

Что такое сплав вольфрама и меди

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Содержание

Глава 1 Введение

- 1.1 Общие сведения о вольфрамо-медном сплаве
 - 1.1.1 Определение вольфрамо-медного сплава
 - 1.1.2 Состав сплава
- 1.2 Исторические истоки и процесс развития вольфрамо-медного сплава
 - 1.2.1 Ранняя разведка
 - 1.2.2 Ключевые узлы прорыва в технологии
 - 1.2.3 Современные тенденции развития

Глава 2 Характеристики вольфрамо-медного сплава

- 2.1 Анализ характеристик вольфрамо-медного сплава
 - 2.1.1 Механизм формирования высокой твердости и преимущества
 - 2.1.1.1 Микроструктурный механизм
 - 2.1.1.2 Преимущества в износостойких приложениях
 - 2.1.1.3 Сравнение твердости и преимущества по сравнению с другими сплавами
 - 2.1.2 Принцип и характеристики стойкости к дуговой эрозии
 - 2.1.2.1 Механизм дуговой эрозии
 - 2.1.2.2 Собственный принцип стойкости к дуговой эрозии
 - 2.1.2.3 Различия в характеристиках в разных условиях эксплуатации
 - 2.1.2.4 Способы улучшения характеристик
 - 2.1.3 Анализ способностей к антиадгезии и антисварке
 - 2.1.3.1 Причины адгезии и сварки
 - 2.1.3.2 Антиадгезивные характеристики
 - 2.1.3.3 Факторы, влияющие на способности к антиадгезии и антисварке
 - 2.1.4 Принцип и применение отличной электропроводности
 - 2.1.4.1 Физическая природа и механизм электропроводности
 - 2.1.4.2 Изменения электропроводности при разных соотношениях компонентов
 - 2.1.4.3 Преимущества электропроводных приложений в электротехнической технике
 - 2.1.5 Хорошая теплопроводность
 - 2.1.5.1 Основные принципы теплопроводности и механизм теплопередачи
 - 2.1.5.2 Связь между теплопроводностью и эффективностью теплоотдачи
 - 2.1.5.3 Прикладная ценность теплопроводности в условиях высокотемпературной эксплуатации
 - 2.1.6 Коррозионная стойкость и ее механизм
 - 2.1.6.1 Влияние разных коррозионных сред
 - 2.1.6.2 Внутренний механизм коррозионной стойкости
 - 2.1.6.3 Технические средства повышения коррозионной стойкости
- 2.2 Влияние соотношения компонентов на свойства вольфрамо-медного сплава
 - 2.2.1 Влияние на механические свойства
 - 2.2.1.1 Влияние на твердость
 - 2.2.1.2 Влияние на прочность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.2.1.3 Влияние на тугоплавкость
- 2.2.2 Влияние на физические свойства
 - 2.2.2.1 Влияние на плотность
 - 2.2.2.2 Влияние на температуру плавления
 - 2.2.2.3 Влияние на коэффициент теплового расширения
 - 2.2.2.4 Влияние на электропроводность
 - 2.2.2.5 Влияние на теплопроводность
- 2.2.3 Влияние на химические свойства
 - 2.2.3.1 Влияние на коррозионную стойкость
 - 2.2.3.2 Влияние на стойкость к высокотемпературной окислению
- 2.3 MSDS вольфрамо-медного сплава компании CTIA GROUP LTD

Глава 3 Корреляция между микроструктурой и свойствами вольфрамо-медного сплава

- 3.1 Понимание характеристик микроструктуры вольфрамо-медного сплава
 - 3.1.1 Морфология и размер зерен
 - 3.1.2 Распределение фаз и интерфейсы
 - 3.1.3 Пористость и проявление дефектов
 - 3.1.4 Различия в структуре при разных технологиях изготовления
- 3.2 Собственная связь между микроструктурой и характеристиками вольфрамо-медного сплава
 - 3.2.1 Механизм влияния зерновой структуры на прочность
 - 3.2.2 Механизм влияния зерновой структуры на тугоплавкость
 - 3.2.3 Корреляция между распределением фаз и электропроводностью
 - 3.2.4 Корреляция между распределением фаз и теплопроводностью
 - 3.2.5 Влияние пор и дефектов на твердость
 - 3.2.6 Влияние пор и дефектов на коррозионную стойкость
- 3.3 Эволюция микроструктуры вольфрамо-медного сплава
 - 3.3.1 Эволюция, вызванная изменениями соотношений компонентов
 - 3.3.2 Структурные превращения при термической обработке
 - 3.3.3 Отклик условий эксплуатации на структуру
 - 3.3.4 Отклик условий эксплуатации на характеристики
- 3.4 Стратегия контроля микроструктуры вольфрамо-медного сплава
 - 3.4.1 Методы контроля на основе технологии изготовления
 - 3.4.2 Методы оптимизации добавления легирующих элементов
 - 3.4.3 Связь между регулировкой структуры и характеристиками

Глава 4 Технология изготовления вольфрамо-медного сплава

- 4.1 Изготовление вольфрамо-медного сплава методом вакуумной пропитки
 - 4.1.1 Принцип расплавной пропитки и требования к оборудованию
 - 4.1.2 Этапы процесса и оптимизация параметров
 - 4.1.3 Преимущества и ограничения процесса

Глава 5 Методы испытания и характеризации характеристик вольфрамо-медного сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.1 Испытание физических свойств вольфрамо-медного сплава
 - 5.1.1 Метод испытания плотности
 - 5.1.2 Стандарты и операции испытания твердости
 - 5.1.3 Метод испытания электропроводности
 - 5.1.4 Метод испытания теплопроводности
- 5.2 Оценка химических свойств вольфрамо-медного сплава
 - 5.2.1 Среда и методы испытания коррозионной стойкости
 - 5.2.2 Метод испытания антиоксидных свойств
- 5.3 Технология характеристики микроструктуры вольфрамо-медного сплава
 - 5.3.1 Метод наблюдения металлографическим микроскопом
 - 5.3.2 Применение анализа сканирующим электронным микроскопом
 - 5.3.3 Структурный анализ рентгеновской дифракции

Глава 6 Различные области применения вольфрамо-медного сплава

- 6.1 Применение вольфрамо-медного сплава в электротехнической области
 - 6.1.1 Применение в низковольтных силовых выключателях
 - 6.1.1.1 Требования к характеристикам материалов ключевых компонентов низковольтных силовых выключателей
 - 6.1.1.2 Применение вольфрамо-медного сплава в контактных компонентах
 - 6.1.1.3 Влияние применения на срок службы низковольтных силовых выключателей
 - 6.1.2 Применение в высоковольтных выключателях
 - 6.1.2.1 Условия эксплуатации высоковольтных выключателей и стандарты стойкости материалов ключевых компонентов
 - 6.1.2.2 Соответствие вольфрамо-медного сплава требованиям к характеристикам высоковольтных выключателей
 - 6.1.2.3 Различия в применении вольфрамо-медного сплава в высоковольтных выключателях разных напряжительных классов
 - 6.1.3 Применение в реле и вакуумных автоматических выключателях
 - 6.1.3.1 Требования к износостойкости материалов реле и пригодность вольфрамо-медного сплава
 - 6.1.3.2 Место установки и реализация функций вольфрамо-медного сплава в реле
 - 6.1.3.3 Требования к характеристикам материалов для системы искроудаления вакуумных автоматических выключателей
 - 6.1.3.4 Принцип применения вольфрамо-медного сплава в камере искроудаления вакуумного автоматического выключателя
 - 6.1.3.5 Стандарты выбора вольфрамо-медного сплава для реле и вакуумных автоматических выключателей
 - 6.1.4 Применение в разъединителях и заземлительных выключателях
 - 6.1.4.1 Требования к атмосферостойкости материалов разъединителей в условиях длительного воздействия внешней среды
 - 6.1.4.2 Конструкторское применение вольфрамо-медного сплава в токопроводящей контактной части разъединителя
 - 6.1.4.3 Требования к прочности и электропроводности материалов заземлительных выключателей при воздействии короткого замыкания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.1.4.4 Механизм обеспечения безопасной эксплуатации заземлительного выключателя вольфрамо-медным сплавом
- 6.1.4.5 Стандарты выбора вольфрамо-медного сплава для разъединителей и заземлительных выключателей
- 6.2 Применение вольфрамо-медного сплава в электронной области
 - 6.2.1 Требования к характеристикам электродов для электроэрозионной обработки и преимущества вольфрамо-медного сплава
 - 6.2.1.1 Требования к показателям характеристик электродных материалов для процесса электроэрозионной обработки
 - 6.2.1.2 Различные требования к характеристикам электродов в разных сценариях обработки
 - 6.2.1.3 Анализ совместимости вольфрамо-медного сплава с точки зрения электропроводности и износостойкости
 - 6.2.1.4 Преимущества характеристик по сравнению с традиционными электродными материалами
 - 6.2.1.5 Стандарты выбора вольфрамо-медных электродов для обычного оборудования для электроэрозионной обработки
 - 6.2.2 Роль в микроэлектронике
 - 6.2.2.1 Требования к точности и стабильности материалов для микроэлектронных устройств
 - 6.2.2.2 Применение вольфрамо-медного сплава в упаковке микроэлектроники
 - 6.2.2.3 Механизмы повышения эффективности теплоотдачи и срока службы микроэлектронных устройств
 - 6.2.2.4 Конструкция монтажной структуры в модуле упаковки чипов
 - 6.2.2.5 Требования к чистоте и микроструктуре вольфрамо-медных сплавов в области микроэлектроники
 - 6.2.3 Применение в области сенсоров
 - 6.2.3.1 Требования к характеристикам материалов для условий эксплуатации сенсоров
 - 6.2.3.2 Потенциальные приложения вольфрамо-медного сплава в сенсорных элементах датчиков
 - 6.2.3.3 Конструкторское применение теплопроводных компонентов сенсоров на основе высокой теплопроводности
- 6.3 Применение вольфрамо-медного сплава в аэрокосмической области
 - 6.3.1 Применение в облицовке горла сопла твердотопливного ракетного двигателя
 - 6.3.1.1 Условия эксплуатации облицовки горла сопла твердотопливного ракетного двигателя
 - 6.3.1.2 Требования к характеристикам материалов облицовки горла сопла
 - 6.3.1.3 Характеристики вольфрамо-медного сплава, удовлетворяющие требованиям к облицовке горла сопла
 - 6.3.1.4 Технология формования и конструктивное проектирование вольфрамо-медного сплава в облицовке горла сопла
 - 6.3.1.5 Повышение срока службы облицовки горла сопла после применения вольфрамо-медного сплава
 - 6.3.2 Потенциальные приложения в компонентах авиационных двигателей
 - 6.3.2.3 Особенности условий эксплуатации ключевых компонентов авиационных двигателей
 - 6.3.2.4 Требования к характеристикам материалов компонентов авиационных двигателей
 - 6.3.2.5 Применение вольфрамо-медного сплава в горячих частях авиационных двигателей
 - 6.3.2.6 Направления оптимизации характеристик вольфрамо-медного сплава для применения в авиационных двигателях
 - 6.3.3 Применение в электросистемах космических аппаратов
 - 6.3.3.1 Условия эксплуатации и требования к надежности электросистем космических аппаратов
 - 6.3.3.2 Требования к характеристикам материалов ключевых компонентов электросистем космических

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

аппаратов

6.3.3.3 Применение вольфрамо-медного сплава в контактах контакторов космических аппаратов

6.3.3.4 Применение вольфрамо-медного сплава в элементах искроудаления автоматических выключателей космических аппаратов

6.3.3.5 Важная роль вольфрамо-медного сплава в обеспечении стабильности и срока службы электросистем космических аппаратов

6.3.3.6 Стандарты выбора материалов и требования к контролю качества вольфрамо-медных сплавов для применения в космических аппаратах

6.4 Применение в других областях

6.4.1 Сценарии применения в металлургической промышленности

6.4.2 Примеры использования в спортивном оборудовании

6.4.3 Исследования в области медицинского оборудования

6.4.4 Перспективы применения в области ядерной энергетики

Глава 7 Будущие тенденции развития вольфрамо-медного сплава

7.1 Исследования новых технологий изготовления вольфрамо-медного сплава

7.1.1 Потенциальные приложения технологии аддитивного производства

7.1.2 Об outlook других передовых технологий изготовления

7.2 Направления исследований оптимизации характеристик вольфрамо-медного сплава

7.2.1 Направления исследований для повышения комплексных характеристик

7.2.2 Повышение характеристик в конкретных сценариях приложения

Приложения

Приложение А Национальный стандарт Китая для вольфрамо-медных сплавов

Приложение Б Международный стандарт для вольфрамо-медных сплавов

Приложение В Стандарты для вольфрамо-медных сплавов в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах

Приложение Г Подробное объяснение терминов, связанных с вольфрамо-медными сплавами

Список источников



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 1 Введение

1.1 Обзор сплава вольфрам-медь

являясь композитным материалом, состоящим из вольфрама и меди, сочетает в себе основные преимущества обоих металлов и занимает незаменимое место в промышленности. Высокая температура плавления вольфрама (3422 °C), высокая прочность, твёрдость и превосходная износостойкость дополняются высокой электропроводностью, высокой теплопроводностью и пластичностью меди, благодаря чему вольфрамово-медный сплав способен выдерживать высокие температуры и сохранять стабильную электро- и теплопроводность. Поэтому он широко используется во многих ключевых областях, таких как электроника, электротехника, аэрокосмическая промышленность и национальная оборона.

С точки зрения свойств материала, характеристики сплава вольфрама и меди не являются простой суперпозицией «вольфрам + медь», но благодаря разумному соотношению компонентов и процессу изготовления характеристики оптимизируются и балансируются. Например, в условиях высоких температур скелетная структура вольфрама может служить опорой для сплава и противостоять высокотемпературной деформации, в то время как медь может быстро проводить тепло благодаря собственной теплопроводности, предотвращая локальный перегрев; в условиях электропроводности могут быть задействованы преимущества меди как проводника, а добавление вольфрама повышает общую прочность сплава, устраняя проблему износа и деформации чистой меди. Эта «прочная комбинация» делает сплав вольфрама и меди идеальным материалом для работы в сложных условиях.

С непрерывным развитием промышленных технологий требования к эксплуатационным характеристикам материалов становятся всё более строгими, а исследования и применение вольфрамово-медных сплавов также продолжают углубляться. От первоначальной базовой модели до сплавов со специальным соотношением, разработанных для различных условий, область их применения постоянно расширяется, а их характеристики всё точнее отвечают различным промышленным потребностям. Далее мы более подробно рассмотрим этот специальный сплав с двух сторон: определение и состав.

1.1.1 Определение сплава вольфрам-медь

Сплав вольфрама с медью относится к псевдосплаву (т. е. двум металлам, которые не смешиваются в твердом состоянии и образуют механически связанный композиционный материал), изготовленный из вольфрама (W) и меди (Cu) в качестве основных компонентов с помощью таких процессов, как порошковая металлургия. В отличие от традиционных отдельных металлов или полностью смешивающихся сплавов, в сплаве вольфрама с медью вольфрам и медь существуют в форме физической смеси - вольфрам образует непрерывную структуру скелета, а медь заполняет поры вольфрамового скелета. Два элемента объединяются через интерфейс, образуя целое. Поэтому он сохраняет высокую температуру плавления, высокую прочность, высокую твердость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и износостойкость вольфрама и обладает высокой электропроводностью, высокой теплопроводностью и хорошей пластичностью меди, достигая характеристик «высокая термостойкость и электро- и теплопроводность» и «баланс между высокой прочностью и простотой обработки». В основе определения лежат «композиционные преимущества» и «технологическая зависимость». С одной стороны, его эксплуатационные характеристики определяются синергетическим эффектом вольфрама и меди: например, при электроискровой обработке высокая электропроводность вольфрамово-медного сплава обеспечивает эффективную передачу тока электродом, а высокая температура плавления вольфрама предотвращает его плавление при высокотемпературном искровом разряде; в компонентах, рассеивающих тепло, теплопроводность меди обеспечивает быстрый отвод тепла, а высокая прочность вольфрама обеспечивает устойчивость компонентов к деформации при монтаже и эксплуатации. С другой стороны, определение также включает в себя направление процесса изготовления: поскольку вольфрам и медь не смешиваются в твердом состоянии, их невозможно получить плавкой, и необходимо использовать порошковую металлургию (прессование, спекание, инфильтрацию и т. д.). Это также стало одной из важных характеристик, отличающих сплав вольфрама с медью от других сплавов.

Это определение не только проясняет состав и структуру сплава вольфрама с медью, но и раскрывает его «индивидуальные» характеристики: регулируя соотношение содержания вольфрама и меди, можно получать сплавы с различными свойствами (например, сплавы с высоким содержанием вольфрама, ориентированные на высокую термостойкость и прочность, и сплавы с высоким содержанием меди, ориентированные на электропроводность и теплопроводность), чтобы удовлетворить индивидуальные потребности различных областей, таких как электронная упаковка, высоковольтные переключатели и аэрокосмические двигатели. Таким образом, определение сплава вольфрама с медью — это не только описание его состава, но и краткое изложение его основной характеристики: «структура определяет характеристики, а характеристики адаптируются к условиям эксплуатации».

1.1.2 Состав сплава

Вольфрамово-медный сплав состоит из вольфрама (W) и меди (Cu), при этом содержание вольфрама обычно составляет от 50% до 90% (массовая доля), а содержание меди — от 10% до 50%. Конкретное соотношение необходимо определять в соответствии с эксплуатационными требованиями конкретного варианта применения. Помимо двух основных компонентов — вольфрама и меди, в некоторые вольфрамово-медные сплавы специального назначения добавляют следовые количества других элементов в качестве вспомогательных компонентов для оптимизации характеристик формовки или выполнения специфических функций материала. Однако содержание этих вспомогательных элементов обычно не превышает 1%, поэтому оно не влияет на структуру основного компонента «вольфрам-медь».

С точки зрения роли основных компонентов, вольфрам, как металл с высокой температурой плавления (температура плавления 3422 °C), является основным поставщиком прочности сплава,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердости, высокотемпературной стойкости и износостойкости. Чем выше содержание вольфрама, тем выше температура плавления сплава, тем больше прочность и твердость, и тем лучше высокотемпературная стойкость. Например, сплав вольфрама с медью с содержанием вольфрама 90% может иметь прочность на сжатие более 800 МПа и может сохранять структурную стабильность в высокотемпературной среде выше 1000 °C, что подходит для высокотемпературных компонентов аэрокосмических двигателей. Медь, как высокопроводящий и теплопроводный металл, в основном отвечает за придание сплаву электропроводности, теплопроводности и определенной пластичности. Чем выше содержание меди, тем лучше электро- и теплопроводность сплава, а также тем лучше производительность обработки. Например, сплав вольфрама и меди с содержанием меди 50% имеет проводимость более 40×10^6 См/м, что делает его пригодным для использования в качестве электрода для отвода тепла в электронных корпусах. Добавление вспомогательных компонентов предназначено для улучшения характеристик процесса или восполнения дефицита основных компонентов. Например, добавление следовых количеств никеля (Ni) может усилить прочность связи между частицами вольфрама и фазами меди, избегая проблемы разделения вольфрамового скелета и фазы меди при воздействии силы на сплав; добавление небольшого количества железа (Fe) или кобальта (Co) может улучшить прессуемость вольфрамового порошка, облегчая получение сплавом плотной структуры в процессе формования. Однако добавление вспомогательных компонентов должно строго контролироваться по пропорции, в противном случае это может повлиять на характеристики основных компонентов — например, избыток никеля снизит электро- и теплопроводность сплава, а избыток железа может увеличить его хрупкость.

В целом, состав сплава вольфрама и меди является типичным примером принципа «основной компонент определяет характеристики сердечника, а вспомогательный компонент оптимизирует процесс и детали». Регулируя соотношение вольфрама и меди, можно точно контролировать прочность, электро- и теплопроводность, а также термостойкость сплава, что делает его пригодным для самых разных применений: от корпусирования электронных компонентов до национальной обороны и военной промышленности. Добавление микроэлементов дополнительно повышает практичность и стабильность сплава, позволяя этому композитному материалу лучше справляться со сложными потребностями отрасли.

1.2 Историческое происхождение и процесс разработки сплава вольфрам-медь

1.2.1 Ранние исследования

История сплава вольфрама с медью восходит к концу XIX – началу XX века. Исследования на этом этапе не были направлены на создание «сплава вольфрама с медью», а шли от отдельного изучения свойств вольфрама и меди и первых попыток создания композитных материалов. В то время промышленная революция стимулировала спрос на высокопрочные и высокопроводящие материалы. Вольфрам привлекал внимание своей высокой температурой плавления и прочностью (особенно в производстве нитей накаливания), а медь стала основным материалом в электротехнической промышленности благодаря своей превосходной электро- и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплопроводности. Однако постепенно проявились недостатки обоих металлов: чистый вольфрам был хрупким и труднообрабатываемым, а чистая медь – низкой прочностью и низкой термостойкостью. Люди начали задумываться о том, «можно ли объединить преимущества двух металлов, смешав их».

Ранние исследования представляли собой в основном мелкомасштабные лабораторные испытания, а технические средства были относительно примитивными. Около 1900 года немецкие и американские материаловеды впервые механически смешали вольфрамовый и медный порошки и изготовили первый «композитный блок вольфрама-меди» путём простого прессования и спекания. Хотя стабильный процесс не был разработан, была подтверждена возможность создания «композита вольфрама-меди». Однако характеристики продукта на этом этапе были крайне низкими: соединение вольфрама и меди было рыхлым, механическая прочность была недостаточной, а электро- и теплопроводность не соответствовали ожиданиям. Кроме того, из-за отсутствия точного контроля размера частиц порошка и температуры спекания выход готового продукта был крайне низким и оставался лишь на уровне теоретической проверки и не нашёл практического применения.

На самом деле, именно потребности военной и электротехнической промышленности подтолкнули ранние исследования к практическому применению. В 1920-х годах, с развитием радиотехники и артиллерийского производства, потребовался материал, способный выдерживать кратковременное воздействие высоких температур и одновременно проводить электричество (например, электроды устройств электрического зажигания артиллерийских орудий). Чистая медь легко плавится при высоких температурах, а чистый вольфрам недостаточно электропроводен. Исследователи вновь обратили внимание на композиты вольфрама и меди. Около 1925 года американская компания General Electric Company изготовила первую партию вольфрамово-медных изделий, которые можно было использовать для простых электродов, улучшив процесс смешивания порошков (например, увеличив время измельчения в шаровой мельнице для получения более мелкого порошка). Хотя характеристики всё ещё были нестабильными, это был первый случай «замены чистого вольфрама или чистой меди в определённых ситуациях», что стало отправной точкой для перехода сплавов вольфрама и меди из лабораторных условий в практическое применение. Хотя исследования на этом этапе не сформировали систематическую техническую систему, они заложили две основы для последующих исследований: во-первых, они определили основное направление «композиты вольфрам-медь могут сбалансировать прочность, электро- и теплопроводность»; во-вторых, они накопили предварительный опыт в смешивании, прессовании и спекании порошков.

1.2.2 Ключевые технологические прорывные узлы

Сплав вольфрама и меди неотделим от ряда ключевых технологических прорывов, которые привели к его превращению из «лабораторных образцов» в «промышленные материалы».

Первый ключевой узел появился в 1940-х годах. Благодаря зрелости процесса инфильтрации была

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

решена основная проблема «слабого сцепления вольфрама и меди». Предыдущий процесс спекания затруднял полное соединение вольфрама и меди, в то время как процесс инфильтрации (предварительное спекание вольфрамового каркаса с последующей инфильтрацией расплавленной меди в его поры) значительно увеличивал плотность материала. В 1943 году, чтобы решить проблему термостойкости электродов зажигания авиационных пулеметов, военные США совместно с научно-исследовательскими институтами оптимизировали процесс инфильтрации: контролируя пористость вольфрамового каркаса (с поправкой на 20–30%) и температуру плавления меди (с точностью до 1100–1200 °C), плотность сплава вольфрама и меди была увеличена более чем до 95%, а прочность и проводимость увеличились на 40% по сравнению с предыдущими. Он был успешно использован в системе зажигания авиационных пулемётов. Это был первый случай практического применения сплава вольфрама с медью в больших масштабах.

Вторым ключевым моментом стало совершенствование технологии порошковой металлургии в 1960-х годах. С появлением электронных микроскопов и прецизионного оборудования для контроля температуры исследователи получили возможность точно контролировать размер частиц вольфрамового и медного порошков (от ранних 100 меш до более чем 500 меш), а также атмосферу спекания (используя инертный газ для предотвращения окисления). В 1962 году японская компания Sumitomo Metal разработала технологию «сверхтонкий порошок + вакуумное спекание», которая позволила более равномерно распределить частицы вольфрама в сплаве вольфрама с медью и обеспечить более полное заполнение медной фазы. Не только механические свойства (прочность на сжатие превышала 600 МПа) и электропроводность (проводимость достигала более 60% от чистой меди) были стабильны, но и была реализована обработка изделий сложной формы (таких как тонкие листы и электроды специальной формы), что способствовало расширению его применения из военной сферы в электронную промышленность (например, радиаторы первых транзисторов).

Третьим ключевым узлом стало внедрение концепции «функциональной кастомизации» в 1980-х годах. Ранее сплавы вольфрама и меди в основном основывались на одном соотношении, и потребности различных областей существенно различались: для аэрокосмической отрасли требуются термостойкие сплавы с высоким содержанием вольфрама (более 80%), а для электроники – сплавы с высокой проводимостью и высоким содержанием меди (более 50%). В 1985 году Пекинский научно-исследовательский институт цветных металлов (Китай) разработал «модель соответствия соотношения вольфрама и меди эксплуатационным характеристикам» для получения индивидуального состава в соответствии с потребностями: регулируя градиентное соотношение содержания вольфрама от 50% до 90% в сочетании с соответствующими параметрами процесса, можно точно контролировать прочность, проводимость и жаростойкость сплава. Этот прорыв превратил сплавы вольфрама и меди из «материалов общего назначения» в «материалы, адаптивные к условиям», и область их применения быстро расширилась.

1.2.3 Современные тенденции развития

В XXI веке развитие вольфрамово-медных сплавов продемонстрировало три основные тенденции:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

«высокая производительность, разнообразные области применения и интеллектуальные процессы», что делает их одними из ключевых материалов в области высокотехнологичного производства. Высокие эксплуатационные характеристики являются основным направлением современного развития. Поскольку требования к материалам в области микросхем, аэрокосмической промышленности и новой энергетики сместились с «удовлетворения базовых потребностей» на «преодоление пределов производительности», эксплуатационные характеристики вольфрамово-медных сплавов постоянно совершенствуются: благодаря технологии получения нанопорошков (например, плазменной шаровой мельницы) размер частиц вольфрамового порошка можно контролировать в пределах 100 нанометров, а граница раздела с медью становится ближе. Электропроводность новейшего продукта достигла более 85% от чистой меди, а прочность на сжатие превысила 1000 МПа, что значительно превышает уровень XX века; С точки зрения стойкости к высоким температурам сплавы вольфрама и меди с высоким содержанием вольфрама (90%) могут сохранять структурную стабильность при температуре 1200 °C, а за счет добавления армирующих фаз, таких как графен, износостойкость увеличивается более чем на 30%, что соответствует требованиям экстремальных сценариев, таких как базовые станции мобильной связи пятого поколения и камеры сгорания аэрокосмических двигателей.

Диверсификация сфер применения отражается в расширении от традиционных областей к новым, высокотехнологичным направлениям. Традиционно сплавы вольфрама и меди используются в основном для электрических контактов, электродов и т. д., но теперь их применение расширено до: корпусирования микросхем (в качестве теплоотводящей подложки для мощных микросхем, использующей высокую теплопроводность для быстрого отвода тепла), новых энергетических транспортных средств (проводящие контакты бортовых высоковольтных реле, выдерживающие высокие токи и дуговую эрозию) и экспериментальных устройств ядерного синтеза (в качестве диверторных материалов для защиты от высокотемпературной плазменной эрозии). Согласно отраслевым данным, с 2020 года ежегодный рост мирового спроса на сплавы вольфрама и меди в области полупроводников превысил 25%, став новым полюсом роста.

Интеллектуальные технологии – техническая основа современного развития. Традиционное производство вольфрамово-медных сплавов основано на ручном труде, но теперь весь процесс контролируется с помощью «цифровых двойников» и автоматизированных производственных линий: от онлайн-контроля размера частиц на этапе смешивания порошков до регулирования температуры и давления в режиме реального времени в процессе спекания и неразрушающего контроля характеристик готовой продукции – всё это может быть реализовано с помощью интеллектуальных систем. Внедрение технологии 3D-печати сняло ограничения в области литья – в 2022 году Институт Фраунгофера в Германии использовал технологию 3D-печати металлом для прямой печати теплоотводящих компонентов из вольфрамово-медного сплава со сложными внутренними каналами. Конструкции, которые невозможно получить традиционными методами, могут производиться серийно, что открывает новые решения для создания компонентов специальной формы и интегрированных компонентов.

В то же время современное развитие сталкивается с трудностями: вольфрам, будучи

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стратегическим ресурсом, подвержен значительным колебаниям цен, что способствовало развитию технологий «переработки и повторного использования вольфрамово-медных сплавов» (текущая степень переработки достигла более 80%); конкуренция со стороны альтернативных материалов (таких как керамика на основе карбида кремния и медно-алюминиевые композиты) также вынуждает вольфрамово-медные сплавы сохранять свои преимущества за счёт повышения эксплуатационных характеристик. В целом, под влиянием спроса на высокотехнологичное производство, вольфрамово-медные сплавы превращаются из «вспомогательных материалов» в «основные», и их развитие тесно связано с инновациями в области передовой науки и техники, и в будущем ещё есть широкие возможности для прорывов.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 2. Характеристики сплава вольфрам-медь

2.1 Анализ характеристик сплава вольфрам-медь

Сплав вольфрама и меди отличается уникальной композитной структурой и составом. Он не просто наследует отдельные свойства вольфрама и меди, но и образует ряд сбалансированных и практических свойств благодаря синергии этих двух компонентов. С макроскопической точки зрения он обладает как хорошей электро- и теплопроводностью, подобной металлам, так и механической прочностью, достаточной для работы в сложных условиях; с точки зрения применения, суть его характеристик заключается в «балансе» — нахождении критической точки между твердостью и вязкостью, высокой термостойкостью, электро- и теплопроводностью для адаптации к промышленным потребностям, что позволяет ему играть роль в различных сценариях с высокими требованиями к свойствам материала. Характеристики сплава вольфрама и меди могут быть особенно отражены как в механических деталях, требующих частого трения, так и в электрооборудовании, которое одновременно подвергается воздействию высоких температур и электрических ударов.

2.1.1 Механизм образования высокой твердости и преимущества

Вольфрамово -медный сплав – это его отличительная особенность, отличающая его от чистой меди и большинства медных сплавов. Формирование этой характеристики тесно связано с синергетическим эффектом внутренней структуры и также обеспечивает основу для его применения в износостойких конструкциях. В отличие от мягкости чистой меди, твёрдость вольфрамово-медного сплава обусловлена не упрочнением одного компонента, а оптимизацией его характеристик, достигаемой за счёт структурного проектирования. Это позволяет ему сохранять определённую пластичность, одновременно сопротивляясь деформациям, вызванным внешним трением и выдавливанием, что делает его одновременно практичным и долговечным материалом.

2.1.1.1 Микроструктурный механизм

вольфрама с медью отличается микроструктурой, заполняющей каркас. Внутри сплава вольфрам существует в виде непрерывного каркаса, обладающего высокой собственной твёрдостью. Эти частицы вольфрама взаимосвязаны, образуя жёсткую опорную сеть по всему материалу, подобно стальному каркасу в здании, обеспечивая основную твёрдость сплава. Медь, как фаза-заполнитель, равномерно распределена в порах вольфрамового каркаса. Хотя сама медь обладает низкой твёрдостью, её присутствие не ослабляет целостность вольфрамового каркаса — напротив, медь может заполнять промежутки между частицами вольфрама, уменьшая «слабые места» в структуре каркаса и позволяя внешнему давлению передаваться на вольфрамовый каркас через медную фазу, предотвращая структурные повреждения, вызванные локальной концентрацией напряжений.

Кроме того, связь интерфейса между вольфрамом и медью также оказывает важное влияние на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твёрдость. В процессе приготовления, после надлежащей технологической обработки, между частицами вольфрама и медной фазой образуется устойчивая связь интерфейса. Эта связь может предотвратить скольжение частиц вольфрама относительно друг друга при воздействии силы, что дополнительно усиливает жёсткость общей структуры. Таким образом, высокая твёрдость сплава вольфрам-медь является результатом не действия одного компонента, а совместного действия жёсткого скелета вольфрама, заполняющего армирования из меди и связи интерфейса. Такая микроструктура позволяет ему сохранять структурную целостность при воздействии внешнего трения или экструзии.

2.1.1.2 Преимущества износостойких применений

вольфрама с медью демонстрирует очевидные преимущества в износостойких приложениях. Суть заключается в том, что он способен противостоять потере поверхности, вызванной длительным трением, и продлевает срок службы компонентов. В условиях, требующих частого контакта или относительного перемещения, поверхность материала подвержена постепенному износу из-за трения, что в конечном итоге приводит к изменению размеров компонента или функциональному отказу. Высокая твёрдость сплава вольфрама с медью может снизить этот износ: при контакте с другими предметами поверхность не царапается и не деформируется, сохраняя свою первоначальную форму и размерную стабильность в течение длительного времени.

В то же время, его износостойкость также отражается в его способности адаптироваться к «колебаниям условий трения». В практическом применении условия трения часто не постоянны, и могут наблюдаться изменения нагрузки, колебания температуры и т. д. Твёрдость сплава вольфрама с медью не снижается существенно при небольшом повышении температуры или изменении нагрузки, и он может сохранять износостойкость в сложных условиях. Например, в некоторых деталях механических трансмиссий, даже если они подвергаются длительному воздействию трения различной степени, их поверхности могут оставаться ровными, а точность передачи не будет подвержена чрезмерному износу, что продлевает цикл технического обслуживания соответствующего оборудования и снижает затраты и потери от простоя, вызванные заменой компонентов.

2.1.1.3 Сравнение твердости и преимущества по сравнению с другими сплавами

По сравнению с чистой медью и обычными медными сплавами, преимущество в твёрдости вольфрамово-медного сплава очевидно. Чистая медь имеет мягкую текстуру и склонна к поверхностной деформации при небольшом внешнем трении. Хотя твёрдость большинства медных сплавов повышается добавлением других элементов, общая твёрдость остаётся «средней или низкой», что затрудняет работу в условиях интенсивного трения. Сплав вольфрамово-медного сплава обладает значительно более высокой твёрдостью, чем эти материалы, благодаря наличию вольфрамового каркаса, и степень износа его поверхности при тех же условиях трения будет значительно ниже. По сравнению с чистым вольфрамом, твёрдость сплава вольфрама с медью несколько ниже, но он обладает рядом преимуществ в практическом применении. Несмотря на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чрезвычайно высокую твёрдость чистого вольфрама, он хрупкий. При лёгком ударе трением он легко ломается или отслаивается, что влияет на износостойкость. Медная фаза в сплаве вольфрама с медью играет определённую «буферную» роль. Сохраняя высокую твёрдость, он может поглощать часть энергии удара и снижать риск хрупкого разрушения. Он больше подходит для комбинированного сценария «трение + удар», который может возникнуть в реальных рабочих условиях.

По сравнению с некоторыми сплавами на основе железа, твёрдость вольфрамово-медного сплава не обязательно обеспечивает абсолютное преимущество, но он более конкурентоспособен по другим показателям, помимо твёрдости. Сплавы на основе железа, как правило, обладают низкой электро- и теплопроводностью, в то время как вольфрамово-медный сплав может сохранять высокую твёрдость при хорошей электро- и теплопроводности, что делает его незаменимым выбором там, где требуются как износостойкость, так и электропроводность (или теплопроводность). Например, в некоторых электрических компонентах, которые должны противостоять контактному трению и проводить ток, сплавы на основе железа не могут обеспечить требуемую электропроводность, в то время как вольфрамово-медные сплавы обеспечивают и то, и другое.

