCu10, WCu20 и WCu30) для удовлетворения различных потребностей.

Промышленные преимущества: Китай имеет полную цепочку вольфрамовой промышленности, от добычи вольфрамовой руды до производства вольфрамово-медных прутков, что формирует сильную промышленную конкурентоспособность.

#### 1.4.2 Текущее состояние исследований и их применения за рубежом

Зарубежные страны одними из первых приступили к исследованию и применению вольфрамово-медных материалов, особенно в Европе, Америке и Японии, где соответствующие технологии достаточно развиты:

Прогресс исследований: США, Япония и Германия лидируют в разработке и оптимизации характеристик композиционных материалов на основе вольфрама и меди. Например, компания СВММ в США разработала высокоэффективные вольфрамово-медные стержни для использования в аэрокосмической и оборонной промышленности. Япония, используя нанотехнологии и прецизионные методы спекания, производит высокоплотные вольфрамово-медные материалы, широко используемые в корпусировании полупроводников. Немецкие исследовательские институты сосредоточены на применении вольфрамово-медных материалов в термоядерном синтезе, разрабатывая композиционные материалы на основе вольфрама и меди, подходящие для диверторных теплоотводов.

Статус применения: За рубежом вольфрамово-медные прутки используются преимущественно в высокоточных электронных устройствах, компонентах аэрокосмической и атомной промышленности. Например, в США вольфрамово-медные прутки используются для производства спутниковых радиаторов и компонентов ракет, а японские вольфрамово-медные материалы используются в высокотехнологичной электронной упаковке и электродах для контактной сварки. В Европе вольфрамово-медные прутки широко используются в качестве теплоотводов в исследованиях в области термоядерного синтеза, например, в проекте ИТЭР.

Технические характеристики: Иностранные компании уделяют всё больше внимания производству высокоточных и сложных по форме деталей при изготовлении вольфрамово-медных материалов. Например, применение аддитивных технологий позволяет зарубежным компаниям производить детали из вольфрамово-медных сплавов сложной геометрии. Кроме того, зарубежные компании обладают преимуществами в технологиях обработки поверхности (таких как золочение и никелирование), которые повышают коррозионную стойкость и электропроводность прутков из вольфрамово-медной стали.

#### 1.4.3 Внутренний и международный разрыв и перспективы на будущее

Несмотря на то, что Китай лидирует по масштабам производства и ресурсным преимуществам вольфрамово-медных материалов, между ним и зарубежными странами сохраняется определённый разрыв в высокоточных процессах подготовки, производстве сложных компонентов и высокотехнологичных приложениях. Например, зарубежные страны добились больших успехов в исследованиях и разработках наноразмерных вольфрамово-медных материалов и технологий аддитивного производства. В будущем Китаю необходимо усилить исследования в следующих областях:

Передовые производственные технологии: разработка высокоточных технологий изготовления компонентов сложной формы из вольфрамовой меди, таких как 3D-печать и лазерное спекание.

Оптимизация производительности: электропроводность, теплопроводность и механические свойства материалов на основе вольфрамовой меди дополнительно улучшены за счет легирования и новых процессов.

Международное сотрудничество: Укреплять сотрудничество с международными научно-исследовательскими институтами и предприятиями, изучать передовые зарубежные технологии и содействовать применению материалов на основе вольфрамовой меди на мировом рынке.



#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## CTIA GROUP LTD Tungsten Copper Rod Introduction

### 1. Overview of Tungsten Copper Rod

Tungsten copper rod is composite materials produced by infiltrating high-purity tungsten powder with copper through a vacuum infiltration process. It possesses a unique microstructure that combines the high strength and high melting point of tungsten with the excellent electrical and thermal conductivity of copper. This results in a high-performance material with outstanding thermal stability, wear resistance, and electrical conductivity.

### 2. Characteristics of Tungsten Copper Rod

**High Thermal Conductivity:** The excellent thermal conductivity of copper ensures rapid heat dissipation, making it suitable for high-power devices and laser systems.

**High Strength and High-Temperature Resistance:** The stable mechanical properties of tungsten allow the material to remain reliable under extreme high-temperature conditions.

**Resistance to Arc Erosion:** The tungsten-copper composite structure provides exceptional resistance to arc erosion in electrical applications, significantly extending electrode service life.

**Low Thermal Expansion Coefficient:** Effectively reduces thermal stress and improves structural stability.

**Excellent Machinability:** Can be precisely fabricated into electrodes, heat sinks, or complex parts to meet diversified application requirements.

### 3. Performance Parameters of Tungsten Copper Rod

Product Name	Chemical Composition (%)		Physical and Mechanical Properties			
	Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (mΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
W50Cu	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
W60Cu	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
W70Cu	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
W80Cu	0.5	Balance	15.15	220	5	980
W90Cu	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

### 4. Advantages of Tungsten Copper Rod

**High-Performance Combination:** A balanced integration of strength, electrical conductivity, thermal conductivity, and high-temperature resistance.

**Customized Solutions:** Tungsten-to-copper ratio and dimensions can be tailored to meet specific customer requirements.

**Long Service Life and Stability:** Significantly reduces maintenance and replacement costs.

### 5. Procurement Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

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

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## Глава 2. Основные типы и классификации вольфрамово-медного прутка

Вольфрамово-медные прутки, являясь высокоэффективным композитным материалом, выпускаются в различных типах и классификациях, в первую очередь, в зависимости от соотношения вольфрама и меди и областей применения. Характеристики вольфрамово-медных прутков варьируются в зависимости от соотношения вольфрама и меди. Прутки с различным соотношением разработаны для конкретных промышленных применений, чтобы соответствовать различным требованиям к электропроводности, теплопроводности, механической прочности и стойкости к высоким температурам. Кроме того, в зависимости от области применения, вольфрамово-медные прутки подразделяются на такие категории, как электротехника и электроника, теплоотвод и терморегулирование, военная и аэрокосмическая промышленность, машиностроение и производство пресс-форм, а также медицина и научные исследования. Далее будет подробно рассмотрена классификация вольфрамово-медных прутков и их конкретные применения в различных областях.

### 2.1 Классификация по соотношению вольфрама и меди

Характеристики вольфрамово-медных прутков тесно связаны с соотношением содержания вольфрама и меди. Прутки с разным соотношением демонстрируют существенные различия в электропроводности, теплопроводности, твёрдости, износостойкости и термостойкости. Ниже представлена классификация распространённых соотношений вольфрама и меди, их характеристики и области применения.

#### 2.1.1 Вольфрамово-медный пруток W-Cu 50/50 (сбалансированная электро- и теплопроводность)

Вольфрамово-медные прутки W-Cu 50/50 содержат 50% вольфрама и 50% меди, что обеспечивает типичный баланс электро- и теплопроводности. Благодаря высокому содержанию меди этот тип вольфрамово-медных прутков обладает превосходной электропроводностью (примерно 50-60% от чистой меди) и теплопроводностью (примерно 200-250 Вт/ м·К ), сохраняя при этом определённую механическую прочность и износостойкость. Его основные характеристики:

**Высокая проводимость:** подходит для ситуаций, требующих быстрой передачи электрического сигнала.

**Отличная теплопроводность:** может эффективно рассеивать тепло и подходит для устройств терморегулирования.

**Умеренная механическая прочность:** по сравнению с материалами с высоким содержанием вольфрама его твердость и износостойкость несколько ниже, но его производительность обработки выше.

**Применение:** Вольфрамовая медная катанка W-Cu 50/50 широко используется в электронных корпусных материалах, соединителях и низковольтных электрических контактах. Например, в токопроводящих подложках и соединителях интегральных схем этот материал обеспечивает стабильную передачу электрического сигнала и превосходное теплоотведение.

#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Он также используется для изготовления электродов для контактной сварки и маломощных дуговых контактов.

Характеристики изготовления: Этот тип вольфрамово-медного прутка обычно производится методом порошковой металлургии, используя смесь высокочистого вольфрамового и медного порошков с последующим прессованием и спеканием. Некоторые процессы могут включать этап инфильтрации меди для повышения плотности материала. Благодаря высокому содержанию меди температура спекания относительно низкая (примерно 1200–1300 °C), что обеспечивает низкую стоимость процесса.

### **2.1.2 Вольфрамово-медный пруток W-Cu 70/30 (обычно используется для электродов и контактов)**

Вольфрамово-медный пруток W-Cu 70/30 содержит 70% вольфрама и 30% меди, что является одним из наиболее распространённых соотношений вольфрама и меди в электротехнике и электронике. Этот материал обеспечивает хороший баланс электропроводности, теплопроводности и механической прочности, что делает его пригодным для использования в качестве электродов и электроконтактных материалов. Его основные характеристики включают:

Более высокая твердость и износостойкость: повышенное содержание вольфрама делает его более устойчивым к механическому износу.

Умеренная проводимость: электропроводность составляет приблизительно 30–40 % от электропроводности чистой меди, что делает ее пригодной для использования в электротехнических системах среднего и высокого напряжения.

Хорошие характеристики гашения дуги: высокая противоабляционная способность в условиях дуги.

Применение: Вольфрамовая медная катанка W-Cu 70/30 является предпочтительным материалом для изготовления контактов высоковольтных выключателей, электродов для контактной сварки и электродов для электроэрозионной обработки (ЭЭО). Например, в выключателях среднего и высокого напряжения этот материал выдерживает частые дуговые разряды и механические нагрузки, продлевая срок службы оборудования. Он также используется для изготовления электродов для точечной сварки в автомобильной промышленности и электрических разъёмов в авиационной отрасли.

Характеристики изготовления: Этот тип вольфрамово-медного прутка обычно производится методом порошковой металлургии в сочетании с инфильтрацией меди. Из-за высокого содержания вольфрама процесс спекания требует более высоких температур (около 1300–1500 °C) и более строгого контроля процесса для обеспечения однородности и плотности материала.

### **2.1.3 Вольфрамово-медный пруток W-Cu 75/25 (сочетание средней теплопроводности и прочности)**

Вольфрам-медный пруток W-Cu 75/25 содержит 75% вольфрама и 25% меди, что обеспечивает наилучший баланс теплопроводности и механической прочности. Этот материал подходит для применений, требующих как высокой прочности, так и определённой теплопроводности. Его основные характеристики включают:

Более высокая механическая прочность: твердость и износостойкость лучше, чем у W-Cu 70/30, подходит для условий высоких нагрузок.

Умеренная теплопроводность: теплопроводность составляет приблизительно 150–200 Вт/м·К, что подходит для систем терморегулирования средней мощности.

Низкий коэффициент теплового расширения: высокое содержание вольфрама обеспечивает хорошую размерную стабильность при высоких температурах.

Применение: Вольфрамовая медь W-Cu 75/25 широко используется для изготовления теплоотводящих подложек и электрических контактных материалов для электронных устройств средней мощности. Например, в силовых полупроводниковых приборах, таких как модули IGBT, этот материал выполняет функцию теплоотводящей подложки, эффективно рассеивая тепло и сохраняя структурную стабильность. Он также используется для изготовления износостойких компонентов и электрических контактов среднего и высокого напряжения в аэрокосмической промышленности.

Характеристики подготовки: Процесс производства этого материала аналогичен процессу производства W-Cu 70/30, но из-за повышенного содержания вольфрама требуется дальнейшая оптимизация температуры и давления спекания. Некоторые производители используют технологию горячего изостатического прессования (ГИП) для повышения плотности и стабильности эксплуатационных характеристик материала.

#### **2.1.4 Вольфрам-медный пруток W-Cu 80/20 (для высокой прочности и стойкости к абляции)**

Вольфрам-медный пруток W-Cu 80/20 содержит 80% вольфрама и 20% меди, отличается высокой прочностью и устойчивостью к абляции, подходит для работы в условиях высоких нагрузок и температур. Основные характеристики:

Чрезвычайно твердый и износостойкий: высокое содержание вольфрама делает его чрезвычайно устойчивым к механическому износу.

Хорошая стойкость к абляции: хорошо работает в условиях высокотемпературной дуги или плазмы.

Низкая электро- и теплопроводность: электропроводность составляет около 20%-30% чистой меди, а теплопроводность — около 120-150 Вт/м·К.

Применение: Вольфрамовая медная катанка W-Cu 80/20 в основном используется для изготовления высокопрочных электродов, высокотемпературных компонентов аэрокосмической и военной техники. Например, в станках плазменной резки и электроэрозионном оборудовании этот материал используется в качестве электрода,

способного выдерживать интенсивную дуговую эрозию. Он также используется для изготовления сопел ракетных двигателей и высокотемпературных износостойких деталей.

Характеристики подготовки: Из-за высокого содержания вольфрама производственный процесс требует более высоких температур спекания (примерно 1500–1600 °C) и более сложных процессов инфильтрации меди. В некоторых современных процессах используется плазменная или лазерная технология спекания для повышения однородности микроструктуры материала.

#### **2.1.5 Вольфрамово-медный пруток W-Cu 85/15 (высокотемпературный и высокопрочный тип, с учетом электропроводности)**

Вольфрамово-медный пруток W-Cu 85/15 содержит 85% вольфрама и 15% меди. Это высокотемпературный, высокопрочный материал, сохраняющий при этом определённую электропроводность. Его основные характеристики:

Чрезвычайно высокая термостойкость: способность сохранять структурную стабильность в экстремальных условиях, близких к 3000 °C .

Отличная механическая прочность: твердость и износостойкость дополнительно улучшены, подходят для экстремальных условий эксплуатации.

Низкая проводимость: электропроводность составляет около 15–25 % от электропроводности чистой меди, подходит для электротехнических применений, требующих высокой прочности.

Применение: Вольфрамовые стержни из меди марки W-Cu 85/15 широко используются в диверторных тепловодах термоядерных реакторов, компонентах авиакосмических двигателей и высоковольтных дуговых контактах. Например, в проекте Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) этот материал используется в качестве диверторного тепловода, способного выдерживать высокие тепловые нагрузки и бомбардировку частицами. Он также используется для изготовления электродов для высокоэнергетических лазеров и плазменных установок.

Характеристики подготовки: Этот тип материала сложен в изготовлении, обычно для обеспечения высокой плотности и стабильных характеристик используется горячее изостатическое прессование или плазменное спекание. Процесс инфильтрации меди требует точного контроля, чтобы избежать пористости и неравномерных характеристик внутри материала.

#### **2.1.6 Вольфрамово-медный пруток W-Cu 90/10 (сверхвысокая прочность и высокая термостойкость)**

Вольфрамово-медный пруток типа W-Cu 90/10 содержит 90% вольфрама и 10% меди. Этот тип обладает самой высокой прочностью и термостойкостью среди вольфрамово-медных прутков и подходит для экстремальных условий эксплуатации. Его основные характеристики:

Сверхвысокая твердость и износостойкость: механические свойства, близкие к чистому

вольфраму, подходят для экстремальных механических нагрузок.

Чрезвычайно высокая термостойкость: способен работать в течение длительного времени в условиях экстремально высоких температур и плазменных сред.

Крайне низкая электро- и теплопроводность: электропроводность составляет всего 10%-15% чистой меди, а теплопроводность — около 80-120 Вт/м·К.

Применение: Прутки из вольфрамовой меди W-Cu 90/10 используются в основном для изготовления высокотемпературных компонентов, работающих в экстремальных условиях, а также в военной промышленности. Например, в двигательных установках космических аппаратов (например, соплах ракет) этот материал служит высокотемпературной износостойкой футеровкой. Он также используется для изготовления направляющих для электромагнитных пушек и высокотемпературных компонентов термоядерных установок.

Характеристики подготовки: В связи с чрезвычайно высоким содержанием вольфрама, производственный процесс требует чрезвычайно высоких температур спекания (примерно 1600–1700 °C) и высокого давления. Широко используются методы горячего изостатического прессования и плазменного спекания. В некоторых процессах также требуется добавление микродобавок (например, никеля или железа) для улучшения спекаемости.

#### **2.1.7 Прутки из вольфрамовой меди со специальным соотношением (сплав по индивидуальному заказу)**

Помимо стандартных соотношений, упомянутых выше, вольфрамово-медные прутки могут быть изготовлены по индивидуальному заказу в соответствии с требованиями конкретного применения. Например, сплавы W-Cu 60/40, W-Cu 65/35 или сплавы с более высоким содержанием меди могут использоваться в областях, требующих повышенной электропроводности, а сплавы со сверхвысоким содержанием вольфрама (например, W-Cu 95/5) – в условиях экстремальной износостойкости и высоких температур. Разработка сплавов по индивидуальному заказу обычно включает в себя следующие аспекты:

Модификация легированием: добавление редкоземельных элементов (таких как лантан, церий) или переходных металлов (таких как никель, кобальт) для улучшения определенных свойств.

Оптимизация микроструктуры: контролируя размер частиц вольфрамового и медного порошка, оптимизируется однородность и плотность материала.

Специальные процессы: Для производства прутков из вольфрамовой меди сложной формы или с высокими эксплуатационными характеристиками используются технологии аддитивного производства, микроволнового спекания или холодного напыления.

Применение: Изготовленные по индивидуальному заказу сплавы широко используются в передовых научных исследованиях, аэрокосмической промышленности и производстве высокотехнологичных электронных устройств. Например, вольфрамово-медные стержни с заданным соотношением компонентов используются для изготовления мишеней для экспериментального оборудования в области физики высоких энергий и компонентов

радиационной защиты для атомной промышленности.

## 2.2 Классификация по области применения

В зависимости от области применения вольфрамовые прутки из меди можно разделить на пять категорий: электротехника и электроника, теплоотвод и терморегулирование, военная и аэрокосмическая промышленность, машиностроение и производство пресс-форм, а также медицина и научные исследования. Далее будут подробно описаны особенности применения и эксплуатационные характеристики различных типов вольфрамовых прутков из меди.

### 2.2.1 Вольфрамово-медный пруток для электротехнических и электронных применений

Вольфрамовая медь широко используется в электротехнике и электронике. Благодаря превосходной электропроводности, дугогасительной способности и износостойкости она является лучшим выбором для изготовления электрических контактов и электродов.

#### 2.2.1.1 Высоковольтные выключатели и дугогасительные контакты

Для высоковольтных выключателей и автоматических выключателей требуются материалы, способные выдерживать высокие напряжения и дуговые разряды, сохраняя при этом долговременную стабильность. Вольфрамовые стержни W-Cu 70/30 и W-Cu 75/25 широко используются в дуговых контактах благодаря превосходной проводимости и стойкости к абляции. Их основные преимущества включают:

Высокая эффективность гашения дуги: позволяет быстро отключить дугу и снизить обгорание контактов.

Высокая термостойкость: сохранение структурной целостности при высоких температурах дуги.

Длительный срок службы: Высокая твердость и износостойкость продлевают срок службы контактов.

Пример применения: в системах высоковольтной передачи и промышленных выключателях дугогасительные контакты из вольфрамовой меди используются в распределительных устройствах с диапазоном напряжений от 10 кВ до 500 кВ и могут выдерживать тысячи переключений.

#### 2.2.1.2 Разрядный электрод и электрод свечи зажигания

электроэрозионной обработки (ЭЭО) и изготовления свечей зажигания требуются электродные материалы с высокой износостойкостью и эрозионной стойкостью. В качестве электродных материалов широко используются вольфрамово-медные прутки W-Cu 70/30 и W-Cu 80/20. Их преимущества включают:

Высокоточная обработка: равномерная микроструктура прутка из вольфрамовой меди обеспечивает точность обработки.

Стойкость к абляции: остается стабильной в условиях высокочастотных разрядов.

Хорошая электропроводность: обеспечивает эффективность и стабильность процесса

разряда.

Примеры применения: В автомобильной промышленности вольфрамово-медные прутки используются для изготовления высокопроизводительных электродов свечей зажигания; в производстве прецизионных пресс-форм вольфрамово-медные электроды используются для электроискровой обработки металлических деталей сложной формы.

### 2.2.1.3 Корпусирование полупроводников и токопроводящие соединители

В корпусировании полупроводников вольфрамовые медные стержни используются в качестве проводящих подложек и соединителей для передачи электрических сигналов и терморегулирования. Вольфрамовые медные стержни W-Cu 50/50 и W-Cu 75/25 широко используются благодаря высокой проводимости и низкому коэффициенту теплового расширения. Их преимущества включают:

Низкий коэффициент теплового расширения: соответствует кремниевым и керамическим подложкам, снижая термическую нагрузку.

Высокая теплопроводность: эффективно рассеивает тепло и защищает чувствительные электронные компоненты.

Высокая надежность: сохраняет стабильную работу в условиях высоких температур и влажности.

Пример применения: В силовых полупроводниковых приборах (таких как МОП-транзисторы и БТИЗ) вольфрамовые медные стержни используются в качестве проводящих подложек и теплоотводящих пластин, а также широко применяются в новых энергетических транспортных средствах и оборудовании промышленной автоматизации.

### 2.2.2 Вольфрамово-медный стержень для отвода тепла и терморегулирования

Применение вольфрамово-медного прутка в области терморегулирования обусловлено его превосходной теплопроводностью и низким коэффициентом теплового расширения, что подходит для нужд отвода тепла в мощных электронных устройствах и аэрокосмическом оборудовании.

#### 2.2.2.1 Микроэлектроника и радиаторы интегральных схем

Микроэлектроника и интегральные схемы требуют эффективных теплоотводящих материалов для предотвращения перегрева. Вольфрамово-медные стержни W-Cu 75/25 и W-Cu 80/20 широко используются в производстве радиаторов благодаря высокой теплопроводности и соответствию коэффициенту теплового расширения кремниевым подложкам. Их преимущества включают:

Эффективное рассеивание тепла: теплопроводность достигает 150-200 Вт/м·К.

Стабильность размеров: Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает структурную целостность при длительной эксплуатации.

Высокая надежность: обеспечивает стабильную работу при работе на высокой мощности.

#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Пример применения: В модулях CPU/GPU высокопроизводительных компьютеров и серверов радиаторы из вольфрамовой меди используются для отвода тепла и обеспечения стабильной работы чипа при высоких нагрузках.

#### **2.2.2.2 Подложки для рассеивания тепла лазеров и мощных устройств**

Мощным лазерам и радиочастотным устройствам необходим эффективный теплоотвод для поддержания производительности. Вольфрамово-медные стержни W-Cu 70/30 и W-Cu 75/25 являются идеальными материалами для теплоотвода. Их преимущества включают:

Высокая теплопроводность: быстро рассеивает тепло, предотвращая перегрев устройства.

Хорошие механические свойства: способен выдерживать механические нагрузки при работе мощных устройств.

Ровность поверхности: подходит для прецизионной обработки и нанесения покрытий.

Пример применения: в оптических коммуникационных лазерах и радиолокационных системах радиаторы из вольфрамовой меди используются для поддержки мощных лазерных диодов и радиочастотных усилителей.

#### **2.2.2.3 Компоненты охлаждения аэрокосмической техники**

Авиационно-космическое оборудование требует эффективного теплоотвода в экстремальных условиях. Вольфрамово-медные прутки W-Cu 80/20 и W-Cu 85/15 используются в компонентах теплоотвода благодаря своей высокой прочности и термостойкости. Их преимущества включают:

Высокая термостойкость: способность сохранять работоспособность в условиях высоких температур.

Высокая плотность: обеспечивает достаточную механическую прочность и баланс массы.

Устойчивость к тепловому удару: сохраняет стабильность при резких перепадах температур.

Примеры применения: в системах терморегулирования спутников и авиационных двигателях компоненты рассеивания тепла из вольфрамовой меди используются для управления потоком высокотемпературного воздуха и тепловой нагрузкой электронных устройств.

### **2.2.3 Вольфрамово-медные прутки для военного и аэрокосмического применения**

Применение прутков из вольфрамовой меди в военной и аэрокосмической областях обусловлено их высокой плотностью, прочностью и устойчивостью к высоким температурам, что делает их пригодными для изготовления высокопроизводительного оружия и аэрокосмических компонентов.

#### **2.2.3.1 Электромагнитное оружие и материалы защитной брони**

Для электромагнитного оружия и защитной брони требуются материалы с высокой плотностью и износостойкостью. Вольфрамово-медный прутки W-Cu 90/10 используется для изготовления направляющих рельсов и элементов брони благодаря своей высокой прочности

и плотности. Его преимущества включают:

**Высокая плотность:** обеспечивает достаточную кинетическую энергию и стабильность качества.

**Износостойкость:** сохраняет эксплуатационные характеристики при высокоскоростном трении и ударах.

**Высокая термостойкость:** выдерживает кратковременное воздействие высокой температуры во время стрельбы из электромагнитной пушки.

**Примеры применения:** в системах электромагнитного оружия рельсы из вольфрамовой меди используются для выдерживания трения и дугового удара высокоскоростных снарядов; в броневых материалах стержни из вольфрамовой меди используются для повышения защитных характеристик.

### **2.2.3.2 Электроды и компоненты для высокоэнергетического оружия**

Для высокоэнергетического оружия, такого как лазеры и плазменное оружие, требуются электродные материалы, устойчивые к высоким температурам и абляции. Вольфрамово-медные стержни W-Cu 80/20 и W-Cu 85/15 являются идеальным выбором, обеспечивая следующие преимущества:

**Стойкость к абляции:** сохраняет структурную целостность при высокоэнергетическом разряде.

**Высокая проводимость:** обеспечивает эффективную передачу электроэнергии.

**Длительный срок службы:** сокращение частоты замены и повышение надежности оружия.

**Примеры применения:** в высокоэнергетическом лазерном оружии вольфрамово-медные электроды используются для поддержки разряда большой мощности; в плазменном оружии компоненты из вольфрамово-медного сплава используются для выдерживания воздействия высокотемпературной плазмы.

