

Что такое сплав вольфрама и никеля с медью

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 Общие сведения о вольфрамо-никелевом медном сплаве

- 1.1 Определение и классификация вольфрамо-никелевого медного сплава
 - 1.1.1 Диапазон состава трехкомпонентной системы
 - 1.1.2 Классификация по плотности и связь с применением
- 1.2 История развития вольфрамо-никелевого медного сплава
 - 1.2.1 Происхождение и ранние исследования
 - 1.2.2 Период, стимулируемый военными приложениями
 - 1.2.3 Массовое применение в современной электронике

Глава 2 Микроструктура вольфрамо-никелевого медного сплава

- 2.1 Особенности микроструктуры вольфрамо-никелевого медного сплава
 - 2.1.1 Распределение вольфрамовых частиц
 - 2.1.2 Распределение никелевомедной связующей фазы
 - 2.1.3 Механизм формирования спекательных шейок
- 2.2 Микроструктура и характеристики границ раздела вольфрамо-никелевого медного сплава
 - 2.2.1 Сила сцепления границы раздела вольфрам-связующая фаза
 - 2.2.2 Влияние микроэлементов на границу раздела
- 2.3 Эволюция микроструктуры сплава W-Ni-Cu
 - 2.3.1 Закон роста зерен при спекании
 - 2.3.2 Регулирование микроструктуры тепловой обработкой

Глава 3 Физико-химические свойства вольфрамо-никелевого медного сплава

- 3.1 Механические свойства вольфрамо-никелевого медного сплава
 - 3.1.1 Прочность на растяжение при комнатной температуре
 - 3.1.2 Относительное удлинение
 - 3.1.3 Гермостойкость
 - 3.1.4 Вязкость при ударе
- 3.2 Тепловые и электрические свойства вольфрамо-никелевого медного сплава
 - 3.2.1 Теплопроводность
 - 3.2.2 Электропроводность
 - 3.2.3 Коэффициент теплового расширения
 - 3.2.4 Свойства теплоотвода
- 3.3 Химическая стабильность вольфрамо-никелевого медного сплава
 - 3.3.1 Коррозионная стойкость
 - 3.3.2 Антиоксидные свойства
- 3.4 Безопасный паспорт продукции (MSDS) вольфрамо-никелевого медного сплава компании CTIA GROUP LTD

Глава 4 Тестирование характеристик и стандарты вольфрамо-никелевого медного сплава

- 4.1 Метод анализа состава вольфрамо-никелевого медного сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.1.1 Технология спектрального анализа
- 4.1.2 Детекция примесных элементов
- 4.2 Метод испытания характеристик вольфрамо-никелевого медного сплава
- 4.2.1 Испытание плотности и компактности
- 4.2.2 Испытание на прочность на растяжение и предельную текучесть
- 4.2.3 Испытание на пластичность
- 4.2.4 Испытание на вязкость
- 4.2.5 Испытание тепловых свойств
- 4.2.6 Испытание электрических свойств
- 4.2.7 Испытание химических свойств
- 4.3 Система стандартов вольфрамо-никелевого медного сплава
- 4.3.1 Национальный стандарт Китая для вольфрамо-никелевого медного сплава
- 4.3.2 Международные стандарты для вольфрамо-никелевых медных сплавов
- 4.3.3 Стандарты вольфрамо-никелевого медного сплава в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах мира

Глава 5 Технология получения вольфрамо-никелевого медного сплава

- 5.1 Предварительная обработка сырья
- 5.1.1 Сферизация вольфрамового порошка и контроль размера частиц
- 5.1.2 Поверхностная обработка никелевомедного порошка
- 5.2 Порошковая металлургия
- 5.2.1 Параметры процесса смешивания порошков
- 5.2.2 Технология прессования
- 5.2.3 Процесс жидкофазного спекания
- 5.3 Современные технологии получения
- 5.3.1 Металлургическое литье под давлением
- 5.3.2 Технология горячего изостатического прессования
- 5.4 Послеобработка и механическая обработка
- 5.4.1 Точная механическая обработка
- 5.4.2 Процесс поверхностной обработки

Глава 6 Применение вольфрамо-никелевого медного сплава в области электронной информации

- 6.1 Упаковка чипов и теплоотвод
- 6.1.1 Теплоотводящая подложка для высокомоощных устройств
- 6.1.2 Контрольный теплообменник модуля 5G радиосигнала
- 6.2 Микроволновое и радарное оборудование
- 6.2.1 Сборка антенного веса
- 6.2.2 Радиарные экранирующие компоненты
- 6.3 Микроэлектромеханические системы
- 6.3.1 Контрольный вес инерциального сенсора
- 6.3.2 Микропоправные компоненты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 7 Применение вольфрамо-никелевого медного сплава в энергетике и промышленности

- 7.1 Область электромобилей
 - 7.1.1 Вес ротора двигателя
 - 7.1.2 Теплоотводящая подложка батарейного модуля
- 7.2 Промышленные системы охлаждения
 - 7.2.1 База охлаждения сервера
 - 7.2.2 Подложка для упаковки силовых полупроводников

Глава 8 Применение вольфрамо-никелевого медного сплава в области обороны и военной промышленности

- 8.1 Оборудование для электронных противотанков
 - 8.1.1 Сборка контрольного веса для противотанков
 - 8.1.2 Компоненты радарных обманок
- 8.2 Системы боеприпасов
 - 8.2.1 Контрольный вес боеголовки снаряда
 - 8.2.2 Балансировочные компоненты ракетных боеголовок
- 8.3 Броня и защитное оборудование
 - 8.3.1 Усилители легких броневых пластин
 - 8.3.2 Защитные облицовки броневых машин
- 8.4 Космические вооружения
 - 8.4.1 Компоненты сопел ракетных двигателей
 - 8.4.2 Контрольные веса для регулировки положения космического корабля

Глава 9 Применение вольфрамо-никелевого медного сплава в медицинской области

- 9.1 Оборудование для радиотерапии
 - 9.1.1 Сборка экранировки для радиотерапии
 - 9.1.2 Компоненты радиационного коллиматора
- 9.2 Оборудование для диагностической визуализации
 - 9.2.1 Защитные части детектора КТ
 - 9.2.2 Контрольные веса для МРТ-оборудования
- 9.3 Хирургические инструменты
 - 9.3.1 Высокоточные позиционирующие компоненты для хирургической навигации
 - 9.3.2 Направляющие компоненты для малоинвазивных интервенционных устройств
- 9.4 Средства реабилитации
 - 9.4.1 Весовые компоненты протезных суставов
 - 9.4.2 Детали регулировки баланса для реабилитационного оборудования

Глава 10 Сравнение вольфрамо-никелевого медного сплава с другими материалами

- 10.1 Анализ конкурентных материалов вольфрамо-никелевого медного сплава
 - 10.1.1 Сравнение с вольфрамо-никелевым железным сплавом
 - 10.1.2 Сравнение с медновольфрамовым сплавом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2 Исследование и разработка передовых технологий для вольфрамо-никелевого медного сплава

10.2.1 Наноструктурированные сплавы

10.2.2 Функционально градиентные материалы

10.3 Экологичная технология производства вольфрамо-никелевого медного сплава

10.3.1 Экологически чистый процесс получения

10.3.2 Технология переработки отходов

Глава 11 Часто встречаемые проблемы и решения для вольфрамо-никелевого медного сплава

11.1 Процесс получения вольфрамо-никелевого медного сплава

11.1.1 Решения проблем с дефектами при спекании

11.1.2 Контроль однородности состава

11.2 Анализ отказов в эксплуатации вольфрамо-никелевого медного сплава

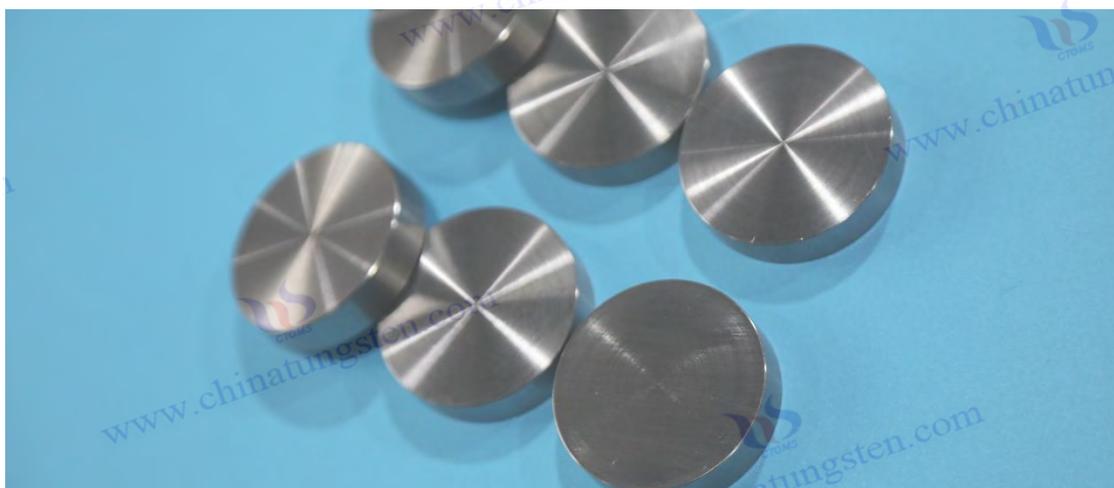
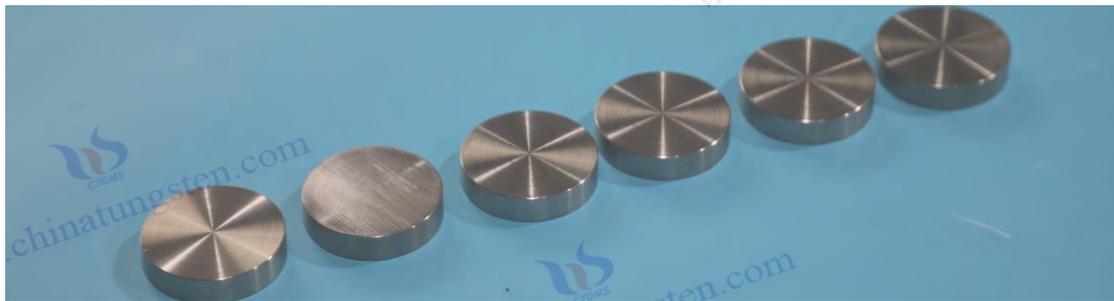
11.2.1 Решения проблем с отказами при тепловых циклах

11.2.2 Защита от коррозии окружающей среды

Приложение:

Терминалогия вольфрамо-никелевого медного сплава

Список источников



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 1. Обзор сплава вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрама с никелем и медью (Tungsten-Nikel-Coppe) – это сплав высокой плотности, основным компонентом которого является вольфрам, а связующим – никель и медь. Он широко используется в аэрокосмической, медицинской, точной приборостроительной и военной промышленности благодаря высокой плотности (16,5–18,5 г/см³), отличным механическим свойствам (предел прочности на разрыв 700–900 МПа, относительное удлинение 5–15%), немагнитным свойствам и хорошей коррозионной стойкости. По сравнению со сплавом вольфрама с никелем и железом, сплав вольфрама с никелем и медью обладает немагнитными свойствами благодаря добавлению меди, что позволяет ему эффективно работать в средах, чувствительных к электромагнитному излучению, сохраняя при этом высокую плотность и обрабатываемость.

1.1 Определение и классификация сплава вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрам-никель-медь представляет собой сплав на основе вольфрама высокой плотности, полученный методом порошковой металлургии. Он состоит в основном из вольфрама (обычно 85%–97% по массе), с никелем и медью в качестве связующих фаз, что придает сплаву высокую плотность, высокую прочность и хорошие технологические свойства. Его основными характеристиками являются немагнитность, отличная теплопроводность (120-150 Вт / м · К) и низкий коэффициент теплового расширения ($4,5-6,0 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$), что позволяет ему хорошо работать в сценариях, требующих противобесов высокой плотности или радиационной защиты. Сплавы вольфрам-никель-медь можно разделить на различные типы в зависимости от содержания вольфрама, соотношения никеля и меди и требований к эксплуатационным характеристикам, и обычно классифицируются по плотности или области применения. Далее будет подробно проанализирован диапазон состава его тройной системы и корреляция между классификацией по плотности и применением.

1.1.1 Диапазон составов тройной системы

вольфрама -никеля-меди в основном состоит из вольфрама (W), никеля (Ni) и меди (Cu). Соотношение этих трех элементов напрямую влияет на плотность, механические свойства и характеристики применения сплава. Вольфрам, как элемент с высокой плотностью (19,25 г/см³), является основным компонентом сплава, обычно составляя 85%–97% массовой доли. Никель и медь, как связующие фазы, заполняют промежутки между частицами вольфрама, улучшают ударную вязкость и технологические свойства сплава, а также снижают твердость (твердость по Виккерсу 250-350 HV), что делает его более легким в обработке, чем чистый вольфрам (твердость >400 HV). Типичный диапазон состава сплава вольфрама-никеля-меди составляет: 85%–97% вольфрама, 2%–10% никеля и 1%–8% меди. Конкретное соотношение регулируется в соответствии с требованиями применения.

В реальном производстве содержание вольфрама определяет плотность и прочность сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Например, 90W-7Ni-3Cu (90% вольфрама, 7% никеля, 3% меди) — распространённая формула с плотностью около 17,0 г/см³ и пределом прочности на разрыв около 750–850 МПа, что подходит для противовесов в аэрокосмической отрасли. Увеличение содержания вольфрама до 95W-3.5Ni-1.5Cu позволяет достичь плотности 18,0 г/см³ и прочности 800–900 МПа, что подходит для защиты от медицинского излучения. Роль никеля заключается в повышении прочности и коррозионной стойкости, а его стойкость к окислению (образуя защитный слой NiO) позволяет сплаву эффективно работать во влажных и химических средах. Добавление меди не только дополнительно повышает прочность, но и делает сплав немагнитным (медь — парамагнитный материал), что делает его более эффективным по сравнению со сплавами вольфрама, никеля и железа в средах, чувствительных к электромагнитному излучению (например, в оборудовании МРТ). Теплопроводность меди (около 400 Вт/м·К) также улучшает теплопроводность сплава, давая ему преимущество в ситуациях, где требуется быстрый отвод тепла (например, в балансировочных блоках фотолитографических машин).

Выбор соотношения компонентов в составе должен обеспечивать баланс между производительностью и стоимостью. Чем выше содержание вольфрама, тем выше плотность и прочность, но при этом возрастает сложность обработки, а дефицит вольфрамовых ресурсов увеличивает стоимость. Соотношение никеля и меди необходимо точно контролировать. Слишком высокое содержание никеля может увеличить риск сенсбилизации (медицинские изделия должны пройти испытания на биосовместимость по ISO 10993), а слишком высокое содержание меди может снизить прочность. В производстве сплав изготавливается методом порошковой металлургии. Никель и медь образуют жидкую фазу в процессе спекания, что способствует связыванию частиц вольфрама, и плотность может достигать более 99,5%. Контроль качества использует рентгенофлуоресцентную спектроскопию (РФС) или атомно-эмиссионную спектроскопию с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) для анализа состава, чтобы гарантировать точность определения вольфрама $\pm 0,5\%$, никеля $\pm 0,2\%$ и меди $\pm 0,2\%$. Микроструктурный анализ (СЭМ-ЭДС) дополнительно подтверждает равномерность распределения частиц вольфрама и целостность связующей фазы, предотвращая образование пор и включений, влияющих на эксплуатационные характеристики. Изменение состава (например, увеличение содержания никеля до 8% для повышения прочности) может соответствовать специфическим требованиям, например, для изготовления противовесов прецизионных приборов или элементов защитных экранов военного назначения.

1.1.2 Классификация плотности и связь с применением

вольфрама с никелем и медью является важной основой для его классификации и применения. Он обычно подразделяется на различные марки в зависимости от содержания вольфрама, с плотностью от 16,5 г/см³ до 18,5 г/см³, соответствующей различным сферам применения. Классификация по плотности напрямую влияет на весовой эффект, экранирующие свойства и механические свойства сплава и тесно связана с конкретными потребностями аэрокосмической, медицинской, прецизионной и военной отраслей. Международные стандарты, такие как ASTM B777 и ISO 20886, классифицируют сплавы на основе вольфрама по плотности на несколько

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

марок. Сплавы вольфрам-никель-медь обычно подразделяются на класс 1 (16,5–17,0 г/см³), класс 2 (17,0–17,5 г/см³), класс 3 (17,5–18,0 г/см³) и класс 4 (18,0–18,5 г/см³), и каждая марка соответствует определенным эксплуатационным характеристикам и областям применения.

Сплавы низкой плотности (типичная формула 90W-7Ni-3Cu) подходят для применений, требующих умеренной плотности и высокой прочности, например, для изготовления противовесов в аэрокосмической промышленности (элероны самолетов или роторы вертолетов). Более низкая плотность (по сравнению с высоковольфрамовыми сплавами) снижает затраты на материал, сохраняя при этом прочность на разрыв 750–850 МПа и относительное удлинение 10–15%, что делает их пригодными для деталей, подверженных вибрации и ударам. В процессе обработки сплавы класса 1 формируются методом жидкофазного спекания и механической обработки (на станках с ЧПУ или электроэрозионной обработке) для удовлетворения требований к точности, предъявляемых к аэрокосмической промышленности.

Марки средней плотности (типичная формула 93W-5Ni-2Cu или 95W-3.5Ni-1.5Cu) широко используются в области медицины и точных приборов. В медицинском оборудовании КТ/МРТ сплавы класса 2/3 используются для экранирования компонентов, эффективно поглощая рентгеновские и гамма-лучи (вольфрам имеет высокий атомный номер $Z=74$) для защиты персонала и оборудования. Его немагнитные свойства гарантируют, что он не мешает магнитному полю МРТ, что лучше, чем у сплавов вольфрама с никелем и железом. Прочность на разрыв 800–900 МПа и теплопроводность (120–140 Вт/м·К) делают его пригодным для высокотемпературных или динамических сред, таких как коллиматоры радиотерапевтического оборудования. Обработка использует горячее изостатическое прессование для обеспечения плотности >99,5%, а поверхностные покрытия (например, PVD TiN) повышают коррозионную стойкость и износостойкость.

Высокоплотные марки (типичная формула 97W-2Ni-1Cu) используются в военных и высокоточных приборах, таких как сердечники броневой снарядов или балансировочные блоки для фотолитографических платформ. Высокая плотность обеспечивает чрезвычайно высокую кинетическую энергию или эффект противовеса, а прочность на разрыв 850–900 МПа гарантирует исключительную стойкость к нагрузкам. Обработка более сложна и требует использования инструментов из кубического нитрида бора (CBN) или лазерной микрообработки. Контроль качества включает проверку отклонения плотности и пористости по стандарту ASTM B777 для обеспечения стабильности характеристик.

При оптимизации классификации по плотности и сопоставлении областей применения необходимо учитывать баланс между стоимостью и производительностью. Высокоплотные марки стоят дороже (с высоким содержанием вольфрама), но подходят для высоких требований к производительности; марки с низкой плотностью более экономичны и подходят для крупномасштабного производства. Аддитивное производство (например, селективное плавление расплавленных металлов) позволяет производить изделия сложной формы по индивидуальному заказу и снизить затраты на обработку. В будущем разработка новых соотношений никеля и меди

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

или добавление микроэлементов (например, кобальта) позволит дополнительно оптимизировать плотность и прочность, а также расширить область применения.

1.2 История развития сплава вольфрам-никель-медь

вольфрама -никеля-меди широко используется в аэрокосмической, военной, медицинской и электронной промышленности благодаря своим превосходным физическим и химическим свойствам. Его разработка прошла несколько этапов от фундаментальных исследований до военного применения, а затем до широкомасштабного применения в современной электронной промышленности. Технологические прорывы и рыночный спрос на каждом этапе способствовали оптимизации характеристик и расширению применения сплава вольфрама-никеля-меди, что сделало его незаменимым материалом в области высоких технологий. В этом разделе подробно рассматриваются происхождение и ранние исследования сплава вольфрама-никеля-меди, период военного применения и процесс разработки широкомасштабного применения в современной электронной промышленности на основе надежной технологии и исторического опыта, избегая помех со стороны ненадежных данных.

1.2.1 Происхождение и ранние исследования

вольфрама с никелем и медью берёт своё начало в XX веке, с развитием исследований сплавов высокой плотности на основе вольфрама. Вольфрам считается идеальным выбором для производства высокопроизводительных материалов благодаря своей высокой плотности (19,25 г/см³) и высокой температуре плавления (3422 °C), однако хрупкость и сложность обработки чистого вольфрама ограничивают его применение. Ранние исследования были сосредоточены на улучшении механических свойств и обрабатываемости вольфрама путём добавления связующей фазы. Введение никеля и меди в качестве связующей фазы обусловлено их способностью образовывать жидкую фазу при высоких температурах, способствуя связыванию частиц вольфрама, одновременно снижая твёрдость сплава и повышая его вязкость.

С 1930-х по 1950-е годы достижения в технологии порошковой металлургии заложили основу для разработки сплавов вольфрам-никель-медь. Исследователи обнаружили, что посредством спекания в жидкой фазе никель и медь могут образовывать однородную связующую фазу между частицами вольфрама, значительно улучшая плотность (>99,5%) и механические свойства сплава. Ранние эксперименты в основном изучали влияние различных соотношений никеля и меди на свойства сплава. Например, формула 90W-7Ni-3Cu имеет плотность около 17,0 г/см³ и прочность на разрыв около 750 МПа, что подходит для использования в качестве противовесов и экранов. В отличие от сплавов вольфрам-никель-железо, добавление меди придает сплаву немагнитные свойства, что делает его потенциально пригодным для использования в средах, чувствительных к электромагнитному излучению. Исследование также сосредоточено на микроструктуре сплава, анализе распределения частиц вольфрама и фазовой структуры с помощью металлографической микроскопии и рентгеновской дифракции (XRD) для оптимизации параметров процесса спекания. В этот период разработки в основном концентрировались в лабораторных условиях и на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мелкосерийных испытаниях с ограниченным спектром применения, в основном для фундаментальных научных исследований и промышленных экспериментов. Например, сплав вольфрама, никеля и меди был опробован для изготовления компонентов противовеса ранней авиационной техники благодаря его высокой плотности и немагнитным свойствам, превосходящим свинец или сталь. Производственный процесс основан на простых печах для прессования и спекания порошков с низкой точностью обработки (допуск $\pm 0,1$ мм), что ограничивает изготовление деталей сложной формы. Тем не менее, ранние исследования заложили теоретическую основу для оптимизации характеристик и последующего применения сплавов вольфрама, никеля и меди, закрепив их позиции в области сплавов высокой плотности.

1.2.2 Период военного применения

В период с 1960-х по 1990-е годы разработка сплавов вольфрама, никеля и меди в значительной степени диктовалась военными потребностями. По мере усиления гонки вооружений во время холодной войны резко возрос спрос на высокопроизводительные материалы для систем вооружения, особенно на высокоплотные, немагнитные и высокопрочные материалы для боеприпасов и средств защиты. Сплавы вольфрама, никеля и меди стали идеальным выбором для военной промышленности благодаря своим превосходным свойствам, особенно в электромагнитно-чувствительном или высокоточном оборудовании.

В военных приложениях сплавы вольфрама, никеля и меди широко используются для изготовления сердечников бронебойных снарядов и компонентов защиты. По сравнению со сплавами вольфрама, никеля и железа (которые обладают слабым ферромагнетизмом), немагнитная природа сплавов вольфрама, никеля и меди делает их подходящими для компонентов радиолокационных или электромагнитных навигационных систем, чтобы избежать помех. Типичные формулы, такие как 93W-5Ni-2Cu (плотность $17,5$ г/см³), используются в сердечниках бронебойных снарядов с кинетической энергией (APFSDS), обеспечивая высокую проникающую способность при сохранении хорошей вязкости для сопротивления высокоскоростному удару. Сплав также используется для изготовления деталей защиты ракет или кораблей для поглощения радиолокационных волн или излучения и защиты электронного оборудования. Достижения в области процессов порошковой металлургии, особенно внедрение горячего изостатического прессования, значительно улучшили плотность и механические свойства сплава для соответствия военным стандартам.

В этот период технологии производства значительно усовершенствовались. Современные печи для спекания и система управления атмосферой (аргон высокой чистоты) снизили пористость и улучшили микроструктурную однородность. Технологии механической обработки (такие как ЧПУ и электроэрозионная обработка) обеспечили высокую точность, что позволило изготавливать детали сложной формы. Контроль качества осуществлялся с помощью рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (РФС) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ-ЭДС) для проверки состава (вольфрам $\pm 0,5\%$) и структуры, что обеспечивало стабильность характеристик. Рост спроса на продукцию военного назначения привел к переходу сплавов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама с никелем и медью из лабораторного в промышленное производство, что привело к увеличению объёмов производства и некоторому снижению затрат, однако дефицит вольфрама по-прежнему ограничивал его широкомасштабное применение.

1.2.3 Широкомасштабное применение в современной электронной промышленности

В XXI веке широкомасштабное применение сплава вольфрама, никеля и меди в электронной промышленности стало новой движущей силой её развития. Стремительное развитие полупроводниковой промышленности, оптических приборов и медицинского оборудования привело к резкому росту спроса на материалы высокой плотности, немагнитные и с высокой теплопроводностью. Благодаря своей немагнитности, высокой теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения сплав вольфрама, никеля и меди стал ключевым материалом в электронной промышленности, особенно в литографических машинах, медицинском диагностическом оборудовании и прецизионных приборах.

В производстве полупроводников сплавы вольфрам-никель-медь используются для балансировочных блоков и компонентов гашения вибраций литографических платформ. Например, в экстремальной ультрафиолетовой литографии (EUV) балансировочные блоки из 95W-3.5Ni-1.5Cu (плотность 18,0 г/см³) оптимизируют динамическую устойчивость платформы, подавляют субнанометровые вибрации и обеспечивают точность гравировки узора. Его немагнитные свойства позволяют избежать помех в высокоточных электромагнитных системах, а его теплопроводность быстро рассеивает тепло, генерируемое лазером. В медицинской области сплав используется в экранирующих компонентах оборудования КТ/МРТ, эффективно поглощая рентгеновские и гамма-лучи (атомный номер вольфрама $Z=74$) для защиты персонала и оборудования. Его биосовместимость (протестирована по ISO 10993) делает его пригодным для медицинских применений, а поверхностные покрытия (такие как PVD TiN) дополнительно повышают коррозионную стойкость и безопасность.

С точки зрения производственных технологий, внедрение технологии аддитивного производства (SLM) значительно повысило производительность сложных деталей и сократило отходы материалов. Зеленые производственные технологии (такие как микроволновое спекание и рекуперация отходящего тепла) снижают энергопотребление и соответствуют стандартам защиты окружающей среды ISO 14001. Технологии переработки (такие как химическое растворение и электрохимическое разделение) увеличивают степень повторного использования лома сплавов и снижают давление, вызванное дефицитом ресурсов вольфрама. Контроль качества проверяет плотность, прочность и пористость по стандартам ASTM B777 в сочетании с вибрационными испытаниями и спектральным анализом для обеспечения производительности компонентов. Масштабный спрос электронной промышленности способствовал автоматизации производства и оптимизации цепочки поставок вольфрам-никелево-медных сплавов, что дополнительно снижает затраты и обеспечивает их широкое применение в высокотехнологичных областях.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

High Density: Typically 16.5 - 18.75 g/cm³

High Thermal Conductivity: Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

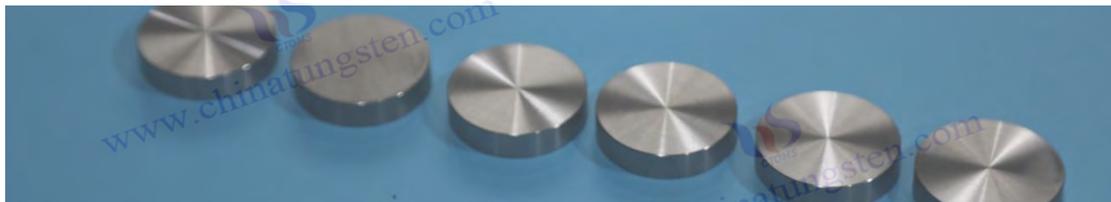
4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 2 Микроструктура сплава вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрама-никеля-меди представляет собой сплав высокой плотности, в котором вольфрам является основным компонентом (обычно 85% -97% по массе), а никель и медь являются связующей фазой. Его микроструктура напрямую определяет его превосходные физические и химические свойства, такие как высокая плотность (16,5-18,5 г/см³), прочность на разрыв (700-900 МПа), относительное удлинение (5% -15%), немагнитность и хорошая теплопроводность (120-150 Вт/ м· К) . Микроструктура в основном состоит из частиц вольфрама и связующих фаз никеля и меди, а однородная и плотная структура формируется с помощью процессов порошковой металлургии, таких как спекание в жидкой фазе и горячее изостатическое прессование. Частицы вольфрама обеспечивают высокую плотность и высокую прочность, в то время как связующая фаза никеля и меди повышает вязкость и технологические свойства, придавая сплаву немагнитные свойства.

2.1 Микроструктурные характеристики сплава вольфрам-никель-медь

Микроструктурные характеристики сплавов вольфрам-никель-медь являются основой их свойств, которые проявляются в распределении и взаимодействии частиц вольфрама и связующих фаз никеля-меди в микрометровом масштабе. Частицы вольфрама (объемно-центрированная кубическая структура, ОЦК) как основная фаза занимают 80% -95% объема сплава, обеспечивая высокую плотность и высокую твердость (твердость по Виккерсу 250-350 HV). Связующая фаза никеля-меди (гранцентрированная кубическая структура, ГЦК) заполняет промежутки между частицами вольфрама, образуя непрерывную матрицу, повышая ударную вязкость и коррозионную стойкость. Микроструктура охарактеризована с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и рентгеновской дифракции (РФА), показывающих равномерное распределение частиц вольфрама и сетчатую структуру фаз никеля-меди. Жидкофазное спекание позволяет никелю и меди образовывать жидкую матрицу при высокой температуре, что способствует перераспределению и связыванию частиц вольфрама, а плотность может достигать более 99,5%. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропористость и обеспечивает структурную однородность. Эти характеристики позволяют использовать сплав в противовесах для аэрокосмической промышленности, медицинских защитных устройствах и балансирах в электронной промышленности. Распределение частиц вольфрама и распределение связующей фазы никеля и меди будет подробно проанализировано ниже.

2.1.1 Распределение частиц вольфрама

вольфрама являются ядром микроструктуры сплава вольфрам-никель-медь, что напрямую влияет на плотность, прочность и термическую стабильность сплава. Частицы вольфрама обычно имеют полигональную или близкую к сферической форму с диапазоном размеров частиц 10-50 мкм , а конкретный размер зависит от размера частиц исходного порошка и параметров процесса спекания. В типичной формуле (например, 90W-7Ni - 3Cu или 95W-3.5Ni-1.5Cu) частицы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама составляют 80%-95% объемной доли, образуя плотную скелетную структуру, обеспечивая основную массу (плотность 16,5-18,5 г/см³) и твердость (твердость по Виккерсу 250-350 HV) сплава. Наблюдения в сканирующем электронном микроскопе показывают, что частицы вольфрама распределены равномерно, без явных агломераций или пор, контакт между ними плотный, а границы чёткие. Это равномерное распределение обусловлено смачивающим эффектом жидкой фазы никеля и меди во время жидкофазного спекания, что способствует перегруппировке частиц вольфрама и формированию плотной структуры.

На частицы вольфрама влияет множество факторов. Во-первых, решающее значение имеет качество исходного порошка. Высокочистый вольфрамовый порошок (чистота >99,9%) получают путем распыления или восстановления для обеспечения однородного размера частиц после спекания. Если размер частиц порошка слишком большой, это может привести к увеличению зазоров между частицами и снижению плотности; если он слишком маленький, это может увеличить усадку при спекании, что приведет к деформации или трещинам. Во-вторых, параметры процесса спекания оказывают значительное влияние на распределение частиц. Соответствующая температура спекания позволяет жидкой фазе никеля и меди полностью смачивать частицы вольфрама и способствовать перегруппировке частиц; слишком высокие температуры могут вызвать чрезмерный рост частиц вольфрама и снизить ударную вязкость. Горячее изостатическое прессование (ГИП) дополнительно сжимает частицы за счет высокого давления и высокой температуры, устраняет микропоры и улучшает прочность контакта между частицами. Анализ рентгеновской дифракции показывает, что частицы вольфрама сохраняют ОЦК-структуру, не претерпевают значительного твердого раствора с фазой никеля и меди и сохраняют высокую твердость и термическую стабильность.

вольфрама критически важно для эксплуатационных характеристик сплава. Равномерное распределение частиц обеспечивает постоянство плотности и стабильное положение центра тяжести в противовесах для аэрокосмической промышленности; высокая плотность повышает прочность на разрыв и подходит для использования в бронебойных сердечниках военных снарядов, выдерживающих высокие ударные нагрузки. Анализ методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) используется для проверки равномерности распределения частиц и отсутствия включений и сегрегации. Контроль качества осуществляется в соответствии со стандартами ASTM B777, а для подтверждения соответствия распределения частиц установленным требованиям используются измерения плотности и металлографический анализ.

2.1.2 Распределение связующей фазы Ni-Cu

Фаза связи никель-медь играет ключевую роль в сплаве вольфрам-никель-медь, заполняя промежутки между частицами вольфрама, образуя непрерывную структуру матрицы и значительно улучшая вязкость, обрабатываемость и немагнитные свойства сплава. Фаза никель-медь существует в гранцентрированной кубической (ГЦК) структуре, обычно составляя 5%-20% объемной доли, а конкретная пропорция зависит от формулы сплава (например, 10% массовая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

доля никеля-меди в 90W-7Ni-3Cu). При наблюдении в СЭМ фаза никель-медь распределена сетчатым образом, обволакивая частицы вольфрама, образуя однородную связующую матрицу. Анализ EDS показывает, что никель и медь образуют твердый раствор (сплав Ni-Cu) в связующей фазе без очевидного разделения фаз, а атомное соотношение никеля и меди близко к расчетному соотношению (например, 7:3 или 3,5:1,5). Такое равномерное распределение обусловлено низкой температурой плавления никеля (температура плавления 1455 °C) и меди (температура плавления 1085 °C) во время процесса жидкофазного спекания, в результате чего образуется жидкая фаза, смачивающая частицы вольфрама, заполняющая промежутки и способствующая уплотнению.

Характеристики распределения связующей фазы никеля и меди оказывают важное влияние на свойства сплава. Никель обеспечивает отличную коррозионную стойкость (образуя защитный слой NiO), что сохраняет сплав стабильным во влажных или химических средах (например, в условиях стерилизации медицинского оборудования). Добавление меди повышает теплопроводность, что подходит для балансировочных блоков или экранирующих деталей, требующих быстрого рассеивания тепла в электронной промышленности. Немагнитность является главным преимуществом фазы никеля и меди. Поскольку никель и медь являются парамагнитными материалами, это позволяет избежать ферромагнитных помех, что подходит для применения в чувствительных к электромагнитному излучению областях, таких как оборудование МРТ или фотолитографические машины. Прочность фазы никеля и меди компенсирует хрупкость частиц вольфрама, делая сплав менее склонным к растрескиванию при обработке (например, токарная обработка с ЧПУ, фрезерование) или динамических нагрузках (например, в условиях вибрации в аэрокосмической промышленности). Оптимизация процесса спекания является ключом к достижению равномерного распределения. Жидкофазное спекание требует контроля температуры и атмосферы (высокоочищенный аргон), чтобы избежать чрезмерного течения жидкой фазы никеля и меди и сегрегации. Горячее изостатическое прессование (ГИП) дополнительно уплотняет связующую фазу, устраняет микропоры и обеспечивает сплошность матрицы.

Распределение никель-медных фаз также сталкивается с некоторыми проблемами. Избыточное содержание никеля может увеличить риск сенсбилизации и требует проведения испытаний на биосовместимость по стандарту ISO 10993 в медицинских целях. Избыточное содержание меди может снизить прочность, поскольку прочность твердого раствора Ni-Cu ниже, чем у частиц вольфрама. В процессе обработки пластичность никель-медной фазы может привести к налипанию или образованию заусенцев на поверхности, поэтому необходимо оптимизировать параметры резки (например, низкоскоростная резка инструментами из кубического нитрида бора). Контроль качества анализирует распределение и состав никель-медной фазы с помощью сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (СЭМ) и рентгеновской дифракции (РД) для подтверждения однородности твердого раствора. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия PVD TiN или DLC) может повысить коррозионную стойкость и износостойкость, а также продлить срок службы компонентов. В будущем технология аддитивного производства позволит добиться индивидуального распределения никель-медных фаз путем точного контроля соотношения порошков и параметров печати (например, мощности лазера), что позволит дополнительно оптимизировать характеристики сплава в медицинских

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

защитных деталях или электронных весах.

2.1.3 Механизм образования шейки при спекании

Образование шейки спекания является ключевым механизмом уплотнения сплава вольфрама-никеля-меди во время спекания в жидкой фазе, что напрямую влияет на микроструктуру, механические свойства и плотность (>99,5%) сплава. Сплав вольфрама-никеля-меди получают методом порошковой металлургии, а спекание в жидкой фазе является основным этапом, на котором никель (температура плавления 1455 °C) и медь (температура плавления 1085 °C) образуют жидкую матрицу при высокой температуре, смачивают частицы вольфрама (температура плавления 3422 °C, остаются твердыми), способствуют связыванию между частицами и образуют шейку спекания. Шейка спекания представляет собой область соединения, образованную мостиком жидкой фазы между частицами вольфрама, что повышает структурную целостность и прочность сплава.

В начале спекания порошок вольфрама (размер частиц 10-50 мкм), порошок никеля и порошок меди смешивают и прессуют в заготовку. Начальная точка контакта является точечным контактом, а зазор между частицами большой. При повышении температуры до определенного уровня никель и медь плавятся, образуя жидкую фазу Ni-Cu. Благодаря низкому поверхностному натяжению и хорошей смачиваемости вольфрамом (угол смачивания <30°), жидкая фаза быстро заполняет зазор между частицами вольфрама и смачивает поверхность частиц за счет капиллярного действия. Смачивание жидкой фазой способствует перегруппировке частиц, заставляя частицы вольфрама перемещаться и сближаться, образуя более компактную структуру укладки. По мере увеличения времени выдержки жидкая фаза дополнительно воздействует на частицы вольфрама через механизмы диффузии и растворения-пересадки. Небольшое количество атомов вольфрама растворяется в жидкой фазе и пересаживается в точку контакта частиц, образуя шейку спекания. Рост шейки спекания увеличивает силу связи между частицами и значительно улучшает плотность сплава.

На более поздней стадии спекания жидкая фаза продолжает заполнять оставшиеся поры и устраняет мелкие поры путем диффузии и массопереноса. Горячее изостатическое прессование дополнительно уплотняет структуру и устраняет остаточные поры, а плотность может достигать 99,5%. Наблюдение в СЭМ показывает, что шейка спекания представляет собой дугообразную или мостовидную структуру, соединяющую соседние частицы вольфрама с образованием трехмерной скелетной сети. Анализ рентгеновской дифракции подтверждает, что частицы вольфрама сохраняют объемно-центрированную кубическую (ОЦК) структуру без значительного твердого раствора, а твердый раствор Ni-Cu в жидкой фазе представляет собой гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру. На образование шейки спекания влияют параметры процесса: слишком высокая температура может вызвать чрезмерный поток жидкой фазы, что приводит к сегрегации никеля и меди или чрезмерному росту частиц вольфрама, что снижает ударную вязкость; слишком низкая температура приведет к недостаточному количеству жидкой фазы, неполному спеканию шейки и снижению плотности. Соотношение никеля и меди

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(обычно 7:3 или 3,5:1,5) также влияет на количество жидкой фазы. Высокое содержание никеля повышает текучесть жидкой фазы и способствует росту шейки спекания, но может снизить прочность; высокое содержание меди снижает температуру плавления жидкой фазы, что благоприятно для спекания, но может привести к сегрегации.

Формирование спекающихся шеек имеет решающее значение для производительности. Плотные спекающиеся шейки улучшают межчастичные связи, повышают прочность на разрыв (700–900 МПа) и ударную вязкость, что подходит для противовесов в аэрокосмической промышленности или броневых сердечников военного назначения, выдерживающих высокие нагрузки. Равномерное распределение спекающихся шеек обеспечивает постоянную плотность и стабильное поглощение излучения в медицинских защитных деталях. Контроль качества анализирует морфологию и состав спекающихся шеек с помощью металлографической микроскопии и СЭМ-ЭДС для проверки пористости и распределения жидкой фазы. В будущем использование наноразмерного вольфрамового порошка или технологии быстрого спекания (например, искрового плазменного спекания, SPS) может оптимизировать формирование спекающихся шеек, сократить время спекания, повысить эффективность и сохранить производительность.

2.2 Микроструктура и характеристики интерфейса сплава вольфрам-никель-медь

вольфрама с никелем и медью, особенно прочность межфазной связи между частицами вольфрама и связующей фазой никеля и меди, играет решающую роль в механических свойствах, термической стабильности и долговечности сплава. Прочность межфазной связи определяет надежность сплава при динамических нагрузках (таких как вибрация или удар) или в условиях высоких температур и напрямую влияет на его эксплуатационные характеристики в противовесах для аэрокосмической промышленности, медицинских защитных элементах и балансирах электронной промышленности. Граница между частицами вольфрама (структура ОЦК) и связующей фазой никеля и меди (структура ГЦК) прочно связана посредством жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования, демонстрируя превосходную механическую и химическую стабильность.