2.1.2 Принцип и характеристики стойкости к дуговой эрозии

Стойкость к дуговой эрозии является одним из основных свойств сплава вольфрамовой меди, широко используемого в электротехнике. В высоковольтных выключателях, реле и другом оборудовании дуги неизбежно возникают при включении и выключении тока. Высокая температура и энергия дуги вызывают коррозию контактного материала и приводят к выходу компонентов из строя. Сплав вольфрамовой меди может эффективно противостоять этой эрозии и обеспечивать длительную стабильную работу компонентов благодаря своему уникальному составу и структуре. Его стойкость к дуговой эрозии является не результатом одного фактора, а проявлением совокупного влияния состава материала, микроструктуры и механизма действия дуги. Он также будет демонстрировать различные характеристики в зависимости от условий эксплуатации, и существует четкое направление для оптимизации характеристик.

2.1.2.1 Механизм дуговой эрозии

Дуговая эрозия – это процесс повреждения поверхности и потери материалов под воздействием дуги. Её движущей силой являются высокая температура и энергия, выделяемая дугой. При возникновении дуги локальная температура резко повышается, достаточно для расплавления или даже испарения поверхности материала; одновременно с этим электрическая сила, создаваемая дугой, отталкивает расплавленные частицы материала от поверхности, образуя разбрызгивание. Кроме того, в условиях высокой температуры материал может вступать в химическую реакцию с окружающей средой (например, с кислородом воздуха) с образованием хрупких веществ, таких как оксиды, которые легко отслаиваются под воздействием дуги или механическим воздействием, что ещё больше усугубляет эрозию.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

С точки зрения процесса, дуговая эрозия представляет собой комплексный эффект «термического повреждения – механического отслоения – химической деградации»: высокая температура сначала разрушает целостность поверхности материала, делая её нестабильной; электрическое поле и воздушный поток отслаивают эти нестабильные вещества; химическая реакция ослабляет сцепление поверхности материала, повышая вероятность продолжения эрозии. Этот механизм приводит к постепенному образованию язв, трещин и деформаций на поверхности материала, что в конечном итоге влияет на проводимость и структурную стабильность компонента.

2.1.2.2 Внутренний принцип стойкости к дуговой эрозии

вольфрама и меди, устойчивый к дуговой эрозии, создан на основе синергетического эффекта вольфрама и меди. Его внутренний принцип основан на тройном механизме: «высокотемпературный каркас + эффективное рассеивание тепла + самовосстанавливающийся буфер».

Вольфрам, как тугоплавкий компонент, образует жёсткий каркас сплава. Он не плавится под воздействием высокой температуры дуги. Он способен сохранять целостность структуры под воздействием дуги и предотвращать обширные повреждения поверхности. Кроме того, присутствие вольфрама снижает общую скорость испарения материала и уменьшает потери материала, вызванные высокой температурой.

Медь, благодаря своей превосходной теплопроводности, быстро отводит тепло, генерируемое дугой, от зоны воздействия, предотвращая чрезмерное локальное повышение температуры и тем самым снижая степень плавления и испарения. Что ещё более важно, при чрезвычайно высокой температуре дуги медь плавится раньше вольфрама, а расплавленная медь заполняет мельчайшие углубления на поверхности, образуя временный «буферный слой», способный поглощать часть энергии дуги и уменьшать площадь вольфрамового каркаса, непосредственно подверженного воздействию дуги, тем самым выполняя защитную функцию.

Кроме того, прочность связи между вольфрамом и медью относительно высока, что позволяет противостоять разрыву, вызванному электрическим полем дуги, и снизить разбрызгивание частиц материала. Этот внутренний механизм, сочетающий вольфрамовую стойкость к плавлению, медную теплоотдачу и синергетическое противоотслаивание, позволяет сплаву вольфрама с медью сохранять хорошую целостность поверхности при многократном воздействии дуги.

2.1.2.3 Различия в производительности в разных условиях использования

вольфрама и меди не статичен и может значительно варьироваться в зависимости от условий эксплуатации. На него в основном влияют такие факторы, как температура окружающей среды, состав атмосферы, плотность энергии дуги и механическая нагрузка.

В условиях высоких температур окружающая среда уже имеет относительно высокую базовую

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

температуру, что снижает эффективность рассеивания тепла меди, затрудняя быстрое рассеивание тепла в зоне действия дуги, что может усилить плавление и испарение материала и увеличить скорость эрозии.

В среде с высоким содержанием кислорода или наличием коррозионных газов (таких как диоксид серы и сероводород) высокая температура дуги вызывает более бурную химическую реакцию между материалом и газом, что приводит к образованию более хрупких оксидов или сульфидов, которые легко отслаиваются, ускоряя тем самым эрозию. В среде, защищенной инертным газом, химические реакции подавляются, эрозия в основном представляет собой физические потери (плавление, разбрызгивание), и эксплуатационные характеристики более стабильны.

При высокой плотности энергии дуги (например, при коммутации больших токов) даже высокая температура плавления вольфрама не может полностью противостоять мгновенному воздействию высокой температуры, что может привести к частичному расплавлению вольфрамового каркаса. В этом случае буферный эффект меди усиливается, но общая степень эрозии всё равно будет выше, чем при дуге с низкой энергией. При одновременном воздействии механической вибрации или давления продукты эрозии на поверхности материала (например, затвердевший слой после плавления) с большей вероятностью отслаиваются под воздействием внешних сил, что ещё больше расширяет область повреждения и снижает эрозионную стойкость дуги.

2.1.2.4 Способы повышения производительности

к дуговой эрозии сплава вольфрама и меди можно оценить, исходя из трех аспектов: конструкции материала, оптимизации процесса и улучшения функций, а также путем целенаправленных улучшений повысить его способность противостоять дуговому повреждению. При проектировании материала баланс производительности можно оптимизировать, регулируя соотношение вольфрама и меди: соответствующее увеличение содержания вольфрама может повысить стабильность жаропрочного каркаса и снизить высокотемпературное плавление; в то время как разумное содержание меди может обеспечить эффективность рассеивания тепла и предотвратить локальный перегрев. Для определенных сценариев высокоэнергетической дуги можно также попробовать добавить небольшое количество тугоплавких антиокислительных элементов, которые можно интегрировать в вольфрамовый каркас, чтобы улучшить его стойкость к плавлению и окислению без существенного снижения теплопроводности меди.

Оптимизация процесса является ключевым средством повышения производительности. Уменьшение размера частиц вольфрамового и медного порошков позволяет добиться более равномерного распределения этих материалов в микроструктуре, уменьшая количество слабых мест, вызванных локальной сегрегацией компонентов. Использование вакуумного спекания или спекания в защитной атмосфере позволяет уменьшить пористость материала, повысить прочность связи между вольфрамом и медью и уменьшить разбрызгивание частиц под воздействием дуги. Кроме того, упрочняющая обработка поверхности готового изделия (например, плазменное напыление износостойкого покрытия) может создать дополнительный защитный барьер на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности, замедляющий эрозию подложки под воздействием дуги.

С точки зрения функционального улучшения, моделируя реальные условия работы дуги, мы можем разработать сплав вольфрама и меди с «градиентной структурой»: поверхностное содержание вольфрама повышено для повышения стойкости к плавлению, а внутреннее содержание меди – для обеспечения теплоотвода, что позволяет материалу действовать целенаправленно на разных глубинах. Одновременно мы разрабатываем технологию переработки и повторного использования сплавов для продления срока службы компонентов за счёт восстановления эродированной поверхности, что также косвенно повышает стойкость материала к дуговой эрозии на протяжении всего срока службы.

2.1.3 Анализ противоадгезионных и противосварочных свойств

Антиадгезионные и антисварочные свойства являются важнейшими свойствами сплава вольфрамовой меди в условиях механического контакта и электрических соединений. Адгезия – это явление, при котором две контактные поверхности частично склеиваются и их трудно разъединить под действием давления или температуры; сварка – более серьёзный вид адгезии, при котором контактная поверхность расплавляется при высокой температуре, а затем охлаждается и затвердевает, образуя неразъемное соединение. Обе эти ситуации приводят к застреванию компонентов и их разрушению, и сплав вольфрамовой меди, благодаря своим собственным характеристикам, демонстрирует очевидные преимущества в борьбе с такими проблемами. Суть его способности заключается в снижении «тенденции к склеиванию интерфейсов» контактной поверхности, что не только предотвращает механическое склеивание, вызванное давлением, но и предотвращает плавление и сварку, вызванные высокой температурой.

2.1.3.1 Причины слипания и сваривания

Причина адгезии в основном связана с «состоянием контакта поверхностей» и «механическим воздействием». Когда поверхности двух деталей находятся в тесном контакте и под давлением, микроскопические выступы на контактной поверхности внедряются друг в друга. Если сам материал обладает высокой пластичностью, выступы могут локально деформироваться и прилегать друг к другу. В то же время, если поверхностный оксидный слой или примеси сжимаются и разрушаются, свежая металлическая поверхность непосредственно контактирует, что приводит к возникновению адсорбционных сил за счёт диффузии между атомами и, в конечном итоге, к локальному слипанию контактной поверхности. Такая ситуация более вероятна в условиях длительного давления или относительного движения с низкой скоростью.

Сварка является результатом комбинированного воздействия «высокотемпературного плавления» и «охлаждения и затвердевания». При наличии на контактной поверхности источников тепла, таких как электрическая дуга и высокая температура трения, поверхность материала может нагреваться до расплавленного состояния, и расплавленные металлы на двух контактных поверхностях смешиваются друг с другом; при понижении температуры смешанные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

расплавленные металлы затвердевают, образуя на контактной поверхности соединение, подобное сварному. Кроме того, при наличии на контактной поверхности загрязнений (например, остатков горящего масла) при высоких температурах могут образовываться легкоплавкие эвтектики, что дополнительно способствует сцеплению расплавленного металла и усиливает эффект сварки.

2.1.3.2 Антиадгезионные свойства

вольфрама и меди в основном отражается в том, что он нелегко образует стабильную связь с другими деталями в контактном состоянии. Даже если происходит кратковременный контакт, это может уменьшить повреждение поверхности при разделении. В сценариях механического контакта жесткий скелет, образованный вольфрамом, улучшает сопротивление деформации поверхности материала, а микроскопические выступы на контактной поверхности нелегко раздавить или внедрить, уменьшая основу для адгезии, вызванной механическим укусом; в то же время присутствие меди позволяет поверхности сохранять определенную смазывающую способность (по сравнению с чистым вольфрамом), снижает коэффициент трения во время контакта и предотвращает ухудшение поверхностной адсорбции из-за тепла трения. Поэтому в компонентах с длительным контактом под давлением поверхность сплава вольфрама и меди нелегко образует следы адгезии с соответствующим материалом, и усилие, необходимое для разделения, меньше, что может поддерживать целостность контактной поверхности.

В условиях электрического контакта, даже при наличии небольшой дуги, вызывающей локальное повышение температуры, сплав вольфрама и меди не склонен к адгезии вследствие поверхностного плавления. Это объясняется тем, что теплопроводность меди быстро рассеивает тепло, предотвращая дальнейшее плавление поверхности; в то время как высокая температура плавления вольфрама препятствует плавлению на большой площади, затрудняя формирование стабильного связующего слоя на контактной поверхности и исключая возможность разрыва при разделении.

2.1.3.3 Факторы, влияющие на антиадгезионные и антисварочные свойства

Сплавы вольфрама и меди не являются фиксированными и будут зависеть от состояния самого материала, условий контакта и факторов окружающей среды.

Состояние поверхности самого материала является ключевым фактором. Наличие на поверхности загрязнений, таких как оксидные пленки и масляные пятна, ухудшает качество поверхности. Примеси могут стать «точками соединения» для адгезии под давлением или при высокой температуре, ослабляя антиадгезионные свойства; напротив, гладкая полированная поверхность имеет меньше микроскопических выступов, меньшую площадь контакта и лучшие антиадгезионные свойства. Кроме того, влияет плотность сплава вольфрама и меди: материалы с большим количеством внутренних пор склонны к образованию мелких углублений на поверхности, на них легко отлагаются примеси, и вероятность локальной адгезии выше. Влияние условий контакта в основном определяется давлением, температурой и относительным

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

движением. Избыточное давление увеличивает микроскопическое сжатие контактной поверхности и способствует адгезии; повышенная температура (даже не достигающая точки плавления) увеличивает скорость атомной диффузии и усиливает поверхностную адсорбцию; а высокоскоростное относительное движение без смазки может усугубить повреждение поверхности из-за выделения тепла при трении, косвенно увеличивая риск адгезии.

Среди факторов окружающей среды наиболее важными являются влажность и состав среды. Высокая влажность ускоряет окисление поверхности, образуя рыхлый оксидный слой, который легко отслаивается при контакте и становится адгезионной средой; при наличии в среде коррозионных газов на поверхности могут образовываться хрупкие соединения, которые при отслаивании могут отрывать металл поверхности, снижая адгезию, но при этом нарушают целостность поверхности и косвенно влияют на сопротивление сварке.

2.1.4 Принцип и применение отличной проводимости

Превосходная электропроводность сплава вольфрама и меди — одно из его основных преимуществ, отличающих его от чистого вольфрама и большинства жаропрочных сплавов. Эта характеристика обусловлена характеристиками самих компонентов, а также синергетическим эффектом композитной структуры. Он не стремится к единой «экстремальной проводимости», а достигает «достаточной и стабильной» электропроводности за счёт поддержания определённой механической прочности и высокой термостойкости, что позволяет ему применяться в условиях, где требуется одновременное обеспечение электропроводности и сложные условия эксплуатации. В принципе, его проводимость обусловлена движением электронов внутри металла; с точки зрения применения это свойство делает его ключевым материалом, объединяющим «электрическую функцию» и «конструкционную опору».

2.1.4.1 Физическая природа и механизм проводимости

Физическая сущность проводимости заключается в способности свободных электронов в материале двигаться направленно под действием электрического поля. При наличии внешнего электрического поля свободные электроны в материале освобождаются от связей, связанных с ядрами атомов, и движутся вдоль направления электрического поля, создавая электрический ток. Чем меньше препятствий движению электронов (таких как колебания атомов, рассеяние на примесях и т. д.), тем лучше проводимость.

вольфрама с медью в основном зависит от роли фазы меди. Медь является типичным хорошим проводником с большим количеством свободных электронов внутри, а ее атомы расположены регулярно. Эффект рассеяния электронов во время движения слабый, поэтому он может эффективно проводить ток. В сплаве вольфрама с медью медь заполняет поры вольфрамового скелета в непрерывной или полунепрерывной форме, образуя сквозной «проводящий канал» - при прохождении тока через сплав электроны в основном протекают через канал фазы меди. Хотя сам вольфрам имеет значительно более низкую проводимость, чем медь, как скелет он не блокирует

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

непрерывность фазы меди, но поддерживает стабильность канала фазы меди через опорную структуру. Кроме того, интерфейс между вольфрамом и медью прочно связан, что снижает потери рассеяния электронов на интерфейсе и дополнительно обеспечивает эффективность проводимости. Этот механизм «проводимости, доминируемой медной фазой, и структуры, стабилизированной вольфрамовой фазой» позволяет сплаву сохранять превосходную проводимость, сохраняя при этом механические свойства.

2.1.4.2 Изменения проводимости при различных соотношениях компонентов

Проводимость сплава вольфрама с медью обнаружит очевидную закономерность при изменении соотношения вольфрама и меди в составе. Основная тенденция заключается в следующем: «чем выше содержание меди, тем лучше проводимость; чем выше содержание вольфрама, тем ниже проводимость». Это изменение обусловлено существенной разницей в проводимости этих двух металлов.

При высоком содержании меди проводящий канал, образованный медной фазой в сплаве, становится более полным и плотным, путь для потока электронов становится более гладким и менее затруднённым, поэтому общая проводимость приближается к уровню чистой меди. Вольфрамовая фаза в этом случае присутствует в виде дисперсных частиц, что оказывает небольшое влияние на непрерывность медной фазы, но ввиду низкого содержания этого недостаточно для блокировки проводящего канала, и проводимость по-прежнему может поддерживаться на высоком уровне.

По мере увеличения содержания вольфрама доля вольфрамового скелета постепенно увеличивается, распределение фазы меди будет разделено частицами вольфрама, некоторые проводящие каналы могут быть отрезаны или сужены, и электронам при течении необходимо обходить частицы вольфрама, путь становится длиннее, рассеивание увеличивается, а проводимость соответственно снижается. При слишком высоком содержании вольфрама фаза меди может не образовать сплошной канал и существовать лишь в изолированных небольших областях. В это время электронам трудно свободно перемещаться внутри сплава, и проводимость значительно ослабевает.

Это изменение не является линейным «монотонным уменьшением», но тесно связано с непрерывностью фазы меди — до тех пор, пока фаза меди может оставаться в основном непрерывной, даже если содержание вольфрама увеличивается, уменьшение проводимости происходит относительно плавно; как только фаза меди полностью разделится, проводимость существенно снизится.

2.1.4.3 Преимущества применения токопроводящих материалов в электрооборудовании

В электротехническом оборудовании преимущество сплава вольфрам-медь в плане электропроводности в основном заключается в «учете как электропроводности, так и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приспособляемости к условиям эксплуатации», что позволяет заполнить разрыв в эксплуатационных характеристиках между чистой медью и чистым вольфрамом в определенных сценариях.

В высоковольтных выключателях, реле и другом оборудовании, требующем частого включения и выключения тока, контактный материал должен проводить ток и выдерживать температуру дуги и механические воздействия во время переключения. Хотя чистая медь обладает отличной проводимостью, она легко плавится при высоких температурах и не обладает механической прочностью. Она склонна к деформации или разрушению в результате абляции после длительного использования; хотя чистый вольфрам устойчив к высоким температурам и обладает высокой прочностью, он имеет плохую проводимость и плохо подходит для работы с большими токами. Сплав вольфрама с медью справляется с обоими этими задачами: медная фаза обеспечивает эффективное протекание тока и предотвращает чрезмерный нагрев контактов; вольфрамовая фаза выдерживает температуру дуги и механические воздействия, продлевает срок службы контактов и снижает количество отказов оборудования.

В деталях, требующих скользящего контакта, таких как щётки электродвигателей и токопроводящие ползуны, материал должен обладать высокой устойчивостью к трению и износу при одновременной электропроводности. Чистая медь обладает низкой износостойкостью, а длительное скольжение приводит к нестабильной электропроводности из-за износа; обычные медные сплавы обладают ограниченной износостойкостью и могут снижать электропроводность из-за добавления дополнительных элементов. Вольфрамовая фаза в сплаве вольфрама и меди повышает износостойкость поверхности и снижает потери при скольжении; медная фаза поддерживает стабильную электропроводность. Даже при незначительном износе поверхности непрерывность внутренней медной фазы может обеспечить электропроводность и стабильность работы оборудования. Кроме того, в некоторых компонентах, требующих двойной функции «проводимость + теплоотвод» (например, электроды мощных устройств), электропроводность вольфрамово-медного сплава и теплопроводность медной фазы образуют синергетический эффект: она не только проводит ток, но и отводит тепло, выделяющееся при работе устройства, предотвращая локальный перегрев и влияя на производительность. Это преимущество «одного материала для многократного использования» еще больше повышает ценность его применения в электрооборудовании.

2.1.5 Хорошая теплопроводность

вольфрама и меди является одним из основных носителей, используемых в высокотемпературных и мощных системах. Эта эффективность обусловлена не только определенным компонентом, но и синергией структуры и свойств вольфрама и меди. Он не только сохраняет эффективную теплопроводность меди, но и обеспечивает стабильность процесса теплопередачи благодаря скелетной структуре вольфрама. По сравнению с чистой медью его теплопроводность несколько снижена, но в обмен на более прочную механическую поддержку; по сравнению с чистым вольфрамом, его эффективность теплопроводности значительно повышена, что позволяет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

справиться с проблемой накопления тепла. Это «сбалансированное» свойство теплопроводности делает его незаменимым в ситуациях, когда требуется одновременно обеспечивать теплопередачу и несущую способность конструкции.

2.1.5.1 Основные принципы теплопроводности и механизмы теплопроводности

Основной принцип теплопроводности заключается в способности тепла передаваться из области с высокой температурой в область с низкой температурой посредством микроскопических перемещений внутри материала. Суть её заключается в передаче кинетической энергии молекулами, атомами или электронами: частицы в области с высокой температурой начинают вибрировать более интенсивно и передают энергию соседним частицам в области с низкой температурой посредством столкновений, постепенно осуществляя диффузию тепла.

Механизм теплопроводности сплава вольфрама с медью в основном основан на «электронной теплопроводности» фазы меди, дополненной «фононной теплопроводностью» фазы вольфрама. Медь, как металл, имеет внутри большое количество свободных электронов. После того, как эти электроны получают энергию в высокотемпературной области, их движение усиливается, и они быстро передают тепло в низкотемпературную область посредством столкновений. Это эффективный способ теплопроводности; в то время как теплопроводность вольфрама в основном зависит от колебаний решетки (т.е. «фононов»), а колебания атомов вблизи положения равновесия передают тепло через решетку. Хотя эффективность ниже, чем у электронной теплопроводности меди, она более стабильна. В структуре сплава фаза меди образует непрерывный канал теплопроводности, и тепло сначала быстро рассеивается через фазу меди. Вольфрамовый каркас служит «вспомогательным путём теплопередачи» и одновременно поддерживает целостность канала медной фазы, предотвращая разрушение пути теплопроводности из-за высокотемпературной деформации. Этот механизм, основанный на доминировании медной фазы и участии вольфрамовой фазы, позволяет сплаву эффективно переносить тепло и сохранять стабильность структуры теплопроводности при термическом ударе.

2.1.5.2 Соотношение между теплопроводностью и эффектом рассеивания тепла

Теплопроводность является основой эффекта рассеивания тепла, и между ними наблюдается «положительная корреляция»: чем выше теплопроводность материала, тем быстрее тепло передается от источника тепла во внешнюю среду и тем значительнее эффект рассеивания тепла. Однако эффект рассеивания тепла определяется не только теплопроводностью, но и связан с площадью рассеивания тепла материала, состоянием контакта со средой рассеивания тепла и т. д. Преимущество сплава вольфрама с медью заключается в том, что он «усиливает эффект других условий рассеивания тепла за счет эффективной теплопроводности». Когда источник тепла генерирует тепло, сплав вольфрама с медью с хорошей теплопроводностью может быстро отводить тепло от поверхности источника тепла, предотвращая локальное накопление тепла; проведенное тепло будет передаваться среде рассеивания тепла, такой как воздух и охлаждающая жидкость, через поверхность материала. В то же время, если теплопроводность самого материала

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

недостаточна, даже при большой площади рассеивания тепла, теплу трудно достичь поверхности, и эффект рассеивания тепла будет значительно снижен. Кроме того, хорошая теплопроводность сплава вольфрама и меди может предотвратить образование «горячих точек» (локальных областей с высокой температурой) внутри материала. Горячие точки часто являются причиной выхода из строя компонента из-за перегрева. Следовательно, равномерная теплопроводность косвенно повышает надежность общего рассеивания тепла. Можно сказать, что теплопроводность сплава вольфрама и меди обеспечивает «базовую мощность» для эффекта рассеивания тепла, позволяя конструкции рассеивания тепла функционировать более эффективно.

2.1.5.3 Значение теплопроводности в условиях высоких температур

В условиях высоких температур теплопроводность материала должна быть не только «эффективной», но и «стабильной», то есть не снижаться значительно при повышении температуры окружающей среды. Этот параметр отражает эксплуатационную ценность вольфрамово-медного сплава. В деталях, расположенных вблизи камеры сгорания аэрокосмических двигателей, температура окружающей среды очень высока, и эти детали также будут генерировать дополнительное тепло в результате работы. При нестабильной теплопроводности накопление тепла может привести к превышению допустимой температуры деталей. Хотя медная фаза в сплаве вольфрама и меди может размягчаться при высоких температурах, её теплопроводность не будет значительно снижаться до тех пор, пока она не достигнет точки плавления; а вольфрамовый каркас может сохранять структурную стабильность и предотвращать деформацию медной фазы под воздействием высоких температур и блокирование пути теплопроводности, что позволяет ему непрерывно проводить тепло и обеспечивать безопасную работу деталей при высоких температурах.

В теплорассеивающей подложке мощных полупроводниковых приборов во время работы выделяется большое количество тепла, и температура окружающей среды повышается со временем. При превышении определённого диапазона температуры обычных теплопроводящих материалов (например, чистого алюминия) их теплопроводность значительно снижается, что приводит к нарушению теплоотвода. Сплав вольфрама и меди сохраняет стабильную теплопроводность при высоких температурах, непрерывно отдавая тепло, вырабатываемое прибором, теплоотводящему устройству, предотвращая ухудшение его характеристик или повреждение из-за перегрева.

Кроме того, электроды дуговой сварки должны не только проводить ток, но и выдерживать кратковременно высокую температуру, создаваемую дугой. При низкой теплопроводности сам электрод быстро сгорит из-за неспособности рассеивать тепло. Вольфрамово-медный сплав способен эффективно отводить тепло дуги, снижая температуру самого электрода, продлевая его срок службы и обеспечивая стабильность сварочного процесса. Эта характеристика, заключающаяся в сохранении высокой теплопроводности при высоких температурах, делает его ключевым материалом, связывающим «тепловыделение» и «теплоотвод» в высокотемпературных средах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.1.6 Коррозионная стойкость и механизм

Сплав вольфрама с медью – это не самая выдающаяся его характеристика, но он имеет практическое значение во влажных средах со слабокоррозионными свойствами. Его коррозионная стойкость достигается не одним компонентом, а результатом структурного взаимодействия вольфрама и меди и «пассивного сопротивления» коррозионному процессу. Он не только предотвращает быстрое окисление чистой меди в определённых средах, но и компенсирует локальные коррозионные дефекты чистого вольфрама в сложных средах, сохраняя стабильность структуры и эксплуатационные характеристики в различных промышленных условиях.

2.1.6.1 Влияние различных коррозионных сред

Различия в коррозионной среде повлияют на степень коррозии сплава вольфрама с медью, что в основном отражается в трех аспектах: типе среды, влажности и температуре. Во влажной атмосферной среде водяной пар образует водяную пленку на поверхности сплава. Если в воздухе присутствует небольшое количество загрязняющих веществ (таких как диоксид серы и соль), водная пленка станет слабым электролитом и вызовет небольшую электрохимическую коррозию. Медная фаза может окисляться, и на поверхности образуется оксидная пленка, но эта оксидная пленка плотная и может в определенной степени предотвратить дальнейшее распространение коррозии. Вольфрам более устойчив к такой среде и практически не корродирует, поэтому общая скорость коррозии медленная.

В кислой или щелочной среде степень коррозии значительно усугубляется. Кислотные среды разрушают оксидную пленку на поверхности меди, в результате чего медная фаза продолжает растворяться; щелочные среды могут вступать в химическую реакцию с медью с образованием растворимых веществ, ускоряя потерю медной фазы. В это время, хотя вольфрамовая фаза может противостоять кислотной и щелочной коррозии, по мере того, как медная фаза продолжает терять, структура сплава постепенно становится рыхлой, что в конечном итоге влияет на общие характеристики. В высокотемпературной сухой среде коррозия в основном представляет собой окисление. Высокие температуры ускоряют реакцию окисления меди, и на поверхности может образоваться более толстый слой оксида. Если оксидный слой отваливается, новая медная поверхность будет подвергаться дальнейшему окислению; вольфрам медленно окисляется при высоких температурах, и образовавшийся оксидный слой может прилипать к поверхности, защищая внутреннюю часть, поэтому общий уровень коррозии ниже, чем во влажной, кислой или щелочной среде.

2.1.6.2 Внутренний механизм коррозионной стойкости

вольфрама и меди можно обобщить как синергетический эффект «коррозионно-стойкого скелета вольфрамовой фазы + самозащиты от окисления медной фазы + структурного барьера плотности».

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сама вольфрамовая фаза обладает высокой химической стабильностью и не склонна к реакциям со средой в большинстве распространённых коррозионных сред. Образующий ею непрерывный каркас обеспечивает коррозионную стойкость сплава: даже при незначительной коррозии медной фазы вольфрамовый каркас сохраняет свою структурную целостность и предотвращает общее повреждение сплава.

Во влажной или слабоокислительной среде на поверхности меди образуется оксидная пленка. Хотя эта пленка и приводит к изменению цвета поверхности, её текстура относительно плотная и может препятствовать дальнейшему контакту среды с медью. Это эквивалентно образованию «естественного барьера», замедляющего дальнейшее распространение коррозии.

Кроме того, плотная структура сплава также может повысить коррозионную стойкость. Благодаря оптимизации процесса изготовления, пористость внутри сплава вольфрама и меди снижается, что уменьшает каналы проникновения коррозионных сред внутрь; в то же время, граница раздела между вольфрамом и медью прочно связана, предотвращая скопление среды на границе раздела и образование локальных очагов коррозии, что дополнительно снижает риск коррозии. Этот механизм «скелетной коррозионной стойкости, самозащиты от окисления и структурной стойкости к проникновению» позволяет сплаву сохранять хорошую стабильность в неэкстремальных коррозионных средах.

2.1.6.3 Технические средства повышения коррозионной стойкости

Для повышения коррозионной стойкости сплава вольфрама и меди необходимо начать с трёх направлений: «блокирование путей коррозии», «усиление защиты поверхности» и «оптимизация внутренней структуры», а также снизить воздействие коррозионных сред на материалы с помощью целенаправленных технических средств. Обработка поверхности является наиболее прямым техническим средством. Коррозионностойкое покрытие формируется на поверхности сплава посредством гальванопокрытия (например, хромирования и никелирования). Это покрытие обладает высокой химической стойкостью и может полностью изолировать матрицу сплава от агрессивной среды. В то же время само покрытие не подвержено окислению и растворению, что значительно снижает вероятность коррозии. Химическая пассивация также может использоваться для формирования более плотной и стабильной оксидной плёнки на поверхности медной фазы с помощью специального раствора для повышения способности к «самозащите», не влияя на основные свойства сплава, такие как электропроводность.

Оптимизация внутренней структуры может повысить коррозионную стойкость с самого начала. Уменьшение размера частиц вольфрамового и медного порошков и повышение однородности смешивания позволяет уменьшить сегрегацию компонентов и пористость внутри сплава, а также предотвратить локальное скопление коррозионной среды. Использование современных процессов спекания (таких как горячее изостатическое прессование) позволяет повысить плотность сплава, устранить внутренние микротрещины и пустоты, блокировать каналы проникновения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионной среды внутрь и повысить коррозионную стойкость с точки зрения структуры. Добавление коррозионно-стойких вспомогательных элементов также является эффективным техническим решением. Добавление небольшого количества элементов с высокой коррозионной стойкостью (таких как хром и кремний) в сплав обогащает этими элементами медную фазу или границу раздела вольфрам-медь, что не влияет на проводимость меди и эффект скелета вольфрама, но также повышает стойкость медной фазы к окислению или прочность связи на границе раздела и уменьшает возникновение локальной коррозии.

2.2 Влияние соотношения компонентов на свойства сплава вольфрама с медью

Вольфрамово-медный сплав состоит из вольфрама (высокая твёрдость, высокая температура плавления, хрупкость) и меди (хорошая пластичность, электропроводность, теплопроводность). Соотношение этих двух компонентов в составе (обычно выражаемое содержанием вольфрама, например, W70Cu30 означает, что вольфрам составляет 70%, а медь — 30%) является ключевым фактором, определяющим его эксплуатационные характеристики. Поскольку механические и физические свойства вольфрама и меди существенно различаются, изменение соотношения компонентов непосредственно приводит к закономерному изменению механических свойств сплава (твёрдости, прочности и вязкости). Это изменение является результатом синергетического эффекта «поддержки скелета вольфрамовой фазы» и «пластичного буфера медной фазы».

2.2.1 Влияние на механические свойства

Сплавы на основе вольфрама и меди в о п л о щ а ю т собой баланс между высокой прочностью и твёрдостью вольфрама и пластичностью и вязкостью меди. С увеличением содержания вольфрама структура сплава постепенно меняется от «медь как матрица и вольфрам как армирующая фаза» к «вольфрам как каркас и медь как заполняющая фаза», а механические свойства также изменяются от «преобладающей пластичности» к «преобладающей жёсткости». И наоборот, с увеличением содержания меди пластичность и вязкость сплава значительно возрастают, но твёрдость и прочность снижаются.

2.2.1.1 Влияние на твердость

вольфрама с медью тесно связан с долей его компонентов, среди которых элемент вольфрам играет ведущую роль в повышении твердости. Когда содержание вольфрама в сплаве низкое, медная фаза занимает доминирующее положение, образуя непрерывную матрицу с небольшим количеством дисперсных частиц вольфрама, внедренных в нее. В это время сплав в целом мягче, и его твердость близка к твердости чистой меди. Это связано с тем, что медь имеет относительно мягкую текстуру и имеет ограниченную способность противостоять внешним деформациям, таким как вмятины и царапины. Например, сплав вольфрама с медью, содержащий 10% -20% вольфрама, имеет твердость по Бринеллю приблизительно 80-120НВ, что больше подходит для некоторых сценариев, которые не требуют высокой твердости, но требуют хороших характеристик обработки и других свойств (таких как проводимость).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

По мере постепенного увеличения содержания вольфрама, например, примерно до 50%, внутренняя структура сплава существенно меняется. Частицы вольфрама сближаются и начинают образовывать определённую степень каркасной структуры. Хотя медная фаза всё ещё присутствует и заполняет пустоты в вольфрамовом скелете, в этот момент начинает проявляться поддерживающая роль вольфрамовой фазы. Поскольку сам вольфрам обладает чрезвычайно высокой твёрдостью, образуемый им скелет значительно повышает способность сплава сопротивляться деформации, и твёрдость сплава значительно увеличивается, до 200-250НВ. Такой уровень твёрдости позволяет сплаву эффективно сохранять целостность поверхности в условиях умеренного трения и износа и подходит для деталей, подверженных определённому трению, таких как компоненты механических трансмиссий.

При дальнейшем увеличении содержания вольфрама до 70%-80% или даже выше, вольфрамовая фаза образует непрерывный и прочный скелет, а медная фаза заполняет только мельчайшие поры вольфрамового скелета. В это время твердость сплава близка к твердости чистого вольфрама, которая может превышать 300НВ. Сплавы вольфрама с медью с высоким содержанием вольфрама хорошо работают в экстремальных рабочих условиях высоких напряжений и высокого износа. Например, электроды для электроэрозионной обработки часто подвергаются воздействию высоких температур и высокого давления, возникающих при разряде во время работы, и материал должен иметь чрезвычайно высокую твердость, чтобы гарантировать точность формы и срок службы электрода; для высоковольтных разрядных контактов также требуются материалы с высокой твердостью, чтобы противостоять дуговой эрозии и механическому износу при частом открытии и закрытии. Сплавы вольфрама с медью с высоким содержанием вольфрама могут хорошо удовлетворить эти требования.

2.2.1.2 Влияние на прочность

С точки зрения прочности, предел прочности на растяжение и прочность на сжатие сплавов вольфрама с медью демонстрируют различные изменения в зависимости от соотношения состава. Что касается прочности на растяжение, когда содержание вольфрама низкое (например, $\leq 50\%$), медная фаза несет основную силу растяжения как непрерывная матрица. В это время прочность сплава на растяжение в основном зависит от пластической несущей способности меди. Поскольку прочность меди относительно низкая, а армирующий эффект диспергированных в ней частиц вольфрама ограничен, прочность сплава на растяжение увеличивается медленно. Например, прочность на растяжение сплава вольфрама с медью, содержащего 30% вольфрама, составляет около 300-350 МПа.

По мере увеличения содержания вольфрама до 50–80 % вольфрамовая фаза постепенно образует полунепрерывную или даже непрерывную структуру скелета, а медная фаза заполняет промежутки в вольфрамовом скелете, играя роль в связывании и передаче напряжения. В этот момент, когда сплав подвергается нагрузке, напряжение может более эффективно передаваться и рассеиваться через вольфрамовый скелет, и прочность на растяжение значительно повышается. Поскольку сам вольфрам обладает высокой прочностью, его структура скелета значительно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

увеличивает общую несущую способность сплава. В то же время медная фаза снимает проблему локальной концентрации напряжений. Например, прочность на растяжение сплава вольфрам-медь, содержащего 60 % вольфрама, может достигать 450–550 МПа. При содержании 70–80 % вольфрама прочность на растяжение дополнительно увеличивается примерно до 600–700 МПа.