### **2.2.3.3 Компоненты сопла ракеты и двигательной установки**

Сопла ракет и двигательные установки должны работать в условиях высоких температур и давления. Вольфрамово-медные прутки марок W-Cu 85/15 и W-Cu 90/10 используются для изготовления вкладышей сопел и компонентов двигательных установок благодаря своей высокой термостойкости и прочности. Их преимущества включают:

**Чрезвычайно высокая термостойкость:** выдерживает высокие температуры камер сгорания ракет (>3000 °C).

**Устойчивость к тепловому удару:** сохраняет стабильность при резких перепадах температур.

**Высокая плотность:** обеспечивает структурную прочность и баланс массы.

**Пример применения:** В твердотопливных ракетных двигателях и жидкостных ракетных двигательных установках прутки из вольфрамовой меди используются для изготовления

вкладышей сопловых каналов и высокотемпературных направляющих элементов.

## 2.2.4 Прутки вольфрамово-медные для машиностроения и производства пресс-форм

Вольфрамовые прутки из меди используются в машиностроении и производстве пресс-форм благодаря высокой твердости, износостойкости, превосходной теплопроводности и стойкости к абляции, что делает их идеальным материалом для изготовления высокоточных инструментов и пресс-форм. В частности, в таких областях, как электроэрозионная обработка (ЭЭО) и штамповка, вольфрамовые прутки из меди демонстрируют уникальные преимущества, значительно повышая эффективность обработки и срок службы пресс-форм.

### 2.2.4.1 Электрод для электроэрозионной обработки (ЭЭО)

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) — это технология прецизионной обработки, при которой материал удаляется посредством электрического искрового разряда. Она широко применяется в производстве пресс-форм, обработке деталей для аэрокосмической промышленности и металлообработке сложной геометрии. Для обеспечения точности обработки и срока службы электродов для ЭЭО требуются материалы с высокой износостойкостью, стойкостью к абляции и хорошей электропроводностью. Вольфрамово-медные прутки W-Cu 70/30 и W-Cu 80/20 являются предпочтительным материалом для электродов для ЭЭО. Их основные преимущества:

**Высокая износостойкость:** Высокая твердость вольфрама позволяет электроду противостоять износу при высокочастотном разряде и продлевает срок его службы.

**Превосходная стойкость к абляции:** под воздействием мгновенной высокой температуры (до 6000 °C), создаваемой электрическим искровым разрядом, вольфрамовый медный стержень может сохранять свою структурную целостность и снижать потери электрода.

**Хорошая проводимость:** добавление меди обеспечивает электроду достаточную проводимость (проводимость составляет около 20–40 % от чистой меди), что способствует эффективной электроэрозионной обработке.

**Высокая точность обработки:** равномерная микроструктура и низкий коэффициент теплового расширения стержня из вольфрамовой меди гарантируют сохранение размерной стабильности электрода в процессе обработки, что способствует достижению высокой точности обработки.

**Простота обработки:** по сравнению с чистым вольфрамом, вольфрамовый медный пруток лучше поддается обработке, что удобно для изготовления электродов сложной формы.

**Примеры применения:** В производстве прецизионных пресс-форм вольфрамово-медные прутки W-Cu 70/30 широко используются для обработки сложных стальных пресс-форм, таких как пресс-формы для автомобильных деталей и корпусов электронных устройств. В аэрокосмической отрасли вольфрамово-медные электроды используются для обработки деталей из титановых сплавов и жаропрочных сплавов, обеспечивая высокую точность и качество поверхности. Кроме того, при обработке микродеталей вольфрамово-медные электроды позволяют достичь микронной точности обработки, что соответствует требованиям к производству МЭМС (микроэлектромеханических систем) и прецизионных

приборов.

Производственные характеристики: Вольфрамово-медные электроды для электроэрозионной обработки обычно изготавливаются методом порошковой металлургии путем смешивания высокочистых вольфрамовых и медных порошков перед прессованием и спеканием. Для повышения плотности электрода и однородности его характеристик некоторые процессы включают инфильтрацию медью или горячее изостатическое прессование (ГИП). Поверхность электрода обычно требует прецизионной обработки (например, шлифования или полирования) для соответствия требованиям к точности обработки.

Тенденции развития: По мере развития электроэрозионной обработки в области микро- и нанообработки процесс изготовления вольфрамово-медных электродов постоянно совершенствуется. Например, использование наноразмерных вольфрамовых и медных порошков может дополнительно улучшить микроструктурную однородность электродов и уменьшить количество мелких дефектов при разряде. Кроме того, для повышения стойкости к окислению и электропроводности электродов используются методы модификации поверхности (например, никелирование или золочение), что дополнительно увеличивает срок их службы.

#### 2.2.4.2 Штампы и износостойкие детали

В производстве штампов и износостойких деталей вольфрамово-медные прутки широко используются благодаря высокой твердости, износостойкости и отличной теплопроводности. Штампы и износостойкие детали часто требуют работы в условиях высоких нагрузок, частых ударов и высоких температур. Вольфрамово-медные прутки эффективно отвечают этим строгим требованиям. В этой области широко используются вольфрамово-медные прутки марок W-Cu 75/25 и W-Cu 80/20. Их основные преимущества:

**Высокая твердость и износостойкость:** Высокая твердость вольфрама (близкая к твердости чистого вольфрама по шкале Мооса (уровень 9)) позволяет прутку из вольфрамовой меди противостоять механическому износу в процессе штамповки и продлевает срок службы формы.

**Отличная теплопроводность:** добавление меди придает вольфрамовому медному пруту более высокую теплопроводность (около 150-200 Вт/м·К), что позволяет быстро рассеивать тепло и предотвращать деформацию или разрушение формы из-за перегрева.

**Низкий коэффициент теплового расширения:** низкие характеристики теплового расширения вольфрама (приблизительно  $4,5-5,5 \times 10^{-6} / \text{K}$ ) обеспечивают размерную стабильность формы при высоких температурах и подходят для высокоточной штамповки.

**Усталостная прочность:** вольфрамовые медные стержни способны сохранять структурную целостность при частых ударах, снижая риск образования трещин и усталостного разрушения.

**Примеры применения:** В автомобильной промышленности прутки из вольфрамовой меди используются для изготовления штампов для производства кузовных панелей, деталей

двигателей и трансмиссий. В литевых формах для алюминиевых и магниевых сплавов прутки из вольфрамовой меди используются в качестве стержней и сопел, выдерживая удары и коррозию, вызванные высокотемпературным расплавленным металлом. Кроме того, при штамповке прецизионных деталей и электронных разъёмов штампы из вольфрамовой меди пользуются популярностью благодаря высокой износостойкости и долговечности.

Производственные характеристики: Вольфрамовые медные прутки для штампов обычно производятся методом порошковой металлургии в сочетании с инфильтрацией меди, что обеспечивает высокую плотность материала и стабильные эксплуатационные характеристики. Для соответствия требованиям к сложной форме пресс-формы в некоторых процессах применяется обработка на станках с ЧПУ или лазерная резка для точной доводки вольфрамовых медных прутков. Кроме того, поверхностная закалка (например, цементация или азотирование) может дополнительно повысить износостойкость и коррозионную стойкость пресс-формы.

Тенденции развития: В будущем вольфрамово-медные прутки для штампов будут совершенствоваться в сторону повышения производительности и создания более сложных форм. Например, применение технологии аддитивного производства (3D-печати) позволяет создавать сложные внутренние охлаждающие каналы в вольфрамово-медных штампах, повышая эффективность теплоотвода. Кроме того, легирование микроэлементами (такими как никель или редкоземельные элементы) может дополнительно оптимизировать усталостную и износостойкость вольфрамово-медных прутков, отвечая требованиям высокопрочной штамповки.

## 2.2.5 Вольфрамово-медные стержни для медицинских и научных исследований

Вольфрамовые медные прутки используются в медицинских и научных исследованиях благодаря высокой плотности, термостойкости и биосовместимости. Они особенно подходят для изготовления медицинских электродов, специализированных зондов и компонентов для экспериментов в области физики высоких энергий. Вольфрамовые медные прутки W-Cu 80/20 и W-Cu 85/15 широко используются в этой области, отвечая требованиям высокой точности и экстремальных условий.

### 2.2.5.1 Медицинские электроды и специальные зонды

В медицине вольфрамовые медные прутки используются для изготовления высокоточных электродов и зондов, которые широко применяются для стимуляции нервов, радиочастотной абляции и малоинвазивных хирургических устройств. Для этих целей требуются материалы с высокой проводимостью, коррозионной стойкостью и биосовместимостью. Вольфрамовые медные прутки W-Cu 70/30 и W-Cu 80/20 широко используются благодаря своим превосходным эксплуатационным характеристикам. Их основные преимущества включают:

**Высокая проводимость:** обеспечивает точную передачу электрических сигналов, подходит для стимуляции нервов и электрофизиологического мониторинга.

**Коррозионная стойкость:** сохраняет стабильность в физиологических средах (таких как кровь

или тканевая жидкость) и снижает деградацию материала.

Высокая твердость и износостойкость: обеспечивает длительное использование зонда при высокоточных операциях.

Биосовместимость: После соответствующей обработки поверхности (например, золочения или серебрения) стержень из вольфрамовой меди может соответствовать требованиям биосовместимости медицинских изделий.

Примеры применения: В устройствах для нейростимуляции вольфрамово-медные электроды используются для глубокой стимуляции мозга (ГСМ) при лечении болезни Паркинсона и эпилепсии, обеспечивая точную доставку электрических импульсов. В процедурах радиочастотной абляции вольфрамово-медные зонды используются для лечения поражений сердца и опухолей, сохраняя стабильность при высоких температурах и высокочастотных электрических полях. Кроме того, в малоинвазивной хирургии вольфрамово-медные стержни используются для изготовления миниатюрных зондов для эндоскопических исследований и взятия образцов тканей.

Характеристики изготовления: Медицинские вольфрамово-медные стержни обычно производятся из высокочистых вольфрамовых и медных порошков методом порошковой металлургии и горячего изостатического прессования, что обеспечивает высокую плотность и непористую структуру. Обработка поверхности (например, гальванопокрытие или химическая пассивация) является ключевым этапом повышения биосовместимости и коррозионной стойкости материала. Кроме того, технологии микро- и нанопроизводства используются для производства микроэлектродов и зондов, отвечающих требованиям высокоточных медицинских устройств.

Тенденции развития: С развитием малоинвазивных медицинских технологий вольфрамово-медные электроды и зонды будут уменьшаться в размерах и приобретать более высокую точность. Например, разработка наноразмерных вольфрамово-медных композитов может дополнительно улучшить проводимость и механические свойства электродов. Кроме того, в сочетании с технологиями интеллектуальных материалов будущие вольфрамово-медные зонды могут включать в себя сенсорные функции для мониторинга физиологических сигналов в режиме реального времени.

#### **2.2.5.2 Эксперименты в области физики высоких энергий и применение в атомной промышленности**

Вольфрамовые стержни из меди широко используются в экспериментах по физике высоких энергий и в атомной промышленности благодаря высокой плотности, высокой термостойкости и радиационной стойкости. Вольфрамовые стержни из меди W-Cu 85/15 и W-Cu 90/10 являются предпочтительными материалами в этой области, способными выдерживать высокие температуры, высокое давление и интенсивную бомбардировку частицами в экстремальных условиях. Их основные преимущества включают:

Высокая плотность: Высокая плотность вольфрама (около 19,25 г/см<sup>3</sup>) позволяет стержням

из вольфрамовой меди эффективно экранировать высокоэнергетическое излучение, что делает их пригодными для использования в компонентах ядерных реакторов и ускорителей частиц.

Высокая термостойкость: сохраняет стабильные характеристики при экстремально высоких температурах ( $>3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), возникающих при ядерном синтезе или столкновениях частиц высокой энергии.

Стойкость к радиации: вольфрамовые медные стержни способны противостоять повреждениям от нейтронного облучения и гамма-излучения, продлевая срок службы компонентов.

Отличная теплопроводность: быстро рассеивает тепло, предотвращая выход компонентов из строя из-за высоких температур.

Примеры применения: В проекте Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) вольфрамовые медные стержни W-Cu 85/15 используются в качестве теплоотводов дивертора, способных выдерживать высокие тепловые нагрузки и плазменную бомбардировку. В ускорителях частиц, таких как Большой адронный коллайдер ЦЕРН, вольфрамовые медные стержни используются для изготовления мишеней и компонентов радиационной защиты, защищая оборудование от высокоэнергетических частиц. Кроме того, в атомной энергетике вольфрамовые медные стержни используются в качестве высокотемпературных теплопроводников и материалов радиационной защиты для повышения безопасности и эффективности реакторов.

Характеристики подготовки: Производство вольфрамово-медных прутков для атомной промышленности требует чрезвычайно высокой чистоты и плотности материала. Для устранения микропор и дефектов в материале обычно используются методы горячего изостатического прессования или плазменного спекания. Для повышения радиационной стойкости некоторые процессы включают легирование редкоземельными элементами (например, лантаном или церием) для оптимизации микроструктуры материала. Кроме того, для повышения коррозионной стойкости и стойкости к высоким температурам на поверхность материала наносятся покрытия (например, молибденовые или керамические).

Тенденции развития: В будущем вольфрамово-медные прутки для атомной промышленности будут совершенствоваться в сторону повышения производительности и создания более сложных конструкций. Например, применение технологии аддитивного производства позволяет изготавливать из вольфрамово-медных прутков теплоотводы и экранирующие элементы сложной геометрии, отвечающие требованиям термоядерных реакторов нового поколения. Кроме того, новые технологии легирования и модификации поверхности дополнительно повысят радиационную стойкость и термостойкость вольфрамово-медных прутков, способствуя их применению в экспериментах в области физики высоких энергий и в атомной промышленности.



### Глава 3. Технология получения и производства вольфрамово-медного прутка

Вольфрамово-медный пруток – композитный материал, сочетающий в себе высокую прочность и термостойкость вольфрама с превосходной электро- и теплопроводностью меди. Он играет незаменимую роль в электронных устройствах, электрических контактах, компонентах терморегулирования и аэрокосмической промышленности. Процесс его изготовления – это сложный путь в материаловедении, сочетающий традиционные методы порошковой металлургии с инновационными достижениями современных технологий. От тщательного выбора сырья до прецизионной обработки конечного продукта – каждый этап требует тщательного проектирования для обеспечения однородности материала, плотности и стабильных характеристик. Ключевым моментом является создание пористого вольфрамового каркаса и точная инфильтрация расплавленной меди для получения идеального композита из двух фаз. Традиционные процессы основаны на прессовании, спекании и вакуумной инфильтрации, в то время как новые технологии включают наноматериалы, аддитивное производство и интеллектуальное управление для удовлетворения еще более высоких требований к производительности. В этой главе будет представлено подробное описание каждого этапа – от подготовки сырья до исследования новых процессов. Сосредоточившись на принципах процесса, рабочих деталях, проблемах и стратегиях оптимизации, он избегает перегрузки техническими данными и вместо этого использует яркий язык, чтобы продемонстрировать сложность и очарование процесса подготовки.

#### 3.1 Подготовка сырья

Подготовка сырья – это отправная точка для производства вольфрамово-медных прутков, подобно подготовке инструментов для сложной симфонии. Вольфрамовый порошок и электролитическая медь, являющиеся основным сырьем, проходят тщательный отбор и

обработку, чтобы обеспечить их гармоничное взаимодействие в последующих процессах и образование высокоэффективного композитного материала. Контроль чистоты, размера частиц и морфологии влияет не только на результаты формовки и спекания, но и на термические, электрические и механические свойства конечного продукта.

### 3.1.1 Подготовка и требования к качеству вольфрамового порошка

Получение вольфрамового порошка подобно превращению твёрдой вольфрамовой руды в изящный, художественный материал. Обычно используется водородное восстановление. Это отработанный промышленный метод. Вольфрамовая руда (например, вольфрамит или шеелит) подвергается химической очистке для получения вольфрамов , которые затем обжигаются для получения триоксида вольфрама . Последующий процесс восстановления происходит в высокотемпературной печи, где водород, подобно терпеливому мастеру, постепенно удаляет оксиды, в результате чего получается чистый вольфрамовый порошок. Другие методы, такие как электролиз или механическое легирование, позволяют получать более мелкие частицы, но они более дороги и подходят для специализированных применений.

К качеству вольфрамового порошка предъявляются исключительно высокие требования: он должен обладать исключительно высокой чистотой для минимизации содержания примесей, однородной формой частиц для облегчения упаковки и склеивания, а также строго контролировать содержание кислорода для предотвращения нежелательного образования оксидов при высоких температурах. Высококачественный вольфрамовый порошок служит тщательно отобранной заправкой, закладывая основу для последующих процессов. Добавление микропримесей-активаторов может улучшить сплавление порошка при спекании, однако рекомендуется соблюдать осторожность, чтобы не снизить теплопроводность материала. Вольфрамовый порошок следует хранить в сухом, герметичном помещении, чтобы предотвратить снижение его активности под воздействием влаги и кислорода.

### 3.1.2 Получение и характеристики электролитической меди

Производство электролитической меди – это процесс электрохимического рафинирования. Необработанная медь разлагается в электролите, и ионы меди, направляемые электрическим полем, осаждаются на катоде, образуя чистую медную фольгу или порошок. Этот процесс, как и аффинаж золота, требует точного контроля для удаления примесей и обеспечения соответствия меди ведущим отраслевым стандартам качества.

Электролитическая медь, обладая превосходной электро- и теплопроводностью, служит «смазкой» в вольфрамовых прутках. Низкая температура плавления позволяет ей легко течь при инфильтрации, заполняя поры вольфрамового каркаса; её превосходная пластичность обеспечивает прочность композитного материала. Медь выпускается в различных формах, от мелкодисперсного порошка до цельных блоков, в зависимости от требований различных технологических процессов. В вольфрамовом прутке медь не только проводит ток и тепло, но и связывает частицы вольфрама, образуя прочную сеть. Однако медь чувствительна к кислороду и требует особой осторожности при хранении и обращении, чтобы предотвратить окисление, которое может повлиять на её эксплуатационные характеристики.

#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## CTIA GROUP LTD Tungsten Copper Rod Introduction

### 1. Overview of Tungsten Copper Rod

Tungsten copper rod is composite materials produced by infiltrating high-purity tungsten powder with copper through a vacuum infiltration process. It possesses a unique microstructure that combines the high strength and high melting point of tungsten with the excellent electrical and thermal conductivity of copper. This results in a high-performance material with outstanding thermal stability, wear resistance, and electrical conductivity.

### 2. Characteristics of Tungsten Copper Rod

**High Thermal Conductivity:** The excellent thermal conductivity of copper ensures rapid heat dissipation, making it suitable for high-power devices and laser systems.

**High Strength and High-Temperature Resistance:** The stable mechanical properties of tungsten allow the material to remain reliable under extreme high-temperature conditions.

**Resistance to Arc Erosion:** The tungsten-copper composite structure provides exceptional resistance to arc erosion in electrical applications, significantly extending electrode service life.

**Low Thermal Expansion Coefficient:** Effectively reduces thermal stress and improves structural stability.

**Excellent Machinability:** Can be precisely fabricated into electrodes, heat sinks, or complex parts to meet diversified application requirements.

### 3. Performance Parameters of Tungsten Copper Rod

Product Name	Chemical Composition (%)		Physical and Mechanical Properties			
	Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (mΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
W50Cu	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
W60Cu	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
W70Cu	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
W80Cu	0.5	Balance	15.15	220	5	980
W90Cu	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

### 4. Advantages of Tungsten Copper Rod

**High-Performance Combination:** A balanced integration of strength, electrical conductivity, thermal conductivity, and high-temperature resistance.

**Customized Solutions:** Tungsten-to-copper ratio and dimensions can be tailored to meet specific customer requirements.

**Long Service Life and Stability:** Significantly reduces maintenance and replacement costs.

### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: tungsten-copper.com

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

### 3.1.3 Влияние размера, морфологии и чистоты порошка вольфрама на процесс

Размер и форма частиц вольфрамового порошка действуют подобно инструментам скульптора, непосредственно формируя структуру материала. Мелкие частицы образуют более плотное соединение, повышая прочность каркаса, но могут преждевременно закупоривать поры и препятствовать проникновению меди. Более крупные частицы способствуют образованию открытой сети пор, но требуют больше энергии для их соединения. Выбор правильного размера частиц подобен смешиванию красок в картине: поиск баланса между прочностью и проницаемостью.

Морфология частиц также имеет решающее значение: порошки с формой, близкой к сферической, упаковываются плотнее, способствуя однородности структуры; частицы неправильной формы увеличивают количество точек контакта, что потенциально улучшает механические свойства, но также может привести к локальным дефектам. Чистота — это душа материала, определяющая стабильность межфазных границ и эксплуатационную надёжность. Высокочистые порошки минимизируют нежелательные химические реакции, обеспечивая плавный процесс изготовления композита; порошки низкой чистоты могут вызывать хрупкость и снижать прочность. Благодаря тщательному отбору и обработке эти факторы можно оптимизировать, открывая путь для последующей переработки.

## 3.2 Процесс формования заготовки на основе вольфрама

Формирование вольфрамовой заготовки — это «закладывающий основу» производственного процесса. Цель — создать пористый вольфрамовый каркас, обеспечивающий идеальные каналы для инфильтрации меди. Этот процесс сочетает в себе методы прессования и спекания, подобно вырезанию микроскопического города из твёрдого вольфрамового порошка. Пористость и прочность требуют тщательного баланса, чтобы избежать как слишком плотной, так и слишком рыхлой структуры.

### 3.2.1 Прессование (одноосное прессование, изостатическое прессование)

Одноосное прессование — простой и понятный процесс, аналогичный прессованию сыпучего песка в кирпичи в форме. Вольфрамовый порошок загружается в стальную форму и прессуется в предварительную форму под действием одноосного усилия. Небольшое количество связующего, например, добавление клея в глину, способствует формованию порошка. Этот метод недорог и подходит для мелкосерийного производства, но может привести к неравномерной плотности, с рыхлой сердцевинной и плотными краями.

Изостатическое прессование, подобно полному обхвату порошка, обеспечивает равномерное давление в жидкой или газообразной среде. Холодное или горячее изостатическое прессование в сочетании с высокой температурой значительно улучшает однородность заготовки и особенно подходит для больших или сложных прутков из вольфрамовой меди. После прессования заготовку необходимо тщательно высушить, чтобы удалить связующее вещество и подготовить её к последующему спеканию.

### 3.2.2 Уплотнение спеканием (вакуум или атмосфера водорода)

Процесс спекания подобен сварке свободных частиц в прочный каркас. Спрессованное сырое тело затем помещают в высокотемпературную печь и нагревают в вакууме или водороде. Вакуум действует как стерильная камера, предотвращая окисление и облегчая удаление газов. Водород действует как очиститель, восстанавливая поверхностные оксиды и укрепляя связь между частицами.

В ходе этого процесса частицы постепенно соединяются посредством диффузии и роста шейки, что приводит к усадке и повышению плотности сырца. Добавление следовых количеств активаторов может снизить необходимую температуру, однако рекомендуется соблюдать осторожность, чтобы не снизить чистоту материала. Спекание — это медленный химический процесс, требующий точного баланса температуры и времени для обеспечения прочного скелета при сохранении достаточной пористости.

### 3.2.3 Контроль пористости и связности преформ

Пористость и связность – это «дыхательная система» преформы, напрямую влияющая на проникновение расплавленной меди. Избыточная пористость может ослабить каркас, а слишком малая – затруднить проникновение. Это требует тщательного контроля соотношения порошка и условий процесса. Добавление временных порообразователей подобно внедрению растворимых частиц в почву, которые затем удаляются после спекания для создания каналов.

Проверка связности пор подобна проверке городской транспортной сети на наличие тупиков. Оптимизированная преформа имеет равномерное распределение пор, что обеспечивает беспрепятственное проникновение расплава и при этом сохраняет достаточную механическую прочность.

## 3.3 Процесс вакуумной инфильтрации

Вакуумная инфильтрация – ключевой этап изготовления вольфрамово-медных прутков. Это похоже на впрыскивание жидкой меди в микроскопические прожилки вольфрамового каркаса, образуя плотный композитный материал. Этот процесс представляет собой не только техническую задачу, но и симфонию физики и химии. В вакууме расплавленная медь проникает в поры вольфрамового каркаса под действием капиллярных сил, заполняя все щели и в конечном итоге формируя однородную композитную структуру. Ключ к успеху – контроль температуры, уровня вакуума и динамики инфильтрации, а также предотвращение улетучивания меди, дефектов на границе раздела и неравномерного распределения. Далее будет подробно описана сложность и нюансы этого процесса, включая принципы, оборудование и конкретные операции.

### 3.3.1 Основные принципы вакуумной инфильтрации

Суть вакуумной инфильтрации заключается в использовании капиллярного эффекта и вакуума для естественного затекания расплавленной меди в поры вольфрамового каркаса. Представьте себе каплю воды, впитываемую губкой: расплавленная медь при высоких

температурах становится текучей жидкостью, и благодаря отрицательному давлению вакуума она проникает в структуру вольфрама через мельчайшие поры. Вольфрам и медь не вступают в химическую реакцию, а связываются посредством физического смачивания. Величина угла смачивания определяет способность меди к самопроизвольному затеканию, а вакуум устраняет сопротивление газа, позволяя меди более равномерно заполнять все углы.