2.2.1 Прочность связи на границе раздела фаз вольфрам-связующее

Прочность связи на границе раздела фаз вольфрам-связующее является ключевой характеристикой микроструктуры сплава вольфрам-никель-медь, которая определяет прочность на растяжение, вязкость и усталостную прочность сплава. Связь на границе раздела образуется за счет смачивания и диффузии жидкой фазы никеля-меди в процессе жидкофазного спекания. Поверхность частиц вольфрама образует полукогерентный или некогерентный интерфейс с твердым раствором Ni-Cu. Прочность связи в основном обеспечивается механической интеркаляцией, химической связью и диффузией. Наблюдение в СЭМ показывает, что интерфейс представляет собой непрерывную и гладкую переходную зону толщиной около 0,1-1 мкм, без очевидных трещин или пор. Анализ EDS показывает, что на границе раздела наблюдается

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

незначительная диффузия элементов, и небольшое количество атомов вольфрама растворяется в фазе никеля - меди, образуя переходный слой для усиления силы связи. Прочность связи интерфейса оценивается путем испытания на растяжение (ASTM E8) и фрактографического анализа, которые обычно показывают высокую прочность на сдвиг и хорошую вязкость разрушения.

Спекание в жидкой фазе является ключевым процессом для формирования межфазной связи. При температуре 1450-1550 °C никель и медь плавятся, образуя жидкую фазу Ni-Cu, которая смачивает частицы вольфрама (угол смачивания $<30^\circ$) и заполняет промежутки между частицами за счет капиллярного действия. Низкое поверхностное натяжение и высокий коэффициент диффузии жидкой фазы способствуют микрорастворению поверхности вольфрама (растворимость <2 мас. %) с образованием химической связи. На более поздней стадии спекания жидкая фаза затвердевает, образуя твердый раствор Ni-Cu с ГЦК-структурой, который обволакивает частицы вольфрама, а механическое сцепление дополнительно усиливает межфазную связь. Горячее изостатическое прессование (HIP) сжимает границу раздела под высоким давлением, устраняет микропоры, увеличивает площадь контакта и повышает прочность связи. Качество прочности межфазной связи напрямую влияет на эксплуатационные характеристики сплава. В противовесах для аэрокосмической промышленности высокая прочность связи гарантирует, что компоненты не подвергаются отслоению интерфейса под воздействием высокочастотной вибрации; в медицинских защитных деталях стабильный интерфейс обеспечивает долгосрочное использование без ухудшения характеристик. Прочность связи интерфейса зависит от многих факторов. Чистота ($>99,9\%$) и состояние поверхности (например, содержание оксида $<0,1\%$) вольфрамового порошка имеют решающее значение для смачиваемости. Оксиды могут вызывать дефекты интерфейса и снижать прочность связи. Соотношение никеля и меди (обычно 7:3) влияет на количество жидкой фазы и свойства твердого раствора. Слишком высокое содержание никеля может привести к избыточному количеству жидкой фазы на интерфейсе, вызывая сегрегацию; слишком высокое содержание меди ($>8\%$) снижает прочность твердого раствора. Параметры спекания должны точно контролироваться. Слишком высокая температура может вызвать чрезмерное растворение частиц вольфрама, расширяя интерфейс, но снижая прочность; слишком низкая температура может привести к недостаточному количеству жидкой фазы и неполному связыванию интерфейса. Контроль качества осуществляется с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и электронного рассеивания электронов (EBSD) для анализа микроструктуры интерфейса, проверки кристаллографического соответствия и распределения дефектов. Анализ изломов показывает, что характер разрушения прочного интерфейса преимущественно вязкий, с образованием ямок.

Оптимизация прочности связи на границе раздела требует усовершенствования технологических процессов. Использование наноразмерного вольфрамового порошка позволяет увеличить площадь контакта на границе раздела и повысить прочность связи (более 600 МПа). Технология быстрого спекания (например, SPS) снижает чрезмерную диффузию на границе раздела при кратковременном воздействии высокой температуры и сохраняет структурную стабильность. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия TiN методом PVD) может повысить

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионную стойкость границы раздела и продлить срок службы медицинских или электронных компонентов.

2.2.2 Влияние микроэлементов на интерфейс

Прочность связи интерфейса вольфрам-связующее сплавов вольфрам-никель-медь является ключевым фактором, определяющим их механические свойства и надежность, а введение микроэлементов оказывает существенное влияние на характеристики интерфейса. Микроэлементы (такие как кобальт, молибден, хром, углерод или кислород, обычно <0,5 мас. %) могут иметь происхождение из примесей в исходном порошке или быть намеренно добавлены для оптимизации связи интерфейса, механических свойств или коррозионной стойкости. Эти элементы влияют на прочность связи (прочность на сдвиг > 500 МПа) между частицами вольфрама и твердым раствором Ni-Cu (структура ГЦК), изменяя смачиваемость, диффузионное поведение и микроструктуру интерфейса жидкой фазы никеля-меди. В противovesах аэрокосмической техники, медицинских защитных деталях и балансирах электронной промышленности оптимизация прочности интерфейса напрямую связана с долговременной стабильностью и усталостной прочностью компонентов.

Следовые количества кобальта часто используются в качестве добавок, поскольку они образуют более стабильный твердый раствор ГЦК с никелем, повышая прочность и ударную вязкость связующей фазы. Анализ SEM-EDS показывает, что кобальт равномерно распределен в никель-медной фазе, увеличивая смачиваемость жидкой фазы во время жидкофазного спекания (угол контакта уменьшается до <25°), способствуя росту спекающихся шеек и улучшая прочность межфазного сцепления (которая может быть увеличена до 550-600 МПа). Кобальт также ингибирует растворение вольфрама на границе раздела, уменьшает толщину переходного слоя интерфейса, сохраняет интерфейс чистым и снижает риск образования трещин. Однако чрезмерное содержание кобальта может вызвать сегрегацию интерфейса и снизить ударную вязкость. Следовые количества молибдена, благодаря его высокой температуре плавления (2623 °C) и кристаллической структуре (ОЦК), сходной с вольфрамом, могут усилить химические связи на границе раздела и повысить термостойкость, что делает его пригодным для использования в сердечниках бронированных снарядов военного назначения и высокотемпературных электронных компонентах. Молибден упрочняет никель-медную фазу за счёт образования твёрдого раствора и повышает прочность на сдвиг на границе раздела, однако его избыточное количество может привести к охрупчиванию границы раздела.

Следовые количества углерода и кислорода обычно присутствуют в качестве примесей, которые могут поступать из оксидов порошка вольфрама или атмосферы спекания (недостаточная чистота аргона). Углерод образует карбиды (такие как WC или соединения Ni-C) на границе раздела, что может увеличить локальную твердость (твердость по Виккерсу увеличивается до 400 HV), но может также вызвать концентрацию межфазных напряжений и снизить вязкость разрушения. Кислород может образовывать оксидные включения (такие как WO₃ или NiO), ослабляя межфазные связи и вызывая отказ медицинских экранов или аэрокосмических компонентов под

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

динамическими нагрузками. Контроль содержания примесей требует высокочистого сырья и высокочистой атмосферы аргона. Следовые количества хрома могут повысить коррозионную стойкость фазы никеля и меди (образуя защитный слой Cr_2O_3), но оказывают незначительное влияние на межфазные связи из-за его ограниченной растворимости. Характеристика эффектов интерфейса проводилась с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и анализа дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) для проверки распределения микроэлементов и кристаллографических характеристик интерфейса. Испытания на растяжение (ASTM E8) и анализ излома показали, что интерфейс с оптимизированным содержанием микроэлементов демонстрирует вязкое разрушение (образование ямок), в то время как избыточное содержание примесей приводит к хрупкому разрушению. Оптимизация процесса требует строгого контроля содержания микроэлементов (точность определения методом ИСП-АЭС $\pm 0,01\%$) и устранения дефектов интерфейса методом горячего изостатического прессования.

2.3 Эволюция микроструктуры сплава W-Ni-Cu

Изменение микроструктуры сплавов WNiCu происходит на протяжении всего производственного процесса, от прессования порошка до спекания и термической обработки, включая динамические изменения роста зерна, распределения фаз и структуры интерфейса. Эти изменения напрямую влияют на плотность, прочность и ударную вязкость сплава, что определяет его эксплуатационные характеристики в противовесах для аэрокосмической промышленности, медицинских защитных устройствах и балансирах в электронной промышленности. Жидкофазное спекание и термическая обработка являются ключевыми процессами для управления изменением микроструктуры, а идеальная микроструктура может быть достигнута путем оптимизации таких параметров процесса, как температура, время выдержки и атмосфера.

2.3.1 Закон роста зерна при спекании

Закон роста зерна во время спекания является ядром микроструктурной эволюции сплавов вольфрам-никель-медь, который напрямую влияет на размер частиц вольфрама, образование шейки спекания и свойства сплава. Жидкофазное спекание является основным процессом, включающим три стадии перегруппировки частиц, растворение-переосаждение и твердофазную диффузию, что приводит к росту частиц вольфрама (структура ОЦК, начальный размер частиц 10-50 мкм) и уплотнению микроструктуры. На ранней стадии спекания порошок вольфрама, порошок никеля и порошок меди прессуются в заготовки. Когда температура повышается до определенного уровня, никель и медь плавятся, образуя жидкую фазу Ni-Cu, которая смачивает частицы вольфрама и вызывает перегруппировку частиц посредством капиллярного действия. На этой стадии рост зерна ограничен, и частицы сохраняют свой начальный размер.

В середине спекания (выдержка в течение 1-2 часов) жидкая фаза способствует росту зерна по механизму растворения-переосаждения. Небольшое количество атомов вольфрама растворяется в жидкой фазе и переосаждается в точке контакта частиц, образуя шейку спекания. Рост зерна следует закону созревания Оствальда. Крупные частицы растут, поглощая мелкие частицы, и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

распределение частиц по размерам становится шире. Температура спекания и время выдержки являются ключевыми факторами влияния: слишком высокая температура или слишком долгое время выдержки приводят к чрезмерному росту и снижению ударной вязкости; слишком низкая температура приводит к недостаточному количеству жидкой фазы, медленному росту зерна и снижению плотности. Соотношение никеля и меди (обычно 7:3) также влияет на количество жидкой фазы. Высокое содержание никеля увеличивает текучесть жидкой фазы и способствует росту зерна, но может вызвать сегрегацию; высокое содержание меди снижает вязкость жидкой фазы, ускоряет рост, но может снизить прочность.

На поздней стадии спекания твердофазная диффузия дополнительно уплотняет структуру, а пористость снижается до <1%. Горячее изостатическое прессование подавляет чрезмерный рост зерен, сжимая частицы под высоким давлением. Анализ методом СЭМ показывает, что зерна имеют полигональную или близкую к сферической форму, а шейки спекания распределены равномерно; рентгеноструктурный анализ подтверждает, что вольфрам сохраняет ОЦК-структуру без существенных фазовых изменений. Контроль закона роста зерен имеет решающее значение для эксплуатационных характеристик: умеренный размер частиц обеспечивает высокую прочность и ударную вязкость, что делает его пригодным для медицинских коллиматоров; более крупный размер частиц обеспечивает высокую плотность, что делает его пригодным для сердечников боевых снарядов.

2.3.2 Регулирование микроструктуры термической обработкой

Термическая обработка является важным способом регулирования микроструктуры сплава вольфрам-никель-медь. Она оптимизирует механические свойства, коррозионную стойкость и термическую стабильность за счет регулирования размера зерна, межфазной связи и остаточных напряжений. Термическая обработка обычно проводится после спекания и включает отжиг, старение или закалку с отпуском. Конкретный процесс разрабатывается в соответствии с требованиями конкретного применения. Отжиг — наиболее распространенный метод термической обработки, целью которого является устранение остаточных напряжений, возникающих в процессе спекания и обработки, повышение прочности и эксплуатационных характеристик при сохранении высокой плотности и немагнитных свойств сплава.

Процесс отжига регулирует микроструктуру посредством диффузии и рекристаллизации. При высоких температурах дефекты кристаллов (такие как дислокации и границы зерен) в фазе связывания никеля и меди (ГЦК-структура) устраняются диффузией, что снижает внутренние напряжения. Частицы вольфрама (ОЦК-структура) не подвергаются значительной рекристаллизации благодаря своей высокой температуре плавления (3422 °C), но следовые количества вольфрама, растворенные на границе раздела, дополнительно сглаживают её и повышают прочность связи (прочность на сдвиг >550 МПа).

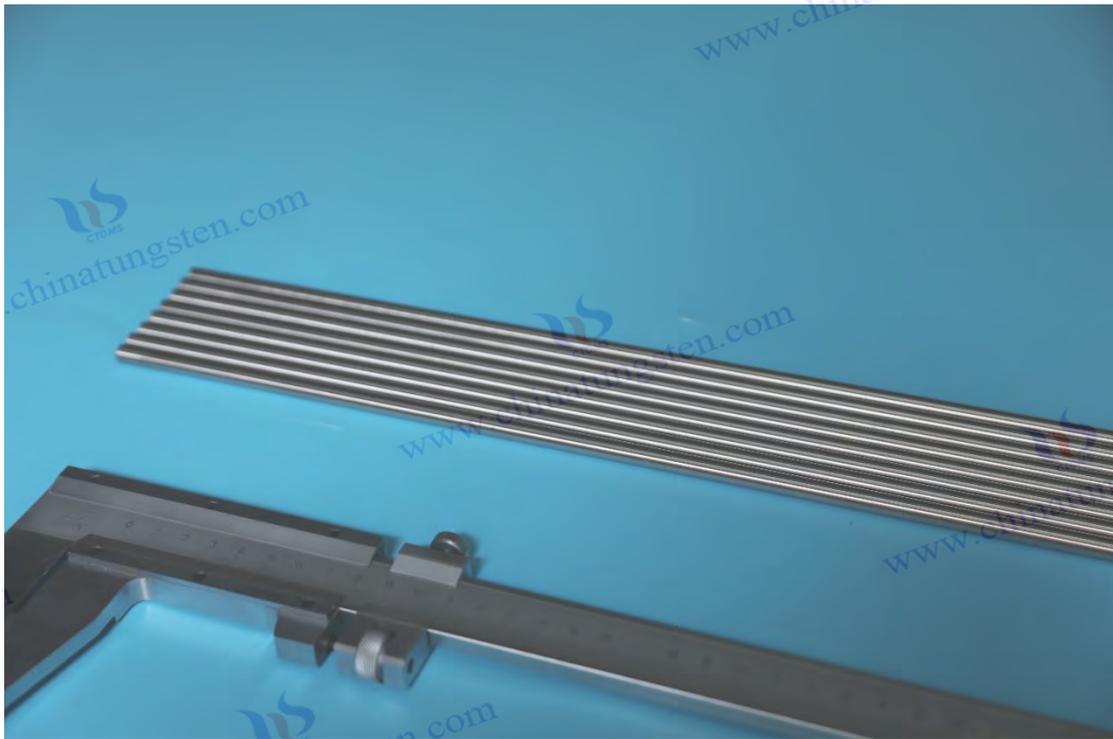
Слишком высокие температуры отжига могут вызвать рост зерен в никель-медной фазе и снизить прочность; слишком низкие температуры приведут к недостаточному снятию напряжений и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ограниченному повышению вязкости. Старение может повысить прочность связующей фазы за счёт выделения следовых количеств второй фазы (например, Ni_3Cu) в твёрдом растворе Ni-Cu, однако следует избегать чрезмерного выделения, так как это может привести к охрупчиванию.

Термическая обработка также может регулировать коррозионную стойкость и теплопроводность. После отжига на поверхности никель-медной фазы образуется плотный защитный слой NiO, который повышает коррозионную стойкость (кислотостойкость увеличивается на 20–30%) и подходит для длительного использования в медицинском оборудовании. Теплопроводность незначительно улучшается (на 5–10%) за счёт оптимизации распределения границ зёрен, что благоприятно влияет на теплоотводящие компоненты в электронной промышленности.

Анализы с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и электронной денситометрии (EBSD) показывают, что после термообработки переходный слой становится более однородным, количество дефектов на границах зёрен уменьшается, а излом приобретает характерные вязкостные характеристики (ямки). Контроль качества подтверждает улучшение характеристик посредством испытаний на растяжение (ASTM E8) и испытаний на твердость (ASTM E92). Термообработку необходимо проводить в среде аргона высокой чистоты, чтобы избежать оксидных включений.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 3 Физические и химические свойства сплава вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрама, никеля и меди – это высокопроизводительный материал высокой плотности, который благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам широко используется в аэрокосмической, медицинской, электронной и военной промышленности. Этот сплав состоит в основном из вольфрама, дополненного никелем и медью в качестве связующей фазы, что обеспечивает высокую плотность, превосходные механические свойства и немагнитную структуру. Высокая плотность сплава обеспечивает эффективное распределение массы в ограниченном пространстве, связующая фаза никеля и меди придает сплаву хорошую прочность и обрабатываемость, а немагнитные свойства позволяют ему эффективно работать в условиях, чувствительных к электромагнитным полям.

3.1 Механические свойства сплава вольфрам-никель-медь

вольфрама, никеля и меди является его основным преимуществом в высокопроизводительных приложениях, особенно в сценариях, где необходимо выдерживать механическое напряжение, вибрацию или удары, таких как противовесы в аэрокосмической промышленности, медицинские коллиматоры или военные бронепробойные сердечники. Механические свойства в основном включают прочность на растяжение, удлинение, твердость и усталостную прочность, которые являются результатом синергетического эффекта высокой твердости частиц вольфрама и вязкости фазы связи никель-медь. Сплав изготавливается методом порошковой металлургии, а процессы спекания в жидкой фазе и горячего изостатического прессования обеспечивают плотную микроструктуру, позволяя ему сохранять структурную целостность в динамической среде. По сравнению с хрупкостью чистого вольфрама, фаза связи никель-медь значительно улучшает пластичность и обрабатываемость сплава, позволяя ему соответствовать производственным требованиям сложных форм и высокой точности.

3.1.1 Прочность на растяжение при комнатной температуре

вольфрама-никеля-меди при комнатной температуре является основным показателем его механических свойств, отражая способность сплава противостоять разрушению при растягивающих нагрузках. Это свойство позволяет ему выдерживать высокие напряжения в противовесах аэрокосмической техники, сердечниках военных снарядов и балансирах электронной промышленности, обеспечивая структурную стабильность и надежность компонентов. Превосходные характеристики прочности на растяжение обусловлены высокой твердостью частиц вольфрама и упрочняющим эффектом связующей фазы никеля и меди. Вольфрам, как основной компонент, обеспечивает прочную структуру скелета, а его объемно-центрированная кубическая кристаллическая структура придает сплаву чрезвычайно высокую твердость и сопротивление деформации. Связующая фаза никеля и меди образует непрерывную матрицу посредством спекания в жидкой фазе, заполняя промежутки между частицами вольфрама, усиливая силу связи между частицами и позволяя сплаву эффективно рассеивать напряжение при растяжении и избегать локального разрушения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Характеристики прочности на растяжение совместно влияют на состав сплава и условия процесса. Сплавы с более высоким содержанием вольфрама (например, 95% вольфрама) обычно имеют более высокую прочность на растяжение, поскольку плотность и твердость частиц вольфрама обеспечивают основную поддержку. Соотношение никеля и меди также оказывает важное влияние на прочность. Никель повышает ударную вязкость и коррозионную стойкость связующей фазы, в то время как медь улучшает теплопроводность и немагнитные свойства. Соответствующее соотношение никеля и меди (например, 7:3 или 3,5:1,5) обеспечивает хорошее сцепление между связующей фазой и частицами вольфрама, формируя однородную микроструктуру и избегая концентрации напряжений. Процесс спекания в жидкой фазе образует жидкую матрицу никеля и меди при высокой температуре, смачивает частицы вольфрама, способствует образованию спекающихся шеек и дополнительно увеличивает силу сцепления между частицами.

В прикладных задачах прочность на разрыв сплава вольфрама, никеля и меди позволяет ему выдерживать высокочастотные вибрации в компонентах аэрокосмической техники или высокоскоростные удары в сердечниках боевых снарядов. Например, в противовесах элеронов самолётов сплав должен выдерживать динамические нагрузки во время полёта, а его высокая прочность на разрыв гарантирует, что компоненты не деформируются и не ломаются. В медицинском радиотерапевтическом оборудовании коллиматор должен выдерживать механические нагрузки и усталость, возникающие при длительной эксплуатации, а высокая прочность на разрыв обеспечивает его точность и долговечность. Ключом к повышению прочности на разрыв является оптимизация процесса, например, контроль температуры спекания и времени выдержки, предотвращение чрезмерного роста частиц вольфрама или сегрегации никель-медных фаз, а также обеспечение однородности микроструктуры.

3.1.2 Удлинение

Относительное удлинение является важным показателем для измерения пластичности и вязкости сплавов вольфрама-никеля-меди, отражая степень, в которой сплав может подвергаться пластической деформации перед разрушением при растяжении. По сравнению с хрупкостью чистого вольфрама, относительное удлинение сплавов вольфрама-никеля-меди значительно улучшено, что делает их менее склонными к хрупкому разрушению при ударе или вибрации и подходящими для сценариев применения, требующих определенной степени вязкости, таких как противовесы хирургических роботов или компоненты снижения вибрации электронного оборудования. Превосходные характеристики относительного удлинения в основном объясняются вязкостью связующей фазы никеля-меди. Никель обеспечивает хорошую способность к пластической деформации благодаря своей гранцентрированной кубической кристаллической структуре, в то время как медь дополнительно повышает пластичность связующей фазы, позволяя сплаву поглощать энергию посредством пластической деформации под действием напряжения и избегать внезапного разрушения. Это свойство позволяет сплаву проявлять хорошую усталостную прочность в динамических средах.

Относительное удлинение зависит от состава сплава, микроструктуры и процесса производства.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Увеличение содержания никеля обычно увеличивает относительное удлинение, поскольку никель обладает лучшей вязкостью, чем вольфрам, может эффективно рассеивать напряжение и продлевать процесс деформации. Однако слишком высокое содержание никеля может снизить общую прочность, и необходимо найти баланс между вязкостью и прочностью. Добавление меди дополнительно увеличивает относительное удлинение, поскольку ее высокая пластичность снижает твердость связующей фазы, делая сплав более восприимчивым к пластическому течению при растяжении. Процесс жидкофазного спекания образует однородную никелево-медную матрицу при высокой температуре, заполняя промежутки между частицами вольфрама, образуя непрерывную сетчатую структуру, которая облегчает передачу напряжений и пластическую деформацию. Процесс горячего изостатического прессования дополнительно улучшает вязкость и относительное удлинение сплава за счет устранения микропор и оптимизации связи на границе раздела. Процессы термической обработки, такие как отжиг, также могут улучшить пластические характеристики сплава за счет устранения остаточных напряжений и оптимизации структуры границ зерен.

В прикладном сценарии удлинение напрямую влияет на применимость сплава. В аэрокосмической отрасли противовесы должны выдерживать высокочастотные вибрации и удары. Более высокое удлинение гарантирует, что компоненты не будут хрупко разрушаться при динамических нагрузках и продлевает их срок службы. В электронной промышленности балансирующий блок литографической платформы должен выдерживать мельчайшие вибрации, а умеренное удлинение обеспечивает стабильность компонентов при длительном использовании. Хотя экранирующие детали в медицинской отрасли в основном полагаются на высокую плотность, соответствующее удлинение снижает вероятность их растрескивания во время обработки и установки. Оптимизация процесса должна быть сосредоточена на контроле микроэлементов и примесей, например, избегая примесей, таких как кислород или углерод, которые образуют хрупкие фазы и уменьшают удлинение. Обработка поверхности (такая как полировка или нанесение покрытия) также может уменьшить поверхностные дефекты и улучшить способность к пластической деформации. В будущем, путем точного контроля соотношения никеля и меди и внедрения передовых производственных технологий (таких как аддитивное производство), удлинение можно будет дополнительно оптимизировать для улучшения характеристик сплава в сценариях с высокими требованиями к прочности.

3.1.3 Высокая термостойкость

вольфрама -никеля-меди является важным механическим свойством в высокотемпературной среде, отражая сохранение прочности и структурную стабильность сплава при высокотемпературном напряжении. Это свойство делает его превосходным в таких областях, как аэрокосмическая, военная промышленность и электронная промышленность, где необходимо выдерживать высокотемпературную среду, например, компоненты ракет, противовесы турбокомпрессоров или балансирующие блоки в высокотемпературном электронном оборудовании. Превосходные характеристики высокотемпературной стойкости обусловлены синергетическим эффектом высокой температуры плавления вольфрама и термической

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стабильности связующей фазы никеля-меди. Вольфрам, как основной компонент, имеет чрезвычайно высокую температуру плавления и может сохранять целостность кристаллической структуры при высокой температуре и противостоять термической деформации и размягчению. Связующая фаза никеля-меди дополнительно улучшает механические свойства и стойкость сплава к окислению при высокой температуре, образуя стабильный твердый раствор, что позволяет ему сохранять производительность в течение длительного времени в высокотемпературной среде.

Высокотемпературная стойкость существенно зависит от состава и микроструктуры сплава. Сплавы с более высоким содержанием вольфрама демонстрируют более высокую стойкость к размягчению при высоких температурах, поскольку объемно-центрированная кубическая кристаллическая структура вольфрама обладает чрезвычайно высокой термической стабильностью и может противостоять скольжению по границам зерен или движению дислокаций, вызванным высокими температурами. Никель обеспечивает антиокислительную защиту в связующей фазе, а оксидный слой, образующийся на его поверхности, эффективно предотвращает кислородную эрозию и сохраняет структурную целостность сплава. Хотя добавление меди снижает температуру плавления связующей фазы, ее высокая теплопроводность помогает быстро рассеивать тепло и уменьшить ухудшение характеристик, вызванное локальным перегревом. Процесс жидкофазного спекания формирует однородную микроструктуру при высоких температурах, и частицы вольфрама плотно соединяются со связующей фазой никеля и меди через шейку спекания, что повышает прочность межфазной связи при высоких температурах. Процесс горячего изостатического прессования дополнительно устраняет микропоры, что делает сплав менее склонным к разрушению из-за расширения пор при высоких температурах. Процессы термической обработки, такие как отжиг, дополнительно повышают механическую стабильность при высоких температурах за счет устранения остаточных напряжений и оптимизации структуры границ зерен. На практике высокая термостойкость делает сплав вольфрама-никеля-меди идеальным выбором для высокотемпературных сред. Например, в аэрокосмической отрасли турбокомпрессоры или противовесы ракет должны выдерживать тепло, выделяемое высокотемпературными газами или трением. Высокотемпературная стойкость сплава гарантирует сохранение формы и прочности деталей в экстремальных условиях. В электронной промышленности для высокотемпературного электронного оборудования (например, компонентов терморегулирования литографических машин) требуются материалы, сохраняющие размерную стабильность при высоких температурах. Низкие характеристики теплового расширения сплава в сочетании с высокотемпературной стойкостью отвечают этим требованиям. Оптимизация процесса имеет решающее значение для повышения высокотемпературной стойкости. Например, путем контроля температуры и атмосферы спекания, предотвращения оксидных включений или чрезмерного роста зерен, а также поддержания стабильности микроструктуры. Добавление микроэлементов (например, молибдена) может дополнительно повысить жаропрочность, однако следует избегать их чрезмерного содержания во избежание охрупчивания поверхности. Контроль качества подтверждает стабильность эксплуатационных характеристик сплава посредством испытаний на растяжение при высоких температурах и испытаний на термоциклирование, чтобы гарантировать его надежность в условиях высоких

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

температур.

3.1.4 Ударная вязкость

Ударная вязкость — это способность сплава вольфрама, никеля и меди противостоять разрушению при внезапном ударе или динамических нагрузках, что отражает его прочность и надежность в условиях высоких напряжений. Это свойство особенно важно в таких приложениях, как противовесы в аэрокосмической промышленности, сердечники броневой снарядов военного назначения и коллиматоры медицинского оборудования, гарантируя, что компоненты не будут подвержены хрупким разрушениям при вибрации, ударах или кратковременных нагрузках. По сравнению с хрупкостью чистого вольфрама, ударная вязкость сплава вольфрама, никеля и меди значительно улучшена, главным образом благодаря пластическому эффекту связующей фазы никеля и меди. Вязкость никеля позволяет ему поглощать энергию во время удара и рассеивать напряжение посредством пластической деформации, в то время как высокая пластичность меди дополнительно повышает трещиностойкость связующей фазы, позволяя сплаву демонстрировать хорошую вязкую характеристику разрушения при ударе.

Характеристики ударной вязкости зависят от состава сплава, микроструктуры и процесса производства. Частицы вольфрама обеспечивают высокую твердость и прочность, образуя прочный скелет сплава, но их хрупкость должна быть компенсирована связующей фазой никеля и меди. Фаза никеля и меди образует непрерывную матрицу, которая инкапсулирует частицы вольфрама и эффективно передает и рассеивает энергию удара посредством межфазной связи. Увеличение содержания никеля обычно улучшает ударную вязкость, поскольку гранецентрированная кубическая структура никеля обладает превосходной способностью к пластической деформации и может образовывать ямки при ударе для поглощения энергии. Добавление меди дополнительно повышает ударную вязкость, а её пластичность снижает твердость связующей фазы, делая сплав более склонным к пластическому течению, а не к хрупкому разрушению при ударе. Процесс жидкофазного спекания увеличивает силу связи между частицами и предотвращает межфазное расслоение под ударом за счёт образования равномерных перешейков спекания и плотной микроструктуры (пористость <1%). Процесс горячего изостатического прессования дополнительно повышает ударную вязкость и снижает начальную точку образования микротрещин за счет уплотнения структуры.

В прикладном сценарии ударная вязкость напрямую определяет надежность и долговечность сплава. В аэрокосмической области противовесы самолетов или вертолетов должны выдерживать вибрации и удары, возникающие при взлете, посадке или турбулентности. Более высокая ударная вязкость гарантирует, что компоненты не выйдут из строя из-за кратковременных нагрузок. В сердечниках броневой снарядов военного назначения сплавы должны выдерживать высокоскоростные удары (начальная скорость 1500-1800 м/с), а хорошая ударная вязкость гарантирует, что сердечник сохраняет целостность при пробитии брони. В медицинском оборудовании коллиматоры или компоненты хирургических роботов могут быть случайно повреждены, а ударная вязкость гарантирует, что их точность и функциональность не пострадают.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оптимизация процесса должна быть сосредоточена на контроле следовых примесей (таких как углерод или кислород), чтобы избежать образования хрупких фаз, которые снижают ударную вязкость. Обработка поверхности (такая как полировка или нанесение покрытия) может уменьшить поверхностные дефекты и дополнительно повысить ударную вязкость.

3.2 Тепловые и электрические свойства сплава вольфрам-никель-медь

Тепловые и электрические свойства сплавов вольфрама, никеля и меди играют важную роль в их применении в высокотехнологичных областях, особенно в сценариях, требующих эффективного терморегулирования или электромагнитной совместимости, таких как балансировочные блоки литографических машин в электронной промышленности, медицинские экраны для КТ/МРТ и высокотемпературные компоненты в аэрокосмической промышленности. Тепловые свойства в основном включают теплопроводность и характеристики теплового расширения, которые определяют способность рассеивания тепла и размерную стабильность сплава в высокотемпературных средах. Электрические свойства в основном отражаются в электропроводности и немагнитности, что гарантирует отсутствие помех в средах, чувствительных к электромагнитному излучению. Эти свойства обусловлены высокой термостойкостью вольфрама и превосходной тепло- и электропроводностью связующей фазы никеля и меди, и синергетически достигаются за счет оптимизации процессов порошковой металлургии. С точки зрения тепловых свойств, сплавы вольфрама, никеля и меди обладают высокой теплопроводностью, что позволяет быстро рассеивать тепло и предотвращать локальный перегрев. Это обусловлено высокой теплопроводностью меди и равномерным распределением твердого раствора никеля и меди. Высокая термическая стабильность частиц вольфрама дополнительно обеспечивает структурную целостность сплава при высоких температурах. Низкий коэффициент термического расширения позволяет сплаву сохранять размерную стабильность при изменении температуры, избегая деформаций, вызванных термическим напряжением, и особенно подходит для применений с чрезвычайно высокими требованиями к точности, таких как платформы литографических машин или медицинское оборудование. В процессе производства жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование обеспечивают компактность микроструктуры и снижают сопротивление границ зерен при теплопроводности. Процесс термической обработки дополнительно улучшает теплопроводность за счет оптимизации структуры границ зерен при сохранении низких характеристик термического расширения.

С точки зрения электрических свойств, немагнитная природа сплава вольфрам-никель-медь является его самым большим преимуществом, что обусловлено парамагнитными свойствами никеля и меди, что позволяет избежать электромагнитных помех и позволяет ему хорошо работать в электромагнитно-чувствительных средах, таких как оборудование МРТ, литографические машины и радиолокационные системы. Хотя электропроводность сплава ниже, чем у чистой меди, ее достаточно для удовлетворения потребностей большинства электронных приложений, особенно в сценариях, где необходимо учитывать высокую плотность и электромагнитную совместимость. Проводимость связующей фазы никеля-меди обеспечивает сплаву стабильные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электрические свойства, в то время как низкая проводимость частиц вольфрама компенсируется оптимизацией микроструктуры. Контроль процесса должен избегать оксидных включений или сегрегации, которые влияют на проводимость или немагнетизм. Поверхностные покрытия (такие как PVD TiN) могут дополнительно защищать сплав от коррозии под воздействием окружающей среды и поддерживать стабильность электрических свойств.

3.2.1 Теплопроводность

вольфрама -никеля-меди является основным показателем его тепловых характеристик, отражающим способность сплава быстро проводить и рассеивать тепло. Это свойство дает ему значительное преимущество в приложениях, требующих эффективного терморегулирования, таких как блоки балансировки литографических машин в электронной промышленности, защита от излучений в медицинском оборудовании и высокотемпературные компоненты аэрокосмической техники. Превосходные характеристики теплопроводности в основном обусловлены синергетическим эффектом высокой теплопроводности меди и связующей фазы никель-медь. Медь, как металл с высокой теплопроводностью, может быстро проводить тепло от источника тепла к другим областям, предотвращая локальный перегрев, в то время как добавление никеля образует стабильный твердый раствор и повышает теплопроводность связующей фазы. Хотя вольфрам имеет более низкую теплопроводность, чем медь, его высокая термическая стабильность гарантирует, что сплав может сохранять структурную целостность при высоких температурах и избегать деформации или разрушения из-за термического напряжения.

Теплопроводность существенно зависит от состава и микроструктуры сплава. Соотношение фаз связи никель-медь напрямую определяет характеристики теплопроводности. Сплавы с более высоким содержанием меди, как правило, имеют лучшую теплопроводность, поскольку теплопроводность меди значительно превышает теплопроводность вольфрама и никеля. Однако чрезмерное содержание меди может снизить общую прочность сплава, поэтому необходимо найти баланс между теплопроводностью и механическими свойствами. Процесс жидкофазного спекания образует однородную матрицу никель-медь при высокой температуре, заполняет промежутки между частицами вольфрама, снижает сопротивление границ зерен и пор теплопроводности и, таким образом, улучшает теплопроводность. Процесс горячего изостатического прессования дополнительно оптимизирует плотность микроструктуры за счет устранения микропор, делая теплопередачу более плавной. Процессы термообработки, такие как отжиг, также могут эффективно улучшать теплопроводность за счет исправления дефектов кристаллов и оптимизации структуры границ зерен, обеспечивая стабильность характеристик сплава в высокотемпературных средах.

В практическом применении уровень теплопроводности напрямую влияет на характеристики сплавов в высокотехнологичных областях. Например, в литографической платформе сплав должен быстро рассеивать тепло, генерируемое лазером или двигателем, для поддержания субнанометровой точности. Отличная теплопроводность обеспечивает термостабильность платформы. В медицинском компьютерном оборудовании экранирующие детали будут

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

генерировать тепло под действием высокоэнергетического излучения. Высокая теплопроводность помогает быстро рассеивать тепло, предотвращая перегрев или ухудшение производительности оборудования. В аэрокосмической отрасли ракеты или компоненты турбин работают в высокотемпературных газовых средах. Теплопроводность сплава обеспечивает возможности терморегулирования компонентов и продлевает их срок службы. При оптимизации процесса необходимо уделять внимание чистоте сырья и параметрам спекания, чтобы избежать оксидных включений или сегрегации, которые снижают теплопроводность.

3.2.2 Проводимость

вольфрама, никеля и меди является важным показателем его электрических свойств, отражающим способность сплава проводить ток. Хотя его электропроводность ниже, чем у чистой меди, она достаточна для удовлетворения потребностей большинства электронных и медицинских приложений, особенно в сценариях, где необходимо учитывать высокую плотность и электромагнитную совместимость. Умеренные характеристики электропроводности обусловлены балансом между проводимостью фазы связывания никеля и меди и относительно низкой проводимостью частиц вольфрама. Медь, как высокопроводящий металл, обеспечивает основной путь проводимости тока для сплава, в то время как добавление никеля образует стабильный твердый раствор Ni-Cu, поддерживая умеренную электропроводность. Хотя высокие свойства сопротивления вольфрама снижают общую проводимость, его высокая плотность и немагнитность дают ему уникальные преимущества в электромагнитно-чувствительных средах, полностью избегая магнитных помех.

Характеристики электропроводности зависят от состава сплава, микроструктуры и процесса производства. Сплавы с более высоким содержанием меди, как правило, обладают более высокой электропроводностью, поскольку электропроводность меди значительно выше, чем у никеля и вольфрама. Однако слишком высокое содержание меди может привести к снижению прочности, поэтому баланс между электропроводностью и механическими свойствами должен быть достигнут путем оптимизации соотношения никеля и меди (например, 7:3 или 3,5:1,5). Процесс жидкофазного спекания снижает сопротивление границ зерен и способствует плавному переносу тока за счет формирования непрерывной никель-медной матрицы. Процесс горячего изостатического прессования дополнительно улучшает плотность микроструктуры и устраняет негативное влияние пор и включений на электропроводность. Контроль примесей имеет решающее значение. Например, такие примеси, как кислород или углерод, могут образовывать непроводящие оксиды или карбиды, снижая электропроводность. Поэтому для спекания требуются высокочистые исходные материалы (вольфрам >99,9%) и атмосфера аргона высокой чистоты. Умеренная проводимость и отсутствие магнитных полей обеспечивают сплав вольфрама, никеля и меди высокую эффективность в электронной промышленности и медицине. Например, в оборудовании МРТ экранирующие элементы из сплава должны быть защищены от помех со стороны магнитного поля, а умеренная проводимость в сочетании с отсутствием магнитных полей обеспечивает высокую чувствительность и точность оборудования. В литографической машине проводимость балансирующего блока обеспечивает его нормальную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

работу в электромагнитной среде и предотвращает накопление статического электричества и возникновение помех. Оптимизация процесса должна быть направлена на обеспечение однородности микроструктуры для предотвращения сегрегации и дефектов, снижающих проводимость.

3.2.3 Коэффициент теплового расширения

вольфрама, никеля и меди является ключевой характеристикой его тепловых свойств, отражающей размерную стабильность сплава при изменении температуры. Низкий коэффициент теплового расширения даёт ему значительное преимущество в приложениях, требующих высокой точности и термической стабильности, таких как литографические платформы, медицинские коллиматоры и противовесы для аэрокосмической промышленности. Низкий коэффициент теплового расширения обусловлен главным образом низким коэффициентом теплового расширения, присущим вольфраму, в сочетании с умеренной пластичностью связующего никеля и меди, что позволяет сплаву сохранять форму и размерную стабильность при колебаниях температуры, предотвращая деформацию и растрескивание, вызванные термическим напряжением.

Коэффициент теплового расширения зависит как от состава сплава, так и от микроструктуры. Высокая температура плавления вольфрама и его объемно-центрированная кубическая структура обеспечивают ему чрезвычайно низкую скорость теплового расширения, которая определяет общие характеристики теплового расширения сплава. Никель и медь имеют более высокие коэффициенты теплового расширения, чем вольфрам, но благодаря разумному соотношению вклад фазы связи в тепловое расширение сводится к минимуму. Процесс спекания в жидкой фазе формирует однородную микроструктуру, а частицы вольфрама прочно связаны с матрицей никель-медь через шейку спекания, что снижает проскальзывание по границам зерен или концентрацию термических напряжений. Процесс горячего изостатического прессования дополнительно улучшает плотность и термическую стабильность структуры за счет устранения микропористости. Процессы термической обработки, такие как отжиг, повышают размерную стабильность сплава во время термических циклов за счет оптимизации структуры границ зерен и устранения остаточных напряжений, избегая микротрещин, вызванных изменениями температуры.

На практике низкий коэффициент теплового расширения делает сплав вольфрама, никеля и меди идеальным выбором для высокоточного оборудования. Например, в фотолитографической машине платформа должна сохранять субнанометровую точность во время циклов лазерного нагрева и охлаждения. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает стабильность платформы и предотвращает термическую деформацию, влияющую на гравировку рисунка. В аэрокосмической отрасли противовесы работают в высокотемпературных газах или низкотемпературных средах, а низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает стабильность центра тяжести. Коллиматор в медицинском оборудовании должен сохранять свою форму под воздействием тепла, генерируемого излучением, а низкие характеристики теплового

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

расширения обеспечивают его точность и надежность. Оптимизация процесса должна исключать образование примесей (таких как кислород или углерод) из-за образования фаз с высоким расширением, влияющих на общую производительность.