Однако при дальнейшем увеличении содержания вольфрама ($\geq 80\%$) прочность на разрыв после достижения пикового значения несколько снижается. Это связано с тем, что доля фазы меди слишком мала и она не может полностью заполнить промежутки между частицами вольфрама, что приводит к ослаблению связи на границе раздела вольфрам-вольфрам. При растяжении эти слабые границы раздела склонны к растрескиванию в первую очередь, что, в свою очередь, приводит к общему разрушению и снижению прочности сплава на разрыв. Например, сплав вольфрама с медью, содержащий 90% вольфрама, имеет прочность на разрыв около 600–650 МПа, что несколько ниже, чем у сплава с 80% вольфрама.

Что касается прочности на сжатие, правило относительно простое и прямолинейное. С увеличением содержания вольфрама прочность на сжатие продолжает расти. В процессе сжатия сплав в основном опирается на структуру скелета, образованного вольфрамовой фазой, чтобы противостоять деформации сжатия. Чем выше содержание вольфрама, тем прочнее скелет и тем большее давление он может выдерживать. Например, сплав вольфрама с медью, содержащий 90% вольфрама, имеет прочность на сжатие более 1000 МПа, в то время как сплав с 50% вольфрама имеет прочность на сжатие всего около 600–700 МПа.

2.2.1.3 Влияние на прочность

Прочность сплава вольфрама с медью в основном определяется медной фазой и существенно отрицательно коррелирует с содержанием вольфрама. При низком содержании вольфрама ($\leq 50\%$) медная фаза существует в виде непрерывной матрицы, что придает сплаву хорошую вязкость. При ударе или внешнем воздействии медная фаза может поглощать большое количество энергии посредством пластической деформации, рассеивать напряжение и снижать вероятность образования и расширения трещин. В это время, хотя небольшое количество дисперсных частиц вольфрама оказывает определенное влияние на непрерывность медной фазы, это не меняет общий режим поглощения энергии сплава, заключающийся в основном в пластической деформации. Сплав обладает хорошей ударной вязкостью. Например, ударная вязкость сплава вольфрама с медью, содержащего 30% вольфрама, составляет около 15-20 Дж/см², что близко к уровню вязкости чистой меди. Он способен сохранять структурную целостность в среде с определенными ударами и подходит для некоторых конструктивных деталей, требующих определенной ударопрочности.

По мере увеличения содержания вольфрама до 50% -80% вольфрамовая фаза постепенно образует каркас во внутренней структуре сплава, а медная фаза превращается в дисперсную фазу, заполняющую промежутки в вольфрамовом скелете. Это структурное изменение приводит к значительному сокращению пространства пластической деформации медной фазы. При

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

воздействию внешней силы медной фазе трудно деформироваться полностью, как прежде, для поглощения энергии. Напряжение легко концентрируется на границе раздела вольфрам-медь, вызывая растрескивание интерфейса. Поэтому ударная вязкость сплава значительно снижается с увеличением содержания вольфрама. Например, ударная вязкость сплава вольфрам-медь, содержащего 60% вольфрама, падает до 5-10 Дж/см², и в этот момент сплав становится более восприимчивым к повреждению при ударе.

При дальнейшем увеличении содержания вольфрама до $\geq 80\%$ непрерывный вольфрамовый скелет практически не имеет способности к пластической деформации, а медная фаза заполняет только крошечные зазоры, что не может эффективно снять концентрацию напряжений. Под ударной нагрузкой вольфрамовый скелет очень легко ломается напрямую, сплав поглощает очень мало энергии, демонстрируя очевидную хрупкость, а ударная вязкость крайне низкая. Например, ударная вязкость сплава вольфрама с медью, содержащего 90% вольфрама, составляет всего 1-3 Дж/см², что близко к хрупкому состоянию чистого вольфрама. Этот сплав с высоким содержанием вольфрама следует избегать подвергания сильным ударам во время использования и в основном используется в сценах с высокими требованиями к твердости и прочности, но низкими требованиями к ударной вязкости.

2.2.2 Влияние на физические свойства

Сплавы вольфрама и меди не являются фиксированными, а будут регулярно меняться с изменением соотношения вольфрама и меди в составе. Это связано с тем, что физические свойства самих вольфрама и меди, очевидно, различаются. При увеличении или уменьшении доли этих двух элементов в сплаве, сплав будет объединять характеристики двух металлов, формируя новые физические свойства. Будь то свойства, связанные с внутренними свойствами материала, такими как плотность и температура плавления, или свойства, связанные с изменениями температуры, такими как коэффициент теплового расширения, влияние соотношения компонентов можно четко увидеть, и это влияние также позволяет сплаву вольфрама и меди адаптироваться к требованиям к физическим характеристикам в различных сценариях путем регулирования состава.

2.2.2.1 Влияние на плотность

вольфрама и меди тесно связан с пропорцией его компонентов, показывая четкую закономерность изменения. Вольфрам, как металл с высокой плотностью, имеет большой атомный вес и плотное расположение атомов, что придает ему чрезвычайно высокие характеристики плотности. Хотя плотность меди находится на среднем уровне среди металлов, она значительно ниже, чем у вольфрама. Когда содержание вольфрама в системе сплава находится на низком уровне, медная фаза занимает основное положение в структуре сплава и представляет собой состояние непрерывного распределения. В это время характеристики плотности сплава в основном зависят от медной фазы, а общая плотность близка к значению плотности чистой меди. В этом случае сплав имеет преимущества в некоторых сценариях, которые чувствительны к весу и имеют другие свойства материала (такие как хорошая проводимость, определенные характеристики обработки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и т. д.). Например, в некоторых внутренних соединительных компонентах электронного оборудования со строгими ограничениями по весу сплавы вольфрама и меди с низким содержанием вольфрама могут отвечать требованиям к электрическим характеристикам и при этом максимально снижать общий вес.

По мере постепенного увеличения содержания вольфрама в сплаве доля фазы вольфрама высокой плотности во внутренней структуре сплава продолжает увеличиваться, и ее вклад в общую плотность сплава становится все более заметным. При этом непрерывная структура, изначально состоящая из медной фазы, постепенно разрушается, частицы вольфрама начинают сближаться и постепенно образуют структуру каркаса, а медная фаза заполняет промежутки в вольфрамовом скелете. Поскольку плотность фазы вольфрама значительно выше, чем у фазы меди, плотность сплава неуклонно увеличивается с увеличением содержания вольфрама. Эта характеристика постепенного увеличения плотности позволяет сплаву играть роль в сценариях применения, где необходимо выдерживать большие ударные нагрузки или требовать стабильных противовесов. Например, в некоторых механических устройствах со сложными вибрационными условиями соответствующее увеличение содержания вольфрама в сплаве вольфрама с медью и увеличение его плотности может повысить устойчивость компонентов в вибрационной среде и снизить риск смещения или повреждения, вызванного вибрацией.

Когда содержание вольфрама в сплаве достигает высокой доли, вольфрамовая фаза образует непрерывную и стабильную структуру скелета в сплаве, а медная фаза заполняет только мельчайшие поры вольфрамового скелета. В это время характеристики плотности сплава почти полностью определяются вольфрамовой фазой, а плотность сплава также близка к плотности чистого вольфрама. Сплавы вольфрама с медью с высоким содержанием вольфрама показывают уникальную ценность в некоторых специальных областях. Например, при изготовлении определенных деталей в аэрокосмической области материал должен сохранять структурную целостность при воздействии экстремального давления и высокоскоростного воздушного потока. Сплав вольфрама с медью высокой плотности может эффективно справляться с этими экстремальными рабочими условиями благодаря своей высокой плотности и высокой прочности и твердости, обеспечиваемым вольфрамовой фазой; В некоторых сценариях, связанных с атомной промышленностью, где необходимо поглощать удары частиц высокой энергии или противостоять ударам высокой энергии, сплавы вольфрамовой меди с высоким содержанием вольфрама и высокой плотностью также могут играть ключевую роль, используя свою высокую плотность для поглощения и рассеивания энергии удара для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования.

2.2.2.2 Влияние на температуру плавления

Характер изменения температуры плавления сплава сложен и тесно связан с пропорцией компонентов. Вольфрам имеет чрезвычайно высокую температуру плавления, занимая одно из самых высоких мест среди распространенных металлов. Это связано с его сильной силой связи между атомами и сложной кристаллической структурой. Температура плавления меди намного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ниже, чем у вольфрама, и разница между двумя температурами плавления значительна. Когда содержание вольфрама в сплаве находится на низком уровне, микроструктура сплава основана на медной фазе как непрерывной матрице. В это время температура плавления сплава в основном определяется свойствами медной фазы, а общая температура плавления близка к температуре плавления чистой меди. Однако, поскольку в сплаве присутствует небольшое количество частиц вольфрама, эти частицы вольфрама с высокой температурой плавления в определенной степени увеличат температуру плавления сплава. Хотя этот эффект улучшения не столь значителен на стадии низкого содержания вольфрама, он уже в некоторой степени повысил температуру плавления сплава по сравнению с чистой медью. Эта характеристика температуры плавления позволяет использовать сплавы вольфрама с медью с низким содержанием вольфрама в некоторых случаях, где не требуется особенно высокая температура плавления, но требуется определённая степень термостойкости и другие свойства, такие как хорошая электропроводность и теплопроводность. Например, при изготовлении компонентов теплоотвода для некоторого электронного оборудования этот тип сплава может сохранять структурную стабильность и выполнять функции хорошего теплоотвода в условиях, когда при нормальной работе оборудования выделяется определённое количество тепла.

По мере постепенного увеличения содержания вольфрама в сплаве внутренняя структура сплава существенно изменяется, и фаза вольфрама начинает постепенно образовывать каркасную структуру. В это время влияние фазы вольфрама с высокой температурой плавления на температуру плавления в системе сплава становится все более очевидным. Поскольку температура плавления фазы вольфрама намного выше, чем у фазы меди, образуемая ею каркасная структура в определенной степени ограничивает текучесть и атомную диффузию фазы меди в процессе нагрева, так что сплаву в целом необходимо поглотить больше энергии, чтобы достичь состояния плавления, тем самым значительно увеличивая температуру плавления сплава. На этом этапе повышение температуры плавления сплава постепенно увеличивается с увеличением содержания вольфрама, показывая относительно очевидную тенденцию к росту. Это свойство дает сплаву преимущество при изготовлении некоторых компонентов, работающих в средах средних и высоких температур. Например, при изготовлении внутренних соединительных деталей некоторых промышленных печей или защитных оболочек высокотемпературных датчиков, соответствующее увеличение содержания вольфрама в сплаве вольфрама с медью и повышение его температуры плавления может гарантировать, что компоненты могут работать стабильно в течение длительного времени в высокотемпературной среде без плавления и деформации из-за повышения температуры, тем самым обеспечивая нормальную работу оборудования. Когда содержание вольфрама в сплаве достигает высокого уровня, доминирует непрерывная и стабильная структура вольфрамового скелета, а медная фаза заполняет только мельчайшие поры вольфрамового скелета. В этот момент температура плавления сплава значительно повышается, приближаясь к температуре плавления вольфрама. В этом случае сплав демонстрирует замечательную стабильность в экстремально высоких температурных условиях. Например, при изготовлении компонентов камеры сгорания авиационных двигателей и компонентов тепловой защиты для входа в атмосферу космических аппаратов, эти компоненты будут сталкиваться с высокотемпературной средой в тысячи градусов во время работы. Сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама с высоким содержанием вольфрама способен выдерживать столь экстремально высокие температуры благодаря своей высокой температуре плавления, эффективно предотвращая плавление и деформацию деталей при высоких температурах и обеспечивая безопасную эксплуатацию самолета или двигателя. Кроме того, присутствие меди может обеспечить сплаву определённую хорошую теплопроводность, способствовать рассеиванию тепла, выделяемого при высоких температурах, и дополнительно повысить надёжность сплава в условиях высоких температур.

2.2.2.3 Влияние на коэффициент теплового расширения

Коэффициент теплового расширения является важным показателем для измерения размерной стабильности материала при изменении температуры. Существует тесная связь между коэффициентом теплового расширения сплава вольфрама с медью и долей компонентов сплава. Медь имеет относительно большой коэффициент теплового расширения, что означает, что при изменении температуры тепловое движение атомов меди усиливается, а расстояние между атомами увеличивается, что приводит к более заметному расширению или сжатию общего размера медного материала. Коэффициент теплового расширения вольфрама относительно невелик, его атомная структура относительно стабильна, а изменение расстояния между атомами относительно невелико при изменении температуры. При низком содержании вольфрама в сплаве медная фаза доминирует в структуре сплава и представляет собой состояние непрерывного распределения. В это время характеристики теплового расширения сплава в основном определяются медной фазой, а коэффициент теплового расширения сплава близок к значению коэффициента теплового расширения чистой меди. В этом случае при изменении температуры окружающей среды сплав будет производить большое изменение объема. Например, на ранних этапах проектирования некоторого электронного оборудования, если в качестве соединительного компонента используется сплав вольфрамовой меди с низким содержанием вольфрама, то при длительной работе оборудования и его нагревании или при значительных колебаниях температуры окружающей среды из-за большого коэффициента теплового расширения сплава соединительный компонент может ослабнуть из-за теплового расширения и сжатия, что повлияет на стабильность электрического соединения и общие эксплуатационные характеристики оборудования.

По мере постепенного увеличения содержания вольфрама в сплаве доля фазы вольфрама с низким коэффициентом расширения во внутренней структуре сплава продолжает расти, и ее ингибирующее влияние на общее тепловое расширение сплава постепенно становится заметным. При этом непрерывная структура, изначально доминируемая медной фазой, постепенно разрушается, и фаза вольфрама начинает формировать определенную каркасную структуру, а медная фаза заполняет промежутки в вольфрамовом скелете. Поскольку коэффициент теплового расширения фазы вольфрама значительно меньше, чем у фазы меди, она играет роль в стабилизации структуры и ограничении общего теплового расширения в сплаве. По мере дальнейшего увеличения содержания вольфрама коэффициент теплового расширения сплава постепенно уменьшается. Эта характеристика изменения коэффициента теплового расширения с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

содержанием вольфрама делает сплав имеющим широкий потенциал применения в некоторых сценариях с высокими требованиями к согласованию коэффициента теплового расширения. Например, в области электронной упаковки различные электронные компоненты часто состоят из множества различных материалов, и коэффициент теплового расширения каждого материала различен.

Чтобы гарантировать, что в процессе эксплуатации оборудования соединительные детали между различными компонентами не будут создавать концентрацию напряжений из-за разницы в тепловом расширении и сжатии, вызванной изменением температуры, что может привести к разрушению или повреждению соединения, необходимо выбирать упаковочные материалы с коэффициентами теплового расширения, соответствующими коэффициентам теплового расширения материалов других компонентов. Регулируя содержание вольфрама в сплаве вольфрама с медью, можно точно регулировать его коэффициент теплового расширения в определенном диапазоне, тем самым удовлетворяя требованиям к согласованию коэффициентов теплового расширения различных материалов электронных компонентов (таких как керамические подложки, полупроводниковые кристаллы и т. д.), гарантируя стабильную и надежную работу электронного оборудования в различных температурных условиях.

Когда содержание вольфрама в сплаве достигает высокой доли, в сплаве доминирует непрерывная и стабильная структура вольфрамового скелета, а медная фаза заполняет только мельчайшие поры вольфрамового скелета. В это время коэффициент теплового расширения сплава приближается к коэффициенту вольфрама. При изменении температуры размерная стабильность сплава значительно улучшается, а амплитуда теплового расширения и сжатия становится очень малой. Эта характеристика делает сплав вольфрама с медью с высоким содержанием вольфрама незаменимым в некоторых высокоточных областях, таких как точное приборостроение и аэрокосмическая промышленность, где требуется чрезвычайно высокая размерная стабильность. Например, при производстве компонентов оптических приборов для космических аппаратов эти приборы будут сталкиваться с чрезвычайно сложными и резко меняющимися температурными условиями в космосе, от чрезвычайно холодного глубокого космоса Вселенной до высокотемпературной среды вблизи Солнца, а диапазон температур может достигать сотен градусов Цельсия. Вольфрамово-медные сплавы с высоким содержанием вольфрама и низким коэффициентом теплового расширения могут гарантировать, что структурные размеры оптических приборов останутся практически неизменными при столь экстремальных изменениях температуры, тем самым гарантируя, что высокоточные оптические характеристики оптических приборов не пострадают, и обеспечивая стабильную и надежную поддержку данных наблюдений для миссий по исследованию космоса.

2.2.2.4 Влияние на проводимость

Вольфрамово- медный сплав тесно связан с соотношением компонентов. Медь является хорошим проводящим металлом с высокой электропроводностью, в то время как вольфрам имеет относительно низкую электропроводность. С увеличением содержания вольфрама в сплаве

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электропроводность постепенно снижается. Это связано с большим межатомным расстоянием вольфрама и низкой плотностью электронного облака. При добавлении в медную матрицу он образует дисперсную фазу и упаковку, препятствуя потоку электронов на границах зерен и внутри зерен, внося больше ионных дефектов и примесных атомов, тем самым затрудняя свободный перенос электронов в решетке. Когда содержание вольфрама превышает определенную долю, скорость снижения проводимости начинает замедляться, вероятно, из-за того, что электронные барьеры, образованные более высоким содержанием вольфрама, начинают взаимодействовать и ограничивать поток большего количества электронов. Напротив, увеличение содержания меди увеличивает электропроводность сплава, поскольку высокие характеристики электропроводности меди позволяют лучше проводить ток.

2.2.2.5 Влияние на теплопроводность

С точки зрения теплопроводности медь имеет значительно более высокую теплопроводность, чем вольфрам. Поэтому, в общем, чем выше содержание меди в сплаве вольфрама с медью, тем выше теплопроводность. Это связано с тем, что чистые металлы проводят тепло в основном за счет свободных электронов, а медь имеет относительно высокую концентрацию свободных электронов, которые могут передавать тепло более эффективно. Однако слишком высокое содержание меди приведет к снижению содержания вольфрама, что может оказать неблагоприятное влияние на другие свойства сплава, такие как увеличение коэффициента теплового расширения. В то же время на теплопроводность сплава влияют и другие факторы, такие как плотность. Газ является плохим переносчиком тепла. Когда в материале есть поры, теплопроводность будет уменьшаться с увеличением пористости, поэтому сплавы вольфрама с медью с высокой плотностью обычно имеют более высокую теплопроводность.

2.2.3 Влияние на химические свойства

Сплав вольфрама с медью обладает хорошей химической стабильностью. С точки зрения стойкости к окислению, вольфрам имеет более высокую температуру плавления и лучшую стойкость к окислению. С увеличением содержания вольфрама стойкость сплава к окислению в некоторой степени повышается. Однако медь в сплаве легко окисляется при высоких температурах, поэтому стойкость сплава к окислению должна всесторонне учитывать такие факторы, как соотношение вольфрама к меди и среда использования. С точки зрения коррозионной стойкости, вольфрам и медь сами по себе обладают определенной коррозионной стойкостью, а сплав вольфрама с медью обладает хорошей стойкостью к некоторым распространенным химикатам и средам. Однако в определенных химических средах, таких как сильные окисляющие кислоты, медь может подвергаться коррозионным реакциям. В это время увеличение содержания вольфрама может в определенной степени улучшить коррозионную стойкость сплава. Кроме того, содержание примесей и процесс приготовления также влияют на химические свойства сплава вольфрама с медью. Например, слишком высокое содержание кислорода вызовет окисление сплава вольфрама с медью, снижая прочность и проводимость сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.3.1 Влияние на коррозионную стойкость

Вольфрамово -медный сплав существенно зависит от его состава и демонстрирует разнообразные эксплуатационные характеристики в различных коррозионных средах. Сам вольфрам обладает хорошей химической стабильностью и способен сохранять свою структуру от лёгкой коррозии во многих распространённых коррозионных средах. При относительно высоком содержании вольфрама в сплаве скелетная структура, образованная вольфрамовой фазой, может обеспечить определённую коррозионную стойкость сплава. Например, в некоторых слабокислых средах сплавы вольфрама с медью с высоким содержанием вольфрама могут эффективно замедлять скорость коррозии всего сплава благодаря химической стабильности вольфрама. Это объясняется тем, что для проникновения коррозионной среды через поверхность сплава и достижения внутренних структур ей необходимо преодолеть относительно прочный «барьер», образованный вольфрамовой фазой. Сильные связи между атомами вольфрама и относительно стабильная электронная структура затрудняют химическую реакцию ионов в коррозионной среде, тем самым препятствуя дальнейшему распространению коррозии.

Однако медь относительно активна в некоторых коррозионных средах. В некоторых сильно окисляющих кислотных растворах, таких как азотная кислота, медь легко вступает в окислительно-восстановительные реакции с азотной кислотой с образованием соответствующих солей меди и выделением газообразного оксида азота. При высоком содержании меди в сплаве негативное влияние этой активности на коррозионную стойкость сплава становится заметным. В такой среде медная фаза становится основным «прорывом» для коррозии сплава, и коррозионная среда будет преимущественно реагировать с медью, что приводит к образованию коррозионных язв, пятен ржавчины и других явлений на поверхности сплава, тем самым разрушая общую структуру сплава и снижая его эксплуатационные характеристики.

Однако в некоторых нейтральных или слабощелочных водных растворах ситуация иная. В этом случае, если содержание меди находится в определённом диапазоне, медь может образовывать тонкую пассивирующую плёнку на поверхности сплава. Основным компонентом этой пассивирующей плёнки являются некоторые оксиды или гидроксиды меди. Она обладает определённой плотностью и способна предотвращать дальнейшее проникновение растворённого кислорода и других едких ионов из раствора во внутреннюю часть сплава, тем самым в определённой степени повышая коррозионную стойкость сплава. Например, при выборе материалов для облицовки некоторых промышленных водопроводных труб, если используется сплав вольфрама и меди с умеренным содержанием меди, это пассивирующее свойство меди может быть использовано для сохранения целостности облицовки трубы при длительном контакте с водой и снижения возникновения таких проблем, как сквозная коррозия.

2.2.3.2 Влияние на стойкость к высокотемпературному окислению

Стойкость к высокотемпературному окислению является ключевым показателем для измерения характеристик сплава вольфрама с медью в высокотемпературной кислородной среде, и она тесно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

связана с соотношением состава. Вольфрам имеет чрезвычайно высокую температуру плавления 3410 °C, и при высокой температуре на его поверхности может образовываться относительно стабильная оксидная пленка. Основными компонентами этой оксидной пленки являются оксиды, такие как WO_3 , которые обладают хорошей плотностью и стабильностью и могут препятствовать дальнейшей диффузии кислорода в сплав, тем самым защищая сплав. Когда содержание вольфрама в сплаве высоко, в высокотемпературной кислородной среде на поверхности сплава преимущественно образуется оксидная пленка, состоящая в основном из оксида вольфрама. По мере повышения температуры и увеличения времени эта оксидная пленка продолжает утолщаться, и благодаря своей стабильной структуре она может эффективно предотвращать дальнейшую реакцию между кислородом и внутренней частью сплава, значительно улучшая стойкость сплава к высокотемпературному окислению. Например, во внутренних деталях некоторых высокотемпературных печей, если используется сплав вольфрама с высоким содержанием вольфрама, он будет длительно работать при температуре 1000 °C и выше. Стойкая оксидная пленка, образующаяся на поверхности сплава, может гарантировать, что конструкционные детали не будут переокисляться в течение длительного времени, сохраняя свои механические свойства и структурную целостность.

Напротив, медь имеет относительно низкую температуру плавления 1080 °C, и медь относительно быстро окисляется при высоких температурах. Когда содержание меди в сплаве высокое, медь будет окисляться до оксидов, таких как Cu_2O или CuO , быстрее в высокотемпературной аэробной среде. По сравнению с оксидами вольфрама, эти оксиды меди имеют относительно рыхлую структуру и не могут образовывать эффективный барьерный слой, такой как пленка оксида вольфрама. По мере продолжения процесса окисления оксиды меди продолжают накапливаться, что не только расходует элемент меди в сплаве, но также может вызвать трещины и отслоение оксидной пленки, что облегчает проникновение кислорода через оксидную пленку и реакцию с другими компонентами внутри сплава, тем самым снижая стойкость сплава к высокотемпературному окислению. В некоторых электроконтактных материалах, требующих длительной и стабильной работы в высокотемпературной аэробной среде, при использовании сплава вольфрама и меди со слишком высоким содержанием меди контакт будет быстро окисляться из-за повышения температуры при частом включении и выключении питания. Образующаяся на поверхности рыхлая пленка оксида меди будет влиять на проводимость и стабильность контакта, а в тяжелых случаях может даже привести к его залипанию и выходу из строя.

Однако в пределах определённого соотношения компонентов в составе и температурного диапазона между оксидами вольфрама и меди могут происходить некоторые взаимодействия, которые будут оказывать комплексное влияние на стойкость сплава к высокотемпературному окислению. Например, в некоторых диапазонах средних температур (800–1200 °C), при подходящем соотношении содержания вольфрама и меди в сплаве, оксид меди может в определённой степени соединяться с оксидом вольфрама, образуя относительно более стабильную структуру композитной оксидной плёнки. Эта композитная оксидная плёнка обладает определённой плотностью и гибкостью. Она может не только использовать барьерные свойства

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оксида вольфрама, но и использовать оксид меди для заполнения мелких трещин в оксидной плёнке, тем самым повышая стойкость сплава к высокотемпературному окислению в этом температурном диапазоне. Однако этот синергетический эффект предъявляет относительно высокие требования к соотношению компонентов состава, и содержание вольфрама и меди необходимо точно контролировать для достижения наилучшего эффекта стойкости к высокотемпературному окислению.

2.3 Паспорт безопасности сплава вольфрама и меди CTIA GROUP LTD

Вольфрам-медный сплав — это композиционный материал, изготовленный методом порошковой металлургии из вольфрама (W) и меди (Cu). Обычно он содержит 70–90% вольфрама и 10–30% меди. Материал широко используется в электрических контактах, высоковольтных переключателях и электродах для электрохимической обработки. Сфера применения включает научные исследования и промышленное производство, а также может включать радиаторы, электроды и т. д. Цель паспорта безопасности материала (MSDS) — предоставить работникам и спасателям рекомендации по безопасному использованию, включая химический состав, потенциальные опасности и рекомендации по обращению с материалом.

Согласно общему паспорту безопасности материала (MSDS) для сплава вольфрамовой меди, сплав вольфрамовой меди, как правило, не классифицируется как опасный материал (в соответствии с OSHA 29 CFR 1910.1200), поэтому для него нет специального сигнального слова или указания на опасность.

вольфрам -медь входят вольфрам (номер CAS: 7440-33-7, содержание 70%-90%) и медь (номер CAS : 7440-50-8, содержание 10%-30%).

Вольфрам-медный сплав трудновоспламеняем в обычных условиях, но образующаяся при его обработке пыль может стать причиной пожара. Рекомендуется использовать порошковые, пенные или углекислотные огнетушители. Никогда не используйте прямую струю воды для тушения горящего металлического порошка, так как вода может усилить реакцию. При нагревании могут выделяться пары оксидов металлов. Пожарным следует использовать автономные дыхательные аппараты, чтобы избежать вдыхания токсичных паров.

Вольфрамовой меди соответствует требованиям инвентаризации TSCA и не представляет значительной экологической опасности, однако отходы переработки могут оказывать незначительное воздействие на окружающую среду. Оценка химической безопасности не проводилась в полном объеме, поэтому рекомендуется проявлять осторожность и соблюдать местные правила.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 3. Корреляция между микроструктурой и свойствами сплава вольфрам-медь

Сплав вольфрама и меди имеет широкий потенциал применения в электротехнике, электронике, обороне и промышленности благодаря своей превосходной электропроводности, теплопроводности, высокой термостойкости и стойкости к дуговой коррозии. Сплав изготавливается методом порошковой металлургии с использованием вольфрама (W) в качестве матрицы или армирующей фазы, обеспечивающей высокую температуру плавления и твердость, и меди (Cu) в качестве связующей фазы, что способствует высокой электропроводности и теплопроводности, и может соответствовать высоким требованиям к сильному току, высоким температурам и условиям сильного износа. Эксплуатационные характеристики сплава вольфрама и меди тесно связаны с его микроструктурой. Морфология зерна, распределение фаз и характеристики интерфейса напрямую влияют на его механические свойства, электропроводность и долговечность.

3.1. Изучение микроструктурных характеристик сплава вольфрам-медь

вольфрама и меди является основой его эксплуатационных характеристик, отражая процессы смешивания, прессования, спекания и последующей обработки в процессе порошковой металлургии. Микроструктурные характеристики включают морфологию и размер зерна, распределение фаз и границу раздела, которые анализируются с помощью микроскопов (таких как сканирующий электронный микроскоп SEM и просвечивающий электронный микроскоп ТЕМ). Высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) сохраняет его твердым во время спекания, а более низкая температура плавления меди (1085 °C) образует жидкую фазу, которая смачивает частицы вольфрама и заполняет зазоры, формируя уникальную композитную структуру. Эта структура напрямую влияет на электропроводность, теплопроводность, твердость и стойкость сплава к дуговой эрозии. Морфология и размер зерна, а также распределение фаз и границ раздела будут подробно проанализированы ниже.

3.1.1 Морфология и размер зерна

Вольфрамово -медные сплавы являются основой микроструктурных характеристик, определяющих механические и термические свойства сплава. Зернистая структура в основном состоит из частиц вольфрама. Поскольку вольфрам остается твердым в процессе спекания, его морфология сохраняет характеристики исходного порошка и обычно является полиэдрической или близкой к сферической. Медная фаза, выступающая в качестве жидкой связующей фазы, проникает в зазоры между частицами вольфрама при высоких температурах и образует после охлаждения нерегулярную сетчатую структуру или заполняющую фазу. Однородность морфологии зерен напрямую влияет на стабильность характеристик. Равномерное распределение частиц вольфрама способствует рассеиванию напряжений, в то время как нерегулярная морфология может привести к образованию локальных ослабленных участков.

Размер зерна существенно зависит от процесса подготовки. Размер частиц исходного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамового порошка обычно находится в диапазоне 1-10 микрон, который может быть дополнительно уменьшен до нанометрового уровня путем высокоэнергетического шарового измельчения. Температура и время спекания играют важную роль в размере зерна, при этом более низкие температуры сохраняют более мелкие зерна, а более высокие температуры могут вызывать рост зерна. В процессе жидкофазного спекания текучесть жидкой фазы меди способствует перераспределению и росту частиц вольфрама, а размер зерна обычно составляет от 5 до 20 микрон, в зависимости от содержания вольфрама и параметров процесса. Применение наноразмерного вольфрамового порошка позволяет контролировать размер зерна до субмикронного уровня, значительно улучшая производительность.

Морфология и размер зерна оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики. Меньший размер зерна повышает прочность и твердость сплава за счет эффекта Холла-Пейджа, а мелкие зерна увеличивают плотность границ зерен, блокируют движение дислокаций и улучшают сопротивление деформации. Например, при уменьшении размера частиц вольфрама до нанометрового уровня твердость может быть увеличена на 20–30 %, что делает его пригодным для применения в условиях высокого износа, например, в электродах для электрообработки. Размер зерна также влияет на электропроводность и теплопроводность. Слишком мелкие зерна могут увеличить сопротивление границ зерен и снизить эффективность переноса электронов и тепла, но сетчатая структура фазы меди может компенсировать этот дефект. Однородная морфология зерна снижает точки концентрации напряжений и повышает усталостную прочность, особенно в условиях термоциклирования или механических ударов.

Оптимизация процесса подготовки является ключом к контролю морфологии и размера зерна. Искровое плазменное спекание (ИПС) подавляет чрезмерный рост зерна и сохраняет мелкозернистую структуру за счет быстрого нагрева и высокого давления. Горячее изостатическое прессование (ГИП) устраняет пористость и улучшает равномерность распределения зерна за счет всенаправленного давления. Добавление микроэлементов (таких как никель или железо) может регулировать энергию границ зерен и стабилизировать микроструктуру. Уменьшение размера зерна также повышает стойкость сплава к дуговой эрозии. Мелкие частицы вольфрама рассеивают энергию дуги и снижают риск поверхностного оплавления. Направления оптимизации включают разработку ультрадисперсных нанопорошков или использование технологии аддитивного производства для достижения более точного контроля зерна. Короче говоря, морфология и размер зерна вольфрамово-медных сплавов обеспечивают базовую поддержку их эксплуатационных характеристик, особенно в сценариях, где необходимо учитывать как прочность, так и проводимость.

3.1.2 Распределение фаз и интерфейс

Вольфрамово-медные сплавы являются важными компонентами микроструктурных характеристик, которые напрямую влияют на механические свойства и функциональные характеристики сплава. Распределение фаз определяет пространственное расположение фаз вольфрама и меди в сплаве, а интерфейс – область их соединения. Вольфрам, как высокоплавкая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

фаза, распределен в виде дисперсных частиц, а медь, как низкоплавкая фаза, образует непрерывную или полунепрерывную сеть соединений. Равномерность распределения фаз определяет стабильность эксплуатационных характеристик, а качество интерфейса влияет на передачу нагрузки и рассеивание тепла.

Формирование распределения фаз зависит от процесса спекания. Спекание в жидкой фазе является ключевым этапом. Медь плавится при температуре выше 1085 °C, смачивает частицы вольфрама и заполняет зазоры за счет капиллярного действия. При высоком содержании вольфрама (например, W80/Cu20) медная фаза распределена прерывисто, окружая изолированные частицы вольфрама; при высоком содержании меди (например, W60/Cu40) медная фаза образует непрерывную сетку, в которую внедрены частицы вольфрама. Равномерность распределения фаз контролируется высокоэнергетическим шаровым измельчением и процессами смешивания порошков. Слишком короткое время шарового измельчения может привести к агломерации вольфрама, в то время как слишком длительное время шарового измельчения может привести к появлению примесей. После спекания охлаждение и затвердевание медной фазы фиксируют структуру распределения фаз, а горячее изостатическое прессование может дополнительно оптимизировать однородность.

Качество интерфейса является ключом к корреляции между распределением фаз и эксплуатационными характеристиками. Интерфейс между вольфрамом и медью химически и механически связан путем жидкофазного спекания, где жидкая фаза меди проникает в поверхность частиц вольфрама и усиливает адгезию интерфейса. Металлургическая связь на интерфейсе уменьшает пустоты и дефекты и повышает эффективность передачи нагрузки. Интерфейс также влияет на электро- и теплопроводность, при этом непрерывная сеть меди, соединенная с вольфрамом через интерфейс, образует эффективный путь переноса электронов и тепла. Улучшенная прочность интерфейса достигается путем добавления микроэлементов, таких как никель, который улучшает смачиваемость и усиливает межфазную связь. Слабый интерфейс может привести к расслоению или растрескиванию, особенно под действием дуги или термического напряжения.

Распределение фаз и границ раздела оказывают значительное влияние на производительность. Равномерное распределение фаз улучшает комплексные свойства сплава, фаза вольфрама обеспечивает твердость и высокую термостойкость, а фаза меди обеспечивает электро- и теплопроводность. Качество интерфейса напрямую влияет на стойкость к эрозии дуги, а прочный интерфейс снижает концентрированную абляцию энергии дуги на границе фаз. Сплавы с высоким содержанием меди (такие как W70/Cu30) подходят для подложек для рассеивания тепла из-за хорошей непрерывности фазы меди, превосходной электропроводности и теплопроводности; сплавы с высоким содержанием вольфрама (такие как W90/Cu10) подходят для применения в электродах из-за преобладающей фазы вольфрама, высокой твердости и износостойкости. Дефекты интерфейса, такие как пустоты или несмачиваемые области, могут ухудшить производительность и должны быть устранены путем оптимизации процесса. Улучшение процесса подготовки является ключом к оптимизации распределения фаз и интерфейса.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вакуумное спекание снижает окисление и сохраняет интерфейс чистым; ступенчатый нагрев контролирует поток жидкой фазы меди и улучшает распределение фаз. Применение наноразмерных порошков увеличивает площадь контакта интерфейса и повышает прочность связи. Направления оптимизации включают разработку функциональных градиентных материалов, постепенный переход распределения фаз вольфрама и меди или использование интеллектуальной технологии мониторинга для оценки качества интерфейса в режиме реального времени. Короче говоря, распределение фаз и интерфейс вольфрам-медных сплавов оказывают важную поддержку их эксплуатационным характеристикам, особенно в сценариях, где необходимо учитывать проводимость, стойкость к высоким температурам и механическую прочность.