Этот процесс вдыхает жизнь в вольфрамовый каркас. Медь не только заполняет поры, но и, охлаждаясь, образует проводящую и теплопроводящую сеть, образуя с вольфрамовым каркасом прочный и эффективный композит. Ключевым моментом является обеспечение хорошего смачивания и предотвращение испарения меди из-за чрезмерно высоких температур или неполного проплавления из-за неравномерной пористости.

### 3.3.2 Конструкция и принцип работы инфильтрационной печи

Инфильтрационная печь – это «сердце» вакуумной инфильтрации, и её конструкция столь же сложна, как прецизионная операционная. Корпус печи состоит из вакуумной камеры, системы нагрева, вакуумного насоса и системы охлаждения. Вакуумная камера обычно изготавливается из жаропрочных материалов, таких как нержавеющая сталь или кварц, а внутри неё помещается графитовый тигель для удерживания вольфрамовой заготовки и медного блока. Система нагрева может быть резистивной или индукционной, и, подобно искусному повару, она поддерживает температуру выше точки плавления меди. Вакуумный насос действует как вентилятор, отсасывая воздух для создания высокого вакуума и уменьшения газовых помех. Система охлаждения постепенно снижает температуру после завершения инфильтрации, предотвращая образование трещин, вызванных термическим напряжением.

В процессе работы вольфрамовая заготовка помещается в тигель, а медный блок располагается сверху или сбоку. Сначала печь вакуумируется для удаления воздуха и влаги, затем температура медленно повышается для расплавления меди. Капиллярные силы и вакуум в тигле позволяют расплавленной меди проникать в заготовку, заполняя поры, а затем остывать и затвердевать. Весь процесс подобен микроскопическому литью под давлением, требующему точного и аккуратного выполнения каждого этапа.

### 3.3.3 Температура инфильтрации меди, степень вакуума и динамика инфильтрации

Температура инфильтрации меди должна быть выше температуры плавления меди, но не слишком высокой, чтобы предотвратить испарение меди или нежелательный рост зерен в вольфрамовом каркасе. Выбор правильной температуры подобен регулировке температуры в сковороде: она должна быть идеальной. Степень вакуума определяет плавность процесса инфильтрации: среда с высоким вакуумом подобна чистой взлётно-посадочной полосе, позволяющей жидкой меди течь беспрепятственно; недостаточный вакуум способствует образованию пузырьков остаточного газа, влияющих на плотность материала.

В основе этого процесса лежит динамика инфильтрации. Скорость потока раствора меди зависит от размера пор, смачиваемости и влияния температуры на вязкость раствора. Поры

меньшего размера обеспечивают большую капиллярную силу, но могут увеличить сопротивление потоку; поры большего размера оказывают противоположный эффект. Оптимизация этих факторов требует экспериментов и моделирования для поиска идеального сочетания температуры, вакуума и времени для быстрой и равномерной инфильтрации.

### 3.3.4 Реакция интерфейса и эволюция микроструктуры во время инфильтрации

В процессе инфильтрации поверхность контакта между расплавленной медью и частицами вольфрама подобна контактной поверхности двух танцоров, требующих скоординированных движений. Вольфрам и медь не смешиваются, и на границе происходит физическое смачивание, а не химическая реакция. При контакте расплавленной меди с частицами вольфрама образуется тонкая диффузионная зона, укрепляющая связь между ними. Добавление небольших количеств таких элементов, как хром или цирконий, может улучшить смачивание и уменьшить образование пустот и микротрещин на границе.

Микроструктура преобразуется из пористого вольфрамового каркаса в плотный комплекс, заполненный медью. Жидкая медь сначала проникает в более крупные поры, затем постепенно заполняет более мелкие каналы, в конечном итоге образуя трёхмерную сеть. Этот процесс подобен городу, постепенно заполняющемуся улицами и зданиями из пустого каркаса. При охлаждении медная фаза затвердевает, образуя единое целое с вольфрамовым каркасом. Микроскопическое наблюдение выявляет идеальную микроструктуру без видимых трещин и незаполненных участков, а медная фаза равномерно распределена, что повышает эксплуатационные характеристики материала.

### 3.3.5 Равномерность инфильтрации и контроль качества

Равномерность — конечная цель процесса инфильтрации. Любая локальная неполная инфильтрация или скопление меди ухудшает эксплуатационные характеристики материала. Равномерность зависит от равномерности пористости вольфрамового каркаса и стабильности условий инфильтрации. Пористость заготовки должна быть рассчитана научно и рационально, чтобы избежать чрезмерно плотных участков, блокирующих раствор меди, или чрезмерно пористых участков, приводящих к недостаточной прочности.

Контроль качества подобен комплексному физическому осмотру готового изделия. Измерение плотности позволяет определить полноту заполнения, микроскопическое исследование — однородность микроструктуры, а неразрушающий контроль, такой как ультразвук или рентген, — выявить скрытые дефекты. При обнаружении неравномерной инфильтрации её можно исправить, проведя многоэтапную инфильтрацию или скорректировав температурный профиль. Конечная цель — убедиться, что материал не содержит пузырьков и трещин, а его эксплуатационные характеристики соответствуют проектным требованиям.

## 3.4 Постобработка и механическая обработка

Постобработка и механическая обработка — это процессы полировки вольфрамово-медного прутка от «черновой» до «тонко обработанной» готовой заготовки. Эти этапы не только

устраняют остаточные дефекты, возникающие при подготовке, но и придают материалу точные размеры и оптимальные свойства поверхности.

#### **3.4.1 Термическая обработка и снятие напряжений**

Термическая обработка представляет собой глубокую релаксацию материала, устраняя внутренние напряжения, накопленные в процессе инфильтрации и охлаждения. Вольфрамовые медные прутки нагревают в защитной атмосфере, например, в водороде или вакууме, постепенно повышая и поддерживая температуру, что позволяет кристаллической структуре перестраиваться и повышать прочность. Процесс охлаждения происходит медленно, что позволяет материалу «дышать» и избегать возникновения новых напряжений. Этот этап может значительно повысить надежность и срок службы материала.

#### **3.4.2 Прецизионная обработка и контроль размеров**

Прецизионная механическая обработка играет ключевую роль в придании прутку из вольфрамовой меди окончательной формы. Высокоточные токарные, фрезерные или шлифовальные станки в сочетании с алмазным инструментом позволяют точно придать материалу заданные размеры. Процесс обработки напоминает работу скульптора, требуя контролируемых скоростей резания и подачи для предотвращения перегрева и повреждения поверхности. Точность размеров обеспечивается лазерным и трёхмерным измерением координат, что обеспечивает микронные допуски, отвечающие требованиям высокоточных применений.

#### **3.4.3 Технология модификации поверхности и нанесения покрытий**

Модификация поверхности подобна нанесению защитного покрытия на материал. Полировка или химическое травление создают зеркально гладкую поверхность, снижая трение и износ. Технологии нанесения покрытий дополнительно повышают эксплуатационные характеристики. Например, нанесение слоя никеля или золота методом гальванического или физического осаждения из паровой фазы (PVD) повышает коррозионную стойкость и электропроводность. Толщину покрытия необходимо тщательно контролировать, чтобы обеспечить защиту, не влияя на теплопроводность материала.

### **3.5 Исследование новых процессов**

С развитием материаловедения новые процессы вдохнули новую жизнь в производство вольфрамово-медных прутков. Эти технологии словно исследователи, изучающие более эффективные и точные способы обработки для удовлетворения потребностей будущих сложных применений.

#### **3.5.1 Технология изготовления нано-вольфрамовых медных заготовок и ультратонкой медной инфильтрации**

Использование наноразмерного вольфрамового порошка повышает точность производства до молекулярного уровня. Ультратонкие порошки, полученные специальными методами, позволяют создавать заготовки с более высокой плотностью. Технология ультратонкой инфильтрации меди использует наноразмерные медные порошки для инфильтрации при

более низких температурах, что снижает энергопотребление и повышает однородность материала. Этот подход, подобно нанесению материала более тонкой кистью, значительно повышает производительность.

### 3.5.2 Сочетание вакуумной инфльтрации и аддитивного производства

Аддитивное производство (3D-печать) открыло новые возможности для изготовления вольфрамово-медных прутков. Лазерная или электронно-лучевая печать вольфрамового каркаса в сочетании с вакуумной инфльтрацией позволяет создавать изделия сложной геометрии. Этот метод, как и цифровая обработка материала, выходит за рамки ограничений традиционных процессов и подходит для производства по индивидуальному заказу.

### 3.5.3 Процесс оптимизации высокой однородности и низкой пористости

Новые оптимизированные процессы сочетают в себе инфльтрацию под высоким давлением, микроволновое спекание и интеллектуальные технологии управления для достижения максимальной однородности и низкой пористости. Интеллектуальные системы действуют как проводники, регулируя параметры процесса в режиме реального времени для обеспечения оптимальной производительности на каждом этапе. Эти технологии выводят эксплуатационные характеристики вольфрамово-медных прутков на новый уровень, отвечая самым высоким требованиям.



## CTIA GROUP LTD Tungsten Copper Rod Introduction

### 1. Overview of Tungsten Copper Rod

Tungsten copper rod is composite materials produced by infiltrating high-purity tungsten powder with copper through a vacuum infiltration process. It possesses a unique microstructure that combines the high strength and high melting point of tungsten with the excellent electrical and thermal conductivity of copper. This results in a high-performance material with outstanding thermal stability, wear resistance, and electrical conductivity.

### 2. Characteristics of Tungsten Copper Rod

**High Thermal Conductivity:** The excellent thermal conductivity of copper ensures rapid heat dissipation, making it suitable for high-power devices and laser systems.

**High Strength and High-Temperature Resistance:** The stable mechanical properties of tungsten allow the material to remain reliable under extreme high-temperature conditions.

**Resistance to Arc Erosion:** The tungsten-copper composite structure provides exceptional resistance to arc erosion in electrical applications, significantly extending electrode service life.

**Low Thermal Expansion Coefficient:** Effectively reduces thermal stress and improves structural stability.

**Excellent Machinability:** Can be precisely fabricated into electrodes, heat sinks, or complex parts to meet diversified application requirements.

### 3. Performance Parameters of Tungsten Copper Rod

Product Name	Chemical Composition (%)		Physical and Mechanical Properties			
	Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (mΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
W50Cu	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
W60Cu	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
W70Cu	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
W80Cu	0.5	Balance	15.15	220	5	980
W90Cu	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

### 4. Advantages of Tungsten Copper Rod

**High-Performance Combination:** A balanced integration of strength, electrical conductivity, thermal conductivity, and high-temperature resistance.

**Customized Solutions:** Tungsten-to-copper ratio and dimensions can be tailored to meet specific customer requirements.

**Long Service Life and Stability:** Significantly reduces maintenance and replacement costs.

### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: tungsten-copper.com

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## Глава 4 Физические и химические свойства вольфрамово-медного прутка

Вольфрамово-медные прутки – уникальный композитный материал, обладающий физико-химическими свойствами благодаря идеальному сочетанию высокой жаропрочности и износостойкости вольфрама и превосходной электро- и теплопроводности меди. Этот материал, напоминающий гармоничное сочетание твёрдой породы и спокойного ручья в природе, не только играет ключевую роль в электронных корпусах, электрических контактах и радиаторах, но и демонстрирует выдающуюся приспособляемость к аэрокосмической технике и высоковольтному электрооборудованию. Эти свойства не просто суммируются, а формируют комплексное преимущество благодаря продуманной конструкции микроструктуры, позволяющей вольфрамово-медным пруткам сохранять стабильность и высокую производительность в экстремальных условиях. Эта глава начнётся с основных физических свойств и постепенно углубится в механические, химические и микроструктурные характеристики. Благодаря подробному описанию и анализу будут раскрыты основные механизмы, факторы влияния и практическое применение этих свойств, что поможет читателям полностью понять, как вольфрамово-медные прутки стали надёжным партнёром в современной промышленности.

### 4.1 Основные физические свойства вольфрамово-медного прутка

Фундаментальные физические свойства вольфрамово-медных прутков составляют основу их применения. Эти свойства, как и присущие материалу физические свойства, определяют его эксплуатационные характеристики при воздействии температуры, электрических полей и термических условий. Добавление вольфрама обеспечивает повышенную стабильность и плотность, а медь – отличную проводимость. Эти два компонента дополняют друг друга, образуя сбалансированную и эффективную систему. Эти физические свойства часто являются основным фактором при проектировании и использовании вольфрамово-медных прутков, поскольку они напрямую влияют на долговечность и совместимость материала.

#### 4.1.1 Плотность и удельный вес вольфрамово-медного прутка

Плотность вольфрамово-медных прутков – одно из их самых фундаментальных и в то же время критически важных физических свойств, отражающее компактность и распределение веса внутренних компонентов материала. С увеличением содержания вольфрама плотность соответственно увеличивается, что делает вольфрамово-медные прутки превосходным материалом для применений, требующих большой массы, таких как компоненты противовесов в прецизионных приборах или материалы радиационной защиты. Такая плотность позволяет материалу выдерживать больший вес в ограниченном пространстве, избегая конструктивных проблем, связанных с избыточным объемом. Она также повышает устойчивость материала, предотвращая его смещение под воздействием вибрации или высокоскоростного движения. На практике вольфрамово-медные прутки высокой плотности часто используются в системах противовесов в авиации, обеспечивая надежное инерционное равновесие без ущерба для других свойств материала. Удельный вес, как мера плотности относительно воды, дополнительно подчеркивает эту воспринимаемую тяжесть и особенно полезен при расчете расхода материала или оценке стоимости доставки. В целом,

оптимизированная плотность и удельный вес делают вольфрамово-медные прутки идеальным выбором для применений, чувствительных к весу и требующих высокой производительности. Регулируя соотношение вольфрама и меди, их можно гибко адаптировать для удовлетворения различных требований, избегая трудностей обработки, связанных с чрезмерно высокой плотностью или недостаточной прочностью, связанной со слишком низкой плотностью.

#### **4.1.2 Температура плавления и термическая стабильность вольфрамово-медного прутка**

Характеристики температуры плавления прутков из вольфрамовой меди наследуют чрезвычайную термостойкость вольфрама, что позволяет материалу сохранять свою целостность в высокотемпературных средах, подобно крепости, выдерживающей испытание огнем. Высокая температура плавления вольфрама значительно повышает верхний предел общей термостойкости материала. Даже при температурах, приближающихся к температуре плавления меди, прутки из вольфрамовой меди не будут легко размягчаться или деформироваться. Эта термостойкость особенно заметна в дуговых разрядах или высокотемпературных сварочных применениях, где он может выдерживать кратковременные тепловые удары и предотвращать разрушение внутренней структуры материала, тем самым продлевая его срок службы. При длительном воздействии высоких температур термостойкость прутков из вольфрамовой меди также отражается в прочности их фазовой структуры, без существенного превращения кристаллов или термического разложения. Это делает их пригодными для применений, связанных с длительным воздействием высоких температур, таких как компоненты авиационных двигателей или электронные радиаторы. Благодаря сложным композитным процессам эту стабильность можно еще больше повысить, что позволяет вольфрамово-медному стержню с легкостью работать в экстремальных температурных условиях, подобно воину, не боящемуся огня, защищая нормальную работу оборудования.

#### **4.1.3 Коэффициент теплового расширения и теплопроводность вольфрамово-медного прутка**

Коэффициент теплового расширения (КТР) является ключевым фактором, определяющим способность вольфрамовых медных прутков выдерживать температурные колебания. Низкий коэффициент теплового расширения вольфрама определяет общие эксплуатационные характеристики материала, позволяя ему сохранять относительную размерную стабильность при термоциклировании, предотвращая концентрацию напряжений и образование трещин, вызванных дифференциальным расширением. Эта характеристика, подобно гибкости моста при сезонных изменениях температуры, особенно подходит для применения в керамике, стекле и полупроводниковых материалах. Например, в корпусировании микроэлектроники вольфрамовые медные прутки идеально подходят для кристаллов, предотвращая отказы, вызванные тепловыми напряжениями. Теплопроводность, обусловленная, прежде всего, превосходной теплопроводностью меди, позволяет вольфрамовым медным пруткам действовать как эффективные тепловые трубки, быстро рассеивая тепло от источника тепла в окружающую среду, предотвращая локальный перегрев. В мощных лазерных устройствах

или силовых полупроводниках эта теплопроводность обеспечивает стабильные рабочие температуры и снижает риск теплового отказа. Синергетический эффект КТР и теплопроводности делает вольфрамовые медные прутки уникальными в области терморегулирования. Они не только выдерживают колебания температур, но и активно регулируют тепловой поток, достигая эффективного баланса передачи энергии и рассеивания тепла.

#### **4.1.4 Проводимость и удельное сопротивление вольфрамово-медного стержня**

Электропроводность – основное преимущество вольфрамово-медных прутков в электротехнике. Непрерывная сеть медных фаз действует как эффективный проводник, обеспечивая плавный ток. Добавление вольфрама несколько увеличивает удельное сопротивление, но значительно повышает дугостойкость и общую стабильность материала. Благодаря сбалансированной конструкции вольфрамово-медные прутки отлично подходят для высоковольтных электрических контактов и коммутационных устройств, обеспечивая плавное прохождение больших токов и защиту от повреждений, вызванных дуговой эрозией. На практике электрические свойства вольфрамово-медных прутков делают их предпочтительным электродным материалом, способным обрабатывать высокочастотные или мощные сигналы без чрезмерного тепловыделения или ухудшения качества сигнала. Гибкое изменение удельного сопротивления в зависимости от содержания вольфрама позволяет применять их в индивидуальных приложениях, например, уменьшать содержание вольфрама в проводниках, требующих низкого сопротивления, или увеличивать его в износостойких электрических контактах для продления срока их службы. В целом, оптимизированная проводимость и удельное сопротивление делают вольфрамово-медные прутки исключительно подходящими для использования в электрическом поле, сочетая эффективность проводимости с долговременной надежностью.

#### **4.2 Механические свойства вольфрамово-медного прутка**

Механические свойства вольфрамово-медных прутков гарантируют их надежность в условиях механических нагрузок. Эти свойства сочетают в себе жесткость вольфрама и гибкость меди, что позволяет вольфрамовому пруту, подобно воину, противостоять износу, ударам и деформациям. Эти характеристики позволяют материалу блестяще проявлять себя в динамических условиях, выдерживая не только статические нагрузки, но и многократные механические воздействия.

##### **4.2.1 Твердость и прочность вольфрамово-медного прутка**

Твёрдость является ярким проявлением механических свойств прутков из вольфрамовой меди. Равномерное распределение частиц вольфрама действует как прочный скелетный каркас, повышая устойчивость материала к внешнему давлению и делая его менее подверженным царапинам или деформации в условиях высокого давления или сильного трения. Эта характеристика твёрдости особенно полезна в формах и режущих инструментах, поскольку она сохраняет острые края и продлевает срок службы инструмента. Прочность отражается в его характеристиках при растяжении, сжатии и изгибе. Добавление вольфрама значительно увеличивает предел прочности материала на разрыв, позволяя прутку из

вольфрамовой меди сохранять структурную целостность под нагрузкой и избегать внезапного разрушения. В зданиях или механических компонентах эта прочность действует как опорные балки и колонны, обеспечивая безопасность и надёжность. Благодаря передовым производственным процессам эти свойства могут быть дополнительно улучшены, что позволяет пруткам из вольфрамовой меди адаптироваться к ещё более требовательным промышленным условиям, подобно крепости, которая никогда не рухнет.

#### **4.2.2 Пластичность и вязкость вольфрамово-медного прутка**

Пластичность обусловлена гибкой природой фазы меди, которая позволяет прутку из вольфрамовой меди слегка деформироваться под нагрузкой без немедленного разрушения, что резко контрастирует с хрупкостью чистого вольфрама, что упрощает обработку и формовку материала. При растяжении или изгибе эта пластичность действует как упругий буфер для материала, поглощая часть энергии и предотвращая катастрофическое разрушение. Прочность отражает способность материала поглощать энергию удара. В условиях вибрации или столкновений прутки из вольфрамовой меди могут поглощать внешние силы и сохранять общую целостность. Это свойство играет ключевую роль в автомобильных деталях или вибрационном оборудовании, позволяя материалу оставаться прочным при повторяющихся нагрузках и избегать повреждений, вызванных накоплением усталости. Оптимизируя интерфейс вольфрам-медь, можно дополнительно улучшить пластичность и ударную вязкость, что позволяет прутку из вольфрамовой меди хорошо работать в динамических приложениях.

#### **4.2.3 Износостойкость и ударопрочность вольфрамово-медного прутка**

Износостойкость служит защитным слоем для прутков из вольфрамовой меди в фрикционных средах. Твердая фаза вольфрама, как и алмаз, противостоит эрозии частицами износа, что значительно продлевает срок службы материала. В высокоскоростных машинах или средах, подверженных сильному износу, эта износостойкость обеспечивает гладкую, долговечную поверхность и предотвращает ухудшение характеристик. Ударопрочность достигается за счет механизма рассеивания энергии композитной структуры, где ударные силы равномерно поглощаются на границе вольфрам-медь, предотвращая локальные повреждения. Это свойство действует как подушка, защищая материал от столкновений или падений. Сочетание износостойкости и ударопрочности делает прутки из вольфрамовой меди надежным выбором для военной техники или инструментов тяжелой промышленности, способными выдерживать строгие испытания, сохраняя при этом функциональность.

### **4.3 Химические свойства вольфрамово-медного прутка**

Химические свойства вольфрамово-медных прутков определяют их эксплуатационные характеристики в коррозионных и высокотемпературных химических средах. Эти свойства действуют как «иммунная система» материала, противостоя внешней коррозии и обеспечивая долгосрочную стабильность и безопасность.

#### **4.3.1 Стойкость к окислению и коррозии вольфрамово-медного прутка**

Стойкость к окислению особенно важна в условиях высоких температур воздуха.

Устойчивый оксидный слой вольфрама действует как защитная пленка, замедляя окисление медной фазы и сохраняя целостность материала в условиях высоких температур. Благодаря своим антиоксидантным свойствам вольфрамово-медные прутки подходят для использования в печах и вытяжных системах, предотвращая их быстрое разрушение. Коррозионная стойкость особенно важна в кислых, щелочных и влажных средах. Вольфрамово-медные прутки выдерживают эрозию в широком спектре химических сред, словно неуязвимый к стихиям страж. В химических трубопроводах или морском оборудовании эта характеристика продлевает срок службы и снижает требования к техническому обслуживанию. Обработка поверхности может дополнительно улучшить эти свойства, позволяя материалу выдерживать агрессивные химические среды.

#### **4.3.2 Высокотемпературная химическая стабильность вольфрамово-медного прутка**

Высокотемпературная химическая стабильность позволяет вольфрамово-медным пруткам сохранять инертность в горячих газах или расплавленных средах. Химическая инертность вольфрама предотвращает нежелательные реакции и разложение. Эта стабильность действует как стабилизирующая сила в печи, обеспечивая надежную работу высокотемпературных реакторов или датчиков и предотвращая отказы, вызванные фазовыми переходами. В металлургии и энергетике это свойство обеспечивает длительную работу при высоких температурах и сохраняет структуру и функции материала.

#### **4.3.3 Совместимость вольфрамово-медного прутка с другими металлами**

Совместимость с другими металлами — ещё одно важное преимущество вольфрамово-медных прутков. Они легко образуют прочное соединение с алюминием, сталью или никелем, предотвращая расслоение и коррозию. Эта совместимость действует как мост, соединяющий разнородные материалы, и играет важную роль в композитных конструкциях, таких как электронные разъёмы, обеспечивая стабильность всей системы. Эта характеристика упрощает процесс сварки или легирования и повышает эффективность.

#### **4.4 Микроструктура и организационные характеристики вольфрамово-медного прутка**

Микроструктура – это «внутренний чертеж» свойств вольфрамово-медных прутков. Она отражает распределение, связи и эволюцию фазы вольфрама-меди. Эти характеристики, подобно ДНК материала, определяют его макроскопические свойства.

##### **4.4.1 Кристаллическая структура и фазовый состав вольфрамово-медного прутка**

Кристаллическая структура в основном состоит из объёмноцентрированной кубической решётки вольфрама и гранцентрированной кубической решётки меди, каждая из которых существует независимо, образуя псевдосплавную систему. Эта структура позволяет материалу обладать как жёсткостью вольфрама, так и гибкостью меди, напоминая под микроскопом два гармоничных архитектурных каркаса. Фазовый состав напоминает точную головоломку: фаза вольфрама образует прочный каркас, а фаза меди заполняет пустоты, обеспечивая общее равновесие.

##### **4.4.2 Характеристики распределения фаз вольфрама и меди**

###### [Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

Вольфрамовая фаза равномерно распределена в медной матрице, подобно звёздам, разбросанным по ночному небу, что позволяет избежать локального скопления и неравномерности. Такое распределение обеспечивает стабильные характеристики, в то время как медная фаза образует непрерывную сеть, улучшая токопроводящий путь. Эта однородность достигается благодаря контролю процесса производства, что позволяет получить материал с идеальной гармонией на микроскопическом уровне.

#### 4.4.3 Механизм межфазного склеивания и анализ микроструктуры

Механизм межфазной связи основан главным образом на механическом сцеплении и микроскопической диффузии, что обеспечивает прочное соединение вольфрамового и медного сплавов без значительного вмешательства со стороны компаундных слоёв. Микроструктурный анализ выявляет гладкую и прочную поверхность контакта с однородной структурой, подобной зацеплению прецизионных шестерён, что обеспечивает эффективную передачу энергии и напряжений. Электронная микроскопия выявляет эту структуру, раскрывая источник внутренней прочности материала.



## CTIA GROUP LTD Tungsten Copper Rod Introduction

### 1. Overview of Tungsten Copper Rod

Tungsten copper rod is composite materials produced by infiltrating high-purity tungsten powder with copper through a vacuum infiltration process. It possesses a unique microstructure that combines the high strength and high melting point of tungsten with the excellent electrical and thermal conductivity of copper. This results in a high-performance material with outstanding thermal stability, wear resistance, and electrical conductivity.

### 2. Characteristics of Tungsten Copper Rod

**High Thermal Conductivity:** The excellent thermal conductivity of copper ensures rapid heat dissipation, making it suitable for high-power devices and laser systems.

**High Strength and High-Temperature Resistance:** The stable mechanical properties of tungsten allow the material to remain reliable under extreme high-temperature conditions.

**Resistance to Arc Erosion:** The tungsten-copper composite structure provides exceptional resistance to arc erosion in electrical applications, significantly extending electrode service life.

**Low Thermal Expansion Coefficient:** Effectively reduces thermal stress and improves structural stability.

**Excellent Machinability:** Can be precisely fabricated into electrodes, heat sinks, or complex parts to meet diversified application requirements.

### 3. Performance Parameters of Tungsten Copper Rod

Product Name	Chemical Composition (%)		Physical and Mechanical Properties			
	Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (mΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
W50Cu	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
W60Cu	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
W70Cu	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
W80Cu	0.5	Balance	15.15	220	5	980
W90Cu	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

### 4. Advantages of Tungsten Copper Rod

**High-Performance Combination:** A balanced integration of strength, electrical conductivity, thermal conductivity, and high-temperature resistance.

**Customized Solutions:** Tungsten-to-copper ratio and dimensions can be tailored to meet specific customer requirements.

**Long Service Life and Stability:** Significantly reduces maintenance and replacement costs.

### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: tungsten-copper.com

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## Глава 5. Основные области применения вольфрамово-медного прутка

Вольфрамово-медный пруток – это высокопроизводительный композитный материал, сочетающий в себе высокую прочность и термостойкость вольфрама с превосходной электро- и теплопроводностью меди, что обеспечивает его широкое применение в различных высокотехнологичных областях. Его уникальные физические и химические свойства позволяют ему сохранять стабильность и надежность в сложных условиях эксплуатации, отвечая строгим требованиям таких отраслей, как электротехника и электроника, аэрокосмическая и оборонная промышленность, машиностроение и терморегулирование. В этой главе подробно рассматривается применение вольфрамово-медного прутка в электротехнике и электронике, аэрокосмической и оборонной промышленности, машиностроении и производстве пресс-форм, терморегулировании и других новых областях, с акцентом на его функции, преимущества, проблемы и технические требования. Профессиональное и подробное описание проясняет его важное место в современной промышленности.

### 5.1 Электрика и электроника

Вольфрамово-медные прутки находят важное применение в электротехнике и электронике, прежде всего благодаря высокой электропроводности, превосходной стойкости к дуговой эрозии и хорошей термической стабильности. Эти свойства делают их идеальным выбором для высоковольтных электрических контактов, компонентов переключателей и электродов, а также широко используются в системах передачи и распределения электроэнергии, а также в корпусировании микроэлектронных компонентов.

В высоковольтном электрооборудовании в качестве материалов электрических контактов часто используются стержни из вольфрамовой меди. Медная фаза обеспечивает низкое сопротивление току, обеспечивая эффективную передачу тока, а высокая температура плавления и твердость вольфрамовой фазы эффективно противостоят высокотемпературной абляции и механическому износу, вызванному дугой. В высоковольтных выключателях и распределительных устройствах контакты из вольфрамовой меди выдерживают частые переключения и сохраняют длительную стабильность работы. Например, в системах распределения электроэнергии контакты из вольфрамовой меди обеспечивают быстрое размыкание и замыкание, снижая потери энергии и повреждение поверхности, вызванное дугой, тем самым продлевая срок службы оборудования. Кроме того, их антиадгезионные свойства гарантируют, что контакты не свариваются под действием сильных токов, что повышает безопасность системы.

В области электроники вольфрамовые медные стержни широко используются в качестве электродов и соединителей в микроэлектронных корпусах. Их коэффициент теплового расширения близок к коэффициенту теплового расширения полупроводниковых материалов (таких как кремний и арсенид галлия), что эффективно снижает концентрацию напряжений и образование трещин, вызванных дифференциальным расширением при термодиклировании. Это свойство особенно важно при корпусировании мощных

#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

интегральных схем и усилителей мощности. В качестве материала подложки или электрода вольфрамовые медные стержни обеспечивают надежное соединение между кристаллом и подложкой, обеспечивая эффективную передачу сигнала благодаря высокой электропроводности медной фазы. Кроме того, их превосходная теплопроводность способствует быстрому рассеиванию тепла, предотвращая выход кристалла из строя из-за перегрева, что делает их пригодными для высокопроизводительных электронных устройств, таких как радиолокационные системы и коммуникационные модули.

Вольфрамово-медные прутки также заслуживают внимания благодаря своему применению в электродах для электроэрозионной обработки (ЭЭО). Высокая твердость и износостойкость обеспечивают сохранение точности формы электродов во время обработки, а превосходная электропроводность способствует стабильной работе разряда. Эти характеристики делают их превосходными для изготовления прецизионных пресс-форм и обработки сложных деталей, позволяя обрабатывать материалы высокой твердости, такие как титановые сплавы и твердые сплавы.

## 5.2 Аэрокосмическая и оборонная промышленность

Вольфрамово-медные прутки используются в аэрокосмической и оборонной промышленности благодаря высокой плотности, термостойкости и ударопрочности, что позволяет им сохранять структурную целостность и функциональную надежность в экстремальных условиях. Эти свойства делают их идеальным материалом для деталей ракетных двигателей, головок самонаведения ракет и бронепробиваемых материалов.

В аэрокосмической отрасли прутки из вольфрамовой меди часто используются для изготовления вкладышей критического сечения и элементов тепловой защиты сопел ракетных двигателей. Высокая температура плавления и термическая стабильность позволяют им выдерживать эрозию газа под высоким давлением и температурой в камере сгорания, предотвращая плавление или абляцию материала. Высокая теплопроводность медной фазы быстро отводит тепло от высокотемпературных зон, предотвращая локальный перегрев и обеспечивая устойчивость сопла при длительной эксплуатации. Кроме того, высокая плотность прутков из вольфрамовой меди даёт им уникальные преимущества в системах противовесов космических аппаратов, используемых для корректировки центра тяжести летательного аппарата и обеспечения точности запуска и орбитальной эксплуатации. Например, в системах ориентации спутников противовесы из вольфрамовой меди обеспечивают устойчивый инерционный баланс и отвечают требованиям высокой точности динамических характеристик.

В оборонной промышленности вольфрамово-медные прутки используются для изготовления сердечников бронебойных снарядов и компонентов электрических контактов. Высокая плотность и твердость позволяют им пробивать прочную броню, а вязкость медной фазы повышает ударопрочность сердечника и снижает риск разрушения. Кроме того, вольфрамово-медные прутки используются в качестве электродного материала в военном электронном оборудовании, сохраняя стабильность при воздействии мощных импульсов и

делая их пригодными для использования в радиолокационных системах и системах радиоэлектронного противодействия. Коррозионная стойкость и термостойкость материала дополнительно обеспечивают его надёжность в суровых условиях боевых действий, таких как высокая температура, высокая влажность и соляной туман.

### 5.3 Машиностроение и производство пресс-форм

Применение вольфрамово-медного прутка в машиностроении и производстве пресс-форм обусловлено его высокой твёрдостью, износостойкостью и хорошей обрабатываемостью. Он подходит для изготовления высокоточных пресс-форм, режущих инструментов и износостойких деталей. Эти характеристики позволяют ему эффективно работать в условиях высоких нагрузок и трения, продлевая срок службы оборудования и инструментов.

В производстве пресс-форм прутки из вольфрамовой меди часто используются для изготовления электроэрозионных и штамповочных машин. Их высокая твёрдость обеспечивает устойчивость к износу и деформации при обработке, обеспечивая точность размеров и качество поверхности. Электропроводность медной фазы способствует эффективному электроэрозионному разряду, что делает её пригодной для обработки деталей сложной геометрии, таких как компоненты авиационной техники и медицинские приборы. Кроме того, высокая теплопроводность прутка способствует быстрому рассеиванию тепла, уменьшая образование термических усталостных трещин при непрерывной работе пресс-формы и повышая эффективность производства.

В производстве режущих инструментов прутки из вольфрамовой меди используются в качестве инструментальных материалов или вставок. Их износостойкость и ударопрочность позволяют обрабатывать высокотвёрдые материалы, такие как нержавеющая сталь и титановые сплавы, сохраняя остроту и срок службы инструмента. Кроме того, прочность медной фазы снижает риск хрупкого разрушения, делая их более конкурентоспособными при высокоскоростной резке и обработке под большими нагрузками. В пресс-формах для литья под давлением и литья под давлением жаропрочность и термостойкость прутков из вольфрамовой меди обеспечивают стабильность пресс-форм при многократных циклах нагрева и охлаждения, уменьшая образование поверхностных трещин и деформацию.

### 5.4 Устройства терморегулирования и отвода тепла

Применение вольфрамово-медного прутка в области терморегулирования и теплоотвода обусловлено его превосходной теплопроводностью и низким коэффициентом теплового расширения, что делает его идеальным выбором для мощных электронных устройств и материалов для теплоотводов. Высокая мощность Плотность размещения современных электронных устройств предъявляет более высокие требования к характеристикам рассеивания тепла, и вольфрамово-медный пруток продемонстрировал превосходные возможности в этой области.

В мощных электронных устройствах вольфрамовые медные стержни часто используются в качестве теплоотводящих подложек и материалов для теплоотводов. Их высокая

теплопроводность позволяет им быстро отводить тепло, генерируемое микросхемами или лазерами, во внешнюю среду, предотвращая перегрев, который может привести к снижению производительности или выходу устройства из строя. Например, в лазерных диодах и усилителях мощности теплоотводы из вольфрамовых медных стержней эффективно снижают рабочие температуры, повышая надежность и срок службы устройств. Низкий коэффициент теплового расширения, совместимый с полупроводниковыми материалами, снижает термические напряжения и обеспечивает структурную целостность при длительной эксплуатации.

В транспортных средствах на новых источниках энергии и коммуникационном оборудовании 5G вольфрамово-медные прутки используются для производства систем управления аккумуляторными батареями и модулей охлаждения базовых станций. Их высокая теплопроводность способствует эффективному управлению теплом, предотвращая перегрев аккумуляторных батарей и тепловой отказ сигнальных процессоров. Кроме того, их высокая прочность и коррозионная стойкость обеспечивают длительное использование во влажных и высокотемпературных средах, что соответствует требованиям к наружному оборудованию. При производстве тепловых трубок и теплообменников их теплопроводность и механическая стабильность дополнительно повышают эффективность системы, что делает их пригодными для центров обработки данных и промышленных систем охлаждения.

### 5.5 Другие области применения

Помимо перечисленных выше основных областей применения, вольфрамово-медные прутки также демонстрируют потенциал во многих новых и специализированных областях. Благодаря своей универсальности они постоянно расширяют спектр своего применения.

В медицине вольфрамовые прутки из меди используются для изготовления экранирующих компонентов и коллиматоров для радиотерапевтического оборудования. Высокая плотность этих прутков эффективно экранирует рентгеновское и гамма-излучение, защищая пациентов и медицинский персонал от радиационного воздействия, а их технологические свойства позволяют изготавливать изделия сложной формы. Кроме того, вольфрамовые прутки из меди используются в качестве электродов или радиаторов в медицинском диагностическом оборудовании, повышая его производительность и стабильность.

В секторе возобновляемой энергетики вольфрамово-медные стержни используются в качестве электрических контактов в фотоэлектрических и ветроэнергетических системах. Их высокая проводимость и износостойкость обеспечивают эффективную передачу тока, а коррозионная стойкость обеспечивает долговременную надежность при эксплуатации вне помещений. Например, в солнечных инверторах вольфрамово-медные стержни служат в качестве соединительных материалов, способных выдерживать высокие токи и частые переключения.

В научных исследованиях вольфрамово-медные прутки часто используются в качестве компонентов высокотемпературных экспериментальных устройств и ускорителей частиц. Их

высокая термостойкость и ударопрочность позволяют им выдерживать экстремальные экспериментальные условия, такие как воздействие высокотемпературной плазмы или воздействие частиц высокой энергии. Кроме того, их электро- и теплопроводность обеспечивают передачу сигналов и управление теплом в прецизионном экспериментальном оборудовании.

В сфере спорта и развлечений вольфрамово-медные прутки используются для изготовления высокоточного спортивного инвентаря, например, грузиков для клюшек для гольфа. Высокая плотность обеспечивает идеальное распределение веса в небольшом объеме, улучшая балансировку и управляемость. Хотя это применение и узкоспециализированное, оно демонстрирует потенциал вольфрамово-медных прутков в непромышленном применении.

Подводя итог, можно сказать, что вольфрамово-медные прутки, благодаря своему превосходному комплексу свойств, демонстрируют широкие перспективы применения в электротехнике и электронике, аэрокосмической и оборонной промышленности, машиностроении и производстве пресс-форм, терморегулировании и других развивающихся областях. Сочетание высокой электропроводности, стойкости к высоким температурам и механической прочности позволяет им выдерживать сложные и требовательные условия эксплуатации, обеспечивая надежную поддержку развития современной промышленности и технологий. С развитием материаловедения ожидается дальнейшее расширение областей применения вольфрамово-медных прутков, что позволит найти инновационные решения для еще большего числа отраслей.



[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

## CTIA GROUP LTD Tungsten Copper Rod Introduction

### 1. Overview of Tungsten Copper Rod

Tungsten copper rod is composite materials produced by infiltrating high-purity tungsten powder with copper through a vacuum infiltration process. It possesses a unique microstructure that combines the high strength and high melting point of tungsten with the excellent electrical and thermal conductivity of copper. This results in a high-performance material with outstanding thermal stability, wear resistance, and electrical conductivity.

### 2. Characteristics of Tungsten Copper Rod

**High Thermal Conductivity:** The excellent thermal conductivity of copper ensures rapid heat dissipation, making it suitable for high-power devices and laser systems.

**High Strength and High-Temperature Resistance:** The stable mechanical properties of tungsten allow the material to remain reliable under extreme high-temperature conditions.

**Resistance to Arc Erosion:** The tungsten-copper composite structure provides exceptional resistance to arc erosion in electrical applications, significantly extending electrode service life.

**Low Thermal Expansion Coefficient:** Effectively reduces thermal stress and improves structural stability.

**Excellent Machinability:** Can be precisely fabricated into electrodes, heat sinks, or complex parts to meet diversified application requirements.

### 3. Performance Parameters of Tungsten Copper Rod

Product Name	Chemical Composition (%)		Physical and Mechanical Properties			
	Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (mΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
W50Cu	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
W60Cu	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
W70Cu	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
W80Cu	0.5	Balance	15.15	220	5	980
W90Cu	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

### 4. Advantages of Tungsten Copper Rod

**High-Performance Combination:** A balanced integration of strength, electrical conductivity, thermal conductivity, and high-temperature resistance.

**Customized Solutions:** Tungsten-to-copper ratio and dimensions can be tailored to meet specific customer requirements.

**Long Service Life and Stability:** Significantly reduces maintenance and replacement costs.

### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: tungsten-copper.com

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## Глава 6. Оборудование для производства и контроль процесса изготовления вольфрамово-медного прутка

Производство прутков из вольфрамовой меди – сложный процесс порошковой металлургии, включающий несколько ключевых этапов, включая подготовку порошка, формовку, спекание, вакуумную инфильтрацию, постобработку и контроль качества. Каждый этап требует сложного производственного оборудования и строгого контроля процесса для обеспечения стабильности и постоянства свойств материала. Конструкция и эксплуатация производственного оборудования напрямую определяют микроструктуру, физические свойства и качество конечного продукта – прутков из вольфрамовой меди, а контроль процесса обеспечивает высокую эффективность и низкий уровень дефектов за счет точного управления параметрами. В этой главе подробно рассматривается основное оборудование, используемое в процессе производства прутков из вольфрамовой меди, и его функции. В сочетании с ключевыми аспектами контроля процесса анализируется выбор оборудования, эксплуатационные требования и стратегии оптимизации для предоставления технических рекомендаций для промышленного производства.

### 6.1 Оборудование для подготовки и формования порошков

Оборудование для подготовки и формования порошка является основой производства вольфрамовой медной катанки. Оно используется для подготовки высокочистого вольфрамового порошка и электролитического медного порошка и прессования их в заготовки. Это оборудование должно обеспечивать чистоту порошка, гранулометрический состав и однородность формируемых заготовок, создавая основу для последующего спекания и инфильтрации.

Оборудование для подготовки порошка в основном включает печи водородного восстановления и системы электролитического рафинирования. Печь водородного восстановления используется для получения высокочистого вольфрамового порошка из вольфрамата или триоксида вольфрама. Обычно она использует трубчатую или вращающуюся печь, оснащенную точной системой контроля температуры и устройством подачи водорода. Температура в печи четко разделена, а первичное и вторичное восстановление проводятся в разных температурных зонах, чтобы гарантировать однородный размер частиц порошка и низкое содержание кислорода. Система электролитического рафинирования используется для получения электролитического медного порошка. Она включает в себя электролитическую ячейку, катодную пластину и устройство регулирования тока. Система циркуляции электролита обеспечивает высокую чистоту и однородность медного порошка. Кроме того, для контроля распределения частиц порошка по размерам используются воздушный сепаратор и вибрационный грохот. Частицы разных размеров разделяются высокоскоростным потоком воздуха или грохотом, чтобы гарантировать, что размер частиц вольфрамового и медного порошков соответствует технологическим требованиям.

Формовочное оборудование в основном включает одноосные и изостатические прессы.

#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Одноосные прессы с гидравлическим или механическим приводом прессуют вольфрамовый порошок (который может быть смешан с небольшим количеством медного порошка или связующего) в стальной форме, формируя заготовку. Они оснащены датчиками давления и автоматизированными системами управления для точного приложения давления и контроля времени выдержки. Изостатические прессы, в свою очередь, обеспечивают равномерное давление через жидкую или газообразную среду и подходят для формования заготовок больших размеров или сложной формы. Оснащенные насосом высокого давления и гибкими пресс-формами, они значительно повышают равномерность плотности заготовок. В процессе формования решающее значение имеют конструкция пресс-формы и система извлечения из формы. Для предотвращения дефектов поверхности и прилипания требуются износостойкие материалы и смазочные устройства.

С точки зрения контроля процесса, приготовление порошка требует строгого контроля восстановительной атмосферы, температурного градиента и состава электролита для обеспечения чистоты порошка более 99,95% и распределения размеров частиц в диапазоне 1–5 мкм. В процессе формования давление, подача связующего и скорость извлечения из формы должны точно регулироваться, чтобы избежать трещин в сыром изделии или градиентов плотности. Техническое обслуживание и очистка оборудования также имеют решающее значение для предотвращения загрязнения примесями или износа оборудования, которые могут повлиять на качество порошка.

## 6.2 Оборудование для вакуумного спекания и подготовки преформ

Оборудование для вакуумного спекания и подготовки преформ используется для преобразования прессованного сырца в пористый вольфрамовый каркас с необходимой пористостью и прочностью, служащий структурной основой для последующей вакуумной инфильтрации. Оборудование должно обладать высокоточным контролем температуры и управлением атмосферой для обеспечения стабильности процесса спекания и однородности каркаса.

Вакуумная спекательная печь является основным оборудованием, обычно использующим резистивный или индукционный нагрев и оснащенный многозонной системой контроля температуры и системой вакуумной откачки. Корпус печи изготовлен из жаропрочных материалов (таких как нержавеющая сталь или кварц) и оснащен графитовыми или молибденовыми нагревательными элементами, что позволяет проводить высокотемпературное спекание при температурах 1200-1600 °C. Система вакуумной откачки, состоящая как из механического насоса, так и из диффузионного насоса, поддерживает уровень вакуума ниже 10<sup>-3</sup> Па внутри печи, предотвращая окисление и облегчая отвод газа. Некоторые спекательные печи поддерживают спекание в атмосфере водорода и оснащены системой подачи водорода и очистки отходящих газов для уменьшения поверхностных оксидов и повышения эффективности связывания частиц. Многозонная конструкция нагрева обеспечивает равномерное температурное поле, сводя к минимуму деформацию сырого тела и локальное перегорание.

Подготовка преформ может также включать вспомогательное оборудование, такое как печь для удаления связующих веществ и система обработки порообразователем. Печь для удаления связующих веществ удаляет связующие вещества (например, поливиниловый спирт) из прессованной заготовки. Нагрев при низких температурах (400–600 °С) в защитной атмосфере разлагает органические вещества, предотвращая образование остаточных карбидов, которые могут повлиять на качество преформы. Система обработки порообразователем используется для добавления и удаления временных порообразователей (например, бикарбоната аммония) и контроля пористости посредством точного дозирования и термообработки.

При управлении процессом ключевыми параметрами являются температура спекания, время выдержки и скорость нагрева. Температуру необходимо повышать постепенно, чтобы избежать растрескивания в сыром изделии под действием термических напряжений; время выдержки регулируется в пределах от 2 до 4 часов для обеспечения прочного соединения между частицами. Мониторинг уровня вакуума или потока водорода в режиме реального времени предотвращает окисление и проникновение примесей. Пористость контролируется оптимизацией соотношения размеров частиц порошка и параметров спекания, стремясь к достижению связанной пористости 20–40% для обеспечения последующей инфильтрации меди.

### 6.3 Оборудование для вакуумной инфильтрации

Оборудование для вакуумной инфильтрации является основой производства вольфрамово-медного прутка и обеспечивает инфильтрацию расплавленной меди в пористый вольфрамовый каркас для формирования плотного композитного материала. Это оборудование должно обладать высокой вакуумной производительностью, точным контролем температуры и стабильной рабочей средой для обеспечения равномерного заполнения медью и предотвращения дефектов.

Вакуумная инфильтрационная печь обычно состоит из вакуумной камеры, системы нагрева, вакуумного насоса и системы охлаждения. Вакуумная камера изготовлена из жаропрочных материалов и содержит графитовый тигель для удерживания вольфрамовой заготовки и медного блока. Система нагрева обычно использует среднечастотный индукционный нагрев, способный быстро поднять температуру до 1100-1300 °С, обеспечивая полное расплавление и надлежащую текучесть расплавленной меди. Вакуумный насос, включающий насосы Рутса и молекулярные насосы, поддерживает вакуумное давление ниже  $10^{-3}$  Па, устраняя газовое сопротивление и способствуя спонтанной инфильтрации меди. Система охлаждения использует водяное или воздушное охлаждение для контроля скорости охлаждения и предотвращения растрескивания, вызванного термическим напряжением. Некоторое современное оборудование оснащено системой вспомогательного газа высокого давления, которая использует инертные газы (например, аргон) для создания дополнительного давления с целью увеличения глубины проникновения.

Процесс работы инфильтрационной печи состоит из четырёх этапов: предварительного

нагрева, плавления, инфильтрации и охлаждения. На этапе предварительного нагрева вольфрамовая заготовка нагревается до 1000–1100 °С для удаления адсорбированных на поверхности газов. На этапе плавления медный блок нагревается выше температуры плавления, что позволяет расплавленной меди проникать в каркас под действием капиллярных сил и вакуума. На этапе выдержки обеспечивается полное заполнение пор расплавленной медью. На этапе охлаждения используется программируемое охлаждение для предотвращения структурных дефектов. Оборудование должно быть оснащено высокоточными датчиками температуры и системами контроля вакуума для обеспечения обратной связи по параметрам процесса в режиме реального времени.

При управлении процессом критически важны температура инфильтрации меди, уровень вакуума и время выдержки. Температура должна быть выше температуры плавления меди, но ниже температуры рекристаллизации вольфрама, чтобы предотвратить улетучивание меди и укрупнение кристаллической структуры. Уровень вакуума должен поддерживаться постоянно, чтобы предотвратить образование пузырьков и реакции окисления. Динамика инфильтрации зависит от размера пор и смачиваемости и должна быть оптимизирована за счёт конструкции преформы и добавления смачивающих агентов (например, следовых количеств хрома). Что касается обслуживания оборудования, регулярный осмотр тиглей и нагревательных элементов имеет решающее значение для предотвращения загрязнения материала или снижения тепловой эффективности.

#### **6.4 Оборудование для последующей обработки и механической обработки**

Оборудование для постобработки и механической обработки используется для устранения остаточных напряжений в процессе подготовки, корректировки свойств материала и достижения точных размеров формовки. Это оборудование должно обладать высокой точностью и износостойкостью, чтобы выдерживать высокую твёрдость и композитные свойства прутков из вольфрамовой меди.

Оборудование для последующей обработки, в основном, включает печи для термической обработки и отжига. В печах для термической обработки используется водородная или вакуумная атмосфера, поддерживающая температуру от 800 до 1000 °С в течение 1–3 часов для устранения остаточных напряжений, возникающих при инфильтрации и охлаждении, что повышает прочность материала. В печах для отжига используется многоступенчатый нагрев и медленное охлаждение для оптимизации кристаллической структуры и уменьшения внутренних дефектов. Оборудование оснащено точной системой контроля температуры и устройством циркуляции атмосферы для обеспечения равномерности и безопасности процесса термической обработки.

Оборудование для обработки включает токарные станки с ЧПУ, фрезерные станки, шлифовальные станки и электроэрозионные станки. Токарные и фрезерные станки с ЧПУ используются для черновой и чистовой обработки, оснащены алмазным или твердосплавным инструментом для адаптации к высокой твердости прутков из вольфрамовой меди. Скорость резания и подачи должны строго контролироваться, чтобы избежать перегрева или

повреждения поверхности. Шлифовальные станки используются для достижения высокой чистоты поверхности ( $Ra < 0,2$  мкм ) и обработки сложных форм благодаря многокоординатному соединению. Электроэрозионные станки подходят для обработки прецизионных форм и мелких деталей, используя собственную проводимость прутков из вольфрамовой меди для эффективной электроэрозионной обработки. В процессе обработки система циркуляции СОЖ и устройство контроля износа инструмента играют ключевую роль в обеспечении точности обработки и срока службы оборудования.

В процессе управления процессом термообработки необходимо оптимизировать температурный профиль и время выдержки для предотвращения перегрева, который может привести к осаждению меди и потере прочности. Механическая обработка требует программирования станков с ЧПУ и онлайн-измерений для поддержания допусков размеров в пределах 0,01 мм. Выбор инструмента и согласование параметров резания имеют решающее значение для предотвращения микротрещин и шероховатости поверхности.

### 6.5 Оборудование для испытаний и контроля качества

Для оценки эксплуатационных характеристик и стабильности характеристик вольфрамово-медных прутков, чтобы гарантировать их соответствие проектным требованиям, используется испытательное и контрольное оборудование. Это оборудование позволяет проводить физический, химический и микроструктурный анализ на протяжении всего производственного процесса.

Оборудование для измерения плотности, включая архимедов денситометр и рентгеновский сканер плотности, используется для оценки плотности и пористости материала, гарантируя отсутствие незаполненных участков после инфильтрации. Прибор для измерения теплопроводности использует метод лазерной вспышки или метод теплового потока для измерения теплопроводности вольфрамово-медных прутков, проверяя их способность к терморегулированию. Прибор для измерения электропроводности измеряет удельное сопротивление с помощью четырёхточечного зонда, чтобы убедиться в соответствии материала требованиям электротехники. Оборудование для испытания механических свойств, включая универсальную испытательную машину и твердомер, используется для испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и твёрдость соответственно для оценки прочности и износостойкости материала.

Оборудование для микроструктурного анализа включает сканирующие электронные микроскопы (СЭМ), рентгеновские дифрактометры (РДА) и энергодисперсионную спектроскопию (ЭДС). СЭМ используются для наблюдения за распределением фаз вольфрама и меди, а также за межфазными связями, выявляя трещины или непроникающие области. РДА анализирует кристаллическую структуру и фазовый состав для обеспечения отсутствия примесных фаз. ЭДС исследует распределение элементов для проверки чистоты и однородности материала. Оборудование для неразрушающего контроля, такое как ультразвуковые дефектоскопы и рентгеновские компьютерные томографы, используется для выявления внутренних дефектов, таких как пузырьки или включения, что позволяет

гарантировать качество продукции.

При управлении технологическим процессом испытания должны охватывать весь процесс, от сырья до полуфабрикатов и готовых изделий. Анализаторы размера частиц и химический анализ используются для обеспечения качества на этапе обработки порошка. Онлайн-мониторинг температуры и вакуума на этапах спекания и инфильтрации контролирует стабильность процесса. Многомерное тестирование подтверждает стабильность характеристик на этапе готового продукта. Система управления данными регистрирует и анализирует результаты испытаний, позволяя оптимизировать производственные параметры и снизить уровень дефектов с помощью методов статистического контроля процесса (SPC).



## CTIA GROUP LTD Tungsten Copper Rod Introduction

### 1. Overview of Tungsten Copper Rod

Tungsten copper rod is composite materials produced by infiltrating high-purity tungsten powder with copper through a vacuum infiltration process. It possesses a unique microstructure that combines the high strength and high melting point of tungsten with the excellent electrical and thermal conductivity of copper. This results in a high-performance material with outstanding thermal stability, wear resistance, and electrical conductivity.

### 2. Characteristics of Tungsten Copper Rod

**High Thermal Conductivity:** The excellent thermal conductivity of copper ensures rapid heat dissipation, making it suitable for high-power devices and laser systems.

**High Strength and High-Temperature Resistance:** The stable mechanical properties of tungsten allow the material to remain reliable under extreme high-temperature conditions.

**Resistance to Arc Erosion:** The tungsten-copper composite structure provides exceptional resistance to arc erosion in electrical applications, significantly extending electrode service life.

**Low Thermal Expansion Coefficient:** Effectively reduces thermal stress and improves structural stability.

**Excellent Machinability:** Can be precisely fabricated into electrodes, heat sinks, or complex parts to meet diversified application requirements.

### 3. Performance Parameters of Tungsten Copper Rod

Product Name	Chemical Composition (%)		Physical and Mechanical Properties			
	Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (mΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
W50Cu	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
W60Cu	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
W70Cu	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
W80Cu	0.5	Balance	15.15	220	5	980
W90Cu	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

### 4. Advantages of Tungsten Copper Rod

**High-Performance Combination:** A balanced integration of strength, electrical conductivity, thermal conductivity, and high-temperature resistance.

**Customized Solutions:** Tungsten-to-copper ratio and dimensions can be tailored to meet specific customer requirements.

**Long Service Life and Stability:** Significantly reduces maintenance and replacement costs.

### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: tungsten-copper.com

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## Глава 7. Методы контроля и оценки качества вольфрамово-медного прутка

Вольфрамовая медь – это высокопроизводительный композитный материал, поэтому контроль и оценка качества прутков из вольфрамовой меди имеют решающее значение для обеспечения их стабильности и надежности в таких областях применения, как электротехника, электроника, аэрокосмическая промышленность и терморегулирование. Контроль качества включает в себя не только предварительный осмотр внешнего вида и размеров, но и комплексную оценку физических, механических, химических и микроструктурных свойств. Эти методы контроля, использующие сложное оборудование и стандартизированные процессы, полностью подтверждают соответствие прутков из вольфрамовой меди проектным требованиям, выявляют потенциальные дефекты и обеспечивают основу для оптимизации процесса. В этой главе систематически объясняются методы контроля и оценки качества прутков из вольфрамовой меди, подробно излагаются технические принципы, рабочие процедуры, требования к оборудованию и критические контрольные точки каждого этапа контроля. Также проводится сравнение с общепринятыми международными стандартами, предоставляя профессиональные рекомендации по производству и применению.

### 7.1 Проверка внешнего вида и размеров прутка из вольфрамовой меди

Внешний вид и размерный контроль являются первыми этапами контроля качества прутков из вольфрамовой меди, направленными на то, чтобы гарантировать, что качество поверхности и геометрическая точность материала соответствуют проектным спецификациям и закладывают основу для последующих эксплуатационных испытаний. Внешний осмотр фокусируется на целостности поверхности материала, проверяя наличие таких дефектов, как трещины, поры, включения, медные ванны или прижоги. Эти дефекты могут быть вызваны неравномерным прессованием, дефектами спекания или недостаточной инфильтрацией в процессе подготовки. Контроль обычно проводится путем визуального осмотра в сочетании с увеличительным стеклом или маломощным микроскопом. Оператору необходимо осмотреть поверхность прутка под ярким и равномерным источником света, чтобы убедиться в отсутствии дефектов, видимых невооруженным глазом. Для прутков из вольфрамовой меди сложной формы промышленные эндоскопы могут использоваться для осмотра внутренних поверхностей или труднодоступных мест.

Размерный контроль гарантирует соответствие геометрических параметров прутка из вольфрамовой меди (таких как диаметр, длина и округлость) требованиям к допускам, как правило, с использованием высокоточных измерительных инструментов. Микрометры и штангенциркули используются для измерения основных размеров с точностью до 0,01 мм. Для более высоких требований к точности координатно-измерительная машина (КИМ) использует многоточечный контактный датчик для сканирования трёхмерного профиля прутка и проверки соответствия допуска 0,005 мм. Лазерные сканеры быстро получают данные о профиле поверхности бесконтактным методом, что делает их пригодными для экспресс-контроля в условиях крупносерийного производства. Размерный контроль также должен учитывать незначительные деформации, которые могут возникнуть после

термообработки или механической обработки, поэтому требуются многократные измерения на разных этапах производства.

Визуальный контроль в процессе производства требует стандартизированной системы классификации дефектов. Например, критерии должны быть установлены на основе размера и типа дефекта (например, допустима длина трещины  $<0,1$  мм). Размерный контроль требует использования калиброванного измерительного оборудования для обеспечения повторяемости и точности, а также регистрации температуры окружающей среды для коррекции эффекта теплового расширения. Раннее выявление дефектов можно отследить до конкретных этапов производственного процесса, таких как недостаточное давление прессования или повышенная температура инфильтрации, что обеспечивает данные для оптимизации процесса.

## 7.2 Испытание физических свойств вольфрамово-медного прутка

Испытание физических свойств позволяет оценить плотность, теплопроводность, электропроводность и характеристики теплового расширения прутков из вольфрамовой меди, которые напрямую влияют на их эффективность в системах терморегулирования и электротехнике. При испытании плотности используется закон Архимеда: масса прутка в воздухе и жидкости измеряется с помощью высокоточных электронных весов. Расчётная плотность затем сравнивается с теоретическими значениями для оценки полноты пропитки и пористости. Плотность типичного прутка из вольфрамовой меди составляет от 11,8 до 17,0 г/см<sup>3</sup> в зависимости от содержания вольфрама (50–90 мас. %). Отклонения плотности могут указывать на наличие незаполненных областей или неравномерное распределение меди.

Испытание теплопроводности проводится методом лазерной вспышки с использованием оборудования, состоящего из лазерного измерителя теплопроводности и нагревательного устройства. Образец стержня нагревается лазерным импульсом, а инфракрасный детектор измеряет изменение температуры с обратной стороны с течением времени для расчета теплопроводности. Теплопроводность прутков из вольфрамовой меди обычно составляет от 180 до 250 Вт/м·К, в зависимости от содержания меди и однородности микроструктуры. Испытание электропроводности проводится методом четырехточечного зонда, измеряющего удельное сопротивление с помощью источника постоянного тока и вольтметра, которое затем преобразуется в электропроводность (обычно 30–50% IACS). Высокая электропроводность критически важна для электрических контактов, в то время как теплопроводность определяет эффективность теплоотвода.

Испытание коэффициента теплового расширения проводится с помощью термомеханического анализатора (ТМА). Образец нагревается при контролируемой температуре (20–1000 °С) и измеряется его линейное расширение. Коэффициент теплового расширения прутков из вольфрамовой меди обычно составляет от 6 до  $10 \times 10^{-6}$  / К, что хорошо согласуется с полупроводниковыми материалами и подходит для корпусирования электронных компонентов. Испытание требует контролируемой скорости нагрева (5–10 °С/мин), чтобы избежать влияния термических напряжений на результаты.

В ходе контроля процесса испытания физических свойств должны обеспечивать единообразие подготовки образцов, например, плоскостность поверхности и стандартизацию размеров. В условиях испытаний необходимо контролировать влажность и температуру для предотвращения внешних помех. Результаты анализируются статистическими методами (например, среднее значение и стандартное отклонение) для оценки однородности партии. Выбросы могут указывать на дефекты процесса, такие как чрезмерная пористость или неравномерное распределение фазы меди.

### 7.3 Испытание механических свойств прутка из вольфрамовой меди

Механические испытания позволяют оценить твёрдость, прочность, ударную вязкость и износостойкость прутков из вольфрамовой меди, обеспечивая их надёжность в условиях механических нагрузок. Для испытания на твёрдость используется прибор для измерения твёрдости по Виккерсу или Бринеллю, который прикладывает определённую нагрузку к поверхности прутка и измеряет размер отпечатка. Твёрдость прутков из вольфрамовой меди увеличивается с увеличением содержания вольфрама, обычно в диапазоне 100–250 HV, что делает их пригодными для износостойких изделий, таких как пресс-формы и электроды.

Испытание на прочность включает испытания на растяжение, сжатие и изгиб, которые проводятся на универсальной испытательной машине. Испытание на растяжение измеряет прочность на растяжение и относительное удлинение. Прочность на растяжение прутков из вольфрамовой меди обычно составляет 500–800 МПа, а относительное удлинение невелико (1–5%), что отражает их ограниченную пластичность. Испытание на сжатие оценивает прочность на сжатие и подходит для противовесов или компонентов высокого давления, обычно в диапазоне 800–1200 МПа. Испытание на трёхточечный изгиб измеряет прочность на изгиб и вязкость разрушения, отражая поведение материала при динамических нагрузках. Испытание требует использования стандартных образцов (например, образцов для растяжения, указанных в ASTM E8) и контроля скорости нагружения для обеспечения точности результатов.

Испытание на износостойкость проводится с помощью трибометра для измерения потери массы или глубины следа износа путем скольжения образца по стандартному абразиву (например, оксиду алюминия) под определенной нагрузкой. Испытание на ударопрочность проводится с помощью испытания падающим грузом или ударной установки Шарпи для оценки способности материала поглощать энергию удара. Износостойкость и ударопрочность прутков из вольфрамовой меди обусловлены твердостью вольфрама и вязкостью меди, что делает их пригодными для высокоскоростной резки или работы в условиях вибрации.

В ходе контроля процесса механические испытания должны гарантировать отсутствие дефектов на поверхности образца, а испытательное оборудование должно регулярно калиброваться. Результаты испытаний необходимо сопоставлять с микроструктурным анализом, чтобы определить, вызвано ли снижение эксплуатационных характеристик ненадёжным межфазным сцеплением или пористостью. Стабильность механических свойств

от партии к партии контролируется с помощью статистического контроля процесса (SPC) для обеспечения стабильного качества продукции.

#### 7.4 Испытание химических свойств вольфрамово-медного прутка

Химические испытания позволяют оценить стойкость к окислению, коррозионную стойкость и химическую стабильность вольфрамово-медных прутков при высоких температурах, обеспечивая их надежность в агрессивных химических средах. Испытание на стойкость к окислению проводится с помощью термогравиметрического анализатора (ТГА). Образец нагревают на воздухе или в кислороде (200–1000 °С), а затем измеряют изменение массы для оценки скорости окисления. Вольфрамово-медные прутки обладают превосходной стойкостью к окислению благодаря стабильному слою оксида вольфрама, который подавляет тенденцию к окислению медной фазы при высоких температурах.

Испытания коррозионной стойкости проводятся либо методом погружения, либо электрохимическими испытаниями. При иммерсионных испытаниях образцы помещаются в кислотную (например, серную кислоту), щелочную (например, гидроксид натрия) или соляной туман для наблюдения за степенью поверхностной коррозии и потерей массы. Электрохимические испытания используют потенциокINETическую поляризацию для измерения коррозионного потенциала и плотности коррозионного тока, оценивая устойчивость материала в коррозионной среде. Вольфрамово-медные стержни демонстрируют отличную коррозионную стойкость в различных химических средах, что делает их пригодными для использования в морской и химической промышленности.

Испытание на химическую стабильность при высоких температурах проводится в высокотемпературной печи. Образец подвергается воздействию определённого газа (например, азота, водорода или углекислого газа) для определения наличия фазового перехода или химической реакции. Высокотемпературная инертность вольфрамово-медных стержней обеспечивает их устойчивость в высокотемпературных реакторах или датчиках.

В ходе контроля процесса испытания химических свойств необходимо контролировать условия окружающей среды (такие как температура, влажность и чистота газа) для обеспечения воспроизводимости результатов. Поверхности образцов должны быть чистыми, чтобы предотвратить загрязнение, которое может повлиять на результаты испытания. Анализ результатов следует сочетать с микроструктурным анализом, чтобы оценить, способствуют ли примеси или дефекты на границе раздела ухудшению химических свойств.

#### 7.5 Микроструктура и структурный анализ вольфрамово-медного прутка

Микроструктурный и структурный анализ позволяет глубоко изучить микроскопические свойства вольфрамово-медных прутков, оценивая распределение фаз вольфрам-медь, межфазные связи и дефекты, что создает основу для оптимизации производительности. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) является основным инструментом для наблюдения за распределением и морфологией фаз вольфрам-медь и обнаружения непроницающих областей, трещин и включений. СЭМ, оснащенный режимом обратно

рассеянных электронов (ОРЭ), позволяет различать вольфрам (высокий атомный номер, светлые области) и медь (темные области), наглядно демонстрируя равномерность распределения фаз.

Рентгеновские дифрактометры (XRD) используются для анализа кристаллической структуры и фазового состава, подтверждая наличие объемно-центрированной кубической (ОЦК) структуры вольфрама и гранецентрированной кубической (ГЦК) структуры меди, а также выявляя образование примесных фаз (например, оксидов). Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) в сочетании со сканирующей электронной микроскопией (SEM) позволяет анализировать распределение элементов, оценивать соотношение вольфрама и меди и содержание примесей, а также обеспечивать чистоту материала. Дифракция обратно рассеянных электронов (EBSD) дополнительно предоставляет информацию об ориентации зерен и характеристиках интерфейса, раскрывая механизм связи вольфрама и меди.

Стереоскопические и оптические микроскопы используются для наблюдения при малом увеличении с целью оценки макроскопической структурной однородности и поверхностных дефектов. Рентгеновская компьютерная томография (КТ) используется для неразрушающего внутреннего структурного исследования с целью выявления скрытых пузырьков, трещин и неоднородностей. Анализ пористости выполняется с помощью ртутного интрузива или программного обеспечения для анализа изображений для количественной оценки распределения и связности пор.

Для контроля процесса микроскопический анализ требует использования стандартных процедур подготовки образцов (например, полировки и травления) во избежание артефактов. Результаты испытаний следует сопоставлять с данными физико-механических свойств для анализа влияния микроструктуры на макроскопические свойства. Аномальные структуры (например, медные включения или пористость) можно связать с дефектами, возникшими в процессе инфильтрации или спекания, что служит основой для оптимизации.

## 7.6 Сравнение общепринятых международных стандартов и методов испытаний

Международные испытания вольфрамово-медных прутков проводятся в соответствии с рядом стандартизированных спецификаций, обеспечивающих сопоставимость и надёжность результатов испытаний. Ниже представлено сравнение основных международных стандартов и областей их применения:

### 1. Стандарты ASTM

- ASTM B702: Этот стандарт определяет методы испытаний химического состава, физических и механических свойств композиционных материалов на основе вольфрама и меди, подходящих для испытаний электрических контактов и радиаторов. Он включает требования к плотности, электропроводности, твёрдости и прочности на растяжение, уделяя особое внимание единообразию условий подготовки образцов и испытаний.
- ASTM E8: Стандарт испытаний на растяжение, применимый к испытаниям прочности и пластичности прутков из вольфрамовой меди, определяет размер образца и скорость

нагрузки.

- ASTM E384: Стандарт испытания на твердость по Виккерсу, подходящий для оценки твердости стержней из вольфрамовой меди, с особым акцентом на выбор индентора и контроль нагрузки.

## 2. Стандарты ИСО

- ISO 4499-2: Стандарт испытания на твердость твердого сплава, частично применимый к пруткам из вольфрамовой меди, определяет метод измерения твердости по Бринеллю и Виккерсу.

- ISO 3369: Стандарт испытания на плотность, использующий закон Архимеда, подходящий для оценки плотности прутков из вольфрамовой меди.

- ISO 6892-1: Стандарт испытаний на растяжение металлических материалов, применимый к испытаниям механических свойств при повышенных и комнатных температурах.

## 3. Китайский национальный стандарт (GB/T)

- GB/T 3458-2006: Технические условия для вольфрамового порошка, в которых указаны чистота, размер частиц и методы определения примесей в вольфрамовом порошке, косвенно влияющих на качество сырья для изготовления вольфрамовой медной катанки.

- GB/T 8320-2017: Стандарт на материалы для электрических контактов из сплава вольфрама и меди, охватывающий требования к испытаниям на проводимость, износостойкость и дугостойкость.

- GB/T 26038-2020: Стандарт на композиционные материалы на основе вольфрама, который определяет методы анализа плотности, теплопроводности и микроструктуры.

## 4. Другие стандарты

- JIS H 0502 (Япония): стандарт для испытаний износостойкости металлических материалов, применимый к оценке характеристик трения и износа прутков из вольфрамовой меди.

- DIN EN 623-4 (Европа): Стандарт испытаний на электропроводность электронных материалов, применимый к измерению удельного сопротивления стержней из вольфрамовой меди.

Сравнение методов:

Стандарты ASTM больше фокусируются на испытаниях для электрических и тепловых приложений, подчеркивая электро- и теплопроводность. Стандарты ISO являются более общими и применимы к различным металлическим композиционным материалам. Китайские стандарты, адаптированные к национальным условиям, включают подробные положения по сырью и контактным применениям. Для испытания плотности архимедов метод (ASTM, ISO) прост и эффективен, но рентгеновская компьютерная томография (GB/T) больше подходит для обнаружения внутренней пористости. Для механических испытаний методы испытаний на растяжение ASTM E8 и ISO 6892-1 схожи, но ISO делает акцент на высокотемпературных испытаниях. Для микроскопического анализа основными международными методами являются SEM и XRD, но EBSD более широко используется в ASTM и подходит для анализа интерфейса.

### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

При контроле процесса необходимо выбирать соответствующие стандарты в зависимости от условий применения. Например, для электрических контактов предпочтителен стандарт GB/T 8320, а для материалов радиаторов — ASTM B702. Калибровка испытательного оборудования и обучение операторов играют ключевую роль в обеспечении единообразного применения стандартов. Сравнение нескольких стандартов может оптимизировать процессы испытаний и повысить международное признание результатов.



## Глава 8 Стандарты и спецификации для вольфрамово-медного прутка

Вольфрамовая медная катанка, являющаяся высокопроизводительным композитным материалом, подпадает под действие строгих стандартов и правил по всему миру. Эти стандарты охватывают химический состав, физико-механические свойства материала, производственные процессы и методы испытаний, обеспечивая надежность и единообразие продукции в таких областях применения, как электротехника, электроника, аэрокосмическая промышленность и терморегулирование. Хотя системы стандартов в разных странах и регионах различаются в зависимости от промышленного контекста и требований к применению, все они направлены на обеспечение единых технических рекомендаций по производству, испытаниям и применению вольфрамовой медной катанки. В этой главе систематически излагаются соответствующие стандарты на вольфрамовую медную катанку в Китае, на международном уровне, в США, Европе и Японии, анализируются их требования, области применения и различия, а также проводится сравнительная оценка их применимости.

### 8.1 Национальные и отраслевые стандарты Китая для прутков из вольфрамовой меди

Национальные и отраслевые стандарты Китая содержат подробные технические характеристики производства и применения вольфрамово-медных прутков, сочетая в себе особенности китайской промышленности и охватывая сырье, производственные процессы, эксплуатационные испытания и контроль качества. Ниже перечислены основные

#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

применимые стандарты:

GB/T 3458-2006 Технические требования к вольфрамовому порошку: Настоящий стандарт определяет химический состав, распределение размеров частиц, насыпную плотность и содержание примесей в вольфрамовом порошке. Он применяется к контролю сырья при производстве вольфрамово-медных прутков. Стандарт требует чистоты не менее 99,95%, содержания кислорода менее 0,05 мас. % и размера частиц от 1 до 5 мкм, что гарантирует пригодность порошка для прессования и спекания. Он также определяет методы испытаний, такие как рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) для определения примесей и лазерный гранулометрический анализ.

GB/T 8320-2017 Материал для электрических контактов из сплава вольфрама и меди: Этот стандарт специально разработан для стержней из вольфрама и меди, используемых в качестве материалов для электрических контактов, и охватывает требования к химическому составу, электропроводности, износостойкости и дугостойкости. Стандарт устанавливает диапазон содержания вольфрама 50–90 мас. %, электропроводность не менее 30% по шкале IACS и диапазон твердости 100–250 HV. Методы испытаний включают измерение сопротивления четырёхточечным зондом, определение твердости по Виккерсу и испытание на дуговую эрозию. Стандарт применим к контактам высоковольтных выключателей и автоматических выключателей.

GB/T 26038-2020 Технические требования к композиционным материалам на основе вольфрама: Этот стандарт распространяется на композиционные материалы на основе вольфрама, включая вольфрамово-медные стержни, и устанавливает требования к эксплуатационным характеристикам, таким как плотность (11,8–17,0 г/см<sup>3</sup>), теплопроводность (180–250 Вт/м·К) и коэффициент теплового расширения (6–10×10<sup>-6</sup> / К). Стандарт также включает требования к микроструктурному анализу, подчеркивая равномерное распределение фазы вольфрама-меди и отсутствие значительной пористости. Методы испытаний включают определение архимедовой плотности, определение теплопроводности с помощью лазерной вспышки и наблюдение с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

YS/T 649-2016 Стандарт на сплав вольфрама и меди для цветной металлургии: Этот отраслевой стандарт регламентирует химический состав и обрабатываемость вольфрамово-медных прутков, определяя эксплуатационные характеристики сплавов с различным соотношением вольфрама и меди (например, W70Cu30 и W80Cu20). Он подходит для использования в электродах и теплоотводах. Стандарт требует шероховатости поверхности Ra < 0,2 мкм и допуска на размеры ±0,01 мм. Он также регламентирует методы химического анализа и механических испытаний.

Китайский стандарт ориентирован на практичность и технологичность производства, учитывая преимущества отечественного вольфрамового сырья, уделяя особое внимание чистоте сырья и электрическим характеристикам. Он подходит для электрических контактов

и терморегулирования. Строгие требования к контролю процесса и подробные методы испытаний обеспечивают чёткое руководство для крупносерийного производства.

## 8.2 Международные стандарты на прутки из вольфрамовой меди (ISO, ASTM, IEC и т. д.)

Международные стандарты устанавливают унифицированные требования к мировой торговле и применению вольфрамово-медных прутков. Они разрабатываются, главным образом, Международной организацией по стандартизации (ИСО), Международной электротехнической комиссией (МЭК) и другими организациями и охватывают свойства материалов и методы испытаний.

ISO 4499-2:2020 «Испытание твёрдости твёрдых сплавов»: Хотя этот стандарт в первую очередь ориентирован на твёрдые сплавы, он также частично применим к испытанию твёрдости вольфрамово-медных прутков. Он устанавливает методы измерения твёрдости по Виккерсу и Бринеллю, требует диапазона испытательной нагрузки от 5 до 100 кгс и обеспечивает точность размеров отпечатка. Стандарт уделяет особое внимание калибровке оборудования и подготовке поверхности образцов, что делает его пригодным для оценки износостойкости вольфрамово-медных прутков.

ISO 3369:2006 Плотность металлических материалов: Этот стандарт описывает архимедов метод измерения плотности и применим к оценке плотности вольфрамово-медных стержней. Для обеспечения точности измерений требуется, чтобы испытательная жидкость (например, деионизированная вода) была высокой чистоты и поддерживалась при температуре  $20 \pm 0,5$  °C. Этот стандарт подходит для проверки целостности процесса инфильтрации.

ISO 6892-1:2019, Испытания металлических материалов на растяжение: Настоящий стандарт устанавливает методы испытаний на растяжение при комнатной и повышенной температурах, применимые к испытаниям на прочность и относительное удлинение прутков из вольфрамовой меди. Образцы должны соответствовать стандартным размерам (например, цилиндрические образцы диаметром 6–12 мм) и скорости нагружения 0,5–2 мм/мин. Настоящий стандарт подходит для оценки характеристик материалов под действием механических напряжений.

IEC 60468:1974 Методы испытаний материалов электрических контактов: Этот стандарт регламентирует электропроводность и дугостойкость материалов электрических контактов и применим к вольфрамово-медным стержням, используемым в коммутационных устройствах. Он регламентирует испытания на сопротивление (четырёхточечным методом) и испытания на дугостойкость, требуя минимальной электропроводности 30% по шкале IACS. Дугостойкость проверяется посредством циклических испытаний.

Международные стандарты универсальны и обеспечивают совместимость с изделиями разных стран. Их методы испытаний научны и строги, что делает их пригодными для экспортной продукции и высокотехнологичных приложений. Стандарты ISO ориентированы

на общие испытания свойств материалов, в то время как стандарты IEC – на электрические характеристики, обеспечивая надежность вольфрамово-медных прутков в глобальном электрооборудовании.

### 8.3 Американские стандарты для вольфрамово-медных прутков (ASTM, ANSI, SAE)

Американские стандарты известны своей строгостью и практической направленностью. Они разработаны в основном Американским обществом по испытаниям и материалам (ASTM), Американским национальным институтом стандартов (ANSI) и другими организациями и широко применяются на североамериканском рынке и в аэрокосмической отрасли.

ASTM B702-93 (2019) Композитный материал на основе вольфрама и меди: Этот стандарт разработан специально для композиционных материалов на основе вольфрама и меди и охватывает требования к химическому составу, физическим и механическим свойствам. Он устанавливает содержание вольфрама 50–90 мас. %, плотность 11,8–17,0 г/см<sup>3</sup>, электропроводность 30–50% по шкале IACS и теплопроводность 180–250 Вт/м·К. Методы испытаний включают архимедовское измерение плотности, измерение сопротивления четырёхточечным зондом и измерение теплопроводности методом лазерной вспышки. Он применим к электрическим контактам и материалам для теплоотводов.

-ASTM E8/E8M-21 Испытание металлических материалов на растяжение: Настоящий стандарт регламентирует подготовку образцов, условия испытаний и методы обработки данных для испытаний на растяжение. Он применим к испытаниям на прочность (500–800 МПа) и относительное удлинение прутков из вольфрамовой меди. Поверхность образца должна быть без дефектов, температура испытания должна поддерживаться на уровне 23±2°C, а скорость нагружения должна составлять 0,015–0,05 мм/с.

-ASTM E384-17 Испытание на твёрдость по Виккерсу: Этот стандарт распространяется на испытания на твёрдость вольфрамово-медных прутков. Он устанавливает диапазон нагрузки от 0,1 до 100 кгс и точность измерения индентора ±0,5 мкм. Для обеспечения точности результатов испытательная поверхность должна быть отполирована до шероховатости Ra < 0,1 мкм.

-ANSI C63.2-2016 Испытания на электромагнитную совместимость: Хотя этот стандарт в первую очередь ориентирован на электромагнитное оборудование, он частично применяется к испытаниям на проводимость вольфрамовых медных стержней в качестве электродных материалов, подчеркивая низкое удельное сопротивление и дугостойкость, и подходит для радиолокационного и коммуникационного оборудования.

Американские стандарты ориентированы на требования к испытаниям в области электротехники и терморегулирования, с подробными методами испытаний и строгой калибровкой оборудования, подходящего для высокоточных и высокотехнологичных рынков. Стандарты ASTM широко используются в аэрокосмической и электронной промышленности, гарантируя, что вольфрамово-медные прутки соответствуют высоким эксплуатационным

требованиям.

#### **8.4 Европейские стандарты на вольфрамовые медные стержни (EN, DIN, BS)**

Европейские стандарты разработаны Европейским комитетом по стандартизации (EN), Немецкими промышленными стандартами (DIN) и Британским институтом стандартов (BS) с упором на эксплуатационные характеристики материалов и требования по охране окружающей среды и подходят для производства и применения прутков из вольфрамовой меди на рынке ЕС.

-EN 623-4:2004 Испытание электропроводности электронных материалов: Этот стандарт определяет метод испытания удельного сопротивления металлических композитных материалов, применимый к случаям использования вольфрамово-медных стержней в качестве электродов и контактов. Испытание требует использования метода четырёхточечного зонда, минимальной электропроводности 30% по шкале IACS и температуры окружающей среды 20–25 °C.

DIN EN ISO 6507-1:2018 Испытание на твёрдость по Виккерсу: Аналогично ASTM E384, этот стандарт распространяется на испытания твёрдости вольфрамово-медных прутков. Он устанавливает диапазон нагрузки от 0,2 до 100 кгс, требует высокой плоскостности поверхности и точности измерения отпечатка  $\pm 0,5$  мкм. Этот стандарт делает акцент на повторяемости испытаний и подходит для оценки износостойкости.

EN ISO 6892-1:2019 Испытание металлических материалов на растяжение: Настоящий стандарт, соответствующий стандартам ISO, устанавливает методы испытаний на прочность на растяжение и относительное удлинение прутков из вольфрамовой меди. Он подходит для оценки механических свойств. Требуется высокая точность обработки образцов, а калибровка испытательной машины должна соответствовать ISO 7500-1.

-BS EN 1011-1:2009 Совместимость сварочных материалов: Эта часть стандарта применяется к испытаниям сварочных характеристик вольфрамово-медных прутков и других металлов, определяет методы испытаний прочности соединения и коррозионной стойкости и подходит для применения в композитных конструкциях.

Европейские стандарты ориентированы на защиту окружающей среды и безопасность, а методы испытаний в полной мере соответствуют международным стандартам, что делает их пригодными для изделий из вольфрамовой меди, экспортируемых в ЕС. Стандарты DIN и EN широко используются в машиностроении и электронной промышленности, подчеркивая надежность и постоянство характеристик материалов.

#### **8.5 Японский стандарт (JIS) для вольфрамово-медного прутка**

Японские промышленные стандарты (JIS) содержат технические спецификации для производства и применения прутков из вольфрамовой меди в сочетании с высокими требованиями к точности японского производства, подходящими для электронной

промышленности и производства пресс-форм.

-JIS H 0502:1986 Испытание на износостойкость металлических материалов: Настоящий стандарт устанавливает методы испытаний на трение и износ, применимые к оценке износостойкости вольфрамово-медных прутков, используемых в качестве форм или электродов. Используются стандартные абразивы (например, оксид алюминия), испытательные нагрузки составляют 5–50 Н, измеряется потеря массы или глубина следов износа.

-JIS Z 2241:2011 Испытание металлических материалов на растяжение: Настоящий стандарт регламентирует подготовку образцов и условия испытаний на растяжение. Он распространяется на испытания на прочность и относительное удлинение прутков из вольфрамовой меди. Размеры образцов должны соответствовать требованиям стандарта, а скорость нагружения должна составлять 0,5–2 мм/мин.

-JIS G 0557:2006 Метод испытания на твердость: Этот стандарт распространяется на испытания на твердость по Виккерсу и Бринеллю, устанавливает процесс измерения твердости прутков из вольфрамовой меди, требует, чтобы испытываемая поверхность была полированной, а диапазон нагрузки составляет 0,1–100 кгс .

-JIS C 2520:1999 Медные сплавы для электротехнических целей: Хотя этот стандарт в первую очередь касается медных сплавов, он частично применяется к испытанию на проводимость стержней из вольфрамовой меди, определяет метод измерения удельного сопротивления и требует, чтобы проводимость соответствовала требованиям применения в электрических контактах.

Стандарты JIS ориентированы на требования к испытаниям в высокоточном производстве и электронике. Их простые и эффективные методы испытаний хорошо подходят для японского рынка прецизионной обработки и электроники. Они делают акцент на калибровке оборудования и стандартизации операций для обеспечения надёжных результатов испытаний.

## **8.6 Сравнительный анализ и анализ применимости стандартов на вольфрамовую медную катанку**

Стандарты разных стран и регионов имеют как сходства, так и различия в требованиях к эксплуатационным характеристикам и методам испытаний вольфрамово-медных прутков. Сравнительный анализ помогает выбрать подходящие характеристики и оптимизировать производство и применение.

Общие черты:

Химический состав: Все стандарты требуют высокой чистоты и низкого содержания примесей в прутках из вольфрамовой меди. Например, стандарты GB/T 3458 и ASTM B702 устанавливают чистоту вольфрама  $\geq 99,95\%$ , а меди —  $\geq 99,99\%$ .

- Физические свойства: плотность, электропроводность и теплопроводность являются

основными параметрами испытаний. В стандартах ISO 3369, ASTM B702 и GB/T 26038 используются метод Архимеда и метод лазерной вспышки с аналогичными диапазонами испытаний (плотность 11,8–17,0 г/см<sup>3</sup>, теплопроводность 180–250 Вт/м·К).

- Механические свойства: Испытание на растяжение и испытание на твердость являются общими требованиями. Стандарты ISO 6892-1, ASTM E8 и JIS Z 2241 в значительной степени согласованы с точки зрения конструкции образцов и скорости нагружения.

-Методы испытаний: СЭМ, рентгеновская дифракция и метод четырехточечного зонда являются признанными на международном уровне методами испытаний микроструктуры и проводимости, обеспечивающими сопоставимость результатов.

разница:

-Фокус: китайский стандарт (GB/T 8320) делает акцент на характеристиках электрических контактов, ASTM B702 фокусируется на терморегулировании и применении в аэрокосмической отрасли, IEC 60468 фокусируется на электрических характеристиках, а JIS H 0502 подчеркивает износостойкость.

Условия испытаний: стандарты ASTM и ISO предъявляют более строгие требования к высокотемпературным испытаниям (например, температура испытаний на растяжение может достигать 1000 °C), в то время как китайские стандарты больше ориентированы на характеристики при комнатной температуре. Стандарты JIS предъявляют более высокие требования к шероховатости поверхности ( $Ra < 0,1$  мкм), что делает их пригодными для прецизионной обработки.

- Требования по охране окружающей среды: европейские стандарты (EN) подчеркивают экологическую совместимость и возможность вторичной переработки материалов, а также устанавливают ограничения на опасные вещества, в то время как другие стандарты менее строгие.

- Область применения: стандарты ASTM и ISO больше подходят для международной торговли, стандарты GB/T подходят для отечественного крупномасштабного производства, а стандарты JIS подходят для высокоточных электронных приложений.

Анализ применимости:

-Электрические контакты: рекомендуются стандарты GB/T 8320 или IEC 60468, уделяющие особое внимание проводимости и дугостойкости, подходят для высоковольтных выключателей и автоматических выключателей.

-Материал тепловода: более применимы стандарты ASTM B702 и GB/T 26038, подчеркивающие соответствие теплопроводности и коэффициента теплового расширения, подходящие для корпусирования микроэлектроники.

- Изготовление пресс-форм: предпочтительны стандарты JIS H 0502 и DIN EN ISO 6507-1, особое внимание уделяется износостойкости и твердости, подходят для электроэрозионной обработки и штампов.

-Авиационно-космическая промышленность: подходят стандарты ASTM B702 и EN 623-4, подчеркивающие высокую термостойкость и совместимость, пригодные для сопел ракет и компонентов противовеса.

-Международная торговля: стандарты ISO и ASTM более универсальны и облегчают

трансграничную сертификацию и доступ на рынки.

На практике производители должны выбирать стандарты, исходя из целевых рынков и условий применения, оптимизируя процессы за счёт интеграции нескольких стандартов. Например, вольфрамовые медные прутки, экспортируемые в ЕС, должны соответствовать экологическим требованиям стандарта EN, в то время как для отечественных электрических контактов приоритет отдаётся GB/T 8320. Межстандартные испытания могут повысить конкурентоспособность продукции, но для обеспечения сопоставимых результатов необходимо уделять внимание единообразию калибровки оборудования и условий испытаний.



## Глава 9 Оптимизация производительности вольфрамово-медного стержня

Вольфрамово-медные прутки, являясь высокоэффективным композитным материалом, широко используются в таких отраслях, как электроника, аэрокосмическая промышленность и энергетика, благодаря своей превосходной электро- и теплопроводности, высокой прочности и стойкости к высоким температурам. Однако различные области применения предъявляют различные требования к характеристикам вольфрамово-медных прутков. Поэтому оптимизация состава сплава, процесса термообработки, микроструктуры, а также износостойкости и коррозионной стойкости может значительно повысить их эксплуатационные характеристики в конкретных условиях. В этой главе будут подробно рассмотрены принципы, методы и практические результаты применения этих методов оптимизации.

### 9.1 Влияние соотношения легирующих элементов на свойства

Вольфрамово-медные прутки изготавливаются из вольфрама (W) и меди (Cu) методом порошковой металлургии. Их свойства напрямую зависят от соотношения вольфрама и меди.

#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

Содержание вольфрама обычно составляет от 50% до 90%, а содержание меди варьируется соответственно. Различное соотношение оказывает существенное влияние на физические, механические и термические свойства материала.

#### 9.1.1 Соотношение вольфрама и меди, электро- и теплопроводность

Медь является отличным электрическим и тепловым проводником, в то время как вольфрам имеет плохую электро- и теплопроводность. Электро- и теплопроводность прутков из вольфрамовой меди значительно увеличиваются с увеличением содержания меди. Например, пруток из вольфрамовой меди с содержанием Cu 30% (W70Cu30) имеет электропроводность приблизительно 45% IACS (Международный стандарт отожженной меди), тогда как при содержании Cu 10% (W90Cu10) электропроводность падает приблизительно до 20% IACS. Теплопроводность также демонстрирует аналогичную тенденцию: W70Cu30 достигает приблизительно 200 Вт/(м·К), а W90Cu10 падает приблизительно до 150 Вт/(м·К). Поэтому прутки из вольфрамовой меди с более высоким содержанием меди часто выбирают для применений, требующих высокой электро- и теплопроводности, таких как электронные корпуса и электродные материалы.

#### 9.1.2 Соотношение вольфрама и меди и механические свойства

Вольфрам обладает высокой твердостью и плотностью (19,25 г/см<sup>3</sup>), тогда как медь имеет более низкую твердость (твердость по Бринеллю приблизительно 50 НВ). Увеличение содержания вольфрама значительно повышает твердость, прочность на сжатие и износостойкость вольфрамово-медных прутков. Например, W80Cu20 может достигать твердости более 200 НВ, в то время как W60Cu40 имеет твердость всего около 120 НВ. Однако увеличение содержания меди улучшает ударную вязкость и прочность материала. Поэтому высокое содержание вольфрама предпочтительно в приложениях, требующих высокой твердости и износостойкости (например, в качестве материалов для пресс-форм); в то время как соответствующее увеличение содержания меди рекомендуется для приложений, требующих определенной степени ударной вязкости (например, в качестве электрических контактов).

#### 9.1.3 Соотношение вольфрама и меди и коэффициент теплового расширения

Вольфрам имеет низкий коэффициент теплового расширения (приблизительно  $4,5 \times 10^{-6} / \text{K}$ ), в то время как медь имеет более высокий коэффициент теплового расширения (приблизительно  $16,5 \times 10^{-6} / \text{K}$ ). Коэффициент теплового расширения вольфрамово-медного прутка увеличивается с увеличением содержания меди. Например, W80Cu20 имеет коэффициент теплового расширения приблизительно  $8,0 \times 10^{-6} / \text{K}$ , что делает его подходящим для сочетания с керамикой или полупроводниковыми материалами (такими как SiC и AlN) для корпусирования электроники. Оптимизация соотношения вольфрама и меди обеспечивает размерную стабильность в высокотемпературных средах и снижает отказы, вызванные тепловым напряжением.

#### 9.1.4 Стратегия оптимизации

Выбор соотношения, ориентированного на потребности заказчика: выберите подходящее

соотношение вольфрама и меди в зависимости от требований к применению. Например, для корпусирования электронных компонентов предпочтительны сплавы W70Cu30 или W75Cu25, обеспечивающие баланс теплопроводности и теплового расширения; для электроэрозионных электродов выбирают сплав W80Cu20, обеспечивающий высокую твёрдость и износостойкость.

Легирование микроэлементами: добавляя микроколичества таких элементов, как серебро (Ag) или никель (Ni), можно дополнительно оптимизировать проводимость или механические свойства, однако необходимо тщательно контролировать количество легирования, чтобы избежать снижения стойкости к высоким температурам.

Оптимизация синергии процесса: оптимизацию соотношений легирующих элементов необходимо сочетать с последующими процессами спекания и термической обработки, чтобы обеспечить однородность и стабильность свойств материала.

## 9.2 Термическая обработка и повышение производительности

Термическая обработка является важным способом повышения эксплуатационных характеристик вольфрамово-медных прутков. Контролируя процессы нагрева, изоляции и охлаждения, можно улучшить микроструктуру материала, устранить внутренние напряжения и повысить эксплуатационные характеристики.

### 9.2.1 Отжиг

Отжиг, обычно проводимый при температуре от 800 до 1000 °C в инертной атмосфере (например, азоте или аргоне), устраняет внутренние напряжения, возникающие в процессе порошковой металлургии, и повышает пластичность материала. Например, отжиг вольфрамово-медного прутка W80Cu20 при температуре 900 °C в течение двух часов может повысить его прочность на разрыв с 600 до 650 МПа, одновременно увеличивая пластичность примерно на 10%. Отжиг также улучшает однородность медной фазы, тем самым повышая электро- и теплопроводность.

### 9.2.2 Обработка на твердый раствор и старение

Для прутков из вольфрамовой меди, содержащих микродобавки, можно использовать комбинацию обработки в растворе (быстрый нагрев выше 1000 °C с последующей закалкой) и старения (выдержка при температуре от 400 до 600 °C в течение нескольких часов). Обработка в растворе равномерно распределяет добавки (например, никель) по всей матрице, а старение способствует образованию фазовых выделений, тем самым повышая твёрдость и прочность. Например, сплав W75Cu25 с добавлением 0,5% никеля после старения в растворе может достичь повышения твёрдости на 15% и значительного повышения износостойкости.

### 9.2.3 Горячее изостатическое прессование (ГИП)

Горячее изостатическое прессование (ГИП) — это высокотемпературный процесс под высоким давлением (приблизительно 1000°C, 100 МПа), который значительно снижает пористость и увеличивает плотность вольфрамово-медных прутков. Например, ГИП

позволяет увеличить плотность сплава W80Cu20 с 95% до более чем 99%, а также повысить теплопроводность примерно на 10% и прочность на сжатие примерно на 20%. ГИП особенно хорошо подходит для производства высококачественных корпусных материалов для электронных устройств.

#### 9.2.4 Примечания

**Контроль температуры:** Чрезмерно высокая температура термообработки может привести к плавлению или испарению медной фазы, что ухудшает свойства материала. Требуется точный контроль температуры и времени выдержки.

**Защита атмосферы:** во время термообработки требуется инертная или восстановительная атмосфера (например, водород), чтобы предотвратить окисление.

**Стоимость процесса:** Современные процессы термообработки, такие как горячее изостатическое прессование, относительно дороги, поэтому стоимость и производительность необходимо оценивать на основе требований к применению.

### 9.3 Взаимосвязь между микроструктурой и свойствами

Эксплуатационные характеристики прутка из вольфрамовой меди тесно связаны с его микроструктурой, включая размер и распределение частиц вольфрама, непрерывность фазы меди и состояние связей на границе раздела.

#### 9.3.1 Размер и распределение частиц вольфрама

Размер частиц вольфрама обычно составляет от 1 до 10 мкм. Более мелкие частицы повышают прочность и ударную вязкость материала, но также несколько снижают его электро- и теплопроводность. Размер частиц вольфрама можно оптимизировать, контролируя размер порошка и условия спекания в процессе порошковой металлургии. Например, сплав W70Cu30, полученный с использованием ультрадисперсного вольфрамового порошка зернистостью 1 мкм, может достигать предела прочности на разрыв 700 МПа, что примерно на 15% выше, чем у материала, полученного с использованием вольфрамового порошка зернистостью 5 мкм.

#### 9.3.2 Связь между микроструктурой и свойствами

Медная фаза образует непрерывную сеть внутри вольфрамово-медного прутка, напрямую влияя на его электро- и теплопроводность. Температура и давление спекания являются ключевыми факторами, влияющими на непрерывность фазы меди. Например, сплав W75Cu25, спеченный при 1350 °C, демонстрирует более равномерную сеть медной фазы, увеличивая электропроводность примерно на 8%. Кроме того, жидкофазное спекание способствует проникновению меди и улучшает межфазные связи, однако следует избегать перегрева, который может привести к потере фазы меди.

#### 9.3.3 Состояние связывания интерфейса

Качество интерфейса вольфрам-медь имеет решающее значение для эксплуатационных характеристик материала. Дефекты интерфейса (такие как поры или трещины) могут снизить теплопроводность и механическую прочность. Оптимизация процесса спекания (например,

вакуумное спекание или добавление следовых количеств поверхностно-активных веществ) может улучшить межфазную связь. Например, добавление 0,1% кобальта улучшает смачиваемость на границе вольфрам-медь, снижает межфазное сопротивление и увеличивает теплопроводность примерно на 5%.

#### 9.3.4 Технология анализа микроструктуры

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ): используется для наблюдения распределения частиц вольфрама и фазовой сетки меди.

Рентгеновская дифракция (XRD): анализ кристаллической структуры и фазового состава.

Дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD): изучение связей на границе раздела и ориентации зерен.

Благодаря этим технологиям можно точно оценить влияние микроструктуры на производительность, что создает основу для оптимизации процесса.

### 9.4 Оптимизация износостойкости и коррозионной стойкости

Вольфрамово-медные прутки часто должны обладать превосходной износостойкостью и коррозионной стойкостью в условиях высоких температур, давления и агрессивных сред. Оптимизация этих свойств может продлить срок службы материала и повысить его надежность.

#### 9.4.1 Оптимизация износостойкости

Высокая твердость вольфрама обеспечивает ему естественную износостойкость, но мягкость медной фазы может привести к более интенсивному износу материала в условиях сильного трения. Стратегии оптимизации включают:

Увеличьте содержание вольфрама: W85Cu15 имеет лучшую износостойкость, чем W70Cu30, и подходит для электродов электроэрозионной обработки.

Упрочнение поверхности: Ионное азотирование или лазерная наплавка поверхности позволяют создать твердый поверхностный слой (например, WC или TiN), который может повысить износостойкость в 2-3 раза.

Добавление твердой фазы: Добавление небольшого количества карбида вольфрама (W) или оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) к вольфрамово-медному стержню может значительно повысить износостойкость, однако следует соблюдать осторожность, чтобы не снизить проводимость.

#### 9.4.2 Оптимизация коррозионной стойкости

Вольфрамово-медные стержни могут выйти из строя во влажной или кислой среде из-за коррозии медной фазы. Методы оптимизации включают:

Покрытие поверхности: гальваническое никелирование или химическое осаждение из паровой фазы (CVD) используется для нанесения коррозионно-стойкого слоя (например, CrN или DLC) для эффективного предотвращения электрохимической коррозии медной фазы.

Модификация легирования: добавление следовых количеств серебра или хрома может

повысить коррозионную стойкость медной фазы. Например, время коррозионной стойкости сплава W75Cu24Ag1 в солевом тумане увеличивается примерно на 30%.

Оптимизация микроструктуры: за счет увеличения плотности и уменьшения пористости можно сократить путь проникновения агрессивных сред, тем самым повысив коррозионную стойкость.

#### 9.4.3 Комплексный вариант оптимизации

В аэрокосмической отрасли вольфрамовые стержни из меди часто используются в высокотемпературных электрических контактах. Применение сплава W80Cu20, ГИП-обработки и поверхностного покрытия CrN позволяет добиться следующих улучшений характеристик:

Износостойкость: коэффициент трения снижен на 20%, а износ уменьшен на 50%.

Коррозионная стойкость: В условиях высоких температур и влажности срок службы увеличивается в 2 раза.

Проводимость: поддерживается на уровне выше 40% IACS, что соответствует требованиям к электрическим характеристикам.

#### 9.4.4 Примечания

Баланс производительности: Оптимизация износостойкости и коррозионной стойкости может привести к снижению электропроводности, что необходимо оценивать в зависимости от потребностей применения.

Контроль затрат: Процессы нанесения покрытий на поверхность и аддитивные процессы являются дорогостоящими, и их экономическая целесообразность требует оценки.

Адаптация к окружающей среде: различные коррозионные среды (такие как кислотные, щелочные или высокотемпературные) требуют целенаправленных решений по оптимизации.

Подвести итог

Благодаря оптимизации состава легирующих элементов, процессов термообработки, микроструктуры, а также износостойкости и коррозионной стойкости, вольфрамово-медные прутки могут соответствовать различным требованиям. Корректировка состава легирующих элементов требует баланса электропроводности, теплопроводности и механических свойств; процессы термообработки могут значительно повысить плотность и прочность; оптимизация микроструктуры является основой повышения эксплуатационных характеристик; а повышение износостойкости и коррозионной стойкости продлевает срок службы материала. На практике оптимальное решение для оптимизации необходимо выбирать с учетом эксплуатационных требований, стоимости процесса и экологических факторов.



## Глава 10 Руководство по выбору и использованию вольфрамово-медного прутка

Вольфрамово-медный пруток – это высокоэффективный композитный материал, который широко используется в таких отраслях, как электроника, аэрокосмическая промышленность, энергетика и производство пресс-форм. Его эксплуатационные характеристики напрямую влияют на качество и срок службы конечного продукта. Правильный выбор вольфрамово-медного прутка, обеспечение его безопасного хранения и транспортировки, правильное использование и обслуживание, а также эффективное решение распространённых проблем в процессе эксплуатации – залог его полной эффективности.

### 10.1 Как правильно выбрать вольфрамовый медный пруток

Выбор подходящего вольфрамово-медного прутка требует всестороннего анализа условий применения, эксплуатационных требований, бюджета и надежности поставщика. Ниже подробно описывается, как сделать выбор с разных точек зрения.

#### 10.1.1 Уточнение сценариев применения и требований к производительности

Характеристики вольфрамово-медных прутков зависят от соотношения вольфрама и меди, процесса производства и последующей обработки. Требования к эксплуатационным характеристикам в различных условиях применения существенно различаются. Ниже приведены распространённые условия применения и рекомендуемые характеристики вольфрамово-медных прутков:

Корпуса электронных компонентов должны обладать высокой электро- и теплопроводностью, а также соответствовать коэффициенту теплового расширения керамических или полупроводниковых материалов. Рекомендуемые материалы включают W70Cu30 или W75Cu25 с электропроводностью около 40–45% по шкале IACS, коэффициентом теплового

расширения около  $7,5-8,5 \times 10^{-6} / \text{K}$  и теплопроводностью около  $190-200 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ . Эти характеристики подходят для силовых модулей, СВЧ-устройств и радиаторов для микросхем. Электроды для электроэрозионной обработки (ЭЭО): Эти электроды должны обладать высокой твёрдостью, износостойкостью и термостойкостью, чтобы противостоять дуговой эрозии. Рекомендуемые варианты включают W80Cu20 или W85Cu15, обладающие твёрдостью более 200 НВ и превосходной износостойкостью, что делает их пригодными для обработки сложных пресс-форм.

Электрические контакты: требуется баланс электропроводности и стойкости к дуговой эрозии, а также сохранение определённой степени прочности для выдерживания механических ударов. Рекомендуется использовать сплав W75Cu25, обладающий как электропроводностью (примерно 40% IACS), так и прочностью на разрыв (примерно 650 МПа).

Авиационно-космические компоненты: требуется высокая термостойкость и низкий коэффициент теплового расширения. Рекомендуется сплав W90Cu10 с коэффициентом теплового расширения всего  $6,5 \times 10^{-6} / \text{K}$ , подходящий для изготовления патрубков и соединителей в условиях высоких температур.

Медицинское оборудование: например, мишени для рентгеновских лучей, требующие высокой плотности и износостойкости. Рекомендуется использовать сплав W80Cu20 с плотностью около  $15,5 \text{ г/см}^3$  и высокой износостойкостью.

При выборе пользователю необходимо указать следующие параметры:

Требования к электро- и теплопроводности: выбирайте материалы с более высоким содержанием меди на основе требований к электро- и теплопроводности.

Механические свойства: отдайте приоритет твердости, прочности и ударной вязкости.

Соответствие коэффициенту теплового расширения: убедитесь, что коэффициент теплового расширения аналогичен коэффициенту теплового расширения соседних материалов, чтобы избежать разрушения из-за термических напряжений.

Размер и форма: Подтвердите, что диаметр, длина и точность обработки прутка соответствуют проектным требованиям.

### 10.1.2 Понимание спецификаций и стандартов вольфрамово-медных прутков

Вольфрамово-медные прутки обычно классифицируются по содержанию вольфрама (например, W70Cu30, W80Cu20). Диаметр прутков обычно варьируется от 3 до 100 мм, а длина — от 100 до 300 мм. Конкретные характеристики следует выбирать на основе каталога продукции, предоставленного поставщиком. Международные стандарты (например, ASTM B702) и национальные стандарты (например, GB/T 8320) устанавливают чёткие требования к химическому составу, плотности, электропроводности и механическим свойствам вольфрамово-медных прутков. Например:

W70Cu30: Плотность около  $13,8-14,2 \text{ г/см}^3$ , проводимость около 40-45% IACS.

W80Cu20: Плотность около  $15,1-15,5 \text{ г/см}^3$ , твердость около 200-220 НВ.

Пользователям следует запрашивать у поставщиков отчёты об испытаниях материалов,

чтобы гарантировать соответствие продукции требованиям. Кроме того, следует обращать внимание на допуски (например, допуск на диаметр  $\pm 0,05$  мм) для обеспечения точности обработки.

### 10.1.3 Оценка надежности поставщика

Выбор надёжного поставщика — залог качества вольфрамово-медных прутков. Ниже приведены основные критерии оценки поставщиков:

**Производственные возможности:** Убедитесь, что поставщик располагает современным оборудованием для порошковой металлургии и установками для термической обработки, такими как печи для вакуумного спекания или оборудование для горячего изостатического прессования (ГИП).

**Сертификация качества:** предпочтение отдается поставщикам, имеющим сертификат ISO 9001 или отраслевые сертификаты, например AS9100 для аэрокосмической отрасли.

**Возможности поставок:** оцените уровни запасов поставщиков и циклы поставок, чтобы гарантировать соблюдение графиков проекта.

**Техническая поддержка:** Качественный поставщик должен предоставлять консультации по выбору материалов, индивидуальную обработку и послепродажное обслуживание.

**Цена и экономическая эффективность:** Исходя из необходимости обеспечения качества, сравните предложения нескольких поставщиков и выберите того, который предлагает наилучшую экономическую эффективность.

Рекомендуется проверять надежность поставщика путем проведения инспекций на месте, испытаний образцов или изучения отзывов клиентов. Например, вы можете попросить поставщика предоставить образцы стали W80Cu20 для испытаний на электропроводность и твердость.

### 10.1.4 Индивидуальные требования

Для особых случаев применения могут потребоваться вольфрамово-медные прутки, изготовленные по индивидуальному заказу, например, с особым диаметром, покрытием поверхности или легированием микроэлементами. При изготовлении на заказ необходимо указать следующие требования:

**Индивидуальные размеры:** нестандартные характеристики, такие как диаметр 50 мм и длина 500 мм.

**Обработка поверхности:** например, никелирование или полировка для повышения коррозионной стойкости или качества поверхности.

**Добавки:** например, добавление 0,5% Ni для повышения прочности или добавление Ag для улучшения проводимости.

Адаптация часто требует согласования параметров процесса с поставщиками и может привести к увеличению стоимости и сроков поставки. Рекомендуется четко определить показатели эффективности и критерии приемки в контракте.

## CTIA GROUP LTD Tungsten Copper Rod Introduction

### 1. Overview of Tungsten Copper Rod

Tungsten copper rod is composite materials produced by infiltrating high-purity tungsten powder with copper through a vacuum infiltration process. It possesses a unique microstructure that combines the high strength and high melting point of tungsten with the excellent electrical and thermal conductivity of copper. This results in a high-performance material with outstanding thermal stability, wear resistance, and electrical conductivity.

### 2. Characteristics of Tungsten Copper Rod

**High Thermal Conductivity:** The excellent thermal conductivity of copper ensures rapid heat dissipation, making it suitable for high-power devices and laser systems.

**High Strength and High-Temperature Resistance:** The stable mechanical properties of tungsten allow the material to remain reliable under extreme high-temperature conditions.

**Resistance to Arc Erosion:** The tungsten-copper composite structure provides exceptional resistance to arc erosion in electrical applications, significantly extending electrode service life.

**Low Thermal Expansion Coefficient:** Effectively reduces thermal stress and improves structural stability.

**Excellent Machinability:** Can be precisely fabricated into electrodes, heat sinks, or complex parts to meet diversified application requirements.

### 3. Performance Parameters of Tungsten Copper Rod

Product Name	Chemical Composition (%)		Physical and Mechanical Properties			
	Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (mΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
W50Cu	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
W60Cu	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
W70Cu	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
W80Cu	0.5	Balance	15.15	220	5	980
W90Cu	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

### 4. Advantages of Tungsten Copper Rod

**High-Performance Combination:** A balanced integration of strength, electrical conductivity, thermal conductivity, and high-temperature resistance.

**Customized Solutions:** Tungsten-to-copper ratio and dimensions can be tailored to meet specific customer requirements.

**Long Service Life and Stability:** Significantly reduces maintenance and replacement costs.

### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: tungsten-copper.com

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

### 10.1.5 Баланс стоимости и производительности

Цена на прутки из вольфрамовой меди увеличивается с увеличением содержания вольфрама. Например, W90Cu10 может быть на 30–50% дороже, чем W70Cu30. Более того, такие процессы, как горячее изостатическое прессование (ГИП) или нанесение покрытия на поверхность, могут дополнительно увеличить стоимость. Пользователям следует выбирать соответствующую спецификацию, исходя из своего бюджета и требований к производительности. Например, если бюджет ограничен, для применений, где износостойкость менее важна, можно выбрать W75Cu25 вместо W80Cu20.

### 10.1.6 Рекомендации по процессу покупки

Анализ спроса: уточните сценарии применения и требования к производительности, а также перечислите ключевые параметры (такие как проводимость и твердость).

Исследование рынка: соберите предложения и информацию о продуктах от нескольких поставщиков и сравните характеристики и качество.

Тестирование образцов: приобретите небольшое количество образцов для тестирования производительности, чтобы проверить, соответствуют ли они требованиям.

Подписание договора: уточнение спецификаций, количества, сроков поставки и стандартов качества.

Приемка и обратная связь: После получения товара проводится проверка качества, регистрируются данные о производительности и поставщикам сообщается о возможных улучшениях.

## 10.2 Меры предосторожности при хранении и транспортировке

Хранение и транспортировка вольфрамово-медных прутков напрямую влияют на их эксплуатационные характеристики и срок службы. Ниже приводится подробное описание условий хранения, требований к упаковке и мер предосторожности при транспортировке.

### 10.2.1 Среда хранения

Медная фаза в вольфрамово-медном прутке легко подвергается воздействию влажной, окислительной или коррозионной среды, поэтому условия хранения должны строго контролироваться:

Температура и влажность: В помещении для хранения следует поддерживать температуру 15–25 °C и относительную влажность ниже 60%. Высокая температура и влажность могут вызвать окисление меди с образованием оксида меди ( CuO ), что снижает электропроводность.

Сухое и влагонепроницаемое место: рекомендуется поместить в место хранения осушитель (например, силикагель) или использовать герметичную упаковку. Для длительного хранения вольфрамовый прутки из меди можно поместить в вакуумный герметичный пакет.

Избегайте химической коррозии: храните вдали от кислотных, щелочных или соленых веществ, чтобы предотвратить электрохимическую коррозию медной фазы. Например, на складах, расположенных вблизи моря, необходимо уделять особое внимание воздействию соляного тумана.

Предотвращение образования пыли и очистка: Место хранения должно быть чистым, чтобы предотвратить прилипание пыли или частиц к поверхности прутка и влияние на точность последующей обработки.

Для прутков из вольфрамовой меди, хранящихся в течение длительного времени, рекомендуется проверять состояние поверхности каждые 6 месяцев и при необходимости очищать и переупаковывать.

### 10.2.2 Требования к упаковке

Вольфрамово-медные прутки имеют высокую плотность (13–17 г/см<sup>3</sup>), хрупкие и легко повреждаются при ударах. При упаковке следует учитывать следующие моменты:

Защитные материалы: Используйте пенопласт, пузырчатую плёнку или деревянные коробки, чтобы стержни не соприкасались друг с другом. Рекомендуется упаковывать каждый стержень отдельно.

Антиокислительная упаковка: добавьте в упаковку влагозащитное средство или запечатайте ее вакуумом, чтобы предотвратить окисление меди.

Четкая маркировка: на упаковке четко указаны соотношение вольфрама и меди (например, W80Cu20), технические характеристики (диаметр, длина), номер партии и меры предосторожности при хранении для удобства управления и прослеживаемости.

Конструкция, устойчивая к сжатию: для транспортировки больших объемов используйте устойчивые к сжатию деревянные ящики или металлические рамы, чтобы гарантировать, что прутки не будут раздавлены при штабелировании.

### 10.2.3 Меры предосторожности при транспортировке

При транспортировке вольфрамовый медный пруток должен быть защищен от вибрации, ударов и изменений окружающей среды:

Меры по предотвращению вибрации: используйте амортизирующие прокладки или пружинные фиксирующие устройства, чтобы гарантировать, что штанги не будут перемещаться во время транспортировки.

Контроль температуры: Избегайте транспортировки при экстремально высоких (>50°C) или низких (<-10°C) температурах, чтобы предотвратить термический стресс или хладноломкость.

Способ транспортировки: Автомобильный транспорт подходит для перевозки на короткие расстояния, а морской или воздушный транспорт рекомендуется для междугородних или международных перевозок. Убедитесь, что упаковка соответствует международным стандартам транспортировки (например, ISTA).

Страхование транспортировки: Для дорогостоящих прутков из вольфрамовой меди рекомендуется приобрести страховку транспортировки, чтобы снизить риск утраты.

Процесс приемки: Проверьте целостность упаковки при получении, сверьте технические характеристики и количество, а также своевременно свяжитесь с поставщиком, если обнаружите какие-либо повреждения или окисление.

#### 10.2.4 Хранение и транспортировка в особых случаях

Вольфрамовые медные прутки для использования в аэрокосмической отрасли: их необходимо хранить в защищенном от пыли помещении, упаковывать в антистатические материалы и перевозить в контейнере с постоянной температурой и влажностью.

Вольфрамовые медные стержни для медицинских изделий: хранение и транспортировка должны соответствовать стандартам для медицинских изделий (например, ISO 13485), чтобы избежать любого загрязнения.

Транспортировка в условиях высоких температур: При транспортировке в тропические районы требуются дополнительные меры изоляции и защиты от влаги.

Благодаря стандартизированному управлению хранением и транспортировкой срок годности вольфрамовых медных прутков может быть эффективно продлен, а их эксплуатационные характеристики не ухудшатся.

#### 10.3 Техническое обслуживание и уход во время использования

Вольфрамово-медные прутки требуют регулярного обслуживания и ухода во время использования для поддержания их эксплуатационных характеристик и продления срока службы. Ниже приведены подробные инструкции по всем трем этапам обработки, эксплуатации и хранения.

##### 10.3.1 Техническое обслуживание во время обработки

Вольфрамово-медные прутки часто подвергаются точению, фрезерованию, сверлению или электроэрозионной обработке. При обработке необходимо учитывать следующие моменты:

Выбор инструмента: используйте твердосплавный или алмазный инструмент, чтобы избежать износа, вызванного недостаточной твердостью инструментов из обычной стали. Рекомендуется использовать инструмент твердостью выше HRC 60.

Использование охлаждающей жидкости: Используйте охлаждающую жидкость на водной или масляной основе во время обработки, чтобы снизить температуру резания и предотвратить размягчение медной фазы и осыпание частиц вольфрама. Следите за чистотой охлаждающей жидкости, чтобы избежать попадания коррозионных примесей.

Параметры обработки: Контролируйте скорость резания (например, 100-200 м/мин) и скорость подачи (например, 0,05-0,2 мм/об), чтобы избежать чрезмерного напряжения, приводящего к образованию трещин в прутке.

Защита поверхности: Немедленно удалите с поверхности остатки охлаждающей жидкости и металлической стружки после обработки, чтобы предотвратить химическую коррозию. Рекомендуется протирать поверхность спиртом или нейтральным моющим средством.

##### 10.3.2 Техническое обслуживание во время эксплуатации

Вольфрамовые медные стержни необходимо регулярно проверять и обслуживать в зависимости от условий их использования (например, в качестве электродов, электрических контактов или радиаторов):

Проверка поверхности: Регулярно проверяйте поверхность прутка на наличие следов окисления, износа или дуговой эрозии. Например, если на поверхности электрода электроэрозионного станка появляются заметные следы эрозии, его следует немедленно заменить.

Чистка и уход: Для удаления загрязнений с поверхности используйте ультразвуковую очистку или мягкую ткань. Избегайте использования кислотных или щелочных моющих средств. Частота чистки должна определяться в зависимости от условий эксплуатации (например, раз в месяц).

Мониторинг температуры: в условиях высоких температур (например, в электрических контактах) следите за тем, чтобы рабочая температура не превышала температуру размягчения меди (приблизительно 800 °C), чтобы предотвратить ухудшение характеристик.

Меры защиты от коррозии: Во влажных или коррозионных средах регулярно наносите антикоррозийное масло или временное покрытие (например, тонкий слой силиконового масла) для защиты медной фазы.

### 10.3.3 Хранение и повторное использование

Неиспользованные вольфрамовые медные прутки или переработанные остатки необходимо хранить надлежащим образом:

Краткосрочное хранение: поместить в герметичный влагонепроницаемый пакет в сухом и проветриваемом месте.

Долгосрочное хранение: используйте вакуумную упаковку или упаковку, заполненную азотом, и регулярно проверяйте состояние поверхности.

Переработка остаточных материалов: Остаточные материалы могут быть переработаны и использованы в сценариях с низкими требованиями (например, в качестве экспериментальных образцов), но их эксплуатационные характеристики необходимо проверить, чтобы увидеть, соответствуют ли они требованиям.

### 10.3.4 Записи о техническом обслуживании

Рекомендуется вести записи о техническом обслуживании, чтобы фиксировать время, состояние и меры по обработке при каждой проверке, очистке и замене. Например:

Дата: 20 августа 2025 г.

Содержание проверки: проверка поверхности электрода W80Cu20

Статус: Незначительная абляция, проводимость снижена на 5%

Меры: Ультразвуковая очистка, планируется замена в следующем месяце.

Благодаря стандартизированному техническому обслуживанию и уходу срок службы вольфрамовых медных прутков может быть значительно продлен, а интенсивность отказов снижена.

## 10.4 Распространенные проблемы и решения

В процессе эксплуатации вольфрамово-медных прутков могут возникнуть различные

проблемы. Ниже приводится краткое описание распространённых проблем и способов их решения, которые помогут пользователям быстро с ними справиться.

#### 10.4.1 Поверхностное окисление

На поверхности вольфрамового медного стержня появляется зелёный или чёрный слой оксида (  $\text{CuO}$  или  $\text{Cu}_2\text{O}$  ), и проводимость снижается.

Причина: Среда хранения или использования влажная или подвержена воздействию высокотемпературной окисляющей атмосферы.

Решение:

Протрите поверхность разбавленной уксусной кислотой (5%) или раствором лимонной кислоты, чтобы удалить оксидный слой, затем промойте спиртом и высушите.

Оптимизируйте условия хранения, поддерживайте влажность ниже 60% и используйте герметичную упаковку.

При высокотемпературных применениях добавьте защиту инертным газом (например, азотом или аргоном).

#### 10.4.2 Дуговая эрозия

Описание проблемы: На поверхности электродов электроэрозионной обработки или электрических контактов появляются абляционные язвы, влияющие на точность обработки или рабочие характеристики контактов.

Причина: Энергия дуги слишком высокая или износостойкость вольфрамово-медного стержня недостаточна.

Решение:

Уменьшите энергию разряда электроэрозионной обработки и оптимизируйте длительность импульса и ток (например, длительность импульса 50-100 мкс ).

Выбирайте материалы с высоким содержанием вольфрама (например, W85Cu15) для повышения износостойкости.

Регулярно проверяйте поверхность электрода и вовремя ремонтируйте или заменяйте его.

#### 10.4.3 Обработка трещин

Описание проблемы: В процессе обработки в прутке из вольфрамовой меди появляются микротрещины, что приводит к снижению прочности.

Причина: Чрезмерная скорость резания, износ инструмента или внутренние дефекты материала.

Решение:

Уменьшите скорость резки (например, 80–150 м/мин) и используйте новый инструмент.

Проверьте качество материала и попросите поставщиков предоставить отчеты о неразрушающем испытании (например, ультразвуковом).

Для снижения технологического напряжения применяется предварительная термообработка (200–300 °C).

#### 10.4.4 Снижение проводимости

Описание проблемы: Проводимость вольфрамово-медного прутка значительно снижается

после определенного периода использования, что влияет на электрические характеристики. Причины: окисление фазы меди, микроструктурные изменения или загрязнение поверхности. Решение:

Для очистки поверхности от загрязнений используйте ультразвуковую очистку или спиртовые салфетки.

Проверьте рабочую среду и избегайте высоких температур или коррозионной атмосферы.

Если проводимость продолжает снижаться, рассмотрите возможность замены стержня на новый или проведения термической обработки для восстановления его характеристик.

#### 10.4.5 Несоответствие теплового расширения

Описание проблемы: Вольфрамовый медный стержень и смежные материалы (например, керамика) отслаиваются или трескаются под воздействием высокой температуры.

Причина: разница в коэффициентах теплового расширения слишком велика.

Решение:

Соотношение вольфрама и меди выбирается заново, например W80Cu20 (коэффициент теплового расширения около  $8,0 \times 10^{-6}$  / К), чтобы соответствовать керамике (например, AlN, около  $4,5 \times 10^{-6}$  / К).

Добавьте буферный слой (например, тонкий слой Ni или Mo) на границе раздела для снятия термического напряжения.

Оптимизируйте рабочую температуру и старайтесь поддерживать ее ниже 600°C.

#### 10.4.6 Деформация при хранении

Описание проблемы: Вольфрамовый медный стержень, хранившийся в течение длительного времени, слегка погнулся или деформировался.

Причина: Неравномерное усилие при хранении или неправильная упаковка.

Решение:

Проверьте способы хранения, чтобы убедиться, что прутки хранятся горизонтально, избегая давления при штабелировании.

Для распределения веса используйте специальную подставку или деревянный ящик.

При незначительных деформациях снятие напряжений может быть достигнуто путем низкотемпературного отжига (около 600°C).

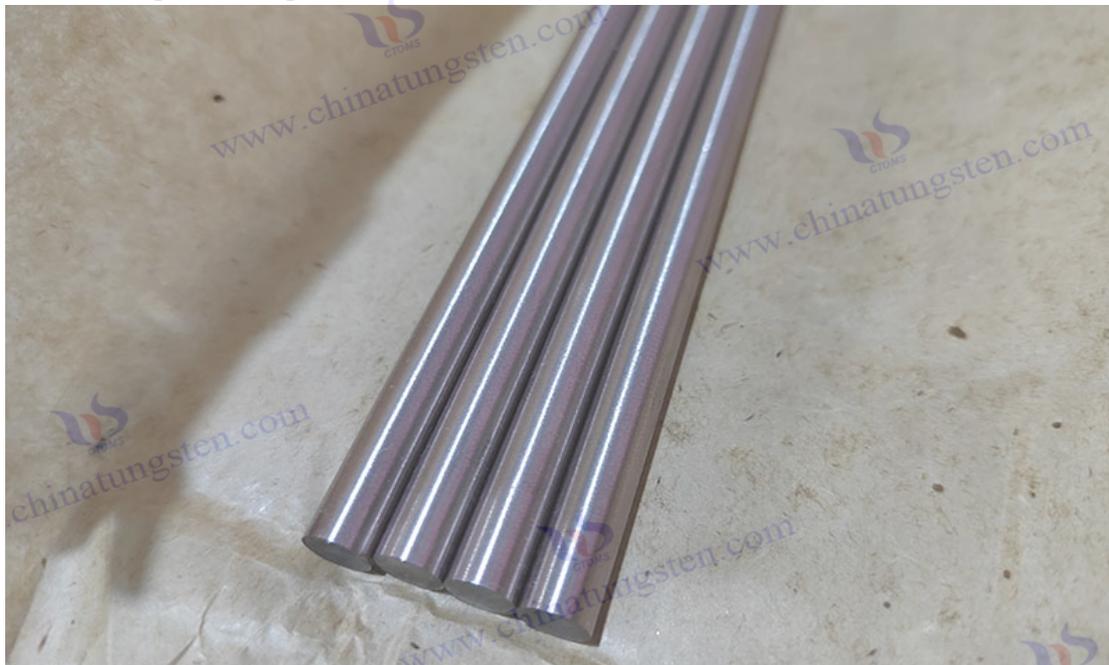
#### 10.4.7 Анализ случая

Пример 1: На заводе по упаковке электроники использовались вольфрамовые медные прутки W70Cu30, и было обнаружено снижение их теплопроводности при высоких температурах. Проверка выявила сильное окисление поверхности. Решение: вакуумная упаковка для хранения и ультразвуковая очистка перед использованием, что восстановило теплопроводность более чем на 95%.

Случай 2: Электроды W80Cu20, изготовленные производителем пресс-форм, подверглись быстрому износу во время электроэрозионной обработки. Анализ выявил чрезмерную энергию разряда. Решение: Уменьшение тока до 50 А и длительности импульса до 80 мкс позволило удвоить срок службы электродов.

Подвести итог

Выбор и применение вольфрамово-медных прутков – это систематический процесс, включающий несколько этапов, включая анализ потребностей, выбор поставщика, хранение и транспортировку, техническое обслуживание и решение проблем. Выбор подходящего вольфрамово-медного прутка требует уточнения требований к его эксплуатационным характеристикам с учетом условий применения и проведения комплексной оценки на основе технических характеристик и надежности поставщика. Хранение и транспортировка требуют строго контролируемых условий окружающей среды для предотвращения окисления и физических повреждений. Стандартизированная обработка и техническое обслуживание в процессе эксплуатации могут продлить срок службы прутка и сохранить его эксплуатационные характеристики. Своевременное внедрение целенаправленных мер для решения распространенных проблем может эффективно снизить частоту отказов. Благодаря научному подходу к управлению и эксплуатации вольфрамово-медные прутки могут оптимально работать в различных сложных условиях.



## Глава 11. Рынок и тенденции развития вольфрамово-медного прутка

Вольфрамово-медные прутки, являясь высокопроизводительным композитным материалом, широко используются в электротехнике, электронике, аэрокосмической промышленности, системах терморегулирования и других областях благодаря своей превосходной электро- и теплопроводности, стойкости к высоким температурам и механической прочности. С развитием мировых промышленных технологий и быстрым развитием новых отраслей промышленности рыночный спрос на вольфрамово-медные прутки продолжает расти, цепочка поставок продолжает совершенствоваться, а технологические инновации способствуют оптимизации её производительности и расширению сферы применения. В данной главе подробно анализируется структура глобальной цепочки поставок вольфрамово-медных материалов, распределение и особенности рыночного спроса, а также ключевые

[Заявление об авторских правах и юридической ответственности](#)

тенденции будущего развития, охватывающие высокопроизводительное, экологичное производство и новые области применения.

### 11.1 Обзор глобальной цепочки производства вольфрамowo-медных материалов

Цепочка производства вольфрамowo-медных материалов включает в себя множество звеньев: от добычи сырья до использования конечного продукта, включая добычу ресурсов, подготовку материалов, переработку и производство, испытания и сертификацию, а также конечное использование. Верхний этап производственной цепочки, в основном, включает добычу и очистку вольфрамовых и медных руд. Ресурсы вольфрама сосредоточены в Китае, России, Австралии и Канаде. На долю Китая приходится около 80% мировых запасов вольфрама и 60% мирового производства, что делает его основным поставщиком вольфрамового порошка. Ресурсы меди широко распространены, основными производителями являются Чили, Перу и Австралия. Технология электролитического производства меди хорошо развита, что обеспечивает ее достаточный запас.

Средний сегмент включает подготовку и обработку вольфрамowo-медных прутков. Вольфрамовый порошок извлекается из вольфрамата или триоксида вольфрама водородным восстановлением, а электролитическая медь получается электрохимическим рафинированием. В процессе подготовки используются технологии порошковой металлургии, включая прессование, спекание и вакуумную инфильтрацию. Основное оборудование, такое как вакуумные печи для спекания и инфильтрационные печи, требует высокоточного контроля для обеспечения качества продукции. Процесс обработки включает прецизионную механическую обработку, термическую обработку и модификацию поверхности для соответствия требованиям к размерам и эксплуатационным характеристикам в различных условиях применения. Компании среднего сегмента в основном являются специализированными производителями материалов.

Сегмент переработки охватывает конечное применение вольфрамowo-медных прутков, включая электрические контакты, электронные компоненты, компоненты для аэрокосмической промышленности, радиаторы и производство пресс-форм. Каналы сбыта включают прямые поставки производителям оборудования (таким как Siemens и GE) и доступ к международным рынкам через трейдеров. Испытания и сертификация являются важнейшими элементами цепочки поставок, требующими соответствия международным стандартам (таким как ASTM B702 и GB/T 8320) для обеспечения конкурентоспособности продукции на мировом рынке.

Отраслевая цепочка в высшей степени глобализована: Китай доминирует в сырье и производстве, в то время как Европа, США и Япония обладают технологическими преимуществами в области высокотехнологичных приложений и точной обработки. Сотрудничество в отраслевой цепочке делает акцент на стабильности цепочки поставок и технологической интеграции, при этом ключевыми проблемами являются колебания цен на сырье и экологические нормы.

## CTIA GROUP LTD Tungsten Copper Rod Introduction

### 1. Overview of Tungsten Copper Rod

Tungsten copper rod is composite materials produced by infiltrating high-purity tungsten powder with copper through a vacuum infiltration process. It possesses a unique microstructure that combines the high strength and high melting point of tungsten with the excellent electrical and thermal conductivity of copper. This results in a high-performance material with outstanding thermal stability, wear resistance, and electrical conductivity.

### 2. Characteristics of Tungsten Copper Rod

**High Thermal Conductivity:** The excellent thermal conductivity of copper ensures rapid heat dissipation, making it suitable for high-power devices and laser systems.

**High Strength and High-Temperature Resistance:** The stable mechanical properties of tungsten allow the material to remain reliable under extreme high-temperature conditions.

**Resistance to Arc Erosion:** The tungsten-copper composite structure provides exceptional resistance to arc erosion in electrical applications, significantly extending electrode service life.

**Low Thermal Expansion Coefficient:** Effectively reduces thermal stress and improves structural stability.

**Excellent Machinability:** Can be precisely fabricated into electrodes, heat sinks, or complex parts to meet diversified application requirements.

### 3. Performance Parameters of Tungsten Copper Rod

Product Name	Chemical Composition (%)		Physical and Mechanical Properties			
	Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HB)	Resistivity (mΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
W50Cu	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
W60Cu	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
W70Cu	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
W80Cu	0.5	Balance	15.15	220	5	980
W90Cu	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

### 4. Advantages of Tungsten Copper Rod

**High-Performance Combination:** A balanced integration of strength, electrical conductivity, thermal conductivity, and high-temperature resistance.

**Customized Solutions:** Tungsten-to-copper ratio and dimensions can be tailored to meet specific customer requirements.

**Long Service Life and Stability:** Significantly reduces maintenance and replacement costs.

### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: tungsten-copper.com

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## 11.2 Структура рыночного спроса и анализ доли применения

В связи с глобальной индустриализацией, развитием электронной промышленности и новых энергетических технологий рыночный спрос на вольфрамово-медные прутки диверсифицирован. Структура рынка может быть разделена на следующие основные сегменты:

– Электротехника и электроника (примерно 45% рынка): вольфрамовые медные прутки доминируют на рынке, применяясь в высоковольтных выключателях, автоматических выключателях и электродах для электроэрозионной обработки. Высокая электропроводность и стойкость к дуговой эрозии делают их идеальным материалом для электрических контактов и электродов, особенно в оборудовании для передачи и распределения электроэнергии. Например, глобальная модернизация электросетей и внедрение интеллектуальных сетей стимулируют спрос на высокопроизводительные контактные материалы. Кроме того, быстро растёт спрос на вольфрамовые медные прутки, используемые в качестве радиаторов и электродов в корпусной микроэлектронике, особенно в системах связи 5G, силовых полупроводниках и радиолокационных системах.

– Аэрокосмическая и оборонная промышленность (примерно 20% рынка): применение вольфрамово-медных прутков в соплах ракетных двигателей, компонентах противовесов и сердечниках бронестойких снарядов обусловлено аэрокосмической и оборонной промышленностью. Стремительное развитие мировой аэрокосмической отрасли, в частности, коммерческие космические программы SpaceX и Blue Origin, привело к росту спроса на термостойкие и высокоплотные материалы. Спрос на высокоэффективные электроды и материалы для терморегулирования также растёт в оборонном секторе, особенно в радиолокационном оборудовании и системах радиоэлектронной борьбы.

Устройства терморегулирования и теплоотвода (доля рынка около 20%). С ростом популярности мощных электронных устройств (таких как лазеры и IGBT-модули) и новых источников энергии, использование вольфрамово-медных стержней в качестве радиаторов и теплоотводящих подложек стремительно расширяется. Высокая теплопроводность и совместимость с полупроводниковыми материалами по коэффициенту теплового расширения делают их незаменимыми в центрах обработки данных, системах управления аккумуляторными батареями электромобилей и базовых станциях 5G. Глобальный спрос на эффективные решения для теплоотвода стимулирует быстрый рост в этом секторе.

- Машиностроение и производство пресс-форм (доля рынка около 10%): вольфрамово-медные прутки используются в электроэрозионных штампах, штампах и режущих инструментах благодаря своей высокой твёрдости и износостойкости. Глобальная тенденция к автоматизации и прецизионному производству привела к росту спроса на высокопроизводительные материалы для пресс-форм, особенно в автомобильной промышленности и производстве медицинских приборов.

Другие секторы (доля рынка около 5%): К этим секторам относятся новые области

применения, такие как защита от медицинского излучения, компоненты электрических контактов для фотоэлектрических преобразователей и грузики для клюшек для гольфа. Несмотря на небольшую долю рынка, эти секторы обладают значительным потенциалом роста, особенно в новых отраслях энергетики и медицины.

Что касается регионального распределения рыночного спроса, то на Азиатско-Тихоокеанский регион (в первую очередь Китай) приходится более 50% мирового рынка, а на Северную Америку и Европу – около 20%. Остальная часть рынка приходится на Южную Америку, Африку и Ближний Восток. Драйверами роста спроса являются глобальный энергетический переход, модернизация электронной промышленности и увеличение инвестиций в аэрокосмическую отрасль. К проблемам относятся колебания цен на сырье (например, цены на вольфрам существенно зависят от спроса и предложения) и давление экологических норм на производственные издержки.

### 11.3 Тенденции будущего развития вольфрамово-медного прутка

Дальнейшее развитие вольфрамово-медных прутков обусловлено технологическими инновациями, рыночным спросом и требованиями устойчивого развития. Ниже анализируются тенденции развития в трёх аспектах: высокая производительность, экологичность и новые области применения.

#### 11.3.1 Высокая производительность и нанотехнологии

Высокая производительность является основным направлением развития технологии вольфрамово-медного прутка, направленным на улучшение электропроводности, теплопроводности, прочности и износостойкости материала для удовлетворения потребностей мощных электронных устройств следующего поколения и применения в экстремальных условиях. Нанотехнологии являются ключевым путем к достижению высокой производительности. Использование наноразмерных вольфрамовых и медных порошков значительно улучшает микроструктуру материала. Большая удельная площадь поверхности наночастиц усиливает межчастичные связи, снижает температуру спекания и повышает плотность и однородность вольфрамово-медного прутка. Например, нано-вольфрамовый порошок (размер частиц <math><100\text{ нм}</math>) может образовывать более тонкую структуру скелета, повышая эффективность инфильтрации медной фазы, тем самым улучшая теплопроводность и механическую прочность.

Другим направлением повышения производительности является разработка функционально-градиентных материалов (FGM). Введение градиентного распределения соотношений вольфрама и меди в вольфрамово-медном стержне позволяет оптимизировать эксплуатационные характеристики отдельных участков. Например, высокое содержание вольфрама на поверхности повышает износостойкость, а высокое содержание меди в стержне улучшает теплопроводность, что делает его пригодным для использования в электродах и радиаторах в сложных условиях эксплуатации. Кроме того, добавление микроэлементов (таких как цирконий и хром) улучшает смачиваемость на границе раздела вольфрам-медь, что дополнительно повышает эксплуатационные характеристики материала. Современные

методы подготовки, такие как плазменное спекание (SPS) и микроволновое спекание, сократили время обработки и повысили однородность микроструктуры, что способствует индустриализации высокопроизводительных вольфрамово-медных стержней.

### 11.3.2 Зеленая подготовка и устойчивое развитие

Экологичное производство и устойчивое развитие являются долгосрочными тенденциями в отрасли производства прутков из вольфрамовой меди, отвечая на глобальные требования по защите окружающей среды и эффективности использования ресурсов. Традиционные процессы порошковой металлургии потребляют много энергии и производят отработанный газ и жидкие отходы. Экологичное производство снижает воздействие на окружающую среду за счет оптимизации процессов и оборудования. Например, технология низкотемпературного спекания снижает температуру спекания на 20-30% за счет добавления активаторов или использования нанопорошков, тем самым снижая потребление энергии. Система улавливания хвостовых газов в процессе вакуумной инфильтрации может улавливать летучие пары меди и сокращать выбросы. Технология переработки отходов также становится все более важной. Благодаря химической очистке и переработке отходы прутков из вольфрамовой меди в процессе производства могут быть преобразованы обратно в порошок высокой чистоты, обеспечивая рециркуляцию ресурсов.

Другим ключевым направлением устойчивого развития является обеспечение устойчивых поставок сырья. Вольфрам, будучи редким металлом, сталкивается с дефицитом ресурсов, что обуславливает повышенное внимание к экологичным технологиям добычи и исследованиям альтернативных материалов (например, композитов на основе молибдена). Производители также обязаны соблюдать международные экологические нормы, такие как Директива ЕС RoHS и Регламент REACH, которые ограничивают использование опасных веществ и гарантируют соответствие вольфрамово-медных прутков экологическим стандартам. Внедрение интеллектуальных производственных систем, оптимизирующих параметры процесса посредством мониторинга и анализа данных в режиме реального времени, дополнительно повышает энергоэффективность и качество продукции.

### 11.3.3 Новые направления применения

Области применения вольфрамово-медных прутков расширяются благодаря технологическому прогрессу, охватывая такие развивающиеся отрасли, как новая энергетика, здравоохранение и аддитивное производство. В секторе новой энергетики растёт спрос на вольфрамово-медные прутки для компонентов электрических контактов в фотоэлектрических инверторах и преобразователях ветряных турбин, где их высокая проводимость и коррозионная стойкость способствуют эффективному преобразованию энергии. В системах управления аккумуляторными батареями электромобилей вольфрамово-медные прутки служат в качестве теплоотводящих подложек, эффективно отводя тепло от мощных аккумуляторных батарей и продлевая срок их службы.

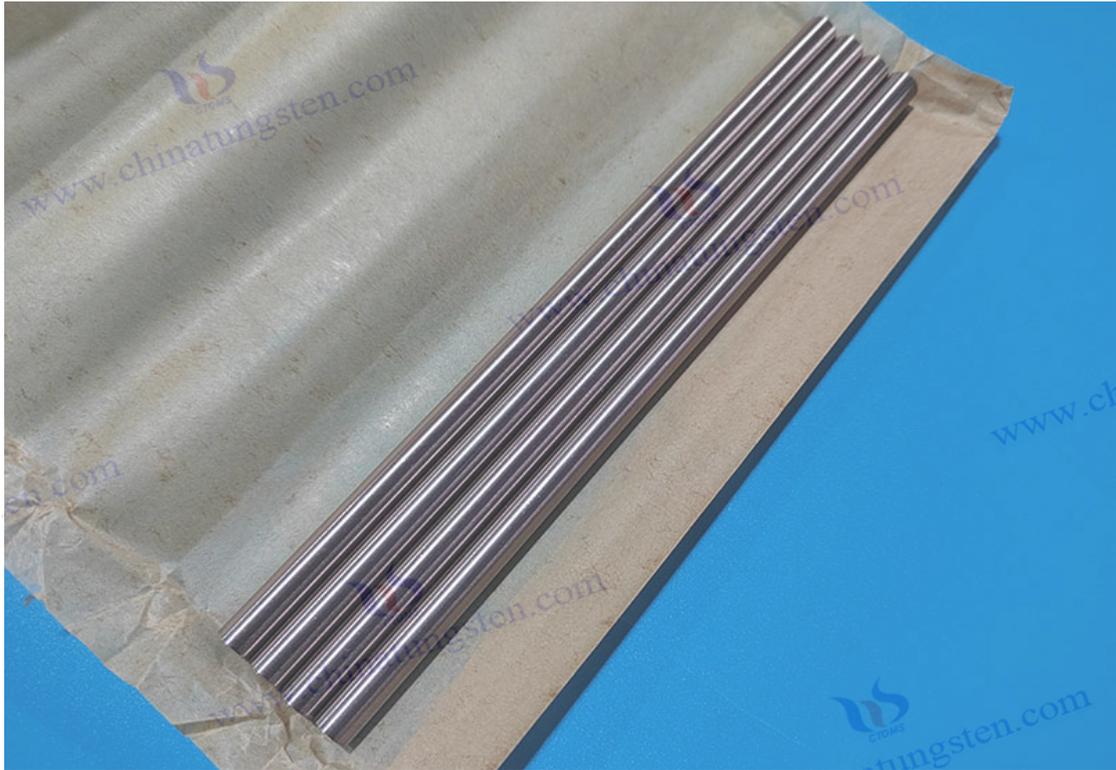
В медицинской сфере радиационно-защитные свойства вольфрамово-медных прутков делают их перспективными для использования в защитном оборудовании от рентгеновского

и гамма-излучения, например, в качестве экранирующих компонентов для коллиматоров компьютерных томографов и оборудования для лучевой терапии. Высокая плотность и высокая производительность обработки позволяют изготавливать изделия сложной формы, отвечающие высоким требованиям к точности медицинского оборудования.

Аддитивное производство (3D-печать) – ещё одно перспективное направление. Используя технологию лазерного или электронно-лучевого осаждения расплава для печати вольфрамового каркаса в сочетании с вакуумной инфильтрацией, можно изготавливать компоненты из вольфрамово-медного сплава со сложной геометрией. Этот метод позволяет преодолеть ограничения традиционной обработки и подходит для мелкосерийного производства по индивидуальным заказам в аэрокосмической и электронной промышленности. Например, напечатанные на 3D-принтере радиаторы из вольфрамово-медного сплава могут иметь внутренние микроканальные конструкции, что дополнительно повышает эффективность рассеивания тепла.

Кроме того, заслуживают внимания потенциальные возможности применения вольфрамово-медных стержней в квантовых вычислениях и оборудовании связи 6G. Квантовые вычисления требуют материалов с высокой теплопроводностью в условиях сверхнизких температур, а низкое тепловое расширение и высокая теплопроводность вольфрамово-медных стержней делают их перспективным кандидатом. Высокая плотность мощности базовых станций 6G предъявляет повышенные требования к теплоотводу и материалам электрических контактов, и комплексные характеристики вольфрамово-медных стержней позволяют удовлетворить эти требования.

Подводя итог, можно сказать, что рынок и тенденции развития вольфрамово-медных прутков определяются глобальной модернизацией промышленности и новыми технологиями. Улучшение цепочек поставок и технологические инновации способствуют широкому внедрению этой технологии как в традиционных, так и в развивающихся секторах. Скоординированное развитие высокопроизводительного, экологичного производства и новых сфер применения дополнительно повысит рыночную конкурентоспособность вольфрамово-медных прутков, оказывая критически важную поддержку будущему развитию промышленности. Для решения рыночных задач и использования возможностей роста отрасли необходимо сосредоточиться на поставках сырья, соблюдении экологических норм и технологических исследованиях и разработках.



  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

Заявление об авторских правах и юридической ответственности

## Приложение

### А. Глоссарий

**Сплав вольфрама и меди:** композиционный материал с металлической матрицей, состоящий из вольфрама и меди, при этом содержание меди обычно составляет от 10% до 50%.

**Процесс вакуумной инфильтрации:** процесс изготовления вольфрамовых медных прутков путем инфильтрации меди в вольфрамовый каркас в вакуумной среде.

**Эффект выпотевания металла:** под воздействием высокой температуры (выше 3000 °C) медь разжижается и испаряется, поглощая тепло и понижая температуру поверхности материала.

**Электропроводность (%IACS):** Международный стандарт электропроводности для отожженной меди, используемый для измерения электропроводности материала.

**Коэффициент теплового расширения:** скорость изменения объема или длины материала при изменении его температуры.

**Стойкость к дуговой эрозии:** способность материала противостоять абляционному повреждению под действием дуги.

**Формование, близкое к заданной форме:** производственная технология, которая позволяет напрямую получать форму, близкую к конечной, путем оптимизации процесса и сокращения последующей обработки.

**Электрод контактной сварки:** электрод, используемый для контактной сварки, который должен быть устойчивым к высоким температурам и износу.

**Электрод EDM:** электрод, используемый для электроэрозионной обработки, с высокой скоростью электрической эрозии и низкой скоростью износа.

**Материалы для упаковки электроники:** Материалы, используемые для упаковки полупроводниковых приборов, обладающие высокой теплопроводностью и низким коэффициентом теплового расширения.

**Метод высокочастотного сжигания инфракрасного поглощения:** аналитический метод, используемый для определения содержания углерода в сплавах вольфрама и меди.

**Гравиметрический метод с использованием цинхонина:** метод химического анализа, используемый для определения содержания вольфрама в сплавах вольфрама с медью.

**Теплопроводность:** способность материала проводить тепло, обычно выражаемая в Вт/м·К.

**Твердость (НВ/НV):** твердость по Бринеллю (НВ) или Виккерсу (НV) используется для измерения сопротивления материала деформации.

### Б. Ссылки

[1] Университет Падуи, Материалы и дизайн, 2023

[2] Металл АЕМ, сплав вольфрама и меди

[3] Chinatungsten, Изготовление прутков из сплава вольфрама и меди методом низкотемпературного спекания и инфильтрации, 2024

[4] Исследования в области получения и свойств высокоэффективных композитов вольфрам-медь. Технология литья, 2023.

[5] Обзор развития тяжёлых сплавов на основе вольфрама в моей стране. Редкие металлы, 2021.

[6] Состояние исследований и перспективы материалов для теплоотвода дивертора

#### Заявление об авторских правах и юридической ответственности

термоядерного реактора. Материаловедение, 2022.

[7] Chinatungsten Online, Процесс производства вольфрамовой меди

[8] Chinatungsten Online, Обработка вольфрамово-медного прутка

[9] Метод приготовления материала для контакта из тугоплавкого металла и меди и вольфрама

[10] Chinatungsten , Изготовление прутков из сплава вольфрама и меди методом низкотемпературного спекания и инфильтрации, 2024

[11] ScienceDirect, Сверхбыстрая обработка высокотвердых нанокompозитов вольфрама и меди, 2016

[12] Спрингер, Композит из меди, укрепленный наночастицами вольфрама, полученный методом золь -гель и реакцией in situ, 2019

[13] PMS, Образование карбида вольфрама in situ в наноструктурированном медном матричном композите с использованием механического легирования и спекания, 2022

[14] ScienceDirect, Многокомпонентное аддитивное производство биметаллической структуры из сплава вольфрама и меди с промежуточным слоем из нержавеющей стали и соответствующими механизмами соединения, 2022

[15] ScienceDirect, Исследование влияния технологии вакуумной инфильтрации на свойства интерфейса соединения вольфрама и меди, 2024

[16] Metal AM, Обеспечение революции в термоядерной энергетике: Освоение вольфрама с помощью аддитивного производства PBF-EB, 2024

[17] MDPI, Обзор аддитивного производства композитов W-Cu, 2025

[18] Конференция, ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ W - CU ПУТЕМ ИНФИЛЬТРАЦИИ W-СКЕЛЕТОВ – ОБЗОР, 2021