3.2.4 Эффективность рассеивания тепла

вольфрама и никеля с медью является всесторонним отражением его тепловых характеристик. Он сочетает в себе преимущества высокой теплопроводности и низкого коэффициента теплового расширения, что позволяет ему быстро рассеивать тепло и сохранять размерную стабильность. Эти характеристики делают его превосходным в приложениях, требующих эффективного терморегулирования, таких как компоненты терморегулирования фотолитографических машин в электронной промышленности, радиационная защита в медицинском оборудовании и высокотемпературные компоненты в аэрокосмической промышленности. Отличные характеристики рассеивания тепла обусловлены высокой теплопроводностью меди и равномерным распределением никель-медной матрицы, которая может быстро передавать тепло от источника тепла наружу, предотвращая локальный перегрев. В то же время низкие характеристики теплового расширения гарантируют, что компоненты не будут деформироваться или выходить из строя во время тепловых циклов.

Эффективность теплоотвода зависит от состава сплава, микроструктуры и производственного процесса. Увеличение содержания меди значительно повышает эффективность теплоотвода, поскольку медь обладает значительно более высокой теплопроводностью, чем вольфрам и никель, и способна быстро передавать тепло. Добавление никеля образует стабильный твердый раствор Ni-Cu, который повышает теплопроводность связующей фазы и обеспечивает антиоксидантную защиту, предотвращая снижение эффективности теплоотвода вследствие высокотемпературного окисления. Высокая термостойкость частиц вольфрама обеспечивает структурную целостность сплава при высоких температурах, предотвращая термическое размягчение или ухудшение характеристик. Процесс жидкофазного спекания уменьшает препятствия для теплопроводности через границы зерен и поры, формируя непрерывную никель-медную матрицу. Процесс горячего изостатического прессования дополнительно повышает плотность микроструктуры и устраняет сопротивление микропор теплопроводности. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия с высокой теплопроводностью или полировка до Ra < 0,4 мкм) может повысить эффективность теплоотвода поверхности и ускорить передачу тепла в окружающую среду.

На практике характеристики теплоотвода напрямую определяют применимость сплава в высокотехнологичных областях. В фотолитографических машинах балансировочный блок должен быстро рассеивать тепло, генерируемое лазером или двигателем, а превосходные характеристики теплоотвода обеспечивают термостабильность и точность платформы. В медицинском компьютерном томографе экранирующие детали генерируют тепло под действием высокоэнергетического излучения, а эффективный теплоотвод предотвращает перегрев оборудования и продлевает срок его службы. В аэрокосмической отрасли компоненты турбин или ракет работают в высокотемпературной газовой среде, а характеристики теплоотвода

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечивают надежность и долговечность компонентов. При оптимизации процесса необходимо уделять внимание чистоте сырья и параметрам спекания, чтобы избежать оксидных включений или сегрегации, которые снижают эффективность теплоотвода.

3.3 Химическая стабильность сплава вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрама, никеля и меди широко используется в аэрокосмической, медицинской, электронной и военной областях благодаря своей высокой плотности, превосходным механическим свойствам, немагнитным свойствам и выдающимся термическим и электрическим свойствам. Сплав изготавливается методом порошковой металлургии, при этом вольфрам является основным компонентом, а никель и медь дополняются связующими фазами, образуя плотную микроструктуру и демонстрируя отличную химическую стабильность. Его химическая стабильность в основном отражается в коррозионной стойкости и стойкости к окислению, что позволяет ему сохранять эксплуатационные характеристики в течение длительного времени в суровых условиях, таких как влажность, кислотность или высокая температура. Эта стабильность обусловлена химической инертностью вольфрама и защитным эффектом связующей фазы никеля и меди, что отвечает требованиям приложений с высокой надежностью.

3.3.1 Коррозионная стойкость

Вольфрам, никель и медь являются важным проявлением его химической стабильности, отражая способность сплава противостоять химической эрозии в агрессивных средах, таких как влага, кислота или солевой туман. Это свойство позволяет ему хорошо работать в сценариях, требующих длительной стабильной работы, таких как медицинское оборудование, морская техника и электронная промышленность, например, защита медицинских компьютерных томографов, противовесы кораблей или корпуса электронного оборудования. Отличная коррозионная стойкость в основном обусловлена синергетическим эффектом химической инертности вольфрама и коррозионной стойкости никеля. Будучи основным компонентом, вольфрам обладает чрезвычайно высокой химической стабильностью и нелегко реагирует в большинстве кислых или щелочных сред, что составляет основу коррозионной стойкости сплава. Никель образует стабильный защитный слой в фазе связывания, который может эффективно противостоять эрозии внешних химикатов и продлевать срок службы сплава.

Коррозионная стойкость совместно зависит от состава сплава, микроструктуры и состояния поверхности. Никель играет ведущую роль в фазе связывания никеля и меди. Его гранцентрированная кубическая структура и антиокислительные свойства позволяют ему образовывать плотный защитный оксидный слой во влажной или кислой среде, предотвращая дальнейшее проникновение коррозионной среды. Хотя добавление меди улучшает теплопроводность и немагнитность, его коррозионная стойкость несколько уступает никелевой. Незначительная коррозия может возникать в некоторых кислых средах (например, азотной кислоте). Поэтому необходимо оптимизировать общую коррозионную стойкость за счет разумного соотношения никеля и меди (например, 7:3 или 3,5:1,5). Процесс жидкофазного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

спекания образует однородную матрицу никеля и меди при высокой температуре, заполняет промежутки между частицами вольфрама, уменьшает микропоры и обнажение границ зерен, а также сокращает путь проникновения коррозионных сред. Процесс горячего изостатического прессования дополнительно повышает плотность микроструктуры, делает поверхность сплава более гладкой и снижает начальную точку коррозии. Обработка поверхности, такая как полировка или химическая пассивация, может дополнительно повысить коррозионную стойкость и сформировать более плотный защитный слой, что особенно подходит для длительного использования медицинского оборудования в стерильных условиях.

В практическом применении коррозионная стойкость напрямую определяет надежность и долговечность сплава. В медицинской сфере экранирующие детали оборудования КТ или МРТ должны подвергаться длительному воздействию дезинфицирующих средств или влажной среды. Отличная коррозионная стойкость обеспечивает целостность поверхности и функциональную стабильность деталей. В морской технике противовесы судов могут подвергаться воздействию морской воды или соляного тумана. Коррозионная стойкость сплава предотвращает деградацию материала и продлевает срок службы. В электронной промышленности корпус или противовес должны быть устойчивы к химическим веществам в производственной среде. Коррозионная стойкость обеспечивает долговременную эксплуатацию оборудования. Оптимизация процесса требует строгого контроля чистоты сырья, чтобы исключить образование примесей, таких как кислород или сера, из-за образования легкокоррозионных фаз. Поверхностные покрытия (например, PVD TiN или DLC) могут дополнительно повысить коррозионную стойкость, особенно в агрессивных химических средах. Контроль качества проверяет коррозионную стойкость путем испытаний в соляном тумане и экспериментов с погружением, чтобы гарантировать соответствие сплава отраслевым стандартам (например, ISO 9227).

3.3.2 Антиоксидантные свойства

вольфрама, никеля и меди является еще одной ключевой характеристикой его химической стабильности, которая отражает способность сплава противостоять реакциям окисления при высокой температуре или окислительной атмосфере. Это свойство дает ему значительные преимущества в высокотемпературных компонентах аэрокосмической промышленности, компонентах терморегулирования в электронной промышленности и военной технике, таких как противовесы турбин, радиаторы для фотолитографических машин или ракетные щиты. Превосходные характеристики стойкости к окислению в основном обусловлены стойкостью к окислению никеля и термической стабильностью вольфрама. Никель образует плотный защитный слой оксида при высоких температурах, чтобы предотвратить дальнейшую коррозию внутренней структуры кислородом, в то время как высокая температура плавления и химическая инертность вольфрама позволяют ему сохранять структурную целостность при высоких температурах и избегать ухудшения характеристик, вызванного окислением. Хотя медь имеет более слабую стойкость к окислению, ее негативное воздействие сводится к минимуму под защитой никеля.

Стойкость к окислению существенно зависит от состава сплава, микроструктуры и условий

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

процесса. Никель играет важную антиоксидантную роль в связующей фазе никеля и меди. Его оксидный слой (NiO) имеет низкую скорость диффузии при высоких температурах (<1000 °C), что может эффективно блокировать проникновение кислорода и защищать внутренние частицы вольфрама и никель-медную матрицу. Высокая термическая стабильность вольфрама дополнительно повышает стойкость к окислению. Даже в условиях высоких температур его объемно-центрированная кубическая структура может оставаться стабильной и противостоять окислительной коррозии. Медь может образовывать оксид меди (CuO или Cu₂O) в окислительной атмосфере, но защитный эффект никеля может эффективно подавлять окисление меди благодаря разумному соотношению никеля и меди (например, 7:3). Процесс жидкофазного спекания формирует плотную микроструктуру при высокой температуре, уменьшая поры и обнажение границ зерен, а также сокращая путь для проникновения кислорода. Процесс горячего изостатического прессования дополнительно повышает плотность структуры за счет устранения микропор, что делает поверхность сплава менее восприимчивой к окислению.

В практическом применении стойкость к окислению напрямую влияет на надежность и срок службы сплава в условиях высоких температур. В аэрокосмической отрасли компоненты турбин или ракет работают в высокотемпературных газовых средах. Отличная стойкость к окислению обеспечивает целостность поверхности противовесов или экранирующих деталей и предотвращает деформацию или отказ, вызванные окислением. В электронной промышленности компоненты тепловода фотолитографических машин должны выдерживать тепло, генерируемое лазерами или двигателями, а стойкость к окислению обеспечивает стабильность при длительной высокотемпературной эксплуатации. В военной технике экранирующие детали могут подвергаться воздействию высокотемпературных окислительных атмосфер, а стойкость сплава к окислению сохраняет его функцию электромагнитного экранирования. Оптимизация процесса должна быть сосредоточена на контроле примесей, чтобы избежать образования примесей, таких как углерод или сера, легко окисляемых фаз. Обработка поверхности (например, химическая пассивация или антиоксидантное покрытие) может дополнительно повысить стойкость к окислению, особенно в высокотемпературных циклических средах. Контроль качества проверяет стойкость к окислению с помощью испытаний на высокотемпературное окисление и термогравиметрического анализа (ТГА), чтобы гарантировать, что сплав соответствует стандартам аэрокосмической или электронной промышленности.

3.4 Паспорт безопасности сплава вольфрама и никеля и меди CTIA GROUP LTD

Паспорт безопасности материала (MSDS) – важный документ, описывающий физические и химические свойства сплавов вольфрама, никеля и меди, а также инструкции по безопасному применению, предоставляющие пользователям и операторам рекомендации по безопасному обращению и действиям в чрезвычайных ситуациях. Сплав вольфрама, никеля и меди (W-Ni-Cu), производимый компанией CTIA GROUP LTD, – это сплав высокой плотности, широко используемый в аэрокосмической, медицинской, электронной и военной промышленности. Он высоко ценится за свою высокую плотность, превосходные механические свойства, немагнитные свойства и хорошую теплопроводность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Информация о продукте

Название продукта : сплав вольфрама с никелем и медью (сплав W-Ni-Cu)

Псевдоним : высокоплотный вольфрамовый сплав, тяжелый вольфрамовый сплав

Применение : используется в противовесах в аэрокосмической промышленности, деталях медицинской радиационной защиты, радиаторах и балансирах в электронной промышленности и т. д.

2. Идентификация опасности

Вольфрамо-никелевый медный сплав обычно не считается опасным веществом при нормальных условиях использования (в твердой форме, например, в виде пластин, прутков или обработанных деталей) и не классифицируется как опасное вещество в соответствии с Согласованной на глобальном уровне системой классификации и маркировки (СГС).

3. Информация о составе/ингредиентах

Сплав вольфрама и никеля и меди представляет собой композиционный материал, в состав которого входят:

- **Вольфрам (W)** : основной компонент, составляющий 90%-97%, обеспечивает высокую плотность и высокую твердость.
- **Никель (Ni)** : связующая фаза, на долю которой приходится 2–7 %, повышающая прочность и коррозионную стойкость.
- **Медь (Cu)** : Связующая фаза, составляющая 1%-5%, улучшает теплопроводность и немагнитные свойства.
- **Микроэлементы** : могут содержать следы кобальта, молибдена или других примесей (<0,5%) в зависимости от процесса производства.

5. Меры пожаротушения

Сплав вольфрама, никеля и меди является негорючим материалом и не взрывоопасен.

6. Экстренное устранение утечек

Сплав вольфрама, никеля и меди — это прочный материал, не подверженный риску утечки.

7. Обращение и хранение

- **Безопасная эксплуатация** : Обработка должна проводиться в хорошо проветриваемом помещении, а операторы должны носить защитные очки и перчатки.
- **Условия хранения** : хранить в сухом, прохладном месте, избегать воздействия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

влажности и высоких температур. Упаковка продукта должна быть ударопрочной (например, деревянные ящики или подушки) для предотвращения повреждений при транспортировке и хранении.

8. Физические и химические свойства

- **Внешний вид** : серебристо-серое металлическое твердое вещество с гладкой поверхностью или обработанное в специальные формы (например, пластины, стержни, блоки).
- **Запах** : Без запаха.
- **Температура плавления** : вольфрам имеет чрезвычайно высокую температуру плавления (около 3422 °C), а температура плавления фазы связи никеля и меди составляет около 1300–1450 °C.
- **Плотность** : Высокая плотность, типичные значения 16,5-18,5 г/см³.
- **Растворимость** : Нерастворим в воде, устойчив к кислотной и щелочной коррозии, некоторые кислые среды (например, азотная кислота) могут вызывать легкую коррозию меди.
- **Химическая стабильность** : Стабилен при комнатной температуре. При высоких температурах никель образует защитный оксидный слой, повышающий стойкость к окислению.

9. Стабильность и реакционная способность

- **Стабильность** : Стабилен при нормальных условиях использования и хранения, риск разложения отсутствует.
- **Реакционная способность** : Не вступает в бурную реакцию с водой, воздухом или обычными химикатами.
- **Условия, которых следует избегать** : Избегайте воздействия высокотемпературных окисляющих сред или длительного контакта с сильными кислотами (например, концентрированной азотной кислотой), которые могут вызвать легкую коррозию меди.

10. Рекомендации по утилизации

- **Переработка отходов** : классифицируйте и перерабатывайте отходы в соответствии с местными экологическими нормами (например, китайским стандартом GB 5085 или международными стандартами по опасным отходам) . Для переработки вольфрама, никеля и меди рекомендуется использовать химическое растворение или электрохимическое разделение.
- **Утилизация упаковки** : Упаковочные материалы (например, деревянные ящики или пластик) следует перерабатывать или утилизировать в соответствии с местными правилами.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11. Информация о доставке

- **Транспортная классификация** : неопасный груз, особых требований к транспортировке нет.
- **Требования к упаковке** : используйте ударопрочную и влагонепроницаемую упаковку (например, деревянные ящики или пенопластовый наполнитель), чтобы исключить повреждения во время транспортировки.

12. Нормативная информация

- **Международные правила** : Соответствуют стандарту оповещения об опасностях OSHA (29CFR1910.1200) и требованиям GHS.
- **Китайские нормы** : Соответствуют Правилам по безопасному обращению с опасными химическими веществами и GB/T 26038-2010 (стандарт вольфрамового сплава).
- **Прочее** : Никель подпадает под действие правил REACH, и его содержание необходимо декларировать; сплав в целом не требует специальной химической регистрации.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

High Density: Typically 16.5 - 18.75 g/cm³

High Thermal Conductivity: Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

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. Испытания производительности и стандарты сплава вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрама, никеля и меди, являясь материалом высокой плотности, широко используется в аэрокосмической, медицинской, электронной и военной областях благодаря своим превосходным механическим свойствам (прочность на растяжение 700-900 МПа, удлинение 5%-15%), немагнитным свойствам, отличной теплопроводности (120-150 Вт/м·К) и химической стабильности. Чтобы гарантировать, что его эксплуатационные характеристики соответствуют строгим требованиям применения (например, противовесы в аэрокосмической промышленности или детали медицинской защиты), контроль качества должен осуществляться с помощью точных методов испытаний эксплуатационных характеристик и международных стандартов. Анализ состава является основным звеном испытаний эксплуатационных характеристик и напрямую влияет на плотность, механические свойства и немагнитные свойства сплава. Анализ состава не только проверяет соотношение основных элементов (вольфрам, никель, медь), но и обнаруживает следы примесей, чтобы гарантировать чистоту и постоянство характеристик сплава.

4.1 Метод анализа состава сплава вольфрам-никель-медь

вольфрама, никеля и меди является основой контроля качества. Он используется для проверки соответствия соотношения основных элементов (85–97% вольфрама, 2–10% никеля, 1–8% меди) проектным требованиям и обеспечения отсутствия влияния следов примесей (таких как кислород, углерод и сера) на характеристики. Методы анализа состава в основном включают спектральный анализ, химический анализ и методы анализа поверхности, среди которых спектральный анализ является первым выбором благодаря своей высокой точности, скорости и неразрушаемости. Результаты анализа должны соответствовать международным стандартам (таким как ASTM B777 или GB/T 26038), чтобы гарантировать надежность сплава в противовесах для аэрокосмической промышленности, медицинских коллиматорах или весовых блоках для электронной промышленности. Процесс обнаружения должен проводиться в чистой среде, а для обеспечения точности результатов должны использоваться калибровочные образцы высокой чистоты.

4.1.1 Технология спектрального анализа

Технология спектрального анализа является основным методом анализа состава сплавов вольфрам-никель-медь. Она позволяет определить тип элементов и их содержание путем измерения спектра, испускаемого или поглощаемого образцом на определенной длине волны. Этот метод широко применяется в производстве сплавов и контроле качества благодаря высокой чувствительности (предел обнаружения может достигать уровня ppm), скорости (однократный анализ менее 5 минут) и возможности одновременного обнаружения нескольких элементов. Методы спектрального анализа включают рентгенофлуоресцентную спектроскопию (РФС), атомно-эмиссионную спектроскопию с индуктивно связанной плазмой и атомно-абсорбционную спектроскопию (ААС). Среди них наиболее распространенными являются РФС и ИСП-АЭС, подходящие для проверки содержания вольфрама, никеля, меди и распределения микроэлементов. Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (РФС) — это метод неразрушающего анализа,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

который использует рентгеновские лучи для возбуждения атомов на поверхности образца с целью получения характерной флуоресценции и анализа длины волны и интенсивности для определения содержания элементов. РФС подходит для образцов из твердых сплавов (таких как пластины, прутки или обработанные детали), не требует сложной предварительной обработки и позволяет быстро определить содержание вольфрама, никеля и меди (точность $\pm 0,2\%$). Преимущество метода заключается в простоте эксплуатации и возможности контроля качества в режиме реального времени на производственном участке. Например, при производстве противовесов для аэрокосмической промышленности РФС позволяет быстро проверить соответствие состава сплава стандарту ASTM B777, гарантируя соответствие плотности и немагнитных свойств стандартам. Ограничением РФС является низкая чувствительность обнаружения легких элементов (таких как углерод и кислород), поэтому для дополнительного анализа необходимо комбинировать его с другими методами.

Атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой — это высокоточный аналитический метод, который определяет содержание элементов путем растворения образца, введения плазменного возбуждения и измерения спектра излучения. ИСП-АЭС подходит для обнаружения основных элементов и следовых элементов в сплавах вольфрама, никеля и меди с пределом обнаружения до уровня ppb. Образец необходимо предварительно обработать кислотным растворением (например, азотной кислотой или царской водкой) и растворить в растворе для анализа. ИСП-АЭС может обнаруживать несколько элементов одновременно и подходит для комплексного анализа компонентов в лабораторных условиях. Например, при производстве медицинских экранирующих деталей ИСП-АЭС может проверить, соответствует ли содержание никеля требованиям биосовместимости ISO 10993, и избежать риска аллергии, вызванной избыточным содержанием никеля. Недостатком метода является сложность предварительной обработки образца и невозможность быстрого обнаружения на месте.

Выбор технологии спектрального анализа следует определять в соответствии с требованиями к применению и состоянием оборудования. РФА подходит для быстрого неразрушающего анализа на месте, в то время как ИСП-АЭС больше подходит для высокоточного лабораторного анализа. Для калибровки во время анализа следует использовать высокочистые стандартные образцы (>99,99%), чтобы избежать влияния матрицы или дрейфа прибора на результаты. Контроль условий окружающей среды (например, чистые помещения или постоянная температура и влажность) может снизить влияние пыли или влажности. Контроль качества подтверждает достоверность результатов посредством повторных испытаний и анализа стандартного отклонения.

4.1.2 Обнаружение примесных элементов

Обнаружение примесных элементов является важной частью анализа состава сплавов вольфрам-никель-медь. Оно направлено на выявление и количественное определение следовых примесей (таких как кислород, углерод, сера, азот или железо, обычно <0,5%), чтобы гарантировать, что они не влияют на механические свойства, теплопроводность или химическую стабильность сплава.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Примеси могут поступать из исходных порошков (вольфрам, никель, медь), атмосферы спекания или производственной среды. Превышение содержания может привести к появлению микроструктурных дефектов (таких как оксидные включения или карбиды), снижению прочности, коррозионной стойкости или ухудшению немагнитных свойств. Методы обнаружения примесей включают спектральный анализ, химический анализ и анализ с помощью специальных приборов, которые должны обеспечивать высокую чувствительность (уровень ppb-ppm) для удовлетворения требований аэрокосмической, медицинской и электронной промышленности.

Кислород и углерод являются наиболее распространенными примесями в сплавах вольфрама, никеля и меди и должны быть обнаружены специальными аналитическими методами. Анализ кислорода обычно использует метод плавки в инертном газе (Inert Gas Fusion), при котором образец нагревается до температуры выше 2000 °C в высокочистом гелии или аргоне, выделяя кислород и реагируя с углеродом с образованием CO или CO₂, а содержание кислорода измеряется инфракрасным детектором. Высокое содержание кислорода может образовывать оксидные включения (такие как WO₃ или NiO), которые снижают прочность межфазных связей и влияют на коррозионную стойкость медицинских экранирующих деталей. Анализ углерода использует метод сжигания (Combustion Analysis), при котором образец сгорает в кислороде с образованием CO₂, а содержание углерода измеряется инфракрасным детектором. Высокое содержание углерода может образовывать карбиды (такие как WC), которые повышают твердость, но снижают ударную вязкость, влияя на ударопрочность противовесов аэрокосмической промышленности.

Примеси, такие как сера и азот, обнаруживаются методом масс-спектрометрии с тлеющим разрядом (GD-MS) или ICP-AES. GD-MS возбуждает поверхность образца тлеющим разрядом и анализирует масс-спектр ионов. Предел обнаружения может достигать уровня ppb, что подходит для многоэлементного анализа примесей. Слишком высокое содержание серы может образовывать сульфидные включения, снижая коррозионную стойкость; слишком высокое содержание азота может вызвать охрупчивание границ зерен и повлиять на стабильность балансировочных грузов в электронной промышленности. Железо, как потенциальная примесь (полученная из сырья или инструментов для обработки), требует особого внимания, поскольку оно может вносить слабый магнетизм, разрушать немагнитные свойства сплава и влиять на характеристики экранирующих частей оборудования МРТ. ICP-AES может точно определять содержание железа путем растворения образца в кислоте с последующим его анализом.

Тестирование на примеси требует строгого контроля подготовки образцов и условий окружающей среды. Поверхность образца необходимо полировать и очищать этанолом для предотвращения загрязнения. Аналитические приборы необходимо регулярно калибровать, а для обеспечения точности используются высокочистые стандартные образцы. Оптимизация процесса спекания позволяет снизить попадание кислорода и азота; скрининг сырья позволяет контролировать исходное содержание примесей. Контроль качества подтверждает равномерность распределения примесей посредством многоточечного отбора проб и статистического анализа. Результаты испытаний должны соответствовать стандартам ASTM B777 или GB/T 26038 для обеспечения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стабильности характеристик сплава.

4.2 Метод испытания эксплуатационных характеристик сплава вольфрам-никель-медь

Вольфрамоникелевые медные сплавы разработаны для комплексной оценки их физико-механических свойств, обеспечивающих эксплуатационные характеристики сплава в целевом применении. Методы испытаний включают в себя испытания на плотность и компактность, испытания механических свойств, испытания термических свойств и анализ микроструктуры, каждый из которых обеспечивает точные данные по конкретным свойствам. Испытания на плотность и компактность проверяют распределение массы и структурную целостность сплава, а испытания механических свойств оценивают его прочность и вязкость под нагрузкой. Эти испытания обычно проводятся в лаборатории или на производственной площадке с использованием стандартизированного оборудования и процессов, чтобы гарантировать соответствие результатов строгим требованиям аэрокосмической, медицинской или электронной промышленности. Контроль условий испытаний имеет решающее значение для точности результатов.

4.2.1 Испытание на плотность и компактность

Испытания на плотность и компактность являются основой испытаний эксплуатационных характеристик сплава вольфрам-никель-медь. Они используются для оценки распределения массы и компактности микроструктуры сплава, что напрямую влияет на его эксплуатационные характеристики в противовесах для аэрокосмической промышленности, медицинских защитных элементах и балансирах для электронной промышленности. Плотность отражает массу сплава на единицу объема и является основным показателем его высокоплотных характеристик, гарантируя эффективное распределение массы компонентов в ограниченном пространстве. Плотность измеряет содержание пор внутри сплава и отражает влияние производственного процесса (например, жидкофазного спекания или горячего изостатического прессования). Плотная микроструктура может повысить прочность, вязкость и коррозионную стойкость сплава.

Испытание плотности обычно использует закон Архимеда для расчета плотности путем измерения разницы масс образца сплава на воздухе и в жидкости (например, в воде или этаноле). Этот метод прост и эффективен, подходит для твердых образцов (таких как прутки, пластины или обработанные детали) и позволяет быстро проверить, достигает ли сплав проектной плотности и соответствует ли он высоким требованиям к плотности, предъявляемым к противовесам в аэрокосмической отрасли или медицинским защитным деталям. Во время испытания поверхность образца необходимо очистить и отполировать, чтобы удалить масло или оксидный слой для обеспечения точности измерений. При выборе жидкости необходимо учитывать ее коррозионную стойкость к сплаву, чтобы избежать поверхностных реакций, влияющих на результаты. Результаты испытания плотности напрямую отражают долю содержания вольфрама. Сплавы с более высоким содержанием вольфрама обычно имеют более высокую плотность и подходят для применений, требующих чрезвычайно высокого распределения массы, например, для военных бронебойных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сердечников.

Испытание плотности оценивает пористость внутри сплава с помощью более сложного метода, обычно сочетающего измерение плотности и микроструктурный анализ. Распространенным методом является сравнение измеренной плотности с теоретической плотностью, чтобы сделать вывод о пористости. Другой метод использует микроскоп для наблюдения за поперечным сечением образца и анализирует распределение частиц вольфрама и фаз связующего никеля-меди с помощью металлографической микроскопии или сканирующей электронной микроскопии для выявления наличия микропор или включений. Сплавы высокой плотности могут обеспечивать лучшие механические свойства и химическую стабильность и особенно подходят для длительного использования в динамических средах или коррозионных средах. Процесс спекания в жидкой фазе образует однородную матрицу никеля-меди при высокой температуре, чтобы заполнить промежутки между частицами вольфрама, в то время как процесс горячего изостатического прессования дополнительно уплотняет структуру, значительно улучшая плотность и уменьшая негативное влияние пористости на эксплуатационные характеристики.

В практическом применении испытания на плотность и компактность обеспечивают надежность сплавов в условиях высокой точности. Например, в балансировочном блоке фотолитографической машины высокая плотность обеспечивает стабильность центра тяжести, а плотная микроструктура предотвращает появление микротрещин, вызванных вибрацией. В медицинских коллиматорах сплавы высокой плотности способны эффективно поглощать излучение, сохраняя при этом структурную целостность в течение длительного времени. Оптимизация испытаний должна быть направлена на обеспечение однородности подготовки образцов, чтобы избежать поверхностных дефектов или внутренних включений, влияющих на результаты. Контроль окружающей среды и высокоточная калибровка приборов также играют ключевую роль.

4.2.2 Испытание на прочность на растяжение и предел текучести

Испытания на прочность на растяжение и предел текучести являются основными методами оценки механических свойств сплавов вольфрама-никеля-меди, которые используются для измерения способности сплава сопротивляться разрушению и пластической деформации под действием растягивающих нагрузок. Эти свойства напрямую определяют надежность и долговечность сплава в противовесах аэрокосмической техники, сердечниках военных снарядов и демпфирующих компонентах в электронной промышленности. Прочность на растяжение отражает сопротивление сплава разрушению при максимальном растягивающем напряжении и подходит для оценки его характеристик в условиях высоких напряжений. Предел текучести указывает уровень напряжения, при котором сплав начинает подвергаться необратимой пластической деформации, отражая его стойкость к деформации под нагрузкой. Превосходные механические свойства сплавов вольфрама-никеля-меди обусловлены синергетическим эффектом высокой твердости частиц вольфрама и вязкости связующей фазы никеля-меди, что позволяет им сохранять структурную целостность в динамических или ударных средах. Испытание прочности на растяжение обычно проводят с использованием испытательной машины на растяжение.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Образцу придают стандартную форму (например, гантелеобразный образец) и прикладывают постепенно увеличивающееся растягивающее усилие в контролируемых условиях до разрушения образца. Во время испытания регистрируют кривую зависимости напряжения от деформации образца, чтобы проанализировать его поведение в процессе растяжения. Высокая прочность на растяжение сплава вольфрам-никель-медь обусловлена твердым скелетом частиц вольфрама и равномерным распределением никель-медной матрицы. Фаза никеля и меди прочно связывает частицы вольфрама через шейку спекания, эффективно рассеивая напряжение и предотвращая локальный разрыв. Испытание необходимо проводить при постоянной температуре (обычно при комнатной температуре), чтобы исключить влияние температуры на механические свойства. Подготовка образца требует гладкой и бездефектной поверхности, чтобы избежать концентрации напряжений, которая приводит к отклонению в результатах. Результаты испытаний используются для проверки соответствия сплава стандартам аэрокосмической или военной промышленности и его способности выдерживать высокие нагрузки и вибрацию.

Испытание на предел текучести проводится одновременно с испытанием на прочность на растяжение, и момент начала пластической деформации сплава определяется путём анализа кривой «напряжение-деформация». Вязкость связующей фазы никеля и меди позволяет сплаву выдерживать определённое количество пластической деформации до достижения текучести, поглощать энергию и избегать хрупкого разрушения. На характеристики предела текучести влияют состав и микроструктура сплава. Сплавы с более высоким содержанием вольфрама, как правило, имеют более высокий предел текучести, поскольку частицы вольфрама обеспечивают основное сопротивление деформации. Оптимизация соотношения никеля и меди (например, 7:3 или 3,5:1,5) обеспечивает баланс между вязкостью и прочностью связующей фазы, избегая чрезмерного содержания никеля, снижающего прочность, или чрезмерного содержания меди, снижающего твёрдость. Жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование уменьшают пористость и дефекты границ зёрен, а также повышают предел текучести за счёт формирования плотной микроструктуры. Процессы термической обработки, такие как отжиг, дополнительно оптимизируют пластические свойства сплава, устраняя остаточные напряжения.

В практическом применении результаты испытаний на прочность на растяжение и предел текучести напрямую влияют на выбор и конструкцию сплавов. Например, в аэрокосмических противовесах высокая прочность на растяжение гарантирует, что компоненты не разрушатся при высокочастотной вибрации или ударе, а предел текучести обеспечивает сохранение формы под нагрузкой. В сердечниках бронебойных снарядов военного назначения сплавы должны обладать высокой прочностью на растяжение для сопротивления высокоскоростному удару, в то время как предел текучести обеспечивает структурную целостность сердечника снаряда при пробитии брони. Оптимизация испытаний должна быть направлена на обеспечение однородности образцов, использование стандартизированных размеров образцов и испытательных процедур (например, ASTM E8). Анализ разрушения может дополнительно подтвердить достоверность результатов испытаний, наблюдая характеристики вязкого или хрупкого разрушения с помощью сканирующего электронного микроскопа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2.3 Испытание на пластичность

Испытание пластичности является важным методом оценки способности сплава вольфрама, никеля и меди подвергаться пластической деформации под действием растягивающих нагрузок, отражая способность сплава избегать разрушения посредством пластического течения под действием напряжения. Пластичность является ключевым показателем для измерения вязкости и обрабатываемости сплава и особенно важна для компонентов, которые должны выдерживать вибрацию, удары или сложную обработку, таких как противовесы для аэрокосмической промышленности, медицинские коллиматоры или компоненты для снижения вибрации в электронной промышленности. По сравнению с хрупкостью чистого вольфрама, пластичность сплава вольфрама, никеля и меди значительно улучшена, главным образом благодаря пластическому эффекту связующей фазы никеля и меди. Гранцентрированная кубическая структура никеля обеспечивает превосходную пластичность и способность поглощать энергию при растяжении, в то время как добавление меди дополнительно повышает пластичность и обрабатываемость связующей фазы, позволяя сплаву проявлять хорошую способность к пластической деформации под действием напряжения.

Испытание пластичности обычно проводится методом растяжения с использованием стандартизированных образцов (например, гантелеобразных образцов) для приложения постепенно увеличивающихся усилий растяжения на разрывной машине до разрушения образца. Во время испытания регистрируются удлинение и усадка образца в поперечном сечении для оценки степени пластической деформации до разрушения. Пластичность сплавов вольфрам-никель-медь обусловлена синергетическим эффектом частиц вольфрама и связующих фаз никель-медь. Частицы вольфрама обеспечивают высокую твердость и прочность, в то время как никель-медная матрица образует непрерывную сеть через спекающиеся шейки, рассеивая напряжение и способствуя пластическому течению. Результаты испытания отражают способность сплава поглощать энергию при растяжении и подходят для проверки его надежности в динамических условиях. Испытание необходимо проводить в контролируемой среде (например, при комнатной температуре и постоянной влажности), чтобы исключить влияние внешних факторов на результаты. Подготовка образца требует гладкой и бездефектной поверхности, чтобы избежать концентрации напряжений, приводящей к преждевременному разрушению.

Пластичность существенно зависит от состава и микроструктуры сплава. Увеличение содержания никеля, как правило, повышает пластичность, поскольку его вязкость позволяет ему подвергаться более значительным пластическим деформациям при растяжении. Добавление меди дополнительно повышает пластичность, а её высокая пластичность снижает твердость связующей фазы, делая сплав более склонным к пластическому течению под действием напряжения. Однако соотношение никеля и меди должно быть рассчитано разумно, а слишком высокое содержание никеля или меди может снизить прочность и повлиять на общие характеристики. Процесс жидкофазного спекания образует однородную никель-медную матрицу при высокой температуре, заполняет промежутки между частицами вольфрама, увеличивает силу связи между частицами и способствует пластической деформации. Процесс горячего

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

изостатического прессования дополнительно повышает пластичность и снижает риск разрушения за счёт устранения микропористости и оптимизации межфазного сцепления. Процессы термической обработки, такие как отжиг, делают сплав более однородным по поведению деформации при растяжении за счёт устранения остаточных напряжений и оптимизации структуры границ зерен.

В практическом применении результаты испытаний на пластичность напрямую влияют на применимость сплавов в сценариях с высоким спросом. Например, в аэрокосмической отрасли противовесы должны выдерживать вибрации, вызванные взлетом, посадкой или турбулентностью. Более высокая пластичность гарантирует, что компоненты не будут подвергаться хрупким разрушениям при динамических нагрузках. В электронной промышленности компоненты литографической платформы, снижающие вибрацию, должны выдерживать мельчайшие вибрации, а хорошая пластичность обеспечивает деформируемость и долговременную стабильность компонентов. В медицинской отрасли коллиматоры или компоненты хирургических роботов могут подвергаться растяжению во время обработки или установки, а пластичность снижает вероятность их растрескивания. Оптимизация испытаний должна быть сосредоточена на однородности образцов, используя стандартизированные размеры образцов и испытательные процедуры (например, ASTM E8). Анализ изломов может дополнительно подтвердить характеристики пластичности путем наблюдения за особенностями пластичного разрушения (такими как углубления).

4.2.4 Испытание на прочность

Испытание на вязкость является важным методом оценки способности сплавов вольфрама-никеля-меди поглощать энергию и противостоять разрушению при ударе или быстрых нагрузках, отражая трещиностойкость и надежность сплава в динамических средах. Вязкость является ключевым свойством сплава в таких приложениях, как противовесы в аэрокосмической промышленности, военные броневые сердечники и коллиматоры медицинского оборудования, гарантируя, что компоненты сохраняют структурную целостность при вибрации, ударах или кратковременных нагрузках. Вязкость сплавов вольфрама-никеля-меди лучше, чем у чистого вольфрама, в основном из-за пластического эффекта связующей фазы никеля-меди. Гранцентрированная кубическая структура никеля обеспечивает хорошую способность поглощения энергии и может рассеивать энергию посредством пластической деформации во время удара, в то время как высокая пластичность меди дополнительно повышает трещиностойкость связующей фазы, благодаря чему сплав проявляет характеристики вязкого разрушения при ударе.

Испытание на ударную вязкость обычно проводится путем испытания на удар. К распространенным методам относятся испытание на удар по Шарпи и испытание на падающем молоте. При испытании на удар по Шарпи используется стандартный образец (обычно с V-образным надрезом) для испытания на маятниковом копре и регистрации энергии, поглощенной образцом при его разрушении. При испытании на падающем молоте тяжелый предмет свободно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

падает с определенной высоты, чтобы ударить образец для оценки его стойкости к разрушению. Ударная вязкость сплава вольфрама, никеля и меди обусловлена синергетическим эффектом частиц вольфрама и фазы связи никель-медь. Частицы вольфрама обеспечивают высокую твердость и прочность, а матрица никеля и меди рассеивает энергию удара через непрерывную сеть спекающихся шейков, чтобы избежать хрупкого разрушения. Испытание необходимо проводить при контролируемой температуре (например, при комнатной температуре), чтобы обеспечить повторяемость результатов. Образец должен быть обработан до стандартного размера, а поверхность должна быть отполирована для уменьшения влияния дефектов.

На вязкость влияют состав сплава, микроструктура и производственный процесс. Увеличение содержания никеля значительно повышает вязкость, поскольку пластичность никеля позволяет ему поглощать больше энергии во время удара, формируя вязкий излом. Добавление меди дополнительно повышает вязкость, а ее пластичность снижает твердость связующей фазы, делая сплав более восприимчивым к пластической деформации, а не к хрупкому разрушению при ударе. Процесс жидкофазного спекания усиливает межфазную связь между частицами вольфрама и никель-медной матрицей за счет формирования плотной микроструктуры, что уменьшает распространение трещин при ударе. Процесс горячего изостатического прессования дополнительно повышает вязкость за счет уплотнения структуры, устранения микропор и дефектов границ зерен. Процессы термической обработки, такие как отжиг, позволяют сплаву демонстрировать более равномерные возможности поглощения энергии во время удара за счет оптимизации структуры границ зерен и устранения остаточных напряжений.

В практическом применении результаты испытаний на ударную вязкость напрямую определяют пригодность сплавов в динамических средах. В аэрокосмической отрасли винты вертолетов или противовесы элеронов самолетов должны выдерживать высокочастотные вибрации и удары. Более высокая ударная вязкость гарантирует, что компоненты не будут хрупко разрушаться в экстремальных условиях. В военной отрасли сердечники бронебойных снарядов должны поглощать огромную энергию при соударении с броней на высокой скорости. Хорошая ударная вязкость обеспечивает целостность сердечника снаряда. В медицине компоненты хирургических роботов могут подвергаться случайным ударам. Ударная вязкость позволяет им противостоять растрескиванию и сохранять функциональность. Оптимизация испытаний должна быть сосредоточена на контроле примесей, чтобы избежать образования хрупких фаз, таких как кислород или углерод, которые снижают ударную вязкость. Обработка поверхности (например, полировка или нанесение покрытия) может уменьшить дефекты поверхности и повысить ударную вязкость. Контроль качества подтверждает характеристики ударной вязкости с помощью анализа изломов (наблюдение ямок с помощью СЭМ) и повторных испытаний.

4.2.5 Испытание тепловых характеристик

Испытание тепловых характеристик предназначено для оценки способности сплава вольфрама-никеля-меди к теплопроводности и термической стабильности. Оно используется для проверки его характеристик в условиях высоких температур или термоциклирования. Оно особенно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подходит для сценариев применения, требующих эффективного терморегулирования или размерной стабильности, таких как радиаторы для фотолитографических машин в электронной промышленности, радиационная защита в медицинском оборудовании или высокотемпературные компоненты в аэрокосмической промышленности. Тепловые свойства в основном включают в себя характеристики теплопроводности и теплового расширения, которые отражают способность сплава быстро рассеивать тепло и размерную стабильность при изменениях температуры соответственно. Эти свойства обусловлены высокой теплопроводностью меди и низкими характеристиками теплового расширения вольфрама в сочетании с синергетическим эффектом фазы связи никель-медь, что позволяет сплаву сохранять производительность в условиях высокой точности и высоких температур.