3.1.3 Пористость и проявление дефектов

Вольфрамово -медный сплав имеет ключевые характеристики микроструктуры, которые напрямую влияют на механические свойства, электропроводность и долговечность сплава. Пористость – это мельчайшие зазоры, которые не полностью заполняются жидкой фазой меди в процессе спекания. К дефектам относятся трещины, несмачиваемые частицы и скопления примесей. Эти структурные дефекты обычно выявляются микроскопическим исследованием или измерением плотности (например, методом Архимеда). Пористость тесно связана с процессом изготовления. Избыточная пористость может снизить плотность и повлиять на стабильность характеристик.

Механизм образования пор в основном связан со свойствами порошка, однородностью смешивания порошка и условиями спекания. Неравномерный размер частиц или агломерация исходного порошка вольфрама может привести к недостаточному локальному количеству жидкой фазы меди, что приведет к образованию микропор. Недостаточное давление или плохая текучесть порошка во время прессования могут привести к образованию начальных пустот, а спекание при слишком низкой температуре (например, ниже 1100 °C) или в течение недостаточного времени может не привести к полному их устранению. Смачиваемость жидкой фазы меди также играет ключевую роль. Краевой угол смачивания между медью и вольфрамом относительно высок (около 30°-40°). Если в атмосферу спекания вносятся примеси (например, окислительная среда), смачивающий эффект ослабевает и пористость увеличивается. Типичные размеры пор находятся в диапазоне 1-10 мкм, а неравномерное распределение может привести к образованию макропор (>20 мкм), что значительно снижает производительность.

Дефекты могут проявляться в различных формах. Трещины могут быть вызваны термическим напряжением или напряжением фазового перехода во время прессования или охлаждения. Особенно при высоком содержании вольфрама неравномерная усадка фазы меди может легко привести к образованию трещин на границе раздела. Несмоченные частицы относятся к частицам вольфрама, поверхность которых не полностью пропитана жидкой фазой меди, что обычно вызвано недостаточной температурой спекания или слишком низким содержанием меди, и проявляются в виде изолированных частиц вольфрама. Агломерации примесей (таких как оксиды

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

или карбиды) могут поступать из сырья или в процессе обработки и концентрироваться на границах зерен или на границах раздела, влияя на передачу нагрузки и диффузию тепла. Плотность пор и дефектов может быть значительно снижена путем горячего изостатического прессования (ГИП) или искрового плазменного спекания (ИПС), и плотность может достигать более 98%.

Пористость и дефекты оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики. Высокая пористость снижает прочность на изгиб и твердость сплава, поскольку пустоты становятся точками концентрации напряжений, которые могут легко привести к разрушению, особенно в условиях высокого износа, таких как электроды. Электро- и теплопроводность также ухудшаются, при этом поры увеличивают электрическое и тепловое сопротивление, снижая эффективность передачи тока и тепла. Стойкость к дуговой эрозии также снижается, а поры имеют тенденцию становиться точками концентрации энергии дуги, ускоряя поверхностное плавление. Дефекты, такие как трещины, могут распространяться при термоциклировании или механическом ударе, сокращая срок службы. Направления оптимизации включают использование наноразмерных порошков для улучшения однородности частиц, оптимизацию параметров спекания (например, ступенчатый нагрев) для уменьшения пористости или заполнения дефектов через поверхностные покрытия. Короче говоря, контроль пор и дефектов является ключом к улучшению характеристик вольфрамово-медного сплава.

3.1.4 Структурные различия при разных процессах подготовки

Сплавы вольфрама и меди значительно различаются по свойствам из-за различных методов изготовления. К распространённым методам относятся традиционная порошковая металлургия, инфильтрация меди, электроискровое плазменное спекание (SPS) и аддитивное производство (3D-печать). Каждый метод оказывает уникальное влияние на морфологию зерен, распределение фаз, пористость и качество интерфейса. Выбор процесса напрямую определяет эксплуатационные характеристики сплава и должен быть оптимизирован в соответствии с требованиями к применению.

Традиционная порошковая металлургия – широко используемый процесс, включающий смешивание порошков, прессование и спекание. Вольфрамовый и медный порошки смешиваются в шаровой мельнице высокой энергии, прессуются в форму и затем спекаются. Структурные особенности включают полиэдрическое распределение частиц вольфрама, прерывистую сетку фаз меди и пористость, обычно составляющую от 5% до 10%. Склеивание на границе раздела зависит от смачивания жидкой фазой меди, а качество определяется температурой и временем спекания. Более высокая температура может привести к росту зерна и снижению однородности. Подходит для теплорассеивающих подложек с высокими требованиями к электропроводности и теплопроводности.

Метод инфильтрации меди предполагает получение сплава путём спекания вольфрамового каркаса и последующей инфильтрации жидкой меди. При более высокой температуре

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамовый каркас образует пористую структуру, которую медь пропитывает и заполняет. Структурные характеристики таковы: вольфрамовая фаза представляет собой непрерывный каркас, медная фаза распределена равномерно, а пористость может быть снижена до 2–5%. Связи на границе раздела прочные, что снижает количество несмачиваемых частиц, однако процесс сложен и энергоёмок. Этот метод подходит для электродных применений, требующих высокой плотности.

При искровом плазменном спекании (ИПС) используются импульсный ток и механическое давление, а время спекания короткое (несколько минут). Структурные характеристики включают мелкодисперсные частицы вольфрама, равномерное распределение фазы меди, пористость менее 2% и чёткие границы зерен. Быстрый нагрев замедляет рост зерен, а прочность связи между ними высокая, что подходит для применений, требующих высокой твердости и стойкости к дуговой эрозии, например, для изготовления контактов. Недостатком является высокая стоимость оборудования и ограниченная область применения.

Аддитивное производство (такое как селективная лазерная плавка SLM) подготавливает сплавы путем осаждения порошка слой за слоем. Структурными характеристиками являются градиентное распределение фаз вольфрама и меди, контролируемый размер зерна и пористость, которая зависит от параметров лазера и может быть менее 3% при оптимизированных условиях. Качество интерфейса высокое, и поддерживаются сложные геометрии, но термическое напряжение может приводить к образованию микротрещин. Подходит для индивидуальных деталей аэрокосмической отрасли. Различия в процессе влияют на производительность. Традиционная порошковая металлургия экономична, но имеет высокую пористость и подходит для крупномасштабного производства; инфильтрация меди имеет хорошую плотность, но высокую стоимость; SPS обеспечивает высокую производительность, но подходит для небольших партий; аддитивное производство гибкое, но требует оптимизации термического напряжения. Направления оптимизации включают объединение нескольких процессов (таких как SPS+ инфильтрация меди) для повышения плотности или использование интеллектуальной технологии мониторинга для регулировки параметров в режиме реального времени. Короче говоря, структурные различия в процессах подготовки предоставляют разнообразные возможности для оптимизации производительности.

3.2 Внутренняя связь между микроструктурой и эксплуатационными характеристиками сплава вольфрам-медь

Между микроструктурой вольфрамово-медного сплава и его эксплуатационными характеристиками существует неразрывная связь. Морфология зерна, распределение фаз, пористость, дефектность и процесс подготовки сплава в совокупности определяют его электропроводность, теплопроводность, механическую прочность и долговечность. Оптимизация микроструктуры достигается за счёт улучшения межфазной связи, снижения количества дефектов и регулирования соотношения фаз для соответствия различным требованиям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Влияние размера зерна на эксплуатационные характеристики отражается в эффекте Холла-Пейджа. Мелкие зерна увеличивают плотность границ зерен, повышают прочность и твердость, но могут повышать сопротивление и снижать электропроводность. Распределение фаз определяет пути электро- и теплопроводности: непрерывная сеть медной фазы улучшает эксплуатационные характеристики, а вольфрамовая фаза повышает термостойкость. Пористость и дефекты снижают плотность, влияя на прочность на изгиб и стойкость к дуговой эрозии, а плотная структура значительно улучшает эксплуатационные характеристики. Качество интерфейса влияет на передачу нагрузки и рассеивание тепла, а прочный интерфейс улучшает общие эксплуатационные характеристики.

Оптимизация микроструктуры должна учитывать условия применения. Теплоотводящая подложка должна обеспечивать высокую непрерывность фазы меди, а электрод – высокую плотность фазы вольфрама. В будущих исследованиях планируется изучить нанокompозитные структуры или конструкции с функциональным градиентом для дальнейшего выявления внутренней связи между микроструктурой и эксплуатационными характеристиками.

3.2.1 Механизм влияния зеренной структуры на прочность

зерна на прочность сплава вольфрама с медью в основном отражаются в барьерном эффекте границ зерен и способности рассеивать напряжения. Прочность – это способность сплава противостоять деформации или разрушению, которая напрямую связана с размером и морфологией зерна. Более мелкие зерна ограничивают движение дислокаций, ключевой механизм упрочнения, увеличивая плотность границ зерен. Границы зерен действуют как барьеры для дислокаций, заставляя их скапливаться или спутываться, потребляя больше энергии для продолжения движения, тем самым значительно повышая сопротивление сплава деформации. Равномерное распределение зерен дополнительно оптимизирует этот эффект, уменьшает локальные точки концентрации напряжений и повышает несущую способность всей конструкции.

Морфология зерен также оказывает важное влияние на прочность. Зерна правильной полиэдрической или почти сферической формы более эффективно распределяют приложенную нагрузку и предотвращают чрезмерное накопление напряжений в определенном направлении. Напротив, зёрна неправильной или плоской формы могут привести к неравномерному распределению напряжений и увеличить риск разрушения. В процессе спекания перестройка и рост зёрен регулируются температурой и давлением, а образование мелких зёрен зависит от быстрого охлаждения или кратковременных процессов спекания, которые поддерживают плотное распределение границ зёрен. Фаза вольфрама служит высокотвёрдым каркасом, а её зёрненная структура обеспечивает жёсткую поддержку сплава, в то время как связующее действие фазы меди дополнительно увеличивает прочность соединения между зёрнами.

Этот механизм действия позволяет сплавам вольфрама и меди эффективно работать в условиях, требующих высокой прочности. Например, в условиях механических ударов или высоких нагрузок мелкозернистая структура может эффективно противостоять деформации и продлевать

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

срок службы компонентов. Эффект упрочнения границ зерен также связан с плотностью микроструктуры, а уменьшение количества пор и дефектов дополнительно повышает прочность. Оптимизация структуры зерен требует стабилизации границ зерен путем контроля параметров спекания или введения микроэлементов для улучшения комплексных механических свойств сплава, что повышает его потенциал в условиях высокой надежности.

3.2.2 Механизм влияния зеренной структуры на вязкость

Влияние структуры зерна на вязкость сплава вольфрама с медью в основном отражается в способности границ зерен поглощать энергию и координировать пластическую деформацию. Вязкость — это способность сплава поглощать энергию и сопротивляться разрушению, которая тесно связана с размером зерна и характеристиками интерфейса. Более крупные зерна, как правило, обладают более высокой пластичностью и могут поглощать энергию посредством скольжения дислокаций и двойниковой деформации, тем самым повышая вязкость. Однако слишком крупные зерна могут снизить прочность и привести к дисбалансу характеристик. Более мелкие зерна повышают устойчивость материала к росту трещин за счет увеличения плотности границ зерен, но могут несколько снизить пластичность, поэтому необходимо искать баланс между прочностью и вязкостью.

Влияние морфологии зерен на вязкость также существенно. Регулярная морфология зерен способствует равномерному распределению напряжений и снижению риска зарождения и распространения трещин. Медная фаза действует как связующая фаза с низкой температурой плавления, а ее пластичность обеспечивает дополнительный путь поглощения энергии между зернами. При приложении внешней нагрузки медная фаза может подвергаться пластической деформации, смягчая хрупкое действие вольфрамовой фазы. Микродеформация на границах зерен также снимает локальную концентрацию напряжений за счет механизмов поглощения и перераспределения дислокаций. В процессе спекания текучесть жидкой фазы меди способствует тесной связи между зернами и улучшает основу вязкости, в то время как процесс быстрого охлаждения помогает сохранить пластические характеристики мелких зерен.

Этот механизм действия позволяет сплаву вольфрама и меди проявлять превосходную вязкость при динамических нагрузках и ударных нагрузках. Например, в условиях дугового разряда или механической вибрации скоординированная деформационная способность зернистой структуры может эффективно предотвращать хрупкое разрушение и продлевать срок службы деталей. Повышение вязкости также зависит от однородности микроструктуры. Уменьшение количества пор и несмоченных участков повышает эффективность передачи нагрузки.

3.2.3 Корреляция между распределением фаз и проводимостью

Связь между распределением фаз и электропроводностью сплава вольфрама с медью в основном отражается в непрерывности фазы меди и дисперсности фазы вольфрама. Электропроводность является мерой способности сплава проводить электрический ток и напрямую связана с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

равномерностью распределения фаз. Медь является высокопроводящей фазой, и ее непрерывная сеть является основой электропроводности. Когда фаза меди образует сквозной путь, электроны могут переноситься эффективно, что значительно улучшает проводящие свойства сплава. Дисперсное распределение фазы вольфрама как фазы с низкой проводимостью не будет существенно препятствовать прохождению тока, но слишком высокое содержание вольфрама может увеличить сопротивление и снизить общую проводимость.

Равномерность распределения фаз имеет решающее значение для электропроводности. Непрерывность фазы меди зависит от полного смачивания и заполнения медью в процессе спекания жидкой фазы. Если частицы вольфрама агломерируются или жидкой фазы меди недостаточно, могут образовываться прерывистые области, увеличивая контактное сопротивление. Равномерность дисперсии фазы вольфрама контролируется процессом смешивания порошка. Время измельчения в шаровой мельнице и однородность смешивания напрямую влияют на качество распределения фаз. Соответствующее повышение температуры спекания способствует течению жидкой фазы меди, улучшает связь между фазами и оптимизирует электропроводность. Качество интерфейса также играет вспомогательную роль. Хорошее сочетание вольфрама и меди уменьшает рассеяние электронов и поддерживает высокую проводимость.

Благодаря этой связи сплавы вольфрама и меди превосходны в областях применения, требующих высокой проводимости. Например, в электрических контактах или теплорассеивающих подложках непрерывная сеть медных фаз обеспечивает эффективную передачу тока и отвечает требованиям высокой плотности тока. Оптимизация распределения фаз также влияет на стойкость к дуговой эрозии. Равномерное распределение медных фаз снижает точки концентрации энергии дуги и косвенно способствует стабильности проводящих свойств. Оптимизация распределения фаз требует корректировки содержания меди или использования многоэтапного процесса спекания для улучшения структуры сети медной фазы, что повышает проводимость и отвечает требованиям высокопроизводительных электротехнических приложений.

3.2.4 Корреляция между распределением фаз и теплопроводностью

фазы и теплопроводность сплава вольфрама с медью в основном отражаются на связности фазы меди и дисперсности фазы вольфрама. Теплопроводность - это способность сплава передавать тепло, которая напрямую связана с равномерностью распределения фаз. Медь является высокотеплопроводной фазой, и ее непрерывная сетка является основой теплопроводности. Когда фаза меди образует сквозной путь, тепло может передаваться эффективно, что значительно улучшает характеристики рассеивания тепла сплава. Будучи фазой с низкой теплопроводностью, дисперсное распределение фазы вольфрама не будет существенно препятствовать тепловому потоку, но слишком высокое содержание вольфрама может снизить общую теплопроводность, поскольку его теплопроводность ниже, чем у меди. Равномерность распределения фаз имеет решающее значение для теплопроводности. Непрерывность фазы меди зависит от полного потока и проникновения меди в процессе спекания жидкой фазы. Если частицы вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

агломерируются или жидкая фаза меди распределена неравномерно, могут образовываться точки термического сопротивления, затрудняющие теплопередачу. Равномерное распределение фаз вольфрама достигается за счет процесса смешивания порошков. Хорошее смешивание обеспечивает бесшовное соединение между фазами и оптимизирует путь теплопроводности. Правильное регулирование температуры спекания способствует смачиванию и заполнению жидкой фазы меди и повышает эффективность теплопередачи между фазами. Качество интерфейса также играет в этом роль. Хорошее сочетание вольфрама и меди уменьшает рассеивание тепла и поддерживает эффективную диффузию тепла.

Это соотношение позволяет сплавам вольфрама и меди демонстрировать превосходные результаты в приложениях, требующих высокой теплопроводности. Например, в силовой электронике или высокотемпературном оборудовании непрерывная сеть медных фаз может быстро рассеивать тепло, предотвращая ухудшение характеристик, вызванное перегревом. Оптимизация распределения фаз также влияет на стойкость к дуговой эрозии. Равномерное распределение медных фаз способствует равномерному рассеиванию тепла и уменьшению локальных высокотемпературных повреждений, вызванных дугой. Для регулирования распределения фаз требуется оптимизация содержания меди или использование многоэтапного процесса спекания, чтобы медная фаза образовала эффективную сеть теплопроводности, тем самым улучшая теплопроводность и отвечая требованиям к высокоэффективному терморегулированию.

3.2.5 Влияние пор и дефектов на твердость

пор и дефектов на твердость сплава вольфрама и меди в основном отражается в структурной плотности и распределении напряжений. Твердость – это способность сплава противостоять поверхностному вдавлению или износу, что напрямую связано с целостностью микроструктуры. Пористость, как мельчайшие зазоры, снижает общую плотность материала и ослабляет его способность сопротивляться деформации. Дефекты, такие как трещины или несмачиваемые частицы, становятся точками концентрации напряжений, которые могут легко вызывать локальные разрушения и, таким образом, снижать твердость. Однородность микроструктуры играет ключевую роль в показателях твердости, а наличие пор и дефектов напрямую снижает механическую прочность сплава.

Образование пор обычно связано с недостаточным заполнением или усадкой материала во время спекания. Когда жидкая фаза меди не может полностью проникнуть в зазоры между частицами вольфрама, остаточные пустоты будут диспергированы внутри сплава. Эти поры склонны вызывать концентрацию напряжений под внешними нагрузками, что приводит к деформации или разрушению материала при более низких давлениях. Дефекты, такие как трещины, могут быть вызваны термическим напряжением во время прессования или охлаждения, особенно в областях фазового перехода или больших градиентов температур. Расширение трещин еще больше снижает твердость. Несмоченные частицы существуют изолированно из-за отсутствия эффективной связи с медной фазой, что ослабляет несущую способность общей структуры. Эти факторы работают

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вместе, чтобы снизить поверхностное сопротивление сплава.

Влияние пор и дефектов на твёрдость также отражается на стабильности механических свойств. Более высокая пористость приводит к неравномерному распределению твёрдости, и в отдельных местах может наблюдаться заметное разупрочнение. Особенно в условиях интенсивного износа поры могут легко стать начальной точкой износа. Наличие дефектов усугубляет этот эффект, и трещины могут распространяться при многократном нагружении, ускоряя разрушение материала. Оптимизация микроструктуры может повысить твёрдость за счёт устранения пор и устранения дефектов, например, путём улучшения процесса спекания или использования технологии постобработки для повышения плотности материала. Оптимизация микроструктуры может значительно повысить долговечность сплава при механическом ударе или контакте с поверхностью, делая его более подходящим для применений с высокими требованиями к твёрдости, таких как электроды или режущие инструменты.

3.2.6 Влияние пор и дефектов на коррозионную стойкость

пор и дефектов на коррозионную стойкость сплава вольфрам-медь в основном определяется защитой поверхности и проникновением сред. Коррозионная стойкость — это способность сплава противостоять эрозии под воздействием окружающей среды (например, кислорода, влаги или химических веществ), которая напрямую связана с целостностью микроструктуры. Поры, как открытые или закрытые щели, обеспечивают проникновение коррозионных сред внутрь, ускоряя деградацию материала. Дефекты, такие как трещины или примеси, становятся отправной точкой коррозии, которая может легко вызвать локальную коррозию или коррозионное растрескивание под напряжением, тем самым снижая коррозионную стойкость. Плотность микроструктуры играет решающую роль в коррозионной стойкости.

Наличие пор позволяет коррозионной среде проникать в сплав, особенно во влажной или кислой среде, где накопленная в порах жидкость может вызвать электрохимическую коррозию. Медная фаза, как связующая фаза, восприимчива к коррозионной среде, а наличие пор усиливает окисление или растворение меди, снижая общую стабильность сплава. Дефекты, такие как трещины, создают пути расширения коррозии, а высокое напряжённое состояние в вершине трещины ускоряет коррозионную реакцию, особенно при высокой температуре или воздействии дуги, где дефекты могут быстро перерасти в серьёзные повреждения. Агломерация примесей также может создавать дополнительные электрохимически активные центры, что ещё больше снижает коррозионную стойкость.

Влияние пор и дефектов на коррозионную стойкость также отражается на эксплуатационных характеристиках при длительном использовании. Более высокая пористость приводит к снижению возможностей защиты поверхности, особенно при воздействии агрессивных газов или жидкостей. Продукты коррозии в порах могут блокировать каналы, но не могут предотвратить дальнейшую эрозию. Наличие дефектов делает скорость коррозии в локальных областях выше общей скорости. Особенно в случаях коррозии под напряжением или усталостной коррозии

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дефекты могут вызывать растрескивание материала. Оптимизация микроструктуры повышает коррозионную стойкость за счет уменьшения пор и дефектов, например, за счет снижения окисления путем вакуумного спекания или использования поверхностных покрытий для изоляции агрессивных сред. Оптимизированный сплав может сохранять долговременную стабильность в суровых условиях и подходит для применений, требующих высокой коррозионной стойкости, таких как морское оборудование или компоненты химической обработки.

3.3 Эволюция микроструктуры сплава вольфрам-медь

Вольфрамово -медный сплав претерпевает динамическую эволюцию в процессе изготовления и эксплуатации. Закон её изменения определяется множеством факторов и напрямую влияет на эксплуатационные характеристики сплава. Эволюция микроструктуры отражает адаптивность и стабильность материала в различных условиях, включая изменение морфологии зерен, фазового распределения и характеристик дефектов. Далее будет подробно рассмотрена эволюция, вызванная изменениями соотношения компонентов, структурными превращениями во время термической обработки и влиянием условий эксплуатации на структуру. Текстовые описания используются для пояснения механизма эволюции, характеристик процесса и влияния на эксплуатационные характеристики, подчёркивая её важность для оптимизации применения сплавов.

3.3.1 Эволюция, вызванная изменениями в соотношении компонентов

Изменение соотношения состава является важным движущим фактором в эволюции микроструктуры сплавов вольфрама с медью. Распределение зерен, граница раздела фаз и характеристики пор зависят от регулирования соотношения вольфрама и меди. Когда содержание вольфрама увеличивается, его частицы доминируют в сплаве и представляют более плотную структуру скелета, в то время как фаза меди постепенно переходит от непрерывной сетки к дисперсной заполняющей фазе. Это изменение приводит к тому, что морфология зерен становится регулярной, площадь интерфейса уменьшается, а пористость увеличивается из-за недостаточного количества жидкой фазы меди. Напротив, когда содержание меди увеличивается, текучесть жидкой фазы меди увеличивается, смачивая частицы вольфрама и заполняя зазоры, делая распределение фаз более равномерным, границы зерен постепенно размываются, а пористость уменьшается из-за заполняющего эффекта меди.

Регулировка соотношения состава также вызывает эволюцию фазового интерфейса. При высоком содержании вольфрама интерфейс в основном проявляется как прямой контакт между частицами вольфрама, и прочность связи зависит от условий спекания; при увеличении содержания меди интерфейс становится доминирующим за счет медной фазы, смачивающий эффект усиливается, и прочность межфазной связи улучшается, но могут возникнуть термические напряжения. Размер зерна также регулируется с изменением соотношения. При высоком содержании вольфрама зерна остаются большего размера, а при высоком содержании меди зерна измельчаются из-за перераспределения жидкой фазы. Эта эволюция напрямую влияет на плотность микроструктуры

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и затем корректирует механические и электрические свойства сплава.

Этот закон эволюции позволяет адаптировать сплавы вольфрама и меди к различным условиям применения. Например, увеличение доли вольфрама повышает термостойкость и стойкость к дуговой эрозии, делая их пригодными для использования в условиях повышенного износа; увеличение доли меди улучшает электропроводность и теплопроводность, делая их пригодными для использования в качестве теплоотводящих подложек. Контроль эволюции требует оптимизации процесса смешивания порошков и параметров спекания для обеспечения согласованного развития состава и микроструктуры.

3.3.2 Структурные превращения при термической обработке

Процесс термической обработки является важным этапом в эволюции микроструктуры сплавов вольфрама с медью. Он вызывает такие изменения, как рост зерен, рекомбинацию фаз и устранение дефектов посредством регулирования температуры, времени и атмосферы. На ранней стадии нагрева медная фаза плавится первой из-за ее более низкой температуры плавления, смачивает частицы вольфрама и заполняет поры, делая распределение фаз более равномерным. По мере повышения температуры зерна начинают перестраиваться и расти. Частицы вольфрама могут корректировать свою морфологию из-за термодиффузии, и границы зерен постепенно становятся четкими или сплавляются. Длительная термическая обработка может привести к тому, что зерна станут слишком большими, на границе раздела возникнут термические напряжения, а поры уменьшатся или перераспределятся из-за усадки материала.

Термическая обработка также вызывает изменение фазовой структуры. Текучесть жидкой фазы меди усиливает связь между частицами вольфрама, что позволяет заполнить некоторые несмачиваемые области и повысить прочность межфазных связей. Однако слишком высокая температура может привести к улетучиванию или окислению меди, что влияет на стабильность фазового распределения. Дефекты, такие как трещины или скопления примесей, могут исчезать или мигрировать во время термообработки, особенно в условиях давления, и микроструктура, как правило, становится плотной. Процесс охлаждения фиксирует эти изменения. Быстрое охлаждение сохраняет мелкозернистость, а медленное охлаждение способствует росту зерен и фазовой стабилизации. Эта структурная трансформация позволяет регулировать свойства вольфрамово-медных сплавов. Например, правильная термическая обработка повышает однородность и прочность материала, делая его пригодным для контактных применений, требующих высокой надежности; перегрев может снизить вязкость, поэтому параметры требуют тщательного контроля. Оптимизацию термической обработки необходимо сочетать со специальными процессами, такими как ступенчатый нагрев или защита в инертной атмосфере, для достижения идеальной эволюции микроструктуры.

3.3.3 Обратная связь среды использования по структуре

Влияние среды использования на микроструктуру сплава вольфрама и меди отражается в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

структурной перестройке и деградации, вызванных внешними условиями, включая такие факторы, как температура, влажность, ток и механическое напряжение. В высокотемпературной среде медная фаза может размягчиться или частично расплавиться, соединение между частицами вольфрама подвергается воздействию термического напряжения, а на границе раздела могут возникнуть микротрещины или отслоение. Длительное воздействие влажной или коррозионной среды делает медную фазу восприимчивой к окислению или эрозии, а поры становятся каналом входа для коррозионных сред, ускоряя структурную деградацию. Под действием дуги поверхностные зерна могут переформировываться из-за высокотемпературной абляции, а расширение пор и дефектов усугубляет разрушение микроструктуры.

Механические напряжения оказывают существенное влияние на структуру. Многократное нагружение может привести к деформации или разрушению зерен, образованию новых трещин на границе раздела и расширению пор вследствие концентрации напряжений. При прохождении тока локальная высокая температура вызывает рекомбинацию фаз: медная фаза может мигрировать или улетучиваться, и структура вольфрамового скелета постепенно обнажается. Циклические изменения условий эксплуатации, такие как термоциклирование или переключение дуги, приводят к постепенной адаптации или разрушению микроструктуры, а границы зерен и распределение фаз могут претерпевать динамические изменения, что влияет на долгосрочные эксплуатационные характеристики.

Благодаря этой обратной связи вольфрамово-медный сплав демонстрирует разную долговечность в различных условиях. Например, в условиях высокотемпературной дуги структурные изменения повышают коррозионную стойкость, тогда как во влажной среде деградация ускоряет снижение срока службы. Обратная связь с окружающей средой служит основой для оптимизации конструкции, а структурную деградацию можно смягчить с помощью поверхностных покрытий или контроля окружающей среды.

3.4 Стратегия управления микроструктурой сплава вольфрам-медь

Целью сплава вольфрам-медь является оптимизация морфологии зерна, фазового распределения, характеристик пор и качества интерфейса посредством различных технических средств для улучшения электропроводности, теплопроводности, механической прочности и долговечности сплава. Контроль микроструктуры является ключом к достижению высокопроизводительных применений, охватывая совершенствование процесса изготовления, оптимизацию добавления легирующих элементов и глубокое исследование взаимосвязи между структурой и эксплуатационными характеристиками. Эти стратегии адаптируются к различным требованиям, предъявляемым к электрическим контактам, сварочным электродам и высоконадежным компонентам, путем корректировки параметров процесса и разработки состава материала.

3.4.1 Методы контроля, основанные на процессе приготовления

Метод управления, основанный на процессе подготовки, является основой для регулирования

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроструктуры сплава вольфрама и меди. Микроскопические характеристики можно точно регулировать путем оптимизации звеньев смешивания, прессования, спекания и последующей обработки. Процесс смешивания порошков является отправной точкой регулирования. Равномерное смешивание порошка вольфрама и медного порошка достигается с помощью высокоэнергетической шаровой мельницы или технологии механического легирования. Хороший эффект смешивания порошков может уменьшить агломерацию частиц, обеспечить равномерное распределение фаз вольфрама и меди и заложить основу для последующих характеристик. Регулировка параметров во время процесса смешивания порошков, таких как время измельчения и выбор среды, влияет на размер частиц порошка и морфологию. Мелкие частицы помогают повысить прочность, в то время как более крупные частицы могут улучшить вязкость. Выбор подходящего диапазона размеров частиц порошка является ключом к контролю размера зерна, и конструкция процесса должна быть настроена в соответствии с целевой производительностью. Процесс прессования формирует порошок путем приложения давления, предварительно определяя расположение зерен и распределение пор. Равномерность давления напрямую влияет на компактность сырца. Слишком низкое давление может привести к рыхлой структуре и увеличению пористости, в то время как слишком высокое давление может вызвать разрыв частиц или концентрацию напряжений. Конструкция пресс-формы и оптимизация параметров процесса могут эффективно контролировать плотность и геометрическую точность сырца, обеспечивая стабильную основу для спекания. Микроструктура сырца после прессования предварительно отражает характеристики распределения вольфрама и меди, а медная фаза начинает проявлять свой смачивающий потенциал, подготавливая к спеканию в жидкой фазе. Уточнение процесса прессования помогает уменьшить начальные дефекты и заложить хорошую основу для последующей оптимизации структуры.

Процесс спекания является основным этапом регулирования микроструктуры. Высокотемпературная обработка используется для достижения фазовой связи и уменьшения пористости. Жидкофазное спекание является распространенным методом. Медь плавится при высокой температуре, смачивает частицы вольфрама и заполняет зазоры, улучшая межфазную связь. Контроль температуры и времени спекания является ключевым. Более низкие температуры помогают сохранить мелкие зерна, в то время как более высокие температуры способствуют полному потоку жидкой фазы меди и уменьшают несмоченные области. Выбор атмосферы спекания, такой как вакуум или среда инертного газа, может предотвратить введение окислительных примесей, сохранить чистоту вольфрама и меди и оптимизировать распределение фаз. Технология ступенчатого нагрева или спекания под давлением дополнительно улучшает микроструктуру, снижает пористость и повышает плотность и особенно подходит для применений, требующих высокой прочности и коррозионной стойкости. Оптимизация процесса спекания обеспечивает однородность и стабильность микроструктуры.

Процессы последующей обработки предоставляют дополнительные средства для точной настройки микроструктуры. Горячее изостатическое прессование устраняет остаточную пористость за счет всенаправленного давления, улучшает равномерность распределения зерна и повышает общие эксплуатационные характеристики материала. Поверхностная обработка, такая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

как полировка или нанесение покрытий, может устранить дефекты и повысить коррозионную стойкость и стойкость к дуговой эрозии. Процесс термической обработки регулирует рост зерна и фазовую стабильность, а также балансирует прочность и вязкость путем регулирования температуры и скорости охлаждения. Выбор различных методов последующей обработки зависит от конкретных требований к применению. Например, для применений с высокой проводимостью может потребоваться очистка поверхности, в то время как для применений с высокой износостойкостью может потребоваться закалка. Метод управления, основанный на процессе подготовки, позволяет адаптировать микроструктуру вольфрамово-медного сплава к различным эксплуатационным требованиям, обеспечивая надежную основу для высоконадежных компонентов.

3.4.2 Методы оптимизации введения легирующих элементов

Тип и содержание добавляемых элементов напрямую влияют на морфологию зерен, распределение фаз, межфазную связь и характеристики дефектов, улучшая электропроводность, теплопроводность, механическую прочность или коррозионную стойкость. К часто добавляемым элементам относятся никель, железо или кобальт, которые могут взаимодействовать с вольфрамом и медью посредством химического средства или физического воздействия, оптимизируя микроструктуру.

Никель, как распространенный элемент-добавка, может значительно улучшить смачиваемость меди вольфрамом. После добавления никеля текучесть жидкой фазы меди во время жидкофазного спекания увеличивается, что делает границу раздела между частицами вольфрама более тесной и уменьшает несмоченную область и поры. Этот эффект улучшения смачивания повышает равномерность распределения фаз, тем самым повышая плотность и прочность материала. Никель также может образовывать стабильные соединения на границах зерен, подавляя рост зерен, сохраняя мелкозернистую структуру и помогая повысить устойчивость сплава к деформации. Добавление железа в основном увеличивает скорость диффузии во время спекания, усиливает взаимное проникновение между вольфрамом и медью, улучшает качество интерфейса и повышает эффективность передачи нагрузки. Благодаря своей пластичности кобальт может обеспечить дополнительную поддержку вязкости в микроструктуре и буферизировать хрупкость фазы вольфрама. Оптимизация добавляемых элементов также включает контроль их распределения и содержания. Избыточное добавление может привести к агломерации примесей или разделению фаз, что снижает стабильность микроструктуры, поэтому необходимо достичь баланса за счет точного подбора соотношений и корректировки процесса. Введение присадочных элементов обычно завершается на этапе смешивания порошков путем смешивания с вольфрамовым и медным порошками для обеспечения их равномерного распределения. В процессе спекания добавленные элементы могут образовывать с медью эвтектическую фазу с низкой температурой плавления, ускоряя образование жидкой фазы и дополнительно оптимизируя микроструктуру. Последующая термическая обработка или обработка поверхности могут дополнительно стабилизировать действие добавленных элементов и повысить их вклад в эксплуатационные характеристики.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Этот метод оптимизации позволяет адаптировать микроструктуру сплава вольфрама с медью к конкретным условиям применения. Например, в электродах, требующих высокой прочности, добавление никеля улучшает сцепление и плотность интерфейса; в контактах, требующих высокой вязкости, добавление кобальта повышает ударопрочность. Регулирование количества добавляемых элементов также способствует повышению коррозионной стойкости и дуговой эрозии, а также продлевает срок службы за счёт снижения количества дефектов и оптимизации фазового распределения. Дальнейшие направления развития включают исследование новых добавляемых элементов или композитных фаз, комбинирование технологий интеллектуального проектирования и динамическую оптимизацию микроструктуры для дальнейшего улучшения комплексных характеристик сплавов вольфрама с медью.

3.4.3 Взаимосвязь между структурным регулированием и производительностью

Структурное регулирование и эксплуатационные характеристики сплавов вольфрама и меди отражаются в том факте, что оптимизация микроструктуры напрямую влияет на ее электропроводность, теплопроводность, механическую прочность и долговечность. Эта взаимосвязь достигается за счет корректировки морфологии зерен, распределения фаз, характеристик пор и качества интерфейса, что отражает решающую роль микроструктуры в макроскопических характеристиках. Измельчение зеренной структуры повышает устойчивость материала к деформации за счет увеличения плотности границ зерен, тем самым улучшая прочность и твердость, и может оказывать определенное влияние на ударную вязкость. Равномерность распределения фаз определяет эффективность путей электро- и теплопроводности. Непрерывная сеть фазы меди оптимизирует перенос электронов и тепла, в то время как дисперсность фазы вольфрама обеспечивает поддержку высокой термостойкости и износостойкости.