Испытание теплопроводности обычно проводится методом лазерной вспышки или методом теплового потока. Метод лазерной вспышки оценивает теплопроводность сплава путем подачи короткого лазерного импульса на поверхность образца и измерения времени, необходимого для распространения тепла через образец. Этот метод подходит для быстрого испытания твердых образцов (таких как пластины или блоки) и может точно отражать способность сплава рассеивать тепло в реальных условиях. Метод теплового потока оценивает характеристики теплопроводности путем установления стабильного градиента температуры с обеих сторон образца и измерения плотности теплового потока. Оба метода необходимо проводить в контролируемой среде (например, при постоянной температуре или в условиях вакуума), чтобы избежать помех от внешней температуры или воздушного потока. Подготовка образца требует гладкой поверхности и равномерной толщины для обеспечения равномерной теплопередачи. Результаты испытаний подтверждают роль меди в фазе связывания никеля с медью. Высокая теплопроводность сплава позволяет ему быстро рассеивать тепло, что подходит для сценариев с высокой тепловой нагрузкой, таких как литографические машины или медицинские устройства. Процессы жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования дополнительно улучшают теплопроводность за счет формирования плотной микроструктуры, снижающей сопротивление пор и границ зерен теплопроводности.

Испытание коэффициента теплового расширения обычно проводится с помощью dilatометра или дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Dilатометр оценивает размерную стабильность при изменении температуры, измеряя изменение длины образца при контролируемом нагреве. Образец медленно нагревают до определенного температурного диапазона, и его деформация регистрируется для подтверждения способности сплава сохранять точность при термоциклировании. Метод ДСК косвенно определяет характеристики теплового расширения, анализируя тепловые эффекты образца при нагревании. Эти испытания необходимо проводить в точно контролируемой среде, а поверхность образца должна быть полирована для устранения влияния дефектов. Низкие характеристики теплового расширения вольфрама позволяют сплаву сохранять стабильные размеры при колебаниях температуры, что делает его пригодным для высокоточных применений, таких как фотолитографические платформы. Связующая фаза никеля и меди равномерно распределена и в сочетании со спекающейся шейкой снижает концентрацию термических напряжений и повышает термическую стабильность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Процессы термической обработки, такие как отжиг, дополнительно улучшают характеристики сплава при термоциклировании за счет оптимизации структуры границ зерен.

В практическом применении испытания тепловых характеристик обеспечивают надежность сплавов в условиях высоких температур или высокой точности. Например, в фотолитографических машинах балансировочный блок должен быстро рассеивать тепло и сохранять размерную стабильность. Отличная теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения обеспечивают субнанометровую точность платформы. В медицинском компьютерном томографе экранирование работает под воздействием тепла, генерируемого излучением, а тепловые характеристики обеспечивают его долговременную стабильность и безопасность. Оптимизация испытаний должна быть направлена на обеспечение единообразия подготовки образцов и калибровки прибора, чтобы исключить наличие примесей (таких как кислород или углерод) или микропор, снижающих теплопроводность.

4.2.6 Испытание электрических характеристик

Испытание электрических характеристик предназначено для оценки способности сплава вольфрама-никеля-меди проводить ток и обладать электромагнитной совместимостью. Оно используется для проверки его характеристик в средах, чувствительных к электромагнитным полям. Оно особенно подходит для таких применений, как экранирование медицинских МРТ, компоненты снижения вибрации литографических машин или компоненты радиолокационных систем. Электрические свойства в основном включают проводимость и немагнитные свойства, которые отражают способность сплава проводить ток и избегать электромагнитных помех. Немагнитная природа сплава вольфрама-никеля-меди является его наибольшим преимуществом, которое достигается за счет парамагнетизма никеля и меди, что позволяет ему хорошо работать в средах, чувствительных к электромагнитным полям. Хотя проводимость ниже, чем у чистой меди, ее достаточно для удовлетворения потребностей большинства электронных приложений. В сочетании с высокой плотностью и немагнитностью он подходит для высокоточного оборудования.

Испытание проводимости обычно проводится с помощью метода четырёхточечного зонда или измерения сопротивления. Метод четырёхточечного зонда предполагает приложение слабого тока к поверхности образца, измерение падения напряжения и расчет проводимости. Этот метод подходит для быстрого испытания твердых образцов (например, прутков или тонких пластин) и позволяет точно оценить токопроводимость сплавов в электронных устройствах. Метод измерения сопротивления измеряет сопротивление образца и позволяет определить проводимость на основе его геометрических размеров. Испытание необходимо проводить при постоянной температуре и влажности, чтобы избежать влияния температуры или влажности на сопротивление. Поверхность образца необходимо отполировать и очистить, чтобы исключить помехи в виде оксидного слоя или загрязнений. Результаты испытания отражают доминирующую роль меди в фазе связывания никеля с медью, а её высокая проводимость обеспечивает стабильный путь токопроводимости для сплава. Добавление никеля образует однородный твердый раствор Ni-Cu и поддерживает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

умеренную проводимость, в то время как высокие характеристики сопротивления вольфрама компенсируются оптимизацией микроструктуры. Процессы жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования снижают влияние сопротивления границ зерен и пористости за счет формирования плотной микроструктуры и улучшения проводимости.

Немагнитные испытания обычно проводятся путем измерения интенсивности намагничивания или испытания магнитной проницаемости с использованием магнитометра или вибрационного магнитометра (VSM) для оценки реакции сплава в магнитном поле. Немагнитная природа сплава вольфрам-никель-медь выигрывает от парамагнитных свойств никеля и меди, избегая ферромагнитных помех и подходит для электромагнитно-чувствительных приложений, таких как оборудование MPT или фотолитографические машины. Испытание необходимо проводить в среде экранированного магнитного поля, чтобы исключить внешние помехи магнитного поля. Образец должен проходить строгий контроль примесей, чтобы избежать внесения слабого магнетизма магнитными элементами, такими как железо (из сырья или инструментов для обработки). В процессе спекания используется атмосфера аргона высокой чистоты, чтобы предотвратить влияние оксидных включений на немагнитные свойства. Обработка поверхности (например, проводящее покрытие PVD) может дополнительно защитить сплав и сохранить стабильность электрических свойств.

В практическом применении испытания электрических характеристик обеспечивают надежность сплавов в условиях, чувствительных к электромагнитному излучению. Например, в оборудовании MPT экранирующие детали должны быть немагнитными, чтобы не создавать помех магнитному полю, а умеренная проводимость должна обеспечивать стабильную работу в электромагнитных условиях. В литографических машинах проводимость и немагнитность балансировочного блока обеспечивают нормальное функционирование платформы в высокоточных электромагнитных системах. Оптимизация испытаний должна быть направлена на контроль примесей, чтобы предотвратить образование непроводящих фаз, таких как кислород или сера, и снижение проводимости. Контроль качества подтверждает достоверность результатов посредством повторных испытаний и калибровки с использованием стандартных образцов.

4.2.7 Испытание химической эффективности

Испытание химических свойств является важным методом оценки стабильности сплавов вольфрама, никеля и меди в коррозионных или окислительных средах. Оно используется для проверки его коррозионной стойкости и стойкости к окислению, а также для обеспечения долговременной надежности сплава в жестких условиях, таких как влажность, кислотность или высокая температура. Это испытание особенно важно для таких применений, как экранирование медицинского оборудования, противовесы морской техники и радиаторы электронной промышленности, которые могут гарантировать сохранение производительности компонентов в сложных условиях. Отличные характеристики химических свойств обусловлены химической инертностью вольфрама и защитным эффектом связующей фазы никеля и меди. Никель образует плотный оксидный защитный слой, предотвращающий проникновение коррозионных сред, в то

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

время как высокая стабильность вольфрама повышает стойкость сплава к химической эрозии. Испытание химических свойств включает испытания на коррозионную стойкость и стойкость к окислению и должно проводиться в контролируемой среде, имитирующей реальные условия применения.

Испытание на коррозионную стойкость обычно проводится методом погружения или испытания в солевом тумане. При испытании на погружение образец сплава помещают в определённую коррозионную среду (например, разбавленную кислоту, щелочной раствор или солёную воду) и наблюдают за изменениями его поверхности, потерей массы или продуктами коррозии при контролируемых температуре и времени. Испытание разработано для имитации условий долгосрочного использования медицинских изделий в стерильной среде или морских компонентов в морской воде для оценки коррозионной стойкости сплава. Образец необходимо отполировать и очистить для удаления поверхностного оксидного слоя и загрязнений, чтобы результаты испытания соответствовали свойствам самого материала. Коррозионная стойкость никеля в фазе соединения никель-медь обеспечивает хорошую работу сплава во влажных или кислых средах, особенно в медицинских применениях, где коррозионная стойкость обеспечивает биосовместимость и долговечность компонентов. Испытание в солевом тумане имитирует морскую или промышленную среду, подвергая образец воздействию солевого тумана (например, нейтрального солевого тумана или кислотного солевого тумана) для наблюдения за пятнами коррозии или разрушением поверхности. Процессы жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования уменьшают поры и обнажение границ зерен за счет формирования плотной микроструктуры, что сокращает путь проникновения агрессивных сред и повышает коррозионную стойкость.

Испытание стойкости к окислению обычно проводится посредством высокотемпературных испытаний на окисление или термогравиметрического анализа. При высокотемпературных испытаниях на окисление образцы помещаются в высокотемпературную среду воздуха или кислорода для наблюдения за образованием поверхностных оксидных слоев, увеличением массы или изменением характеристик, имитируя условия работы высокотемпературных компонентов аэрокосмической техники или электронных радиаторов. Стойкость никеля к окислению обеспечивает образование защитного оксидного слоя при высоких температурах, предотвращая дальнейшую эрозию под воздействием кислорода, в то время как высокая термическая стабильность вольфрама обеспечивает структурную целостность сплава. Термогравиметрический анализ оценивает скорость и степень окислительных реакций путем точного измерения изменения массы образца при нагревании, что подходит для высокоточных лабораторных испытаний. Испытание необходимо проводить в печи с точным контролем температуры, а поверхность образца должна быть гладкой для снижения влияния начальных дефектов. В процессе спекания используется атмосфера аргона высокой чистоты, чтобы избежать оксидных включений, влияющих на стойкость к окислению. Обработка поверхности (например, химическая пассивация или антиоксидантное покрытие) может дополнительно повысить стойкость к окислению и продлить срок службы компонента. В практическом применении испытания химических свойств обеспечивают надежность сплавов в суровых условиях.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Например, в медицинской компьютерной защите коррозионная стойкость обеспечивает долговременную стабильность компонентов в стерильных условиях; в противовесах аэрокосмических турбин стойкость к окислению обеспечивает сохранение эксплуатационных характеристик в высокотемпературных газовых средах. Оптимизация испытаний должна быть направлена на обеспечение постоянства подготовки образцов и достоверности моделирования условий окружающей среды, чтобы исключить влияние примесей (таких как кислород или сера) или дефектов поверхности на результаты. Контроль качества подтверждает достоверность результатов посредством повторных испытаний и калибровки с использованием стандартных образцов.

4.3 Стандартная система сплава вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрама, никеля и меди является важной основой для обеспечения его качества, производительности и постоянства применения, охватывая требования к составу, показатели производительности, методы испытаний и процессы контроля качества. Эти стандарты разработаны международными, национальными или отраслевыми организациями для регулирования процессов производства, испытаний и применения, чтобы гарантировать соответствие и конкурентоспособность сплава на мировом рынке. Система стандартов включает в себя международные стандарты (такие как ASTM B777, ISO 20886), национальные стандарты (такие как серия GB/T Китая) и отраслевые стандарты, обеспечивая единый эталон качества для аэрокосмической, медицинской и электронной промышленности. Национальные стандарты Китая играют важную руководящую роль в производстве и применении сплавов вольфрама, никеля и меди, отражая особенности отечественных технологий и рыночный спрос.

4.3.1 Китайский национальный стандарт для сплава вольфрам-никель-медь

Национальные стандарты Китая (серия GB/T) являются основными спецификациями для производства, испытаний и применения сплавов вольфрама-никеля-меди. Они разработаны Национальным управлением по стандартизации и широко используются в отечественной аэрокосмической, медицинской, электронной и военной областях. Эти стандарты определяют диапазон составов, требования к эксплуатационным характеристикам, методы испытаний и процессы контроля качества сплавов, чтобы гарантировать, что продукция соответствует требованиям высоконадежных приложений, таких как противовесы самолетов, медицинские коллиматоры или балансировочные блоки фотолитографических машин. Будучи крупнейшей страной в мире по запасам вольфрама (с запасами около 3,5 миллионов тонн) и центром производства вольфрамовых сплавов, Китай разработал ряд стандартов для вольфрамовых сплавов высокой плотности. Как представитель немагнитных сплавов высокой плотности, сплавы вольфрама-никеля-меди получили особое внимание.

Один из самых важных стандартов в национальных стандартах Китая - это GB / T 26036-2010 Тяжелые вольфрамовые сплавы, который применяется к сплавам на основе вольфрама высокой плотности, включая сплавы вольфрама-никеля- меди , и определяет диапазон состава (например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

85% -97% вольфрама, никеля и меди в качестве связующих фаз), требования к плотности, механические свойства и методы испытаний. Стандарт требует, чтобы сплав имел высокую плотность для удовлетворения потребностей противовеса и экранирования, при этом подчеркивая немагнитные свойства, подходящие для электромагнитно-чувствительных сред, таких как оборудование МРТ. Анализ состава требует использования методов спектроскопии (таких как XRF или ICP-AES) для проверки соотношения вольфрама, никеля и меди, а содержание примесей (таких как кислород и углерод) должно строго контролироваться, чтобы избежать ухудшения производительности. Испытания механических свойств включают прочность на растяжение и пластичность, а испытания на растяжение необходимы для подтверждения надёжности сплава при высоких нагрузках. Испытания химических свойств включают оценку коррозионной стойкости и стойкости к окислению, чтобы гарантировать стабильность сплава во влажной среде или при высоких температурах.

Кроме того, GB/T 228.1-2010 Испытание на растяжение металлических материалов Часть 1: Метод испытания при комнатной температуре содержит спецификации для испытания механических свойств сплавов вольфрам-никель-медь, направляя измерение предела прочности на растяжение и предела текучести, чтобы гарантировать, что результаты соответствуют требованиям авиационной или военной промышленности. GB/T 231.1-2018 Испытание твердости по Бринеллю металлических материалов Часть 1: Метод испытания определяет процесс испытания твердости для оценки твердости поверхности и технологических свойств сплавов. GB/T 1423-2012 Метод определения плотности драгоценных металлов и их сплавов содержит стандартизированный метод испытания плотности, чтобы гарантировать, что характеристики высокой плотности сплава соответствуют проектным требованиям.

Применение национальных стандартов Китая способствовало повышению качества и рыночной конкурентоспособности отечественных вольфрам-никелево-медных сплавов. Например, в медицинской сфере стандарты гарантируют соответствие немагнитных и коррозионностойких свойств экранирующих деталей требованиям ISO к биосовместимости; в электронной промышленности стандарты регламентируют испытания плотности и теплопроводности балансировочных блоков фотолитографических машин для обеспечения высокой точности работы. Внедрение стандартов необходимо сочетать с оптимизацией производственного процесса, например, с использованием жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования для повышения плотности, а также строгим контролем сырья и атмосферы для снижения содержания примесей. Контроль качества осуществляется посредством стандартизированных многоточечных испытаний и сертификации независимыми организациями (например, лабораториями CNAS).

4.3.2 Международные стандарты для сплавов вольфрам-никель-медь

Международные стандарты – это глобальные спецификации для контроля качества и применения сплавов вольфрама, никеля и меди, разработанные Международной организацией по стандартизации (ISO) и другими авторитетными организациями и широко применяемые в авиационной, медицинской и электронной промышленности. Эти стандарты содержат единые

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рекомендации по составу, эксплуатационным характеристикам, методам испытаний и сертификации качества сплавов, обеспечивая единообразие и надежность продукции в различных странах и отраслях. Поскольку сплавы вольфрама, никеля и меди являются немагнитными материалами высокой плотности, международные стандарты в основном ориентированы на диапазон состава, плотность, механические и немагнитные свойства и подходят для высокоточных и чувствительных к электромагнитным полям применений.

ISO 20886:2004 Техническая спецификация для высокоплотных вольфрамовых сплавов, разработанная Международной организацией по стандартизации, является одним из основных международных стандартов для сплавов вольфрам-никель-медь, применимых к высокоплотным сплавам на основе вольфрама (включая W-Ni-Cu и W-Ni-Fe). Стандарт определяет диапазон состава сплава (содержание вольфрама 85% -97%, никель и медь в качестве связующих фаз) и требует проверки его плотности, механических свойств (таких как прочность на растяжение и пластичность) и немагнитных свойств. Стандарт подчеркивает определение соотношения основных элементов с помощью спектрального анализа (например, XRF или ICP-AES), оценку механических свойств с помощью испытаний на растяжение и ударных испытаний, а также подтверждение немагнитных свойств с помощью испытаний на прочность при намагничивании, что соответствует требованиям медицинской защиты МРТ или балансировочных грузов для электронной промышленности. ISO 20886 также требует, чтобы производственный процесс (например, спекание в жидкой фазе или горячее изостатическое прессование) обеспечивал компактность микроструктуры и снижал влияние пор и примесей на эксплуатационные характеристики.

Другим важным международным стандартом является серия стандартов ISO 10993 «Биологическая оценка медицинских изделий», которая применима к применению сплавов вольфрама, никеля и меди в медицинской сфере (например, в экранах компьютерной томографии или коллиматорах). Стандарт требует проверки биосовместимости сплава, в частности, контроля содержания никеля для предотвращения аллергических реакций. Испытания на коррозионную стойкость и стойкость к окислению должны соответствовать требованиям стандарта для обеспечения долговременной стабильности сплава в стерильной или влажной среде. Международный стандарт также ссылается на ISO 6892-1 «Испытания металлических материалов на растяжение» для регулирования испытаний механических свойств, руководства по измерению прочности на растяжение и предела текучести, а также обеспечения надежности сплава в условиях высоких напряжений. В совокупности эти стандарты обеспечивают техническую поддержку для глобального применения сплавов вольфрама, никеля и меди.

Внедрение международных стандартов способствовало распространению вольфрам-никелево-медных сплавов на мировом рынке. Например, в аэрокосмической отрасли стандарты гарантируют соответствие высокой плотности и немагнитных свойств противовесов проектным требованиям; в медицинской сфере стандарты гарантируют биосовместимость и долговечность экранирующих элементов. Процесс внедрения требует сочетания высокоточного испытательного оборудования (например, СЭМ или VSM) и строгих процессов контроля качества (например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сертификации независимыми организациями) для обеспечения соответствия требованиям стандартов.

4.3.3 Стандарты сплавов вольфрам-никель-медь в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах мира

Основанные на международных стандартах, стандарты на вольфрамо-никелево-медные сплавы в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах разработали более конкретные и подробные спецификации, учитывающие местные технологии и рыночный спрос. Эти стандарты имеют определенные различия в контроле состава, эксплуатационных требованиях и методах испытаний, что отражает специфику применения каждой страны в аэрокосмической, медицинской и электронной промышленности. Далее будут рассмотрены соответствующие стандарты США, Европы, Японии и Южной Кореи, а также их характеристики и области применения.

Стандарт США : Соединенные Штаты принимают ASTM B777-15 «Спецификация сплава вольфрама высокой плотности» в качестве основного стандарта для сплавов вольфрама, никеля и меди, который применим к сплавам W-Ni-Cu и W-Ni-Fe. Стандарт делит вольфрамовые сплавы на четыре категории (класс 1-4), определяет эксплуатационные требования на основе содержания вольфрама (90% -97%) и соотношения фаз связующего вещества, а также охватывает плотность, механические свойства (такие как прочность на растяжение и твердость) и немагнитные испытания. ASTM B777 требует, чтобы прочность была проверена испытанием на растяжение (ссылка ASTM E8), а немагнитные свойства были подтверждены испытанием на намагниченность, что подходит для медицинских экранирующих деталей МРТ и балансировочных грузов для электронной промышленности. Стандарт также требует, чтобы производственные процессы (такие как порошковая металлургия) гарантировали, что микроструктура плотная, а пористость снижена. Военный стандарт США MIL-T-21014D «Сплав высокой плотности на основе вольфрама» дополнительно уточняет требования к военному применению, определяет эксплуатационные характеристики броневой сердечников и противовесов для аэрокосмической техники, а также уделяет особое внимание ударопрочности и высокотемпературной стабильности. Эти стандарты широко используются в аэрокосмической и оборонной промышленности США, гарантируя, что сплавы соответствуют высоким требованиям к надежности.

Европейские стандарты : Европа в основном опирается на стандарт «EN 1982 Медь и медные сплавы: слитки и отливки» и другие стандарты для сплавов высокой плотности. Хотя он в основном предназначен для сплавов на основе меди, некоторые спецификации применимы к литью и обработке вольфрамо-никелево-медных сплавов. Стандарты EN делают акцент на контроле состава (например, соотношении никеля и меди) и испытаниях на коррозионную стойкость, что подходит для применения в морской технике и медицинском оборудовании. Европа также использует стандарт «EN ISO 6892-1 Испытание металлических материалов на растяжение» для стандартизации испытаний механических свойств, требуя проверки эксплуатационных свойств сплавов в условиях высоких напряжений. Европейские стандарты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ориентированы на защиту окружающей среды и биосовместимость, особенно в медицинских применениях, требуя соответствия стандарту биологической оценки «EN ISO 10993» для контроля содержания никеля во избежание аллергических реакций. Европейские вольфрам-никелево-медные сплавы в основном используются для изготовления противовесов судов и медицинских экранов, при этом особое внимание уделяется стойкости к коррозии в морской воде и немагнитным свойствам.

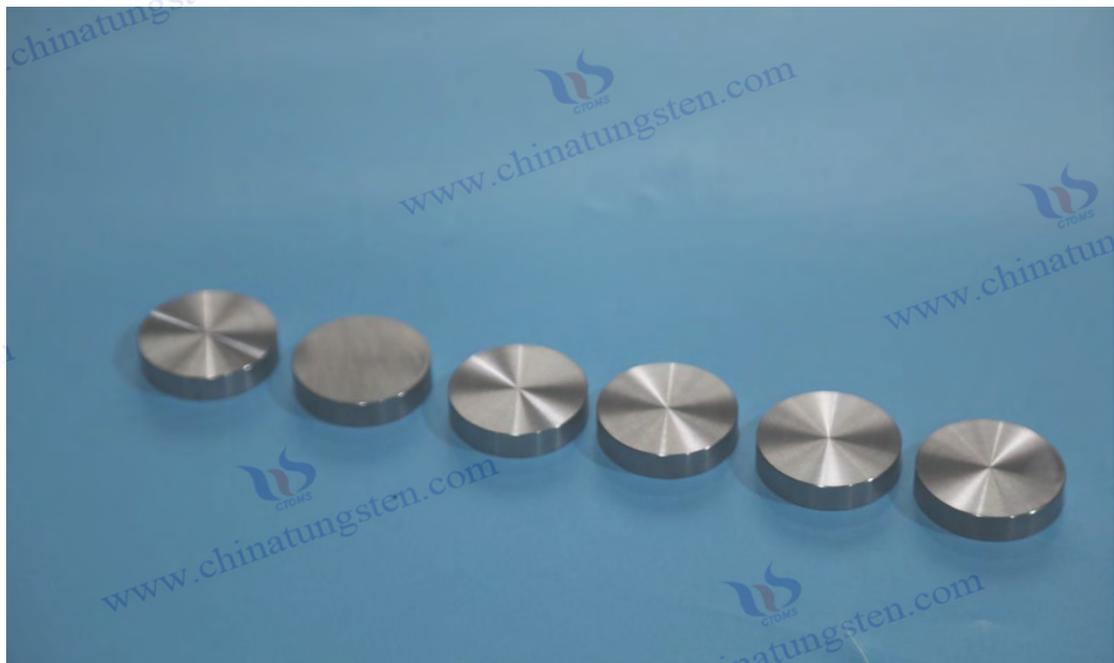
Японский стандарт : Япония приняла стандарт «JIS H7202 Высокоплотный вольфрамовый сплав» в качестве основного стандарта для сплавов вольфрама, никеля и меди, подходящих для аэрокосмической, электронной и медицинской промышленности. Стандарт определяет диапазон содержания вольфрама (90–95%) и состав связующей фазы, требует проверки состава спектральным анализом и оценки механических свойств испытаниями на растяжение и удар. Японский стандарт уделяет особое внимание испытаниям на немагнитность и теплопроводность, которые подходят для высокоточных применений в литографических балансировочных блоках и элементах экранирования МРТ. «JIS Z2241 Метод испытания на растяжение металлических материалов» содержит рекомендации по испытаниям механических свойств для обеспечения согласованности результатов. В области технологий производства Япония фокусируется на высококачественном сырье и вакуумном спекании для снижения влияния примесей (таких как кислород или железо) на немагнитные свойства и коррозионную стойкость. Особенно заметно применение японских стандартов в электронной промышленности, что способствует популяризации сплавов в полупроводниковом оборудовании.

Корейский стандарт : Корея принимает KS D 5201 Вольфрам и вольфрамовые сплавы для регулирования производства и испытания сплавов вольфрама-никеля-меди, которые подходят для аэрокосмической, электронной и военной областей. Стандарт требует проверки плотности, механических свойств и немагнитных свойств сплава и гарантирует, что состав и эксплуатационные характеристики соответствуют требованиям с помощью спектрального анализа и испытания на прочность при намагничивании. Корейские стандарты сосредоточены на испытании тепловых характеристик (таких как теплопроводность и коэффициент теплового расширения) для удовлетворения потребностей радиаторов и балансировочных блоков в электронной промышленности. Производство сплавов вольфрама-никеля-меди в Корее в основном использует процессы спекания в жидкой фазе и горячего изостатического прессования для обеспечения плотности микроструктуры. Стандарт также ссылается на KS D ISO 6892 Испытание металлических материалов на растяжение для испытания механических свойств, подчеркивая надежность сплава в условиях высоких напряжений. Стремительное развитие Кореи в области электроники и полупроводников способствовало внедрению этих стандартов для обеспечения соответствия сплавов требованиям высокоточного оборудования.

Различия в стандартах разных стран в основном отражаются в области применения и особенностях испытаний. Американский стандарт ориентирован на высокие требования к прочности в военной и аэрокосмической промышленности, европейский – на коррозионную стойкость в морской и медицинской промышленности, японский – на немагнитность и высокую

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

точность в электронной промышленности, а южнокорейский – на электронику и системы терморегулирования. Внедрение этих стандартов требует сочетания высокоточного испытательного оборудования и строгого контроля содержания примесей (например, содержание кислорода <math><0,05\%</math>) для обеспечения стабильности характеристик сплава. Сертификация качества обычно проводится независимой организацией в целях содействия международной торговле.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 5 Технология приготовления сплава вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрама, никеля и меди представляет собой высокоплотный, немагнитный, высокопроизводительный материал. Он широко используется в аэрокосмической, медицинской, электронной и военной областях благодаря своим превосходным механическим свойствам, теплопроводности и химической стабильности. Процесс его приготовления в основном основан на технологии порошковой металлургии, а высокоплотная и однородная микроструктура достигается с помощью таких этапов, как предварительная обработка сырья, смешивание порошков, прессование, жидкофазное спекание и последующая обработка. Предварительная обработка сырья является отправной точкой процесса приготовления, которая напрямую влияет на текучесть, однородность смешивания и спекаемые свойства порошка и, таким образом, определяет качество и эксплуатационные характеристики сплава. Сфероидизация и контроль размера частиц вольфрамового порошка и обработка поверхности никель-медного порошка являются двумя ключевыми звеньями в предварительной обработке сырья для обеспечения высокой чистоты, соответствующего размера частиц и поверхностной активности порошка.

5.1 Предварительная обработка сырья

При получении сплава вольфрама, никеля и меди в качестве сырья используются высокочистые вольфрамовые порошки, никелевые порошки и медные порошки, и с помощью процесса порошковой металлургии формируется плотная структура сплава. Предварительная обработка сырья направлена на оптимизацию физических и химических свойств порошка, включая размер частиц, морфологию, чистоту и состояние поверхности, чтобы улучшить текучесть, однородность смешивания и спекаемость порошка. В качестве основного компонента вольфрамовый порошок должен иметь высокую чистоту и подходящее распределение размеров частиц, чтобы обеспечить высокую плотность и механические свойства сплава. Никелевые и медные порошки, как связующие фазы, должны иметь хорошую поверхностную активность и смачиваемость, чтобы способствовать соединению с частицами вольфрама во время жидкофазного спекания. Предварительная обработка сырья включает такие этапы, как подготовка порошка, просеивание, очистка и модификация поверхности, которые должны проводиться в чистой среде, чтобы избежать загрязнения примесями (такими как кислород и углерод). Далее будут подробно рассмотрены процесс и применение сфероидизации вольфрамового порошка, а также контроль размера частиц и обработка поверхности никель-медным порошком.

5.1.1 Сфероидизация порошка вольфрама и контроль размера частиц

Сфероидизация и контроль размера частиц вольфрамового порошка являются основными звеньями предварительной обработки сырья, направленными на оптимизацию морфологии и распределения размеров частиц вольфрамового порошка, улучшение его текучести, насыпной плотности и характеристик спекания, а также непосредственное влияние на плотность и микроструктурную однородность сплава вольфрам-никель-медь. Вольфрамовый порошок обычно получают методом восстановления водородом или плазменным методом, а исходная

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

морфология в основном нерегулярная многоугольная или угловая, с широким диапазоном размеров частиц. Обработка сфероидизацией делает частицы вольфрамового порошка сферическими, уменьшает края и углы, улучшает текучесть (сокращение времени течения) и насыпную плотность, а также способствует смешиванию и прессованию порошка. Контроль размера частиц гарантирует, что распределение размеров частиц порошка находится в пределах надлежащего диапазона, улучшает перераспределение и уплотнение частиц во время спекания и предотвращает образование пор или сегрегации, влияющих на свойства сплава. При сфероидизации часто используют технологию плазменной сфероидизации или высокотемпературной атомизации расплава. Плазменная сфероидизация осуществляется путем подачи порошка вольфрама в пламя высокотемпературной плазмы, в результате чего частицы мгновенно плавятся и под действием поверхностного натяжения образуют сферические капли, которые затем быстро охлаждаются и затвердевают. Этот метод может значительно улучшить сферичность порошка вольфрама, уменьшить дефекты поверхности и повысить текучесть порошка, что делает его пригодным для высокоточных применений, таких как блоки балансировки фотолитографических машин. Метод высокотемпературной атомизации расплава расплавляет сырье вольфрама и распыляет его на мелкие капли, которые затем охлаждаются в инертном газе (например, аргоне) для образования сферических частиц, что подходит для крупномасштабного производства. Сфероидизированный порошок вольфрама имеет более высокую насыпную плотность, что способствует однородности прессованной заготовки и снижает риск неравномерной усадки при спекании.

Контроль размера частиц обычно достигается с помощью просеивания, классификации потоком воздуха или технологии ультразвуковой дисперсии. Метод просеивания использует стандартное сито для разделения вольфрамовых порошков разных размеров частиц. Он прост и эффективен, но точность низкая. Классификация потоком воздуха разделяет частицы с помощью воздушного потока и точно контролирует распределение размеров частиц, что подходит для приложений с высокими требованиями. Ультразвуковая дисперсия использует ультразвуковые волны для разрушения агломерированных частиц и оптимизации однородности размера частиц. Соответствующий диапазон размеров частиц может сбалансировать активность спекания и структурную стабильность. Более мелкие частицы усиливают эффект растворения-пересадки во время спекания и способствуют уплотнению; более крупные частицы обеспечивают стабильную структуру скелета, которая подходит для высоких требований к прочности сердечников военных бронейных снарядов. Контроль размера частиц необходимо сочетать с контролем чистоты сырья, чтобы избежать примесей кислорода или углерода, влияющих на характеристики порошка.

В процессе производства сфероидизация вольфрамового порошка и контроль размера частиц обеспечивают высокую плотность и механические свойства сплава. Например, в противовесах для аэрокосмической промышленности сфероидизация вольфрамового порошка повышает плотность заготовки и обеспечивает стабильность центра тяжести; в медицинских защитных элементах равномерное распределение частиц по размеру снижает пористость и повышает эффективность поглощения излучения. Оптимизация процесса должна быть направлена на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечение высокой точности оборудования (например, контроля температуры плазмы) и чистоты окружающей среды (работы в чистых помещениях) для предотвращения пылевого загрязнения. Контроль качества включает проверку распределения размеров и морфологии частиц с помощью лазерного анализатора размера частиц и наблюдения в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ).

5.1.2 Поверхностная обработка никель-медного порошка

Поверхностная обработка никель-медного порошка является еще одним ключевым шагом в предварительной обработке сырья, которая направлена на оптимизацию химического состояния поверхности, чистоты и активности никелевых и медных порошков, улучшение их смачиваемости и связующей способности с частицами вольфрама во время жидкофазного спекания. Никель и медь, как связующие фазы, образуют жидкую фазу во время спекания, заполняют промежутки между частицами вольфрама и повышают ударную вязкость, немагнитность и теплопроводность сплава. Необработанный никель-медный порошок может иметь оксидный слой (такой как NiO или CuO), органические загрязнители или адсорбированные газы на поверхности, что снижает его смачиваемость и активность спекания, что приводит к плохому межфазному связыванию или повышенной пористости. Обработка поверхности улучшает свойства порошка за счет очистки, химической модификации или технологии нанесения покрытия, чтобы обеспечить компактность и однородность сплава. Для очистки поверхности обычно используют химическую очистку или ультразвуковую очистку. Химическая очистка использует разбавленную кислоту (такую как соляная кислота или азотная кислота) или щелочной раствор для удаления оксидного слоя и загрязнений с поверхности никель-медного порошка, после чего следует промывка деионизированной водой и сушка в вакууме или инертном газе (например, аргоне), чтобы избежать вторичного окисления. Ультразвуковая очистка использует высокочастотные ультразвуковые волны для создания мельчайших пузырьков в чистящей жидкости (например, этаноле), которые разрывают и удаляют поверхностные загрязнения, что подходит для высокоточных применений. Процесс очистки должен контролировать концентрацию раствора и время, чтобы избежать чрезмерной коррозии и повреждения морфологии порошка. Чистота поверхности никель-медного порошка после очистки улучшается, а смачиваемость жидкой фазой повышается, что способствует образованию спекающихся шеек.

Химическая модификация дополнительно улучшает спекаемость никель-медного порошка за счет введения активного агента или восстановителя на поверхность никель-медного порошка. Например, следовое количество восстановителя (такого как водород или муравьиная кислота) используется для обработки поверхности порошка для восстановления оксидов и формирования активной металлической поверхности, что усиливает химическую связь с частицами вольфрама. Технология нанесения покрытия на поверхность (такая как химическое осаждение из газовой фазы, CVD) может осаждать тонкий слой углерода или металла (например, Ni или Cu) на поверхность никелевого или медного порошка для улучшения стойкости к окислению и смачиваемости, что подходит для высокотемпературной среды спекания. Модифицированный порошок образует более равномерное распределение жидкой фазы при жидкофазном спекании,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

уменьшает сегрегацию и способствует перестройке и связыванию частиц вольфрама. В процессе производства поверхностная обработка никель-медного порошка оптимизирует микроструктуру и свойства сплава. Например, в теплоотводах для электронной промышленности поверхностно обработанный никель-медный порошок улучшает теплопроводность и прочность межфазных связей; в медицинских коллиматорах улучшенная смачиваемость снижает пористость и повышает эффективность защиты от излучения. Оптимизация процесса должна быть направлена на обеспечение экологичности чистящего раствора и чистоты рабочей среды для предотвращения вторичного загрязнения. Контроль качества включает проверку химического состояния поверхности с помощью рентгеноспектрального анализа (РФС) или энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) в сочетании с сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) для изучения морфологии порошка.

5.2 Процесс порошковой металлургии

Порошковая металлургия является основным методом получения сплава вольфрама-никеля-меди. Он образует структуру сплава высокой плотности путем смешивания порошка вольфрама, порошка никеля и порошка меди, прессования и спекания. Этот процесс может точно контролировать пропорцию компонентов, оптимизировать микроструктуру и соответствовать высоким требованиям к эксплуатационным характеристикам противовесов в аэрокосмической отрасли, медицинских экранирующих деталей и балансировочных блоков в электронной промышленности. Процесс порошковой металлургии включает такие этапы, как смешивание порошков, прессование, спекание в жидкой фазе и последующую обработку (такую как горячее изостатическое прессование или термическая обработка). Среди них смешивание порошков и прессование являются ключом к формированию однородной заготовки, что напрямую влияет на перегруппировку частиц, распределение жидкой фазы и плотность в процессе спекания. Процесс должен осуществляться в чистой среде с использованием высокочистого сырья и точного оборудования для обеспечения постоянства и надежности характеристик сплава.

5.2.1 Параметры процесса смешивания порошков

Процесс смешивания порошков является начальным этапом порошковой металлургии, целью которого является равномерное смешивание порошка вольфрама, порошка никеля и порошка меди в заданной пропорции для образования порошковой смеси с равномерным распределением компонентов, что закладывает основу для последующего прессования и спекания. Равномерное смешивание порошков может обеспечить однородность микроструктуры сплава, избежать сегрегации компонентов или чрезмерной пористости и, таким образом, улучшить плотность, механические свойства и немагнитные свойства. Вольфрамовый порошок, как основной компонент, обеспечивает высокую плотность и твердость; никелевый порошок и медный порошок, как связующие фазы, повышают вязкость и теплопроводность. Успех процесса смешивания порошков зависит от оптимизации размера частиц порошка, морфологии, смесительного оборудования и условий процесса, чтобы гарантировать полный контакт частиц порошка и равномерное распределение.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Смешивание порошка обычно использует механическое смешивание или технологию смешивания в шаровой мельнице. Механическое смешивание использует V-образный смеситель или трехмерный смеситель для перемешивания и перемешивания частиц порошка в контейнере путем вращения или вибрации, что подходит для крупномасштабного производства. Смеситель должен иметь высокоточный контроль скорости, чтобы избежать чрезмерного смешивания, которое приводит к повреждению морфологии частиц или небольшой агломерации. Смешивание в шаровой мельнице добавляет мелющие тела (например, циркониевые шары) в шаровую мельницу и использует столкновение и трение для достижения равномерного распределения порошка, что подходит для высокоточного мелкосерийного производства. Соотношение шаров к материалу и время измельчения необходимо контролировать в процессе шаровой мельницы, чтобы избежать чрезмерного измельчения, которое приводит к разрушению частиц или внесению примесей (таких как кислород или железо). Среда смешивания должна осуществляться в условиях инертного газа высокой чистоты (например, аргона) или вакуума, чтобы предотвратить окисление порошка и сохранить поверхностную активность никель-медного порошка.

порошков заключается в оптимизации соответствия размеров частиц и однородности смешивания порошков. Вольфрамовый порошок обычно имеет больший размер частиц, в то время как никелевый и медный порошки мельче. Разумное соответствие размеров частиц может увеличить плотность упаковки смеси и способствовать уплотнению во время прессования и спекания. Морфология порошка также имеет решающее значение. Сфероидизированный вольфрамовый порошок обладает высокой текучестью, что способствует равномерному смешиванию; поверхностная обработка никелевого и медного порошков (например, химическая очистка) удаляет оксидный слой, улучшает контакт между частицами и смачиваемость жидкофазного спекания. Оптимизация условий процесса включает время смешивания, скорость вращения и контроль окружающей среды. Соответствующее время смешивания обеспечивает однородность, а слишком длительное время смешивания может привести к агломерации частиц или повреждению поверхности. Добавление небольшого количества смазки может улучшить текучесть порошка, но ее необходимо удалить перед спеканием, чтобы избежать остатков углерода.

В реальном производстве равномерность смешивания порошка напрямую влияет на эксплуатационные характеристики сплава. Например, в медицинских защитных деталях равномерное распределение компонентов обеспечивает эффективность поглощения излучения и отсутствие магнитных полей; в противовесах для аэрокосмической промышленности равномерное смешивание порошка улучшает постоянство плотности и обеспечивает стабильность центра тяжести. Контроль качества включает проверку соотношения компонентов с помощью анализа проб (рентгенофлуоресцентной спектроскопии или атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой), а также наблюдение за равномерностью смешивания и морфологией частиц с помощью лазерного анализатора размера частиц и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Оптимизация процесса должна быть направлена на обеспечение чистоты оборудования и чистоты порошка (>99,9%) для предотвращения загрязнения примесями.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2.2 Технология прессования

Технология прессования является ключевым этапом в процессе порошковой металлургии. Она прессует равномерно смешанные порошки вольфрама, никеля и меди в заготовку определенной формы и прочности, которая служит основой для последующего спекания. Качество прессования напрямую влияет на плотность, точность формы и спекаемость заготовки, что, в свою очередь, определяет конечные свойства сплава, такие как высокая плотность, прочность и вязкость. Прессование требует обеспечения плотной упаковки частиц порошка и снижения пористости (начальная пористость составляет около 20–30%) при сохранении структурной целостности заготовки. Она подходит для изготовления противовесов сложной формы для аэрокосмической техники, медицинских коллиматоров или теплопроводов в электронной промышленности. Технология прессования требует оптимизации параметров процесса в сочетании со свойствами порошка и целевым применением, чтобы гарантировать соответствие заготовки требованиям к спеканию.