Контроль пор и дефектов является ключевым звеном во взаимосвязи между структурным регулированием и эксплуатационными характеристиками. Уменьшение пор повышает плотность материала, прочность на изгиб и поверхностное сопротивление, одновременно снижая тепловое и электрическое сопротивление, а также улучшая электро- и теплопроводность. Устранение дефектов, таких как трещины или несмачиваемые частицы, уменьшает количество точек концентрации напряжений и повышает усталостную и коррозионную стойкость. Улучшение качества интерфейса косвенно улучшает механические свойства и стойкость к дуговой эрозии за счет повышения прочности связи между фазами, оптимизации передачи нагрузки и эффективности рассеивания тепла. Комплексность структурного регулирования заключается в его способности уравнивать взаимные ограничения между этими свойствами для удовлетворения потребностей различных областей применения.

Эта взаимосвязь позволяет оптимизировать свойства вольфрамово-медных сплавов на основе микроструктурных корректировок. Например, в теплорассеивающих подложках с высокими требованиями к проводимости непрерывное распределение медных фаз и снижение пористости значительно улучшают эксплуатационные характеристики; в электродах с высокими

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

требованиями к износостойкости мелкозернистость и плотный вольфрамовый каркас повышают долговечность. Стратегия структурного регулирования также выявляет ограничения эксплуатационных характеристик. Слишком мелкозернистость может снизить прочность, а слишком высокое содержание вольфрама – повысить хрупкость. Для достижения баланса эксплуатационных характеристик необходимо комплексное регулирование.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 4 Технология приготовления сплава вольфрам-медь

Процесс получения сплава вольфрама и меди является ключом к производству высокопроизводительных композиционных материалов, включающим в себя различные технические методы для достижения однородного сочетания вольфрама и меди. Сплав вольфрама и меди широко используется в электротехнике, электронике и промышленности благодаря своей превосходной электропроводности, теплопроводности, высокой термостойкости и стойкости к дуговой коррозии. Целью процесса получения является оптимизация микроструктуры и эксплуатационных характеристик сплава путем контроля исходных материалов, параметров процесса и состояния оборудования. Различные методы получения, такие как вакуумная инфильтрация, порошковая металлургия и инфильтрация медью, имеют свои особенности и подходят для конкретных условий применения.

4.1 Приготовление сплава вольфрам-медь методом вакуумной инфильтрации

Приготовление сплава вольфрама и меди методом вакуумной инфильтрации представляет собой метод приготовления, при котором жидкая медь пропитывается внутренней частью вольфрамового каркаса при высокой температуре с целью формирования плотной и однородной композитной структуры. В этом процессе используется высокая температура плавления вольфрама и низкая температура плавления меди для приготовления пористого вольфрамового каркаса путем спекания, а затем медь плавится в вакуумной среде и пропитывается. Вакуумная среда является основной особенностью процесса, которая позволяет удалять кислород и примеси из воздуха, предотвращать реакции окисления и обеспечивать хорошее сцепление между жидкой медью и вольфрамовым каркасом. Процесс включает в себя подготовку вольфрамового каркаса, пропитку меди, охлаждение и затвердевание. Контроль каждого этапа напрямую влияет на микроструктуру и эксплуатационные характеристики сплава. Вакуумная инфильтрация особенно подходит для компонентов, требующих высокой проводимости и стойкости к высоким температурам, таких как контакты высоковольтных выключателей и электроды для контактной сварки, поскольку она позволяет достичь высокой плотности и равномерного распределения фаз. Оптимизация процесса направлена на повышение равномерности проникновения, снижение пористости и улучшение сцепления интерфейсов для удовлетворения разнообразных требований применения.

4.1.1 Принцип инфильтрации и требования к оборудованию

Приготовление сплава вольфрама и меди методом вакуумной инфильтрации основано на проницаемости жидкой меди в вакууме. Медь инфильтруется внутрь вольфрамового каркаса под действием высокой температуры, образуя однородный композиционный материал. Суть процесса инфильтрации заключается в том, что низкая температура плавления меди превращает ее в жидкость при нагревании, и, используя капиллярное и гравитационное действие, она проникает в мельчайшие поры пористого вольфрамового каркаса. Будучи материалом с высокой температурой плавления, вольфрам остается твердым и образует прочный каркас, обеспечивающий

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проникновение меди. Вакуумная среда устраняет кислород и примеси из воздуха, предотвращая реакции окисления и обеспечивая полное смачивание поверхности вольфрама медной жидкостью. Температура и степень вакуума во время процесса инфильтрации регулируют текучесть и глубину проникновения медной жидкости, что напрямую влияет на микроструктуру и свойства сплава. Ключ к успеху процесса заключается в хорошем сцеплении и равномерности проникновения между медной жидкостью и вольфрамовым каркасом. Качество интерфейса и распределение пор становятся важными факторами, определяющими производительность. Для реализации этого процесса требуется специализированное оборудование. Основным оборудованием является вакуумная инфильтрационная печь, оснащенная высокотемпературной системой нагрева и эффективным вакуумным насосом для поддержания стабильной вакуумной среды, предотвращающей окисление и образование газовых остатков. Система нагрева использует технологию резистивного или индукционного нагрева и должна обеспечивать равномерный нагрев и точный контроль температуры, чтобы гарантировать полное расплавление меди и проникновение ее во все уголки вольфрамового каркаса. Вакуумный насос должен обладать высокой скоростью откачки и низкой скоростью утечки для достижения состояния низкого давления и предотвращения помех от примесей. Форма или тигель используются для поддержки вольфрамового каркаса и содержат жидкую медь. Материал должен быть устойчивым к высоким температурам и не вступать в химическую реакцию с вольфрамом и медью, чтобы предотвратить загрязнение или повреждение конструкции. Вспомогательное оборудование, такое как датчики температуры и системы контроля давления, используется для контроля параметров процесса в режиме реального времени для обеспечения эксплуатационной стабильности. В совокупности эти устройства обеспечивают эффективность и надежность процесса вакуумной инфильтрации и соответствие микроструктуры сплава ожидаемым эксплуатационным требованиям.

4.1.2 Этапы процесса и оптимизация параметров

Подготовка сплава вольфрама с медью методом вакуумной инфильтрации представляет собой систематический процесс, включающий скоординированные операции на нескольких этапах для обеспечения соответствия микроструктуры и свойств сплава ожидаемым целям. Процесс начинается с подготовки и формования вольфрамового порошка, а пористый вольфрамовый скелет формируется прессованием или предварительным спеканием. На этом этапе следует уделить внимание пористости и механической прочности скелета, чтобы обеспечить подходящий канал для последующей инфильтрации меди. Затем подготовленный вольфрамовый скелет помещают в печь вакуумной инфильтрации, добавляют соответствующее количество медного материала, корпус печи герметизируют и запускают вакуумную систему для удаления кислорода и примесей из воздуха, чтобы создать чистую среду для инфильтрации. Стадия нагрева является ядром процесса. Температуру необходимо постепенно повышать до температуры выше точки плавления меди, позволяя жидкой меди плавиться и естественным образом инфильтроваться в вакуумной среде. Этап изоляции обеспечивает полное заполнение пор вольфрамового каркаса медной жидкостью, увеличивая время обработки, оптимизируя распределение фаз и межфазное соединение. Этап охлаждения контролирует скорость охлаждения для фиксации микроструктуры и предотвращения дефектов или неоднородностей, вызванных термическими напряжениями.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Плавность выполнения каждого этапа зависит от точного контроля параметров процесса, обеспечивающих качество конечного продукта.

Оптимизация параметров сосредоточена на согласовании температуры, вакуума и времени. Регулирование температуры необходимо осуществлять поэтапно. Низкотемпературная стадия предварительного нагрева снижает тепловой удар, высокотемпературная стадия обеспечивает полное расплавление меди, а промежуточная стадия перехода балансирует распределение тепла, предотвращая локальный перегрев. Регулировка вакуума напрямую влияет на смачивающую способность и содержание примесей в жидкой меди. Слишком низкий вакуум может привести к снижению проникновения остаточного газа. Слишком высокий вакуум требует баланса между сложностью оборудования и эффективностью процесса и должен динамически корректироваться в соответствии с реальными потребностями. Оптимизация времени включает распределение времени для каждого этапа нагрева, изоляции и охлаждения. Слишком короткий вакуум может привести к недостаточному проникновению или образованию остаточных пор, а слишком длинный – к чрезмерному размеру зерна или улетучиванию меди, что влияет на производительность. Технологический процесс также должен учитывать предварительную обработку вольфрамового каркаса, такую как очистка поверхности или регулировка пор, для повышения проникающей способности меди. Динамическая регулировка параметров достигается посредством моделирования процесса и экспериментальной проверки для обеспечения плотности и однородности микроструктуры и обеспечения повышения производительности.

Оптимизация стадий процесса существенно влияет на эксплуатационные характеристики сплава. Равномерное распределение температуры и достаточное время проникновения могут улучшить электро- и теплопроводность, что делает его пригодным для применения в качестве подложек для рассеивания тепла; стабильная вакуумная среда и соответствующая скорость охлаждения повышают механическую прочность и коррозионную стойкость, что делает его пригодным для компонентов электродов. Каждый этап процесса должен быть тесно связан с предыдущим. Потеря контроля на любом этапе может привести к увеличению дефектов или неравномерному распределению фаз. Будущие направления развития включают внедрение интеллектуальных систем мониторинга для динамической оптимизации параметров путем отслеживания в реальном времени температуры, уровня вакуума и глубины проникновения для повышения эффективности процесса и качества продукции. Этот метод обеспечивает надежную гарантию промышленного производства сплава вольфрам-медь.

4.1.3 Преимущества и ограничения процесса

Получение сплава вольфрама и меди методом вакуумной инфильтрации демонстрирует значительные преимущества благодаря уникальным технологическим характеристикам, но также имеет определенные ограничения. Эти характеристики в совокупности определяют область его применения и направления оптимизации. Одним из преимуществ является высокая плотность. Полное проникновение жидкой меди в вакуумной среде может значительно снизить пористость и повысить общую прочность и стабильность материала. Эта плотная структура обеспечивает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сплаву превосходные механические свойства и долговечность, что делает его особенно подходящим для применений, подверженных высоким нагрузкам. Еще одним преимуществом является равномерное распределение фаз. Удачное сочетание вольфрамового скелета и медной фазы оптимизирует электро- и теплопроводность, благодаря чему сплав хорошо работает в условиях сильных токов и высоких температур. Защита вакуумной среды снижает проникновение окислительных примесей, сохраняет чистоту материала и создает надежную основу для долгосрочного использования. Кроме того, контролируемость процесса позволяет производить детали сложной формы или крупногабаритные детали, отвечая различным требованиям обработки и демонстрируя его гибкость.

Однако этот процесс также имеет некоторые ограничения. Сложность оборудования и эксплуатационные расходы высоки, а требования к обслуживанию вакуумной печи и связанного с ней вспомогательного оборудования строгие, что увеличивает производственные затраты и ограничивает его применение в сценариях, чувствительных к стоимости. Технологический цикл длительный и включает многоэтапные операции. От подготовки вольфрамового каркаса до инфильтрации меди требуется много времени, что может повлиять на эффективность массового производства. При определенных условиях может существовать риск улетучивания меди или неравномерной инфильтрации, особенно при несоответствии пористости вольфрамового каркаса или недостаточной степени вакуума, что влияет на стабильность качества продукта. Кроме того, процесс сильно зависит от чистоты и предварительной обработки сырья. Любые дефекты или неоднородности сырья могут передаваться конечному продукту, что требует дополнительного контроля качества и корректировки процесса.

Эти преимущества и ограничения в совокупности определяют области применения сплавов вольфрамовой меди, полученных методом вакуумной инфильтрации. Эти преимущества дают ему преимущество в областях, требующих высокой производительности, например, в контактах высоковольтных выключателей, где высокая плотность и проводимость сплава обеспечивают надежную коммутацию; в электродах для контактной сварки равномерное распределение фаз и высокая термостойкость обеспечивают длительный срок службы. В аэрокосмической отрасли этот процесс также эффективен для изготовления деталей сложной формы из вольфрамовой меди, таких как радиаторы и электрические контакты. Ограничения указывают на необходимость дополнения этого метода другими методами, например, порошковой металлургией, для снижения затрат и повышения эффективности.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 5. Методы испытаний и характеристики характеристик сплава вольфрамовой меди

Сплав вольфрам-медь является важным средством оценки его электропроводности, теплопроводности, механической прочности и долговечности, которые напрямую определяют эффективность его применения в электротехнике, электронике и промышленности. Метод испытания включает измерение физических, механических и электрических свойств, а также выявляет взаимосвязь между микроструктурой и макроскопическими свойствами сплава посредством стандартизированных операций и передовых методов характеризации.

5.1 Испытание физических свойств сплава вольфрам-медь

вольфрамовой меди является оценка его основных физических свойств, таких как плотность, электропроводность и теплопроводность, которые тесно связаны с его микроструктурой и процессом изготовления. Испытание на плотность отражает компактность сплава, которая напрямую влияет на электропроводность и механическую прочность; испытание на электропроводность оценивает способность к передаче электронов, что подходит для электрических контактов; испытание на теплопроводность измеряет эффективность рассеивания тепла, что является ключевым фактором в приложениях рассеивания тепла. Испытания физических свойств проводятся неразрушающими или минимально разрушающими методами для обеспечения целостности образца и предоставления надежных данных. Результаты испытаний служат основой для оптимизации процесса и повышения производительности. В этом разделе основное внимание будет уделено методу испытания на плотность, а также стандартам и процедурам испытаний на твердость.

5.1.1 Метод определения плотности

Метод испытания на плотность используется для измерения удельной массы объема сплава вольфрама и меди, которая отражает плотность и пористость его микроструктуры и является важным показателем для оценки качества препарата. Принцип испытания основан на законе Архимеда. Измеряя разницу веса образца на воздухе и в жидкости, рассчитывается его истинная плотность. Процесс работы сначала требует подготовки образцов правильной формы или без явных дефектов, а затем очистки и сушки для удаления поверхностных загрязнений. Затем образец подвешивают на точных весах, регистрируют его вес на воздухе, а затем погружают в жидкость с известной плотностью (например, в дистиллированную воду) для измерения его выталкивающей силы в жидкости. Разницу веса объединяют с плотностью жидкости, чтобы получить объем образца, и, наконец, плотность рассчитывают путем деления массы на объем.

Метод испытания требует строгих экспериментальных условий для обеспечения точности. Температура жидкости должна поддерживаться постоянной, чтобы избежать влияния теплового расширения на значение плотности; точность весов должна быть достаточной для обнаружения небольших изменений веса и снижения погрешностей измерений. На поверхности образца не должно быть пузырьков, что может быть достигнуто вакуумной дегазацией или обработкой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхности. В ходе испытания проводятся множественные измерения, и для исключения случайных ошибок вычисляется среднее значение. Испытание на плотность подходит для определения пористости и однородности в процессе подготовки. Более низкая плотность может указывать на более высокую пористость, в то время как более высокая плотность отражает лучшую компактность. Результаты испытания служат прямой основой для оптимизации процесса спекания и снижения дефектов и широко используются для контроля качества и оценки эксплуатационных характеристик.

5.1.2 Стандарты и операции испытания на твердость

Стандарты и процедуры испытаний на твердость используются для оценки способности сплава вольфрама с медью противостоять поверхностному вдавливанию или износу, отражая его механические свойства и долговечность. Принцип испытания основан на приложении определенной нагрузки к поверхности образца стандартизированным индентором, измерении глубины или площади вдавливания и косвенном указании способности материала сопротивляться деформации. Распространенные стандарты испытаний включают твердость по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу, которые подходят для различных диапазонов твердости и характеристик образцов. Твердость по Бринеллю прикладывает большую нагрузку через стальной шариковый индентор, что подходит для более мягких или однородных материалов; твердость по Роквеллу использует алмазный конус или стальной шарик для быстрого измерения тонких образцов или поверхностной твердости; твердость по Виккерсу использует алмазный четырехгранный пирамидальный индентор, который подходит для небольших участков или сложных структур.

Процесс работы сначала требует подготовки плоской поверхности образца, удаления шероховатостей шлифованием или полированием и обеспечения полного контакта индентора с поверхностью. Выберите соответствующий стандарт испытаний и тип индентора, а также определите нагрузку и время инденторирования в соответствии с размером образца и ожидаемым диапазоном твердости. После приложения нагрузки удалите индентор, измерьте геометрические характеристики отпечатка, такие как диаметр или длина диагонали, и используйте микроскоп или специальный прибор для точного считывания. Испытание необходимо повторить в нескольких точках, чтобы исключить влияние неоднородности поверхности, и вычислить среднее значение для получения репрезентативных результатов.

Во время работы следует уделять внимание температуре и влажности окружающей среды, чтобы избежать внешних факторов, влияющих на точность измерений. Испытание на твердость имеет большое значение для оценки эксплуатационных характеристик. Высокая твердость обычно связана с мелким зерном и плотной структурой, отражая износостойкость сплава, который подходит для применения в электродах или режущих инструментах. Результаты испытаний также могут быть использованы для выявления дефектов в процессе подготовки, таких как поры или несмачиваемые участки, которые могут привести к локальному снижению твердости. Стандартизированные операции обеспечивают сопоставимость результатов испытаний и создают научную основу для выбора материалов и совершенствования процесса.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.3 Метод испытания проводимости

Метод испытания на проводимость используется для оценки способности сплава вольфрама с медью проводить ток. Он отражает связность фазы меди в его микроструктуре и эффективность проводящего пути. Это ключевой показатель для измерения электрических свойств сплава. Принцип испытания основан на законе Ома. Путем измерения тока образца при определенном напряжении рассчитывается его проводимость. Рабочий процесс сначала требует подготовки образца правильной формы, а поверхность должна быть отполирована для уменьшения влияния контактного сопротивления. Для измерения используйте четырех- или двухзондовый метод. Четырехзондовый метод размещает четыре электрода на поверхности образца, подает ток и измеряет напряжение соответственно, и устраняет помехи контактного сопротивления; двухзондовый метод напрямую измеряет напряжение и ток на обоих концах, что подходит для более длинных образцов. Испытательное оборудование включает в себя прецизионный источник питания, амперметр и вольтметр для обеспечения точности измерений.

Испытание необходимо проводить при постоянной температуре и влажности, чтобы избежать влияния факторов окружающей среды на проводимость. Образец должен быть плотно прижат к электроду, а хорошее соединение может быть достигнуто с помощью зажима или проводящей пасты. После подачи стабильного тока запишите значения напряжения и тока, рассчитайте удельное сопротивление и переведите его в проводимость на основе геометрии образца. Среднее значение в различных точках измеряется несколько раз, чтобы обеспечить репрезентативность результатов и исключить локальные неоднородности. Испытание на проводимость подходит для выявления влияния процесса подготовки на распределение фаз меди. Более высокая проводимость обычно связана с непрерывной сетью фаз меди, отражающей хорошую микроструктуру.

5.1.4 Метод испытания теплопроводности

Метод испытания на теплопроводность используется для оценки способности сплава вольфрама и меди передавать тепло. Он отражает влияние распределения фаз и качества интерфейса в его микроструктуре на теплопроводность и является важным показателем для измерения характеристик рассеивания тепла. Принцип испытания основан на законе Фурье. Теплопроводность рассчитывается путем измерения скорости теплопередачи в образце. В процессе работы сначала подготавливается образец правильной формы. Поверхность должна быть плоской, чтобы обеспечить хороший тепловой контакт. Обычно используемые методы включают стационарный метод и переходный метод. Стационарный метод измеряет градиент температуры путем приложения постоянного теплового потока к обоим концам образца; переходный метод кратковременно нагревает поверхность образца, регистрирует изменение температуры с течением времени и выводит значение температуропроводности.

Испытание должно проводиться в контролируемой температурной среде с использованием источника тепла и термопар или инфракрасных датчиков для измерения распределения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

температуры. Метод стационарного состояния требует стабильной температуры на обоих концах образца и равномерного теплового потока, а также теплоизоляционных материалов для уменьшения бокового рассеивания тепла; переходный закон требует быстродействующего оборудования, такого как лазерный флэш-метр, для регистрации изменений температуры. Геометрические размеры и контактные поверхности образца должны соответствовать испытательному оборудованию для обеспечения четкого пути теплопередачи. Возьмите среднее значение нескольких испытаний, чтобы исключить экспериментальные ошибки. Испытание теплопроводности подходит для оценки влияния процессов подготовки на связность медных межсоединений. Более высокая теплопроводность обычно связана с равномерным распределением фаз и низкой пористостью, что подходит для применений в качестве подложки для рассеивания тепла. Результаты испытаний обеспечивают научную основу для оптимизации характеристик терморегулирования, и в будущем технология тепловидения может быть объединена для повышения точности измерений.

5.2 Оценка химических свойств сплава вольфрам-медь

вольфрамовой меди является изучение его коррозионной стойкости и химической стабильности в различных средах, отражая влияние микроструктуры на адаптивность к окружающей среде, что является ключом к обеспечению долгосрочной надежности. Методы оценки включают в себя испытание на погружение, измерение скорости коррозии и анализ поверхности, которые имитируют среду использования для наблюдения за химической реакцией и поведением деградации сплава. В процессе эксплуатации сначала подготавливается образец, поверхность необходимо очистить от примесей, а затем поместить в кислотную, солевую или влажную среду для имитации условий использования. Испытание на погружение наблюдает за изменениями поверхности, подвергая образец длительному воздействию; измерение скорости коррозии рассчитывает скорость реакции по потере веса или уменьшению толщины; анализ поверхности, такой как сканирующая электронная микроскопия или рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, используется для определения состава и распределения продуктов коррозии.

В процессе оценки необходимо контролировать такие параметры окружающей среды, как температура, влажность и концентрация среды, чтобы избежать внешнего воздействия. Регулярно отбирайте образцы, очищайте и высушивайте их, измеряйте вес или поверхность и регистрируйте динамику изменений. Для исключения случайных факторов используйте среднее значение нескольких испытаний. Оценка химических свойств подходит для определения чувствительности меди к коррозии. Пористость и дефекты могут ускорить проникновение среды и снизить стабильность. Результаты оценки служат основой для оптимизации обработки поверхности и выбора коррозионно-стойких покрытий, которые широко используются в морском оборудовании и компонентах химической обработки.

5.2.1 Условия и методы испытаний на коррозионную стойкость

Испытательная среда и метод коррозионной стойкости используются для оценки коррозионной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стойкости сплава вольфрама и меди в различных средах, отражая приспособляемость его микроструктуры и состава к химической среде и являясь ключом к обеспечению долговременной стабильности. Испытательная среда должна имитировать реальные условия использования, такие как влажная, кислая или соленая среда, чтобы воспроизвести возможные сценарии коррозии. В ходе операции сначала подготавливается плоский образец, очищается поверхность от загрязнений и гарантируется, что результаты испытания не будут затронуты загрязнением. Обычно используемые испытательные среды включают камеры солевого тумана, резервуары для погружения в кислотный раствор или камеры влажного тепла. Камеры солевого тумана имитируют морскую или промышленную среду, кислотные растворы, такие как серная кислота или соляная кислота, имитируют условия химической обработки, а камеры влажного тепла имитируют комбинированное воздействие высокой влажности и температуры. Образцы помещаются в эти среды, подвергаются воздействию в течение определенного периода времени, и регулярно наблюдаются изменения поверхности.

Методы испытаний включают метод потери веса и электрохимический метод. Метод потери веса рассчитывает скорость коррозии по изменению веса образца до и после погружения и требует точного взвешивания и регистрации времени; электрохимический метод измеряет коррозионный потенциал и плотность тока с помощью потенциометра для оценки динамического поведения процесса коррозии. Такие параметры окружающей среды, как температура, концентрация среды и время воздействия, необходимо контролировать во время испытания, чтобы избежать помех от внешних факторов. Среднее значение берется из нескольких испытаний, чтобы исключить случайные ошибки, а морфология коррозии наблюдается под микроскопом. Испытание на коррозионную стойкость подходит для определения чувствительности меди к относительной коррозии. Пористость и дефекты могут ускорить проникновение среды и повлиять на стабильность. Результаты испытания служат основой для оптимизации защиты поверхности и выбора коррозионно-стойких применений. В будущем может быть разработана многофакторная связанная среда для повышения практической значимости испытания.

5.2.2 Метод испытания антиоксидантной активности

Метод испытания на стойкость к окислению используется для оценки стойкости к окислению сплава вольфрама и меди в высокотемпературной или кислородсодержащей среде, отражая стойкость его микроструктуры к окислению, и является важным показателем для приложений с высокой надежностью. Принцип испытания основан на воздействии на образец окислительной атмосферы для наблюдения за образованием поверхностного оксидного слоя и степенью деградации материала. В процессе работы сначала подготавливается образец, полируется поверхность для удаления оксида и обеспечивается постоянство исходного состояния. Обычные методы включают испытание на высокотемпературное окисление и испытание на циклическое окисление. Испытание на высокотемпературное окисление помещает образец в высокотемпературную печь, пропускает воздух или кислород и непрерывно нагревает для наблюдения за поведением окисления; испытание на циклическое окисление имитирует условия термического цикла, попеременно нагревает и охлаждает и оценивает стабильность стойкости к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

окислению. Испытательное оборудование должно иметь точный контроль температуры и возможности подачи газа.

Во время испытания необходимо регистрировать время нагрева, температуру и толщину оксидного слоя, регулярно отбирать образцы, очищать и взвешивать их, а также рассчитывать прирост массы или изменение поверхности. Микроскопический или рентгеноструктурный анализ можно использовать для определения состава и распределения продуктов окисления. В испытательной среде необходимо поддерживать стабильную концентрацию кислорода, чтобы избежать помех от других газов. Возьмите среднее значение нескольких испытаний, чтобы исключить экспериментальные ошибки. Испытание антиоксидантной эффективности подходит для определения тенденции к окислению фазы меди при высокой температуре. Стабильность фазы вольфрама играет защитную роль, а поры могут усугублять окисление. Результаты испытания служат руководством для оптимизации высокотемпературных процессов и выбора антиоксидантных покрытий. В будущем технология мониторинга в реальном времени может быть объединена для повышения точности испытаний и ценности применения.

5.3 Технология определения микроструктуры сплава вольфрам-медь

Методы характеризации включают в себя оптический микроскоп, сканирующий электронный микроскоп и просвечивающий электронный микроскоп. Оптический микроскоп используется для наблюдения макроскопических особенностей поверхности, сканирующий электронный микроскоп обеспечивает высокоточный анализ морфологии и состава, а просвечивающий электронный микроскоп позволяет глубоко изучать границы зерен и фазовые границы. В процессе работы образец сначала подготавливается: его разрезают, шлифуют и полируют. Некоторые технологии требуют утонения или травления для повышения контрастности.

Процесс испытания требует выбора соответствующих условий в соответствии с технологией. Для наблюдения с помощью оптической микроскопии требуется соответствующее окрашивание, для сканирующей электронной микроскопии – вакуумная среда и настройка электронного пучка, а для просвечивающей электронной микроскопии – высокоточная подготовка образцов. Результаты анализа позволяют количественно определить размер зерна и распределение пор с помощью программного обеспечения для обработки изображений, а также определить фазовый состав в сочетании с анализом энергетического спектра. Технология характеризации подходит для выявления влияния процесса подготовки на микроструктуру, а измельчение зерна и равномерность распределения фаз повышают производительность. Полученные результаты обеспечивают научную основу для оптимизации процесса и контроля дефектов, а в будущем могут быть объединены с технологией трехмерной визуализации для полной характеристики микроструктуры.

5.3.1 Метод наблюдения с помощью металлографического микроскопа

Метод наблюдения с помощью металлографического микроскопа используется для наблюдения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроструктурных характеристик сплавов вольфрама и меди, таких как морфология зерен, распределение фаз и пористость, а также для выявления влияния процесса подготовки на микроструктуру. Принцип испытания основан на отражении или пропускании видимого света через поверхность образца для увеличения и наблюдения микроскопических деталей. Процесс операции сначала требует подготовки образца, которая включает резку, шлифовку и полировку для получения плоской поверхности, а затем химическое травление или электролитическое полирование для усиления контраста между фазами вольфрама и меди и улучшения видимости границ зерен и фазовых границ. Образец закрепляется на столике, а фокус и источник света микроскопа регулируются для наблюдения микроструктуры при различных увеличениях. Во время испытания необходимо выбрать подходящий режим освещения, такой как светлое поле или темное поле, для улучшения видимости специфических особенностей. Оператор записывает изображение через окуляр или цифровую систему визуализации для анализа размера зерна, однородности распределения фаз и дефектов. Наблюдайте на различных участках несколько раз, чтобы обеспечить репрезентативность и исключить влияние локальной неоднородности. Наблюдение под металлографическим микроскопом подходит для предварительной оценки влияния процесса подготовки. Измельчение зерна или оптимизация распределения фаз обычно связаны с повышением производительности.

5.3.2 Применение анализа с помощью сканирующего электронного микроскопа

Анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии используется для изучения микроструктуры и распределения состава сплавов вольфрама и меди с высоким разрешением, выявляя тонкие особенности морфологии зерен, фазовых границ и дефектов. Принцип испытания основан на бомбардировке поверхности образца электронным пучком, что приводит к генерации вторичных и обратно рассеянных электронов для получения морфологической и композиционной информации. В процессе работы образец сначала подготавливается, его необходимо разрезать, отшлифовать, отполировать и подвергнуть проводящей обработке, такой как напыление золотом или нанесение углеродного покрытия, для предотвращения эффектов зарядки.

Образец помещается в вакуумную камеру, а параметры электронного пучка, такие как ускоряющее напряжение и рабочее расстояние, регулируются для сканирования поверхности образца. Во время испытания изображение во вторичных электронах обеспечивает детали морфологии поверхности, изображение в обратно рассеянных электронах подчеркивает контраст различных фаз, а анализ энергодисперсионного спектра (EDS) определяет распределение элементов. Оператор может регулировать увеличение и режим детектора для наблюдения за границами зерен, порами и распределением фаз.

Несколько раз сканировать различные области для обеспечения полноты данных и использовать программное обеспечение для обработки данных. Анализ методом сканирующей электронной микроскопии подходит для выявления микроскопических изменений, вызванных процессом подготовки, таких как уменьшение пор или улучшение межфазных границ, а соответствующие результаты позволяют оптимизировать производительность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3.3 Рентгеноструктурный анализ

Рентгеноструктурный анализ (РФА) используется для определения кристаллической структуры, фазового состава и параметров решетки сплавов вольфрама и меди, а также для изучения взаимосвязи между микроструктурой и эксплуатационными характеристиками. Принцип исследования основан на брэгговской дифракции рентгеновских лучей на кристаллографической плоскости образца с получением характерных спектральных линий, отражающих расположение атомов внутри материала. Рабочий процесс: Подготовьте порошкообразные или плоские образцы, измельчите до нужного размера частиц или отполируйте поверхность для предотвращения текстурных эффектов. Поместите образец в рентгеновский дифрактометр, отрегулируйте углы источника рентгеновского излучения и детектора и просканируйте определённый диапазон углов 2θ .

В ходе испытания регистрируются положение и интенсивность дифракционных пиков, анализируются характеристики кристаллической фазы вольфрама и меди, а также обнаруживаются возможные примеси или оксиды. Оператор может использовать программное обеспечение для подгонки формы пика и определения размера зерна и деформации. Многократные измерения усредняются для исключения погрешностей прибора. Рентгеноструктурный анализ подходит для оценки влияния процесса спекания на кристаллическую фазу. Острота пика отражает размер зерна, а смещение пика указывает на напряжённое состояние. Результаты служат основой для оптимизации микроструктуры и прогнозирования характеристик, а в будущем технология синхротронного излучения может быть объединена для повышения точности.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 6. Многочисленные области применения сплава вольфрамовой меди

Вольфрамово-медные сплавы обладают уникальными физическими и химическими свойствами, которые находят применение в различных отраслях, таких как электротехника, авиация, электроника и промышленное производство. Отличная электропроводность, теплопроводность, высокая термостойкость и стойкость к дуговой эрозии делают их идеальным выбором для создания высокопроизводительных компонентов. Области применения постоянно расширяются, включая низковольтные силовые выключатели, высоковольтные автоматические выключатели, радиаторы и электроды для электроэрозионной обработки. Вольфрамово-медные сплавы отвечают самым разнообразным требованиям к эксплуатационным характеристикам благодаря различным процессам обработки и конструкциям.

6.1 Применение сплава вольфрам-медь в электротехнике

Вольфрамово-медный сплав широко используется в электротехнике, особенно там, где требуются высокая проводимость и стойкость к дуговой эрозии. Электротехническая область включает в себя низковольтные силовые выключатели, высоковольтные автоматические выключатели и электрические контакты. Вольфрамово-медный сплав отвечает требованиям высоких токов, высокого напряжения и частого переключения благодаря высокой температуре плавления вольфрама и высокой проводимости меди. Микроструктура сплава оптимизируется с помощью порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, а распределение фаз и плотность напрямую влияют на его характеристики.

6.1.1 Применение в низковольтных силовых выключателях

Вольфрамово-медный сплав в низковольтных силовых выключателях является важным проявлением применения вольфрамово-медного сплава в электротехнической области, особенно в контактных компонентах. Низковольтные силовые выключатели используются для управления включением и выключением цепей. Частые переключения и возникновение дуги предъявляют строгие требования к материалам. Вольфрамово-медный сплав отвечает этим требованиям благодаря высокой стойкости к дуговой эрозии и проводимости и широко используется в бытовой технике, промышленных системах управления и распределения электроэнергии. Существуют различные области применения, включая подвижные и статические контакты и электродные компоненты, а оптимизация процесса обеспечивает стабильность характеристик. В этом разделе подробно рассматриваются требования к характеристикам основных компонентов, области применения и влияние увеличения срока службы.

6.1.1.1 Требования к эксплуатационным характеристикам материалов основных компонентов низковольтных силовых выключателей

Требования к характеристикам материалов для основных компонентов низковольтных силовых переключателей, таких как контакты и электроды, охватывают множество аспектов,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечивающих безопасность и надежность оборудования. Во-первых, материал должен обладать превосходной электропроводностью для эффективной передачи тока и снижения потерь энергии и тепловыделения. Еще одним ключевым требованием является хорошая теплопроводность, которая позволяет быстро рассеивать тепло, выделяемое дугой или сильным током, предотвращая локальный перегрев. Во-вторых, материал должен обладать высокой стойкостью к дуговой эрозии, чтобы противостоять поверхностному разрушению, вызванному дугой во время переключения, обеспечивая стабильность при длительной эксплуатации. Кроме того, критически важна высокая термостойкость, и основные компоненты должны выдерживать экстремальные температуры без деформации или плавления при отключении сильных токов. Механическая прочность и износостойкость также необходимы для обеспечения частых механических переключений и предотвращения износа или поломки. Коррозионная стойкость помогает поддерживать работоспособность во влажных или промышленных условиях. Наконец, материал должен обладать достаточной твердостью, чтобы выдерживать контактное давление, сохраняя при этом достаточную прочность для предотвращения хрупкого разрушения. Эти требования в совокупности определяют выбор материала для компонентов низковольтных выключателей, и сплав вольфрама и меди является предпочтительным выбором благодаря своим комплексным эксплуатационным характеристикам.

6.1.1.2 Применение сплава вольфрамовой меди в контактных деталях

Вольфрамово -медный сплав в контактных узлах низковольтных выключателей питания различается в зависимости от требований к конструкции и условий эксплуатации. Одной из распространенных форм является изготовление контактного материала из вольфрамово-медного сплава, который непосредственно используется для подвижных и статических контактов выключателя и выдерживает частые операции включения-выключения благодаря своей высокой проводимости и стойкости к дуговой эрозии. Сплав обычно изготавливается с более высоким содержанием вольфрама (например, WCu 70/30 или WCu 80/20). Вольфрам обеспечивает высокую термостойкость и износостойкость, а медь гарантирует непрерывность токопроводящей дорожки. Другая форма — композитная структура, в которой в качестве контактного поверхностного слоя используется вольфрамово-медный сплав в сочетании с другими подложками, такими как медь или сталь, и интегрируется сваркой или запрессовкой для оптимизации баланса между стоимостью и производительностью.