Прессование обычно использует технологию холодного прессования или изостатического прессования. Холодное прессование использует гидравлический или механический пресс для загрузки порошка в форму и прессования его в заготовку определенной формы под высоким давлением. Это подходит для производства деталей простой формы (таких как прутки или пластины). Конструкция пресс-формы должна учитывать текучесть и степень сжатия порошка, чтобы обеспечить равномерную плотность внутри заготовки и избежать трещин или расслоения. Изостатическое прессование (холодное изостатическое прессование, CIP) образует заготовку высокой плотности путем загрузки порошка в гибкую форму (например, резиновый мешок) и приложения равномерного давления во всех направлениях в жидкой среде. Это подходит для сложных форм или высокоточных деталей. Изостатическое прессование может значительно снизить концентрацию напряжений и пористость внутри заготовки и подходит для изготовления медицинских защитных деталей или балансировочных блоков фотолитографических машин.

Успех прессования зависит от оптимизации свойств порошка и условий процесса. Сфероидизированный вольфрамовый порошок и поверхностно обработанный никель-медный порошок обладают высокой текучестью, что позволяет формировать более плотную структуру в процессе прессования и повышать начальную плотность заготовки. Распределение размеров частиц порошка должно быть разумно подобрано, а мелкие частицы заполняют промежутки между крупными частицами, уменьшая пористость. Добавление небольшого количества связующего (например, поливинилового спирта) может повысить прочность заготовки в сыром виде, но его необходимо удалить обезжириванием перед спеканием. Давление прессования необходимо корректировать в зависимости от типа порошка и целевой плотности. Слишком высокое давление может привести к износу формы или растрескиванию заготовки, а слишком низкое – к недостаточной плотности. Контроль окружающей среды (например, работа в чистой комнате) позволяет избежать загрязнения пылью или примесями и поддерживать чистоту заготовки. Процесс обезжиривания проводится после прессования, а связующее и смазывающее вещество удаляются низкотемпературным нагревом, чтобы избежать влияния остатков углерода

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на качество спекания.

В реальном производстве технология прессования напрямую влияет на эксплуатационные характеристики и область применения сплава. Например, в сердечниках бронепробойных снарядов военного назначения высокоплотная заготовка обеспечивает высокую плотность и прочность сплава после спекания; в тепловодах для электронной промышленности однородная структура заготовки улучшает теплопроводность и размерную точность. Контроль качества позволяет проверить однородность и пористость заготовки путем измерения плотности (метод Архимеда) и микроскопического исследования. Оптимизация процесса должна быть направлена на износостойкость пресс-формы и точный контроль давления с использованием высокоточного гидравлического оборудования или автоматизированной системы изостатического прессования.

5.2.3 Процесс жидкофазного спекания

Процесс спекания в жидкой фазе является ключевым этапом в приготовлении сплава вольфрама, никеля и меди. Он смачивает частицы вольфрама, образуя жидкую фазу с никелем и медью при высокой температуре, способствует перегруппировке и уплотнению частиц и формирует высокоплотную, однородную микроструктуру. Этот процесс использует высокую температуру плавления вольфрама (около 3422 °C) и низкую температуру плавления никеля и меди (около 1300-1450 °C) для достижения тесной связи частиц вольфрама под действием жидкой фазы и улучшения механических свойств (прочности на разрыв, вязкости), теплопроводности и немагнитных свойств сплава. Спекание в жидкой фазе является идеальным выбором для высокопроизводительных применений, таких как противовесы в аэрокосмической промышленности, медицинские защитные детали и радиаторы в электронной промышленности, поскольку оно позволяет производить сплавы с плотностью, близкой к теоретической, и соответствовать строгим требованиям к качеству.

Процесс жидкофазного спекания обычно проводится в вакууме или атмосфере высокочистого инертного газа (например, аргона) для предотвращения окисления и внедрения примесей. Процесс включает три стадии: нагрев, изоляцию и охлаждение. На стадии нагрева однородно перемешанные заготовки вольфрама, никеля и меди нагреваются выше температуры плавления никеля и меди, и никель и медь расплавляются с образованием жидкой фазы, которая смачивает поверхность частиц вольфрама. Благодаря низкому поверхностному натяжению и хорошей смачиваемости жидкой фазы жидкие никель и медь быстро заполняют промежутки между частицами вольфрама, способствуют перегруппировке частиц за счет капиллярного действия и значительно уменьшают пористость заготовки. Стадия изоляции является ядром уплотнения. Жидкая фаза воздействует на частицы вольфрама через механизм растворения-пересадки. Небольшое количество атомов вольфрама растворяется и повторно осаждается в точках контакта частиц, образуя спекающуюся шейку, что усиливает прочность связи между частицами. На этапе охлаждения необходимо контролировать скорость охлаждения, чтобы избежать трещин, вызванных термическим напряжением, обеспечивая при этом затвердевание жидкой фазы никеля и меди с образованием стабильной гранцентрированной кубической структуры,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечивающей прочную связь с частицами вольфрама.

Успех спекания в жидкой фазе зависит от оптимизации условий процесса. Соотношение никеля и меди (обычно 7:3 или 3,5:1,5) влияет на количество и текучесть жидкой фазы. Более высокое содержание никеля может улучшить смачиваемость, но может вызвать сегрегацию; более высокое содержание меди снижает температуру плавления жидкой фазы, что благоприятно для спекания, но необходимо избегать потери прочности. Точный контроль температуры спекания и времени выдержки имеет решающее значение. Слишком высокая температура может вызвать чрезмерный рост частиц вольфрама или потерю жидкой фазы, в то время как слишком низкая температура приведет к недостаточному количеству жидкой фазы и снижению плотности. Контроль атмосферы использует высокочистый аргон или вакуумную среду для предотвращения образования оксидов (таких как WO_3 или NiO), которые влияют на немагнитные свойства или коррозионную стойкость. Начальная плотность заготовки (оптимизированная прессованием) также влияет на эффект спекания. Заготовки высокой плотности могут уменьшить пористость и увеличить конечную плотность.

В условиях реального производства жидкофазное спекание обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики сплава. Например, в медицинских коллиматорах высокая плотность и однородная микроструктура обеспечивают отличную защиту от радиации; в противовесах для аэрокосмической промышленности прочное сцепление спекаемой шейки обеспечивает высокую прочность и вибростойкость. Контроль качества подтверждает эффективность процесса посредством измерения плотности (метод Архимеда), наблюдения морфологии спекаемой шейки с помощью СЭМ и анализа фазовой структуры методом рентгеновской дифракции.

5.3 Передовые технологии подготовки

В связи с ростом спроса на детали сложной формы и высокой точности в аэрокосмической, медицинской и электронной промышленности традиционные методы порошковой металлургии сталкиваются с ограничениями при изготовлении изделий сложной геометрии. Передовые технологии подготовки, такие как литье металлов под давлением (MIM), аддитивное производство (AM) и электроплазменное спекание (SPS), открывают новые возможности для получения сплавов вольфрама, никеля и меди. Эти технологии отвечают требованиям высокопроизводительных приложений, увеличивая свободу формования, сокращая производственные циклы и оптимизируя микроструктуру. Литье металлов под давлением стало важной технологией получения сплавов вольфрама, никеля и меди благодаря своим преимуществам при производстве небольших деталей сложной формы и широко используется в медицинских приборах, электронном оборудовании и компонентах военного назначения.

5.3.1 Литье металлов под давлением

Литье металлов под давлением (MIM) — это передовая производственная технология,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сочетающая порошковую металлургию и литье пластмасс под давлением. В процессе литья под давлением образуется текучая суспензия путем смешивания порошков вольфрама, никеля и меди со связующим веществом. После литья под давлением она обезжиривается и спекается для получения деталей из сплава высокой плотности. МИМ особенно подходит для изготовления небольших, сложных по форме, высокоточных деталей, таких как медицинские хирургические инструменты, соединители для электронной промышленности или небольшие противовесы для аэрокосмической промышленности. Преимущества МИМ заключаются в большой свободе формования, высоком коэффициенте использования материала и высокой эффективности производства. По сравнению с традиционным прессованием, МИМ позволяет получать сложные геометрические структуры (например, тонкие стенки или внутренние каналы), сокращая объем последующей обработки и снижая затраты.

Процесс МИМ включает четыре основных этапа: смешивание, литье под давлением, удаление связующего и спекание. На этапе смешивания порошки вольфрама, никеля и меди (соотношение 85% -97% вольфрама, 2% -10% никеля, 1% -8% меди) смешиваются со связующим (например, полипропиленом или связующим на основе воска) для образования однородной суспензии. Порошок вольфрама необходимо сфероидизировать для улучшения текучести, а порошки никеля и меди необходимо очистить поверхность для улучшения сцепления. Смешивание необходимо проводить в высокотемпературном перемешивающем устройстве для обеспечения полного диспергирования порошка и связующего. На этапе литья под давлением суспензия впрыскивается в прецизионную форму. Конструкция формы должна учитывать усадку и точность формы для формирования сырого тела с целевой геометрией. На этапе удаления связующего вещества связующее вещество удаляется термическим или растворяющим способом, обычно при медленном нагревании при низкой температуре, чтобы избежать растрескивания или деформации заготовки. На этапе спекания используется жидкофазное спекание, при котором никель и медь образуют жидкую фазу при высокой температуре, которая смачивает частицы вольфрама, способствует уплотнению и формирует структуру сплава, близкую к теоретической плотности.

Успех МИМ зависит от оптимизации параметров процесса. Размер частиц порошка должен быть мелким и равномерно распределенным, чтобы улучшить текучесть суспензии и плотность заготовки; выбор и пропорция связующего влияют на гладкость литья под давлением и эффективность удаления связующего, а текучесть и прочность в сыром виде должны быть сбалансированы. Процесс спекания требует точного контроля температуры и атмосферы, а для предотвращения окисления и обеспечения немагнитных свойств используется высокочистый аргон или вакуумная среда. Окончательные характеристики деталей МИМ дополнительно оптимизируются с помощью постобработки (такой как горячее изостатическое прессование или отжиг) для устранения остаточной пористости и напряжений и повышения прочности и вязкости. Контроль качества проверяет характеристики деталей посредством наблюдения микроструктуры с помощью СЭМ, измерения плотности и испытания механических свойств, которые должны соответствовать стандартам ASTM B777 или GB/T 26036.

В реальном производстве технология МИМ значительно повысила гибкость производства сплавов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама, никеля и меди. Например, в медицинской сфере коллиматоры сложной формы, изготовленные с использованием МИМ, обладают высокой точностью и эффективностью защиты от излучения; в электронной промышленности микрорадиаторы или разъемы, изготовленные с использованием МИМ, обладают высокой теплопроводностью и немагнитными свойствами. Оптимизация процесса должна быть направлена на обеспечение высокой точности изготовления пресс-форм и экологичности связующего вещества, а также использование разлагаемых или нетоксичных связующих веществ для снижения воздействия на окружающую среду. В будущем сочетание МИМ с аддитивным производством позволит обеспечить быстрое производство более сложных форм и расширить возможности применения сплавов вольфрама, никеля и меди в высокотехнологичных областях.

5.3.2 Технология горячего изостатического прессования

Горячее изостатическое прессование (ГИП) — это передовой процесс постобработки в порошковой металлургии, при котором заготовкам из сплава вольфрама, никеля и меди в среде инертного газа при высокой температуре и давлении оказывается изотропное давление для устранения микропор, повышения плотности и улучшения микроструктурной однородности. Эта технология особенно подходит для производства высокопроизводительных компонентов, таких как противовесы для аэрокосмической промышленности, медицинские защитные элементы и радиаторы в электронной промышленности, и может значительно улучшить плотность, механические свойства (прочность на разрыв, ударную вязкость) и коррозионную стойкость сплава. Горячее изостатическое прессование дополнительно уплотняет структуру после спекания в жидкой фазе, чтобы компенсировать мельчайшие дефекты, которые могут остаться при обычном спекании, так что сплав имеет плотность, близкую к теоретической, и соответствует требованиям приложений с высокой надежностью.

Процесс горячего изостатического прессования обычно осуществляется в специальном оборудовании HIP с использованием высокочистого аргона в качестве рабочей среды. Процесс включает три основных этапа: нагрев, изоляцию и охлаждение. На этапе нагрева спеченная заготовка из сплава вольфрама, никеля и меди помещается в закрытую полость и нагревается до температуры, близкой к температуре плавления связующей фазы никеля и меди (около 1200-1400 °C), чтобы сделать материал пластичным. На этапе изоляции применяется высокое изостатическое давление (обычно в среде аргона) для сжатия микропор внутри заготовки с равным давлением во всех направлениях, что способствует тесному сцеплению частиц вольфрама и связующей фазы никеля и меди. Фаза никеля и меди обладает определенной текучестью при высокой температуре, заполняя поры и усиливая силу сцепления интерфейса; частицы вольфрама сохраняют свою объемно-центрированную кубическую структуру и обеспечивают стабильный скелет. Стадию охлаждения необходимо проводить медленно, чтобы избежать образования трещин, вызванных термическими напряжениями, а также обеспечить стабильность структуры сплава и однородность его характеристик.

Успех горячего изостатического прессования зависит от оптимизации условий процесса. Точный

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контроль температуры и давления является ключевым фактором. Температура должна обеспечивать достаточную текучесть никель-медной фазы, но избегать чрезмерного растворения частиц вольфрама. Давление должно быть достаточным для устранения пористости, но не слишком высоким, чтобы избежать перегрузки оборудования. Высокая чистота аргона необходима для предотвращения образования оксидов (таких как WO_3 или NiO), которые влияют на немагнитные свойства или коррозионную стойкость сплава. Начальная плотность заготовки (оптимизированная путем смешивания порошков и прессования) влияет на эффект HIP. Заготовки с более низкой начальной пористостью могут более эффективно достигать состояния, близкого к теоретической плотности. Горячее изостатическое прессование также можно комбинировать со спеканием в жидкой фазе в качестве одного технологического этапа, непосредственно от порошковых прессованных заготовок до конечных плотных деталей, сокращая производственный цикл. В реальном производстве горячее изостатическое прессование значительно улучшает характеристики сплавов вольфрам-никель-медь. Например, в аэрокосмической отрасли противовесы, обработанные методом горячего изостатического прессования (ГИП), обладают более высокой плотностью и виброустойчивостью, обеспечивая стабильность центра тяжести и долговременную надежность; в медицинских коллиматорах структуры, плотность которых близка к теоретической, повышают эффективность радиационной защиты и коррозионную стойкость. Контроль качества подтверждает эффективность ГИП посредством измерения плотности (метод Архимеда), наблюдения микроструктуры с помощью СЭМ и испытания механических свойств. Оптимизация процесса требует особого внимания герметизации оборудования под высоким давлением и равномерности температуры, а также использования автоматизированных систем управления для повышения точности.

5.4 Постобработка и обработка

Постобработка и механическая обработка являются заключительными этапами подготовки сплава вольфрама, никеля и меди. Они направлены на оптимизацию точности размеров, качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей после спекания или горячего изостатического прессования для соответствия строгим требованиям авиационной, медицинской и электронной промышленности. Процессы постобработки включают термическую, поверхностную и механическую обработку для снятия остаточных напряжений, улучшения качества поверхности и достижения сложной геометрии. Высокая твердость и вязкость сплавов вольфрама, никеля и меди усложняют их обработку, но благодаря оптимизации технологических процессов можно добиться высокой точности и качества готовых деталей. Постобработка и механическая обработка не только улучшают функциональность деталей, но и повышают их долговечность и надежность в суровых условиях.

Термическая обработка является важным этапом постобработки, обычно включающим отжиг или старение, целью которого является устранение остаточных напряжений, возникающих во время спекания или горячего изостатического прессования, оптимизация микроструктуры и повышение ударной вязкости и коррозионной стойкости. Отжиг устраняет дефекты кристаллов (такие как дислокации или напряжения на границах зерен) в фазе связи никель-медь путем диффузии через

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

изоляцию при более низкой температуре (около 800–1000 °C), сохраняя при этом стабильность частиц вольфрама. Старение способствует образованию следов преципитатов в фазе никель-медь и повышает прочность фазы связи за счет долговременной изоляции при более низкой температуре. Термическую обработку необходимо проводить в среде аргона высокой чистоты или вакуума для предотвращения окисления и обеспечения немагнитной и химической стабильности сплава. Термообработанные детали демонстрируют более однородные механические свойства и более высокую усталостную прочность, что делает их пригодными для использования в противовесах для аэрокосмической промышленности или медицинских хирургических инструментах.

Обработка поверхности улучшает качество поверхности и эксплуатационные характеристики компонентов за счет полировки, химической пассивации или технологии нанесения покрытий. Механическая полировка или электрохимическая полировка делает поверхность гладкой, уменьшает дефекты поверхности (такие как царапины или микротрещины), повышает коррозионную стойкость и эстетику и особенно подходит для медицинских экранов или электронных радиаторов. Химическая пассивация образует защитный оксидный слой посредством обработки кислотным раствором, повышает коррозионную стойкость и подходит для применения в морской среде или стерилизованных средах. Технология покрытия (например, PVD TiN или DLC покрытие) может дополнительно улучшить твердость поверхности, износостойкость и стойкость к окислению, а также продлить срок службы компонента. Обработку поверхности следует выбирать в соответствии с требованиями к применению, чтобы избежать чрезмерно толстых покрытий, которые влияют на теплопроводность или немагнитность.

Механическая обработка включает точение, фрезерование, шлифование или электроэрозионную обработку (ЭЭМ), которая используется для получения сложных форм и высокоточных размеров. Высокая твердость вольфрамо-никелево-медных сплавов требует использования твердосплавных или алмазных инструментов, а низкие скорости резания и достаточное количество охлаждающей жидкости необходимы для снижения термических напряжений и износа инструмента. Электроэрозионная обработка подходит для обработки деталей сложной геометрии (например, внутренних каналов или тонкостенных конструкций) и удаляет материал с помощью электрических импульсов для поддержания высокой точности. Обработанные детали необходимо очищать и проверять на отсутствие остаточных напряжений и повреждений поверхности. Контроль качества включает проверку точности обработки и качества поверхности с помощью КИМ, контроля шероховатости поверхности и наблюдения с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

В реальном производстве постобработка и обработка значительно расширили возможности применения сплавов вольфрама, никеля и меди. Например, в балансировочном блоке фотолитографического станка прецизионная механическая обработка обеспечивает субнанометровую точность, а полировка поверхности улучшает теплопроводность и коррозионную стойкость; в сердечниках броневой снарядов военного назначения термообработка повышает прочность, а механическая обработка позволяет получать изделия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сложной формы. Оптимизация процесса должна быть направлена на повышение износостойкости инструмента и чистоты рабочей среды, а также на использование автоматизированного оборудования для повышения эффективности. Контроль качества позволяет проверить целостность компонентов с помощью неразрушающих методов контроля (например, ультразвука или рентгеновского излучения).

5.4.1 Прецизионная обработка

Прецизионная механическая обработка является ключевым процессом постобработки сплавов вольфрама, никеля и меди. Она используется для переработки спеченных или горячеизостатически прессованных заготовок в готовые компоненты с высокоточными размерами и сложной геометрией, отвечающие строгим требованиям аэрокосмической, медицинской и электронной промышленности. Высокая твердость и прочность сплавов вольфрама, никеля и меди затрудняют их обработку, но благодаря оптимизации инструментов и процессов можно достичь субмикронной и даже нанометровой точности, что подходит для компонентов литографических машин для снижения вибрации, медицинских коллиматоров и броневой брони сердечников военного назначения. Прецизионная механическая обработка не только обеспечивает точность формы и размеров деталей, но и улучшает качество поверхности, повышая производительность и надежность.

Прецизионная механическая обработка обычно включает в себя такие технологии, как точение, фрезерование, шлифование и электроэрозионная обработка (ЭЭО). При точении и фрезеровании используются станки с числовым программным управлением (ЧПУ) для резки сплавов, что позволяет изготавливать детали правильной формы, такие как прутки или пластины. Высокая твердость вольфрама требует использования твердосплавных или алмазных инструментов, а низкие скорости резания и достаточное количество охлаждающей жидкости (например, эмульсий на водной основе) необходимы в процессе обработки для снижения термических напряжений и износа инструмента. Шлифование дополнительно улучшает поверхность с помощью шлифовальных кругов или абразивов, достигая высокой чистоты и точности размеров, что особенно подходит для поверхностей медицинских экранов или электронных радиаторов. ЭЭО использует электрические импульсы для удаления следов материала с проводящих материалов, что подходит для изготовления деталей сложной формы или внутренних каналов, например, для микроструктурной обработки небольших противовесов в аэрокосмической промышленности. ЭЭО позволяет достичь высокой точности без прямого контакта, снижая износ инструмента и напряжение в материале.

Процесс обработки должен быть оптимизирован для адаптации к характеристикам сплава вольфрама, никеля и меди. Прочность фазы связи никеля и меди может привести к прилипанию сплава к инструменту во время обработки, а поверхностные заусенцы должны быть уменьшены за счет оптимизации скорости резания и подачи. Высокая твердость частиц вольфрама может привести к быстрому износу инструментов, и инструменты должны регулярно проверяться и заменяться для обеспечения постоянства обработки. Окружающая среда обработки должна быть

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чистой (работа в чистой комнате), чтобы избежать пыли и примесей, которые влияют на производительность компонента. Выбор охлаждающей жидкости должен учитывать защиту окружающей среды и некоррозионность сплава, чтобы избежать поверхностной коррозии или остатков. Обработанные детали должны быть очищены ультразвуком для удаления стружки и охлаждающей жидкости, чтобы гарантировать чистоту поверхности.

В условиях реального производства прецизионная обработка значительно повышает эксплуатационные характеристики деталей из сплава вольфрама, никеля и меди. Например, в балансировочном блоке фотолитографического станка обработка на станках с ЧПУ обеспечивает субнанометровую точность и стабильность платформы; в сердечниках бронебойных снарядов военного назначения электроискровая обработка формирует сложные геометрические формы и повышает пробивную способность. Контроль качества обеспечивает точность размеров и чистоту обработки с помощью трёхкоординатных измерительных машин (КИМ), лазерных интерферометров и испытаний на шероховатость поверхности. Оптимизация процесса должна быть направлена на интеграцию автоматизированного технологического оборудования и износостойкость инструментальных материалов, а также на использование интеллектуальных систем ЧПУ для повышения эффективности.

5.4.2 Процесс обработки поверхности

Обработка поверхности – важный этап постобработки сплавов вольфрам-никель-медь, направленный на улучшение качества поверхности, коррозионной стойкости, износостойкости и внешнего вида деталей для удовлетворения специфических требований медицинской, электронной и аэрокосмической промышленности. Качество поверхности сплавов вольфрам-никель-медь напрямую влияет на их эксплуатационные характеристики в суровых условиях (таких как стерилизация, морская среда или высокотемпературные условия). Обработка поверхности повышает коррозионную стойкость, стойкость к окислению и функциональность сплава за счет оптимизации состояния поверхности. Процессы обработки поверхности включают механическую полировку, химическую пассивацию, электрохимическую полировку и технологию нанесения покрытий. Выбор подходящего метода обработки зависит от условий применения.

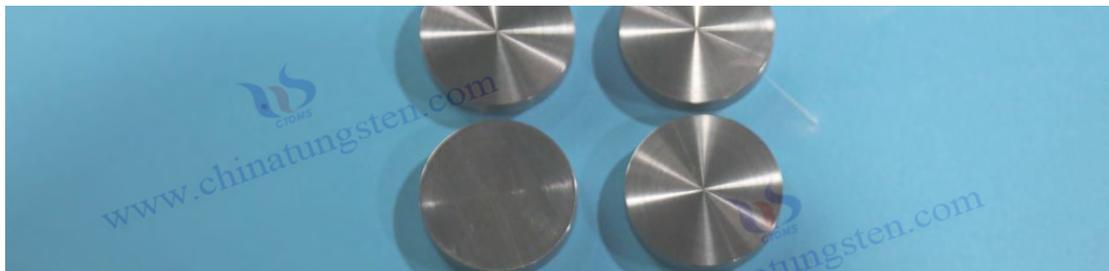
Механическая полировка – распространённый метод обработки поверхности. Поверхность детали постепенно шлифуется шлифовальным кругом, полировальной тканью или абразивным инструментом для удаления следов обработки, царапин и мелких дефектов до зеркального блеска. После полировки улучшается гладкость поверхности (уменьшается шероховатость), что не только улучшает внешний вид, но и снижает точки адгезии агрессивных сред, что подходит для применения в медицинских коллиматорах или электронных радиаторах. Полировка требует использования абразивов постепенного измельчения, а давление и скорость полировки контролируются для предотвращения перегрева или концентрации поверхностных напряжений. Электрохимическая полировка использует электрический ток в электролите для небольшого растворения поверхности сплава, сглаживания поверхности и образования тонкой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пассивирующей плёнки, что дополнительно повышает коррозионную стойкость. Этот метод особенно подходит для противовесов судов, эксплуатируемых в морской среде.

Химическая пассивация образует плотный защитный слой оксида (в основном NiO) на поверхности путем погружения деталей в кислый или нейтральный раствор (например, разбавленный раствор азотной кислоты или лимонной кислоты), что повышает коррозионную стойкость и стойкость к окислению. Пассивация требует контроля концентрации раствора и времени погружения, чтобы избежать чрезмерной коррозии и деградации поверхности. Обработанные детали показывают более высокую стабильность в стерилизованных или влажных средах и подходят для длительного использования в медицинских устройствах. Технология нанесения покрытия (например, физическое осаждение из паровой фазы PVD или химическое осаждение из паровой фазы CVD) значительно улучшает твердость поверхности, износостойкость и коррозионную стойкость за счет нанесения тонкого слоя материала (например, TiN, DLC или CrN) на поверхность. Покрытие PVD TiN придает деталям золотистый вид и отличную износостойкость, подходит для противовесов в аэрокосмической промышленности; покрытие DLC имеет низкий коэффициент трения и подходит для скользящих деталей в электронной промышленности. Толщину покрытия необходимо точно контролировать, чтобы не влиять на теплопроводность или немагнитность.

Обработка поверхности должна проводиться в чистой среде, чтобы избежать загрязнения пылью или маслом. Перед обработкой детали необходимо очистить ультразвуком для удаления остатков обработки; после обработки их необходимо промыть деионизированной водой и высушить для предотвращения вторичного загрязнения. Контроль качества подтверждает коррозионную стойкость путем измерения шероховатости поверхности (например, профилометром), наблюдения морфологии поверхности с помощью СЭМ и испытания в солевом тумане. Оптимизация процесса должна быть направлена на экологичность обрабатываемого раствора и высокую точность оборудования, а также на использование автоматизированного оборудования для полировки или нанесения покрытий для повышения однородности. В реальном производстве обработка поверхности значительно улучшает эксплуатационные характеристики сплава. Например, в медицинских деталях экранирования компьютерной томографии электрохимическая полировка улучшает качество поверхности и устойчивость к дезинфекции; в фотолитографических радиаторах покрытия PVD повышают износостойкость и теплопроводность.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

High Density: Typically 16.5 - 18.75 g/cm³

High Thermal Conductivity: Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

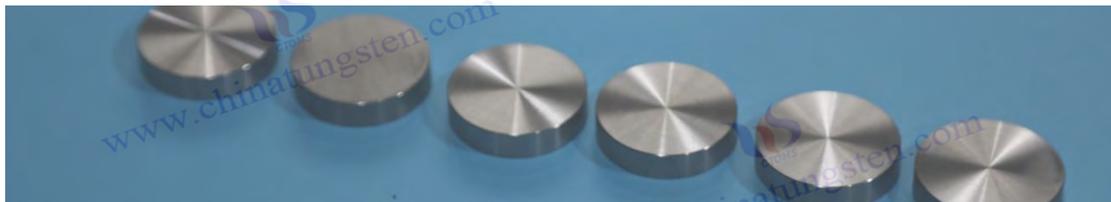
4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 6. Применение сплава вольфрам-никель-медь в сфере электронной информации

Сплав вольфрама-никеля-меди широко используется в области электронной информации благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам, отличной теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения, особенно в корпусе микросхем, управлении теплоотводом и высокоточных компонентах противовеса. Сплав изготавливается методом порошковой металлургии, сочетая высокую плотность вольфрама с прочностью и теплопроводностью фазы связывания никеля и меди, и может отвечать высоким требованиям электронного оборудования к тепловому управлению, электромагнитной совместимости и размерной стабильности. С быстрым развитием технологии 5G, искусственного интеллекта и Интернета вещей растет спрос на высокопроизводительные материалы в области электронной информации. Сплав вольфрама-никеля-меди стал идеальным выбором для корпуса микросхем, радиочастотных модулей и фотолитографических машин благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам.

6.1 Корпус микросхемы и рассеивание тепла

Упаковка чипов и рассеивание тепла являются основными технологиями в области электронной информации, включая фиксацию чипа на подложке и эффективное управление теплом, выделяемым во время работы, для обеспечения высокой производительности и длительного срока службы устройства. Сплав вольфрама, никеля и меди используется в качестве подложки для рассеивания тепла, радиатора и компонента противовеса в упаковке чипов. Благодаря высокой теплопроводности, низкому коэффициенту теплового расширения и немагнитным свойствам он может эффективно рассеивать тепло, поддерживать размерную стабильность и предотвращать электромагнитные помехи для удовлетворения потребностей мощного и высокочастотного электронного оборудования. Микроструктура сплава оптимизируется с помощью процессов жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования для формирования плотной сетки из частиц вольфрама и фазы связывания никеля и меди, что обеспечивает превосходную теплопроводность и механическую стабильность. Его применение охватывает высокоточное оборудование, такое как высокомошные устройства, радиочастотные модули 5G и литографические машины, обеспечивая ключевую поддержку для повышения производительности и миниатюризации электронной информационной индустрии.

6.1.1 Подложка для рассеивания тепла мощного устройства

Теплоотводящая подложка мощных устройств является ключевым компонентом в корпусе чипа. Она используется для быстрого рассеивания сильного тепла, выделяемого чипом во время работы, чтобы предотвратить перегрев, приводящий к снижению производительности или выходу устройства из строя. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для теплоотводящих подложек мощных устройств (таких как усилители мощности, графические процессоры и лазерные диоды) благодаря своей превосходной теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения. Высокая теплопроводность сплава обусловлена быстрой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплопроводностью меди, которая может быстро передавать тепло, выделяемое чипом, в систему рассеивания тепла; низкий коэффициент теплового расширения соответствует характеристикам теплового расширения материалов чипа (таких как кремний или нитрид галлия), уменьшая деформацию или растрескивание, вызванные тепловым напряжением, и обеспечивая долговременную стабильность структуры корпуса. Немагнитные свойства позволяют избежать электромагнитных помех и подходят для высокочастотных электронных устройств.

В процессе подготовки сплав вольфрама-никеля-меди формируется в подложку высокой плотности с помощью процесса порошковой металлургии, а жидкофазное спекание обеспечивает равномерное распределение фазы связи никеля и меди, что повышает эффективность теплопроводности; горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры и повышает плотность и прочность подложки. Прецизионная механическая обработка и обработка поверхности (например, электрохимическая полировка или нанесение покрытия методом PVD) оптимизируют качество поверхности подложки, снижают тепловое сопротивление и улучшают эффективность контакта с кристаллом. Поверхность подложки вольфрама-никеля-меди обычно соединяется с кристаллом с помощью процессов сварки или склеивания, и необходимо гарантировать прочное соединение интерфейса, чтобы избежать отпадания или растрескивания во время тепловых циклов. В устройствах высокой мощности применение подложек для рассеивания тепла из вольфрама-никеля-меди значительно повышает производительность устройства. Например, в чипах для высокопроизводительных вычислений (HPC) быстрое рассеивание тепла подложки обеспечивает стабильность чипа при высоких нагрузках; в лазерных диодах низкий коэффициент теплового расширения поддерживает точность позиционирования оптических компонентов. Направления оптимизации включают повышение теплопроводности за счёт регулирования соотношения никеля и меди, использование нанопокровов (например, DLC) для снижения поверхностного теплового сопротивления или сочетание технологий аддитивного производства для создания сложных структур теплоотвода. Контроль качества включает проверку свойств подложки путём испытаний на теплопроводность (метод лазерной вспышки) и измерения коэффициента теплового расширения для обеспечения соответствия стандартам электронной промышленности (например, JEDEC).

6.1.2 Противовесный радиатор радиочастотного модуля 5G

Противовесный радиатор модуля 5G RF является ключевым компонентом в оборудовании связи 5G. Он выполняет функции как рассеивания тепла, так и противовеса, обеспечивая тепловое управление модулем и стабильность центра тяжести во время высокочастотной работы. Сплав вольфрама-никеля-меди является предпочтительным материалом для противовесных радиаторов модуля RF из-за его высокой плотности, немагнитных свойств, высокой теплопроводности и низкого коэффициента теплового расширения. Модули 5G RF должны работать с высокочастотными сигналами (миллиметровыми волнами), генерируя много тепла, требуя при этом миниатюризации и высокой точности. Сплав вольфрама-никеля-меди может быстро рассеивать тепло, поддерживать стабильность размеров и избегать электромагнитных помех, отвечая высоким требованиям к производительности модуля. Характеристики высокой плотности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

позволяют сплаву обеспечивать достаточный противовес в ограниченном пространстве, оптимизировать распределение центра тяжести модуля и снизить влияние вибрации на передачу сигнала.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления противовесных радиаторов сложной формы методом литья под давлением (ММ) или порошковой металлургии. Технология ММ позволяет получать высокоточные компоненты путем смешивания порошка со связующим, литья под давлением, обезжиривания и спекания, которые подходят для сложных геометрических требований миниатюрных модулей. Жидкофазное спекание позволяет жидкой фазе никеля и меди смачивать частицы вольфрама, формируя плотную микроструктуру, что повышает теплопроводность и механические свойства. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия TiN методом PVD или электрохимическая полировка) улучшает коррозионную стойкость и чистоту поверхности, снижает тепловое сопротивление и повышает стойкость к окислению. Прецизионная механическая обработка на этапе постобработки обеспечивает размерную точность компонентов и соответствует строгим требованиям к допускам модулей 5G.

В радиочастотных модулях 5G противовесные радиаторы из вольфрама, никеля и меди значительно повышают производительность модуля. Например, в антенных модулях базовых станций высокая плотность сплава обеспечивает стабильность центра тяжести антенны, а теплопроводность быстро рассеивает тепло радиочастотного чипа для поддержания стабильности передачи сигнала; в мобильных терминалах (таких как смартфоны) миниатюрные противовесные радиаторы поддерживают компактную конструкцию модуля, обеспечивая при этом эффективность теплоотвода. Направления оптимизации включают улучшение теплопроводности за счет оптимизации соотношения никеля и меди, улучшение возможностей рассеивания тепла за счет микроструктурных конструкций (таких как сотовые каналы рассеивания тепла) или сочетание технологии горячего изостатического прессования для дальнейшего повышения плотности. Контроль качества проверяет производительность компонентов путем измерения плотности, испытания теплопроводности и испытания на прочность намагничивания для обеспечения соответствия стандартам связи 5G (таким как 3GPP).

6.2 Микроволновое и радиолокационное оборудование

Микроволновое и радиолокационное оборудование является основной технологией в области электронной информации. Оно широко используется в связи, навигации, дистанционном зондировании и национальной обороне. Для обеспечения производительности оборудования в условиях высокой частоты, высокой мощности и сложных условий требуются материалы с высокой плотностью, немагнитностью, высокой теплопроводностью и размерной стабильностью. Вольфрам-никелевый медный сплав стал предпочтительным материалом для компонентов антенного веса и экранирующих компонентов в микроволновом и радиолокационном оборудовании благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам. Его высокая плотность может обеспечить точное управление центром тяжести, немагнитные свойства

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предотвращают электромагнитные помехи, высокая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения обеспечивают тепловое управление и размерную стабильность, а также отвечают требованиям надежности оборудования в экстремальных условиях (таких как высокая температура, вибрация или электромагнитные помехи). Сплав образует плотную микроструктуру посредством жидкофазного спекания и горячего изостатического прессования в сочетании с прецизионной механической обработкой и обработкой поверхности, чтобы соответствовать высоким требованиям точности микроволнового и радиолокационного оборудования.

6.2.1 Сборка антенного груза

Компоненты веса антенны являются ключевыми компонентами в микроволновом и радиолокационном оборудовании, используемыми для регулировки распределения центра тяжести антенны, чтобы обеспечить ее устойчивость и точность наведения в динамических условиях (таких как движение спутника или вибрация корабля). Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для компонентов веса антенны благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в ограниченном объеме, оптимизировать положение центра тяжести антенной системы и уменьшать отклонение, вызванное вибрацией или ветровой нагрузкой. Немагнитные свойства позволяют избежать помех от магнитного поля и обеспечивают точность и стабильность антенны при передаче высокочастотных микроволновых сигналов. Низкий коэффициент теплового расширения сплава обеспечивает размерную стабильность при изменениях температуры (таких как разница дневных и ночных температур или низкая температура на большой высоте) и сохраняет геометрическую точность антенны.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления компонентов веса антенны с помощью порошковой металлургии, обычно с использованием технологии литья под давлением металла (МДМ) или холодного изостатического прессования для формирования заготовок сложной формы, которые соответствуют требованиям компактной конструкции антенных систем. Жидкофазное спекание позволяет жидкой фазе никеля и меди смачивать частицы вольфрама для формирования плотной микроструктуры, что повышает плотность и механические свойства компонентов веса. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры и повышает плотность, что делает его пригодным для высоконадежных применений, таких как антенны спутниковой связи. Прецизионная механическая обработка (например, фрезерование с ЧПУ или электроэрозионная обработка) обеспечивает точность размеров компонентов веса, а обработка поверхности (например, электрохимическая полировка или PVD-покрытие) улучшает коррозионную стойкость и чистоту поверхности, уменьшая рассеивание сигнала или эрозию под воздействием окружающей среды.

В антенных системах компоненты из сплава вольфрам-никель-медь значительно повышают производительность оборудования. Например, в антеннах базовых станций 5G высокая плотность компонентов обеспечивает устойчивость антенны к высокочастотным вибрациям, а немагнитные свойства позволяют избежать помех сигнала; в антеннах спутниковой связи низкий коэффициент

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплового расширения обеспечивает точность наведения в условиях высокогорья. Направления оптимизации включают повышение теплопроводности за счёт оптимизации соотношения никеля и меди, улучшение механических свойств за счёт микроструктурного проектирования (например, внутренних рёбер жёсткости) или изготовление компонентов сложной формы по индивидуальному заказу в сочетании с аддитивными технологиями. Контроль качества включает проверку производительности компонентов путём измерения плотности, испытаний на намагниченность и испытаний на вибрацию для обеспечения соответствия стандартам микроволновой связи.

6.2.2 Компоненты экранирования радаров

Компоненты экранирования радаров используются для изоляции электромагнитных помех, поглощения паразитных сигналов или защиты чувствительных электронных компонентов в радиолокационном оборудовании для обеспечения стабильной работы системы в условиях высоких частот и высокой мощности. Сплав вольфрама, никеля и меди является предпочтительным материалом для компонентов экранирования радаров из-за его немагнитности, высокой плотности и превосходной теплопроводности. Немагнитные свойства позволяют избежать помех со стороны магнитных полей в сигналах радаров, что особенно подходит для высокочувствительных радиолокационных систем (таких как радары с фазированной антенной решеткой). Высокая плотность позволяет сплаву эффективно поглощать и экранировать электромагнитные волны, уменьшая утечку сигнала или внешние помехи. Теплопроводность быстро рассеивает тепло, генерируемое передатчиком или приемником радара, чтобы предотвратить влияние перегрева на производительность оборудования. Низкий коэффициент теплового расширения гарантирует, что компоненты сохраняют размерную стабильность в условиях высоких температур или термоциклирования, чтобы избежать деформации, которая влияет на эффект экранирования.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления экранирующих компонентов методом порошковой металлургии или MIM-технологии, что позволяет создавать сложные формы и компактные конструкции. Жидкофазное спекание формирует плотную микроструктуру с равномерным распределением связующей фазы никеля и меди, что повышает теплопроводность и механические свойства. Горячее изостатическое прессование устраняет остаточную пористость, повышает плотность и долговечность экранирующих компонентов и подходит для высоких требований военных и авиационных радаров. Прецизионная механическая обработка (например, шлифование или электроэрозионная обработка) позволяет добиться высокоточной геометрии, обеспечивая бесшовную интеграцию компонентов с радиолокационными системами. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия PVD CrN или химическая пассивация) повышает коррозионную стойкость и стойкость к окислению, продлевая срок службы компонентов во влажных или высокотемпературных средах.

В радиолокационных системах экранирующие компоненты из сплава вольфрама, никеля и меди значительно повышают надежность системы. Например, в военных РЛС с фазированной антенной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

решеткой немагнитные экранирующие компоненты предотвращают помехи сигнала, а высокая плотность повышает эффективность электромагнитного экранирования; в метеорологических РЛС теплопроводность обеспечивает тепловое управление мощными передатчиками. Направления оптимизации включают повышение теплопроводности путем регулирования соотношения никеля и меди, использование многослойных композитных покрытий для усиления экранирующего эффекта или комбинирование технологий 3D-печати для изготовления сложных экранирующих структур. Контроль качества проверяет характеристики компонентов посредством испытаний на электромагнитное экранирование (например, MIL-STD-461), испытаний на теплопроводность и испытаний в солевом тумане для обеспечения соответствия стандартам радиолокационных систем (например, IEC 61000).