В приложениях сплавы вольфрамовой меди также могут быть изготовлены в специальных формах, таких как круглые или прямоугольные контакты, с помощью порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации для адаптации к конструкции различных переключателей. Обработка поверхности, такая как полировка или нанесение покрытия, может дополнительно повысить коррозионную стойкость и дугостойкость. В некоторых случаях, когда требуется высокая прочность, сплавы вольфрамовой меди перерабатываются в многослойные структуры с внутренним слоем с высоким содержанием вольфрама для повышения долговечности и внешним слоем с высоким содержанием меди для улучшения проводимости. Контактный узел обычно крепится болтами или встраивается в корпус переключателя для обеспечения надежного контакта.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Эти варианты применения в полной мере используют характеристики сплавов вольфрамовой меди для удовлетворения разнообразных потребностей низковольтных силовых переключателей.

6.1.1.3 Влияние применения на срок службы низковольтных силовых выключателей

Вольфрамово -медный сплав, используемый в контактных компонентах низковольтных силовых выключателей, благодаря своим превосходным эксплуатационным характеристикам значительно увеличивает срок службы оборудования. Во-первых, высокая стойкость сплава к дуговой эрозии снижает абляцию и потерю материала на контактной поверхности, увеличивая циклы включения-выключения выключателя. Высокая термостойкость обеспечивает стабильность контактов при отключении при высоких токах, снижая вероятность механических отказов и ухудшения характеристик, вызванных перегревом. Во-вторых, хорошая электропроводность и теплопроводность снижают тепловой эффект сопротивления, замедляют старение контактов и повышают надежность длительной эксплуатации. Механическая прочность и износостойкость обеспечивают частые переключения, снижая риск износа или поломки контактов, что дополнительно продлевает срок службы. Кроме того, равномерное распределение фаз и низкая пористость сплава вольфрама с медью улучшают общую структурную целостность контакта и снижают ранний отказ, вызванный микроскопическими дефектами. Коррозионная стойкость также играет защитную роль, особенно во влажных или промышленных средах, снижая негативное воздействие окисления или эрозии поверхности на срок службы. После применения увеличивается интервал технического обслуживания низковольтных силовых переключателей, снижается интенсивность отказов и повышается общая эффективность работы. На практике цикл замены компонентов контакта значительно увеличивается, особенно в сценариях высокочастотного использования, таких как промышленные системы управления или бытовая техника. Применение сплава вольфрама с медью обеспечивает оборудованию более длительный срок службы и более высокую экономическую выгоду. В будущем эффект продления срока службы может быть дополнительно усилен за счет оптимизации соотношений легирующих элементов и обработки поверхности.

6.1.2 Применение в высоковольтных выключателях

Применение в высоковольтных выключателях является важным проявлением сплава вольфрамовой меди в электротехнической области, особенно играя ключевую роль в сценариях, требующих работы с высоким напряжением и сильными дугами. Высоковольтные выключатели используются для управления и защиты цепей в энергосистемах, включая такое оборудование, как высоковольтные выключатели, разъединители и заземлители. Эти устройства будут генерировать сильные дуги при переключении токов высокого напряжения, что предъявляет чрезвычайно высокие требования к характеристикам материала. Сплав вольфрамовой меди стал идеальным материалом для основных компонентов высоковольтных выключателей благодаря своей превосходной проводимости, высокой термостойкости и стойкости к дуговой эрозии. Его микроструктура оптимизируется с помощью процессов порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации для обеспечения стабильной работы в экстремальных рабочих условиях. В

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложениях сплав вольфрамовой меди в основном используется для контактов, подвижных и статических электродов, а также устройств гашения дуги, что значительно повышает надежность и срок службы выключателей. В этом разделе будут подробно рассмотрены рабочая среда высоковольтных выключателей и стандарты допусков материалов основных компонентов, характеристики сплава вольфрам-медь при адаптации к потребностям высоковольтных выключателей, а также различия в применении сплава вольфрам-медь в высоковольтных выключателях разных уровней напряжения.

6.1.2.1 Стандарты рабочей среды высоковольтных выключателей и допуски материалов для основных компонентов

Условия эксплуатации высоковольтных выключателей чрезвычайно суровы и включают в себя комбинированное воздействие высокой температуры, высокого давления, мощных дуг и механических напряжений, что предъявляет множество требований к стандартам точности материалов основных компонентов. Во-первых, высокая температура в рабочей среде создается, главным образом, дугами. Энергия, выделяющаяся мгновенно при отключении тока, может привести к резкому повышению локальной температуры.

Материал должен обладать превосходной термостойкостью и не плавиться и не деформироваться при высоких температурах в тысячи градусов. Основные компоненты, такие как контакты и электроды, должны выдерживать эту экстремальную тепловую нагрузку, сохраняя при этом структурную целостность. Во-вторых, высоковольтная среда сопровождается высоким напряжением. Для обеспечения непрерывности и прочности дуги материал должен обладать чрезвычайно высокой стойкостью к дуговой эрозии, чтобы предотвратить абляцию поверхности или потерю материала, а также продлить срок службы. Кроме того, частые механические переключения вызывают удары и вибрации. Материал должен обладать достаточной механической прочностью и износостойкостью, чтобы противостоять износу и разрушению, обеспечивая долговременную стабильность работы. Коррозионная стойкость является ещё одним ключевым стандартом допуска, особенно в наружных или промышленных условиях, где высоковольтные переключатели могут подвергаться воздействию влаги, соляного тумана или химикатов. Материал должен быть устойчив к окислению и коррозии и сохранять электрические характеристики. Электропроводность и теплопроводность не менее важны. Эффективная передача тока и рассеивание тепла могут снизить эффект резистивного нагрева, снизить риск локального перегрева и защитить окружающие компоненты.

Твёрдость материала должна быть умеренной, чтобы он мог выдерживать контактное давление без растрескивания из-за чрезмерной хрупкости. В то же время, ударная вязкость должна быть достаточной для поглощения энергии удара. В ответ на эти требования международные и отраслевые стандарты, такие как IEC 62271 и ANSI/IEEE C37.04, установили контрольные показатели производительности для материалов высоковольтных переключателей, охватывающие испытания на дугостойкость, испытания на термостойкость и оценку механической прочности. Материалы должны быть проверены на соответствие этим строгим стандартам, чтобы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

гарантировать превосходные характеристики в сложных условиях эксплуатации высоковольтных переключателей. Вольфрамово-медные сплавы отвечают этим требованиям благодаря своим комплексным эксплуатационным характеристикам и стали предпочтительным материалом.

6.1.2.2 Характеристики сплава вольфрамовой меди применительно к высоковольтным выключателям

Прежде всего, высокая температура плавления и твёрдость вольфрама обеспечивают ему отличную стойкость к высоким температурам и дуговой эрозии. Когда высоковольтный выключатель отключает высоковольтный ток, вольфрамовая фаза эффективно поглощает и рассеивает выделяемое дугой тепло, предотвращая плавление контакта или его серьёзную абляцию. Высокая электропроводность меди обеспечивает эффективную передачу тока, снижает резистивный тепловой эффект и обеспечивает стабильный токопроводящий путь для дугогасительного устройства. Микроструктура сплава оптимизирована методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации.

Вольфрамово -медный сплав особенно важен в высоковольтных выключателях. Эффективная способность рассеивания тепла может быстро передавать тепло дуги в окружающую область, снижать локальную температуру контакта и продлевать срок службы. Механическая прочность и износостойкость поддерживают частые переключения. Прочность сплава повышается за счет пластичности медной фазы , что снижает риск образования трещин, вызванных ударами или вибрацией. С точки зрения коррозионной стойкости, химическая стабильность вольфрама защищает сплав от влаги или промышленных загрязнений, а поверхностная обработка медной фазы может дополнительно повысить коррозионную стойкость. В реальном применении высоковольтных выключателей вольфрамово-медный сплав также демонстрирует превосходную электрическую стабильность контакта, снижает контактное сопротивление и тепловыделение, а также повышает общую надежность оборудования. Для различных соотношений, таких как WCu 70/30 или WCu 80/20, сплав может регулировать свои характеристики в соответствии с конкретными потребностями. Сплав WCu 80/20 больше подходит для условий с высокой дугой, тогда как WCu 70/30 превосходит в ситуациях, где требуется более высокая проводимость. Эти характеристики делают сплав вольфрамовой меди идеальным выбором для основных компонентов высоковольтных выключателей.

6.1.2.3 Различия в применении сплава вольфрам-медь в высоковольтных выключателях разных классов напряжения

вольфрама и меди в высоковольтных переключателях различных уровней напряжения в основном отражаются в различных требованиях к напряжению, току и интенсивности дуги, что влияет на соотношение сплава, процесс подготовки и конструкцию компонентов. Уровни напряжения высоковольтных переключателей обычно делятся на среднее напряжение (от 1 кВ до 35 кВ), высокое напряжение (от 35 кВ до 230 кВ) и сверхвысокое напряжение (выше 230 кВ). Каждый уровень имеет существенно разные формы применения и требования к производительности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сплавов вольфрама и меди. В переключателях среднего напряжения интенсивность дуги относительно низкая, и сплав вольфрама и меди обычно изготавливается методом порошковой металлургии с соотношением WCu 70/30, уделяя особое внимание оптимизации проводимости и износостойкости. Контактные компоненты в основном имеют простые геометрические формы, что подчеркивает экономическую эффективность и долговременную стабильность. Стойкость сплава к дуговой эрозии достаточна для выполнения коммутационных операций в условиях среднего напряжения.

Высоковольтные переключатели (например, от 110 кВ до 230 кВ) сталкиваются с более сильными дугами и тепловыми нагрузками. Вольфрамово-медные сплавы, как правило, используют соотношение содержания вольфрама WCu 80/20 или выше для повышения высокотемпературной стойкости и стойкости к дуговой эрозии. Процесс подготовки может быть объединен с вакуумной инфильтрацией для обеспечения более высокой плотности и однородности. Конструкция контактов часто принимает многослойную структуру или композитную форму с внутренним слоем с высоким содержанием вольфрама для защиты от дуги и внешним слоем с высоким содержанием меди для оптимизации проводимости. По мере увеличения размера и веса компонентов необходимо учитывать механическую прочность и терморегулирование. Для повышения долговечности часто используется покрытие поверхности или термическая обработка. Сверхвысоковольтные переключатели предъявляют требования к пиковым эксплуатационным характеристикам материала. Энергия дуги чрезвычайно велика. Вольфрамово-медные сплавы могут использовать соотношение WCu 90/10 для изготовления контактов сложной формы и устройств гашения дуги с помощью аддитивного производства или технологии плазменного напыления. Сплав должен обладать чрезвычайно высокой стойкостью к дуговой эрозии и теплопроводностью.

Эти различия отражают влияние уровней напряжения на применение сплавов вольфрама и меди. В сценариях низкого напряжения основное внимание уделяется стоимости и проводимости, в сценариях среднего и высокого напряжения – дугостойкости и терморегулированию, а в сценариях сверхвысокого напряжения – экстремальным характеристикам и сложным конструкциям. Процесс подготовки и последующей обработки необходимо корректировать в зависимости от уровня напряжения. В будущем интеллектуальное проектирование и сочетание различных технологий могут быть использованы для адаптации к требованиям более высоких уровней напряжения и дальнейшего расширения области применения.

6.1.3 Применение реле и воздушных выключателей

вольфрамовой меди в реле и воздушных выключателях является важным проявлением сплава вольфрамовой меди в электротехнической области, особенно в сценариях, требующих высоконадежного электрического управления и защиты. Будучи маломощными устройствами управления сигналами, реле полагаются на контакты для осуществления включения и выключения цепей, а частые механические воздействия предъявляют требования к долговечности материалов. Воздушные выключатели используются для защиты цепей от перегрузки или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

короткого замыкания. Их системы гашения дуги должны выдерживать высокие токи и сильные дуги, что требует высокопроизводительных материалов. Сплав вольфрамовой меди стал основным материалом для контактов реле и дугогасительных камер воздушных выключателей благодаря своей превосходной проводимости, износостойкости и стойкости к дуговой эрозии.

6.1.3.1 Требования к износостойкости материала реле и пригодность сплава вольфрамовой меди

Требования к износостойкости реле для материалов обусловлены их частыми механическими переключениями и контактным давлением, которые напрямую влияют на срок службы и надежность контактов. Износостойкость является основным требованием, поскольку при коммутации реле маломощных сигналов контакты должны выдерживать многократный физический контакт и разъединение. Длительная эксплуатация может вызвать износ поверхности, перенос материала или адгезию, что, в свою очередь, приводит к увеличению сопротивления контакта или отказу.

Материал также должен обладать достаточной твердостью, чтобы противостоять вдавливанию, сохраняя при этом соответствующую вязкость для предотвращения хрупкого разрушения, вызванного чрезмерным закаливанием. Электропроводность является еще одним ключевым требованием, обеспечивающим путь с низким сопротивлением для поддержки передачи сигнала; высокая термостойкость и стойкость к дуговой эрозии помогают выдерживать случайные условия высокого тока или дуги. Кроме того, коррозионная стойкость особенно важна во влажных или промышленных средах для предотвращения влияния окисления или загрязнения на производительность.

Сплав вольфрама и меди демонстрирует чрезвычайно высокую приспособляемость и отвечает требованиям износостойкости реле. Его вольфрамовая фаза обеспечивает высокую твердость и износостойкость, противостоя износу поверхности, вызванному частым контактом, и продлевает срок службы контактов. Медная фаза способствует отличной проводимости, обеспечивая стабильность передачи сигнала и снижая тепловой эффект сопротивления. Микроструктура сплава оптимизирована с помощью процесса порошковой металлургии, измельчение зерна повышает износостойкость, а низкая пористость снижает сколы материала при износе.

Процесс вакуумной инфильтрации дополнительно повышает плотность, улучшает сцепление интерфейса между вольфрамом и медью и уменьшает точки концентрации механических напряжений. Стойкость к дуговой эрозии поддерживает эпизодические высокоэнергетические переключения, в то время как коррозионная стойкость обеспечивается химической стабильностью вольфрама. На практике использование сплавов вольфрама и меди (например, WCu 70/30) в контактах реле значительно снижает скорость износа и продлевает срок службы оборудования, особенно при работе на высоких частотах или в суровых условиях. В будущем его противоизносные свойства могут быть дополнительно улучшены за счет поверхностного упрочнения или добавления микроэлементов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.3.2 Место установки и реализация функции вольфрамово-медного сплава в реле

В реле сплав вольфрамовой меди в основном сосредоточен в контактном узле, а конкретное положение и реализация функции тесно связаны с требованиями к его конструкции. Контакт является основным компонентом реле, отвечающим за реализацию включения и выключения цепи. Сплав вольфрамовой меди обычно изготавливается в виде подвижного контакта или статического контакта, который устанавливается между механическим приводным механизмом и основанием реле. Подвижный контакт приводится в действие электромагнитной катушкой или механическим рычагом для контакта или разъединения со статическим контактом для завершения управления сигналом. Форма установки - это в основном сварка или прессование для фиксации контакта из сплава вольфрамовой меди на медной или стальной подложке для обеспечения электрического соединения и механической стабильности. Выбор положения установки должен учитывать контактное давление и распределение дуги. Поверхность контакта обычно полируется для оптимизации площади контакта и уменьшения сопротивления.

С точки зрения функциональной реализации, контакты из сплава вольфрамовой меди используют свою высокую проводимость для обеспечения надежной передачи маломощных сигналов, а медная фаза обеспечивает непрерывный токопроводящий путь. Высокая твердость и износостойкость вольфрамовой фазы обеспечивают частые механические переключения, предотвращают износ и слипание, а также обеспечивают долговременную стабильность контактов. Способность противостоять дуговой эрозии играет важную роль в условиях высокого напряжения или перегрузки, уменьшая повреждение контактов дугой и защищая внутреннюю структуру реле. Место установки может также включать вспомогательные электроды или элементы дугоизоляции. Сплав вольфрамовой меди способствует гашению дуги или рассеиванию тепла благодаря своей высокой термостойкости. В некоторых реле с высоким спросом сплав вольфрамовой меди имеет многослойную структуру с внутренним слоем с высоким содержанием вольфрама для повышения долговечности и внешним слоем с высоким содержанием меди для оптимизации проводимости. Эффективность функциональной реализации зависит от контроля точности монтажа и оптимизации процесса, такого как качество сварки и обработка поверхности. В будущем единообразии монтажа может быть улучшено за счет автоматизированной технологии сборки.

6.1.3.3 Требования к характеристикам материалов для систем гашения дуги воздушных выключателей

Система гашения дуги воздушных выключателей разработана для экстремальных условий работы при отключении большого тока, и к ней предъявляются строгие требования во многих аспектах. Во-первых, система гашения дуги должна обладать превосходной стойкостью к дуговой эрозии, поскольку сильная дуга, образующаяся при отключении большого тока, прожигает поверхность материала, а материал должен выдерживать множественные дуговые удары без выхода из строя. Высокая термостойкость является ключевым фактором. Температура дуги может достигать тысяч градусов. Материал должен сохранять структурную целостность при высоких температурах,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чтобы предотвратить плавление или деформацию. Во-вторых, электропроводность и теплопроводность имеют решающее значение. Эффективная передача тока и рассеивание тепла могут снизить резистивные тепловые эффекты, уменьшить локальный перегрев и защитить окружающие компоненты. Механическая прочность и износостойкость выдерживают частое перемещение дугогасительных решеток или контактов и противостоят механическим нагрузкам и износу.

Коррозионная стойкость особенно важна в наружных или промышленных средах для предотвращения коррозии материала под воздействием влаги или химикатов и поддержания долгосрочной производительности. Твердость материала должна быть умеренной, чтобы он мог выдерживать дуги и механическое давление без растрескивания из-за чрезмерной хрупкости. Вязкость должна поглощать энергию удара. Конструкция системы гашения дуги также требует, чтобы материал имел способность быстро гасить дугу и взаимодействовать с эффектом дутья дуги воздушной средой для быстрого прерывания дуги. Международные стандарты, такие как IEC 60947 и ANSI/IEEE C37.13, установили эталонные показатели производительности для дугогасительных материалов, включая испытания на стойкость к дуге и испытания на термическую стабильность. Материалы должны быть проверены по этим стандартам, чтобы гарантировать отличную производительность в сложной среде воздушных выключателей. Сплав вольфрамовой меди отвечает этим требованиям благодаря своим комплексным характеристикам и стал основным выбором для систем гашения дуги.

6.1.3.4 Принцип применения сплава вольфрамовой меди в дугогасительной камере воздушного выключателя

вольфрамовой меди в дугогасительной камере воздушных выключателей основан на его превосходных характеристиках при отключении при большом токе, особенно при контроле дуги и тепловом управлении. В применении сплав вольфрамовой меди в основном используется для дугогасительных решеток, контактов и компонентов разъединителей. Благодаря высокой стойкости к дуговой эрозии и высокой термостойкости он может выдерживать экстремальные условия отключения. Принцип заключается в том, что когда воздушный выключатель отключает большой ток, в зазоре между контактами возникает дуга, а высокая температура плавления и твердость вольфрамовой фазы эффективно поглощают энергию дуги, предотвращая поверхностную абляцию или потерю материала. Высокая электропроводность и теплопроводность медной фазы быстро передает ток и рассеивает тепло, снижает локальную температуру и взаимодействует с обдувом воздуха для ускорения гашения дуги.

Оптимизация микроструктуры является ключом к принципу применения. Равномерное распределение вольфрама и меди достигается с помощью порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации, что снижает пористость и повышает плотность для обеспечения равномерного распределения энергии дуги. Компоненты из сплава вольфрама и меди в дугогасительной камере выполнены в виде сегментированных структур. Дуга разделяется между сетками, увеличивая площадь охлаждающей поверхности и повышая эффективность гашения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дуги. Механическая прочность сплава обеспечивает частое открытие и закрытие, а ударная вязкость поглощает механические напряжения и предотвращает распространение трещин. Коррозионная стойкость защищает компоненты от воздействия окружающей среды и продлевает срок службы. Принцип применения также включает синергию с воздушной средой. Поверхность сплава вольфрама и меди под действием дуги образует защитный оксидный слой, способствующий прерыванию дуги. В силовых сценариях, таких как промышленное распределение электроэнергии или энергосистемы, характеристики сплава вольфрама и меди обеспечивают надежную работу дугогасительной камеры. В будущем управление тепловым режимом и эффекты гашения дуги могут быть оптимизированы за счет проектирования функционального градиента.

6.1.4 Применение в разъединителях и заземлителях

Вольфрамово -медный сплав, используемый в разъединителях и заземлителях, является важным примером применения вольфрамово-медного сплава в электротехнической сфере, особенно при изоляции и заземлении в энергосистемах. Разъединители используются для изоляции цепей в режиме холостого хода, предотвращая случайное включение питания, в то время как заземлители обеспечивают безопасное заземление при техническом обслуживании или отказах и должны выдерживать воздействие токов короткого замыкания. Вольфрамово-медный сплав стал основным материалом для этих разъединителей благодаря своей превосходной проводимости, высокой термостойкости и механической прочности. Микроструктура сплава оптимизирована методом порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации для обеспечения стабильной работы при длительном воздействии и экстремальных токах. В этом разделе будут подробно рассмотрены требования к стойкости материалов разъединителей к атмосферным воздействиям при длительном воздействии, конструкция применения сплава вольфрамовой меди в токопроводящей контактной части разъединителей, требования к прочности материалов и проводимости заземлителей при воздействии на них токов короткого замыкания, механизм действия сплава вольфрамовой меди для обеспечения безопасной работы заземлителей и критерии выбора сплава вольфрамовой меди для разъединителей и заземлителей.

6.1.4.1 Требования к стойкости к атмосферным воздействиям для материалов разъединителей, подвергающихся длительному воздействию окружающей среды

Требования к стойкости материалов к погодным условиям в условиях длительного воздействия для разъединителей обусловлены тем, что они обычно устанавливаются на открытом воздухе или в промышленных условиях и должны выдерживать воздействие различных природных и человеческих факторов. Прежде всего, стойкость к погодным условиям должна включать коррозионную стойкость. Разъединители часто подвергаются воздействию дождя, соляного тумана или промышленных выхлопных газов. Материалы должны противостоять окислению, ржавчине или химической эрозии и сохранять электропроводность и механическую целостность. Во-вторых, важным требованием является стойкость к УФ-старению. Длительное воздействие солнечного света может вызвать деградацию поверхности материала, и он должен обладать

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

антифотодеграционными свойствами для предотвращения ухудшения характеристик. Кроме того, решающее значение имеет стойкость к высоким и низким температурам. Изменения температуры окружающей среды могут вызвать термическое напряжение. Материал должен оставаться стабильным в экстремальных погодных условиях, таких как высокие температуры летом или сильный холод зимой. Также необходимо учитывать влагостойкость. Влажная среда может привести к разрушению поверхностного изоляционного слоя или электрической коррозии, что повлияет на безопасную эксплуатацию.

Механическая прочность является ещё одним ключевым требованием. Частые работы или ветровые нагрузки разъединителей могут вызывать вибрацию и износ. Материал должен обладать достаточной твёрдостью и усталостной прочностью, чтобы предотвратить растрескивание и деформацию. Электропроводность и теплопроводность должны сохраняться при длительном воздействии для обеспечения надёжности изоляции. Международные стандарты, такие как IEC 62271-102, устанавливают требования к испытаниям на атмосферостойкость для материалов разъединителей, включая испытания в солевом тумане, испытания на воздействие ультрафиолетового излучения и испытания на циклическое изменение температуры. Материал должен пройти эти испытания, чтобы подтвердить свою долгосрочную стабильность в условиях окружающей среды.

6.1.4.2 Конструкция из сплава вольфрамовой меди в токопроводящей контактной части разъединителя

Вольфрамово -медный сплав в токопроводящей контактной части разъединителя фокусируется на его работе в режиме изоляции без нагрузки. Токопроводящая контактная часть включает в себя подвижный контакт, статический контакт и соединительный вывод. Вольфрамово-медный сплав обычно изготавливается в соотношении WCu 70/30 или WCu 80/20, а высокоплотная структура формируется методом порошковой металлургии. При проектировании сплав обрабатывается в определенную форму, например, цилиндрический или пластинчатый контакт, а поверхность полируется для оптимизации площади контакта, снижения сопротивления и нагрева. Монтажная форма, как правило, болтовая или сварная, обеспечивает стабильное электрическое соединение с основным корпусом разъединителя. Некоторые конструкции также включают в себя пружинный механизм для поддержания постоянного контактного давления.

При проектировании также учитывается оптимизация микроструктуры. Вольфрамовая фаза обеспечивает высокую твёрдость и износостойкость, обеспечивая длительный механический контакт, а медная фаза – эффективную передачу тока. Стойкость сплава к дуговой эрозии играет важную роль в периодическом высоковольтном режиме работы, предотвращая абляцию поверхности. В конструкции может быть использована композитная структура с использованием сплава вольфрама и меди в качестве контактного слоя в сочетании с медной или алюминиевой подложкой для снижения стоимости и повышения общей проводимости. Обработка поверхности, такая как серебрение или нанесение покрытия, может повысить коррозионную стойкость и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проводимость, а также адаптироваться к условиям окружающей среды. При проектировании также необходимо учитывать согласование коэффициентов теплового расширения.

6.1.4.3 Требования к прочности и проводимости материалов заземлителей при воздействии тока короткого замыкания

Требования к прочности и проводимости материала заземлителя при воздействии токов короткого замыкания обусловлены его важнейшей защитной функцией в условиях короткого замыкания. Токи короткого замыкания могут достигать тысяч ампер, а мгновенно высвобождаемая энергия предъявляет чрезвычайно высокие требования к материалу. Во-первых, материал должен обладать превосходной механической прочностью, чтобы противостоять электромагнитной силе и ударной силе, вызванным током короткого замыкания, и предотвращать деформацию или разрушение контакта. Прочность также должна выдерживать механическое воздействие операции заземления для обеспечения стабильного контакта. Проводимость является основным требованием, и эффективная передача тока может быстро отводить энергию короткого замыкания в землю, снижая повреждение оборудования и риски для персонала. Материал также должен обладать высокой теплопроводностью, чтобы быстро рассеивать тепло короткого замыкания и предотвращать локальный перегрев, приводящий к плавлению или отказу.

Высокая термостойкость имеет решающее значение. Токи короткого замыкания могут вызывать высокотемпературные дуги, и материалы должны сохранять структурную целостность в экстремальных тепловых условиях. Стойкость к дуговой эрозии выдерживает многократные короткие замыкания и снижает поверхностную эрозию, которая влияет на срок службы. Коррозионная стойкость особенно важна для наружных заземляющих разъединителей, чтобы предотвратить влияние влаги или солевого тумана на проводимость. Твердость и ударная вязкость должны быть сбалансированы, при этом твердость должна выдерживать контактное давление, а ударная вязкость — поглощать энергию удара. Международные стандарты, такие как IEC 62271-102 и IEEE C37.41, устанавливают требования к испытаниям на прочность и проводимость для материалов заземляющих разъединителей, включая испытания на устойчивость к коротким замыканиям и оценку термической стабильности. Сплав вольфрамовой меди отвечает этим требованиям благодаря своей высокой прочности и проводимости, и в будущем характеристики могут быть улучшены за счет оптимизации соотношения легирующих элементов.

6.1.4.4 Механизм из вольфрамово-медного сплава для обеспечения безопасной работы заземлителя

вольфрама с медью, обеспечивающий безопасную работу заземлителей, основан на его комплексных эксплуатационных характеристиках в условиях короткого замыкания. Этот механизм, прежде всего, отражается в высокой проводимости. Медная фаза обеспечивает непрерывный путь тока, быстро отводит энергию короткого замыкания в землю, снижает напряжение в системе и защищает оборудование. Высокая температура плавления и стойкость к дуговой эрозии вольфрамовой фазы поглощают энергию под действием дуги короткого замыкания,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предотвращают плавление контакта или его сильную абляцию, а также обеспечивают надежность заземляющего контакта. Микроструктура сплава оптимизирована с помощью вакуумной инфильтрации или процесса порошковой металлургии. Плотность снижает пористость, повышает ударопрочность и термическую стабильность, а также выдерживает мгновенную нагрузку тока короткого замыкания.

Механизм механической прочности и вязкости поддерживает механическое действие операции заземления. Фаза вольфрама обеспечивает твердость, чтобы противостоять электромагнитным силам, а фаза меди повышает пластичность, поглощает энергию удара и предотвращает распространение трещин. Механизм теплопроводности быстро рассеивает тепло короткого замыкания, снижает локальную температуру и защищает окружающие компоненты. Механизм коррозионной стойкости противостоит эрозии окружающей среды благодаря химической стабильности вольфрама, а поверхностная обработка фазы меди дополнительно повышает атмосферостойкость. В приложениях сплавы вольфрама и меди часто изготавливаются в контактах или разъемах, спроектированных как многослойные структуры. Слой с высоким содержанием вольфрама противостоит дуге, а слой с высоким содержанием меди оптимизирует проводимость. В сочетании с дугой или сегментированной структурой заземлителя дуга гаснет быстрее. В будущем интеллектуальный мониторинг может быть использован для оценки характеристик сплава в режиме реального времени и повышения безопасности.

6.1.4.5 Критерии выбора вольфрамово -медного сплава для разъединителей и заземлителей

вольфрамовой меди для разъединителей и заземлителей выбираются на основе комплексной оценки требований к применению и условий окружающей среды. В первую очередь, основным критерием является электропроводность. Сплав должен обеспечивать эффективную передачу тока. Содержание меди обычно составляет от 20% до 40%. Распространены сплавы WCu 70/30 или WCu 80/20. Другим критерием являются высокая термостойкость и стойкость к дуговой эрозии. Высоковольтные условия и условия короткого замыкания требуют более высокого содержания вольфрама, например, WCu 90/10, а процесс изготовления должен обеспечивать оптимальную плотность. Механическая прочность и износостойкость требуют, чтобы сплав имел мелкозернистую структуру и низкую пористость для обеспечения механической прочности и длительного срока службы.

Коррозионная стойкость и атмосферостойкость являются важными факторами при выборе. Для использования на открытом воздухе следует выбирать сплавы с обработкой поверхности или улучшенным покрытием. Коэффициент теплового расширения должен соответствовать характеристикам подложки для снижения термических напряжений. Стоимость и технологичность также влияют на выбор. Для сложных деталей приоритет может отдаваться порошковой металлургии, а в условиях ограниченных затрат могут использоваться композитные конструкции. Международные стандарты, такие как IEC 62271-102, и отраслевые спецификации предоставляют эталонные характеристики, поэтому выбор должен быть подтвержден испытаниями на атмосферостойкость, устойчивость к коротким замыканиям и проводимость.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Применение сплава вольфрам-медь в области электроники

Вольфрамово-медный сплав широко используется в области электроники, особенно в сценариях, требующих высокоточной обработки и эффективного терморегулирования. Область электроники охватывает электроды для электроискровой обработки (EDM), радиаторы для электронных корпусов и разъемы высокочастотных схем. Вольфрамово-медный сплав отвечает требованиям прецизионного производства и терморегулирования благодаря высокой износостойкости вольфрама и высокой проводимости меди. В электроэрозионной обработке сплав используется в качестве материала электрода для эффективного удаления материала заготовки при сохранении длительного срока службы. В электронной упаковке его низкий коэффициент теплового расширения и теплопроводность способствуют рассеиванию тепла высокоплотных интегральных схем. В высокочастотных приложениях проводимость сплава обеспечивает стабильность передачи сигнала. В этом разделе будут глубоко проанализированы требования к производительности электродов EDM и преимущества вольфрамово-медного сплава.

6.2.1 Требования к эксплуатационным характеристикам электроэрозионных электродов и преимущества сплава вольфрам-медь

Требования к эксплуатационным характеристикам электродов для электроэрозионной обработки тесно связаны с преимуществами сплавов вольфрама и меди. Комплексные характеристики этого сплава позволяют ему занимать важное место в высокоточной обработке. Электроэрозионная обработка предполагает удаление материала заготовки посредством электрического искрового разряда, что предъявляет высокие требования к электропроводности, износостойкости и термостойкости электродных материалов. Сплав вольфрама и меди идеально соответствует этим требованиям благодаря высокой твердости вольфрама и высокой электропроводности меди. Соотношения WCu 70/30 и WCu 80/20 являются распространенным выбором, обеспечивающим баланс между проводимостью и износостойкостью соответственно. Микроструктура сплава оптимизируется методами порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации для обеспечения низкой пористости и равномерного распределения фаз, повышения точности обработки и срока службы. В этом разделе подробно рассматриваются требования к показателям эффективности электродных материалов для электроэрозионной обработки, требования к различиям в характеристиках электродов в различных условиях обработки, анализ адаптивности вольфрамово-медных сплавов с точки зрения проводимости и износостойкости, сравнение эксплуатационных преимуществ по сравнению с традиционными электродными материалами, а также критерии выбора электродов из вольфрамово-медных сплавов для электроэрозионного оборудования.

6.2.1.1 Требования к показателям эффективности электродных материалов для процесса электроэрозионной обработки

Требования к рабочим характеристикам электродного материала в процессе электроэрозионной обработки обусловлены его уникальным принципом удаления материала заготовки посредством

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электрического искрового разряда, который включает в себя множество ключевых свойств. Прежде всего, материал должен обладать отличной проводимостью для обеспечения эффективной передачи тока, создания стабильного искрового разряда и снижения потерь энергии и неравномерности во время обработки. Электропроводность напрямую влияет на эффективность разряда, особенно при точной обработке, где электроды должны обеспечивать путь с низким сопротивлением. Теплопроводность является еще одним основным показателем. Хорошая способность рассеивания тепла позволяет быстро отводить тепло, выделяемое разрядом, наружу электрода, предотвращая локальный перегрев, приводящий к деформации электрода или ожогам на поверхности заготовки. Износостойкость является ключевым требованием. Разряд между электродом и заготовкой во время электроэрозионной обработки приведет к потере материала.

Не менее важна стойкость к дуговой эрозии. Частые разряды могут вызвать абляцию или перенос материала на поверхности электрода. Материал должен выдерживать воздействие высокоэнергетических дуг без быстрого разрушения. Высокая термостойкость имеет решающее значение. Локальная высокая температура в момент разряда может достигать тысяч градусов. Материал должен сохранять структурную целостность в экстремальных температурных условиях, предотвращая плавление и растрескивание. Также необходимо учитывать механическую прочность и технологичность. Электрод должен выдерживать механическое зажимное и технологическое давление, обеспечивая при этом прецизионную резку сложных форм, таких как глубокие отверстия или мелкие детали. Коррозионная стойкость особенно важна при обработке некоторых химически активных заготовок. Для предотвращения повреждения поверхности электрода или загрязнения поверхности заготовки. Для обеспечения точности обработки электрод должен обладать низкой пористостью и однородной микроструктурой, что обеспечивает равномерность разряда и предотвращает дефекты обработки. Международные стандарты, такие как ISO 14132 и JIS B 6402, устанавливают контрольные показатели эффективности материалов для электродов электроэрозионной обработки, включая испытания на проводимость, износостойкость и оценку термостойкости. Сплавы вольфрама и меди отвечают этим требованиям благодаря своему комплексу свойств и стали предпочтительным материалом для электроэрозионной обработки.

6.2.1.2 Различные требования к характеристикам электродов в различных сценариях обработки

Различные требования к характеристикам электрода в различных сценариях обработки отражают разнообразные требования к материалам заготовки, точности и эффективности обработки и напрямую влияют на соотношение и форму применения сплава вольфрама с медью. В сценариях прецизионной резки, таких как обработка пресс-форм, микрошестерен или прецизионных электронных компонентов, электрод должен иметь чрезвычайно высокую точность обработки и качество поверхности, а также требовать низкой пористости и мелкозернистой структуры для обеспечения равномерности разряда. Проводимость должна быть стабильной для поддержки точного управления током, а износостойкость должна быть превосходной для снижения потерь электрода и продления срока службы. Обычно используемое соотношение WCu 70/30 имеет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

умеренную долю фазы меди, что обеспечивает проводимость и поддерживает определенную износостойкость. В сценариях грубой обработки, таких как удаление больших объемов материала или открытие грубых полостей пресс-форм, подчеркиваются эффективный разряд и быстрое удаление материала. Проводимость и стойкость к высоким температурам более важны, а требования к износостойкости относительно низкие. Соотношение WCu 60/40 может быть выбрано для повышения проводимости и ускорения обработки.