6.3 Микроэлектромеханические системы

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) — это технологии, которые интегрируют микроэлектронику с механическими структурами в микрометровом или миллиметровом масштабе. Они широко используются в смартфонах, автомобилях, медицинских приборах и аэрокосмической технике, таких как акселерометры, гироскопы и микроактюаторы. Для МЭМС-устройств требуются материалы с высокой плотностью для достижения миниатюрных противовесов, немагнитными свойствами для предотвращения электромагнитных помех, отличной теплопроводностью для отвода тепла в крошечных пространствах и низким коэффициентом теплового расширения для обеспечения размерной стабильности. Благодаря высокой плотности и немагнитным свойствам, сплавы вольфрама, никеля и меди могут обеспечить достаточную массу в небольшом объеме и оптимизировать распределение центра тяжести МЭМС-устройств; их высокая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения обеспечивают тепловое управление и долговременную стабильность, что делает их подходящими для применения в высокоточных и динамических средах. Сплавы изготавливаются методом литья металлов под давлением (МИМ) или прецизионной порошковой металлургии в сочетании с прецизионной механической обработкой и обработкой поверхности для удовлетворения требований миниатюризации и высокоточного производства МЭМС.

6.3.1 Противовес инерциального датчика

Противовес инерциального датчика является основным компонентом МЭМС-акселерометров и гироскопов. Он используется для настройки инерционных свойств блока масс датчика, чтобы обеспечить его высокую чувствительность к ускорению или угловой скорости. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для противовесов инерциальных датчиков благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме, повышать чувствительность и точность отклика датчика и подходит для миниатюрных конструкций, таких как МЭМС-датчики для смартфонов или носимых устройств. Немагнитные свойства позволяют избежать помех со стороны магнитных полей в сигналах датчика, обеспечивая высокоточные измерения в сложных электромагнитных условиях (например, в автомобильной электронике или авиационных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

навигационных системах). Низкий коэффициент теплового расширения сплава обеспечивает размерную стабильность противовеса при изменении температуры и поддерживает долговременную надежность датчика.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления микрогрузов с помощью технологии литья под давлением металла (ММ), чтобы соответствовать требованиям устройств MEMS для сложных форм и высокой точности. Процесс ММ смешивает порошки вольфрама, никеля и меди со связующим и образует плотную структуру путем обезжиривания и спекания в жидкой фазе после литья под давлением. Жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама, уменьшает пористость и улучшает плотность и механические свойства. Прецизионная обработка (например, микрофрезерование или лазерная обработка) дополнительно оптимизирует размерную точность противовеса с допуском на микронном уровне. Обработка поверхности (например, электрохимическая полировка или покрытие PVD) улучшает качество поверхности, снижает трение и тепловое сопротивление, а также обеспечивает бесшовную интеграцию со структурами MEMS. Обработка и транспортировка должны осуществляться в чистом помещении, чтобы избежать загрязнения пылью, которое влияет на производительность микрокомпонентов.

В инерциальных датчиках противовесы из сплава вольфрам-никель-медь значительно повышают производительность устройств. Например, в акселерометрах смартфонов противовесы высокой плотности повышают чувствительность обнаружения движения, а немагнитные свойства обеспечивают стабильную работу в условиях электромагнитных помех; в системах автомобильных подушек безопасности размерная стабильность и теплопроводность противовесов обеспечивают надежность датчиков при экстремальных температурах. Направления оптимизации включают улучшение теплопроводности за счет оптимизации соотношения никеля и меди, использование микроструктурных конструкций (например, пористых противовесов) для снижения массы при сохранении инерционности или сочетание технологий аддитивного производства для достижения более высокой точности миниатюризации. Контроль качества проверяет характеристики противовеса путем измерения плотности, испытаний на прочность при намагничивании и испытаний на вибрацию для обеспечения соответствия стандартам МЭМС (например, ISO 16063). В будущем, по мере развития МЭМС-датчиков в сторону повышения чувствительности и миниатюризации, противовесы из сплава вольфрам-никель-медь могут дополнительно оптимизировать производительность за счет интеграции наноматериалов.

6.3.2 Компоненты микровесов

Микросбалансированные компоненты являются ключевыми компонентами в MEMS-актюаторах, осцилляторах или микрзеркала. Они используются для регулировки динамического баланса и распределения центра тяжести микромеханических структур, чтобы обеспечить их устойчивость при высокочастотных вибрациях или быстрых перемещениях. Сплавы вольфрама, никеля и меди являются предпочтительными материалами для микросбалансированных компонентов из-за их

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокой плотности, немагнитных свойств и низкого коэффициента теплового расширения. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме, оптимизировать положение центра тяжести MEMS-устройств (таких как оптические микрзеркала или микрогирископы) и уменьшать смещение вибрации или механический резонанс. Немагнитные свойства позволяют избежать электромагнитных помех и подходят для высокоточного оптического или коммуникационного оборудования. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает геометрическую стабильность компонентов при изменениях температуры и сохраняет рабочую точность MEMS-структуры.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления микросбалансированных компонентов с помощью процесса МИМ или микропорошковой металлургии для удовлетворения требований сложных форм и точности на микронном уровне. Процесс МИМ формирует крошечные заготовки с помощью литья под давлением, а жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование дополнительно повышают плотность, устраняют микропоры и улучшают механические свойства и теплопроводность. Прецизионная обработка (такая как лазерная микрообработка или электроискровая обработка) позволяет достичь высокоточных геометрических форм с допусками, контролируруемыми на микронном уровне, что подходит для крошечных структур MEMS-генераторов. Обработка поверхности (такая как покрытие DLC или химическая пассивация) улучшает износостойкость и коррозионную стойкость, а также продлевает срок службы компонентов в динамических средах. Процесс обработки должен проводиться в среде высокой чистоты, чтобы предотвратить влияние пылевого загрязнения на производительность микрокомпонентов.

В приложениях МЭМС микросбалансированные компоненты из вольфрама, никеля и меди значительно повышают производительность устройств. Например, в лазерных сканирующих микрзеркалах высокоплотные балансирующие компоненты оптимизируют распределение центра тяжести осциллятора и повышают точность и скорость сканирования; в микрогирископах немагнитность и низкий коэффициент теплового расширения обеспечивают высокую чувствительность и адаптивность к окружающей среде. Направления оптимизации включают снижение массы за счет проектирования микроструктур (например, полых структур), использование нанопокровов для улучшения свойств поверхности или сочетание технологий 3D-печати для быстрой настройки сложных форм. Контроль качества проверяет производительность компонентов посредством измерения точности размеров с помощью КИМ, испытаний на теплопроводность и испытаний на электромагнитное экранирование для обеспечения соответствия стандартам МЭМС (например, IEEE 1833).



CTIA GROUP LTD Вольфрамowo-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

High Density: Typically 16.5 - 18.75 g/cm³

High Thermal Conductivity: Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

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. Применение сплава вольфрам-никель-медь в энергетике и промышленности

Сплав вольфрама-никеля-меди показал превосходный потенциал применения в энергетике и промышленности благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам, превосходной теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения, особенно в сценариях с высоким спросом, таких как новые энергетические транспортные средства, аэрокосмическое и промышленное оборудование. Сплав изготавливается методом порошковой металлургии, сочетая высокую плотность вольфрама с прочностью и теплопроводностью связующей фазы никеля-меди, что может соответствовать строгим требованиям энергетического оборудования к терморегулированию, балансировке веса и электромагнитной совместимости. С ростом мирового спроса на чистую энергию и эффективные промышленные технологии применение сплава вольфрама-никеля-меди в области новых энергетических транспортных средств становится все более важным, особенно в противовесах роторов двигателей и подложках для рассеивания тепла аккумуляторных батарей.

7.1. Область транспортных средств на новых источниках энергии

Новые энергетические транспортные средства (включая чистые электромобили и гибридные транспортные средства) полагаются на эффективные двигательные системы и системы управления аккумуляторными батареями, и предъявляют высокие требования к плотности, теплопроводности, немагнитности и размерной стабильности материалов. Сплав вольфрама, никеля и меди стал идеальным материалом для ключевых компонентов в двигательных и аккумуляторных системах благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам. Высокая плотность позволяет ему обеспечивать точную балансировку веса и оптимизировать динамический баланс ротора двигателя; высокая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения поддерживают тепловое управление аккумуляторной системой и поддерживают эксплуатационную стабильность и безопасность; немагнитные свойства позволяют избежать электромагнитных помех и обеспечивают производительность двигателя и электронной системы. Сплав изготавливается путем спекания в жидкой фазе, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки для удовлетворения потребностей новых энергетических транспортных средств в высокой точности и долговечности.

7.1.1 Вес ротора двигателя

Противовес ротора двигателя является ключевым компонентом приводной системы новых энергетических транспортных средств. Он используется для регулировки распределения центра тяжести ротора, обеспечения динамического равновесия двигателя при высокоскоростном вращении, снижения вибрации и шума, а также повышения эффективности и срока службы. Сплав вольфрама, никеля и меди является предпочтительным материалом для противовесов ротора двигателя благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в ограниченном объеме, точно контролировать положение центра тяжести ротора, снижать эксцентриситетную вибрацию при

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокоскоростном вращении и продлевать срок службы подшипника двигателя. Немагнитные свойства предотвращают помехи магнитного поля и обеспечивают стабильную работу двигателя в высокочастотной электромагнитной среде. Он особенно подходит для синхронных двигателей с постоянными магнитами или асинхронных двигателей. Низкий коэффициент теплового расширения сплава обеспечивает сохранение размерной стабильности противовеса при повышении температуры, возникающем при работе двигателя, и точность балансировки ротора. В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления компонентов противовеса методом литья под давлением или порошковой металлургии для удовлетворения требований к конструкции сложных форм и миниатюризации. Технология MIM формирует высокоплотную структуру путем смешивания порошков вольфрама, никеля и меди со связующим, обезжиривания и жидкофазного спекания после литья под давлением. Жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама для улучшения механических свойств и теплопроводности. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры, повышает плотность и прочность противовеса и подходит для применения в высокопроизводительных двигателях. Прецизионная механическая обработка обеспечивает допуски на микронном уровне, что гарантирует точное соответствие противовеса и ротора. Обработка поверхности улучшает коррозионную стойкость и чистоту поверхности, а также снижает трение и износ.

В новых энергетических автомобилях грузы ротора двигателя из сплава вольфрам-никель-медь значительно повышают производительность приводной системы. Например, в главных приводных двигателях электромобилей грузы высокой плотности снижают вибрацию и шум, а также повышают КПД; в гибридных двигателях немагнитные грузы предотвращают электромагнитные помехи и повышают точность управления. Направления оптимизации включают улучшение теплопроводности за счет оптимизации соотношения никеля и меди, снижение массы за счет использования облегченной микроструктуры (например, полых грузиков) или сочетание технологий аддитивного производства для достижения сложной конфигурации. Контроль качества проверяет характеристики груза путем измерения плотности, испытаний на вибрацию и испытания на намагниченность для обеспечения соответствия стандартам автомобильной промышленности.

7.1.2 Подложка для рассеивания тепла аккумуляторной батареи

Теплоотводящая подложка аккумуляторной батареи является ключевым компонентом в системе управления батареями новых энергетических транспортных средств. Она используется для быстрого рассеивания сильного тепла, выделяемого батареями во время работы, чтобы предотвратить перегрев, приводящий к снижению производительности или угрозе безопасности. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для теплоотводящей подложки аккумуляторной батареи благодаря своей высокой теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения. Высокая теплопроводность обусловлена быстрой теплопроводностью меди, которая может быстро передавать тепло, выделяемое батареями (например, литий-ионными батареями), в систему рассеивания тепла для поддержания идеальной рабочей температуры

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

батареи. Низкий коэффициент теплового расширения соответствует характеристикам теплового расширения материалов батареи (таких как графитовые или керамические диафрагмы), уменьшает деформацию или растрескивание, вызванные тепловым напряжением, и обеспечивает структурную стабильность аккумуляторной батареи. Немагнитные свойства позволяют избежать электромагнитных помех и подходят для использования рядом с электронным блоком управления (ЭБУ) в системе управления батареями.

В процессе подготовки сплав вольфрама-никеля-меди используется для изготовления теплоотводящих подложек с помощью порошковой металлургии или технологии МИМ для удовлетворения требований аккумуляторной батареи к тонкостенным, высокоточным структурам. Жидкофазное спекание формирует плотную микроструктуру с равномерно распределенными фазами связывания никеля и меди, что улучшает теплопроводность и механические свойства. Горячее изостатическое прессование устраняет остаточную пористость, повышает плотность и долговечность подложки и подходит для применения в мощных аккумуляторных батареях. Прецизионная обработка (например, микрофрезерование или лазерная обработка) позволяет создавать сложные каналы теплоотвода или тонкие пластинчатые структуры для обеспечения тесного контакта с аккумуляторным модулем. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия PVD TiN или химическая пассивация) повышает коррозионную стойкость и стойкость к окислению, а также продлевает срок службы подложки во влажных или высокотемпературных средах. Обработка должна проводиться в чистом помещении, чтобы избежать загрязнения пылью, влияющего на эффективность теплопроводности.

В новых энергетических автомобилях теплоотводящие подложки из сплава вольфрам-никель-медь значительно повышают производительность аккумуляторных батарей. Например, в высокопроизводительных электромобилях быстрое рассеивание тепла подложкой снижает нагрев аккумулятора, продлевая срок его службы и повышая эффективность зарядки; в коммерческих электробусах низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает структурную стабильность аккумуляторной батареи при термоциклировании. Направления оптимизации включают повышение эффективности теплоотвода за счет микроканальной конструкции, использование композитных покрытий (например, графена) для снижения теплового сопротивления или сочетание технологий 3D-печати для создания сложных теплоотводящих структур. Контроль качества проверяет характеристики подложки путем испытаний на теплопроводность (лазерная вспышка), измерения коэффициента теплового расширения и испытаний в солевом тумане для обеспечения соответствия стандартам автомобильной промышленности.

7.2 Решения для промышленного охлаждения

Решения для промышленного теплоотвода являются основой стабильной работы современного промышленного оборудования. Они включают в себя эффективное управление теплом, выделяемым мощными электронными компонентами или системами во время работы, чтобы предотвратить перегрев, приводящий к снижению производительности или выходу оборудования

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

из строя. Сплав вольфрама с никелем и медью является идеальным материалом для промышленных компонентов теплоотвода благодаря своей высокой теплопроводности, низкому коэффициенту теплового расширения и немагнитным свойствам. Он способен быстро рассеивать тепло, сохранять размерную стабильность и предотвращать электромагнитные помехи. Высокая плотность и превосходные механические свойства сплава делают его пригодным для длительного использования в жестких условиях, таких как серверы центров обработки данных, оборудование промышленной автоматизации и силовые полупроводниковые модули. Сплав вольфрама с никелем и медью изготавливается методом жидкофазного спекания, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки для формирования плотной микроструктуры, которая отвечает требованиям промышленного теплоотвода, обеспечивая высокую точность и долговечность, а также обеспечивая стабильную работу высокопроизводительного промышленного оборудования.

7.2.1 Охлаждающая база сервера

Серверный радиатор является ключевым компонентом сервера центра обработки данных. Он используется для быстрого рассеивания сильного тепла, выделяемого центральным процессором, графическим процессором или модулем памяти во время работы, чтобы обеспечить стабильность и надежность сервера при высокой нагрузке. Сплав вольфрама, никеля и меди является предпочтительным материалом для серверного радиатора из-за его высокой теплопроводности и низкого коэффициента теплового расширения. Высокая теплопроводность обусловлена быстрой теплопроводностью меди, которая может быстро передавать тепло, выделяемое процессором, к радиатору или системе жидкостного охлаждения, снижая температуру чипа и продлевая срок службы оборудования. Низкий коэффициент теплового расширения соответствует характеристикам теплового расширения кремниевых чипов или керамических подложек, уменьшает деформацию или растрескивание, вызванные тепловым напряжением, и обеспечивает долговременную стабильность контакта между основанием и чипом. Немагнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи и подходят для высокоплотной электромагнитной среды центра обработки данных.

В процессе подготовки сплав вольфрама-никеля-меди изготавливается в виде радиатора с помощью порошковой металлургии, обычно с использованием технологии холодного изостатического прессования или литья металла под давлением (ММ) для формирования высокоточной заготовки. Жидкофазное спекание позволяет жидкой фазе никеля-меди смачивать частицы вольфрама, образуя плотную микроструктуру, улучшая теплопроводность и механические свойства. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры, повышает плотность и долговечность основания и подходит для высоконагруженных серверных приложений. Прецизионная обработка (например, фрезерование с ЧПУ или лазерная обработка) реализует сложные каналы рассеивания тепла или тонкие пластинчатые структуры для обеспечения тесного контакта с чипом. Обработка поверхности (например, электрохимическая полировка или PVD покрытие TiN) улучшает качество поверхности и коррозионную стойкость, снижает тепловое сопротивление и повышает стойкость к окислению. Обработку необходимо

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проводить в чистом помещении, чтобы избежать загрязнения пылью, влияющего на эффективность теплопроводности.

В серверных приложениях радиатор из вольфрамово-никелево-медного сплава значительно повышает производительность центров обработки данных. Например, в серверах высокопроизводительных вычислений (HPC) быстрое рассеивание тепла от основания снижает нагрев чипа и обеспечивает непрерывную работу с высокой нагрузкой; в серверах облачных вычислений низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает структурную стабильность при термоциклировании и снижает затраты на обслуживание. Направления оптимизации включают повышение эффективности рассеивания тепла за счет микроканальной конструкции, использование нанопокровов (например, графена) для снижения теплового сопротивления или сочетание технологий 3D-печати для создания сложных структур рассеивания тепла. Контроль качества проверяет производительность основания путем испытаний на теплопроводность (метод лазерной вспышки), измерения коэффициента теплового расширения и испытаний на долговечность для обеспечения соответствия стандартам центров обработки данных (например, ASHRAE).

7.2.2 Подложка для корпуса силового полупроводника

Подложки корпусов силовых полупроводников являются основными компонентами мощных электронных устройств. Они используются для поддержки кристалла и быстрого рассеивания сильного тепла, выделяемого во время работы, обеспечивая производительность и надежность устройства в условиях высокого напряжения и больших токов. Сплавы вольфрама, никеля и меди являются идеальными материалами для подложек корпусов силовых полупроводников благодаря своей высокой теплопроводности, низкому коэффициенту теплового расширения и немагнитным свойствам. Высокая теплопроводность позволяет быстро передавать тепло от кристаллов полупроводников к системе рассеивания тепла, снижать температуру перехода и повышать эффективность и срок службы устройства. Низкий коэффициент теплового расширения соответствует характеристикам теплового расширения материалов кристалла (таких как кремний или карбид кремния), что снижает отказы корпуса, вызванные тепловым напряжением, и обеспечивает долговременную стабильность. Немагнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи и подходят для высокочастотных приложений силовой электроники.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления подложек корпусов с помощью порошковой металлургии или технологии MIM для удовлетворения потребностей в тонкостенных, высокоточных структурах. Жидкофазное спекание формирует плотную микроструктуру с равномерным распределением связующей фазы никеля и меди, что улучшает теплопроводность и механические свойства. Горячее изостатическое прессование устраняет остаточную пористость, повышает плотность и долговечность подложки и подходит для приложений высокой мощности. Прецизионная обработка (например, микрофрезерование или электроискровая обработка) позволяет получить плоские поверхности и точные размеры с допусками, контролируруемыми на микронном уровне, для обеспечения плотного соединения с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

кристаллом. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия PVD CrN или химическая пассивация) повышает коррозионную стойкость и стойкость к окислению, а также продлевает срок службы подложки в условиях высоких температур или влажности. Поверхность подложки обычно соединяется с кристаллом сваркой или теплопроводящим клеем, а тепловое сопротивление интерфейса должно быть минимизировано.

В силовых полупроводниковых приборах подложки из сплава вольфрам-никель-медь значительно повышают производительность устройств. Например, в промышленных инверторах быстрое рассеивание тепла подложки повышает плотность мощности и надежность IGBT-модуля; в инверторах для ветроэнергетики низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает стабильность корпуса при термоциклировании. Направления оптимизации включают повышение теплопроводности за счёт оптимизации соотношения никеля и меди, использование многослойной композитной структуры для повышения эффективности рассеивания тепла или сочетание технологий аддитивного производства для создания сложных путей рассеивания тепла. Контроль качества включает проверку характеристик подложки посредством испытаний на теплопроводность, измерения коэффициента теплового расширения и испытаний на высокотемпературное старение для обеспечения соответствия промышленным стандартам (например, IEC 60747).



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 8. Применение сплава вольфрам-никель-медь в национальной оборонной промышленности

Сплав вольфрама, никеля и меди показал отличную ценность для применения в области национальной обороны и военной промышленности благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам, превосходной теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения, особенно в оборудовании радиоэлектронного противодействия, системах вооружения и защитном снаряжении. Сплав изготавливается методом порошковой металлургии, сочетая высокую плотность вольфрама и прочность и теплопроводность связующей фазы никеля и меди, что может соответствовать строгим требованиям военной техники к контролю веса, электромагнитной совместимости и устойчивости к экстремальным условиям. С ростом спроса на высокую точность, высокую надежность и скрытность в современной войне применение сплава вольфрама, никеля и меди в оборудовании радиоэлектронного противодействия становится все более важным, особенно в компонентах веса постановщиков помех и компонентах радиолокационных ловушек.

8.1 Средства радиоэлектронного противодействия

Оборудование радиоэлектронной борьбы является ключевой технологией в области современной национальной обороны и военной промышленности. Оно используется для создания помех работе или обмана радаров, систем связи и навигационного оборудования противника для обеспечения безопасности собственных войск или техники. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для ключевых компонентов оборудования радиоэлектронной борьбы благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам, высокой теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения. Высокая плотность позволяет ему обеспечивать достаточную массу в ограниченном объеме и оптимизировать распределение веса и динамическую балансировку оборудования; немагнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи и обеспечивают стабильную работу в высокочастотных электромагнитных средах; высокая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения способствуют терморегулированию и размерной стабильности, что подходит для высокопрочных и быстроразвертываемых военных сценариев. Сплав изготавливается методами жидкофазного спекания, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки для формирования плотной микроструктуры, отвечающей требованиям к оборудованию радиоэлектронной борьбы в отношении высокой точности и долговечности.

8.1.1 Контрмеры и весовые компоненты

Узел противовеса постановщика помех является ключевым компонентом оборудования радиоэлектронного противодействия. Он используется для корректировки центра тяжести постановщика помех (например, коаксиального дипольного отражателя или инфракрасной ловушки) для обеспечения его динамической устойчивости и точности траектории при высокоскоростном запуске и полете. Вольфрам-никелево-медный сплав является

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предпочтительным материалом для узла противовеса постановщика помех благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме, точно контролировать центр тяжести постановщика помех, оптимизировать его аэродинамические характеристики, увеличивать дальность полета или повышать точность доставки. Немагнитные свойства предотвращают влияние магнитного поля на внутренние электронные компоненты постановщика помех (такие как головка самонаведения или схема управления), обеспечивая нормальную работу в сложной электромагнитной обстановке. Низкий коэффициент теплового расширения сплава обеспечивает размерную стабильность узла противовеса при нагревании от трения о воздух или разнице температур окружающей среды, возникающих при высокоскоростном полете.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления компонентов противовеса с помощью литья под давлением металла (ММ) или порошковой металлургии, чтобы соответствовать требованиям к глушилкам для миниатюризации и сложных форм. Технология ММ формирует высокоплотную структуру путем смешивания порошков вольфрама, никеля и меди со связующим, обезжиривания и спекания в жидкой фазе после литья под давлением. Жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама для улучшения механических свойств и теплопроводности. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры, улучшает плотность и прочность противовеса и подходит для приложений с высокими динамическими нагрузками. Прецизионная механическая обработка (например, фрезерование с ЧПУ или электроэрозионная обработка) позволяет достичь допусков на микронном уровне, что гарантирует точное соответствие противовеса структуре глушилки. Обработка поверхности улучшает коррозионную стойкость и стойкость к окислению, продлевая срок службы компонентов во влажных или высокотемпературных средах.

В системах радиоэлектронного противодействия противовесы из вольфрама, никеля и меди значительно повышают эффективность постановщиков помех. Например, в корабельных дипольных постановщиках помех высокоплотные противовесы оптимизируют траекторию полёта ракеты, обеспечивая точное перекрытие зоны обнаружения РЛС противника; в инфракрасных бомбах-ловушках немагнитные противовесы предотвращают помехи в работе электронной системы наведения и улучшают индукционный эффект. Направления оптимизации включают повышение теплопроводности за счёт оптимизации соотношения никеля и меди, снижение массы за счёт использования микроструктуры (например, полых противовесов) или изготовление противовесов сложной формы по индивидуальному заказу в сочетании с аддитивными технологиями. Контроль качества проверяет характеристики противовеса путём измерения плотности, вибрационных испытаний и испытаний на магнитную прочность для обеспечения соответствия военным стандартам.

8.1.2 Компоненты радиолокационных ловушек

Компоненты радиолокационных ложных целей являются важной частью средств радиоэлектронного противодействия, используемых для имитации сигналов целей или создания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

помех радарам противника, защищая собственные самолеты, корабли или наземное оборудование от обнаружения и атаки. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для компонентов радиолокационных ложных целей благодаря своей высокой плотности, немагнитности и высокой теплопроводности.

Высокая плотность позволяет ему обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме для имитации эффективной площади рассеяния (ЭПР) реальной цели и повышения дезинформационного эффекта ложной цели. Немагнитные свойства предотвращают влияние магнитного поля на внутренние электронные компоненты ложной цели (такие как антенны или генераторы сигналов), обеспечивая стабильную работу в высокочастотной электромагнитной среде. Высокая теплопроводность быстро рассеивает тепло, выделяемое ложной целью при полете на высокой скорости или работе на высокой мощности, предотвращая перегрев и выход из строя; низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность компонентов при экстремальных перепадах температур.

В процессе подготовки сплава вольфрама, никеля и меди используется для изготовления компонентов радиолокационных ловушек с помощью ММ или порошковой металлургии, чтобы соответствовать требованиям сложной формы и высокой точности. Технология ММ формирует крошечные заготовки посредством литья под давлением, а жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование улучшают плотность, устраняют микропоры и улучшают теплопроводность и механические свойства.

Прецизионная механическая обработка (например, лазерная микрообработка или электронская обработка) позволяет достичь сложных геометрических форм с допусками, контролируемые на микронном уровне, что подходит для миниатюрных конструкций радиолокационных ловушек. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия TiN методом PVD или электрохимическая полировка) улучшает коррозионную стойкость и качество поверхности, уменьшает рассеяние сигнала и повышает стойкость к окислению. Обработка должна проводиться в чистом помещении, чтобы предотвратить влияние пылевого загрязнения на производительность компонента.

В ловушках радиолокационных целей компоненты из сплава вольфрам-никель-медь значительно повышают эффективность противодействия. Например, в ловушках беспилотных летательных аппаратов компоненты высокой плотности имитируют эффективную площадь рассеяния реальных самолетов и вводят в заблуждение радары противника; в корабельных системах ложных целей немагнитные свойства и высокая теплопроводность обеспечивают стабильность и надежность ловушки при работе на высокой мощности. Направления оптимизации включают повышение электропроводности путем регулирования соотношения никеля и меди, использование многослойных композитных структур для усиления эффекта электромагнитного экранирования или комбинирование технологий 3D-печати для изготовления ловушек сложной конструкции. Контроль качества проверяет характеристики компонентов путем испытаний на электромагнитное экранирование (MIL-STD-461), испытаний на теплопроводность и испытаний

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на высокотемпературное старение для обеспечения соответствия военным стандартам.

8.2 Система боеприпасов

основной компонент оборонной промышленности, требующий от материалов высокой плотности для оптимизации распределения веса, хороших механических свойств, чтобы выдерживать высокоскоростные удары, и немагнитных свойств для предотвращения электромагнитных помех. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для компонентов противовеса и баланса в системах боеприпасов благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам, высокой прочности и низкому коэффициенту теплового расширения. Высокая плотность позволяет ему обеспечивать достаточную массу в ограниченном объеме для оптимизации стабильности полета и пробивной способности боеприпаса; немагнитные свойства гарантируют, что он не мешает электронной системе наведения в боеприпасе; высокая прочность и вязкость позволяют компонентам выдерживать экстремальные механические нагрузки во время запуска и полета; низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность в условиях высоких температур или перепадов температур. Сплав изготавливается путем жидкофазного спекания, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки для формирования плотной микроструктуры, которая соответствует требованиям системы боеприпасов к высокой точности и долговечности.

8.2.1 Противовес боевой части снаряда

Противовес боевой части снаряда является ключевым компонентом конструкции снаряда. Он используется для регулировки центра тяжести снаряда и обеспечения его динамической устойчивости и точности пробития при высокоскоростном запуске и полете. Вольфрамоникелево-медный сплав является предпочтительным материалом для противовеса боевой части снаряда благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в ограниченном объеме, точно контролировать центр тяжести снаряда, оптимизировать аэродинамические характеристики, уменьшать отклонение в полете и повышать точность попадания. Немагнитные свойства предотвращают влияние магнитного поля на электронные компоненты внутри снаряда (такие как система наведения или взрыватель), обеспечивая надежную работу в сложной электромагнитной обстановке. Высокая прочность и вязкость сплава позволяют ему выдерживать огромную ударную силу при запуске снаряда и вибрацию во время высокоскоростного полета. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность при высоких температурах запуска или перепадах температур окружающей среды.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления противовесов с помощью порошковой металлургии или технологии литья под давлением (MIM), чтобы соответствовать требованиям сложной формы и высокой точности для артиллерийских снарядов. Технология MIM формирует высокоплотную структуру путем смешивания порошков вольфрама, никеля и меди со связующим, обезжиривания и жидкофазного спекания после литья

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

под давлением. Жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама для улучшения механических свойств и теплопроводности. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры, повышает плотность и ударопрочность противовеса и подходит для высокопроизводительных артиллерийских снарядов. Прецизионная механическая обработка (например, точение с ЧПУ или электроэрозионная обработка) позволяет достичь допусков на уровне микронов, что гарантирует точное соответствие противовеса структуре боеголовки. Обработка поверхности повышает коррозионную стойкость и стойкость к окислению, а также продлевает срок службы противовеса во влажных или высокотемпературных средах.

В артиллерийских снарядах противовесы из сплава вольфрама, никеля и меди значительно повышают боеспособность. Например, в танковых снарядах противовесы высокой плотности повышают устойчивость боевой части в полете и бронепробиваемость; в боеприпасах корабельных орудий немагнитные противовесы предотвращают помехи от электронных взрывателей и повышают точность попадания. Направления оптимизации включают повышение прочности за счет оптимизации соотношения никеля и меди, оптимизацию распределения центра тяжести с помощью микроструктурного проектирования (например, градиентных противовесов плотности) или индивидуализацию сложных форм в сочетании с аддитивными технологиями. Контроль качества проверяет характеристики противовеса путем измерения плотности, ударных испытаний и испытаний на магнитную прочность для обеспечения соответствия военным стандартам.

8.2.2 Компоненты балансировки боевой части ракеты

Компонент балансировки боевой части ракеты является ключевым компонентом ракетной системы, который используется для регулировки распределения центра тяжести боевой части, обеспечивая устойчивость и точность наведения ракеты во время высокоскоростного полета и маневрирования. Вольфрамо-никелево-медный сплав является идеальным материалом для компонентов балансировки боевой части ракеты благодаря своей высокой плотности, немагнитности и высокой прочности. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме, точно контролировать центр тяжести боевой части и оптимизировать траекторию полета и устойчивость положения ракеты в пространстве, особенно при сверхзвуковом или маневренном полете. Немагнитные свойства предотвращают влияние магнитного поля на электронную систему боеголовки (такую как радиолокационная головка самонаведения или инерциальная навигационная система), обеспечивая высокоточное наведение. Высокая прочность и вязкость сплава позволяют ему выдерживать ударные нагрузки при запуске и экстремальные механические нагрузки в полете, а низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность при сильном трении или перепаде температур окружающей среды.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди изготавливается в сбалансированных компонентах с помощью МИМ или порошковой металлургии, чтобы удовлетворить потребности боеголовок ракет в миниатюризации и сложных формах. Технология МИМ формирует крошечные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

заготовки с помощью литья под давлением, а жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование улучшают плотность, устраняют микропоры и улучшают механические свойства и теплопроводность. Прецизионная обработка (такая как лазерная микрообработка или электроискровая обработка) позволяет достичь сложных геометрических форм с допусками, контролируемые на микронном уровне, что подходит для компактной конструкции боеголовок. Обработка поверхности (такая как PVD покрытие CrN или электрохимическая полировка) улучшает коррозионную стойкость и качество поверхности, снижает воздействие тепла от трения воздуха и повышает стойкость к окислению. Обработка должна проводиться в среде высокой чистоты, чтобы предотвратить влияние пылевого загрязнения на производительность компонентов.

В ракетном деле балансировочные компоненты из сплава вольфрама, никеля и меди значительно улучшают характеристики боеголовок. Например, в противокорабельных ракетах высокоплотные балансировочные компоненты оптимизируют распределение центра тяжести боеголовки и повышают устойчивость высокоскоростного полета; в высокоточных ракетах немагнитные свойства и высокая прочность обеспечивают надежность и ударопрочность системы наведения. Направления оптимизации включают повышение теплопроводности путем регулирования соотношения никеля и меди, использование многослойных композитных структур для улучшения механических свойств или комбинирование технологий 3D-печати для изготовления сложных балансировочных конструкций. Контроль качества проверяет характеристики компонентов путем измерения плотности, испытаний на вибрацию и испытания на электромагнитное экранирование для обеспечения соответствия военным стандартам.

8.3 Бронезащитные средства

Бронезащитное снаряжение является ключевым компонентом национальной оборонной промышленности. Оно используется для защиты личного состава, транспортных средств и объектов от снарядов, осколков взрывов и других угроз. Для достижения баланса между лёгкостью и высокой защитой требуются материалы с высокой плотностью, прочностью, ударной вязкостью и немагнитными свойствами. Вольфрамоникелевый медный сплав обеспечивает высокую ударопрочность благодаря высокой плотности и превосходным механическим свойствам; его немагнитные свойства предотвращают воздействие электромагнитных помех и подходят для современных систем брони со встроенным электронным оборудованием; низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность при экстремальных температурах.

8.3.1 Легкие броневые пластины для усиления

Легкие броневые пластины являются ключевыми компонентами средств бронезащиты. Они используются для повышения противопулевых свойств броневых пластин при максимальном снижении веса. Они подходят для портативного защитного снаряжения (например, бронжилетов) или легкой бронетехники. Сплавы вольфрама, никеля и меди являются предпочтительными материалами для легких броневых пластин благодаря своей высокой плотности, прочности и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ударной вязкости. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в ограниченном объеме, повышать ударопрочность броневой пластины, а также эффективно поглощать и рассеивать кинетическую энергию снарядов или осколков взрыва. Прочность связующего слоя никеля и меди делает сплав менее склонным к хрупкому разрушению при высокоскоростном ударе и может поглощать энергию посредством пластической деформации, улучшая защитные характеристики. Немагнитные свойства предотвращают помехи магнитных полей на электронном оборудовании, встроенном в броневые пластины (например, средства связи или датчики), что подходит для сложной электромагнитной обстановки современных полей боя. Низкий коэффициент термического расширения обеспечивает размерную стабильность арматуры при высокотемпературных взрывах или перепадах температур окружающей среды.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления арматуры методом порошковой металлургии или литья под давлением (ММ) для удовлетворения требований к легким бронеплитам сложной формы и малого веса. Технология ММ формирует высокоплотную структуру путем смешивания порошков вольфрама, никеля и меди со связующим, обезжиривания и жидкофазного спекания после литья под давлением, а жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама для повышения ударной вязкости и механических свойств. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры, улучшает плотность и ударопрочность арматуры и подходит для приложений с высокими динамическими нагрузками. Прецизионная механическая обработка (например, фрезерование с ЧПУ или электроэрозионная обработка) обеспечивает точную геометрическую форму и размерные допуски, обеспечивая бесшовную интеграцию арматуры с бронеплитами. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия TiN методом PVD или химическая пассивация) повышает коррозионную стойкость и износостойкость, продлевая срок службы арматуры в суровых условиях.

В бронетехнике армирование вольфрамом, никелем и медью значительно повышает защитные свойства лёгких броневых пластин. Например, в бронезилетах армирование повышает устойчивость к бронебойным снарядам, сохраняя при этом лёгкость и повышая мобильность солдата; в лёгкой бронетехнике армирование высокой плотности оптимизирует ударопрочность броневых пластин. Направления оптимизации включают повышение прочности за счёт оптимизации соотношения никеля и меди, использование композитных структур (например, в сочетании с керамикой) для повышения эффективности защиты или сочетание технологий аддитивного производства для создания сложных армирований. Контроль качества проверяет характеристики армирования путём измерения плотности, испытаний на удар и испытаний на электромагнитное экранирование для обеспечения соответствия военным стандартам.

8.3.2 Защитная облицовка бронетехники

Защитная облицовка бронетехники является ключевым защитным компонентом внутри бронетехники, используемым для поглощения и рассеивания энергии ударной волны взрыва, снарядов или осколков, а также для защиты водителя и пассажиров, а также ключевого оборудования от повреждений. Сплав вольфрама, никеля и меди стал предпочтительным

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материалом для защитной облицовки бронетехники благодаря своей высокой плотности, прочности и немагнитным свойствам. Высокая плотность позволяет сплаву эффективно поглощать энергию удара, снижать проникновение взрывов или снарядов и повышать защитные свойства автомобиля. Прочность связующего слоя никеля и меди позволяет облицовке поглощать энергию посредством пластической деформации при высокоскоростном ударе, предотвращая хрупкое разрушение и повышая устойчивость к многократным ударам. Немагнитные свойства облицовки гарантируют отсутствие помех для электронных систем внутри автомобиля (например, навигационного или коммуникационного оборудования), что подходит для современных интеллектуальных бронированных машин. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность облицовки при высокотемпературных взрывах или перепадах температур окружающей среды, а также сохраняет целостность защитной конструкции.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления защитных накладок методом порошковой металлургии или МПМ-технологии, чтобы удовлетворить потребности бронированных транспортных средств в сложных формах и легкости. Жидкофазное спекание формирует плотную микроструктуру, а жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама, улучшая механические свойства и теплопроводность. Горячее изостатическое прессование устраняет микропоры, повышает плотность и ударопрочность накладки и подходит для высокоинтенсивных защитных применений. Прецизионная обработка (например, шлифование с ЧПУ или лазерная обработка) позволяет добиться сложных геометрических форм, а допуски контролируются на микронном уровне для обеспечения точного соответствия накладки конструкции транспортного средства. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия PVD CrN или химическая пассивация) повышает коррозионную стойкость и стойкость к окислению, а также продлевает срок службы накладки во влажных или высокотемпературных средах. Обработка должна проводиться в условиях высокой чистоты, чтобы предотвратить влияние пылевого загрязнения на эксплуатационные характеристики. В бронетехнике защитные облицовки из вольфрамо-никеля и меди значительно повышают защитные характеристики. Например, в основных боевых танках облицовки высокой плотности эффективно поглощают энергию удара взрыва и обеспечивают безопасность экипажа; в бронетранспортерах немагнитные облицовки обеспечивают стабильную работу электронного оборудования. Направления оптимизации включают повышение эффективности поглощения энергии за счет разработки микроструктуры (например, облицовки с градиентной плотностью), использование композитных покрытий для повышения износостойкости или комбинирование технологий 3D-печати для изготовления облицовок по индивидуальному заказу. Контроль качества включает проверку эксплуатационных характеристик облицовки путем измерения плотности, испытаний на удар и испытаний на высокотемпературное старение для обеспечения соответствия военным стандартам.

8.4 Космическое оружие

Космическое оружие включает в себя такие системы, как ракеты, снаряды и космические аппараты, которым требуются материалы с высокой плотностью для оптимизации распределения веса, отличной теплопроводностью и высокой термостойкостью, чтобы выдерживать

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

экстремальные температурные условия, немагнитными свойствами для предотвращения электромагнитных помех и низким коэффициентом теплового расширения для обеспечения размерной стабильности. Сплав вольфрама, никеля и меди стал идеальным материалом для ключевых компонентов аэрокосмического оружия благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам. Высокая плотность позволяет ему обеспечивать достаточную массу в ограниченном объеме, оптимизируя распределение центра тяжести и динамический баланс системы; высокая теплопроводность и высокая термостойкость поддерживают работоспособность компонентов в условиях высоких тепловых потоков; немагнитные свойства предотвращают помехи для прецизионных электронных систем; низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает геометрическую стабильность при экстремальных температурах. Сплав изготавливается путем жидкофазного спекания, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки для формирования плотной микроструктуры, которая отвечает требованиям аэрокосмического оружия к высокой точности и долговечности.