При обработке материалов с высокой температурой плавления или высокой твердостью (таких как вольфрамовая сталь, карбид вольфрама или титановый сплав) электрод должен обладать более высокой стойкостью к высоким температурам и дуговой эрозии. Более подходящими являются сплавы WCu 80/20 или сплавы с более высоким содержанием вольфрама. Теплопроводность также должна быть улучшена для рассеивания высокоэнергетического тепла и уменьшения зоны термического влияния заготовки. В сценариях обработки глубоких отверстий или сложной геометрии электрод должен обладать хорошей механической прочностью и технологичностью, поддерживать тонкие конструкции или сложные формы, а износостойкость и коррозионная стойкость должны поддерживать многократное использование. Часто используется соотношение WCu 70/30 в сочетании с процессом полировки поверхности. При обработке непроводящих материалов (таких как керамика) требуется конструкция вспомогательного электрода, а требования к проводимости согласуются со вспомогательными материалами. Может быть выбран WCu 60/40 с высоким содержанием меди. Различные сценарии также включают скорость обработки и стоимость. Прецизионная резка, как правило, предполагает использование высокоточных и прочных материалов, а черновая обработка, как правило, экономична и эффективна. В будущем соотношение легирующих элементов и параметры процесса можно будет динамически корректировать для адаптации к различным требованиям обработки и дальнейшего повышения производительности электродов.

6.2.1.3 Анализ совместимости сплава вольфрам-медь по проводимости и износостойкости

Анализ совместимости сплава вольфрама с медью с точки зрения проводимости и износостойкости отражает его уникальные преимущества в качестве электрода для электроэрозионной обработки. Проводимость в основном обеспечивается медной фазой. Высокая проводимость меди обеспечивает эффективную передачу тока, создает стабильный электрический искровой разряд, снижает потери энергии и неравномерность во время обработки. Микроструктура сплава оптимизирована с помощью порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации. Непрерывная сетка медной фазы снижает сопротивление и повышает равномерность разряда. Соотношения WCu 70/30 и WCu 60/40 показывают хорошие показатели проводимости и подходят для сценариев, требующих высокоэффективной обработки. Теплопроводность и электропроводность дополняют друг друга. Высокая теплопроводность медной фазы быстро передает тепло разряда на внешнюю сторону электрода, снижает локальную температуру и предотвращает деформацию или растрескивание, особенно при прецизионной резке. Износостойкость в основном обеспечивается вольфрамовой фазой, чья высокая твердость и противоизносные свойства противостоят потере материала, вызванной искровым разрядом.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Мелкое зерно и структура с низкой пористостью повышают стабильность поверхности и уменьшают износ и эрозию электрода, особенно при высокоэнергетической обработке. Высокая термостойкость вольфрамовой фазы поддерживает высокоэнергетический разряд. WCu 80/20 демонстрирует лучшие показатели износостойкости и стойкости к дуговой эрозии и подходит для обработки материалов высокой твердости. Интерфейсная связь между вольфрамом и медью достигается за счет оптимизации процесса, что снижает риск отслоения и сохраняет долговременную износостойкость. Анализ совместимости показывает, что сплав вольфрама и меди может достичь баланса между проводимостью и износостойкостью путем регулирования соотношения вольфрама и меди. WCu 70/30 — это общий выбор, учитывающий обе характеристики, в то время как WCu 80/20 больше подходит для случаев, когда требуются высокие требования к износостойкости.

6.2.1.4 Преимущества по сравнению с традиционными электродными материалами

По сравнению с традиционными электродными материалами, такими как чистая медь, чистый вольфрам и графит, сплав вольфрама и меди показывает значительное превосходство в сравнении преимуществ производительности. Во-первых, по сравнению с чистой медью, сплав вольфрама и меди обладает более высокой устойчивостью к высокой температуре и дуговой эрозии. Чистая медь легко плавится или деформируется при высокоэнергетическом разряде, в то время как вольфрамовая фаза сплава вольфрама и меди улучшает термическую стабильность и продлевает срок службы электрода. С точки зрения проводимости чистая медь немного лучше, но сплав вольфрама и меди приближается к ее уровню за счет оптимизации распределения фазы меди. Он также обладает износостойкостью и снижает потери, что особенно заметно при длительной обработке. По сравнению с чистым вольфрамом, электропроводность и теплопроводность сплава вольфрама и меди значительно улучшены. Низкая электропроводность чистого вольфрама ограничивает эффективность разряда, в то время как медная фаза сплава вольфрама и меди компенсирует этот недостаток и подходит для эффективной обработки.

По сравнению с графитовыми электродами, сплав вольфрама и меди обладает лучшей механической прочностью и износостойкостью. Графит легко ломается или изнашивается во время обработки сложной формы, в то время как сплав вольфрама и меди поддерживает прецизионную резку и обработку глубоких отверстий, а также имеет более высокую точность обработки. Графит обладает высокой проводимостью, но его устойчивость к высоким температурам и дуговой эрозии не так хороша, как сплав вольфрама и меди. Он имеет большие потери при обработке материалов с высокой твердостью и плохой шероховатостью поверхности. Низкая пористость и однородная микроструктура сплава вольфрама и меди обеспечивают однородность обработки, в то время как графит может вызвать неравномерный разряд из-за своей пористости. Комплексное сравнение, сплав вольфрама и меди обладает преимуществами в долговечности, точности и адаптивности к различным сценариям, особенно в требованиях к высокой точности, длительному сроку службы и сложной обработке, традиционные материалы, такие как чистая медь, чистый вольфрам и графит, трудно сравнить.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.1.5 Критерии выбора электродов из сплава вольфрама и меди для электроэрозионного оборудования общего назначения

Электроды из сплава вольфрама и меди в обычном электроэрозионном оборудовании выбираются на основе комплексной оценки характеристик оборудования и требований к обработке, что напрямую влияет на качество и эффективность обработки. В первую очередь, основным стандартом является проводимость. Сплав должен соответствовать параметрам разряда оборудования. Соотношение WCu 60/40 к WCu 80/20 выбирается в соответствии с силой тока и точностью обработки. Проводимость должна быть совместима с системой питания для обеспечения стабильного разряда. Износостойкость и стойкость к дуговой эрозии являются ключевыми факторами. Обработка материалов высокой твердости или высокоэнергетических сценариев требует более высокого содержания вольфрама. Более подходящим является WCu 80/20 или WCu 90/10.

Механическая прочность и обрабатываемость влияют на формирование электродов. Для сложных форм или тонких конструкций требуются сплавы, легко поддающиеся резке, а шероховатость поверхности должна соответствовать точности обработки. Для баланса этих двух аспектов часто используется сплав WCu 70/30. Коррозионная стойкость важна при обработке химических активных деталей, поэтому при выборе сплава можно использовать гальванопокрытие или другие виды покрытия. Также необходимо учитывать стоимость и доступность. Сплав WCu 70/30 — экономичный выбор, подходящий для общей обработки. Высококласное оборудование может использовать высокое содержание вольфрама для удовлетворения высоких требований к долговечности. Производители оборудования предоставляют технические рекомендации, и выбор должен быть подтвержден испытаниями на износостойкость, проверкой проводимости и испытаниями на обработку.

6.2.2 Роль в области микроэлектроники

В области микроэлектроники предъявляются чрезвычайно строгие требования к характеристикам материалов. Необходима хорошая электро- и теплопроводность для эффективной передачи электронных сигналов и тепла, а также подходящий коэффициент теплового расширения для соответствия основным компонентам, таким как микросхемы. Кроме того, материал должен обладать определённой структурной прочностью для обеспечения точной упаковки. Благодаря уникальному сочетанию свойств, сплав вольфрама и меди играет важную роль в этой области и стал ключевым материалом для соединения основных устройств с внешними цепями и решения проблем рассеивания тепла.

6.2.2.1 Требования к точности и стабильности материалов для микроэлектронных приборов

Требования к точности и стабильности материалов, предъявляемые к микроэлектронным устройствам, обусловлены их высокой интеграцией и малыми размерами, что напрямую влияет на производительность и надежность устройств. Прежде всего, точность требует от материала

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

исключительно высокой точности размеров и плоскостности поверхности. Микроэлектронные устройства, такие как чипы и датчики, обычно имеют микронный или нанометровый уровень. Материал должен обладать низкой шероховатостью и однородностью благодаря прецизионной обработке для обеспечения однородности электрического соединения и теплопроводности. Электропроводность является ключевым показателем. Материал должен обеспечивать низкое сопротивление для высокоскоростной передачи сигнала и предотвращения затухания или помех. Теплопроводность не менее важна. Эффективное рассеивание тепла может снизить рабочую температуру чипа и предотвратить ухудшение производительности или отказ из-за перегрева.

Стабильность требует, чтобы материал сохранял стабильные характеристики при длительной эксплуатации, а высокая термостойкость является основой. Рабочая температура чипа может достигать более 150 °C, и материал не должен терять форму или окисляться при высоких температурах. Усталостная стойкость и механическая стабильность выдерживают частые тепловые циклы и механические напряжения, предотвращая образование микротрещин или межслоевое расслоение. Низкий коэффициент теплового расширения является важным требованием, соответствующим тепловому расширению материалов на основе кремния (таких как подложки чипов), чтобы уменьшить коробление или разрушение, вызванное тепловым напряжением. Коррозионная стойкость и химическая стабильность особенно важны во влажных или кислых средах, чтобы предотвратить деградацию материала, влияющую на срок службы устройства. Международные стандарты, такие как JEDEC JESD22 и IPC-6012, установили эталонные показатели производительности для микроэлектронных материалов, включая испытания на термоциклирование и оценку надежности. Сплавы вольфрама и меди отвечают этим требованиям благодаря своим комплексным характеристикам и стали предпочтительным материалом в области микроэлектроники.

6.2.2.2 Применение сплава вольфрамовой меди в микроэлектронных корпусах

сплав вольфрамовой меди принимает различные формы в зависимости от типа корпуса и требований к тепловому управлению. Одной из распространенных форм является изготовление из сплава вольфрамовой меди подложки для теплоотвода, которая непосредственно используется для корпуса чипа. Соотношение WCu 85/15 или WCu 90/10 изготавливается методом порошковой металлургии, толщина обычно составляет от 0,5 мм до 2 мм, а поверхность полируется для оптимизации теплового контакта. Другая форма — композитная структура, в которой сплав вольфрамовой меди используется в качестве слоя теплоотвода в сочетании с керамической (например, AlN) или металлической (например, Cu-Mo) подложкой и интегрированы с помощью диффузионной сварки или прессовой посадки для балансировки теплового расширения и теплопроводности. В применении сплав также может быть обработан в сложные формы, такие как теплоотводы с микроканалами, для удовлетворения потребностей корпуса с высокой плотностью.

Монтажная форма в основном фиксируется склеиванием или болтовым соединением для обеспечения плотного контакта с кристаллом или оболочкой корпуса. Обработка поверхности,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

такая как никелирование или золочение, может улучшить коррозионную стойкость и свариваемость, а также адаптироваться к различным процессам упаковки. В некоторых высокопроизводительных приложениях сплав вольфрама с медью разрабатывается как функциональный градиентный материал, и содержание вольфрама уменьшается от подложки к поверхности для оптимизации теплового согласования и проводимости с кристаллом. В корпусировании сплав также используется для выводных рамок или межсоединений, а соотношение WCu 70/30 способствует передаче сигнала и рассеиванию тепла. Форма приложения в полной мере использует низкое тепловое расширение и теплопроводность сплава вольфрама с медью для удовлетворения высоких требований к точности и надежности микроэлектронной упаковки. В будущем более сложные формы приложения могут быть разработаны с помощью технологии 3D-печати.

6.2.2.3 Механизмы повышения эффективности теплоотвода и срока службы микроэлектронных приборов

вольфрамовой меди повышает эффективность теплоотвода и увеличивает срок службы микроэлектронных устройств благодаря превосходному тепловому регулированию и структурной стабильности. Во-первых, высокая теплопроводность сплава быстро отводит тепло, генерируемое кристаллом, к поверхности теплоотвода, снижая рабочую температуру и предотвращая ухудшение производительности, вызванное накоплением термических напряжений. Низкий коэффициент теплового расширения, соответствующий материалу на основе кремния, уменьшает деформацию и растрескивание при термоциклировании и повышает механическую стабильность структуры корпуса. Высокая температура плавления и высокая термостойкость вольфрамовой фазы позволяют кристаллу работать при температуре выше 150 °C и предотвращают деградацию материала.

Оптимизация микроструктуры уменьшает количество пор и дефектов, улучшает непрерывность теплопроводности, а соотношение WCu 85/15 обеспечивает выдающуюся эффективность теплоотвода. Равномерное распределение фаз снижает тепловое сопротивление, медная фаза обеспечивает эффективное теплоотвод, а вольфрамовая фаза поддерживает структурную целостность. Устойчивость к коррозии и окислению защищает сплав от воздействия влаги и химических веществ, продлевая срок службы. Эффективность теплоотвода вольфрамово-медного сплава в приложениях снижает локализацию тепла, замедляет старение кристалла и увеличивает срок службы с тысяч часов для традиционных материалов до более чем 10 000 часов, особенно в высокопроизводительных вычислительных системах и устройствах 5G.

6.2.2.4 Конструкция монтажной конструкции в модуле корпуса микросхемы

Конструкция монтажной конструкции в модуле корпуса микросхемы должна в полной мере использовать характеристики сплава вольфрамовой меди для оптимизации теплоотвода и электрических соединений. В конструкции сплав вольфрамовой меди часто используется в качестве теплорассеивающей подложки, размещаемой под микросхемой и контактирующей с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нижней частью микросхемы через термоинтерфейсные материалы (например, термопасту), что обеспечивает эффективную теплопроводность. Способ монтажа в основном болтовой или клеевой. Толщина подложки выбирается в зависимости от мощности микросхемы и обычно составляет от 0,5 мм до 1,5 мм. Конструкция также включает микроканальную или ребристую структуру для увеличения площади рассеивания тепла. Соотношение WCu 90/10 поддерживает микросхемы высокой мощности, а поверхностное покрытие улучшает свариваемость.

В конструкции электрических соединений используется сплав вольфрамовой меди для выводных рамок и межсоединений. Соотношение WCu 70/30 достигается запрессовкой или сваркой и стыкуется с контактной площадкой кристалла для обеспечения низкого сопротивления. Конструкция учитывает согласование теплового расширения, а конструкция с низким термическим напряжением из сплава вольфрамовой меди и керамической или кремниевой подложки предотвращает деформацию корпуса. Место установки также включает вспомогательный слой рассеивания тепла в сочетании с системой воздушного или жидкостного охлаждения для оптимизации пути теплового потока. Необходимо проверить тепловые напряжения и механическую стабильность конструкции с помощью конечноэлементного анализа, а международные стандарты, такие как JEDEC JESD51, содержат рекомендации по управлению тепловым режимом.

6.2.2.5 Требования к чистоте и микроструктуре сплавов вольфрам-медь в области микроэлектроники

Требования к чистоте и микроструктуре сплавов вольфрама и меди в области микроэлектроники обусловлены необходимостью высокой точности и надежности. Прежде всего, требования к чистоте чрезвычайно высоки, а содержание примесей вольфрама и меди должно быть менее 0,1% во избежание снижения проводимости или затруднения теплопроводности. Содержание кислорода должно контролироваться на низком уровне, чтобы предотвратить образование оксидов, влияющих на микроструктуру. Чистота также подразумевает контроль микроэлементов. Например, легирование железом или кремнием может привести к ослаблению границ зерен, что должно быть обеспечено использованием высокочистого сырья и вакуумных процессов.

Международные стандарты, такие как ASTM B702, устанавливают требования к составу высокочистых сплавов вольфрама и меди. Микроструктура требует равномерного распределения фаз. Размер частиц вольфрама и меди должен быть в диапазоне 5–20 микрон. Мелкое зерно повышает механическую прочность и теплопроводность. Пористость должна быть менее 1% для обеспечения непрерывности теплопроводности и электрических свойств. Склеивание на границе раздела должно быть плотным для снижения риска отслоения. Оптимизация микроструктуры с использованием сплава WCu 85/15 часто используется в случаях с высоким спросом. Микродефекты, такие как трещины или несмачиваемые области, необходимо проверять с помощью сканирующей электронной микроскопии. Процессы подготовки, такие как горячее изостатическое прессование (ГИП), могут улучшить структурную однородность. В будущем

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чистота и микрокачество могут быть дополнительно улучшены с помощью нанотехнологий или процессов фазированных решеток.

6.2.3 Применение в области датчиков

Датчики, являясь основным устройством для получения информации об окружающей среде, часто работают в сложных условиях, таких как высокотемпературные промышленные объекты, влажные помещения или механические системы, подверженные вибрации и ударам, что предъявляет высокие требования к стабильности, адаптивности и функциональности материалов датчиков. Сплав вольфрамовой меди постепенно доказал свою эффективность в области датчиков благодаря высокой термостойкости, вибростойкости, хорошей теплопроводности и структурной стабильности, став важным материалом для повышения надежности датчиков.

6.2.3.1 Требования к характеристикам материалов для рабочей среды датчика

Требования к рабочим характеристикам материала в рабочей среде датчика различаются из-за разнообразных сценариев применения, что напрямую влияет на точность и срок службы датчика. Прежде всего, ключевым требованием является высокая термостойкость. Многие датчики, такие как высокотемпературные датчики давления или термопары, должны работать в средах выше 200 °C - 1000 °C. Материал должен сохранять структурную стабильность и проводимость, чтобы предотвратить ухудшение характеристик из-за термической деформации или окисления. Устойчивость к коррозии является еще одним основным требованием. Датчики часто подвергаются воздействию кислотных, щелочных или влажных сред, таких как химические или морские применения. Материал должен быть устойчив к химической эрозии, чтобы предотвратить ухудшение поверхности, влияющее на точность измерений. Механическая прочность и износостойкость обеспечивают долгосрочное использование датчиков в условиях вибрации или механических нагрузок, предотвращая износ или поломку компонентов, особенно в промышленном оборудовании.

Электропроводность имеет решающее значение для датчиков электрических сигналов (таких как резистивные или емкостные датчики). Материал должен обеспечивать путь с низким сопротивлением для обеспечения точности и стабильности передачи сигнала. Теплопроводность важна для высокотемпературных или высокомоощных датчиков. Эффективное рассеивание тепла снижает рабочие температуры и защищает чувствительные компоненты. Низкий коэффициент теплового расширения соответствует подложке, снижает концентрацию напряжений во время тепловых циклов и повышает структурную целостность. Стойкость к дуговой эрозии требуется в высоковольтных датчиках для предотвращения повреждения от искр. Обрабатываемость и точность размеров требуют, чтобы материал легко поддавался точной резке для соответствия требованиям к структуре на микронном уровне для микродатчиков (таких как MEMS). Международные стандарты, такие как IEC 60751 и ASTM E1137, установили эталонные характеристики для материалов датчиков, включая испытания на термостойкость и оценку

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

надежности. Сплав вольфрамовой меди стал предпочтительным материалом в области датчиков из-за его комплексных характеристик, отвечающих этим требованиям.

6.2.3.2 Потенциальные возможности применения сплава вольфрама и меди в чувствительных элементах датчиков

Вольфрамово- медный сплав в чувствительных элементах датчиков варьируется в зависимости от типа датчика и функциональных требований. Одним из возможных вариантов является изготовление из него чувствительного элемента резистивного датчика температуры. Сплав WCu с соотношением 70/30 изготавливается методом порошковой металлургии и перерабатывается в тонкую пленку или нить, используя высокую проводимость медной фазы и стабильность вольфрамовой фазы для точного измерения изменений температуры. Другой вариант – использование его в диафрагмах или контактах датчиков давления. Соотношение WCu 85/15 оптимизировано методом вакуумной инфильтрации, толщина слоя составляет от 0,1 до 0,5 мм, а полировка поверхности обеспечивает надежный контакт, что способствует обнаружению деформаций в условиях высокого давления.

В датчиках перемещения или ускорения в качестве электродов или разъемов может использоваться сплав вольфрамовой меди. Соотношение WCu 60/40 интегрируется путем прессования или сварки, сочетая высокую проводимость и механическую прочность для удовлетворения потребностей в динамических измерениях. Потенциальные области применения также включают нагревательные элементы для газовых датчиков. Сплав перерабатывается в микронагревательные пластины. Соотношение WCu 80/20 поддерживает высокую температурную стабильность, а поверхностное покрытие повышает коррозионную стойкость. Форма установки в основном использует склеивание или микросварку, которая тесно интегрирована с подложкой датчика. Конструкция может иметь многослойную структуру с внутренним слоем с высоким содержанием вольфрама для повышения долговечности и внешним слоем с высоким содержанием меди для оптимизации проводимости. Эти формы применения в полной мере используют характеристики сплавов вольфрамовой меди для удовлетворения требований высокой точности и надежности чувствительных компонентов. В будущем с помощью технологии 3D-печати можно будет разрабатывать более сложные структуры приложений.

6.2.3.3 Применение компонентов теплоотвода датчиков на основе высокой теплопроводности

Применение компонентов теплоотвода датчиков, основанных на высокой теплопроводности, направлено на использование возможностей терморегулирования сплава вольфрамовой меди для повышения производительности и срока службы датчиков в условиях высоких температур. В конструкции сплав вольфрамовой меди часто используется в качестве теплоотводящей подложки, помещаемой под чувствительный элемент датчика. Сплав WCu 85/15 или WCu 90/10 изготавливается методом порошковой металлургии, имеет толщину от 1 до 3 мм и плоскостность поверхности более 5 мкм для обеспечения плотного контакта с чувствительным элементом.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Конструкция также включает микроканалы или рёбра для увеличения площади теплоотвода, быстрой передачи тепла внешнему радиатору или окружающему воздуху и снижения температуры чувствительного элемента.

Метод крепления - болтовое крепление или теплопроводящее соединение, интегрированное с корпусом датчика или системой воздушного охлаждения, а материал теплопроводящего интерфейса (например, теплопроводящая прокладка) оптимизирует контактное тепловое сопротивление. Низкий коэффициент теплового расширения (около $7 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$) разработан для соответствия кремниевой или керамической подложке, снижая напряжение при термоциклировании и предотвращая растрескивание корпуса. Компонент рассеивания тепла может быть объединен с активной системой охлаждения (например, микровентилятором). Соотношение WCu 70/30 выгодно в легких сценариях, а никелирование поверхности повышает коррозионную стойкость. В приложениях эффективность рассеивания тепла значительно снижает рабочую температуру чувствительных компонентов и продлевает их срок службы, особенно в высокотемпературных датчиках давления или инфракрасных датчиках. Проектирование должно проверять распределение теплового потока с помощью теплового моделирования, а международные стандарты, такие как JEDEC JESD51, содержат рекомендации по управлению тепловым режимом. В будущем для оптимизации рассеивания тепла и структурного баланса может быть использована конструкция с функциональным градиентом.

6.3 Применение сплава вольфрам-медь в аэрокосмической отрасли

В аэрокосмической отрасли предъявляются очень строгие требования к допускам материалов. Материалы должны выдерживать воздействие экстремально высоких температур, высокого давления и высокоскоростного воздушного потока, обеспечивая при этом структурную стабильность и надёжное функционирование. Вольфрамово-медный сплав стал основным материалом для многих ключевых компонентов в этой области благодаря высокой температуре плавления и прочности вольфрама, а также высокой теплопроводности и стойкости к тепловым ударам меди. В таких областях, как твердотопливные ракеты, тепловая защита космических аппаратов и компоненты спутников, его характеристики «баланса между высокой термостойкостью и теплопроводностью» и «сочетание прочности и ударопрочности» используются в полной мере. Среди них, облицовка сопла твердотопливных ракетных двигателей является одним из наиболее показательных применений.

6.3.1 Применение облицовки сопла твердотопливного ракетного двигателя

Горловая часть сопла твердотопливного ракетного двигателя – это «горловая» часть сопла ракетного двигателя, которая отвечает за направление высокотемпературного газа для его выброса с высокой скоростью для создания тяги. Её характеристики напрямую определяют эффективность тяги и безопасность запуска ракеты. В связи с чрезвычайно сложными условиями эксплуатации, к материалу предъявляются исключительно высокие комплексные требования к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

эксплуатационным характеристикам. Сплав вольфрам-медь стал идеальным материалом для этого компонента благодаря оптимизации характеристик и адаптации процесса.

6.3.1.1 Рабочая среда сопла твердотопливного ракетного двигателя

Рабочие условия в сопле твердотопливного ракетного двигателя можно описать как «материальное чистилище», и оно должно выдерживать одновременное воздействие множества экстремальных условий. После зажигания ракеты высокотемпературный газ, образующийся при сгорании твердого топлива, протекает через сопло со сверхзвуковой скоростью. Температура газа может достигать тысяч градусов Цельсия, чего достаточно для мгновенного расплавления большинства металлов; твердые частицы, переносимые высокоскоростным потоком воздуха, ударяются о поверхность сопла с чрезвычайно высокой скоростью, создавая непрерывный эффект «пескоструйной обработки», непрерывно изнашивая поверхность материала; окислительный газ и коррозионные частицы, содержащиеся в газе, вступают в химическую реакцию с поверхностью сопла, что еще больше усугубляет потерю материала; что еще более серьезно, за короткий промежуток времени от зажигания до выключения двигателя температура сопла резко повышается от комнатной до высокой, а затем быстро остывает. Резкие перепады температур создают сильные термические напряжения, которые могут легко привести к растрескиванию материала.

6.3.1.2 Требования к свойствам материалов облицовки горловины сопла

Рабочая среда вкладыша горловины сопла определяет, что требования к его эксплуатационным характеристикам для материала должны быть всеобъемлющими и строгими. Во-первых, материал должен обладать чрезвычайно высокой термостойкостью, не плавиться и не деформироваться при высоких температурах в тысячи градусов Цельсия и быть способным сохранять структурную целостность; во-вторых, он должен обладать превосходной стойкостью к эрозии и износу, быть способным противостоять непрерывному воздействию высокоскоростного воздушного потока и частиц, а также уменьшать потери поверхности; в-третьих, теплопроводность должна быть превосходной, а тепло, поглощенное поверхностью, должно быстро отводиться, чтобы избежать локального перегрева и абляции; в то же время, необходима стойкость к тепловому удару - при внезапном повышении и понижении температуры это может уменьшить возникновение термических напряжений и избежать появления трещин; наконец, материал должен обладать достаточной структурной прочностью и не ломаться и не разрушаться под воздействием газа высокого давления.

6.3.1.3 Характеристики сплава вольфрамовой меди, отвечающие требованиям к футеровке горловины сопла

Сплав вольфрама и меди точно соответствует требованиям к облицовке сопла, а его основное преимущество заключается в «синергетическом взаимодополнении вольфрама и меди». Высокая температура плавления вольфрама позволяет сплаву сохранять стабильность в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотемпературном газе. Даже при воздействии на поверхность экстремально высоких температур, каркас, образованный вольфрамовой фазой, не плавится, непосредственно сопротивляясь «высокотемпературному горению»; высокая прочность и твёрдость вольфрама придают сплаву превосходную противозерозионную способность, что позволяет ему выдерживать удары высокоскоростных частиц, снижать износ поверхности и справляться с «высокоскоростной эрозией»; высокая теплопроводность меди играет ключевую роль — она способна быстро отводить тепло от поверхности облицовки сопла во внутреннюю полость или систему охлаждения, предотвращая абляцию, вызванную локальным накоплением тепла, и решая проблему «накопления тепла». В то же время пластичность меди позволяет снизить термические напряжения, вызванные резкими перепадами температур, снизить риск хрупкого растрескивания вольфрамового каркаса и повысить стойкость к тепловому удару; кроме того, после обработки сплава вольфрама с медью методом уплотнения прочность конструкции достаточна для того, чтобы выдерживать воздействие газа высокого давления и обеспечивать стабильность формы облицовки горловины.

6.3.1.4 Процесс формовки и структурная конструкция вольфрамово-медного сплава для облицовки горловины сопла

Вольфрамово-медный сплав для облицовки горловины сопла требует точного процесса формования и структурного проектирования для максимального повышения производительности. Процесс формования основан на порошковой металлургии: сначала вольфрамовый и медный порошки смешиваются в определённой пропорции и прессуются в форме, формируя исходную форму облицовки горловины (сырую заготовку); затем частицы вольфрама соединяются посредством высокотемпературного спекания для формирования непрерывного каркаса, после чего медь заполняет поры каркаса методом инфильтрации, обеспечивая плотность материала.

Структурная конструкция ориентирована на «функциональную адаптацию»: поверхность вкладыша горловины имеет дугообразную форму, чтобы соответствовать траектории газового потока и уменьшить локальный износ, вызванный воздействием воздушного потока; некоторые вкладыши горловины имеют небольшие охлаждающие каналы внутри, что в сочетании с высокой теплопроводностью меди позволяет быстро отводить тепло через охлаждающую среду; в месте соединения с другими частями сопла используется ступенчатая уплотнительная структура, чтобы избежать утечки высокотемпературного газа; в то же время толщина вкладыша горловины регулируется в соответствии с распределением силы - область с наиболее сильным воздействием газа соответствующим образом утолщена для обеспечения прочности и снижения отходов материала.

6.3.1.5 Повышение срока службы футеровки горловины сопла после использования сплава вольфрамовой меди

По сравнению с традиционными материалами (такими как чистый вольфрам, керамика и т.д.), сплав вольфрама и меди значительно продлевает срок службы вкладыша горловины сопла,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

повышая его класс с «одноразового использования» до «способного выдерживать многократные удары». Хотя традиционный чистый вольфрам устойчив к высоким температурам, он хрупок и обладает низкой стойкостью к тепловым ударам. Он склонен к растрескиванию при резких перепадах температур и часто выходит из строя из-за трещин после одного зажигания. Керамические материалы, хотя и износостойкие, обладают низкой теплопроводностью, а поверхность склонна к локальной абляции из-за накопления тепла, что делает их срок службы крайне коротким.

Сплав вольфрама с медью решает эти проблемы благодаря синергетическому эффекту: вольфрамовая фаза устойчива к высоким температурам и эрозии, снижая скорость износа поверхности; медная фаза эффективно проводит тепло, предотвращая локальный перегрев и абляцию; повышение стойкости к тепловому удару снижает вероятность образования трещин; в сочетании с плотным процессом формования и оптимизированной структурной конструкцией, вкладыш горловины может выдерживать воздействие многократных циклов зажигания-выключения. На практике вкладыш горловины сопла из сплава вольфрама с медью может не только выполнить одну миссию запуска, но некоторые модели также могут использоваться для многократных испытаний или повторного использования ракет, что значительно снижает частоту замены и риск отказа, одновременно повышая экономичность и надежность запусков ракет.

6.3.2 Потенциальные области применения в компонентах авиационных двигателей

Авиационный двигатель – это «сердце» самолёта, и его характеристики напрямую определяют мощность, эффективность и безопасность самолёта. По мере роста требований авиационной промышленности к тяговооружённости двигателей и топливной эффективности рабочие условия основных компонентов становятся всё более суровыми, что предъявляет всё более высокие требования к комплексным эксплуатационным характеристикам материалов. Сплав вольфрамовой меди, обладающий сбалансированными характеристиками высокой термостойкости, теплопроводности и структурной прочности, продемонстрировал высокий потенциал применения в таких ключевых узлах, как горячие концы авиационных двигателей, и, как ожидается, решит проблему узких мест в производительности традиционных материалов в экстремальных условиях эксплуатации.

6.3.2.1 Характеристики рабочей среды основных компонентов авиационного двигателя

Рабочая среда ключевых компонентов авиационного двигателя (особенно компонентов горячей части, таких как камеры сгорания, лопатки турбин, сопла и т.д.) характеризуется четырьмя основными характеристиками: «высокая температура, высокое давление, высокочастотная вибрация и коррозия». Температура сгорания топлива в камере сгорания может достигать тысяч градусов Цельсия, а лопатки турбины должны вращаться с высокой скоростью (скорость может достигать тысяч оборотов в минуту) под действием высокотемпературных продуктов сгорания, выдерживая огромные центробежные силы и термические напряжения; зазоры между компрессором высокого давления и турбиной должны оставаться герметичными в среде

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высоконапорного газа, выдерживая локальную высокую температуру, создаваемую трением о воздух; кроме того, сульфиды, оксиды азота и другие компоненты, содержащиеся в продуктах сгорания, вызывают постоянную коррозию поверхности компонентов; колебания температуры и давления во время запуска, разгона и торможения двигателя также вызывают высокочастотную термическую усталость и механическую вибрацию компонентов. Такая сложная среда «постоянная высокая температура + знакопеременное напряжение + коррозионная эрозия + вибрационные воздействия» представляет собой серьезное испытание для стабильности и долговечности материала .

6.3.2.2 Требования к свойствам материалов деталей авиационных двигателей

В связи с экстремальными условиями эксплуатации, требования к эксплуатационным характеристикам материалов для компонентов авиационных двигателей представляют собой «комплексное» свойство. Во-первых, материал должен обладать превосходной термостойкостью и сохранять механические свойства (прочность, твёрдость) без существенного снижения при длительном воздействии высоких температур, чтобы избежать деформации или разрушения вследствие размягчения; во-вторых, он должен обладать превосходной теплопроводностью и быстро отводить тепло с поверхности компонента, что позволяет снизить образование локальных горячих точек и риск термической усталости; в-третьих, он должен обладать хорошей термостойкостью и механической прочностью, чтобы уменьшить образование трещин при изменении температуры и давления, а также выдерживать вибрационные нагрузки; в то же время, он должен обладать коррозионной стойкостью и противостоять эрозии, вызываемой коррозионными компонентами в газе, предотвращая отслоение поверхности или ослабление конструкции; наконец, материал должен обладать определённой степенью технологичности и быть пригодным для изготовления сложных конструкций (например, криволинейных поверхностей лопаток, охлаждающих каналов и т. д.) методом литья под давлением, что соответствует требованиям к точности изготовления компонентов. Эти показатели должны достигаться скоординированно, и ни один из них не должен быть пропущен.

6.3.2.3 Применение сплава вольфрамовой меди в деталях горячих концов авиационных двигателей

Применение вольфрамово-медного сплава в компонентах горячих концов авиационных двигателей в основном основано на ключевом положении «необходимости учитывать как теплопроводность, так и стойкость к высоким температурам», а форма заявки корректируется в соответствии с различными функциями компонентов. В области гильз камер сгорания сплавы вольфрамовой меди с высоким содержанием вольфрама могут использоваться для изготовления тонкостенных гильз, используя высокую термостойкость вольфрама для сопротивления прямому воздействию пламени, в то время как теплопроводность меди позволяет быстро передавать тепло в систему охлаждения, предотвращая локальный перегрев гильз; на кромке или концевой уплотнительной части лопатки турбины сплав вольфрамовой меди может использоваться в качестве износостойкой теплопроводящей вставки и внедряться в матрицу лопатки — его высокая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердость позволяет противостоять трению и износу о корпус, а его теплопроводность может способствовать рассеиванию тепла лопаткой и снижению концентрации термических напряжений; В топливных форсунках или компонентах зажигания сплав вольфрамовой меди может использоваться для изготовления сердечников форсунок. Высокая термостойкость обеспечивает стабильность распыления топлива, а теплопроводность предотвращает засорение форсунок из-за перегрева, вызванного углеродистыми отложениями. Кроме того, сплавы вольфрамовой меди могут использоваться во вспомогательных компонентах, таких как теплозащитные прокладки двигателя и корпуса высокотемпературных датчиков, благодаря использованию специализированных конструкций (например, композитных с охлаждающими каналами).

6.3.2.4 Направление оптимизации производительности сплава вольфрамовой меди для применения в авиационных двигателях

Для лучшей адаптации к требованиям авиационных двигателей оптимизация характеристик вольфрамо-медных сплавов должна быть направлена на «улучшение недостатков» и «укрепление преимуществ». Что касается стойкости к высоким температурам, можно добавить небольшое количество тугоплавких легирующих элементов (таких как молибден и ниобий) для измельчения частиц вольфрама, повышения высокотемпературной стабильности вольфрамового каркаса и уменьшения явления размягчения при длительном воздействии высоких температур; что касается коррозионной стойкости, можно использовать технологии модификации поверхности (такие как плазменный слой и антиокислительное покрытие) для формирования плотного защитного слоя на поверхности сплава, препятствующего газовой коррозии без влияния на теплопроводность; что касается механической вязкости, прочность связи на границе вольфрам-медь может быть повышена путем регулирования соотношения вольфрама и меди (например, умеренного увеличения содержания меди) или оптимизации процесса спекания, что снижает риск хрупкого разрушения; Для повышения технологичности могут быть разработаны прецизионные процессы, такие как литье под давлением порошков, позволяющие формировать сложные структуры (например, микроканалы охлаждения и поверхности специальной формы) практически точно, что снижает сложность последующей обработки. Кроме того, могут быть разработаны «сплавы вольфрам-медь с градиентной структурой»: высокое содержание вольфрама на поверхности детали для повышения термостойкости и износостойкости, высокое содержание меди во внутреннем слое для повышения теплопроводности и прочности, а также адаптация к различным требованиям к положению детали за счет зонирования производительности. Эти направления оптимизации направлены на то, чтобы перевести сплав вольфрам-медь из категории «потенциального применения» в категорию «фактической адаптации» для соответствия строгим стандартам авиационных двигателей.