8.4.1 Компоненты сопла ракетного двигателя

Компоненты сопла ракетного двигателя являются основными компонентами аэрокосмического оружия. Они используются для направления и ускорения высокотемпературных и высоконапорных газов для обеспечения эффективной тяги ракеты и должны выдерживать экстремально высокие температуры, термоудары и механические нагрузки. Вольфрамо-никелево-медные сплавы являются предпочтительными материалами для компонентов сопла (таких как вкладыши критического сечения или сопловые удлинители) благодаря своей высокой теплопроводности, высокой термостойкости и низкому коэффициенту теплового расширения. Высокая теплопроводность обусловлена высокой теплопроводностью меди, которая способна быстро рассеивать тепло сопла при высоких температурах в камере сгорания, предотвращая локальный перегрев и разрушение материала. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает геометрическую стабильность сопла при резких перепадах температур, поддерживает точное направление газового потока и повышает эффективность тяги. Высокая плотность и прочность сплава позволяют ему выдерживать истиранию и вибрацию высокоскоростного газового потока, а пластичность связующего слоя никеля и меди поглощает энергию термоудара, предотвращая хрупкое разрушение. Немагнитные свойства гарантируют отсутствие помех для электронных компонентов системы навигации и управления ракетой.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления компонентов сопла с помощью порошковой металлургии или технологии литья под давлением металла (MIM), чтобы соответствовать требованиям сложной формы и высокой точности. Жидкофазное спекание формирует плотную микроструктуру, а жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама, улучшая теплопроводность и механические свойства. Горячее изостатическое прессование устраняет микропоры, улучшает плотность и высокотемпературную стойкость компонентов и подходит для сред с высоким тепловым потоком. Прецизионная механическая обработка (например, шлифование с ЧПУ или электроискровая обработка) позволяет получать сложные геометрические формы с допусками, контролируемые на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микронном уровне, для обеспечения аэродинамических характеристик сопла. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия PVD CrN или химическая пассивация) повышает стойкость к высокотемпературному окислению и эрозии, а также продлевает срок службы компонентов в экстремальных условиях. Обработка должна проводиться в условиях высокой чистоты, чтобы предотвратить влияние пылевого загрязнения на производительность. В аэрокосмическом оружии компоненты сопла из сплава вольфрам-никель-медь значительно улучшают характеристики ракетных двигателей. Например, в твердотопливных ракетных двигателях компоненты сопла с высокой теплопроводностью эффективно управляют потоком высокотемпературного газа и продлевают срок службы; в жидкостных ракетных двигателях низкие коэффициенты теплового расширения обеспечивают геометрическую стабильность сопла при термоциклировании. Направления оптимизации включают повышение теплопроводности за счет оптимизации соотношения никеля и меди, использование композитных покрытий для повышения стойкости к высоким температурам или комбинирование технологий 3D-печати для изготовления сопел сложной конструкции. Контроль качества проверяет характеристики компонентов путем испытаний на теплопроводность, термоудары и старение при высоких температурах для обеспечения соответствия аэрокосмическим стандартам.

8.4.2 Противовесы управления ориентацией космического корабля

Противовесы для управления ориентацией космических аппаратов являются ключевыми компонентами космического оружия и спутниковых систем. Они используются для регулировки распределения центра тяжести космического аппарата, чтобы обеспечить его устойчивость в пространстве и точное управление во время орбитальной эксплуатации или маневрирования. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для противовесов для управления ориентацией благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам и низкому коэффициенту теплового расширения. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме, точно контролировать центр тяжести космического аппарата, оптимизировать эффективность регулировки ориентации и снижать расход топлива. Немагнитные свойства позволяют избежать помех со стороны магнитных полей в навигационной системе космического аппарата (такой как звездные датчики или гироскопы), обеспечивая высокоточное управление ориентацией. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность противовеса при экстремальных перепадах температур в космической среде и поддерживает динамическое равновесие космического аппарата.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления противовесов методом ММ или порошковой металлургии, что позволяет удовлетворить потребности космических аппаратов в миниатюризации и создании сложных форм. Технология ММ позволяет получать мельчайшие заготовки методом литья под давлением, а жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование повышают плотность, устраняют микропоры, а также улучшают механические свойства и теплопроводность. Прецизионная механическая обработка (например, лазерная микрообработка или электроискровая обработка) позволяет получать сложные геометрические формы с допусками, контролируемые на микронном уровне, что подходит для компактных космических аппаратов. Обработка поверхности повышает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионную стойкость и качество поверхности, а также снижает загрязнение частицами или воздействием радиации в космической среде. Обработка должна проводиться в условиях высокой чистоты, чтобы предотвратить влияние пылевого загрязнения на производительность компонентов.

В космических аппаратах противовесы из сплава вольфрам-никель-медь значительно повышают эффективность управления ориентацией. Например, в военных разведывательных спутниках противовесы высокой плотности оптимизируют распределение центра тяжести и повышают скорость реакции при регулировании ориентации; в системах противоракетной обороны немагнитные противовесы обеспечивают стабильную работу навигационных систем. Направления оптимизации включают снижение массы за счёт микроструктурного проектирования, использование радиационно-стойких покрытий для повышения адаптивности к космическим условиям или сочетание технологий аддитивного производства для создания индивидуальных конструкций противовесов. Контроль качества включает проверку характеристик противовеса путём измерения плотности, испытаний на вибрацию и испытания на магнитную прочность для обеспечения соответствия аэрокосмическим стандартам.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

Глава 9. Применение сплава вольфрама и никеля с медью в медицине

Сплав вольфрама, никеля и меди продемонстрировал отличную применимость в медицинской сфере благодаря высокой плотности, немагнитным свойствам, превосходной теплопроводности и хорошей биосовместимости, особенно в радиотерапевтическом оборудовании, диагностическом оборудовании и хирургических инструментах. Этот сплав, полученный методом порошковой металлургии, сочетает в себе высокую плотность вольфрама с прочностью и теплопроводностью связующего никеля и меди и соответствует строгим требованиям медицинского оборудования к радиационной защите, терморегулированию и электромагнитной совместимости. С развитием прецизионной медицины и технологий неинвазивного лечения применение сплава вольфрама, никеля и меди в радиотерапевтическом оборудовании становится все более актуальным.

9.1 Оборудование для радиотерапии

Оборудование для лучевой терапии (такое как линейные ускорители и гамма-ножи) является ключевой технологией, используемой в современной медицине для лечения рака. Оно точно контролирует высокоэнергетическое излучение (например, рентгеновское или гамма-излучение), воздействуя на опухолевую ткань, одновременно защищая окружающие здоровые ткани. Этот тип оборудования предъявляет чрезвычайно высокие требования к материалам: высокая плотность для эффективной защиты от излучения, немагнитные свойства для предотвращения помех прецизионным электронным системам, отличная теплопроводность для отвода тепла, выделяемого во время работы, и хорошая биосовместимость для обеспечения безопасности. Сплав вольфрама с никелем и медью может эффективно поглощать и экранировать излучение, защищая пациентов и медицинский персонал благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам; его высокая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения обеспечивают терморегуляцию и размерную стабильность оборудования при работе на высокой мощности; прочность связующей фазы никеля и меди повышает долговечность компонентов. Сплав изготавливается методом жидкофазного спекания, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки для формирования плотной микроструктуры, отвечающей требованиям медицинского оборудования к высокой точности и надежности.

9.1.1 Сборка экрана для радиотерапии

Компоненты экранирования радиотерапии являются ключевыми компонентами в оборудовании для радиотерапии, используемыми для экранирования и ограничения высокоэнергетического излучения, обеспечения воздействия излучения только на целевую область лечения и защиты здоровых тканей пациентов и медицинского персонала от ненужного облучения. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для компонентов экранирования радиотерапии благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам. Высокая плотность позволяет ему эффективно поглощать рентгеновские или гамма-лучи, значительно снижать утечку излучения и обеспечивать превосходный экранирующий эффект. Он легче и экологичнее традиционных свинцовых материалов. Немагнитные свойства позволяют избежать помех от магнитных полей в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прецизионных электронных системах в оборудовании для радиотерапии (таких как системы магнитно-резонансного наведения), обеспечивая точность лечения. Высокая теплопроводность быстро рассеивает тепло, выделяемое во время работы, предотвращая перегрев защитного покрытия и влияя на производительность оборудования; низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность компонента во время тепловых циклов и сохраняет точность структуры экранирования.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления компонентов экрана с помощью порошковой металлургии или технологии литья под давлением (MIM), чтобы соответствовать требованиям сложной формы и высокой точности. Технология MIM формирует высокоплотную структуру путем смешивания порошков вольфрама, никеля и меди со связующим, обезжиривания и спекания в жидкой фазе после литья под давлением. Жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама для улучшения механических свойств и теплопроводности. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры, улучшает плотность и способность экрана поглощать излучение и подходит для применения в высокоэнергетической радиотерапии. Прецизионная обработка (например, фрезерование с ЧПУ или электроискровая обработка) позволяет достичь сложной геометрии с допусками, контролируемые на микронном уровне, что обеспечивает бесшовную интеграцию с оборудованием для радиотерапии. Обработка поверхности (например, электрохимическая полировка или химическая пассивация) повышает коррозионную стойкость и биосовместимость, а также предотвращает эрозию в условиях окисления или стерилизации при длительном использовании.

В радиотерапии экранирующие компоненты из сплава вольфрам-никель и меди значительно повышают безопасность и точность лечения. Например, в линейных ускорителях высокоплотное экранирование эффективно ограничивает рассеяние излучения и защищает здоровые ткани пациента; в гамма-ножах немагнитное экранирование обеспечивает электромагнитную совместимость лечебной системы. Направления оптимизации включают улучшение теплопроводности за счёт оптимизации соотношения никеля и меди, использование композитных покрытий (например, DLC) для повышения коррозионной стойкости или сочетание технологий 3D-печати для изготовления индивидуальных экранирующих конструкций. Контроль качества проверяет характеристики компонентов посредством испытаний на радиационную защиту, теплопроводность и биосовместимость (ISO 10993).

9.1.2 Компоненты коллиматора излучения

Коллиматор излучения является ключевым компонентом оборудования для лучевой терапии, используемым для точного управления направлением и диапазоном излучения, обеспечения фокусировки высокоэнергетического излучения на опухолевой ткани и минимизации повреждения окружающих здоровых тканей. Сплав вольфрама, никеля и меди является предпочтительным материалом для компонентов коллиматора излучения благодаря своей высокой плотности, немагнитности и высокой теплопроводности. Высокая плотность позволяет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ему эффективно поглощать и экранировать рассеянное излучение, формировать точный луч излучения и улучшать точность облучения. Немагнитные свойства позволяют избежать помех со стороны магнитного поля в электронной системе управления (например, серводвигателях или датчиках) вблизи коллиматора, обеспечивая точность динамической регулировки пучка излучения. Высокая теплопроводность быстро рассеивает тепло, выделяемое коллиматором под действием высокоэнергетического излучения, предотвращая деформацию, вызванную перегревом; низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность компонента при термоциклировании и точность коллимации.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления компонентов коллиматора с помощью МИМ или порошковой металлургии для удовлетворения требований сложных форм и точности на микронном уровне. Технология МИМ формирует крошечные заготовки с помощью литья под давлением, а жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование улучшают плотность, устраняют микропоры и улучшают возможности радиационной защиты и механические свойства. Прецизионная обработка (например, лазерная микрообработка или электроискровая обработка) реализует сложную геометрию, такую как тонколистовая структура многолепесткового коллиматора (MLC), с допусками, контролируемые на микронном уровне, для обеспечения точного управления пучком. Обработка поверхности (например, PVD покрытие TiN или электрохимическая полировка) улучшает коррозионную стойкость и чистоту поверхности, уменьшает рассеяние излучения и повышает стойкость к окислению. Обработка должна проводиться в среде высокой чистоты, чтобы предотвратить влияние загрязнения пылью на производительность компонента.

В радиотерапии компоненты коллиматоров из сплава вольфрам-никель и меди значительно повышают точность и безопасность лечения. Например, в радиотерапии с модуляцией интенсивности (IMRT) коллиматоры высокой плотности точно формируют пучок и воздействуют на опухоли сложной формы; в оборудовании для протонной терапии немагнитные коллиматоры обеспечивают стабильную работу высокоточных электромагнитных систем управления. Направления оптимизации включают снижение массы за счёт микроструктурного дизайна (например, пористых коллимационных лезвий), использование нанопокровов для повышения износостойкости и биосовместимости, а также сочетание технологий аддитивного производства для создания сложных коллимационных структур. Контроль качества включает проверку характеристик компонентов посредством испытаний на радиационную защиту, испытаний на теплопроводность и измерений геометрической точности для обеспечения соответствия медицинским стандартам.

9.2 Оборудование для диагностической визуализации

Диагностическое оборудование для визуализации является основной технологией, используемой в современной медицине для диагностики заболеваний и планирования лечения. Оно создает изображения внутренних органов человека с помощью высокоточного излучения или магнитных полей, требуя, чтобы материалы имели высокую плотность для экранирования излучения,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

немагнитные свойства для предотвращения электромагнитных помех, отличную теплопроводность для отвода тепла от работы оборудования и хорошую биосовместимость для обеспечения безопасности. Сплав вольфрама-никеля-меди может эффективно экранировать рентгеновские лучи или обеспечивать балансировку веса благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам; высокая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения поддерживают тепловое управление и размерную стабильность; прочность связующей фазы никеля-меди повышает долговечность компонентов. Сплав изготавливается путем жидкофазного спекания, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки для формирования плотной микроструктуры, которая соответствует требованиям диагностического оборудования для высокой точности и надежности.

9.2.1 Детали защиты детектора ТТ

Защитные экраны для детекторов КТ являются ключевыми компонентами оборудования компьютерной томографии (КТ), используемыми для экранирования рассеянного рентгеновского излучения, защиты модулей детекторов и пациентов от ненужного облучения, а также обеспечения четкости и точности сигналов изображения. Сплав вольфрама, никеля и меди стал предпочтительным материалом для защитных экранов детекторов КТ из-за его высокой плотности и немагнитных свойств. Высокая плотность позволяет ему эффективно поглощать рентгеновские лучи и значительно уменьшать рассеянное излучение. Он тоньше и более экологичен, чем традиционные свинцовые материалы, обеспечивая превосходный экранирующий эффект. Немагнитные свойства предотвращают влияние магнитных полей на прецизионные электронные компоненты в аппаратах КТ (такие как матрицы детекторов или схемы обработки сигналов), обеспечивая стабильность получения изображений. Высокая теплопроводность быстро рассеивает тепло, выделяемое детектором во время работы, предотвращая влияние перегрева на чувствительность детектора; низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность экрана во время тепловых циклов и сохраняет точное прилегание к модулю детектора.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления защитных деталей методом литья под давлением (ММ) или порошковой металлургии для удовлетворения требований машин компьютерной томографии к сложным формам и высокой точности. Технология ММ формирует высокоплотную структуру путем смешивания порошков вольфрама, никеля и меди со связующим, обезжиривания и жидкофазного спекания после литья под давлением, а жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама для улучшения механических свойств и теплопроводности. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры, улучшает плотность и способность поглощать излучение защитных деталей и подходит для сред с высоким уровнем рентгеновского излучения. Прецизионная механическая обработка позволяет достичь сложных геометрических форм с допусками, контролируемые на микронном уровне, что обеспечивает бесшовную интеграцию защитных деталей с модулями детектора. Обработка поверхности (например, электрохимическая полировка или химическая пассивация) повышает коррозионную стойкость и биосовместимость, а также

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предотвращает эрозию при окислении или в условиях дезинфекции при длительном использовании.

В компьютерных томографах защитные детали из сплава вольфрама, никеля и меди значительно повышают качество изображения и безопасность оборудования. Например, в компьютерных томографах высокого разрешения защитные детали высокой плотности эффективно уменьшают рассеянное излучение и повышают контрастность изображения; в мобильных компьютерных томографах немагнитные и лёгкие конструкции обеспечивают портативность и электромагнитную совместимость. Направления оптимизации включают улучшение теплопроводности за счёт оптимизации соотношения никеля и меди, использование нанопокровов (например, DLC) для повышения коррозионной стойкости или комбинирование технологий 3D-печати для изготовления индивидуальных защитных конструкций. Контроль качества проверяет эксплуатационные характеристики защитных деталей посредством испытаний на радиационную защиту (в соответствии со стандартами IEC 60601), испытаний на теплопроводность и испытаний на биосовместимость (ISO 10993).

9.2.2 Противовесы для оборудования МРТ

Противовес оборудования магнитно-резонансной томографии (МРТ) является ключевым компонентом, используемым в системе МРТ для регулировки центра тяжести оборудования или балансировки механической конструкции, обеспечивая стабильность и точность сканирующей платформы или магнитного узла во время работы. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для противовеса оборудования МРТ благодаря своей высокой плотности, немагнитности и низкому коэффициенту теплового расширения. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме, точно контролировать распределение центра тяжести оборудования МРТ (например, сканирующих столов или градиентных катушек), снижать вибрацию или механическое смещение, а также улучшать четкость изображения. Немагнитные свойства критически важны для предотвращения интерференции магнитного поля с высокоинтенсивным магнитным полем МРТ (1,5–7 Тл), обеспечивая однородность магнитного поля и точность получения сигнала. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность противовеса при повышении температуры во время работы оборудования или перепаде температур окружающей среды, а также поддерживает долгосрочную надежность механической конструкции.

В процессе подготовки сплав вольфрама-никеля-меди используется для изготовления противовесов с помощью МИМ или порошковой металлургии, чтобы удовлетворить потребности оборудования МРТ в сложных формах и миниатюризации. Технология МИМ формирует крошечные заготовки с помощью литья под давлением, а жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование улучшают плотность, устраняют микропоры и улучшают механические свойства и теплопроводность. Прецизионная обработка (например, фрезерование с ЧПУ или электроэрозионная обработка) позволяет достичь сложных геометрических форм с допусками, контролируемые на микронном уровне, что подходит для компактной конструкции

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оборудования МРТ. Обработка поверхности (например, нанесение покрытия TiN PVD или электрохимическая полировка) улучшает коррозионную стойкость и качество поверхности, а также снижает риск окисления или загрязнения в стерильной среде. Обработка должна проводиться в среде высокой чистоты, чтобы предотвратить влияние пыли на производительность компонентов или магнитные поля МРТ. В приложениях МРТ противовесы из вольфрама-никеля-меди значительно повышают производительность оборудования. Например, в высокопольных МРТ-аппаратах противовесы высокой плотности оптимизируют динамическую балансировку сканирующей платформы и снижают влияние вибрации на качество изображения; в портативных МРТ-аппаратах немагнитные противовесы обеспечивают стабильность магнитного поля и электромагнитную совместимость. Направления оптимизации включают снижение массы за счёт микроструктурного проектирования (например, полых противовесов), использование антикоррозионных покрытий для повышения биосовместимости или сочетание технологий аддитивного производства для создания индивидуальных конструкций противовесов. Контроль качества включает проверку характеристик противовесов путём измерения плотности, испытаний на прочность намагничивания и испытаний на вибрацию для обеспечения соответствия медицинским стандартам.

9.3 Хирургические инструменты

Хирургические инструменты являются основными средствами точной диагностики и лечения в современной медицине, охватывая хирургические навигационные системы, малоинвазивные интервенционные инструменты и имплантируемые медицинские устройства. Для них требуются материалы с высокой плотностью для оптимизации баланса веса, немагнитными свойствами для предотвращения электромагнитных помех, превосходными механическими свойствами для обеспечения долговечности и хорошей биосовместимостью для соответствия стандартам безопасности для использования in vivo или на поверхности тела. Сплавы вольфрама, никеля и меди могут обеспечить точный контроль веса и электромагнитную совместимость благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам; прочность и высокая теплопроводность связующей фазы никеля и меди повышают долговечность и возможности терморегулирования инструмента; а низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность при температуре тела или в стерилизованной среде. Сплав изготавливается путем спекания в жидкой фазе, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки для формирования плотной микроструктуры, которая отвечает требованиям хирургических инструментов к высокой точности и надежности.

9.3.1 Высокоточные компоненты позиционирования хирургической навигации

Высокоточные компоненты позиционирования хирургических навигационных систем являются ключевыми компонентами, используемыми для определения местоположения и направления хирургических инструментов в хирургических навигационных системах. Они широко используются в нейрохирургии, ортопедии и сердечно-сосудистой хирургии для обеспечения точности и безопасности хирургических траекторий. Сплав вольфрама, никеля и меди является

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

предпочтительным материалом для компонентов позиционирования хирургических навигационных систем благодаря своей высокой плотности, немагнитности и низкому коэффициенту теплового расширения. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме, оптимизировать распределение центра тяжести позиционирующих компонентов, повышать стабильность хирургической навигационной системы и, в частности, повышать точность позиционирования при динамических корректировках (например, при роботизированной хирургии). Немагнитные свойства предотвращают влияние магнитных полей на электронные компоненты навигационной системы (такие как электромагнитные трекеры или оптические датчики), обеспечивая надежность в условиях магнитно-резонансного наведения или электромагнитной навигации. Низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность позиционирующих компонентов при температуре тела или в стерильной среде, сохраняя точность навигации.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления позиционирующих деталей методом литья под давлением (MIM) или порошковой металлургии для удовлетворения требований хирургических навигационных систем к сложным формам и точности на микронном уровне. Технология MIM формирует высокоплотную структуру путем смешивания порошков вольфрама, никеля и меди со связующим, обезжиривания и жидкофазного спекания после литья под давлением. Жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама для улучшения механических свойств и теплопроводности. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры, повышает плотность и долговечность позиционирующих деталей и подходит для высокоточных применений. Прецизионная обработка (такая как лазерная микрообработка или электроискровая обработка) позволяет достичь сложной геометрии с допусками, контролируемые на микронном уровне, что обеспечивает бесшовную интеграцию с навигационными системами. Обработка поверхности (например, электрохимическая полировка или PVD- покрытие TiN) повышает коррозионную стойкость и биосовместимость, предотвращает окисление во время стерилизации или в условиях *in vivo* и соответствует стандартам биосовместимости ISO 10993.

В хирургической навигации детали позиционирования из сплава вольфрам-никель-медь значительно повышают точность и безопасность хирургических операций. Например, в нейрохирургической навигации детали позиционирования с высокой плотностью оптимизируют стабильность системы наведения и обеспечивают проведение операций на головном мозге с микронной точностью; в ортопедической хирургии немагнитные детали позиционирования предотвращают электромагнитные помехи и повышают надежность навигационной системы. Направления оптимизации включают повышение прочности за счет оптимизации соотношения никеля и меди, использование нанопокровов для повышения износостойкости и биосовместимости, а также комбинирование технологий 3D-печати для изготовления индивидуальных структур позиционирования. Контроль качества проверяет характеристики деталей позиционирования путем измерения плотности, испытания на прочность намагничивания и испытания шероховатости поверхности для соответствия медицинским стандартам.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3.2 Компоненты направляющих устройств для малоинвазивных интервенционных устройств

Ключевые компоненты, используемые для направления проводников, катетеров или стентов в малоинвазивных хирургических вмешательствах (таких как сердечно-сосудистые вмешательства или эндоскопические операции). Для обеспечения успеха операции и безопасности пациента от них требуется высокая точность, биосовместимость и долговечность. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для направляющих компонентов благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам и превосходным механическим свойствам. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме, оптимизировать распределение центра тяжести направляющего компонента и повысить маневренность и стабильность проводника или катетера, особенно для точного направления по сложным сосудистым путям. Немагнитные свойства предотвращают влияние магнитных полей на электронные компоненты (такие как датчики или модули визуализации) интервенционных устройств и подходят для малоинвазивных хирургических вмешательств под контролем магнитного резонанса. Прочность связующего никеля и меди позволяет компоненту выдерживать многократные изгибы и кручения, а низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность при температуре тела или в стерильной среде.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления направляющих компонентов с помощью процесса ММ или микропорошковой металлургии для удовлетворения потребностей минимально инвазивных устройств для миниатюризации и сложных форм. Технология ММ формирует крошечные заготовки с помощью литья под давлением, а жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование увеличивают плотность, устраняют микропоры и улучшают механические свойства и теплопроводность. Прецизионная обработка (такая как лазерная микрообработка или электроискровая обработка) позволяет достичь сложной геометрии, такой как направляющие кольца проводника или наконечники катетера, с допусками, контролируемые на микронном уровне, для обеспечения точных манипуляций во время операции. Обработка поверхности (такая как покрытие DLC или химическая пассивация) улучшает износостойкость, коррозионную стойкость и биосовместимость, снижает трение с сосудистой тканью и предотвращает окисление или эрозию дезинфекции при длительном использовании. Обработка должна проводиться в среде с высокой степенью чистоты, чтобы предотвратить влияние пылевого загрязнения на производительность компонента.

В малоинвазивной хирургии направляющие компоненты из сплава вольфрам-никель-медь значительно повышают эффективность и безопасность хирургического вмешательства. Например, при имплантации сердечно-сосудистых стентов направляющие компоненты высокой плотности оптимизируют маневренность проводника и обеспечивают точное позиционирование; в нейроинтервенционной хирургии немагнитные направляющие компоненты исключают помехи, создаваемые МРТ-оборудованием, и повышают надежность визуализации. Направления оптимизации включают снижение массы за счёт разработки микроструктуры (например, полых

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

направляющих), использование биосовместимых покрытий для повышения сродства к тканям или сочетание технологий аддитивного производства для создания персонализированных направляющих структур. Контроль качества включает проверку эксплуатационных характеристик компонентов посредством испытаний механических свойств, испытаний на биосовместимость (ISO 10993) и измерения шероховатости поверхности.

9.4 Вспомогательные средства реабилитации

Реабилитационные вспомогательные устройства (такие как протезы, ортезы и реабилитационное тренировочное оборудование) являются важными инструментами в современной медицине, помогая пациентам восстанавливать двигательную функцию или улучшать качество жизни. Им требуются материалы с высокой плотностью для оптимизации распределения веса, превосходными механическими свойствами для обеспечения долговечности, немагнитными свойствами для предотвращения электромагнитных помех и хорошей биосовместимостью для соответствия стандартам безопасности при долгосрочном использовании. Сплав вольфрама-никеля-меди может обеспечить точный контроль веса и электромагнитную совместимость благодаря своей высокой плотности и немагнитным свойствам; прочность и высокая теплопроводность фазы связывания никеля и меди повышают долговечность и возможность терморегулирования компонентов; а низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность при температуре тела или перепаде температур окружающей среды. Сплав изготавливается путем спекания в жидкой фазе, горячего изостатического прессования и прецизионной обработки для формирования плотной микроструктуры, которая отвечает требованиям высокой точности и надежности для реабилитационных вспомогательных устройств.

9.4.1 Компоненты веса протезного сустава

Компоненты веса протезного сустава являются ключевыми компонентами в конструкции протеза, используемыми для регулировки распределения центра тяжести протеза, оптимизации баланса движения и естественной походки, а также повышения комфорта и функциональности пациента. Сплав вольфрама, никеля и меди стал предпочтительным материалом для компонентов веса протезного сустава из-за его высокой плотности, немагнитности и превосходных механических свойств. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в небольшом объеме, точно контролировать центр тяжести протезного сустава, имитировать распределение веса естественных конечностей и снижать утомляемость пациента при использовании протеза. Немагнитные свойства позволяют избежать помех магнитного поля на электронных компонентах, встроенных в протез, что подходит для интеллектуальных протезных систем. Прочность связующей фазы никеля и меди позволяет компонентам веса выдерживать повторяющиеся механические нагрузки и удары, такие как напряжение во время ходьбы или бега; низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает размерную стабильность деталей при температуре тела или перепаде температур окружающей среды, а также сохраняет точность движения соединения. В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления весовых компонентов методом литья под давлением (MIM) или порошковой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

металлургии, чтобы соответствовать требованиям протезирования к миниатюризации, сложным формам и высокой точности. Технология МІМ формирует высокоплотную структуру путем смешивания порошков вольфрама, никеля и меди со связующим, обезжиривания и жидкофазного спекания после литья под давлением, а жидкая фаза никеля и меди смачивает частицы вольфрама для улучшения механических свойств и теплопроводности. Горячее изостатическое прессование дополнительно устраняет микропоры, повышает плотность и долговечность весовых компонентов и подходит для долгосрочного применения в протезировании. Прецизионная обработка (такая как лазерная микрообработка или фрезерование с ЧПУ) позволяет достичь сложной геометрии с допусками, контролируемые на микронном уровне, что обеспечивает точное прилегание к протезному суставу. Обработка поверхности повышает коррозионную стойкость и биосовместимость, предотвращает окисление при длительном использовании или раздражение при контакте с кожей и соответствует стандартам биосовместимости ISO 10993.

9.4.2 Детали для регулировки баланса реабилитационного оборудования

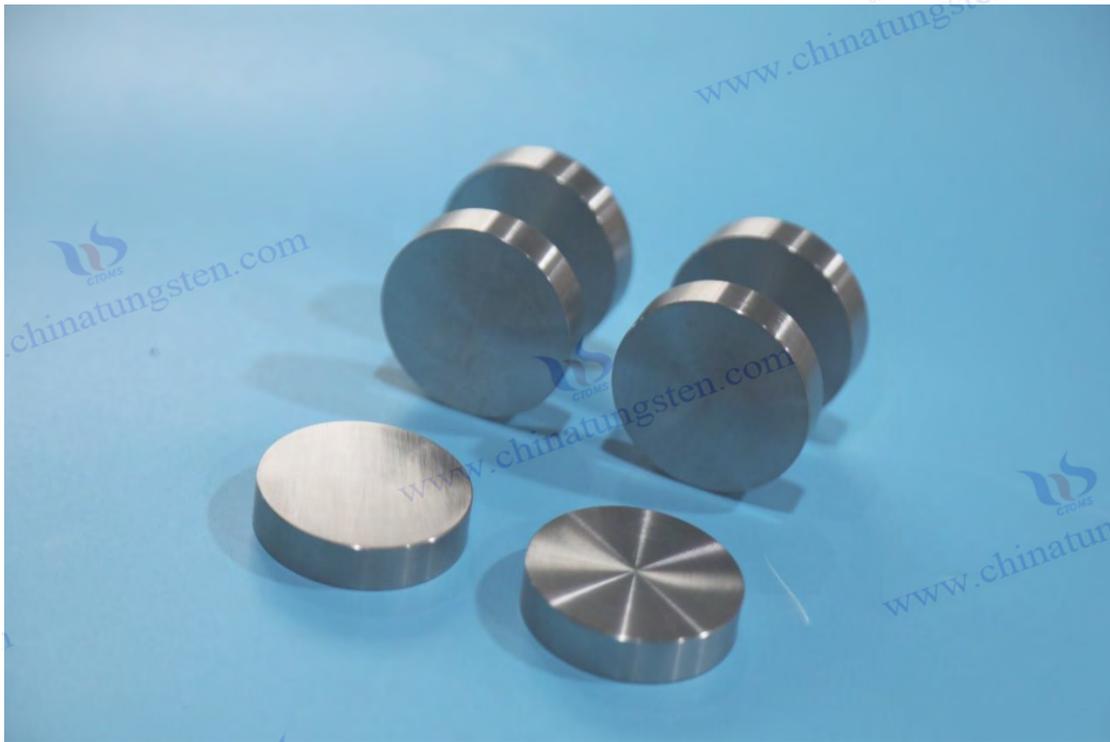
Детали для регулировки баланса в реабилитационном оборудовании являются ключевыми компонентами реабилитационного тренировочного оборудования (например, тренажеров для ходьбы или силовых тренажеров). Они используются для регулировки центра тяжести или сопротивления движению оборудования, обеспечивая стабильность и безопасность во время тренировки, а также оптимизируя эффект реабилитации для пациента. Сплав вольфрама, никеля и меди является идеальным материалом для деталей для регулировки баланса в реабилитационном оборудовании благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам и превосходным механическим свойствам. Высокая плотность позволяет сплаву обеспечивать достаточную массу в ограниченном объеме, точно контролировать распределение центра тяжести оборудования, повышать устойчивость оборудования при динамических движениях и снижать воздействие вибрации или смещения на пациента. Немагнитные свойства предотвращают воздействие магнитных полей на электронные компоненты реабилитационного оборудования (например, датчики движения или системы управления), что подходит для интеллектуального реабилитационного оборудования. Прочность никель-медного соединения позволяет регулирующим деталям выдерживать многократные механические нагрузки, а низкий коэффициент теплового расширения обеспечивает стабильность размеров при температуре тела или перепаде температур окружающей среды, сохраняя точность регулировки.

В процессе подготовки сплав вольфрама, никеля и меди используется для изготовления деталей регулировки баланса с помощью МІМ или порошковой металлургии, чтобы соответствовать требованиям реабилитационного оборудования к сложным формам и высокой точности. Технология МІМ формирует крошечные заготовки с помощью литья под давлением, а жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование повышают плотность, устраняют микропоры и улучшают механические свойства и теплопроводность. Прецизионная обработка (например, электроэрозионная или шлифовальная машина с ЧПУ) позволяет достичь сложных геометрических форм, а допуски контролируются на микронном уровне для обеспечения точного соответствия деталей регулировки структуре устройства. Обработка поверхности (например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

покрытие DLC или химическая пассивация) повышает износостойкость, коррозионную стойкость и биосовместимость, снижает трение с кожей пациента и предотвращает окисление в стерильной среде. Обработка должна проводиться в среде высокой чистоты, чтобы предотвратить влияние пылевого загрязнения на производительность компонентов.

В реабилитационном оборудовании регуляторы баланса из сплава вольфрам-никель-медь значительно улучшают результаты тренировок и надежность оборудования. Например, в тренажерах для ходьбы регуляторы высокой плотности оптимизируют центр тяжести устройства и повышают устойчивость во время тренировки; в тренажерах для силовой реабилитации немагнитные регуляторы предотвращают помехи от электронных систем управления и повышают точность траектории движения. Направления оптимизации включают в себя оптимизацию распределения веса за счет разработки микроструктуры (например, регуляторов градиентной плотности), использование нанопокровов для повышения долговечности и биосовместимости или сочетание технологий аддитивного производства для создания персонализированных регулировочных структур. Контроль качества проверяет работу регуляторов путем измерения плотности, испытаний на вибрацию и испытаний на биосовместимость для обеспечения соответствия медицинским стандартам (например, ISO 13485).



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

High Density: Typically 16.5 - 18.75 g/cm³

High Thermal Conductivity: Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

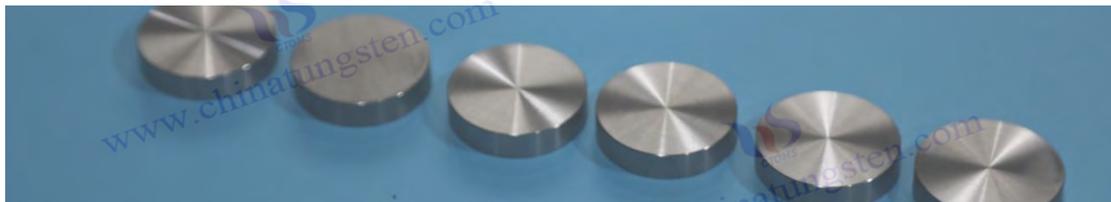
4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 10. Сравнение сплава вольфрама, никеля и меди с другими материалами

Сплав вольфрама-никеля-меди показал широкую применимость в аэрокосмической, медицинской, электронной информационной, национальной оборонной и энергетической областях благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам, превосходной теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения. Изготовленный методом порошковой металлургии, сплав вольфрама-никеля-меди сочетает в себе высокую плотность вольфрама с прочностью и теплопроводностью связующей фазы никеля-меди, чтобы удовлетворить потребности различных сценариев с высоким спросом. Однако в реальных приложениях сплав вольфрама-никеля-меди часто сравнивают с другими высокопроизводительными материалами, такими как сплав вольфрама-никеля-железа и сплав меди-вольфрама, чтобы оценить его эксплуатационные преимущества и применимость. Физические и химические свойства, процессы получения и разница в стоимости различных материалов определяют их конкурентоспособность в конкретных приложениях.

10.1 Анализ конкурентоспособных материалов из сплава вольфрама и никеля с медью

Сплав вольфрама-никеля-меди (W-Ni-Cu) широко используется в компонентах веса, рассеивания тепла, экранирования и защиты благодаря своей высокой плотности (15-18 г/см³), немагнитным свойствам, хорошей теплопроводности и биосовместимости. Однако он существенно отличается по производительности и стоимости от сплавов вольфрама-никеля-железа (W-Ni-Fe) и меди-вольфрама (W-Cu). Сплавы вольфрама-никеля-железа имеют преимущество в военной и промышленной областях благодаря своей высокой прочности и низкой стоимости, но их магнетизм ограничивает приложения с высокими требованиями к электромагнитной совместимости. Сплавы меди-вольфрама превосходны в областях электроники и терморегулирования благодаря своей превосходной тепло- и электропроводности, но имеют низкую плотность и плохую вязкость. Выбор конкурирующих материалов необходимо сопоставлять с требованиями к применению (такими как немагнитные свойства, теплопроводность или стоимость).

10.1.1 Сравнение со сплавом вольфрама, никеля и железа

Вольфрам-никелево-железный сплав (W-Ni-Fe) — распространённый сплав высокой плотности, широко используемый в военной промышленности (например, для изготовления броневой сердечников), противовесов в аэрокосмической промышленности и промышленном оборудовании. Его основными компонентами являются вольфрам (85–98%), никель и железо, а диапазон его плотности аналогичен диапазону плотности сплава вольфрам-никель-медь. По сравнению со сплавом вольфрам-никель-медь, сплав вольфрам-никель-железо имеет существенные различия в механических свойствах, стоимости и областях применения.

Сравнение характеристик : Прочность и твердость сплава вольфрам-никель-железо, как правило, выше, чем у сплава вольфрам-никель-медь. Добавление железа улучшает механические

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

свойства связующей фазы никель-железо, делая ее более предпочтительной в ударопрочных и износостойких сценариях (например, в сердечниках бронебойных снарядов или механических противовесах). Однако добавление железа делает ее слабомагнитной, что ограничивает ее использование в приложениях с высокими требованиями к электромагнитной совместимости (например, в оборудовании МРТ и оборудовании радиоэлектронного противодействия). Немагнитная природа сплава вольфрам-никель-медь является его основным преимуществом, и он подходит для сценариев, где необходимо избегать электромагнитных помех, таких как медицинское оборудование и радиолокационные системы. Теплопроводность сплава вольфрам-никель-медь немного выше, чем у сплава вольфрам-никель-железо. Поскольку медь имеет лучшую теплопроводность, чем железо, она подходит для приложений, связанных с рассеиванием тепла (например, в электронных радиаторах). Коэффициенты теплового расширения у обоих материалов схожи, и оба могут обеспечить хорошую размерную стабильность.

Сравнение процессов подготовки : оба сплава готовятся методом порошковой металлургии, включая смешивание порошков, прессование и спекание в жидкой фазе, но температура спекания сплава вольфрама-никеля-железа немного ниже, а стоимость процесса ниже, потому что цена железа намного ниже, чем у меди. Приготовление сплава вольфрама-никеля-меди требует более строгого контроля окружающей среды (например, высокочистого аргона или вакуума) для предотвращения окисления меди, что увеличивает производственные затраты. Производительность обработки сплава вольфрама-никеля-железа немного ниже, потому что его более высокая твердость может вызвать износ инструмента, в то время как прочность сплава вольфрама-никеля-меди позволяет легче достигать сложных форм при прецизионной обработке (например, МИМ или обработка с ЧПУ).

Применимые сценарии, преимущества и недостатки : Сплав вольфрама-никеля-железа широко используется в военной области (например, в бронебойных сердечниках, противовесах ракет) и промышленных противовесах (например, в гасителях вибрации) из-за его высокой прочности и низкой стоимости, но его слабый магнетизм делает его непригодным для электромагнитно-чувствительных сред. Сплав вольфрама-никеля-меди имеет больше преимуществ в медицине (противовесы МРТ, экранирование радиотерапии), электронной информации (радиочастотные модули 5G) и аэрокосмическом оружии (противовесы управления ориентацией). Его немагнитные свойства и биосовместимость отвечают высоким требованиям точности и безопасности. Недостатком сплава вольфрама-никеля-меди является его высокая стоимость, которая влияет на его экономическую эффективность, особенно при колебаниях цен на медь. Направления оптимизации включают повышение производительности путем регулирования соотношения никеля и меди или использования аддитивного производства для снижения затрат на обработку.

10.1.2 Сравнение с медно-вольфрамовым сплавом

Медно-вольфрамовый сплав (W-Cu) – это композиционный материал, в котором вольфрам выступает в качестве матрицы, а медь – в качестве связующего вещества. Он широко используется

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в электронных системах теплоотвода, электрических контактах и высокотемпературных компонентах. Типичный состав включает вольфрам (70–90%) и медь, а плотность варьируется от 12 до 17 г/см³. По сравнению со сплавом вольфрам-никель-медь, медно-вольфрамовый сплав имеет существенные различия в теплопроводности, электропроводности и областях применения.