6.3.3 Применение в электрических системах космических аппаратов

Электрическая система космического корабля – это «нервный центр», обеспечивающий его нормальную работу. Она отвечает за передачу энергии, управление и электропитание оборудования. Её надёжность напрямую связана с успехом или неудачей миссии. В космосе

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электрическая система подвергается экстремальным испытаниям в условиях окружающей среды, и сплав вольфрама и меди стал идеальным материалом для основных компонентов, таких как контакторы и автоматические выключатели, благодаря своей «превосходной электро- и теплопроводности, а также высокой стойкости к дуговой эрозии», что обеспечивает важнейшую поддержку стабильной работы электрической системы.

6.3.3.1 Требования к условиям эксплуатации и надежности электрических систем космических аппаратов

Рабочие условия электрической системы космического аппарата характеризуются двумя основными характеристиками: «экстремальными» и «необслуживаемыми». При работе на орбите система должна выдерживать чередование вакуума, высоких и низких температур. В условиях вакуума отсутствует теплоотдача, что легко приводит к накоплению тепла в компонентах; резкие перепады температур приводят к расширению и сжатию материала, что приводит к усталости от напряжений. Кроме того, в космосе присутствует высокоэнергетическое излучение частиц, которое может нарушить передачу электрических сигналов; а сильная вибрация и удары во время запуска проверяют структурную целостность компонентов.

Исходя из этих характеристик окружающей среды, требования к надежности системы близки к «нулевому отказу»: основные компоненты должны стабильно работать в течение всего цикла миссии от нескольких дней до нескольких лет без таких проблем, как плохой контакт и дуговая эрозия; электрические соединения должны сохранять проводимость при экстремальных температурах и вибрациях, а компоненты дугогашения должны надёжно отключать ток; даже в случае воздействия радиации или падения микрометеоритов необходимо избегать внезапных отказов. Возникновение отказа может непосредственно привести к срыву миссии, поскольку его невозможно устранить на орбите.

6.3.3.2 Требования к свойствам материалов основных компонентов электротехнических систем космических аппаратов

Требования к характеристикам материалов для основных компонентов электрических систем космических аппаратов (таких как контакты контакторов и дугогасительные камеры автоматических выключателей) в первую очередь ориентированы на «электрическую стабильность» и «адаптируемость к окружающей среде». Во-первых, материал должен обладать превосходной электропроводностью для обеспечения эффективной передачи тока и снижения нагрева, вызванного контактным сопротивлением; во-вторых, ключевым фактором является стойкость к дуговой эрозии – дуга, образующаяся при замыкании и размыкании контактов, прожигает поверхность, а материал должен быть устойчив к плавлению и разбрызгиванию высокотемпературной дуги; в то же время, должна быть превосходная теплопроводность, чтобы выделяемое дугой тепло могло быстро отводиться, предотвращая перегрев компонентов; кроме того, материал должен обладать хорошей термостойкостью и механической прочностью, не трескаться и не деформироваться при чередовании высоких и низких температур, а также при

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вибрационных нагрузках; наконец, в вакуумной среде материал не должен выделять летучие вещества (чтобы избежать загрязнения оптического оборудования) и должен обладать высокой химической стабильностью и не реагировать с окружающей средой.

6.3.3.3 Применение сплава вольфрамовой меди в контактах контакторов космических аппаратов

Контактор – это «выключатель», управляющий включением и выключением электрической системы космического аппарата. Его контакты являются основными исполнительными компонентами, а применение в них сплава вольфрама и меди точно соответствует функциональным требованиям. Контакты контактора генерируют короткую дугу при включении и выключении. Вольфрамовая фаза в сплаве вольфрама и меди способна выдерживать высокую температуру дуги и предотвращать плавление и деформацию контактов; медная фаза обеспечивает отличную проводимость, снижает контактное сопротивление и уменьшает тепловыделение при проводимости. С точки зрения конструкции контакты часто представляют собой «композитный слой вольфрама и меди»: высокое содержание вольфрама на поверхности повышает дугостойкость, а несколько более высокое содержание меди в нижнем слое улучшает свариваемость с основанием.

6.3.3.4 Применение сплава вольфрамовой меди в дугогасительных элементах выключателей космических аппаратов

Автоматические выключатели являются «защитными ограждениями» электрических систем космических аппаратов. При перегрузке или коротком замыкании цепи ток должен быть быстро отключен, а дуга должна быть погашена. Сплав вольфрама с медью играет ключевую роль в компонентах гашения дуги (таких как стенки камеры дугогасительной камеры и дуговые контакты). При гашении дуги высокая температура, создаваемая дугой, легко плавит поверхность компонента, а вольфрамовая фаза сплава вольфрама с меди может выдерживать высокие температуры и уменьшать поверхностную абляцию; высокая теплопроводность медной фазы может быстро отводить тепло дуги к охлаждающей конструкции, ускоряя гашение дуги. В вакуумной среде гашения дуги сплав вольфрама с медью не выделяет летучих компонентов, что предотвращает смешивание примесных газов в дуге и обеспечивает эффективность гашения дуги; В то же время, его стойкость к тепловому удару предотвращает растрескивание компонентов при резком переходе от высокой температуры к низкой температуре в вакууме, сохраняя структурную целостность. Эта характеристика позволяет автоматическим выключателям надежно отключать ток и обеспечивать безопасность цепи в аварийных ситуациях.

6.3.3.5 Роль сплава вольфрам-медь в обеспечении устойчивости работы и ресурса электросистем космических аппаратов

Вольфрам-медный сплав напрямую обеспечивает стабильность работы и срок службы электрической системы космического корабля, повышая надежность основных компонентов. В

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контакторе его дугостойкость снижает износ контактов, увеличивает количество включений-выключений с тысяч до десятков тысяч и продлевает цикл замены компонентов; стабильная проводимость предотвращает локальный перегрев, вызванный нагревом контактов, и снижает риск отказа цепи. В выключателе эффективное гашение дуги и сопротивление абляции вольфрамово-медного сплава гарантируют быстрое отключение тока при перегрузке, чтобы избежать распространения неисправностей; в то же время стойкость к тепловому удару и механическая прочность материала предотвращают отказ компонентов при длительном воздействии высоких и низких температур и вибраций, адаптируясь к циклу миссии космического корабля в несколько лет. Кроме того, низкая летучесть вольфрамово-медного сплава предотвращает загрязнение другого оборудования, косвенно обеспечивает слаженную работу всей электрической системы и снижает отказы цепи, вызванные проблемами материала.

6.3.3.6 Критерии выбора материалов и требования к контролю качества для сплавов вольфрама и меди для применения в космических аппаратах

Вольфрамово-медные сплавы, используемые в космических аппаратах, должны проходить строгий отбор материалов и контроль качества для обеспечения надежности. Что касается критериев выбора материалов, то сначала необходимо уточнить соотношение компонентов: для контактов контактора необходимо учитывать как проводимость, так и дугостойкость, и обычно выбирают серии W70-Cu30 – W80-Cu20; для компонентов дугогашения требуется более высокое содержание вольфрама (W85-Cu15 и выше) для повышения стойкости к высоким температурам. При этом плотность материала должна быть выше 98%, чтобы внутренние поры не стали уязвимыми местами для дуговой эрозии; проводимость должна быть $\geq 40\%$ по IACS (Международный стандарт отожжённой меди) для обеспечения эффективности передачи тока.

Контроль качества осуществляется на протяжении всего процесса: чистота сырья должна быть проверена, чтобы исключить влияние примесей на проводимость; в процессе формования используется вакуумное спекание и инфильтрация для снижения окисления и пористости; готовое изделие должно пройти испытания на воздействие окружающей среды, такие как циклы высоких и низких температур, вибрация и удары, для подтверждения стабильности характеристик; и, наконец, необходимы испытания на имитацию дуговой эрозии, чтобы гарантировать сохранение функциональности после тысяч циклов включения и выключения. Только полный контроль позволяет сплавам вольфрама и меди соответствовать требованиям «нулевого брака» для применения в космических аппаратах.

6.4 Применение в других областях

Применение вольфрамово-медных сплавов не ограничивается такими высокотехнологичными областями, как аэрокосмическая промышленность. Такие характеристики, как «высокая термостойкость, баланс электро- и теплопроводности», а также «контролируемая плотность и прочность», также демонстрируют уникальную ценность в металлургии, спорте, медицине, атомной энергетике и других областях. Благодаря оптимизации состава и процесса в соответствии

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

с требованиями различных сценариев, вольфрамово-медные сплавы постепенно расширили сферу применения, перейдя от категории «специальных материалов» к более гражданским и промышленным применениям, став ключевым выбором для решения проблемы, связанной с эксплуатационными недостатками традиционных материалов.

6.4.1 Сценарии применения в металлургической промышленности

Высокотемпературная плавка, литье и переработка в металлургической промышленности предъявляют высокие требования к высокотемпературной стойкости, износостойкости и теплопроводности материалов. Вольфрамово-медный сплав играет важную роль в различных основных сценариях. Среди электродных материалов для вакуумной плавки вольфрамово-медный сплав может использоваться в качестве электрода для дуговой плавки благодаря своей высокой проводимости и высокотемпературной стойкости. Вольфрамовая фаза противостоит высокотемпературной дуговой эрозии во время плавки, а медная фаза обеспечивает стабильную передачу тока, быстро рассеивая тепло дуги, чтобы избежать перегрева электрода. В износостойких деталях кристаллизатора непрерывной разливки сплав вольфрамово-медный с высоким содержанием вольфрама может быть изготовлен во вставке внутренней стенки кристаллизатора. Его износостойкость позволяет противостоять эрозии высокотемпературной расплавленной стали, а его теплопроводность способствует быстрому охлаждению и формированию расплавленной стали, уменьшая явление прилипания стали. Высокая прочность и термостойкость вольфрамово-медного сплава, используемого в локальных вставках литейных форм (например, в литниках, стержнях и других быстроизнашиваемых деталях), продлевают срок службы формы и предотвращают образование трещин, возникающих при многократном нагреве и охлаждении. Кроме того, высокая термостойкость и герметичность, применяемые в корпусах высокотемпературных датчиков металлургического оборудования для обнаружения, также обеспечивают точность обнаружения.

6.4.2 Варианты использования спортивного инвентаря

В области спортивного инвентаря применение сплава вольфрамовой меди сосредоточено на ключевом требовании «сочетания высокой плотности с амортизацией», и сфера его применения сосредоточена в высокоточном спортивном оборудовании. В балансирах снаряжения для стрельбы из лука сплав вольфрамовой меди с высоким содержанием вольфрама может обеспечить достаточный вес при небольшом объёме благодаря своей высокой плотности, помогая лучникам корректировать центр тяжести древка стрелы и повышать стабильность стрельбы; в то же время, присутствие фазы меди придаёт грузику определённую прочность, предотвращая её поломку при столкновении. В утяжеляющем сердечнике бильярдных киев сплав вольфрамовой меди может заменить традиционные свинцовые бруски. Регулируя соотношение вольфрама и меди для контроля распределения веса, он не только обеспечивает передачу усилия при ударе по мячу, но и предотвращает токсичное загрязнение свинцом. В грузике рукоятки высококачественных удилищ его плотность сочетается с коррозионной стойкостью — он не только улучшает ощущение хвата благодаря весу, но и защищает от ржавчины в водной среде и продлевает срок службы снаряжения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Во всех этих вариантах использования используются преимущества сплава вольфрамовой меди «контролируемая плотность + нетоксичность + хорошая формуемость» для замены традиционных материалов на основе тяжелых металлов.

6.4.3 Исследования в области медицинских приборов

В сфере медицинских приборов предъявляются строгие требования к биологической безопасности, точности и функциональности материалов. Исследование и применение сплавов вольфрама и меди сосредоточены на сценариях, требующих «сочетания высокой плотности и радиационной защиты». В оборудовании для калибровки дозы в радиотерапии сплавы вольфрама и меди с высоким содержанием вольфрама могут использоваться в качестве ослабителей излучения – вольфрам обладает высокой степенью экранирования рентгеновского и гамма-излучения и позволяет точно контролировать проникающую дозу излучения. Присутствие меди повышает точность обработки материала и позволяет создавать сложные каналы ослабления для обеспечения точности калибровки; в то же время, её нетоксичность и химическая стабильность позволяют избежать загрязнения оборудования. В позиционирующих компонентах интервенционных медицинских устройств (например, в качестве меток на сосудистых стентах) высокая плотность сплавов вольфрама и меди позволяет чётко визуализировать их под рентгеновским излучением, что помогает врачам определить местоположение стента, а обрабатываемость медной фазы позволяет создавать микроструктуры, не влияя на гибкость стента. В настоящее время эти области применения находятся на стадии исследований. Основная задача заключается в дальнейшем улучшении биосовместимости путём пассивации поверхности, что заложит основу для клинического применения.

6.4.4 Перспективы применения в области атомной энергетики

Экстремальные условия (высокая температура, радиация, высокое давление) в области ядерной энергетики требуют чрезвычайно высокой устойчивости к материалам. Вольфрамово-медные сплавы продемонстрировали широкие перспективы применения благодаря своим характеристикам «высокотемпературная радиационная стойкость + стабильная теплопроводность». В направляющих элементах регулирующих стержней ядерных реакторов вольфрамово-медные сплавы могут использоваться в качестве направляющих трубок – вольфрам обладает высокой радиационной стойкостью и сохраняет структурную устойчивость в условиях нейтронного излучения. Теплопроводность меди позволяет отводить тепло из реактора, предотвращая деформацию направляющей трубы из-за перегрева и обеспечивая плавное движение регулирующих стержней; в то же время, её коррозионная стойкость позволяет противостоять эрозии теплоносителя реактора. В защитных элементах оборудования для переработки ядерных отходов вольфрамово-медные сплавы с высоким содержанием вольфрама могут быть использованы для изготовления защитных контейнеров, используя радиационную защиту вольфрама для изоляции ядерных отходов, а медная фаза улучшает герметизацию и технологичность контейнера, упрощая создание сложных уплотнительных конструкций. В будущем, благодаря оптимизации технологии радиационно-стойких покрытий и процессов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

порошковой металлургии, ожидается, что сплавы вольфрама и меди добьются прорыва в таких областях, как компоненты теплообмена и корпуса детекторов излучения малых модульных реакторов, став одним из ключевых материалов для безопасной эксплуатации ядерной энергетики.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 7. Тенденции будущего развития сплава вольфрама и меди

Вольфрамово-медный сплав ориентирован на постоянную оптимизацию и инновации в высокопроизводительных приложениях, сочетая новые технологии для повышения производительности и расширения сферы применения. Дальнейшие разработки будут направлены на новые технологии подготовки, стратегии повышения производительности и экологичное проектирование для удовлетворения растущих потребностей электротехнической, аэрокосмической и новой энергетической отраслей.

7.1 Исследование новой технологии получения сплава вольфрама с медью

Целью разработки сплавов вольфрама и меди является преодоление ограничений традиционных процессов и внедрение передовых методов производства для улучшения контроля микроструктуры и эксплуатационных характеристик. Эти технологии оптимизируют распределение вольфрама и меди, снижают количество дефектов и повышают функциональность благодаря инновационным методам обработки и формовки материалов. Разработка новых технологий подготовки будет способствовать широкому применению сплавов в изделиях со сложной геометрией, высокоточных компонентах и специализированных приложениях.

7.1.1 Потенциальные области применения технологии аддитивного производства

Технология аддитивного производства, как потенциальное приложение для получения сплавов вольфрама и меди, обеспечивает возможность получения сложных структур путем послойного осаждения материалов. Управляемая компьютерным проектированием, технология использует методы плавления в порошковом слое или направленного энергетического осаждения для послойного расплавления и затвердевания порошков вольфрама и меди для формирования деталей из сплава с индивидуальной микроструктурой. Потенциальное применение заключается в ее способности точно контролировать локальное распределение вольфрама и меди, создавать функциональные градиентные материалы и достигать динамического баланса между проводимостью и высокой термостойкостью в различных областях компонента. Этот процесс позволяет проектировать сложные геометрии, такие как внутренние каналы охлаждения или легкие конструкции, чтобы соответствовать высоким требованиям аэрокосмического и электронного оборудования.

Технология аддитивного производства также включает в себя сокращение отходов материала и сокращение производственных циклов, а также прямое формование с помощью цифровых моделей для удовлетворения потребностей мелкосерийного или персонализированного производства. В вольфрамово-медных сплавах эта технология позволяет оптимизировать морфологию зерна и распределение фаз, улучшить сцепление на границе раздела и уменьшить пористость и несмоченные области в традиционных процессах. Потенциальные области применения включают высокопроизводительные радиаторы, прецизионные электрические контакты и специализированные сварочные электроды, особенно в компонентах со сложной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

внутренней структурой. Дальнейшие разработки должны решать такие проблемы, как однородность смешивания порошков, контроль термических напряжений и оптимизация постобработки для повышения надежности и стабильности компонентов.

7.1.2 Обзор других передовых технологий подготовки

В дополнение к технологии аддитивного производства, перспективы других передовых технологий подготовки открывают разнообразные пути для будущего развития сплавов вольфрама и меди. Эти технологии включают нанотехнологии, плазменное напыление и методы самосборки, которые направлены на улучшение характеристик сплавов за счет инновационных методов проектирования и обработки материалов. Нанотехнология использует сверхтонкие порошки вольфрама и меди для повышения однородности и плотности микроструктуры, потенциально улучшая проводимость и механическую прочность. Технология плазменного напыления плавит и осаждает частицы вольфрама и меди с помощью высокоскоростной плазмы, что подходит для быстрой подготовки покрытий или сложных поверхностей и подходит для износостойких и коррозионно-стойких применений. Метод самосборки использует химические или физические свойства самого материала для регулирования распределения фаз на молекулярном уровне и исследования новых композитных структур.

Перспектива этих передовых технологий заключается в их способности преодолеть ограничения традиционной порошковой металлургии или методов инфильтрации расплава и обеспечить большую гибкость и функциональность. Например, нанотехнологии позволяют достичь более мелких размеров зерна и повысить стойкость к дуговой эрозии; плазменное напыление может быстро восстановить или улучшить поверхность компонентов; а методы самосборки могут открыть новые области интеллектуального дизайна материалов. Будущие направления развития включают объединение интеграции нескольких технологий, таких как сочетание нанопорошков и аддитивного производства или синергия плазменного напыления и обработки поверхности для оптимизации микроструктуры и характеристик. Проблемы заключаются в сложности процесса, контроле затрат и возможности крупномасштабного применения. Развитие этих технологий откроет новые перспективы применения сплавов вольфрама и меди.

7.2 Направление исследований по оптимизации характеристик вольфрамово-медного сплава

вольфрама и меди посредством углубленного изучения конструкции материала и совершенствования технологических процессов для удовлетворения всё более сложных требований к применению. В основе оптимизации производительности лежит баланс характеристик вольфрама и меди, точная настройка микроструктуры и разработка индивидуальных решений для конкретных условий применения. Направление исследований охватывает комплексное улучшение производительности и усиление конкретных условий применения, подчеркивая роль инновационных методов в содействии разработке сплавов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.1 Направления исследований для улучшения комплексной эффективности

Направление исследований комплексного улучшения производительности сосредоточено на одновременном улучшении множественных свойств сплавов вольфрама и меди, включая электропроводность, теплопроводность, механическую прочность и коррозионную стойкость, для достижения всесторонней оптимизации производительности. Суть исследований заключается в точном контроле микроструктуры, уменьшении дефектов и улучшении плотности материала за счет оптимизации размера зерна, распределения фаз и связи интерфейса. Потенциальным методом является разработка новой технологии смешивания порошков для обеспечения равномерного распределения вольфрама и меди, повышения непрерывности фазы меди для улучшения электро- и теплопроводности, сохраняя при этом стабильную структуру фазы вольфрама для поддержки механической прочности. Методы улучшения интерфейса, такие как введение промежуточной фазы или модификация поверхности, могут улучшить адгезию между вольфрамом и медью и снизить риск отслоения.

Другим направлением исследований является изучение конструкции многофазных композитов путем введения микродобавок или материалов второй фазы для корректировки микроструктуры для баланса прочности и ударной вязкости. При выборе добавок необходимо учитывать их химическую совместимость с вольфрамом и медью, чтобы избежать появления новых слабых мест. Кроме того, технологические инновации, такие как поэтапное спекание или обработка под давлением, могут дополнительно снизить пористость и повысить общую стабильность материала. Улучшения коррозионной стойкости и стойкости к окислению могут быть достигнуты с помощью обработки поверхности или технологии нанесения покрытий для защиты медной фазы от эрозии под воздействием окружающей среды, сохраняя при этом высокотемпературную стойкость вольфрама. Будущие исследования также могут сочетать технологии моделирования и искусственный интеллект для прогнозирования взаимосвязи между микроструктурой и эксплуатационными характеристиками и динамической оптимизации параметров подготовки. Достижения в этих направлениях будут способствовать комплексному улучшению характеристик сплавов вольфрама и меди в различных высокопроизводительных приложениях.

7.2.2 Повышение производительности в конкретных сценариях применения

Направление исследований по повышению производительности в конкретных сценариях применения направлено на адаптацию и оптимизацию характеристик вольфрамово-медных сплавов для таких областей, как электрические контакты, сварочные электроды и компоненты аэрокосмической техники. В области электрических контактов основное внимание уделяется повышению проводимости и стойкости к дуговой эрозии. Для повышения эффективности переноса электронов можно оптимизировать структуру медной фазы, а для снижения повреждений поверхности, вызванных дугой, можно использовать термостойкие покрытия или модификации поверхности. Исследования могут быть направлены на изучение методов динамической регулировки содержания вольфрама для обеспечения повышенной износостойкости и стабильности в условиях высоких токов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Для применения сварочных электродов направлением повышения производительности является улучшение стойкости к высоким температурам и антиадгезионной способности. Противоплавкие свойства скелета могут быть улучшены за счет увеличения доли фазы вольфрама, одновременно оптимизируя процесс спекания и уменьшая пористость для улучшения теплопроводности. Укрепление связи интерфейса также имеет решающее значение для предотвращения прилипания фазы меди к заготовке при высокой температуре. Исследования могут ввести улучшители смачивания или многослойную конструкцию структуры. Потребности аэрокосмических компонентов, таких как радиаторы, сосредоточены на теплопроводности и легкости. Функциональная градиентная конструкция может быть использована для достижения распределения высокой теплопроводности фазы меди на поверхности, а фаза вольфрама обеспечивает структурную поддержку внутри. Направления исследований включают разработку новых технологий формования для оптимизации распределения внутренней пористости. Эти конкретные исследования по укреплению должны быть объединены с фактическими условиями сценария применения, такими как температура, механическое напряжение и цикл использования, для разработки целевых методов испытаний и проверки. Будущие разработки могут включать в себя разработку адаптивных материалов, позволяющих сплавам динамически изменять характеристики в соответствии с изменениями окружающей среды, или использование интеллектуальных производственных технологий для мониторинга и оптимизации характеристик в режиме реального времени.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение

Приложение А. Национальный стандарт Китая для сплава вольфрама и меди

Национальные стандарты Китая для сплавов вольфрама и меди разработаны Администрацией по стандартизации Китая (SAC) для регулирования подготовки, эксплуатационных характеристик и применения сплавов вольфрама и меди для обеспечения качества продукции и единообразия в отрасли. Эти стандарты в основном охватывают порошки сплавов вольфрама и меди, готовые детали и связанные с ними методы испытаний. Хотя единого национального стандарта, специально предназначенного для сплавов вольфрама и меди, не существует, соответствующие стандарты могут быть выведены из общих спецификаций вольфрама и медных сплавов. Национальная система стандартов Китая включает серию GB/T, некоторые из которых, например, GB/T 26055-2022 (порошок восстановленного карбида вольфрама), включают требования к подготовке материалов на основе вольфрама и могут быть использованы в качестве справочного материала. Стандарты GB/T 38470-2023 и GB/T 38471-2023 устанавливают стандарты качества для вторичных медных сплавов и медного сырья соответственно и косвенно применимы к контролю качества медной фазы в вольфрамово-медных сплавах. Кроме того, стандарты GB/T 5242-2006 и GB/T 5243-2006 устанавливают правила контроля, а также спецификации упаковки и транспортировки изделий из твердого сплава, некоторые из которых могут быть распространены на контроль и транспортировку вольфрамово-медных сплавов. Эти стандарты обеспечивают однородность материала и постоянство эксплуатационных характеристик посредством химического анализа, определения плотности и оценки микроструктуры.

Характерными особенностями китайских стандартов являются их адаптируемость к отечественному сырью и процессам, а также акцент на защите окружающей среды и контроле качества. В последние годы, с ужесточением политики импорта лома, например, с введением новых таможенных стандартов в 2023 году, были выдвинуты более высокие требования к чистоте и содержанию неметаллических примесей в медном сырье, что косвенно влияет на производство вольфрамово-медных сплавов. Содержание стандартов обычно включает требования к составу материала, физическим свойствам и технологии обработки, направленные на поддержку внутренних промышленных потребностей, таких как применение электрических контактов и сварочных электродов. В будущем стандарты могут быть дополнительно доработаны для включения требований к новым технологиям подготовки для адаптации к технологическому прогрессу и международной конкуренции.

Приложение В Международные стандарты сплавов вольфрама и меди

Международные стандарты на сплавы вольфрама и меди в основном разрабатываются Международной организацией по стандартизации (ISO) и другими национальными или региональными органами по стандартизации для обеспечения единой справочной структуры для глобальной цепочки поставок. Хотя не существует международного стандарта, специально предназначенного для сплавов вольфрама и меди, соответствующие спецификации можно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

получить из общих стандартов на сплавы вольфрама и медные сплавы. ISO 18119 охватывает порошки сплавов вольфрама, используемые в производстве твердых сплавов, обеспечивает основные требования к приготовлению и свойствам порошка и может быть использован в качестве основы для сырья для сплавов вольфрама и меди. Другие международные стандарты, такие как JIS H 3201 (японский промышленный стандарт), определяют характеристики порошков сплавов вольфрама, некоторые из которых применимы к композитам из вольфрама и меди. Хотя международные стандарты ASTM и стандарты EN не нацелены напрямую на сплавы вольфрама и меди, их методы испытаний металлических материалов (такие как испытания на плотность и твердость) могут быть использованы для оценки эксплуатационных характеристик.

Характерными чертами международных стандартов являются их транснациональная применимость, подчеркивающая единообразие материалов и удобство торговли. Промышленные стандарты (такие как ASTM, JIS и DIN) в разных странах и регионах, таких как США, Япония и Европа, сформировали глобальную систему спецификаций посредством взаимопомощи и взаимного признания. Международное применение сплавов вольфрама и меди, например, в аэрокосмической промышленности и электронной упаковке, побудило эти стандарты сосредоточиться на высокой электропроводности, высокой теплопроводности и высокой термостойкости. Некоторые крупные производители порошков также разработали внутренние спецификации, чтобы восполнить недостатки международных стандартов и обеспечить высококачественные поставки. Однако международные стандарты еще не в полной мере поддерживают новые технологии подготовки, такие как аддитивное производство, и, возможно, в будущем их потребуется обновить для адаптации к технологическому развитию. В целом, международные стандарты служат важным руководством для мировой торговли и применения сплавов вольфрама и меди, но их конкретная реализация должна сочетаться с фактическими условиями каждой страны.

Приложение С Стандарты на вольфрамово-медные сплавы в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах

Стандарты на вольфрамово-медные сплавы в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах разрабатываются соответствующими национальными или региональными органами по стандартизации для стандартизации свойств материалов, процессов их изготовления и требований к применению в целях поддержки мировой торговли и развития промышленности. Хотя единого международного стандарта, предназначенного специально для вольфрамово-медных сплавов, не существует, соответствующие спецификации обычно основаны на общих стандартах на вольфрамовые, медные сплавы и композитные материалы. Ниже представлен обзор стандартов основных стран и регионов.

В Европе и Соединенных Штатах основными справочными рамками являются международные стандарты ASTM в Соединенных Штатах и стандарты EN в Европе. Стандарты ASTM, такие как ASTM B702, охватывают требования к подготовке и эксплуатационным характеристикам материалов электрических контактов из вольфрама и меди, включая такие параметры, как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

плотность, проводимость и твердость, но не содержат подробных спецификаций для всех типов сплавов вольфрама и меди. Стандарты EN в основном сосредоточены на меди и ее сплавах и косвенно применимы к контролю качества медной фазы в сплавах вольфрама и меди. Эти стандарты подчеркивают однородность материалов и повторяемость методов испытаний и широко используются в электрических контактах и теплоотводах. Европейские и американские стандарты предъявляют высокие требования к высокой проводимости и стойкости к высоким температурам. Некоторые компании, такие как American Elements и Plansee, сформулировали внутренние спецификации, чтобы восполнить недостатки общих стандартов.

Стандарты JIS Японии (например, JIS H 3201) определяют характеристики порошков вольфрамовых сплавов, некоторые из которых применимы к композитам вольфрам-медь, уделяя особое внимание однородности размера частиц порошка и химическому составу. Применение сплавов вольфрам-медь в японской промышленности в основном сосредоточено в электродах для электроискровой обработки (EDM) и контактах высоковольтных переключателей, а стандарты подчеркивают стойкость к дуговой эрозии и электропроводность. Корейские стандарты сформулированы Корейскими промышленными стандартами (KS). Такие спецификации, как KS D 2101, охватывают материалы на основе вольфрама и применимы к процессам порошковой металлургии для сплавов вольфрам-медь. Южная Корея фокусируется на производстве высокоточных компонентов, и стандарты имеют особые требования к микроструктуре и теплопроводности, отражающие ее потребности в областях электронной упаковки и аэрокосмической промышленности.

Стандарты этих стран различаются. Европа и США делают акцент на универсальности и торговой совместимости, в то время как Япония и Южная Корея уделяют больше внимания техническим деталям конкретных промышленных применений. Требования к производительности соотношения вольфрамовых медных сплавов (таких как WCu 70/30, WCu 80/20) в разных стандартах могут различаться, но, как правило, требуют высокой плотности, низкого теплового расширения и отличной проводимости. Действующие стандарты ограниченно поддерживают новые технологии, такие как аддитивное производство, и могут нуждаться в обновлении в будущем для адаптации к технологическому прогрессу. В целом, эти стандарты служат важным руководством для международного сотрудничества и применения вольфрамовых медных сплавов, но их внедрение должно сочетаться с промышленными характеристиками и потребностями рынка каждой страны.

Приложение D Глоссарий сплавов вольфрама и меди

термин	определение
Сплав вольфрам-медь	из вольфрама и меди методом порошковой металлургии или инфильтрации, сочетающие высокую температуру плавления и электропроводность.
Порошковая	Процесс приготовления сплава путем смешивания, прессования и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

металлургия	спекания металлических порошков подходит для равномерного распределения сплава вольфрама и меди.
Вакуумная инфильтрация	Процесс инфильтрации жидкой меди в вольфрамовый каркас в вакуумной среде используется для приготовления сплава вольфрама и меди высокой плотности.
Размер зерна	Средний размер частиц вольфрама или меди в сплаве, влияющий на прочность и проводимость.
Фазовое распределение	Фазы вольфрама и меди в сплаве определяют пути электро- и теплопроводности.
Пористость	Доля незаполненных пустот в сплаве влияет на плотность и механические свойства.
Склеивание интерфейсов	Фазы вольфрама и меди влияют на передачу нагрузки и сопротивление отслаиванию.
Электропроводность	Способность сплава проводить электрический ток определяется главным образом непрерывностью медной фазы.
Теплопроводность	Способность сплава передавать тепло зависит от распределения фазы меди и однородности микроструктуры.
Стойкость к дуговой эрозии	Способность сплава противостоять дуговой высокотемпературной абляции зависит от стабильности фазы вольфрама и распределения пор.
Жидкофазное спекание	Плотность сплава повышается за счет процесса спекания при высокой температуре с использованием смачивания жидкой фазой меди и заполнения частицами вольфрама.
Горячее изостатическое прессование	Сплав обрабатывается при высокой температуре с использованием всенаправленного давления для уменьшения пористости и улучшения микроструктуры.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

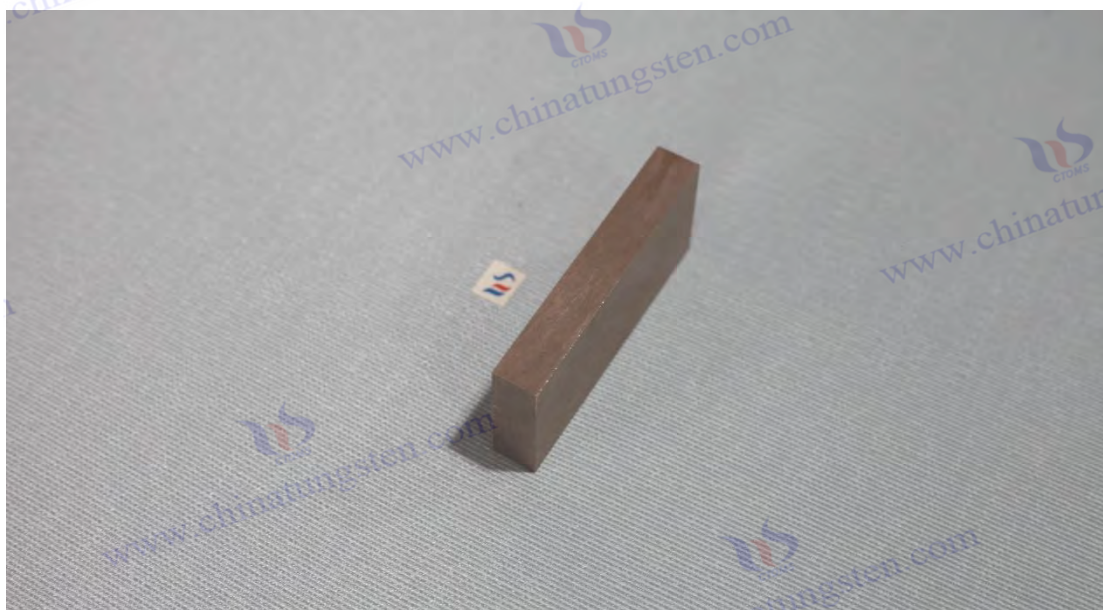
Ссылки

Китайская литература

- [1] Китайская ассоциация по стандартизации. (2023). GB/T 26055-2022 Восстановленный порошок карбида вольфрама. Пекин: China Standards Press.
- [2] Китайская ассоциация по стандартизации. (2023). GB/T 38470-2023 Вторичные медные сплавы. Пекин: China Standards Press.
- [3] Китайская ассоциация по стандартизации. (2023). GB/T 38471-2023 Требования к качеству медного сырья. Пекин: China Standards Press.
- [4] Китайская ассоциация по стандартизации. (2006). GB/T 5242-2006 Правила проверки изделий из твердого сплава. Пекин: China Standards Press.
- [5] Китайская ассоциация по стандартизации. (2006). GB/T 5243-2006 Технические условия на упаковку и транспортировку изделий из твердого сплава. Пекин: China Standards Press.

английская литература

- [1] Международная организация по стандартизации. (2020). ISO 18119: Порошки вольфрамовых сплавов для твердых сплавов . Швейцария: ISO.
- [2] Японский комитет по промышленным стандартам. (2018). JIS H 3201: Характеристики порошка вольфрамового сплава. Токио: Японская ассоциация стандартов.
- [3] ASTM International. (2019). ASTM B702: Стандартная спецификация для материала электрических контактов из вольфрама и меди. США: ASTM.
- [4] Европейский комитет по стандартизации. (2017). EN 13601: Медь и медные сплавы – Прутки. Брюссель: CEN.
- [5] Корейское агентство по технологиям и стандартам. (2021). KS D 2101: Технические условия порошковой металлургии для материалов на основе вольфрама. Сеул: KATS.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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