Сравнение характеристик : Теплопроводность и электропроводность сплава меди и вольфрама лучше, чем у сплава вольфрама, никеля и меди. Более высокое содержание меди (10–30 %) повышает эффективность тепло- и электропроводности, что делает его превосходным для рассеивания тепла в мощных электронных приборах (например, в подложках силовых полупроводников, радиаторах серверов) и в качестве электродных материалов. Однако плотность сплава меди и вольфрама ниже, чем у сплава вольфрама, никеля и меди, что ограничивает его применение в приложениях, требующих высокой балансировки веса (например, в противовесах аэрокосмической техники и компонентах балансировки ракет). Механические свойства сплава меди и вольфрама слабые, а его прочность и ударопрочность не так хороши, как у сплава вольфрама, никеля и меди. Из-за отсутствия упрочняющего эффекта никеля он легко ломается при высоких нагрузках. Немагнитная природа сплава вольфрама, никеля и меди является его преимуществом, что делает его подходящим для сред, чувствительных к электромагнитным полям. Хотя медно-вольфрамовый сплав также немагнитен, его меньшая плотность несколько ухудшает его экранирующие свойства. Коэффициенты теплового расширения у обоих сплавов схожи, и оба подходят для случаев, где требуется размерная стабильность.

Сравнение процессов подготовки : сплав меди с вольфрамом и сплав вольфрама с никелем и медью оба получают методом порошковой металлургии, но сплав меди с вольфрамом обычно получают методом инфильтрации (сначала спекают вольфрамовый скелет, затем инфильтруют жидкую медь), что является сложным и энергоемким процессом. Сплав вольфрама с никелем и медью использует жидкофазное спекание, которое является более гибким и позволяет достигать сложных форм с помощью МИМ, что делает его подходящим для миниатюрных компонентов (таких как медицинские коллиматоры и противовесы MEMS). Сплав меди с вольфрамом трудно обрабатывать из-за его высокой твердости и мягкой фазы меди, что может легко привести к неровным поверхностям, в то время как прочность сплава вольфрама с никелем и медью делает его более выгодным для прецизионной обработки. Сплав меди с вольфрамом имеет высокое содержание меди, и атмосферу спекания необходимо строго контролировать, чтобы предотвратить окисление, что увеличивает стоимость процесса.

Применимые сценарии, преимущества и недостатки : сплав меди и вольфрама широко используется в электронной промышленности (например, для корпусирования силовых полупроводников, электрических контактов) и высокотемпературных компонентах (например, в облицовке сопла ракет) из-за его превосходной теплопроводности и электропроводности, но его более низкая плотность и плохая ударная вязкость ограничивают его применение в противовесах высокой плотности или в сценариях с высоким воздействием. Сплав вольфрама, никеля и меди имеет больше преимуществ в медицине (экранирование радиотерапии, противовесы МРТ), национальной обороне (ловушки радаров, противовесы ракет) и новых энергетических

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

транспортных средствах (противовесы двигателей). Его высокая плотность и ударная вязкость отвечают сложным механическим и электромагнитным требованиям. Стоимость сплава меди и вольфрама сильно колеблется из-за высокого содержания меди, в то время как стоимость сплава вольфрама, никеля и меди зависит от цен на никель и медь, и это соотношение необходимо оптимизировать для снижения экономического давления. Направления оптимизации включают повышение прочности медно-вольфрамовых сплавов за счет композитных покрытий или использование наноразмерного вольфрамового порошка для улучшения характеристик вольфрамо-никелево-медных сплавов.

10.2 Исследования и разработки передовых технологий для сплава вольфрам-никель-медь

По мере роста спроса на высокопроизводительные материалы исследования и разработки вольфрамо-никелево-медных сплавов смещаются от традиционной оптимизации характеристик к проектированию микроструктуры и функциональным инновациям. Наноструктурные сплавы значительно повышают прочность, ударную вязкость и теплопроводность материалов за счет уменьшения размера частиц порошка до наномасштаба, что делает их пригодными для высокоточных применений в экстремальных условиях. Функциональные градиентные материалы достигают индивидуальных характеристик за счет постепенного распределения состава или структуры в сплаве для удовлетворения сложных и многофункциональных потребностей. Эти технологии открывают новые возможности применения вольфрамо-никелево-медных сплавов в медицине, электронике, обороне и энергетике благодаря передовым процессам подготовки, обеспечивая поддержку для следующего поколения высокопроизводительных компонентов.

10.2.1 Наноструктурные сплавы

Наноструктурированные сплавы вольфрама-никеля-меди изготавливаются с использованием наноразмерных порошков вольфрама, никеля и меди, которые значительно улучшают микроструктуру и свойства сплава. Наноразмерные частицы имеют высокую удельную площадь поверхности и поверхностную активность, что может образовывать более однородную микроструктуру во время спекания, уменьшать пористость и улучшать плотность, прочность и ударную вязкость. По сравнению с традиционными микроразмерными сплавами вольфрама-никеля-меди механические свойства наноструктурированных сплавов значительно улучшены, поскольку эффект упрочнения границ зерен наночастицами повышает ударную вязкость и усталостную прочность. Немагнитные свойства сохраняются, что подходит для приложений с высокими требованиями к электромагнитной совместимости (таких как оборудование МРТ, радиолокационные системы). Кроме того, равномерное распределение наноразмерных частиц улучшает теплопроводность, благодаря чему сплав лучше работает в приложениях с рассеиванием тепла (таких как подложки силовых полупроводников, модули 5G RF). Мелкие зерна наноструктуры также снижают коэффициент теплового расширения, что дополнительно улучшает размерную стабильность.

Метод подготовки : наноструктурированные сплавы обычно готовятся с помощью

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокоэнергетической шаровой мельницы, химического осаждения из паровой фазы (CVD) или плазменного метода для приготовления наноразмерных порошков, а затем плотные сплавы формируются с помощью процессов порошковой металлургии (таких как спекание в жидкой фазе или спекание искровой плазмы, SPS). Высокоэнергетическая шаровая мельница измельчает частицы порошка до наноразмера путем механического измельчения, а время измельчения и окружающая среда (высокоочищенный аргон или вакуум) должны контролироваться, чтобы избежать введения примесей. Технология SPS использует высокое напряжение и импульсный ток для быстрого спекания нанопорошков, сокращения времени спекания, подавления роста зерен и сохранения характеристик наноструктуры. Горячее изостатическое прессование (HIP) дополнительно повышает плотность и устраняет микропоры. Прецизионная обработка (такая как лазерная микрообработка) позволяет достичь сложных форм, а обработка поверхности повышает коррозионную стойкость и биосовместимость. Процесс приготовления требует строгого контроля чистоты порошка и условий спекания для обеспечения стабильности и постоянства характеристик наноструктуры.

Применение и преимущества : Наноструктурированные сплавы вольфрама, никеля и меди обладают значительными преимуществами в высокоточных приложениях. Например, в медицинской области наноструктурированные сплавы используются в компонентах коллиматоров радиотерапии для повышения эффективности радиационной защиты и точности размеров; в электронной информационной области отличная теплопроводность наносплавов делает их пригодными для оснований рассеивания тепла серверов высокой мощности; в оборонной области высокопрочные наносплавы могут использоваться в компонентах балансиров ракет для повышения ударопрочности. Направления оптимизации включают разработку более эффективной технологии приготовления нанопорошков, использование композитных нанопокровов для дальнейшего повышения производительности или комбинирование аддитивного производства для получения сложных наноструктур. Проблема заключается в высокой стоимости нанопорошков и контроле окисления в процессе приготовления, что требует использования автоматизированного оборудования и технологии онлайн-мониторинга для повышения эффективности производства.

10.2.2 Функционально-градиентные материалы

Функционально-градиентные материалы (FGM) достигают плавного перехода от высокой плотности к высокой теплопроводности или высокой прочности за счет постепенного распределения состава или структуры внутри сплавов вольфрама-никеля-меди для удовлетворения потребностей многофункциональных компонентов. Однородный состав традиционных сплавов вольфрама-никеля-меди ограничивает их приспособляемость к сложным рабочим условиям, в то время как FGM оптимизируют производительность за счет градиентной конструкции (такой как постепенное изменение содержания вольфрама от высокого к низкому или локальное изменение соотношения никеля и меди). Например, области с высоким содержанием меди вблизи поверхности могут улучшить теплопроводность и подходят для нужд рассеивания тепла; внутренние области с высоким содержанием вольфрама обеспечивают высокую плотность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

для удовлетворения требований по весу. Немагнитные свойства FGM сохраняются, что делает его подходящим для электромагнитно-чувствительных сред; градиентная структура также повышает стойкость к тепловым ударам и сцепление интерфейса, что делает его подходящим для сценариев с высокими температурами или высокими напряжениями.

Метод подготовки : Сплавы вольфрама-никеля-меди FGM обычно изготавливаются путем послойной укладки порошка в сочетании со спеканием в жидкой фазе или технологией аддитивного производства. Послойная укладка порошка образует градиентную структуру путем размещения порошков вольфрама, никеля и меди с различным соотношением состава в форме слой за слоем (например, градиент от слоя с высоким содержанием вольфрама к слою с высоким содержанием меди), а затем формирует градиентную структуру посредством спекания в жидкой фазе. Температура и атмосфера должны точно контролироваться в процессе спекания, чтобы обеспечить соединение интерфейса. Аддитивное производство (такое как селективная лазерная плавка, SLM) напрямую создает градиентную структуру путем осаждения порошков различного состава слой за слоем, что подходит для деталей сложной формы. Горячее изостатическое прессование дополнительно повышает плотность и устраняет микропоры в градиентном интерфейсе. Прецизионная обработка (например, фрезерование с ЧПУ или электроискровая обработка) обеспечивает точность геометрии, а обработка поверхности (например, химическая пассивация или нанесение PVD-покрытия) повышает коррозионную стойкость и биосовместимость. Процесс подготовки требует оптимизации распределения порошка и параметров спекания, чтобы избежать концентрации напряжений на границе градиента.

Применение и преимущества : Функционально градиентные сплавы вольфрама-никеля-меди имеют значительные преимущества в многофункциональных компонентах. Например, в теплоотсеивающей подложке новых аккумуляторных батарей транспортных средств высокое содержание меди на поверхности улучшает теплопроводность, а высокое содержание вольфрама внутри обеспечивает структурную поддержку; в защитных кожухах медицинской радиотерапии градиентная структура оптимизирует радиационную защиту и легкий вес; в компонентах сопел аэрокосмического оружия градиентная конструкция повышает стойкость к тепловому удару. Направления оптимизации включают разработку более точных технологий управления градиентом (таких как многоматериальная 3D-печать), использование композитных покрытий для улучшения свойств поверхности или оптимизацию распределения градиента с помощью моделирования. Проблема заключается в высокой стоимости подготовки и стабильности градиентного интерфейса, которую необходимо снизить за счет автоматизированного производства и онлайн-мониторинга.

10.3 Экологичная технология производства сплава вольфрам-никель-медь

Вольфрам-никелево-медные сплавы производятся с использованием высокоэнергетических процессов порошковой металлургии и химической обработки, которые могут приводить к образованию отходящих газов, жидких и твердых отходов, что создает определенную нагрузку на окружающую среду. Экологичные технологии производства значительно снижают воздействие на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

окружающую среду за счет совершенствования процессов подготовки и разработки эффективных методов переработки отходов, одновременно повышая эффективность использования ресурсов и производства. Экологически безопасные процессы подготовки обеспечивают чистое производство за счет оптимизации производственных процессов, сокращения использования вредных химикатов и снижения энергопотребления; технологии переработки отходов сокращают потери ресурсов и загрязнение окружающей среды за счет переработки отходов и бракованных деталей в процессе производства. Эти технологии не только отвечают требованиям экологических норм, но и повышают рыночную конкурентоспособность вольфрамо-никелево-медных сплавов в таких областях, как медицина, электроника и оборона, открывая новый путь для устойчивого производства.

10.3.1 Экологически безопасный процесс приготовления

Экологически чистый процесс подготовки направлен на создание чистого и эффективного производственного процесса за счет оптимизации процесса производства сплава вольфрама, никеля и меди, снижения потребления энергии, выбросов выхлопных газов и использования вредных химических веществ. Традиционные процессы порошковой металлургии включают высокоэнергетическое спекание и этапы химической очистки, которые могут привести к образованию оксидных отходящих газов или кислотных отходов. Экологически чистый процесс подготовки значительно снижает воздействие на окружающую среду за счет применения технологии низкоэнергетического спекания, зеленых связующих и чистых методов обработки. Технология низкоэнергетического спекания использует быстрые методы спекания, такие как искровое плазменное спекание (SPS), при котором быстрый нагрев осуществляется импульсным током и высоким давлением, что сокращает время спекания и снижает потребление энергии при сохранении плотности и эксплуатационных характеристик сплава. Зеленые связующие используют разлагаемые или нетоксичные материалы для замены традиционных парафиновых или полимерных связующих, снижают выбросы летучих органических соединений при литье металлов под давлением (MIM) и уменьшают загрязнение выхлопными газами во время обезжиривания. Чистые методы обработки сокращают количество вредных жидких отходов во время обработки за счет использования охлаждающих жидкостей на водной основе вместо масляных, одновременно оптимизируя процессы прецизионной обработки для уменьшения образования пыли и отходов.

Экологически безопасные процессы подготовки также ориентированы на контроль производственной среды. Спекание и обработка в среде высокочистого инертного газа или вакуума предотвращает окисление порошков вольфрама, никеля и меди, а также снижает образование оксидных отходящих газов. Система очистки сточных вод собирает и очищает моющую жидкость в процессе производства, что позволяет сократить количество сточных вод и загрязнение окружающей среды. Оптимизация процесса также включает использование автоматизированных систем управления для точного контроля температуры и атмосферы спекания, повышения стабильности производства и сокращения отходов, вызванных технологическими ошибками. Преимущество экологически безопасных процессов подготовки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

заключается в том, что, снижая энергопотребление и выбросы, они сохраняют высокую плотность, немагнитность и теплопроводность сплава, что соответствует требованиям медицинской радиотерапевтической защиты, электронных теплоотводящих подложек и компонентов противовесов национальной обороны. Направления оптимизации включают разработку более эффективной технологии быстрого спекания, исследование применения связующих на биологической основе и интеграцию интеллектуальных производственных систем для дальнейшего повышения эффективности производства.

10.3.2 Технология переработки отходов

Сокращение отходов ресурсов и загрязнения окружающей среды, а также повышение экономичности и устойчивости материалов за счет переработки отходов (таких как порошки, стружка) и лома деталей (таких как детали медицинских экранов и противовесы) при производстве вольфрамо-никелево-медных сплавов. Традиционные методы переработки могут включать высокоэнергетическую плавку или химическую обработку, что приводит к вторичному загрязнению. Технология зеленой переработки отходов обеспечивает высокую степень извлечения и низкое воздействие на окружающую среду за счет физического разделения, химической очистки и эффективных процессов повторного использования. Физическое разделение использует механическое измельчение и просеивание для первоначального отделения компонентов вольфрама, никеля и меди в отходах, что снижает потребность в химической обработке. Химическая очистка использует экологически чистые растворители (такие как растворы на водной основе или малотоксичные кислотные жидкости) для разделения и очистки металлических компонентов, избегая отходящих газов и отработанной жидкости, образующихся при традиционной сильнокислотной или высокотемпературной плавке. Эффективный процесс повторного использования повторно распределяет восстановленный металлический порошок для порошковой металлургии или процессов МІМ для изготовления новых деталей из сплава и поддержания постоянства характеристик.

Технология переработки отходов также включает переработку лома. Путем разборки и сортировки лома медицинских коллиматоров, электронных радиаторов или противовесов оборонного назначения извлекаются пригодные для использования материалы на основе вольфрама, никеля и меди, которые затем очищаются, измельчаются и повторно спекаются для преобразования в высококачественное порошковое сырье. Процесс переработки должен осуществляться в чистой среде, чтобы избежать загрязнения примесями, влияющими на немагнитные свойства и биосовместимость сплава. Передовая технология онлайн-мониторинга используется для определения состава и чистоты переработанного порошка, чтобы гарантировать его соответствие производственным стандартам. Преимущество технологии переработки отходов заключается в значительном снижении зависимости от первичных минералов вольфрама, никеля и меди, снижении воздействия на окружающую среду при добыче и переработке полезных ископаемых, а также уменьшении накопления твердых отходов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 11. Распространенные проблемы и решения для сплавов вольфрам-никель-медь

Сплав вольфрама, никеля и меди широко используется в аэрокосмической, медицинской, электронной, информационной, оборонной и энергетической областях благодаря своей высокой плотности, немагнитным свойствам, превосходной теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения. Изготовленный методом порошковой металлургии, этот сплав сочетает в себе высокую плотность вольфрама с прочностью и теплопроводностью связующей фазы никеля и меди, что соответствует требованиям высокой точности и жестких условий эксплуатации. Однако в процессе приготовления может возникнуть ряд проблем, таких как дефекты спекания, неравномерность состава или трудности обработки, которые влияют на эксплуатационные характеристики и надежность сплава. Решение этих проблем требует оптимизации технологических процессов, улучшения контроля оборудования и внедрения передовых технологий для обеспечения высокого качества и однородности сплава.

11.1 Процесс приготовления сплава вольфрам-никель-медь

Вольфрам -никелево-медный сплав в основном изготавливается методом порошковой металлургии, включающим смешивание порошков, прессование, спекание и последующую обработку. Проблемы могут возникнуть на каждом этапе из-за неподходящего сырья, оборудования или параметров процесса. Спекание, являясь ключевым этапом, напрямую влияет на плотность, микроструктуру и эксплуатационные характеристики сплава, но подвержено таким дефектам, как пористость, трещины или сегрегация компонентов. Эти проблемы могут привести к снижению механических свойств, недостаточной теплопроводности или ухудшению немагнитных свойств сплава, что затрудняет его применение в медицинских защитных деталях, электронных подложках для рассеивания тепла или компонентах противовесов для национальной обороны. Решение проблем, связанных с процессом изготовления, требует, прежде всего, выбора сырья, оптимизации процесса и контроля качества, чтобы гарантировать соответствие характеристик сплава требованиям высокотребовательных приложений.

11.1.1 Решения по устранению дефектов спекания

Дефекты спекания являются распространенными проблемами в процессе получения сплавов вольфрам-никель-медь, в основном проявляющимися в виде пор, трещин, сегрегации состава или неравномерного спекания. Эти дефекты снижают плотность, механические свойства и теплопроводность сплава, влияя на его надежность в высокоточных приложениях. Пористость обычно вызвана неполным заполнением зазоров между частицами порошка или остаточным газом, что может привести к недостаточной плотности и ослаблению радиационной защиты или эффекта противовеса. Трещины часто возникают из-за термического напряжения или неравномерной скорости охлаждения во время спекания, что влияет на вязкость и долговечность сплава. Сегрегация состава вызвана неравномерным распределением порошков вольфрама, никеля и меди или недостаточной текучестью во время спекания в жидкой фазе, что может привести к нестабильности локальных свойств, таких как снижение теплопроводности или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ухудшение немагнитных свойств. Неравномерное спекание связано с неправильным температурным градиентом или контролем атмосферы в печи, что влияет на однородность микроструктуры сплава.

Решение : Дефекты спекания можно устранить путем оптимизации выбора сырья, улучшения процесса спекания и усиления контроля процесса. Используйте высокочистые, однородные по размеру частицы порошков вольфрама, никеля и меди, чтобы гарантировать постоянство химического состава и физических свойств порошков и уменьшить возникновение пористости и сегрегации. Используйте высокоэнергетическую шаровую мельницу или технологию механического легирования для смешивания порошков, чтобы улучшить однородность и площадь контакта частиц и усилить смачивающий и заполняющий эффект фаз никеля и меди во время спекания в жидкой фазе. Оптимизируйте параметры процесса спекания, примите стратегию спекания с ступенчатым повышением температуры, медленно нагревайте до температуры спекания в жидкой фазе, чтобы жидкая фаза никеля и меди могла полностью течь, заполнять промежутки между частицами вольфрама и уменьшать образование пор; в то же время контролируйте скорость охлаждения, чтобы избежать трещин, вызванных термическим напряжением. Используйте высокочистый инертный газ (например, аргон) или вакуум для спекания, чтобы предотвратить образование оксидов и сохранить немагнитные свойства и теплопроводность сплава. Внедрите технологию быстрого спекания, такую как искровое плазменное спекание (ИПС), которая использует импульсный ток и высокое давление для быстрого нагрева, сокращения времени спекания, подавления роста зерен, а также уменьшения пористости и сегрегации.

Усилите контроль качества в процессе спекания и используйте онлайн-систему мониторинга для определения температуры, атмосферы и давления в печи в режиме реального времени, чтобы обеспечить стабильность условий спекания. Горячее изостатическое прессование (ГИП) используется в качестве процесса постобработки для дальнейшего устранения остаточных пор и микротрещин за счет высокой температуры и давления, повышения плотности и однородности сплава и особенно подходит для высокотребовательных применений, таких как медицинские коллиматоры или компоненты противовесов для аэрокосмической промышленности. Регулярно калибруйте спекательное оборудование, чтобы обеспечить равномерное температурное поле в печи и избежать неравномерного спекания, вызванного локальным перегревом или холодными зонами. Кроме того, объедините технологию моделирования для оптимизации параметров спекания, прогнозирования течения жидкой фазы и распределения напряжений, а также снижения затрат на пробы и ошибки. Преимущество этого решения заключается в значительном улучшении плотности, механических свойств и стабильности эксплуатационных характеристик сплава для соответствия строгим требованиям медицинской, электронной и оборонной промышленности. Направления оптимизации включают разработку более эффективного оборудования для быстрого спекания, исследование автоматизированных систем управления для повышения стабильности процесса и интеграцию технологий аддитивного производства для непосредственного изготовления сложных форм и снижения количества дефектов в процессе обработки. В будущем, благодаря сочетанию с экологичными технологиями производства, процесс спекания может

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дополнительно снизить энергопотребление и выбросы, а также способствовать устойчивому развитию вольфрамо-никелево-медных сплавов.

11.1.2 Контроль однородности состава

Проблема однородности состава является распространенной проблемой при получении сплавов вольфрам-никель-медь. Она относится к неравномерному распределению компонентов вольфрама, никеля и меди в сплаве, что может привести к локальным различиям в плотности, снижению теплопроводности или ухудшению немагнитных свойств. Неоднородность состава обычно вызвана недостаточным смешиванием порошка, различиями в размере частиц или плохой текучестью во время спекания в жидкой фазе. Высокая плотность вольфрама позволяет ему легко оседать в процессе смешивания порошка, в то время как неравномерное распределение связующей фазы никеля и меди может вызвать локальную сегрегацию после спекания, влияя на постоянство характеристик сплава. Например, в деталях защиты медицинской радиотерапии неравномерный состав может снизить эффект экранирования излучения; в электронных радиаторах это может привести к нестабильной теплопроводности и повлиять на эффективность рассеивания тепла.

Решение : Для обеспечения однородности состава эту проблему можно решить путем оптимизации выбора порошка, улучшения процесса смешивания порошка и усиления контроля спекания. Выбирайте высококачественные порошки вольфрама, никеля и меди с постоянным размером частиц, чтобы уменьшить тенденцию к осаждению частиц и расслоению и обеспечить однородность на начальном этапе смешивания. Используйте высокоэнергетическую шаровую мельницу или технологию механического легирования для смешивания порошков. Благодаря длительному высокоинтенсивному измельчению частицы вольфрама, никеля и меди полностью диспергируются, улучшается однородность контакта между частицами и предотвращается введение примесей. Используйте трехмерное оборудование для смешивания порошка или ультразвуковое смешивание порошка для дальнейшего улучшения диспергирования и текучести порошка и уменьшения осаждения. Оптимизируйте процесс жидкофазного спекания и контролируйте плавление и течение жидкой фазы никеля и меди с помощью ступенчатой стратегии нагрева, чтобы гарантировать, что она полностью смачивает частицы вольфрама, заполняет промежутки между частицами и уменьшает сегрегацию. В процессе спекания используйте инертный газ высокой чистоты или вакуумную среду, чтобы предотвратить окисление меди, приводящее к дисбалансу состава.

Усиление контроля процесса – ключ к обеспечению однородности состава. Система онлайн-мониторинга используется для определения степени смешивания порошка и распределения состава в процессе спекания в режиме реального времени, а однородность подтверждается рентгенофлуоресцентным анализом или электронной микроскопией. Горячее изостатическое прессование (ГИП) – это процесс постобработки, который устраняет локальную сегрегацию и микропоры благодаря высокой температуре и высокому давлению, улучшает плотность и однородность состава сплава и особенно подходит для высокоточных применений, таких как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

противовесы в аэрокосмической отрасли или медицинские коллиматоры. Регулярно калибруйте оборудование для смешивания и спекания порошка, чтобы обеспечить стабильные параметры процесса и избежать неоднородности состава, вызванной отклонениями в работе оборудования. Кроме того, технология моделирования используется для оптимизации параметров смешивания и спекания порошка, прогнозирования потока жидкости и распределения состава, а также снижения затрат на испытания. Преимущество данного решения заключается в значительном улучшении стабильности характеристик сплава для соответствия строгим требованиям медицинской, электронной и оборонной промышленности. Направления оптимизации включают разработку автоматизированной системы смешивания порошков, исследование наноразмерных порошков для дальнейшего повышения однородности и интеграцию технологии аддитивного производства для непосредственного контроля распределения состава.

11.2 Анализ отказов при применении сплава вольфрам-никель-медь

Сплавы вольфрама, никеля и меди могут выходить из строя в ответственных областях применения (например, в медицинской радиотерапевтической защите, электронных теплоотводящих подложках и компонентах противовесов в оборонной промышленности) из-за дефектов материала, воздействия окружающей среды или неправильного использования, что приводит к снижению производительности или повреждению компонентов. Сбои в эксплуатации могут проявляться в недостаточной механической прочности, сниженной теплопроводности, поверхностной коррозии или размерной нестабильности, что влияет на безопасность и надежность оборудования. Например, в медицинском оборудовании сбои могут привести к снижению эффективности радиационной защиты; в электронных устройствах могут возникать сбои из-за перегрева; в оборонном оборудовании могут пострадать точность противовеса или ударопрочность. Анализ причин сбоев и предложение решений являются ключом к повышению надежности применения сплавов, начиная с подготовки материала, адаптации к окружающей среде и условий эксплуатации.

Причины отказов и решения : К распространенным причинам отказов при применении относятся дефекты подготовки, эрозия под воздействием окружающей среды и механическая перегрузка. Дефекты подготовки, такие как поры, трещины или неравномерный состав, напрямую снижают механические свойства и теплопроводность сплава. Дефекты можно устранить, оптимизировав процесс спекания (например, электроискровое плазменное спекание) или используя горячее изостатическое прессование для обеспечения плотной и однородной микроструктуры. Эрозия под воздействием окружающей среды в основном вызывается влагой, химической дезинфекцией или высокотемпературным окислением, что приводит к коррозии поверхности или ухудшению характеристик, особенно в медицинском оборудовании или морской среде. Решения включают в себя использование коррозионно-стойкой обработки поверхности, такой как PVD- покрытия TiN или химическая пассивация, для формирования плотного защитного слоя для повышения стойкости к окислению и коррозии; одновременно оптимизируя состав сплава и увеличивая соотношение никеля и меди для повышения коррозионной стойкости. Механическая перегрузка часто встречается в условиях сильных ударов или вибрации (например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в противовесах ракет, броневой защите), что может привести к трещинам или деформации. Ударопрочность можно повысить за счет улучшения прочности сплава (например, с помощью наноструктурированной конструкции) или оптимизации геометрии компонента (например, путем добавления галтелей или градиентных структур).

Адаптация к окружающей среде является основным аспектом анализа отказов. В условиях высоких температур или циклического изменения температуры термические напряжения могут привести к размерной нестабильности или отслоению интерфейса, что влияет на характеристики теплоотводящих подложек или экранирующих компонентов. Решения включают использование рецептур с низким коэффициентом теплового расширения в сочетании с функциональными градиентными материалами (FGM) для оптимизации распределения термических напряжений. Электромагнитные помехи могут вызывать немагнитные отказы, особенно в оборудовании МРТ или радиолокационных системах, что может быть обеспечено строгим контролем содержания примесей железа и онлайн-тестированием намагниченности. Неправильное использование, такое как перегрузка или установка, не соответствующая проектным требованиям, может привести к отказу компонента.

Необходимо снизить количество ошибок, связанных с человеческим фактором, посредством обучения пользователей и стандартизации процессов установки. Контроль качества включает сканирующую электронную микроскопию для анализа микроструктуры, испытания в солевом тумане для проверки коррозионной стойкости и вибрационные испытания для оценки механических свойств, чтобы гарантировать соответствие компонентов стандартам применения. Преимущество данного решения заключается в комплексном повышении надежности и срока службы сплава для удовлетворения высоких требований медицинской, электронной и оборонной отраслей. Направления оптимизации включают разработку самовосстанавливающихся покрытий для борьбы с эрозией окружающей среды, исследование технологий интеллектуального мониторинга для выявления рисков отказов в режиме реального времени и интеграцию технологий аддитивного производства для создания отказоустойчивых конструкций.

11.2.1 Решения по устранению сбоев термического цикла

Разрушение при термическом цикле является распространенным видом разрушения сплава вольфрам-никель-медь в условиях высокой температуры или перепада температур, которое проявляется в виде микротрещин, отслоения интерфейса или размерной деформации, вызванных многократным термическим расширением и сжатием, что влияет на структурную целостность и стабильность характеристик сплава. Разрушение при термическом цикле в основном вызвано термическим напряжением. Когда сплав подвергается быстрым изменениям температуры при работе с высокой температурой или в условиях экстремального перепада температур, внутри материала или на границе с матрицей возникает концентрация напряжений из-за различий в коэффициентах термического расширения, что может привести к распространению трещин или отказу компонента. Например, в экране детектора медицинского КТ-аппарата термоциклирование может вызвать деформацию компонента экрана и снизить эффект радиационной защиты.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Решение : Отказ от термического цикла может быть решен путем оптимизации состава сплава, улучшения микроструктуры и внедрения передовых процессов. Отрегулируйте соотношение никеля и меди и увеличьте содержание меди для улучшения теплопроводности, ускорения рассеивания тепла, уменьшения локальных перепадов температур и уменьшения накопления термических напряжений. Используйте конструкцию функционального градиентного материала (FGM) для оптимизации согласования коэффициента теплового расширения и снятия напряжений на границе раздела путем введения постепенного распределения содержания вольфрама, никеля и меди внутри сплава. Он особенно подходит для теплорассеивающих подложек или экранирующих деталей в сочетании с кремнием, керамикой и другими подложками. Внедрите наноструктурированные сплавы и используйте эффект упрочнения границ зерен наномасштабных частиц для повышения сопротивления термической усталости и уменьшения образования микротрещин. Оптимизируйте процесс спекания и используйте искровое плазменное спекание (SPS) для быстрого формирования плотной структуры и уменьшения пор и точек концентрации напряжений; горячее изостатическое прессование (HIP) дополнительно устраняет микропоры и повышает стойкость сплава к тепловому удару.

Обработка поверхности является важной мерой для борьбы с отказом при термоциклировании. Нанесение высокоэффективных покрытий для формирования термобарьерного слоя может снизить воздействие теплового удара на поверхность сплава, одновременно увеличивая силу межфазного сцепления для предотвращения отслоения. Оптимизируйте геометрию компонента, например, увеличивая галтели или толщину градиента, чтобы рассредоточить термические напряжения и снизить риск образования трещин. Контроль качества имитирует реальные условия эксплуатации с помощью испытаний на термоциклирование в сочетании со сканирующей электронной микроскопией для анализа микротрещин и проверки термической стабильности сплава. Преимущество решения заключается в том, что оно значительно повышает надежность сплава в условиях высоких температур и перепадов температур, отвечая строгим требованиям медицинской, электронной и аэрокосмической областей. Направления оптимизации включают разработку адаптивных покрытий для динамического снятия термических напряжений и исследование технологии 3D-печати для изготовления сложных градиентных структур.

11.2.2 Защита от коррозии под воздействием окружающей среды

Коррозия под воздействием окружающей среды является распространенным видом отказа сплавов вольфрама-никеля-меди во влажных, химически стерилизованных или высокотемпературных окислительных средах, которая проявляется как окисление поверхности, коррозионные язвы или деградация материала, что влияет на производительность и срок службы сплава. Коррозия в основном вызывается факторами окружающей среды, такими как влажность, солевой туман или химические чистящие средства, особенно в медицинском оборудовании (требуется частая дезинфекция), морской среде (например, противовесы корабельных радаров) или высокотемпературных применениях (например, компоненты сопла ракет). Медь как связующая фаза подвержена окислению или химическому воздействию, что приводит к шероховатости поверхности, снижению теплопроводности или ухудшению немагнитных свойств.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Например, в защитных кожухах медицинской радиотерапии коррозия может снизить эффект радиационной защиты; в противовесах двигателей новых энергетических транспортных средств она может вызвать износ поверхности и повлиять на динамический баланс.

Решение : Проблему коррозии под воздействием окружающей среды можно решить путем оптимизации состава сплава, нанесения защитных покрытий и улучшения управления окружающей средой. Увеличение содержания никеля или оптимизация соотношения никеля и меди может повысить коррозионную стойкость связующего слоя и снизить склонность меди к окислению во влажной или химической среде. Технологии обработки поверхности, такие как PVD- покрытие TiN или CrN , могут использоваться для формирования плотного защитного слоя, изолирующего кислород, влагу и химические вещества, что значительно повышает коррозионную стойкость; химическая пассивация может дополнительно повысить стойкость к окислению и биосовместимость за счет формирования на поверхности защитной оксидной пленки, что подходит для медицинских протезов или компонентов хирургической навигации. Электрохимическая полировка оптимизирует качество поверхности, снижает начальные точки коррозии и повышает коррозионную стойкость.

Улучшите процесс подготовки для снижения чувствительности к коррозии. Используйте высококачественное сырье и чистую среду спекания (например, вакуум или высокочистый аргон), чтобы предотвратить попадание примесей (например, железа или кислорода) и сохранить немагнитные и коррозионно-стойкие свойства сплава. Горячее изостатическое прессование (ГИП) увеличивает плотность сплава и снижает вероятность образования пор как отправной точки коррозии. Оптимизируйте управление средой использования, например, используйте нейтральные дезинфицирующие средства вместо сильных кислотных и щелочных очистителей в медицинском оборудовании для снижения химической коррозии; комбинируйте конструкцию герметизации в морской среде для изоляции от солевого тумана и влажности. Контроль качества проверяет коррозионную стойкость с помощью испытаний в солевом тумане, испытаний на циклическое воздействие влажного тепла и анализа поверхности (СЭМ или РФЭС) для обеспечения соответствия медицинским и военным стандартам. Преимущество этого решения заключается в том, что оно значительно продлевает срок службы сплава в суровых условиях и отвечает требованиям надежности в медицинской, электронной и оборонной областях. Направления оптимизации включают разработку самовосстанавливающихся покрытий для динамического устранения коррозионных повреждений, исследование нанокompозитных покрытий для повышения эффективности защиты и интеграцию технологии онлайн-мониторинга для оценки состояния коррозии в режиме реального времени.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

High Density: Typically 16.5 - 18.75 g/cm³

High Thermal Conductivity: Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение

Терминология сплавов вольфрам-никель-медь

Термин	Определение и объяснение
Порошковая металлургия	Процесс получения металлических материалов путем смешивания металлических порошков, прессования и спекания для производства сплавов вольфрам-никель-медь, обеспечивающих высокую плотность и однородную микроструктуру.
Жидкофазное спекание	В процессе спекания фаза никеля и меди плавится при высокой температуре, образуя жидкость, которая смачивает частицы вольфрама и заполняет зазоры, тем самым улучшая плотность и эксплуатационные характеристики сплава.
Горячее изостатическое прессование (ГИП)	Процесс обработки сплавов под воздействием высокой температуры и высокого давления во всех направлениях для устранения микропор и дефектов, а также улучшения плотности и механических свойств.
Литье металлов под давлением (МИМ)	Процесс изготовления деталей сложной формы и высокой точности путем смешивания металлического порошка со связующим веществом, удаления связующего вещества и спекания после литья под давлением, подходящий для применения в миниатюризации.
Высокая плотность	Сплавы вольфрама, никеля и меди отличаются высокой массой на единицу объема, что делает их пригодными для использования в качестве противовесов и экранов, например, в защитных элементах медицинской радиотерапии и противовесах в аэрокосмической отрасли.
Немагнитный	Сплав не создает магнитных полей и не подвержен влиянию магнитных полей, что делает его пригодным для использования в средах, чувствительных к электромагнитному излучению, таких как оборудование МРТ и радиолокационные системы.
Теплопроводность	Способность сплава передавать тепло и добавление фазы меди делают его превосходным в приложениях по рассеиванию тепла (например, в электронных радиаторах, подложках аккумуляторных батарей).
Низкий коэффициент теплового расширения	Малое изменение размеров сплава при изменении температуры обеспечивает геометрическую стабильность при термоциклах и подходит для высокоточных деталей.
Функционально-градиентные материалы	Материалы с оптимизированными характеристиками за счет композиционного или структурного градиентного дизайна,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(FGM)	например, комбинации сердцевины высокой плотности и поверхностного слоя с высокой теплопроводностью.
Наноструктурированные сплавы	Сплав изготовлен из наноразмерного порошка и имеет мелкозернистую структуру, что повышает прочность, ударную вязкость и теплопроводность.
Дефекты спекания	Поры, трещины или расслоение компонентов, возникающие в процессе спекания, влияют на производительность и могут быть решены путем оптимизации процесса и последующей обработки.
однородность состава	Равномерное распределение вольфрама, никеля и меди в сплаве обеспечивает постоянную производительность, которая контролируется с помощью высокоэнергетического шарового измельчения и онлайн-мониторинга.
Отказ от термодиклирования	Трещины или нарушение сцепления на границе раздела, вызванные многократными изменениями температуры, можно устранить с помощью градиентной конструкции и покрытия.
Коррозия под воздействием окружающей среды	Окисление или деградацию поверхности, вызванные влажной или химической средой, можно оптимально защитить с помощью антикоррозийных покрытий и компонентов.
Биосовместимость	не вызывает побочных реакций при контакте с тканями человека, что делает его пригодным для медицинского применения, например, в протезах и компонентах хирургической навигации.



CTIA GROUP LTD Вольфрамово-никелевый медный сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Китайские ссылки

- [1] Чжан Ли, Ван Юн. Получение и исследование характеристик сплава высокой плотности на основе вольфрама. Журнал «Материаловедение и машиностроение», 2019.
- [2] Ли Сяо, Лю Чжи. Прогресс в применении сплава вольфрам-никель-медь для рассеивания тепла в электронике. Электронные материалы и технологии, 2020.
- [3] Чэнь Хуэй, Чжао Мин. Применение технологий экологичного производства при производстве вольфрамовых сплавов. Журнал «Прогресс материалов Китая», 2021.
- [4] Ван Цян, Чжан Хуа. Приготовление и оптимизация характеристик наноструктурированного вольфрамового сплава. Nanotechnology and Precision Engineering, 2022.
- [5] Сунь Вэй, Ли Цян. Применение функциональных градиентных материалов в высокоточных компонентах из вольфрамового сплава. Journal of Composite Materials, 2023.
- [6] Лю Ян, Чжан Вэй. Исследование радиационной защиты сплава вольфрам-никель-медь в медицинском оборудовании. Medical Device Research, 2021.
- [7] Чжоу Пин, Сюй Фэн. Применение сплава вольфрам-никель-медь в противовесе для аэрокосмической техники. Journal of Aeronautical Materials, 2020.
- [8] Ян Фань, Ван Лэй. Стратегия контроля дефектов спекания при приготовлении сплава вольфрам-никель-медь. Powder Metallurgy Technology, 2022.
- [9] Чжан Тао, Ли На. Технология утилизации и переработки отходов сплава вольфрама, никеля и меди. Circular Economy and Materials, 2023.
- [10] Хэ Мин, Сунь Ли. Применение и проблемы сплава вольфрама, никеля и меди в области национальной обороны и военной промышленности. National Defense Technology, 2021.

Ссылки на английском языке

- [1] Смит, Дж. и Браун, Т. Сплавы высокой плотности для аэрокосмической и медицинской промышленности. Журнал материаловедения, Springer, 2020.
- [2] Чжан, Л. и Ван, И. Достижения в порошковой металлургии сплавов на основе вольфрама. Materials Today, Elsevier, 2019.
- [3] Кумар, Р. и Сингх, А. Немагнитные вольфрамовые сплавы в электромагнитных средах. Журнал прикладной физики, издательство AIP, 2021.
- [4] Ли, Х. и др. Материалы для терморегулирования в электронике и энергетике. Advanced Materials Research, Wiley, 2022.
- [5] Чэнь, Х. и Лю, З. Экологичные технологии производства высокопроизводительных сплавов. Устойчивые материалы и технологии, Elsevier, 2023.
- [6] Ван, Ц. и Чжао, М. Функциональные градиентные материалы в высокоточных приложениях. Композитная наука и технологии, Elsevier, 2021.
- [7] Ли, С. и др. Наноструктурированные вольфрамовые сплавы для экстремальных условий. Nanotechnology Reviews, De Gruyter, 2023.
- [8] Джонсон, П. и Тейлор, Р. Вольфрамовые сплавы в радиационной защите медицинских приборов. Медицинская физика, AAPM, 2020.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT