

Энциклопедия вольфрамового тигля

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

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

ЗНАКОМСТВО С CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, дочерняя компания с независимой правосубъектностью, 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 — первый в Китае веб-сайт высшего уровня по вольфрамовым продуктам — является новаторской компанией электронной коммерции в стране, специализирующейся на вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности. Опираясь на почти тридцатилетний опыт работы в области вольфрама и молибдена, CTIA GROUP наследует исключительные возможности своей материнской компании в области проектирования и производства, превосходные услуги и глобальную деловую репутацию, став поставщиком комплексных прикладных решений в области химических веществ вольфрама, металлов вольфрама, твердых сплавов, сплавов высокой плотности, молибдена и молибденовых сплавов.

За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE создала более 200 многоязычных профессиональных веб-сайтов по вольфраму и молибдену, охватывающих более 20 языков, с более чем миллионом страниц новостей, цен и анализа рынка, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными элементами. С 2013 года официальный аккаунт WeChat «CHINATUNGSTEN ONLINE» опубликовал более 40 000 единиц информации, обслуживая почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставляя бесплатную информацию сотням тысяч профессионалов отрасли по всему миру. Благодаря совокупному количеству посещений веб-сайта и официального аккаунта, достигшему миллиардов раз, компания стала признанным глобальным и авторитетным информационным центром для вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной отраслей, предоставляющим 24/7 многоязычные новости, характеристики продукции, рыночные цены и услуги по рыночным тенденциям.

Опираясь на технологии и опыт CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологию искусственного интеллекта, она совместно с клиентами разрабатывает и производит вольфрамовые и молибденовые изделия с определенным химическим составом и физическими свойствами (такими как размер частиц, плотность, твердость, прочность, размеры и допуски). Она предлагает комплексные интегрированные услуги, начиная от вскрытия пресс-форм, пробного производства и заканчивая отделкой, упаковкой и логистикой. За последние 30 лет компания CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по исследованиям и разработкам, проектированию и производству более 500 000 видов вольфрамовых и молибденовых изделий для более чем 130 000 клиентов по всему миру, заложив основу для индивидуального, гибкого и интеллектуального производства. Опираясь на эту основу, CTIA GROUP еще больше углубляет интеллектуальное производство и интегрированные инновации в области вольфрама и молибдена в эпоху промышленного интернета.

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



У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of $\geq 99.95\%$ minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

Rare earth metal melting: Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

Vacuum coating: Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

High-temperature furnaces: Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C .

Chemical synthesis: Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

Metal smelting and refining: Used for melting and refining high-purity metals.

Sapphire crystal growth: Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between $2000\text{--}2500^{\circ}\text{C}$.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Содержание

Глава 1 Общая теория вольфрамового тигля

- 1.1 Определение и основные понятия вольфрамового тигля
- 1.2 Историческое развитие вольфрамовых тиглей
- 1.3 Стратегическое значение вольфрамового тигля в современной промышленности
- 1.4 Глобальное распределение вольфрама и состояние добычи
- 1.5 Обзор цепи для промышленности вольфрамовых тиглей

Глава 2 Характеристики продукта вольфрамового тигля

- 2.1 Геометрия и размеры вольфрамового тигля
 - 2.1.1 Стандартные размеры (диаметр, толщина стенки, высота)
 - 2.1.2 Индивидуальный дизайн и нестандартные размеры
 - 2.1.3 Объем и грузоподъемность
 - 2.1.4 Фасонные конструкции (цилиндрические, конические, специальной формы)
- 2.2 Качество поверхности вольфрамового тигля
 - 2.2.1 Полировка, шлифовка и механическая обработка поверхностей
 - 2.2.2 Нормы шероховатости поверхности (Ra, Rz)
 - 2.2.3 Обнаружение и контроль поверхностных дефектов
 - 2.2.4 Покрытие и модификация поверхности
- 2.3 Чистота материала вольфрамового тигля
 - 2.3.1 Вольфрам высокой чистоты
 - 2.3.2 Анализ примесных элементов
 - 2.3.3 Влияние чистоты на высокотемпературные характеристики
- 2.4 Термические свойства вольфрамового тигля
 - 2.4.1 Устойчивость вольфрамового тигля к высоким температурам
 - 2.4.2 Термостойкость вольфрамового тигля к тепловому удару и термоусталостная долговечность
 - 2.4.3 Теплопроводность и характеристики теплового излучения
 - 2.4.4 Согласование теплового расширения
- 2.5 Химическая стабильность вольфрамового тигля
 - 2.5.1 Стойкость к кислотной и щелочной коррозии
 - 2.5.2 Высокотемпературная инертность и способность к защите от загрязнения
 - 2.5.3 Совместимость с расплавленным металлом и сплавом
- 2.6 Механические свойства вольфрамового тигля
 - 2.6.1 Устойчивость к деформации при высоких температурах
 - 2.6.2 Устойчивость к распространению трещин
 - 2.6.3 Устойчивость конструкции при циклическом нагреве
 - 2.6.4 Ударопрочность и вибростойкость
- 2.7 Другие характеристики
 - 2.7.1 Высокотемпературные электрические свойства
 - 2.7.2 Износостойкость и стойкость к истиранию

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

- 2.7.3 Радиационная стойкость (применение в атомной промышленности)
- 2.8CTIA GROUP LTD Вольфрамовый тигель MSDS

Глава 3 Процесс и технология подготовки

- 3.1 Подготовка сырья
 - 3.1.1 Рафинирование вольфрамовой руды и производство порошков
 - 3.1.2 Химические и физические характеристики вольфрамового порошка
 - 3.1.3 Контроль размера и морфологии частиц
 - 3.1.4 Контроль качества сырья
- 3.2 Процесс порошковой металлургии
 - 3.2.1 Смесь вольфрамового порошка и добавки
 - 3.2.2 Холодное прессование и преформинг
 - 3.2.3 Уплотнение порошка и удаление связующего
- 3.3 Процесс формовки
 - 3.3.1 Изостатическое прессование
 - 3.3.2 Компрессионное формование и экструзия
 - 3.3.3 Вращение и растяжка
 - 3.3.4 Формовка сложной формы
 - 3.3.5 Проектирование и изготовление пресс-форм
- 3.4 Процесс спекания
 - 3.4.1 Вакуумное спекание
 - 3.4.2 Агломерация водорода/инертного газа
 - 3.4.3 Оптимизация температуры/времени/атмосферы
 - 3.4.4 Многостадийное и градиентное спекание
 - 3.4.5 Контроль усадки спекания и размеров
- 3.5 Механическая обработка и чистовая обработка
 - 3.5.1 Токарная, фрезерная, сверлильная обработка
 - 3.5.2 Электроэрозионная и лазерная резка
 - 3.5.3 Прецизионная шлифовка и полировка
 - 3.5.4 Поверхностные покрытия
- 3.6 Технология последующей обработки
 - 3.6.1 Термическая обработка и отжиг
 - 3.6.2 Поверхностное упрочнение
 - 3.6.3 Очистка и обеззараживание
 - 3.6.4 Снятие напряжений и оптимизация конструкций
- 3.7 Контроль качества и тестирование
 - 3.7.1 Размерные и геометрические испытания
 - 3.7.2 Неразрушающий контроль
 - 3.7.3 Химический и микроструктурный анализ
 - 3.7.4 Испытания на работу при высоких температурах
 - 3.7.5 Сертификация и прослеживаемость

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

3.8 Передовые технологии производства

3.8.1 Аддитивное производство (3D-печать)

3.8.2 Лазерное плавление и плазменное напыление

3.8.3 Микропроизводство

3.8.4 Интеллектуальное производство и Индустрия 4.0

Глава 4 Технология производства и инновации

4.1 Автоматизация и интеллектуальное производство

4.1.1 ЧПУ и робототехника

4.1.2 Производственные линии, интегрированные в IoT

4.1.3 ИИ для оптимизации процессов

4.1.4 Производство, управляемое данными

4.2 Энергетика и охрана окружающей среды

4.2.1 Эффективная конструкция печи для спекания

4.2.2 Рекуперация отходящего тепла

4.2.3 Методы экологически чистого производства

4.2.4 Более чистые технологии производства

4.3 Экономика замкнутого цикла и ресурсы

4.3.1 Переработка вольфрамового лома

4.3.2 Переработка отходов

4.3.3 Устойчивые цепочки поставок

4.3.4 Оценка жизненного цикла

4.4 Передовые технологии

4.4.1 Нановольфрамовый порошок

4.4.2 Высокоэнтропийные и композитные тигли

4.4.3 Квантовые вычисления в материалах

4.4.4 Материалы, вдохновленные биологией

Глава 5 Применение

5.1 Металлургическая промышленность

5.1.1 Выплавка редкоземельных и драгоценных металлов

5.1.2 Жаропрочные сплавы

5.1.3 Порошковая металлургия

5.2 Полупроводники и электроника

5.2.1 Рост кристаллов кремния и сапфира

5.2.2 Составные полупроводники

5.2.3 PVD и CVD

5.2.4 Упаковка и управление температурным режимом

5.3 Химическая промышленность

5.3.1 Синтез катализатора

5.3.2 Сосуды для коррозионной реакции

- 5.3.3 Химическое рафинирование высокой чистоты
- 5.4 Научные исследования
 - 5.4.1 Высокотемпературные испытания материалов
 - 5.4.2 Моделирование экстремальных условий
 - 5.4.3 Продвинутый синтез материалов
 - 5.4.4 Синхротронные и нейтронные эксперименты
- 5.5 Аэрокосмическая и оборонная промышленность
 - 5.5.1 Компоненты ракетных двигателей
 - 5.5.2 Высокотемпературные структурные испытания
 - 5.5.3 Военная техника
 - 5.5.4 Спутниковые тепловые системы
- 5.6 Энергетика
 - 5.6.1 Компоненты ядерных реакторов
 - 5.6.2 Фотоэлектрическая промышленность
 - 5.6.3 Производство топливных элементов
 - 5.6.4 Материалы для термоядерного синтеза
- 5.7 Новые и кросс-индустриальные
 - 5.7.1 Производство ювелирных изделий и предметов роскоши
 - 5.7.2 Медицинские имплантаты и устройства
 - 5.7.3 3D-печать и пресс-формы
 - 5.7.4 Квантовые технологии и сверхпроводники

Глава 6 Преимущества, недостатки и проблемы

- 6.1 Преимущества
 - 6.1.1 Высокая температура плавления и стабильность
 - 6.1.2 Превосходная химическая инертность
 - 6.1.3 Высокая надежность и долговечность
 - 6.1.4 Адаптивность к экстремальным условиям
- 6.2 Ограничения и проблемы
 - 6.2.1 Высокая стоимость
 - 6.2.2 Хрупкость и сложность обработки
 - 6.2.3 Ограничения на крупногабаритное производство
 - 6.2.4 Цепочка поставок и геополитические риски
- 6.3 Улучшения
 - 6.3.1 Снижение затрат и массовое производство
 - 6.3.2 Новые материалы и композиты
 - 6.3.3 Повышение точности и эффективности
 - 6.3.4 Умное производство

Глава 7 Рекомендации по использованию

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

- 7.1 Установка и эксплуатация
 - 7.1.1 Предмонтажный осмотр
 - 7.1.2 Безопасность работы при высоких температурах
 - 7.1.3 Термическая и механическая защита
- 7.2 Экологические требования
 - 7.2.1 Контроль атмосферы и температуры
 - 7.2.2 Избегайте использования несовместимых материалов
 - 7.2.3 Предотвращение загрязнения
- 7.3 Техническое обслуживание
 - 7.3.1 Регулярный осмотр и чистка
 - 7.3.2 Мониторинг повреждений поверхности
 - 7.3.3 Оценка срока службы
- 7.4 Устранение неполадок
 - 7.4.1 Распространенные проблемы
 - 7.4.2 Диагностика и ремонт
 - 7.4.3 Порядок аварийного отключения

Глава 8 Транспортировка и хранение

- 8.1 Требования к транспортировке
- 8.2 Условия хранения
- 8.3 Меры предосторожности при обращении
- 8.4 Документация и маркировка
- 8.5 Аномальное управление

Глава 9 Устойчивое развитие и переработка

- 9.1 Управление жизненным циклом
 - 9.1.1 Оценка пригодности производства к использованию
 - 9.1.2 Воздействие на окружающую среду и воздействие на окружающую среду
 - 9.1.3 Устойчивое проектирование и процессы
- 9.2 Переработка и повторное использование
 - 9.2.1 Процесс переработки
 - 9.2.2 Технологические проблемы
 - 9.2.3 Контроль качества переработанной продукции
- 9.3 Соблюдение экологических норм
 - 9.3.1 Обзор регламента
 - 9.3.2 Нормы утилизации отходов
 - 9.3.3 Сертификация и аудит
- 9.4 Экономика замкнутого цикла
 - 9.4.1 Использование ресурсов в замкнутом цикле
 - 9.4.2 Анализ экономических выгод
 - 9.4.3 Отраслевое сотрудничество

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Глава 10 Стандарты и правила

10.1 Китайские стандарты (GB)

10.1.1 GB/T 3875-2017

10.1.2 GB/T 3459-2022

10.1.3 YB/T 5174-2020

10.2 Стандарты ISO

10.2.1 ИСО 9001:2015

10.2.2 ИСО 14001:2015

10.2.3 ИСО 15730:2000

10.3 Стандарты ASTM

10.3.1 ASTM B760-07(2019)

10.3.2 ASTM E696-07(2018)

10.3.3 ASTM E1447-09(2016)

10.4 Другие международные стандарты

10.4.1 JIS H 4701:2015

10.4.2 DIN EN 10204:2004

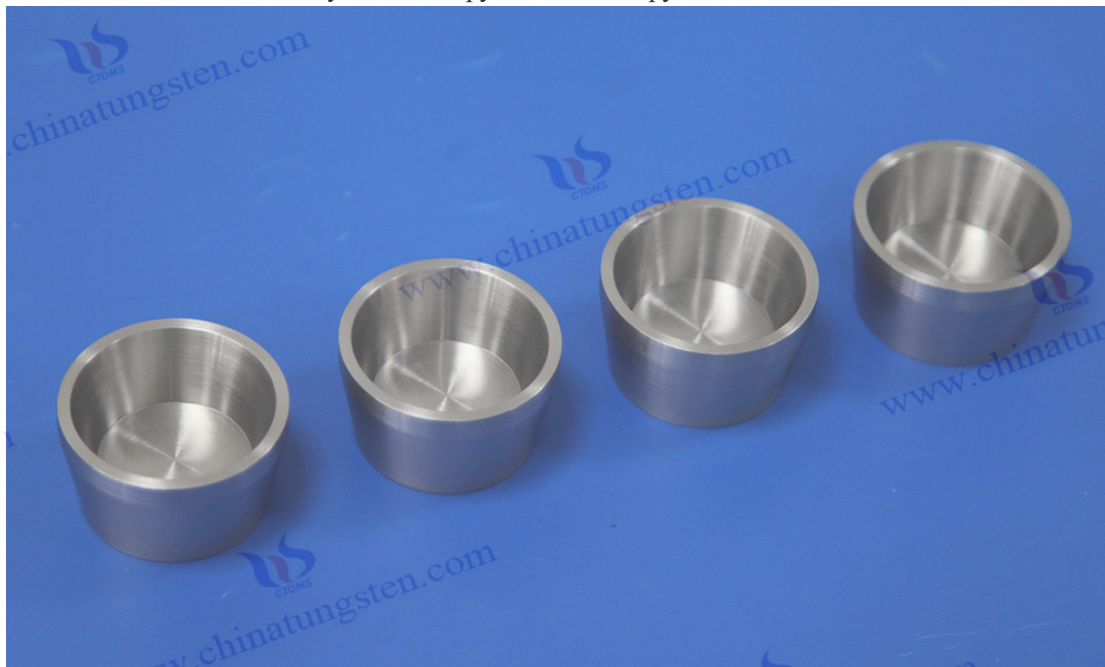
10.4.3 EN 10276-1:2000

Приложение

A. Глоссарий терминов

B. Ссылки

C. Список часто используемых инструментов и оборудования



Вольфрамовые тигли от CTIA GROUP LTD

Глава 1 Общая теория вольфрамового тигля

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

1.1 Определение и основные понятия вольфрамового тигля

Вольфрамовый тигель представляет собой высокотемпературный и устойчивый к коррозии контейнер, изготовленный из вольфрама высокой чистоты (чистота обычно $\geq 99,95\%$) в качестве основного сырья, полученный методом порошковой металлургии, спекания, механической обработки и других процессов, и широко используется в таких промышленных областях, как высокотемпературная плавка, выращивание кристаллов, химические реакции и испытания материалов. Основные свойства вольфрамового тигля обусловлены сверхвысокой температурой плавления вольфрама ($3422\text{ }^{\circ}\text{C}$, самая высокая среди металлов), отличной химической стабильностью и механической прочностью в экстремальных условиях, что делает его незаменимым компонентом в высокотемпературных процессах. Его основные функции включают в себя обработку и обработку расплавленных металлов, сплавов, керамики или химикатов, а также поддержание структурной целостности и стабильных характеристик при температурах до $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ или в высококоррозионных средах.

Типичная структура вольфрамового тигля является цилиндрической или конической, внутренняя стенка обычно прецизионно отполирована для уменьшения адгезии расплавленного материала, а толщина и размер стенки настраиваются в соответствии с применением. Например, вольфрамовые тигли, используемые для выращивания монокристаллического кремния в полупроводниковой промышленности, обычно имеют диаметр $100\text{--}300\text{ мм}$ и толщину стенки $5\text{--}10\text{ мм}$, в то время как тигли, используемые в металлургической промышленности для плавки редкоземельных металлов, могут быть более 500 мм в диаметре и $15\text{--}20\text{ мм}$ в толщине стенки. На производительность вольфрамовых тиглей влияет множество факторов, включая чистоту материала, размер зерна, качество поверхности и производственный процесс. Например, вольфрамовые тигли высокой чистоты (чистота $\geq 99,999\%$) значительно снижают загрязнение примесями при росте полупроводниковых кристаллов, в то время как тигли более низкой чистоты ($99,95\%$) чаще используются в чувствительных к стоимости металлургических приложениях.

Конструкция вольфрамовых тиглей требует сочетания термических, механических и химических свойств. Например, при высоких температурах вольфрамовые тигли должны выдерживать термические нагрузки и механические нагрузки, избегая при этом химических реакций с расплавленными веществами. В вакууме или инертной атмосфере низкое давление пара вольфрамового тигля (всего 10^{-7} Па при 3000°C) гарантирует, что он не испаряется и не загрязняет окружающую среду. Кроме того, вольфрамовые тигли имеют низкий коэффициент теплового расширения (около $4,5 \times 10^{-6}/\text{K}$) и хорошо прилегают к таким материалам, как расплавленный кремний или сапфир, что снижает риск растрескивания, вызванного термическим напряжением. В последние годы достижения в области аддитивного производства и технологий нанесения покрытий на поверхности еще больше расширили возможности и области применения вольфрамовых тиглей, в том числе в термоядерных реакторах и аэрокосмической отрасли.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

1.2 Историческое развитие вольфрамовых тиглей

Происхождение вольфрамового тигля тесно связано с промышленным применением металлического вольфрама. Вольфрам, как редкий металл, начал привлекать внимание в середине 19 века, но его раннее применение было крайне ограничено из-за высокой температуры плавления и сложности обработки. В 1870-х годах вольфрам начали использовать в виде вольфрамовой стали в инструментальном производстве, но вольфрамовые тигли были разработаны только в начале 20 века. В 1909 году Уильям Д. Кулидж из американской компании «Дженерал Электрик» изобрел метод подготовки пластичной вольфрамовой проволоки для производства вольфрамовых изделий высокой чистоты с помощью порошковой металлургии и технологии высокотемпературного спекания, что ознаменовало собой крупный прорыв в технологии обработки вольфрама. Эта технология закладывает основу для промышленного производства вольфрамовых тиглей.

В начале 20-го века вольфрамовые тигли в основном использовались в высокотемпературных лабораторных экспериментах, таких как плавка драгоценных металлов, химический анализ и вакуумная дистилляция. В 1920-х годах, с развитием технологии вакуумных печей, вольфрамовые тигли начали использовать в промышленных масштабах для выплавки редких металлов, таких как молибден, ниобий и тантал. Во время Второй мировой войны вольфрамовые тигли оставили свой след в военной промышленности, где их использовали при плавке жаропрочных сплавов и специальных сталей, а также при производстве авиационных двигателей и броневых материалов.

В 1950-х годах зрелость технологии порошковой металлургии способствовала широкомасштабному производству вольфрамовых тиглей. Внедрение технологии изостатического компрессионного формования и вакуумного спекания позволило значительно повысить плотность и прочность тигля, позволив ему выдерживать более высокие температуры и механические нагрузки. В 1960-х годах подъем полупроводниковой промышленности стал поворотным моментом в развитии вольфрамовых тиглей. Процессы выращивания монокристаллического кремния и кристаллов сапфира (такие как процессы Чохральского и Киропулоса) предъявляют чрезвычайно высокие требования к чистоте и качеству поверхности тиглей, а вольфрамовые тигли высокой чистоты (чистота $\geq 99,99\%$) начинают становиться стандартом в полупроводниковой промышленности.

В 21 веке область применения вольфрамовых тиглей еще больше расширилась. В аэрокосмической отрасли вольфрамовые тигли используются для изготовления сопел ракетных двигателей и высокотемпературных конструкционных материалов; Атомная промышленность использует его для высокотемпературных компонентов реакторов и экспериментов по ядерному синтезу; Новые области энергетики (такие как фотовольтаика и топливные элементы) полагаются на вольфрамовые тигли для производства кремния и керамики высокой чистоты. Согласно отраслевым отчетам [Chinatungsten Online](http://ChinatungstenOnline.com), с 2000 по 2020 год объем мирового рынка вольфрамовых тиглей увеличился с примерно 300 миллионов

долларов США до 1,2 миллиарда долларов США, при этом среднегодовой совокупный темп роста составил около 7,5%. В последние годы внедрение аддитивного производства (3D-печати) и технологий умного производства еще больше способствовало индивидуальному и эффективному производству вольфрамовых тиглей.

1.3 Стратегическое значение вольфрамового тигля в современной промышленности

Вольфрамовый тигель занимает незаменимое стратегическое положение в современной промышленности, а его важность отражается во многих аспектах технологии, экономики и геополитики:

Технологии в основе

Вольфрамовые тигли являются краеугольным камнем высокотемпературных процессов, особенно в полупроводниковой, аэрокосмической промышленности и новой энергетике. В полупроводниковой промышленности вольфрамовые тигли используются для выращивания монокристаллического кремния и сложных полупроводников (таких как GaAs, GaN), которые напрямую влияют на качество и эффективность производства чипов. В аэрокосмическом секторе вольфрамовые тигли используются для плавки жаропрочных сплавов и композитов, поддерживая разработку передовых двигателей и конструктивных компонентов. В области новой энергетики вольфрамовые тигли незаменимы при производстве фотоэлектрических кремниевых пластин и подготовке материалов термоядерных реакторов. Например, в проекте Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) вольфрамовые тигли используются для тестирования материалов, обращенных к плазме, и способствуют прорывам в технологиях чистой энергетики.

Хозяйственное значение

Рынок вольфрамовых тиглей является важной частью глобальной цепочки вольфрамовой промышленности. По данным Chinatungsten Online, объем мирового рынка вольфрамовых тиглей составил примерно 1,3 миллиарда долларов США в 2023 году и, как ожидается, достигнет 2 миллиардов долларов США к 2030 году, что обусловлено растущим спросом на полупроводники и увеличением инвестиций в аэрокосмическую промышленность. Высокая добавленная стоимость вольфрамового тигля делает его основным продуктом предприятий по производству вольфрамовой продукции.

Геополитика и ресурсная безопасность

Вольфрам — редкий металл с ограниченными мировыми запасами, и безопасность цепочки поставок напрямую влияет на производство вольфрамовых тиглей. На долю Китая приходится 57% мировых запасов вольфрама и 80% производства, и он является крупным поставщиком вольфрамовых тиглей. В последние годы западные страны активизировали усилия по разработке и переработке вольфрамовых ресурсов, чтобы снизить свою зависимость от Китая. В результате производство и поставки вольфрамовых тиглей оказались в центре геополитических игр.

Поддержка модернизации промышленности и инноваций

Исследования и разработки вольфрамовых тиглей способствовали прогрессу материаловедения, производственных технологий и интеллекта. Например, разработка нановольфрамового порошка и ультрамелкозернистых вольфрамовых тиглей позволила повысить термостойкость и срок службы тиглей, а также адаптировать их к повышенным требованиям полупроводниковой и атомной промышленности. Применение интеллектуальных производственных технологий, таких как оптимизированные с помощью искусственного интеллекта процессы спекания, еще больше снизило производственные затраты и повысило глобальную конкурентоспособность.

Подводя итог, можно сказать, что вольфрамовый тигель является не только промышленной составляющей, но и воплощением технической мощи и ресурсной стратегии страны, а направление его развития тесно связано с глобальной высокотехнологичной промышленностью и энергетическим переходом.

1.4 Глобальное распределение вольфрама и состояние добычи

Ресурсы вольфрама в основном представлены в виде вольфрамита (FeMnWO_4) и шеелита (CaWO_4), с глобальными доказанными запасами около 3,3 млн тонн (в пересчете на металлический вольфрам). Конкретное распределение выглядит следующим образом:

Китай: запасы около 1,9 млн тонн, составляющие 57% от общемировых, в основном распределены в провинциях Хунань (Чалин, Цзысин), Цзянси (Даюй, Ганьчжоу) и Хэнань (Луаньчуань). Содержание вольфрамовой руды в Китае высокое, со средним содержанием WO_3 0,3-0,5%.

Россия: запасы около 250 000 тонн, в основном на Дальнем Востоке и в Сибири, большинство рудников малые и средние.

Вьетнам: С запасами около 100 000 тонн, рудник Nui Phao является крупнейшим в мире вольфрамовым рудником с годовым объемом производства около 6 000 тонн.

Канада: Запасы около 80 000 тонн, сосредоточены в Британской Колумбии, где рудник Кантунг является основным районом добычи.

Другие регионы: добыча вольфрама в Австралии (рудник Кинг-Айленд), Боливии (рудник Ллаллагуа) и Африке (например, в Руанде, Конго) постепенно увеличивается, но запасы и добыча ограничены.

Статус майнинга

В 2023 году мировое производство вольфрамового концентрата (WO_3) составит около 85 000 тонн, снизившись в годовом исчислении на 2%, в основном из-за ужесточения экологических норм и старения рудников. Производство Китая составляет около 68 000 тонн, что составляет 80% от мирового объема; Вьетнам — около 6 000 тонн, а Россия — около 4 000 тонн. Добыча вольфрама сталкивается со следующими проблемами:

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Стресс от окружающей среды

Традиционная открытая и подземная добыча полезных ископаемых наносит большой ущерб земельным и водным ресурсам, а затраты на очистку хвостов высоки. С 2015 года Китай проводит строгую экологическую политику и закрыл несколько сильно загрязняющих окружающую среду шахт, что привело к снижению производства.

Снижение уклона

Среднее содержание основной в мире вольфрамовой руды упало с 1% в 20 веке до 0,3-0,5%, что привело к увеличению затрат на обогащение и аффинаж.

Геополитические риски

Ресурсы вольфрама сосредоточены в небольшом числе стран, а цепочка поставок подвержена политическим и торговым трениям.

Ответ

Чтобы смягчить нехватку ресурсов, важным дополнением стала переработка вольфрамовых отходов. Около 20% мировых поставок вольфрама приходится на переработку, в основном путем химического растворения или механического дробления для извлечения вольфрама из отходов вольфрамовых тиглей, ножей и сплавов. Кроме того, изучаются технологии глубоководной разведки вольфрама и биовыщелачивания, такие как использование микроорганизмов для разложения вольфрамовой руды, которые могут стать новыми источниками для будущего.

1.5 Обзор цепи для промышленности вольфрамовых тиглей

Производственная цепочка вольфрамовых тиглей охватывает множество звеньев от добычи сырья до терминального применения, включая добычу, выплавку, производство, применение и переработку, образуя экономическую систему замкнутого цикла:

Разведка и добыча: добыча и переработка вольфрама

Горнодобывающая промышленность: Вольфрамовая руда добывается открытым или подземным способом, а процесс обогащения включает в себя гравитационную сепарацию, флотацию и магнитную сепарацию для получения вольфрамового концентрата (содержание WO_3 65-70%).

Рафинирование: Вольфрамовый концентрат преобразуется в вольфрамат аммония (АРТ) путем щелочного или кислотного выщелачивания, а затем кальцинируется и восстанавливается водородом для получения вольфрамового порошка высокой чистоты (чистота $\geq 99,95\%$).

Транспортировка: производство вольфрамовых тиглей

Процесс: включая прессование вольфрамового порошка, спекание, механическую обработку

и обработку поверхности, основной технологией является изостатическое прессование, формование и вакуумное спекание.

Продукция: Стандартные и индивидуальные вольфрамовые тигли для полупроводниковых, металлургических и аэрокосмических нужд.

Переработка и сбыт: Приложения и дистрибуция

Области применения: полупроводники (выращивание кристаллов), металлургия (выплавка редкоземельных и драгоценных металлов), аэрокосмическая промышленность (суперсплавы), новая энергетика (фотовольтаика и ядерная энергетика).

Дистрибуция: Через прямые продажи или агентскую дистрибуцию некоторые компании предоставляют индивидуальные услуги.

Переработка и переработка

Процесс переработки: Отходы вольфрамовых тиглей перерабатываются путем химического растворения (для получения вольфрама натрия) или механического дробления для получения вольфрамового порошка или тиглей.

Значимость: Снижение зависимости от ресурсов, уменьшение загрязнения окружающей среды, а на долю переработанного вольфрама приходится 20-25% мировых поставок.

Объем рынка и тенденции

По данным Chinatungsten Online, объем мирового рынка вольфрамовых тиглей составит около 1,35 миллиарда долларов США в 2024 году и, как ожидается, достигнет 2 миллиардов долларов США к 2030 году, при этом среднегодовой темп роста составит около 6,5%. Драйверами роста являются:

Спрос на полупроводники: 5G, искусственный интеллект и электромобили стимулируют спрос на чипы, а рынок монокристаллических кремниевых и вольфрамовых тиглей для сложных полупроводников быстро растет.

Инвестиции в аэрокосмическую промышленность: Глобальный космический бюджет увеличился, а спрос на вольфрамовые тигли для жаропрочных сплавов вырос.

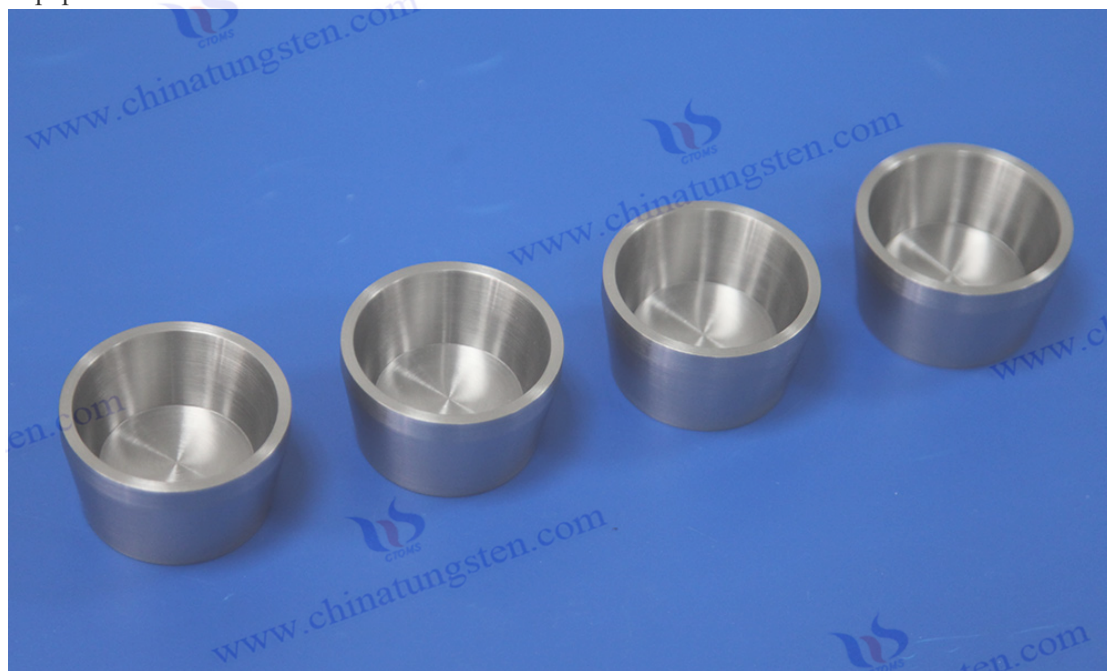
Развитие новой энергетики: производство фотоэлектрических кремниевых пластин и исследования в области ядерного синтеза расширяют возможности применения вольфрамовых тиглей.

Технологические достижения: аддитивное производство и интеллектуальное производство снижают затраты и улучшают возможности персонализации.

Вызов

Производственная цепочка подвержена колебаниям цен на сырье, экологическому давлению и геополитическим рискам. Например, цена на вольфрамовый концентрат в 2023 году вырастет на 15%, что приведет к росту себестоимости тигельного производства. Компании

реагируют на эти вызовы за счет оптимизации процессов и увеличения доли вторичной переработки.



Вольфрамовый тигель CTIA GROUP LTD

Глава 2 Характеристики продукта вольфрамового тигля

Являясь ключевым компонентом высокотемпературной промышленности и научных исследований, характеристики вольфрамового тигля напрямую определяют его производительность и влияние на применение в экстремальных условиях. В этой главе будут всесторонне проанализированы технические характеристики и эксплуатационные преимущества вольфрамовых тиглей с различных аспектов, таких как геометрия и размерные характеристики, качество поверхности, чистота материала, термические свойства, химическая стабильность, механические свойства, другие свойства и паспорт безопасности материала (MSDS) вольфрамовых тиглей.

2.1 Геометрия и размеры вольфрамового тигля

Геометрия и размерные характеристики вольфрамовых тиглей являются основой для их проектирования и применения, что напрямую влияет на их объем, эффективность теплопроводности и структурную стабильность. Различные сценарии применения, такие как выращивание полупроводниковых кристаллов, металлургическое плавление или испытания материалов в аэрокосмической отрасли, предъявляют особые требования к геометрии и размерам тигля. Ниже приведено подробное описание с четырех аспектов: стандартный размер, индивидуальный дизайн, объем и грузоподъемность, а также дизайн формы.

2.1.1 Стандартные размеры (диаметр, толщина стенки, высота)

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Стандартный размер вольфрамовых тиглей обычно разрабатывается в соответствии с отраслевыми спецификациями и потребностями применения для общего промышленного и научного использования. В китайском национальном стандарте GB/T 3459-2022 «Технические требования к вольфрамовым тиглям» четко оговаривается стандартный диапазон размеров. Конкретные параметры размера следующие:

Диаметр: Вольфрамовые тигли обычно имеют диаметр от 10 мм до 500 мм, при этом общие характеристики сосредоточены от 50 мм до 200 мм. Тигли малого диаметра (например, 10-50 мм) в основном используются для небольших лабораторных экспериментов или высокоточного выращивания кристаллов, таких как производство монокристаллического кремния или кристаллов сапфира; Тигли большого диаметра (например, 200-500 мм) подходят для металлургической плавки в промышленных масштабах или рафинирования редкоземельных металлов.

Толщина стенки: Толщина стенки варьируется от 2 мм до 10 мм, в зависимости от назначения и требований к несущей способности тигля. Тонкостенные тигли (2-4 мм) подходят для легких нагрузок и сценариев быстрой теплопередачи, таких как рост кристаллов Чохральского в полупроводниковой промышленности; Толстостенные тигли (6-10 мм) используются для длительной работы в тяжелых условиях и при высоких температурах, например, для плавки жаропрочных сплавов. Конструкция с толщиной стенки должна обеспечивать баланс между эффективностью теплопроводности и механической прочностью, чтобы избежать деформации из-за слишком тонкой концентрации или увеличения затрат на материал из-за слишком большой толщины.

Высота: Диапазон высот составляет от 20 мм до 600 мм, что тесно связано с объемом и применением тигля. Тигли малой высоты (20-100 мм) подходят для мелкого плавления или осаждения тонкой пленки; Тигли большой высоты (300-600 мм) используются для плавления больших объемов или глубоких реакций, таких как рафинирование драгоценных металлов или высокотемпературные эксперименты в атомной промышленности.

2.1.2 Индивидуальный дизайн и нестандартные размеры

С диверсификацией потребностей в промышленных и научных исследованиях растет спрос на индивидуальную конструкцию вольфрамовых тиглей нестандартных размеров. Нестандартные тигли обычно относятся к тиглям со специальными техническими характеристиками диаметром более 500 мм, толщиной стенки менее 2 мм или высотой более 600 мм, которые подходят для высокотехнологичных областей, таких как аэрокосмическая, атомная промышленность или передовые исследования материалов. Например, для испытаний плазменных материалов в термоядерных реакторах может потребоваться вольфрамовые тигли сверхбольшого диаметра (>600 мм) для размещения сложных экспериментальных установок; Полупроводниковая промышленность может нуждаться в ультратонкостенных (<1,5 мм) тиглях для оптимизации теплопередачи и снижения расхода

материала.

Сложность индивидуального проектирования заключается в сложности разработки и обработки пресс-форм. Тигли негабаритного размера требуют специального крупногабаритного изостатического прессования и печей для спекания, что увеличивает производственные затраты; Ультратонкостенные тигли требуют высокой степени точности в процессе формовки и спекания, а незначительное отклонение может привести к растрескиванию или ухудшению эксплуатационных характеристик тигля. Кроме того, допуски на размеры нестандартных тиглей должны контролироваться в пределах $\pm 0,1$ мм для удовлетворения потребностей высокоточных применений.

Согласно отраслевому отчету Chinatungsten Online, рыночный спрос на индивидуальные вольфрамовые тигли увеличился примерно на 20% за последнее десятилетие, в основном за счет аэрокосмической и полупроводниковой промышленности. При проектировании по индивидуальному заказу часто требуется тесное сотрудничество с производителем для определения геометрических параметров, тепловых свойств и требований к механической прочности тигля, а также для моделирования распределения напряжений и теплового расширения тигля при высоких температурах с помощью анализа методом конечных элементов (FEA) для обеспечения осуществимости проекта.

2.1.3 Объем и грузоподъемность

Объем и несущая способность вольфрамового тигля являются ключевыми показателями его функциональности, которые напрямую определяют его применимость в конкретных приложениях. Объем варьируется от нескольких миллилитров до нескольких литров, в зависимости от внутреннего диаметра, высоты и толщины стенок тигля. Например, цилиндрический тигель диаметром 50 мм и высотой 50 мм имеет объем около 98 мл, что делает его пригодным для небольших лабораторных экспериментов; При диаметре 300 мм и высоте 400 мм тигель имеет объем до 28 литров и подходит для плавки металла в промышленных масштабах.

Несущая способность относится к весу расплавленного материала, который тигель может безопасно переносить при высоких температурах, и обычно определяется плотностью материала, толщиной стенки и геометрией. Плотность вольфрама составляет $19,25 \text{ г/см}^3$, что придает тиглю чрезвычайно высокую структурную прочность. Вольфрамовые тигли со стандартной толщиной стенок (4-6 мм) могут перевозить тысячи граммов расплавленных металлов, таких как алюминий, медь или редкоземельные металлы; Толстостенные тигли (8-10 мм) могут нести даже тонны расплавленного золота и подходят для производства суперсплавов.

При проектировании объема и несущей способности следует учитывать следующие факторы: Эффективность теплопроводности: Чрезмерный объем может привести к неравномерному

распределению тепла, что повлияет на однородность расплава.

Стабильность конструкции: чрезмерные требования к несущей способности могут привести к увеличению толщины стенки, что, в свою очередь, увеличивает термическую инерцию и затраты на материалы.

Согласование теплового расширения: Коэффициент теплового расширения тигля и расплава должен быть согласован, чтобы избежать растрескивания из-за термического напряжения.

2.1.4 Фасонные конструкции (цилиндрические, конические, специальной формы)

Форма вольфрамового тигля оказывает важное влияние на его функциональность и сценарии применения. К распространенным формам относятся цилиндрические, конические и профилированные тигли, каждый из которых оптимизирован для конкретных потребностей использования.

Цилиндрический тигель: это наиболее распространенная форма с равномерной толщиной стенки и внутренним диаметром, что делает его подходящим для сценариев, требующих стабильного теплового поля и равномерного нагрева, таких как рост монокристаллического кремния (метод Чохральского) или плавка драгоценных металлов. Преимущества цилиндрических тиглей заключаются в том, что производственный процесс относительно прост, распределение термического напряжения равномерно, и они подходят для стандартизированного производства. Недостатком является то, что заливать расплав может быть неудобно и он менее приспособляется к сложным экспериментальным установкам.

Конический тигель: нижний диаметр конического тигля меньше верхнего, что облегчает заливку и сбор расплавленного материала и обычно используется при рафинировании редкоземельных металлов или драгоценных металлов в металлургической промышленности. Коническая конструкция уменьшает количество остатков расплава на стенках тигля и улучшает использование материала. Однако распределение теплового поля в коническом тигле не такое равномерное, как в цилиндрическом, и для компенсации может потребоваться дополнительная система нагрева.

Конформные тигли: Конформные тигли имеют овальные, многоугольные или другие нестандартные формы и часто изготавливаются по индивидуальному заказу для конкретных экспериментов или промышленного применения. Например, для испытаний сопел ракетных двигателей в аэрокосмической отрасли может потребоваться эллиптический тигель для размещения испытательного образца со сложной геометрией; Для экспериментов с плазмой в атомной промышленности могут потребоваться многоугольные тигли, соответствующие форме реакционного устройства. Тигли специальной формы сложны в производстве и требуют передовых методов формования (таких как прядение или 3D-печать) и прецизионного проектирования пресс-форм.

При проектировании формы учитывается тепловое расширение, распределение напряжений

и производственные затраты. Например, тепловое расширение цилиндрических тиглей относительно равномерно, что подходит для высокотемпературного циклирования; Конический тигель может создавать локальные концентрации напряжений в процессе заливки, а структурная стабильность должна быть повышена за счет оптимизации толщины стенки. Распределение напряжений в тиглях специальной формы является сложным, и проверка конструкции обычно выполняется с помощью анализа методом конечных элементов.

2.2 Качество поверхности вольфрамового тигля

Качество поверхности является важным показателем производительности вольфрамового тигля, который напрямую влияет на его коррозионную стойкость, адгезию к расплаву и срок службы. Поверхность вольфрамовых тиглей обычно должна быть отполирована, отшлифована или покрыта в соответствии со строгими требованиями различных сценариев применения. Нижеследующее подробно обсуждается с четырех аспектов: полировка и механическая обработка, стандарты шероховатости поверхности, обнаружение дефектов и контроль их, а также нанесение и модификация поверхности.

2.2.1 Полировка, шлифовка и механическая обработка поверхностей

Процесс обработки поверхности вольфрамового тигля включает в себя токарную обработку, фрезерование, шлифовку и полировку, каждая из которых нацелена на различные требования к качеству поверхности. Токарная и фрезерная обработка используются для предварительного формования, удаления шероховатого слоя на поверхности сырого тела; Шлифование еще больше улучшает плоскостность поверхности и уменьшает микроскопические дефекты; Полировка используется для достижения зеркального эффекта, что значительно снижает шероховатость поверхности.

Токарная и фрезерная обработка: точность обработки до $\pm 0,05$ мм осуществляется обрабатывающим центром с числовым программным управлением (ЧПУ). Токарная обработка подходит для обработки наружных стенок цилиндрических тиглей, в то время как фрезерование используется для формовки внутренней стенки или дна сложных форм. Инструменты из карбида вольфрама используются в процессе обработки, чтобы справиться с высокой твердостью вольфрама (8-9 по шкале Мооса).

Шлифование: Для шлифования используются алмазные шлифовальные круги или керамические шлифовальные круги, которые могут снизить шероховатость поверхности до Ra 0,8-1,6 мкм. Процесс шлифования требует строгого контроля расхода СОЖ, чтобы избежать образования микротрещин, вызванных термическими нагрузками.

Полировка: Полировка делится на механическую полировку и химическую полировку. При механической полировке используются полирующие средства наноуровня, с помощью которых можно достичь зеркального эффекта Ra <0,4 мкм; Химическая полировка еще

больше улучшает гладкость за счет травления поверхности кислотным раствором, таким как смесь азотной кислоты и фтористоводородной кислоты. Полированная поверхность значительно снижает адгезию расплавов, таких как кремний или алюминий, продлевая срок службы тигля.

Выбор процесса полировки и шлифовки зависит от области применения. Полупроводниковая промышленность требует зеркальной полировки для обеспечения чистоты роста кристаллов; В металлургической промышленности для контроля затрат может потребоваться только шлифовка поверхностей. Согласно техническому руководству Chinatungsten Online, срок службы полированных вольфрамовых тиглей в среднем на 15-20% больше, чем у неполированных тиглей.

2.2.2 Нормы шероховатости поверхности (Ra, Rz)

Шероховатость поверхности является основным показателем качества поверхности вольфрамовых тиглей, которое обычно выражается в Ra (средняя арифметическая шероховатость) и Rz (максимальная высота). Ra отражает среднее значение микроскопических флуктуаций поверхности, а Rz представляет расстояние между самой высокой и самой низкой точками поверхности. Отраслевой стандарт содержит следующие требования к шероховатости поверхности для различных сценариев применения:

Полупроводниковая промышленность: $Ra < 0,4$ мкм, $Rz < 2,0$ мкм, чтобы гарантировать отсутствие примесей во время роста кристаллов. Зеркальная полировка – это необходимый процесс, который необходимо использовать с помощью лазерного интерферометра для осмотра поверхности.

Металлургическая промышленность: Ra 0,8-1,6 мкм, Rz 4,0-8,0 мкм, шлифовка или средняя полировка могут удовлетворить спрос, стоимость относительно невысока.

Аэрокосмическая и атомная промышленность: Ra 0,4-0,8 мкм, Rz 2,0-4,0 мкм, баланс качества поверхности и высокотемпературных механических свойств.

Шероховатость поверхности обычно измеряется с помощью контактного профилографа или бесконтактного лазерного микроскопа для обеспечения точности измерения $\pm 0,01$ мкм. Чрезмерная шероховатость поверхности может привести к адгезии расплава или концентрации локальных напряжений, что приведет к сокращению срока службы тигля; Слишком низкая шероховатость может увеличить затраты на обработку и должна быть оптимизирована в соответствии со сценарием применения.

2.2.3 Обнаружение и контроль поверхностных дефектов

Поверхностные дефекты (например, трещины, пористость, включения) оказывают существенное влияние на высокотемпературные характеристики и срок службы

вольфрамовых тиглей. К распространенным методам обнаружения дефектов относятся:

Ультразвуковой контроль: обнаружение внутренних и поверхностных дефектов методом ультразвукового отражения для толстостенных тиглей. Чувствительность обнаружения может достигать 0,1 мм.

Рентгеновский контроль: используется для обнаружения пористости и включений внутри тиглей, особенно для больших тиглей. Рентгеновская компьютерная томография (КТ) позволяет получить трехмерную карту распределения дефектов.

Визуальный контроль поверхности: в сочетании с оптической микроскопией или сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) он обнаруживает поверхностные микротрещины и аномалии шероховатости.

Ключом к контролю дефектов является оптимизация процесса подготовки. Например, контроль атмосферы в процессе спекания снижает пористость; Управление подводом СОЖ и выбор инструмента при обработке позволяют избежать образования трещин на поверхности. Согласно отчету об испытаниях CTIA GROUP LTD, проходимость вольфрамового тигля может быть увеличена до более чем 98% за счет строгого контроля дефектов.

2.2.4 Покрытие и модификация поверхности

Чтобы еще больше повысить стойкость вольфрамовых тиглей к окислению и истиранию, покрытие может быть нанесено на поверхность или модифицировано. Распространенные методы обработки поверхности включают:

Антиокислительные покрытия: такие как покрытия из оксида алюминия (Al_2O_3), силицида (SiC) или диоксида циркония (ZrO_2), наносимые методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) или плазменного напыления. Эти покрытия образуют защитный слой при высоких температурах, который предотвращает реакцию вольфрама с кислородом, продлевая срок службы тигля в окислительной атмосфере.

Износостойкие покрытия, такие как покрытия из карбида вольфрама (www.tungsten-carbide-powder.com) или нитрида титана (TiN), наносятся методом физического осаждения из газовой фазы (PVD) для повышения твердости поверхности и износостойкости, что делает их пригодными для длительной работы при высоких температурах [27].

Модификация поверхности: ионная имплантация (например, имплантация азотом или углеродом) может изменить кристаллическую структуру поверхности, улучшить твердость и коррозионную стойкость; Азотирование или науглероживание могут повысить стойкость поверхности к тепловому удару.

Процесс нанесения покрытия и модификации должен быть выбран в соответствии с

фактическими условиями, в которых будет использоваться тигель. Например, полупроводниковая промышленность обычно избегает использования покрытий для предотвращения загрязнения; Аэрокосмическая промышленность, как правило, использует антиокислительные покрытия для работы в сложных атмосферах.

2.3 Чистота материала вольфрамового тигля

Чистота материала является основой производительности вольфрамового тигля, что напрямую влияет на его высокую температурную стабильность, противообрастающую способность и механическую прочность. Вольфрамовые тигли обычно изготавливаются с использованием вольфрама высокой чистоты (www.tungsten.com.cn), а требования к чистоте составляют $\geq 99,95\%$. Ниже приведен подробный анализ с трех аспектов: характеристики вольфрама высокой чистоты, анализ примесных элементов и влияние чистоты на высокотемпературные характеристики.

2.3.1 Вольфрам высокой чистоты

Вольфрам высокой чистоты относится к металлическим материалам с содержанием вольфрама $\geq 99,95\%$, которые получают с помощью многоступенчатых процессов очистки, таких как прокаливание паравольфрамата аммония (www.ammonium-paratungstate.com) и восстановление водорода). Вольфрам высокой чистоты обладает следующими ключевыми свойствами:

Сверхвысокая температура плавления: 3410°C , самая высокая из всех металлов, подходит для экстремально высоких температур.

Высокая плотность: $19,25 \text{ г/см}^3$, что придает тиглю отличную механическую прочность и устойчивость к деформации.

Низкое давление пара: почти нелетучее ниже 3000°C , снижает потери материала при высоких температурах.

Отличная химическая стабильность: инертен к большинству химических веществ в инертной атмосфере, подходит для приготовления материалов высокой чистоты.

Получение вольфрама высокой чистоты требует строгого контроля качества сырья и производственных условий. Согласно техническому отчету Chinatungsten Online, себестоимость производства вольфрамового порошка высокой чистоты составляет около 30%-40% от общей стоимости вольфрамового тигля, что является ключевым фактором, влияющим на цену вольфрамового тигля.

2.3.2 Анализ примесных элементов

Примесные элементы в вольфрамовых тиглях включают углерод, кислород, железо, молибден, азот и т. д. и обычно измеряются в частях на миллион (ppm). Для определения содержания примесей в основном используются следующие методы:

Рентгенофлуоресцентный спектрометр (РФА): используется для быстрого обнаружения основных примесных элементов с точностью до ± 1 ppm.

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS): для анализа микроэлементов с пределом обнаружения до 0,01 ppm.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) в сочетании с энергетической спектроскопией (ЭДС): используется для определения распределения примесей и анализа элементного обогащения на границах зерен.

В соответствии со стандартом ASTM E1447-09 вольфрамовые тигли должны содержать примеси в следующих диапазонах:

углерод	<50 стр/мин
кислород	<100 стр/мин
железо	<20 стр/мин
молибден	<50 стр/мин
азот	<10 стр/мин

Чрезмерно высокий уровень примесей может привести к ослаблению границ зерна, ухудшению характеристик теплового удара или летучему загрязнению при высоких температурах.

2.3.3 Влияние чистоты на высокотемпературные характеристики

Чистота материала оказывает следующие специфические влияния на высокотемпературные характеристики вольфрамового тигля:

Высокая температурная стабильность: границы зерен вольфрама высокой чистоты чище, что снижает вероятность проскальзывания и ползучести границ зерен при высоких температурах. Вольфрамовые тигли с чистотой $\geq 99,99\%$ могут стабильно работать при температуре выше 3000°C , в то время как тигли с чистотой $99,9\%$ могут подвергаться микроскопической деформации при температуре 2800°C .

Устойчивость к тепловому удару: Примеси, такие как кислород или углерод, могут образовывать хрупкие фазы на границах зерен, что приводит к образованию трещин от теплового удара. Чем выше чистота, тем сильнее устойчивость к тепловому удару, что подходит для сценариев быстрого повышения и понижения температуры.

Устойчивость к загрязнению: Примеси в вольфраме низкой чистоты (например, железе или молибдене) могут улетучиваться при высоких температурах, загрязняя расплав и влияя на рост кристаллов или чистоту сплава. Вольфрамовые тигли высокой чистоты сводят к минимуму риск загрязнения.

2.4 Термические свойства вольфрамового тигля

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Термические свойства вольфрамового тигля являются его основными преимуществами в высокотемпературных средах, которые определяют его характеристики с точки зрения теплопроводности, термической стабильности и согласования теплового расширения. Ниже приведен подробный анализ с четырех аспектов: высокая температурная стабильность, устойчивость к тепловому удару, характеристики теплопроводности и теплового излучения, а также согласование теплового расширения.

2.4.1 Устойчивость вольфрамового тигля к высоким температурам

Высокая температурная стабильность вольфрамовых тиглей обусловлена сверхвысокой температурой плавления (3410°C) и низким давлением паров вольфрама. Вольфрамовые тигли при температуре ниже 3000°C практически не испаряются или не деформируются, что делает их пригодными для работы в условиях экстремально высоких температур, таких как испытания плазменных материалов в термоядерных реакторах или плавка жаропрочных сплавов.

Ключ к высокотемпературной стабильности лежит в оптимизации микроструктуры материала. Вольфрамовый тигель с мелкозернистой структурой (размер зерна $< 10\text{ мкм}$) может уменьшить скольжение границы зерна и улучшить сопротивление ползучести. Высокая плотность (теоретическая плотность $>98\%$) может снизить локальную концентрацию напряжения, вызванную устьицами.

2.4.2 Термостойкость вольфрамового тигля к тепловому удару и термоусталостная долговечность

Устойчивость к тепловому удару относится к способности вольфрамового тигля противостоять растрескиванию при быстрых изменениях температуры. Низкий коэффициент теплового расширения вольфрама ($4,5 \times 10^{-6}/\text{K}$) и высокая теплопроводность ($174\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) обеспечивают ему превосходную стойкость к тепловому удару, но его хрупкость при комнатной температуре может привести к распространению трещин.

Устойчивость к тепловому удару обычно проверяется с помощью водяной закалки или лазерного импульсного нагрева. Например, вольфрамовый тигель быстро охлаждается с 2000°C до комнатной температуры, чтобы наблюдать за образованием трещин. Мелкозернистые вольфрамовые тигли высокой чистоты могут выдерживать перепады температур $>1000^{\circ}\text{C/s}$ без растрескивания, в то время как предел обычных тиглей составляет около 500°C/s .

Термическая усталостная долговечность относится к структурной стабильности тигля после нескольких термических циклов. Термические усталостные трещины обычно возникают из-за поверхностных дефектов или ослабления границ зерен. Благодаря полировке поверхности и измельчению зерна термоусталостная долговечность может быть увеличена более чем на 50%.

2.4.3 Теплопроводность и характеристики теплового излучения вольфрамового тигля

Вольфрам имеет теплопроводность 174 Вт/(м·К) и сохраняет высокую теплопроводность при высоких температурах, что делает его пригодным для сценариев, требующих быстрого теплового отклика, таких как рост монокристаллического кремния или осаждение тонких пленок. Теплопроводность немного уменьшается с повышением температуры и составляет около 120 Вт/(м·К) при 2000°C.

Свойства теплового излучения определяются излучательной способностью поверхности. Поверхностная излучательная способность неполированного вольфрамового тигля составляет 0,3-0,4, которая может быть снижена до 0,1-0,2 после полировки, снижая потери теплового излучения. При высоких температурах (> 2000 °C) тепловое излучение становится основным путем потери тепла, и тепловую эффективность необходимо оптимизировать за счет конструкции тигля, например, путем добавления отражающих покрытий.

2.4.4 Согласование теплового расширения вольфрамового тигля

Коэффициент теплового расширения вольфрама составляет $4,5 \times 10^{-6}/K$, что значительно ниже, чем у большинства расплавов (например, кремния: $2,6 \times 10^{-5}/K$; Алюминий: $2,3 \times 10^{-5}/K$). Несоответствие теплового расширения может привести к термическому напряжению на границе раздела тигель-расплав, что приведет к образованию трещин или отслаиванию.

Для улучшения согласования теплового расширения могут быть приняты следующие меры:
Геометрическая оптимизация: Анализ методом конечных элементов используется для расчета толщины стенки тигля и кривизны дна для рассеивания термических напряжений.
Буферный слой: Буферный слой из графита или диоксида циркония наносится на внутреннюю стенку тигля для смягчения разницы в тепловом расширении.
Процесс предварительного нагрева: медленный предварительный нагрев тигля и расплава перед нагревом для снижения напряжения, вызванного разницей температур.

2.5 Химическая стабильность вольфрамового тигля

Химическая стабильность вольфрамовых тиглей является важным преимуществом в коррозионных средах и высокотемпературных реакциях, определяя его совместимость с расплавами, химическими веществами и атмосферой. Ниже подробно рассматриваются три аспекта: кислотная и щелочная коррозионная стойкость, инертность при высоких температурах и способность к защите от загрязнений, а также совместимость с расплавленными металлами и сплавами.

2.5.1 Кислотная и щелочная коррозионная стойкость вольфрамового тигля

Вольфрам обладает отличной коррозионной стойкостью к большинству кислот и оснований, особенно в нормальных и нейтральных или слабокислых средах. Удельная коррозионная стойкость следующая:

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Кислая среда: вольфрамовые тигли устойчивы к соляной, серной и фосфорной кислоте, но медленно растворяются в сильных окисляющих кислотах, таких как концентрированная азотная кислота или царская водка. Эксперименты показывают, что скорость коррозии вольфрамового тигля чистотой 99,95% в 10% растворе серной кислоты (25°C) < 0,01 мм/год.

Щелочная среда: Вольфрам относительно стабилен в сильных щелочных растворах (таких как гидроксид натрия), но реакция окисления может происходить в щелочных расплавах при высоких температурах (>500°C), и следует избегать прямого контакта.

Нейтральная среда: вольфрамовый тигель практически не подвержен коррозии в нейтральных растворах (таких как вода или раствор соли), что подходит для химической очистки высокой чистоты в химической промышленности.

Стойкость к кислотной и щелочной коррозии обычно проверяется методом погружения или электрохимической коррозии, чтобы убедиться в отсутствии значительной потери массы или морфологических изменений на поверхности тигля.

2.5.2 Вольфрамовый тигель, высокотемпературная инертность и способность к защите от загрязнения

Вольфрамовые тигли чрезвычайно химически инертны в инертной атмосфере (например, аргон, гелий) или вакууме, что может эффективно предотвращать загрязнение и подходит для получения материалов высокой чистоты, таких как монокристаллический кремний, сапфир или сложные полупроводники (GaAs, GaN).

Ключ к высокотемпературной инертности заключается в низком давлении пара вольфрама и стабильной кристаллической структуре. При температуре ниже 3000 °C вольфрам практически нелетуч, что снижает загрязнение расплава материалом тигля. Напротив, примеси в тиглях низкой чистоты, такие как железо или углерод, могут испаряться при высоких температурах, что приводит к кристаллическим дефектам или отклонениям в составе сплава.

Испытание на устойчивость к загрязнению обычно проводится путем нагрева тигля в вакуумной среде для анализа химического состава летучих веществ.

2.5.3 Совместимость вольфрамового тигля с расплавленным металлом и сплавом

Вольфрамовые тигли обладают хорошей совместимостью с большинством расплавленных металлов и сплавов, но могут вступать в реакцию с некоторыми химически активными металлами. Конкретный анализ совместимости выглядит следующим образом:

Инертные металлы: вольфрамовые тигли хорошо совместимы с расплавленным алюминием,

медью, золотом, серебром и другими инертными металлами, без явной химической реакции или растворения, и подходят для рафинирования драгоценных металлов.

Активные металлы: вольфрам может вступать в реакцию на границе раздела с расплавленным титаном, цирконием, гафнием и другими активными металлами с образованием хрупких соединений (таких как титан вольфрам). Чтобы избежать реакций, на внутреннюю стенку тигля может быть нанесен защитный слой из графита или диоксида циркония.

Сплав: Вольфрамовый тигель можно использовать для плавки жаропрочных сплавов (таких как сплавы на основе никеля и сплавы на основе кобальта), но время плавления и атмосферу необходимо контролировать, чтобы избежать растворения следов, вызванного длительным контактом.

Для тестирования на совместимость обычно используются эксперименты по высокотемпературному плавлению в сочетании со сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) и рентгеновской дифракцией (XRD) для анализа продуктов межфазных реакций.

2.6 Механические свойства вольфрамового тигля

Механические свойства вольфрамового тигля определяют его структурную целостность и срок службы в условиях высоких температур и сложных нагрузок. Ниже приведен подробный анализ по четырем аспектам: устойчивость к деформации при высоких температурах, устойчивость к распространению трещин, структурная стабильность при циркуляции тепла, а также ударопрочность и вибростойкость.

2.6.1 Устойчивость вольфрамового тигля к деформации при высоких температурах

Вольфрам сохраняет высокую прочность и жесткость при высоких температурах, а его устойчивость к деформации превосходит устойчивость других огнеупоров, таких как графит или глинозем. При 2000°C предел текучести вольфрама еще может достигать 100-150 МПа, что значительно выше, чем у графита (около 20 МПа).

Ключ к устойчивости к деформации при высоких температурах кроется в размере и плотности зерен. Вольфрамовые тигли с мелкими зёрнами (<10 мкм) и высокой плотностью (>98%) эффективны против ползучести и пластической деформации. Данные испытаний Chinatungsten Online показывают, что скорость деформации вольфрамового тигля можно контролировать ниже 0,1% при температуре 2500°C за счет оптимизации процесса спекания.

2.6.2 Сопротивление распространению трещин в вольфрамовом тигле

Хрупкость вольфрама делает его склонным к распространению трещин при комнатной температуре, но он проявляет некоторую ударную вязкость при высокой температуре (>1000°C). Устойчивость к распространению трещин может быть улучшена за счет:

Измельчение зернистости: мелкозернистая структура может рассеивать энергию трещин и снижать скорость роста трещин.

Упрочнение поверхности: например, азотирование или ионная имплантация для повышения твердости поверхности и трещиностойкости.

Контроль дефектов: удаление пористости и включений с помощью неразрушающего контроля (например, ультразвукового или рентгеновского) для уменьшения образования трещин.

При испытании на распространение трещин обычно используется испытание на трехточечный изгиб или вязкость разрушения.

2.6.3 Структурная стабильность вольфрамового тигля при циркуляционном нагреве

Циркуляционный нагрев может привести к образованию термических усталостных трещин и деградации микроструктуры, что влияет на структурную стабильность тигля. К влияющим факторам относятся:

Термическое напряжение: Термическое напряжение, вызванное быстрым нарастанием и падением температуры, может привести к образованию трещин.

Ослабление границ зерна: Длительная эксплуатация при высоких температурах может привести к проскальзыванию границы зерна или обогащению примесей.

Поверхностные повреждения: поверхностное окисление или эрозия расплава могут ускорить деградацию конструкции.

Структурная стабильность может быть значительно улучшена за счет оптимизации процесса спекания (например, многоступенчатого спекания) и обработки поверхности (например, антиокислительных покрытий).

2.6.4 Ударопрочность и вибростойкость вольфрамового тигля

Вольфрамовый тигель обладает слабой устойчивостью к ударам и вибрации, особенно при комнатной температуре, и подвержен образованию трещин из-за механических ударов или вибрации. При высоких температурах ($>1000^{\circ}\text{C}$) ударная вязкость вольфрама немного улучшается, но сильных ударов все же следует избегать.

Ударопрочность обычно проверяется с помощью испытания падающим грузом или испытания вибростендом. В практическом использовании требуются амортизирующие кронштейны и защитная упаковка для снижения риска удара при транспортировке и эксплуатации.

2.7 Другие характеристики вольфрамового тигля

Помимо термических, химических и механических свойств, вольфрамовые тигли также обладают некоторыми особыми свойствами, которые подходят для конкретных сценариев

применения. Нижеследующее анализируется с трех аспектов: высокотемпературные электрические свойства, противоизносная стойкость и стойкость к истиранию, а также антирадиационные свойства.

2.7.1 Высокотемпературные электрические свойства вольфрамового тигля

Вольфрам обладает стабильным удельным сопротивлением при высоких температурах, что делает его пригодным в качестве электрического нагревательного элемента или высокотемпературного электрода (<http://tungsten.com.cn/chinese/tungsten-electrodes.html>). При температуре 2000°C удельное сопротивление вольфрама составляет 50-60 мОм·см, что всего в 5 раз превышает комнатную температуру, и демонстрирует отличную электрическую стабильность.

Области применения высокотемпературных электрических свойств включают:

Дуговое плавление: вольфрамовые тигли могут использоваться в качестве электродов, выдерживающих высокие токи и высокие тепловые нагрузки.

Резистивный нагрев: вольфрамовый тигель может нагреваться непосредственно электричеством, что упрощает конструкцию системы нагрева.

2.7.2 Износ вольфрамового тигля и износостойкость

Вольфрам имеет твердость 8-9 по шкале Мооса, высокую твердость поверхности, отличную износостойкость, подходит для длительной работы при высоких температурах. Для испытания на стойкость к истиранию обычно используется испытание на трение и износ, которое имитирует контакт тигля с расплавленным веществом или инструментом. Повышенная износостойкость может быть достигнута за счет поверхностных покрытий, таких как карбид вольфрама или нитрид титана, или за счет ионной имплантации. Эти обработки увеличивают твердость поверхности до HV 2000 и еще больше продлевают срок службы тигля.

2.7.3 Радиационная стойкость вольфрамовых тиглей (применение в атомной промышленности)

Вольфрам обладает высокой поглощающей способностью для нейтронов и гамма-лучей, что делает его пригодным для высокотемпературных компонентов в ядерных реакторах и термоядерных установках. Радиационная стойкость вольфрама обусловлена его высокой плотностью и высоким атомным номером, которые могут эффективно экранировать от лучистой энергии.

В атомной промышленности вольфрамовые тигли обычно используются для испытаний плазменных материалов и изготовления высокотемпературных компонентов. Данные испытаний показали, что вольфрамовый тигель остался конструктивно неповрежденным под действием гамма-излучения 10⁶ Гр без явных повреждений решетки.

2.8 Вольфрамовый тигель MSDS от CTIA GROUP LTD

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Паспорт безопасности (MSDS) материалов для вольфрамовых тиглей, предоставленный CTIA GROUP LTD (<http://cn.ctia.group>), содержит подробный химический состав, физические свойства, рекомендации по технике безопасности и меры по аварийной обработке продукции. Основное содержание MSDS включает в себя:

Часть I: Наименование продукта

Название: Вольфрамовый тигель

Номер CAS: 7440-33-7

Часть II: Композиция/информация о композиции

Основное содержание $W \geq 99.95\%$

Общее содержание примесей $\leq 0.05\%$

Часть III: Обзор опасностей

Опасность для здоровья: Этот продукт не вызывает раздражения у глаз и кожи.

Взрывоопасность: Этот продукт негорюч и не вызывает раздражения.

Часть IV: Меры первой помощи

Контакт кожа к коже: снимите загрязненную одежду и промойте большим количеством проточной воды.

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

Ингаляция: Уберите с места происшествия на свежий воздух. Если вы испытываете трудности с дыханием, дайте кислород. Лечение.

Применение: Пейте много теплой воды, чтобы вызвать рвоту. Лечение.

Часть V: Меры противопожарной защиты

Вредные продукты сгорания: Естественные продукты разложения неизвестны.

Метод тушения пожара: Пожарные должны носить противогазы и пожарные костюмы для тушения огня в наветренном направлении. Огнетушащее вещество: сухой кожаный порошок, песок.

Часть 6: Экстренное обращение с разливами

Неотложная помощь: Изолируйте загрязненную утечкой зону и ограничьте доступ. Перекройте источник огня. Сотрудникам экстренных служб рекомендуется носить респираторы (полнолицевые маски) и защитную одежду. Избегайте попадания пыли, тщательно подметите его, положите в пакет и перенесите в безопасное место. Если имеется большое количество протекания, накройте его пластиковой тканью или холстом. Собирайте и перерабатывайте или транспортируйте на свалку отходов для утилизации.

Часть VII: Обработка, обработка и хранение

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Меры предосторожности при эксплуатации: Операторы должны быть специально обучены и строго следовать рабочим процедурам. Операторам рекомендуется носить самовсасывающие фильтрующие пылезащитные маски, защитные очки от химических веществ, комбинезоны для защиты от отравления и резиновые перчатки. Держите подальше от огня и источников тепла, а также курение на рабочем месте категорически запрещено. Используйте взрывозащищенные вентиляционные системы и оборудование. Избегайте образования пыли. Избегайте контакта с окислителями и галогенами. При погрузочно-разгрузочных работах необходимо загружать и выгружать налегке, чтобы не допустить повреждения упаковки и контейнеров. Комплектуются соответствующими сортами и количествами противопожарного оборудования и оборудования для устранения утечек аварийного оборудования. Пустые контейнеры могут оставлять вредные вещества.

Меры предосторожности при хранении: Хранить в прохладном, проветриваемом складе. Держите вдали от огня и источников тепла. Его следует хранить отдельно от окислителей и галогенов, и не следует смешивать. Оснащается соответствующим разнообразием и количеством противопожарного оборудования. Площадка для хранения должна быть оборудована подходящими материалами для локализации разлива.

Часть VIII: Контроль воздействия/Индивидуальная защита

ПДК в Китае (мг/м³): 6

ПДК СССР (мг/м³): 6

TLVTN: ACGIH 1 мг/м³

Краткая стоимость: ACGIH 3 мг/м³

Метод мониторинга: метод спектролюминесценции тиоцианида калия-хлорида титана

Инженерный контроль: производственный процесс проходит без пыли и полностью проветривается.

Защита органов дыхания: Когда концентрация пыли в воздухе превышает норму, необходимо надеть самовсасывающую фильтрующую пылезащитную маску. В случае экстренной эвакуации следует надеть дыхательные аппараты с воздухом.

Защита глаз: Носите очки химической защиты.

Защита тела: Носите комбинезон с защитой от отравления.

Защита рук: Надевайте резиновые перчатки.

Часть IX: Физико-химические свойства

Основной ингредиент: Чистый

Внешний вид и свойства: цельный, ярко-белый металл

Температура плавления (°C): н/д

Температура кипения (°C): Н/Д

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

Плотность пара (воздух = 1): Нет данных

Давление насыщенного пара (кПа): нет данных

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Теплота сгорания (кДж/моль): нет данных
Критическая температура (°C): Данные отсутствуют
Критическое давление (МПа): Данные отсутствуют
Логарифм коэффициента разбавления воды: нет данных
Температура вспышки (°C): Данные отсутствуют
Температура воспламенения (°C): Нет данных
Предел взрываемости % (В/В): Нет данных
Нижний предел взрываемости % (V/V): Нет данных
Растворимость: растворим в азотной кислоте, фтористоводородной кислоте
Основное применение: используется для изготовления защитных деталей, валов дротиков из вольфрамового сплава, шариков из вольфрамового сплава и т. Д.

Часть X: Стабильность и реакционная способность

Запрещенные вещества: сильная кислота и щелочь.

Часть 11:

Острая токсичность: данные отсутствуют

LC50: Нет данных

Часть XII: Экологические данные

Нет данных по данному разделу

Часть XIII: Утилизация

Метод утилизации отходов: Перед утилизацией ознакомьтесь с соответствующими национальными и местными законами и нормативными актами. По возможности утилизируйте.

Часть XIV: Информация о доставке

Категория упаковки: Z01

Меры предосторожности при транспортировке: Упаковка должна быть полной при отправке, а погрузка должна быть надежной. Во время транспортировки необходимо следить за тем, чтобы контейнер не протекал, не сложился, не упал и не повредился. Категорически запрещается смешивать с окислителями, галогенами, пищевыми химикатами и т.д. Во время транспортировки он должен быть защищен от воздействия солнца, дождя и высокой температуры. Транспортные средства должны быть тщательно очищены после транспортировки.

Часть 15: Информация о поставщиках

Поставщик: CTIA GROUP LTD

Тел.: +86 0592-5129696/5129595

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и



Вольфрамовые тигли CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of $\geq 99.95\%$ minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

Rare earth metal melting: Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

Vacuum coating: Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

High-temperature furnaces: Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C.

Chemical synthesis: Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

Metal smelting and refining: Used for melting and refining high-purity metals.

Sapphire crystal growth: Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between 2000–2500°C.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Глава 3 Процесс подготовки и технология вольфрамового тигля

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Подготовка вольфрамового тигля представляет собой сложный процесс, включающий подготовку сырья, порошковую металлургию, формование, спекание, механическую обработку, постобработку и контроль качества. Технические детали каждого звена напрямую влияют на производительность и стоимость тигля. В этой главе будет подробно рассмотрен технологический процесс, требования к оборудованию, стратегии оптимизации каждого звена, а также последние технологические достижения крупнейших мировых компаний по производству вольфрама.

3.1 Подготовка вольфрамового тигельного сырья

Качество сырья является основой производительности вольфрамового тигля, что напрямую определяет его чистоту, микроструктуру и высокотемпературные характеристики. Ниже приведено подробное обсуждение четырех аспектов: рафинирование вольфрамовой руды, характеристики вольфрамового порошка, контроль размера частиц и контроль качества.

3.1.1 Рафинирование вольфрамовой руды и производство вольфрамового порошка высокой чистоты

Сырье для вольфрамового тигля в основном получают из вольфрамита и шеелита (www.tungsten.com.cn). Процесс рафинирования включает в себя дробление руды, флотацию, гравитационную сепарацию, химическое выщелачивание и подготовку паравольфрамата аммония (АРТ). АРТ производит вольфрамовый порошок высокой чистоты путем восстановления водорода, а технологический процесс выглядит следующим образом: прокаливание АРТ (500-800 °C) → восстановление водорода (800-1000 °C) → просеивание порошка.

Чистота вольфрамового порошка высокой чистоты обычно должна достигать более 99,95%, а для некоторых высокотехнологичных применений (например, полупроводников) требуется 99,999% (5N). Контроль атмосферы (чистота водорода > 99,999%) и градиент температуры ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) во время снижения АРТ являются ключом к достижению высокой чистоты. Редукционные печи обычно проектируются с многозонным контролем температуры, а материалом труб печи является молибден или кварц высокой чистоты, чтобы избежать загрязнения примесями.

К числу проблем, связанных с процессом нефтепереработки, относятся энергопотребление и экологические проблемы. Традиционный гидрометаллургический процесс требует использования большого количества кислотных и щелочных реагентов, из которых образуются отходящие жидкие и отходящие газы. Технология «зеленой» металлургии Chinatungsten Online снижает выбросы отработанных жидкостей до 0,1 м³/т за счет замкнутого цикла очистки воды и каталитической конверсии выхлопных газов в соответствии со стандартом ISO 14001 [67].

3.1.2 Требования к химическим и физическим характеристикам вольфрамового

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

порошка

К химическим свойствам вольфрамового порошка относятся низкое содержание кислорода (<200 ppm), низкое содержание примесей (железо <50 ppm, никеля <20 ppm, углерода <30 ppm) и высокая чистота ($>99,95\%$). Физические свойства включают размер частиц, топографию, текучесть и кажущуюся плотность. Диапазон размеров частиц обычно составляет от 1 мкм до 10 мкм, а топография предпочтительно близка к сферической для улучшения плотности и печательных свойств порошка. Расход измеряется с помощью холловского измерителя скорости, а расход высококачественного вольфрамового порошка должен быть менее 20 с/50 г. Кажущаяся плотность (около 4-6 г/см³) отражает упаковочные характеристики порошка и напрямую влияет на плотность формованного корпуса.

Технические характеристики Chinatungsten Online требуют, чтобы содержание кислорода в вольфрамовом порошке контролировалось ниже 100 ppm с помощью высокотемпературного восстановления водорода, а примеси железа удалялись с помощью магнитной сепарации и травления. Плазменная сфероидизация была использована для оптимизации неправильной формы порошка до почти сферической формы, со скоростью шаровидизации более 90% [68]. Международные компании, такие как австрийская Plansee Group, контролируют распределение частиц вольфрамового порошка по размерам на $\pm 0,5$ мкм с помощью технологии классификации воздушным потоком для улучшения однородности микроструктуры тигля.

3.1.3 Контроль гранулометрического состава и морфологии гранул вольфрамового порошка

Гранулометрический состав вольфрамового порошка напрямую влияет на плотность, механические свойства и усадку тигля при спекании. Узкое распределение частиц по размерам ($D_{90}/D_{10} < 2$) улучшает однородность тигля и уменьшает пористость и трещины. Контроль размера частиц обычно осуществляется с помощью классификации воздушного потока, ультразвукового просеивания или методов влажного осаждения. Классификация воздушного потока разделяет порошки с различными размерами частиц путем регулировки скорости воздушного потока (5-20 м/с) с точностью до $\pm 0,1$ мкм. Ультразвуковое просеивание используется для удаления ультрадисперсных порошков ($<0,5$ мкм) во избежание аномального роста зерна в процессе спекания.

Контроль рельефа местности является ключом к оптимизации размера частиц. Насыпная плотность околосферического порошка примерно на 20% выше, чем у порошка неправильной формы, а плотность спекания может достигать более 99%. Технология плазменной сфероидизации расплавляет вольфрамовый порошок с высокотемпературной плазмой ($>10000^{\circ}\text{C}$) с образованием сферической формы под поверхностным натяжением.

3.1.4 Контроль качества сырья

Тестирование сырья включает в себя анализ химического состава, анализ размера частиц, наблюдение за морфологией и испытание физических свойств. Химический состав

анализировали с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФА), масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) и газоанализаторов с точностью до 1 ppm. Анализ размера частиц проводится с помощью лазерного анализатора размера частиц с диапазоном измерений от 0,1 мкм до 100 мкм. Для наблюдения топографии с разрешением 1 нм использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ). Тестирование физических свойств включает в себя измерение текучести и кажущейся плотности, чтобы убедиться, что порошок соответствует требованиям формования и спекания.

3.2 Процесс порошковой металлургии вольфрамового тигля

Порошковая металлургия является основной технологией подготовки вольфрамовых тиглей, которая включает в себя такие этапы, как смешивание, холодное прессование и уплотнение. Ниже подробно рассматриваются три аспекта: смешивание и добавки, холодное прессование и предварительная формовка, а также уплотнение и удаление связующего.

3.2.1 Смесь вольфрамового порошка и добавки

Для улучшения характеристик тигля в вольфрамовый порошок обычно добавляют микроэлементы (например, лантан, церий, иттрий) или связующие вещества (например, поливиниловый спирт ПВА, полиметилметакрилат ПММА). Лантан (0,5-1%) повышает термическую прочность вольфрама и сопротивление ползучести, а церий (0,2-0,5%) улучшает стойкость к тепловому удару. Связующие вещества используются для повышения прочности корпусов холодного прессования, как правило, в дозировке 1-3 мас.%. В процессе смешивания используются планетарные шаровые мельницы или V-образные смесители со временем смешивания 4-8 часов и скоростью 100-300 об/мин для обеспечения равномерного распределения добавок.

3.2.2 Технология холодного прессования и преформинга

Холодное прессование достигается с помощью технологии одноосного прессования или изостатического прессования с диапазоном давлений от 100 МПа до 300 МПа. Одноосное прессование подходит для небольших тиглей (диаметр < 200 мм) с формами из высокопрочной стали или карбида и полированной до Ra<0,1 мкм поверхностью. Изостатическое прессование (CIP) равномерно подает давление через жидкую среду и подходит для больших тиглей (диаметр > 300 мм) с плотностью 60%-70% от теоретической плотности. Форма корпуса преформы должна учитывать усадку при спекании (15%-20%), а размер формы обычно увеличивают в 1,2 раза.

3.2.3 Уплотнение порошка и удаление вяжущего

Процесс удаления вяжущего происходит в атмосфере водорода от 400°C до 600°C, время выдержки составляет 2-4 часа, а скорость удаления составляет более 99%. Водородная атмосфера препятствует окислению вольфрамового порошка и удаляет примеси кислорода с поверхности. Уплотнение достигается за счет спекания, а конечная плотность тигля может

достигать более 99%. Тело предварительного спекания предварительно спекается (800-1000°C) для увеличения начальной прочности.

3.3 Процесс формовки вольфрамового тигля

Процесс формовки определяет геометрическую точность, структурную однородность и эффективность производства тигля. Ниже приведено подробное обсуждение пяти аспектов: изостатическое прессование, формование, прядение, сложное формование формы и проектирование пресс-форм.

3.3.1 Изостатическое прессование (холодное изостатическое прессование, горячее изостатическое прессование)

Холодное изостатическое прессование (CIP) равномерно подает давление (100-200 МПа) через жидкую среду, такую как вода или масло, и подходит для формования больших тиглей. Барокамера установки CIP обычно изготавливается из высокопрочной стали и облицовывается резиновой формой для защиты поверхности сырого тела. Горячее изостатическое прессование (HIP) осуществляется при высоких температурах (1000-1500°C) и высоких давлениях (100-200 МПа) для дальнейшего увеличения плотности тигля и снижения пористости до менее чем 0,1%.

3.3.2 Компрессионное формование и экструзия

Компрессионное формование достигается одноосным или двухосным прессованием, что подходит для мелкосерийного производства с низкими затратами на оснастку. Экструзия используется для изготовления тонких тиглей (например, высотой > 1000 мм) с высоким соотношением сторон (> 10:1), достигаемым путем непрерывной экструзии. Оба процесса требуют точного контроля потока порошка и смазочных материалов для форм (например, графитовой эмульсии).

3.3.3 Вращение и растяжка

Прядильная формовочная формовка формирует тигли путем вращения форм с высокой скоростью (500-2000 об/мин) и подходит для производства тонкостенных тиглей (толщина стенок < 3 мм). Форма изготавливается из карбида или керамики, а поверхность полируется до Ra<0,05μm. Формование на растяжение достигается с помощью волоочильной матрицы и подходит для тиглей большой высоты. Согласно техническому отчету Chinatungsten Online, однородность толщины стенок формованного тигля составляет ±0,1 мм, а эффективность производства примерно на 50% выше, чем у формовки.

3.3.4 Технология формовки тиглей сложной формы

Тигли сложной формы, такие как фланцевые, многогнездные или ступенчатые конструкции, часто вращаются с помощью вращения CN, изостатического прессования или аддитивного производства. Вращение с ЧПУ позволяет получать сложные геометрии за счет многоосевой связи, в то время как изостатическое прессование формируется гибкими формами.

3.3.5 Проектирование и изготовление пресс-форм

При проектировании пресс-форм необходимо учитывать усадку агломерата, распределение термического напряжения и срок службы пресс-формы. Материалом пресс-формы обычно является высокопрочная сталь, твердый сплав или керамика, а поверхность должна быть хромирована или покрыта DLC (алмазоподобным покрытием) для повышения износостойкости.

3.4 Процесс спекания вольфрамового тигля

Процесс спекания вольфрамового тигля является основным этапом в процессе его подготовки, который напрямую определяет плотность, микроструктуру, механические свойства, высокую температурную стабильность и конечный срок службы тигля. Спекание приводит к тому, что частицы вольфрамового порошка диффундируют и объединяются при высокотемпературной обработке с образованием однородной твердой структуры высокой плотности. Из-за сверхвысокой температуры плавления (около 3422°C), высокой твердости и химической инертности вольфрама процесс спекания необходимо проводить в точно контролируемых условиях, чтобы обеспечить стабильное качество продукции и надежную работу. В этой главе будут подробно рассмотрены различные технологии спекания вольфрамового тигля, включая вакуумное спекание, спекание в среде защиты водорода или инертного газа, оптимизацию параметров спекания, многоступенчатое спекание, градиентное спекание, усадку при спекании и контроль размера, в сочетании с технической практикой мировых компаний по производству вольфрама, последними академическими исследованиями и отраслевой информацией, предоставленной Chinatungsten Online. всесторонне проанализировать принципы, оборудование, параметры и задачи процесса спекания.

3.4.1 Технология вакуумного спекания

Вакуумное спекание — это процесс, который выбирают для производства вольфрамовых тиглей высокой чистоты, которые широко используются в таких требовательных областях, как выращивание полупроводниковых кристаллов, выплавка редкоземельных металлов и атомная промышленность. Вакуумная среда значительно снижает окисление вольфрама кислородом и другими химически активными газами, обеспечивая тем самым высокую чистоту и отличную производительность тигля.

Принцип процесса

При вакуумном спекании вольфрамовое тело нагревается при температуре ниже точки плавления вольфрама (обычно от 1800 °C до 2600 °C), что способствует поверхностной диффузии, диффузии на границе зерен и стереоскопической диффузии между частицами с образованием плотной микроструктуры. В вакууме молекулы газа удаляются из окружающей среды, уменьшая образование оксидов (например, триоксида вольфрама) и других примесей. В процессе спекания частицы вольфрама связываются путем атомной миграции и закрытия

пор с образованием тигельной структуры с плотностью, близкой к теоретической плотности (19,25 г/см³).

Требования к оборудованию:

Для вакуумного спекания обычно используется высокотемпературная вакуумная печь для спекания, оснащенная молибденовыми, вольфрамовыми или графитовыми нагревательными элементами для достижения экстремально высоких температур. Корпус печи должен обладать следующими характеристиками:

Вакуумная система: Оснащена механическими, диффузионными или турбомолекулярными насосами для обеспечения уровня вакуума от 10^{-3} Па до 10^{-5} Па.

Нагревательные элементы: молибденовые или графитовые нагревательные элементы должны выдерживать высокие температуры выше 2600°C и иметь равномерное распределение температуры.

Контроль температуры: используется инфракрасный термометр или термопара, а точность контролируется в пределах $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Материал печи: Футерован графитом или молибденом высокой чистоты для предотвращения реакции с вольфрамовым корпусом при высоких температурах.

Технологические параметры

Существенное влияние на эффект спекания оказывают ключевые технологические параметры:

Температура спекания: обычно от 2000°C до 2400°C. Высокая температура ($>2500^{\circ}\text{C}$) может привести к аномальному росту зерна и снижению сопротивления тиглю распространению трещин. Слишком низкие температуры ($<1900^{\circ}\text{C}$) могут привести к недостаточной плотности ($<95\%$).

Время выдержки: В зависимости от размера тигля и толщины стенки, время выдержки обычно составляет от 2 до 10 часов. Для тонкостенных тиглей (толщина стенок <5 мм) требуется от 2 до 4 часов, для толстостенных тиглей (толщина стенки > 10 мм) требуется от 2 до 10 часов.

Вакуум: Ниже 10^{-3} Па для некоторых высокотехнологичных применений (например, тиглей для полупроводников) требуется 10^{-4} Па или выше.

Скорость нагрева: контроль при температуре от $3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, слишком высокая скорость может вызвать термическое напряжение и растрескивание зеленого тела.

Скорость охлаждения: контролируется ниже $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, с использованием секционного охлаждения для снижения остаточного напряжения.

Технологические преимущества

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Высокая чистота: вакуумная среда эффективно предотвращает окисление и загрязнение примесями, а чистота тигля может достигать более 99,99%.

Однородная микроструктура: размер зерна от 10 до 50 мкм можно контролировать путем точного контроля температуры и времени, оптимизируя механические свойства.

Низкий уровень дефектов: Уменьшает пористость и включения, что приводит к плотности от 98% до 99,5% для удовлетворения потребностей высокотехнологичных приложений.

Технические проблемы

Высокая стоимость оборудования: Вакуумные печи для спекания дороги в производстве и обслуживании, особенно для работы в системах высокого вакуума.

Высокое энергопотребление: Высокое энергопотребление из-за высокой температуры и длительного спекания, а также необходимость оптимизации процесса для повышения экономичности.

Высокие требования к сырому телу: Исходная плотность и однородность сырого тела напрямую влияют на эффект спекания, и предыдущий процесс (например, изостатическое формование под давлением) должен строго контролироваться.

3.4.2 Спекание в среде защиты водорода или инертного газа

Спекание в среде защиты водорода или инертных газов (например, аргона, азота) является еще одной важной технологией в производстве вольфрамовых тиглей для чувствительных к стоимости или относительно низкой чистоты применений, таких как плавка драгоценных металлов в металлургической промышленности и обработка кремниевых материалов в фотоэлектрической промышленности.

Принцип процесса

Защищенная водородом или инертным газом, среда спекания может эффективно предотвратить реакцию вольфрамового тела с кислородом или другими химически активными газами. Водородное спекание повышает чистоту вольфрамовых материалов за счет уменьшения количества следовых оксидов, таких как WO_3 , и способствует диффузионной связи между частицами. Инертные газы (например, аргон) предотвращают реакцию вольфрама с кислородом или азотом при высоких температурах, образуя инертную атмосферу, что подходит для сценариев с высокими требованиями к химической стабильности.

Требования к оборудованию:

Печи для спекания водорода и инертного газа должны обладать следующими характеристиками:

Система нагрева: используется вольфрамовая проволока, молибденовая проволока или графитовый нагревательный элемент, выдерживающий высокую температуру выше 2300°C.

Система очистки газов: оснащена молекулярным ситом или катализатором для обеспечения чистоты водорода до 99,999% и удаления примесей воды и кислорода.

Система циркуляции атмосферы: контролируйте расход и давление газа для предотвращения локальных неравномерностей атмосферы.

Система безопасности: Печи для спекания водорода должны быть оснащены взрывозащищенными устройствами и системами обнаружения утечек для обеспечения безопасной работы.

Технологические параметры

Температура спекания: обычно от 1800°C до 2300°C, ниже, чем при вакуумном спекании для снижения энергопотребления.

Контроль атмосферы:

Водород: чистота $\geq 99,999\%$, расход от 0,5 до 2 л/мин, содержание влаги < 5 ppm.

Аргон: чистота $\geq 99,999\%$, содержание кислорода < 10 ppm, давление от 0,1 до 0,5 МПа.

Время выдержки: от 3 до 12 часов, в зависимости от размера тигля и требований к плотности.

Скорость нагрева: от 5°C/мин до 15°C/мин, баланс эффективности и термического напряжения.

Скорость охлаждения: от 3°C/мин до 8°C/мин, охлаждение с помощью инертного газа для снижения напряжения.

Технологические преимущества

Более низкая стоимость: по сравнению с вакуумным спеканием, водородное спекание имеет более низкие затраты на оборудование и эксплуатационные расходы, а также подходит для крупносерийного производства.

Восстановление оксидов: водород может эффективно удалять следовые оксиды в порошке вольфрама и улучшать чистоту материалов.

Гибкость: Спекание в инертном газе может быть адаптировано к различным сценариям путем выбора различных газов (например, аргона или гелия) в соответствии с требованиями применения.

Технические проблемы

Водородная безопасность: Воспламеняемость водорода требует строгих мер безопасности, что усложняет конструкцию оборудования.

Сложность в контроле атмосферы: точный контроль чистоты и расхода газа для предотвращения попадания влаги или других примесей.

Ограничения по чистоте: Атмосферное спекание имеет немного более низкую чистоту, чем вакуумное спекание, и может не подходить для применений со сверхвысокой чистотой.

3.4.3 Оптимизация температуры, времени и атмосферы спекания

Оптимизация температуры, времени и атмосферы спекания является ключом к получению высокопроизводительных вольфрамовых тиглей, которые напрямую влияют на плотность, размер зерна, механические свойства и высокую температурную стабильность.

Систематически оптимизируя эти параметры, можно достичь наилучшего баланса между производительностью и стоимостью.

Оптимизация температуры

Температура спекания является основным фактором, влияющим на скорость диффузии и рост зерен вольфрамовых частиц. Исследования показали, что:

При температуре ниже 2000 °C скорость диффузии частиц ниже, а плотность обычно составляет менее 95%, что делает его непригодным для сложных условий эксплуатации.

При температуре от 2200°C до 2400°C плотность может достигать от 97% до 99,5%, а размер зерна контролируется от 20 до 50μм с учетом прочности и ударной вязкости.

При температуре выше 2500 °C чрезмерный рост зерна (>100 мкм) может привести к снижению сопротивления распространению трещин и повлиять на срок службы тигля. Стратегия оптимизации включает в себя использование градиентных кривых нагрева (например, предварительный нагрев 1000 °C, среднетемпературное спекание 1800 °C, высокотемпературное уплотнение 2300 °C) для балансировки уплотнения и контроля зерна. Согласно технической статье Chinatungsten Online, точная оптимизация температуры может повысить устойчивость тигля к тепловому удару до 20%.

Оптимизация времени

Время выдержки должно соответствовать целевому размеру тигля, толщине стенок и плотности:

Маленький тигель (диаметр < 100 мм): держать в тепле от 2 до 4 часов, а плотность может достигать более 97%.

Тигли среднего размера (диаметр от 100 до 300 мм): выдерживают в тепле от 4 до 8 часов для обеспечения равномерного уплотнения.

Большие тигли (диаметр > 300 мм): выдерживают от 8 до 12 часов, продлевают для компенсации задержки диффузии в толстостенных областях. Слишком долгое хранение может привести к увеличению потребления энергии и крупному зерну, в то время как слишком короткое хранение может привести к остаточной пористости. Исследования показали, что эффективность производства может быть увеличена на 10-15 процентов за счет динамической регулировки времени выдержки.

Оптимизация атмосферы

Выбор и контроль атмосферы имеют решающее значение для чистоты и производительности вольфрамового тигля:

Водородная атмосфера: Повышает чистоту вольфрама до более чем 99,95% за счет снижения содержания следовых оксидов (например, WO₂, WO₃). Содержание влаги (<5 ppm) должно строго контролироваться, чтобы избежать реакции водяного пара с вольфрамом с образованием летучих соединений.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Атмосфера аргона: подходит для применений сверхвысокой чистоты, таких как тигли для атомной промышленности, где содержание кислорода < 10 ppm.

Гелиевая атмосфера: высокая теплопроводность, подходит для сценариев быстрого охлаждения, но по более высокой стоимости. Технологии динамического кондиционирования атмосферы, такие как переключение ступеней водорода и аргона, дополнительно оптимизируют эффект спекания. Исследования Plansee Group показали, что динамическое регулирование атмосферы может снизить содержание химических примесей в тиглях до 30%.

3.4.4 Процесс многостадийного спекания и градиентного спекания

Многостадийное спекание и градиентное спекание являются передовыми технологиями в производстве вольфрамовых тиглей, которые призваны решить проблемы неоднородности, термических напряжений и дефектов микроструктуры в процессе спекания крупногабаритных тиглей.

Многоступенчатое спекание

Многоступенчатое спекание постепенно реализует уплотнение сырого тела за счет контроля температуры и времени выдержки в этапы, которое делится на:

Низкотемпературная фаза (от 800°C до 1200°C): удаляет связующие, летучие примеси и адсорбированные газы для предотвращения образования пор в последующей высокотемпературной фазе.

Среднетемпературная стадия (от 1600°C до 1800°C): способствует первоначальному связыванию частиц и снижает пористость до менее чем 20%.

Высокотемпературная фаза (от 2200°C до 2400°C): Окончательное уплотнение с плотностью более 98%. Преимуществами многоступенчатого спекания являются снижение термического напряжения, уменьшение количества микротрещин и улучшение структурной однородности. Исследования показали, что многоступенчатое спекание позволяет снизить частоту дефектов больших тиглей до 25%.

Градиентное спекание

Градиентное спекание оптимизирует распределение свойств за счет применения различных температур, атмосфер или давлений к различным областям тигля. Например:

Высокотемпературное спекание наружной стены: высокая температура 2400°C используется для повышения твердости и износостойкости.

Низкотемпературное спекание внутренней стенки: контролируется при температуре 2200°C, оптимизирована ударная вязкость и стойкость к тепловому удару.

Градиент атмосферы: атмосфера аргона используется на внешней стене для улучшения чистоты, а водородная атмосфера используется на внутренней стене для удаления оксидов.

Градиентное спекание требует усовершенствованных конструкций печей для спекания, таких как зональный нагрев и системы управления несколькими атмосферами. Согласно техническому отчету Chinatungsten Online, технология градиентного спекания может снизить

частоту растрескивания на 35% при производстве вольфрамовых тиглей большого диаметра (>400 мм).

Оборудование и контроль

Для многоступенчатого и градиентного спекания требуется интеллектуальная печь для спекания, обладающая следующими характеристиками:

Зональный обогрев: независимое регулирование температуры различных зон с помощью нескольких нагревательных элементов.

Динамическое регулирование атмосферы: Оснащен системой распределения газов для переключения водорода, аргона или смешанной атмосферы.

Мониторинг в режиме реального времени: инфракрасное измерение температуры и лазерное определение местоположения используются для мониторинга температурного поля и изменения размеров тигля.

3.4.5 Контроль усадки спекания и размеров

Усадка в процессе спекания является ключевой проблемой при производстве вольфрамовых тиглей и напрямую влияет на точность окончательных размеров, геометрические допуски и стабильность производства.

Механизм усадки

Усадка агломерата происходит из-за закрытия пор и процесса уплотнения между частицами вольфрама. Усадка обычно составляет от 15% до 22% в зависимости от следующих факторов: Размер частиц вольфрамового порошка: размер мелких частиц (<5 мкм) имеет высокую усадку (от 18% до 22%), крупный размер частиц (>10 мкм) имеет меньшую усадку (от 15% до 18%).

Плотность сырого тела: Чем выше начальная плотность холодного изостатического прессованного сырого тела, тем меньше усадка.

Условия спекания: Высокая температура и длительное спекание увеличивают усадку, но могут привести к отклонениям размеров. Процесс усадки делится на три фазы: начальная усадка (первоначальное закрытие пор), промежуточная усадка (связывание частиц) и окончательная усадка (завершение уплотнения).

Технология контроля размеров

Чтобы обеспечить точность размеров тигля, необходимо принять следующие меры:

Конструкция пресс-формы: Запас резервируется в зависимости от усадки, обычно в 1,15-1,25 раза больше конечного размера. Анализ методом конечных элементов (МКЭ) используется для моделирования усадки и оптимизации геометрии пресс-формы.

Однородность: За счет оптимизации процесса холодного изостатического прессования или формования обеспечивается однородность плотности сырого тела (отклонение <2%) и уменьшается неравномерная усадка.

Спеченные опоры: Опоры из графита, молибдена или диоксида циркония высокой чистоты используются для предотвращения деформации или разрушения тигля при высоких

температурах.

Мониторинг в режиме реального времени: лазерный дальномер или рентгеновская визуализация используются для мониторинга изменения размера тигля в режиме реального времени, а точность может достигать $\pm 0,05$ мм.

Сегментированное спекание: скорость усадки контролируется многоступенчатым спеканием, чтобы избежать концентрации напряжений, вызванных быстрой усадкой.

Технические проблемы

Отклонения размеров: Неравномерность усадки больших тиглей (> диаметром 500 мм) может привести к превышению допусков.

Термическое напряжение: Быстрая усадка может привести к образованию микротрещин, которые необходимо смягчить за счет оптимизации кривой охлаждения.

Стоимость оснастки: Стоимость изготовления высокоточных пресс-форм высока, и необходимо сбалансировать стоимость и производительность.

3.5 Обработка и чистовая обработка вольфрамового тигля

Механическая обработка и чистовая обработка вольфрамовых тиглей являются важным этапом в обеспечении их геометрической точности, качества поверхности и производительности после спекания. Благодаря высокой твердости вольфрамового сплава (около 7,5 по шкале Мооса), высокой плотности и охрупчиванию при комнатной температуре, процесс механической обработки требует высокоточного оборудования, современных инструментов и строгого контроля процесса. В этой главе будут всесторонне рассмотрены технологии токарной обработки, фрезерования, сверления, электроэрозионной обработки, лазерной резки, прецизионного шлифования, полировки и нанесения покрытий на поверхность в сочетании с практическим опытом и последними достижениями исследований мировых компаний по производству вольфрама, а также глубоко проанализированы принципы, оборудование, параметры, преимущества и проблемы каждого процесса.

3.5.1 Токарная, фрезерная и сверлильная обработка

Принцип процесса

Токарная обработка, фрезерование и сверление являются основными процессами обработки вольфрамового тигля и используются для формирования формы, полости и функциональных отверстий тигля:

Токарная обработка: резка материалов путем вращения заготовки и неподвижных инструментов, в основном для наружных и внутренних стенок цилиндрических тиглей, обеспечивая округлость и concentricity.

Фрезерование: резка материалов вращающимися инструментами и движущимися деталями, подходит для обработки сложных геометрических форм, таких как ступени или канавки тиглей.

Сверление: Обработка функциональных отверстий (например, вентиляционных отверстий или монтажных отверстий) в тигле вращением сверла обеспечивает точность диаметра

отверстия и допуски по положению.

Требования к оборудованию:

Вольфрамовые тигли обычно обрабатываются с помощью высокоточных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), оснащенных следующим оборудованием:

Станок: 5-осевой токарный станок с ЧПУ или обрабатывающий центр с высокой жесткостью и подавлением вибрации.

Инструменты: алмазные (PCD) или кубический нитрид бора (CBN) с твердостью выше вольфрама (HV>2000).

Система охлаждения: система впрыска охлаждающей жидкости на масляной или водной основе высокого давления с давлением от 10 до 20 МПа для предотвращения перегрева инструмента.

Система удаления пыли: высокоэффективный импульсный пылеуловитель собирает вольфрамовую пыль (размер частиц <10 мкм) для обеспечения безопасной рабочей среды.

Технологические параметры

Скорость резания: от 10 до 50 м/мин, слишком высокая может привести к износу инструмента, слишком низкая снижает эффективность.

Поддачи: от 0,02 до 0,2 мм/об, оптимизированы для толщины стенок тигля и производительности инструмента.

Глубина пропила: от 0,1 до 0,5 мм, при глубоком резании могут образоваться микротрещины.

Расход охлаждающей жидкости: от 10 до 30 л/мин для обеспечения температуры зоны резания ниже 200°C.

Технологические преимущества

Высокая точность: станки с ЧПУ могут достигать допусков на размеры $\pm 0,02$ мм, что соответствует полупроводниковым и аэрокосмическим приложениям.

Гибкость: фрезерование и сверление могут использоваться для обработки сложных форм и адаптации к потребностям заказчика.

Качество поверхности: Шероховатость поверхности (Ra) можно контролировать в диапазоне от 0,8 до 1,6 мкм путем оптимизации параметров.

Технические проблемы

Износ инструмента: высокая твердость вольфрама приводит к короткой стойкости инструмента и требует частой замены алмазных или CBN инструментов.

Микротрещины: Микротрещины могут быть вызваны механическим воздействием в процессе резки и могут быть вызваны поверхностными или внутренними микротрещинами, которые необходимо исследовать с помощью неразрушающего контроля (ультразвукового или рентгеновского).

Борьба с пылью: Вольфрамовая пыль представляет потенциальную опасность для здоровья и требует строгого соблюдения стандартов безопасности труда (например, OSHA).

3.5.2 Электроэрозионная и лазерная резка

Электроэрозионная обработка (электроэрозионная обработка)

Электроэрозионный станок удаляет материал с поверхности заготовки путем дугового образования и подходит для обработки вольфрамовых тиглей с высокой твердостью или сложной формы. Электроэрозионная обработка делится на две формы: проволочная электроэрозионная и электроэрозионная матрица:

Электроэрозионная обработка с проволочной резкой: использует тонкую металлическую проволоку (например, молибденовую проволоку) в качестве электрода для вырезания сложных контуров.

Электроэрозионная обработка штампов: обработка внутренних полостей или канавок с использованием предварительно изготовленных электродов, таких как медь или графит.

Технологические параметры

Ток разряда: от 5 до 50 А, влияющий на скорость обработки и качество поверхности.

Длительность импульса: от 10 до 100 мс, короткие импульсы для чистовой обработки и длинные импульсы для черновой обработки.

Материал электрода: медь или графит, по точности обработки выбирать.

Рабочая жидкость: деионизированная вода или среда на масляной основе, которая нуждается в поддержании высокой изоляции.

Технологические преимущества

Отсутствие механического напряжения: бесконтактная обработка позволяет избежать режущего напряжения и уменьшить образование микротрещин.

Сложные формы: можно обрабатывать тигли специальной формы или небольшие детали (например, диаметр отверстия 0,1 мм).

Высокая приспособляемость к твердости: подходит для вольфрамовых материалов с очень высокой твердостью.

Технические проблемы

Низкая скорость обработки: электроэрозионная обработка имеет меньшую скорость съема материала (от 0,1 до 10 мм³/мин) по сравнению с механической обработкой.

Поверхностные дефекты: Выделения могут вызвать поверхностные ожоги или микропоры, требующие последующей полировки.

Износ электродов: потеря электродного материала увеличивает затраты на обработку.

Лазерная резка

При лазерной резке используется высокоэнергетический лазерный луч (волоконный лазер или СО₂ лазер) для плавления или испарения вольфрамовых материалов и подходит для высокоточной и тонкостенной обработки тиглей.

Технологические параметры

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Мощность лазера: от 2 до 10 кВт, в зависимости от толщины стенки.

Скорость резки: от 0,5 до 5 м/мин, для тонкостенных тиглей доступны более высокие скорости.

Положение фокусировки: от 0,1 до 0,5 мм ниже поверхности материала для обеспечения качества реза.

Вспомогательный газ: азот или аргон под давлением от 5 до 15 бар для предотвращения окисления.

Технологические преимущества

Высокая точность: < реза 0,1 мм, допуск $\pm 0,02$ мм.

Малая зона термического влияния: лазер фокусируется на концентрации энергии, а глубина зоны термического влияния < 0,05 мм.

Эффективность: подходит для высокоскоростной обработки тонкостенных тиглей (толщина стенок < 3 мм).

Технические проблемы

Термическое напряжение: Быстрый нагрев может привести к образованию микротрещин, поэтому параметры лазерного импульса необходимо оптимизировать.

Стоимость оборудования: Высокие инвестиции в мощное лазерное оборудование и комплексное обслуживание.

Качество поверхности: Для поверхностей среза может потребоваться вторичная обработка для уменьшения шероховатости.

3.5.3 Прецизионная шлифовка и полировка

Принцип процесса

Прецизионное шлифование и полировка используются для улучшения качества поверхности вольфрамовых тиглей и снижения шероховатости поверхности (Ra) в соответствии с высокими требованиями полупроводниковой, оптической и высокотемпературной плавки:

Шлифование: Удаление поверхностного материала с помощью алмазного шлифовального круга, улучшающее геометрическую точность и плоскостность поверхности.

Полировка: химико-механическая полировка (СМР), электролитическая полировка или ультразвуковая полировка используются для дальнейшего уменьшения шероховатости и улучшения отделки.

Требования к оборудованию:

Шлифовальные станки: высокоточные плоскошлифовальные станки или круглошлифовальные станки с частотой вращения шпинделя от 5 000 до 10 000 об/мин.

Шлифовальный круг: алмазный шлифовальный круг, размер зерна от 400 до 2000 меш, нуждается в регулярной обрезке.

Оборудование для полировки: Машина СМР оснащена высокоточной полировальной головкой, а ультразвуковая полировальная машина должна поддерживать высокочастотную вибрацию (от 20 до 40 кГц).

Испытательное оборудование: измеритель шероховатости поверхности (типа Talysurf) с разрешением 0,01 мкм.

Технологические параметры

Шлифование:

Размер шлифовального круга: от 400 до 2000 меш, от 400 до 800 меш для грубого шлифования, от 1200 до 2000 меш для тонкого шлифования.

Скорость подачи: от 0,005 до 0,05 мм/мин, что гарантирует отсутствие царапин на поверхности.

Охлаждающая жидкость: на водной или масляной основе, расход от 15 до 30 л/мин.

Полированный:

Суспензия CMP: глинозем (Al_2O_3) или диоксид кремния (SiO_2), размер частиц от 0,05 до 0,5 мкм.

Давление полировки: от 0,1 до 0,5 МПа, слишком высокое может привести к повреждению поверхности.

Время полировки: от 1 до 4 часов, в зависимости от целевой шероховатости.

Технологические преимущества

Сверхнизкая шероховатость: после полировки Ra может достигать от 0,05 до 0,1 мкм, что соответствует требованиям роста кристаллов сапфира.

Коррозионная стойкость: гладкая поверхность снижает химическую реактивность и продлевает срок службы тигля.

Защита от обрастания: Поверхность с низкой шероховатостью снижает адсорбцию примесей, что делает ее пригодной для применения с высокой степенью чистоты.

Технические проблемы

Низкая эффективность: высокая твердость вольфрама приводит к низкой скорости шлифовки и полировки и длительному времени обработки.

Микроцарапины: Микроцарапины могут появиться в процессе полировки и должны быть устранены с помощью многоступенчатой полировки.

Высокая стоимость: алмазные шлифовальные круги и пульпа CMP стоят дорого, и процесс необходимо оптимизировать для снижения потребления.

3.5.4 Поверхностные покрытия (антиокислительные покрытия, износостойкие покрытия)

Принцип процесса

Поверхностное покрытие представляет собой нанесение антиокислительных, износостойких или коррозионностойких покрытий на поверхность вольфрамового тигля методом физического осаждения из газовой фазы (PVD), химического осаждения из газовой фазы (CVD), плазменного напыления или технологии дугового ионного покрытия, что значительно продлевает срок службы. К распространенным материалам покрытия относятся:

Антиокислительные покрытия: оксид алюминия (Al_2O_3), диоксид циркония (ZrO_2), силицид молибдена (MoSi_2).

Износостойкие покрытия: карбид вольфрама (WC), нитрид титана (TiN), нитрид хрома (CrN).

Коррозионностойкие покрытия: карбид кремния (SiC), борид вольфрама (WB).

Требования к оборудованию:

Оборудование с PVD/CVD: Печь вакуумного осаждения с электронно-лучевым испарением или системой магнетронного распыления.

Оборудование для плазменного напыления: Мощность плазменной пушки от 50 до 100 кВт, дальность распыления от 100 до 200 мм.

Испытательное оборудование: толщиномер покрытия (разрешение 0,1 мкм), тестер на царапины (испытание на адгезию).

Технологические параметры

PVD:

Температура осаждения: от 400°C до 800°C во избежание изменения свойств вольфрамовой матрицы.

Толщина покрытия: от 2 до 10 мкм, в зависимости от соотношения производительности и стоимости.

Вакуум: от 10^{-2} до 10^{-4} Па для обеспечения качества осаждения.

CC3:

Температура осаждения: от 800°C до 1200°C, контролируемое термическое напряжение.

Прекурсоры газов: например, SiH_4 (для покрытий из карбида кремния) или CH_4 (для покрытий для туалетов).

Толщина покрытия: от 5 до 20 мкм, подходит для работы в условиях высоких температур.

Плазменное напыление:

Мощность распыления: от 40 до 80 кВт, влияющая на плотность покрытия.

Расстояние распыления: от 100 до 150 мм для оптимальной адгезии.

Толщина покрытия: от 20 до 100 мкм, подходит для износостойких применений.

Технологические преимущества

Стойкость к окислению: покрытия Al_2O_3 или MoSi_2 могут продлить срок службы вольфрамовых тиглей в окислительной среде при температуре 1500°C в 2-5 раз.

Стойкость к истиранию: покрытия WC или TiN значительно повышают твердость поверхности ($\text{HV} > 2500$) и снижают износ.

Коррозионная стойкость: покрытие SiC эффективно противостоит кислотно-щелочной коррозии и коррозии расплавленного металла, что делает его пригодным для химической промышленности.

Технические проблемы

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Адгезия покрытия: Разница в коэффициенте теплового расширения между покрытием и вольфрамовой матрицей может привести к сколообразованию, поэтому конструкцию интерфейса необходимо оптимизировать.

Высокая температурная стабильность: Некоторые покрытия (например, TiN) могут разлагаться при $> 1000^{\circ}\text{C}$, поэтому необходимо выбрать подходящий материал.

Высокая стоимость: оборудование для CVD и PVD требует значительных инвестиций, а процесс нанесения покрытий должен сочетать производительность и экономичность.

3.6 Технология последующей обработки вольфрамовых тиглей

После спекания и механической обработки вольфрамового тигля технология последующей обработки является критически важным этапом для обеспечения его производительности, качества поверхности и срока службы. Из-за высокой твердости, температуры плавления и химической инертности вольфрама процесс последующей обработки необходимо проводить в точно контролируемых условиях для оптимизации механических свойств, химической стабильности и способности тигля адаптироваться к высоким температурам. В этой главе будут подробно рассмотрены технологии последующей обработки вольфрамового тигля, такие как термическая обработка, отжиг, упрочнение поверхности, очистка и обеззараживание, снятие напряжений и т. д., а также всесторонне проанализированы принципы, оборудование, параметры, преимущества и проблемы каждого процесса на основе практического опыта мировых компаний по производству вольфрама и отраслевой информации, предоставленной Chinatungsten Online.

3.6.1 Процесс термической обработки и отжига

Принцип процесса

Процесс термической обработки и отжига оптимизирует микроструктуру, устраняет остаточные напряжения и улучшает механические свойства вольфрамовых тиглей за счет их нагрева и охлаждения при определенных температурах и атмосфере. Термическая обработка в основном используется для корректировки размера зерна и фазовой структуры, в то время как отжиг направлен на устранение внутренних напряжений, возникающих во время обработки, и повышение ударной вязкости и устойчивости тигля к тепловому удару.

Требования к оборудованию:

Термическая обработка и отжиг обычно проводятся в высокотемпературных вакуумных печах или печах для защиты атмосферы, при этом оборудование должно обладать следующими характеристиками:

Система нагрева: молибденовый или графитовый нагревательный элемент, устойчивый к высокой температуре выше 2000°C .

Контроль температуры: инфракрасный термометр или термopара с точностью до $\pm 3^{\circ}\text{C}$ для обеспечения равномерного нагрева.

Контроль атмосферы: вакуум (ниже 10^{-3} Па) или инертный газ (например, аргон, гелий,

чисто $\geq 99,999\%$) для предотвращения окисления.

Система охлаждения: Оснащена системой газового или водяного охлаждения для контроля скорости охлаждения во избежание термического напряжения.

Технологические параметры

Температура термообработки: обычно от 1200°C до 1800°C, в зависимости от области применения тигля. Тигли для полупроводников требуют более низких температур (от 1200 °C до 1400 °C) для поддержания мелких зерен; Металлургические тигли можно использовать при более высоких температурах (от 1600°C до 1800°C) для повышения прочности.

Время выдержки: от 1 до 6 часов, от 1 до 2 часов для тонкостенных тиглей (толщина стенки < 5 мм) и от 4 до 6 часов для толстостенных тиглей (толщина стенки > 10 мм).

Атмосфера: Вакуумная или аргоновая атмосфера, содержание кислорода < 5 ppm, предотвращающее поверхностное окисление.

Скорость охлаждения: от 2°C/мин до 10°C/мин, сегментированное охлаждение для снижения остаточного напряжения.

Количество циклов: Некоторые процессы требуют многократной термической обработки (например, от 2 до 3 раз) для оптимизации микроструктуры.

Снятие напряжения: Отжиг может снизить технологическое напряжение более чем на 80%, значительно улучшив сопротивление тиглю распространению трещин.

Оптимизация зерна: Термическая обработка позволяет контролировать размер зерна от 10 до 50 мкм, уравнивая прочность и ударную вязкость.

Стабильная производительность: улучшают структурную стабильность тигля в высокотемпературном цикле и продлевают срок службы.

Способность к высоким температурам: После оптимизации микроструктуры устойчивость тигля к тепловому удару может быть увеличена на 20-30 процентов.

Технические проблемы

Однородность температуры: Большие тигли (> диаметром 300 мм) подвержены температурным градиентам при высоких температурах, что приводит к неравномерной производительности.

Риск окисления: Неправильный контроль атмосферы может привести к окислению поверхности, что потребует высокой чистоты газа и герметичного уплотнения.

Высокое энергопотребление: высокая температура и длительная обработка увеличивают потребление энергии, и процесс необходимо оптимизировать для повышения экономичности.

Вариации размеров: Термическая обработка может привести к небольшим отклонениям в размерах, которые должны быть предварительно компенсированы конструкцией пресс-формы.

3.6.2 Поверхностное упрочнение (цементация, азотирование, ионная имплантация)

Принцип процесса

Поверхностное упрочнение улучшает производительность вольфрамовых тиглей в суровых

условиях за счет введения углерода, азота или других элементов на поверхность с образованием слоя соединений, которые являются высокотвердыми, износостойкими или коррозионностойкими. Распространенные методы упрочнения поверхности включают:

Цементация: Атомы углерода проникают в поверхность вольфрама при высоких температурах, образуя слой карбида вольфрама (WC).

Азотирование: нитрид вольфрама (WN) или композитный слой нитрида образуется путем обработки азотной атмосферой.

Ионная имплантация: углерод, азот или металлические элементы (например, хром, титан) имплантируются в поверхность с помощью высокоэнергетических ионных пучков для повышения твердости и химической стабильности.

Требования к оборудованию:

Оборудование для цементации: вакуумная печь для цементации или печь для газовой цементации, оснащенная системой подачи источника углерода (например, метана, ацетилен).

Оборудование для азотирования: печь плазменного азотирования или печь газового азотирования для поддержки атмосферы азота или аммиака.

Оборудование для ионной имплантации: высоковакуумный аппарат для ионной имплантации, оснащенный источником ионов (например, углерода, азота, титана) и ускорителем.

Испытательное оборудование: рентгеновский дифрактометр (XRD) для анализа структуры слоя соединения, нанотвердомер для проверки твердости поверхности.

Технологические параметры

Цементация:

Температура: от 1000°C до 1400°C, чтобы избежать грубого зерна из-за чрезмерной температуры.

Источник углерода: метан (CH₄) или ацетилен (C₂H₂) с расходом от 0,2 до 1 л/мин.

Время обработки: от 2 до 8 часов, толщина слоя контролируется на уровне от 5 до 20 мкм.

Атмосфера: вакуум или низкое давление (10⁻¹ Па) для предотвращения окисления.

Азотирование:

Температура: от 800°C до 1200°C, баланс толщины нитридного слоя и производительности основания.

Источник азота: азот (N₂) или аммиак (NH₃), чистота ≥ 99,999%.

Время обработки: от 4 до 12 часов, толщина слоя от 10 до 30 мкм.

Напряжение плазмы: от 500 до 1000 В (плазменное азотирование).

Ионная имплантация:

Энергия ионов: от 50 до 200 кэВ, контролируемая глубина имплантации (от 0,1 до 1 мкм).

Ионная доза: от 10¹⁶ до 10¹⁸ ионов/см² для оптимальных свойств поверхности.

Вакуум: 10⁻⁴ Па или менее для обеспечения чистоты ионного пучка.

Технологические преимущества

Высокая твердость: Твердость слоя азота, образованного науглероживанием, может достигать HV 2500, а твердость азотирующего слоя может достигать HV 2000.

Стойкость к истиранию: Армирующий слой поверхности значительно снижает износ при высоких температурах и продлевает срок службы тигля в 2-3 раза.

Коррозионная стойкость: нитридный слой и слой ионной имплантации эффективно устойчивы к кислотно-щелочной коррозии и коррозии расплавленных металлов.

Улучшение микроструктуры: Ионная имплантация может привести к образованию аморфного поверхностного слоя и повышению усталостной прочности.

Технические проблемы

Однородность толщины слоя: сложная геометрия больших тиглей может привести к неравномерной толщине армирующего слоя.

Термическое напряжение: Высокотемпературное науглероживание или азотирование может вызвать межфазное напряжение между матрицей и армирующим слоем, и этот процесс необходимо оптимизировать.

Стоимость оборудования: Оборудование для ионной имплантации имеет большие инвестиции и подходит для высокотехнологичных приложений.

Сложность процесса: Многоступенчатый процесс интенсификации требует строгого контроля параметров, что увеличивает сложность производства.

3.6.3 Процессы очистки и обеззараживания

Принцип процесса

В процессе очистки и обеззараживания с поверхности вольфрамовых тиглей удаляются оксиды, масла, остатки металлов и твердые частицы с помощью физических, химических или ультразвуковых методов для обеспечения высокой чистоты и противообрастающих свойств. Процесс очистки особенно важен для полупроводниковых, фотоэлектрических и научно-исследовательских тиглей, где любые следовые загрязнения могут повлиять на качество конечного продукта.

Требования к оборудованию:

Оборудование для очистки: Ультразвуковой очиститель (частота от 20 до 80 кГц) с системой очистки нескольких баков.

Оборудование для химической очистки: резервуар для очистки кислотой и щелочью, оснащенный функциями перемешивания и нагрева.

Оборудование для сушки: вакуумная сушильная печь или инфракрасная сушилка для обеспечения отсутствия водяных следов.

Испытательное оборудование: лазерный анализатор размеров частиц (обнаружение поверхностных частиц), рентгенофлуоресцентный спектрометр (РФА, анализ остаточных элементов).

Технологические параметры

Ультразвуковая очистка:

Частота: 40 кГц (обычная чистка) или 80 кГц (прецизионная очистка).

Раствор для очистки: деионизированная вода (удельное сопротивление >18 МОм·см) или нейтральное чистящее средство.

Температура: от 40°C до 60°C во избежание повреждения поверхности, вызванного высокими температурами.

Время: от 5 до 20 минут, в зависимости от уровня загрязнения.

Химическая очистка:

Травление: разбавляют азотной кислотой (HNO₃, от 5% до 10%) или соляной кислотой (HCl, 5%) для удаления оксидов и металлических остатков.

Промывка каустическим уксусом: гидроксид натрия (NaOH, от 2% до 5%) для удаления органических загрязнений.

Время: от 2 до 10 минут, строго контролируется во избежание коррозии.

Сухой:

Температура: от 80°C до 120°C, вакуум или атмосфера инертного газа.

Время: от 10 до 30 минут, чтобы убедиться в отсутствии водяных пятен или вторичного загрязнения.

Технологические преимущества

Высокая чистота: Поверхностные загрязнения могут быть снижены до менее чем 10 ppb после очистки, что соответствует требованиям полупроводниковой промышленности.

Защита от загрязнения: Гладкая, экологически чистая поверхность снижает адсорбцию примесей и продлевает срок службы тигля.

Постоянство: стандартизированный процесс очистки обеспечивает стабильное качество поверхности от партии к партии.

Защита окружающей среды: В современном процессе очистки используются чистящие средства с низким уровнем токсичности для снижения воздействия на окружающую среду.

Технические проблемы

Удаление частиц: Субмикронные частицы (<0,1 мкм) трудно удалить полностью и требуют многоступенчатой очистки.

Химическая коррозия: очистка кислотой и щелочью может повредить поверхность, поэтому необходимо точно контролировать концентрацию и время.

Контроль сушки: Неправильная сушка может привести к появлению водяных пятен или вторичного загрязнения, а также требуется среда высокой чистоты.

Высокая стоимость: Инвестиции в оборудование для ультразвуковой и химической очистки значительны, и эксплуатационные расходы необходимо оптимизировать.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

3.6.4 Снятие напряжений и оптимизация конструкций

Принцип процесса

Снятие напряжений и оптимизация структуры Снижает остаточное напряжение внутри и на поверхности вольфрамового тигля с помощью термообработки, механической вибрации или лазерной обработки, а также оптимизирует его структурную стабильность. Напряжения, возникающие во время обработки и спекания, могут привести к растрескиванию или деформации тигля при высоких температурных циклах, а процесс снятия напряжения является ключом к продлению срока службы.

Требования к оборудованию:

Печь для термообработки: вакуумная печь или печь в среде инертного газа, точность регулирования температуры $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Вибрационное оборудование: механический встряхиватель с частотой от 10 до 100 Гц и амплитудой от 0,1 до 1 мм.

Лазерные станки: импульсные лазеры мощностью от 1 до 5 кВт для локального снятия напряжения.

Испытательное оборудование: рентгеновский анализатор напряжений для измерения остаточных напряжений (точность ± 5 МПа).

Технологические параметры

Снятие термического напряжения:

Температура: от 1000°C до 1400°C , ниже температуры рекристаллизации, чтобы избежать роста зерна.

Время выдержки: от 1 до 4 часов, в зависимости от размера тигля.

Атмосфера: аргоновая или вакуумная, содержание кислорода < 5 ppm.

Скорость охлаждения: от $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, сегментированное охлаждение.

Снятие вибрационного напряжения:

Частота: от 20 до 80 Гц для оптимальной эффективности разгрузки от натяжения.

Амплитуда: от 0,2 до 0,8 мм во избежание повреждения поверхности.

Время: от 30 до 120 минут, в зависимости от распределения нагрузки.

Лазерное снятие напряжения:

Мощность лазера: от 1 до 3 кВт, длительность импульса от 10 до 100 нс.

Скорость сканирования: от 0,5 до 2 м/мин, контролируемое тепловложение.

Диаметр фокуса: от 0,1 до 0,5 мм, местный.

Технологические преимущества

Низкое напряжение: остаточное напряжение может быть снижено до менее чем 5 МПа для повышения трещиностойкости.

Структурная стабильность: После оптимизации скорость деформации тигля при

высокотемпературном циклировании снижается на 50%.

Гибкость: Вибрация и лазерное лечение могут быть направлены на локализованные области с высоким напряжением и подходят для сложных форм.

Неповреждающий: Неразрушающий процесс не влияет на микроструктуру тигля.

Технические проблемы

Сложное распределение напряжений: Распределение напряжений в больших тиглях неравномерно, и необходимо комбинировать несколько методов.

Точность оборудования: Лазерное и вибрационное оборудование должно контролироваться с высокой точностью, чтобы избежать вторичных напряжений.

Энергопотребление и стоимость: Термическая обработка потребляет много энергии и должна быть оптимизирована для снижения затрат.

Сложность: Точное измерение остаточных напряжений требует дорогостоящего оборудования и технологий.

3.7 Контроль качества и испытания вольфрамового тигля

Контроль качества и испытания являются ключевым звеном в производстве вольфрамовых тиглей, гарантируя, что их размеры, свойства материала и надежность соответствуют отраслевым стандартам. Дорогостоящие и требовательные сценарии применения вольфрамовых тиглей (например, в полупроводниковой и аэрокосмической промышленности) требуют строгих систем управления качеством. В этом разделе будут подробно рассмотрены испытания размеров и геометрических допусков, неразрушающие испытания, анализ химического состава и микроструктуры, высокотемпературные эксплуатационные испытания, а также сертификация качества и системы отслеживания.

3.7.1 Испытание размерных и геометрических допусков

Принцип процесса

Испытания на размерные и геометрические допуски проверяют геометрические размеры (диаметр, толщину стенки, высоту) и геометрические допуски (округлость, параллельность, концентричность) вольфрамового тигля с помощью прецизионного измерительного оборудования, чтобы гарантировать его соответствие проектным требованиям. Результаты испытаний напрямую влияют на установку и эксплуатационные характеристики тигля.

Требования к оборудованию:

Координатно-измерительная машина (КИМ): точность $\pm 0,001$ мм, подходит для сложных геометрических измерений.

Лазерный дальномер: разрешение 0,01 мм, для быстрого контроля размеров.

Профилометр: Измерьте округлость и профиль поверхности с точностью до $\pm 0,005$ мм.

Высотомер и штангенциркуль: для простой проверки размеров с точностью до $\pm 0,01$ мм.

Параметры детектирования

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Допуски по размерам: допуски по диаметру и высоте $\pm 0,05$ мм, допуски по толщине стенки $\pm 0,02$ мм (тигли для полупроводников).

Геометрические допуски:

Округлость: $\leq 0,02$ мм.

Параллельность: $\leq 0,01$ мм.

Концентричность: $\leq 0,015$ мм.

Частота измерений: от 10% до 20% отбора проб от каждой партии, полная проверка ключевых областей применения.

Требования к окружающей среде: температура $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, влажность $< 60\%$, чтобы избежать влияния теплового расширения.

Технологические преимущества

Высокая точность: КИМ и лазерное оборудование обеспечивают погрешность измерения $< 0,01$ мм.

Эффективность: Автоматизированная измерительная система может обрабатывать большое количество тиглей.

Постоянство: Стандартизированный процесс контроля обеспечивает геометрическую точность каждого тигля.

Технические проблемы

Сложные формы: для измерения тиглей специальной формы требуется многоосевая КИМ, а стоимость оборудования высока.

Поверхностные эффекты: Высококачественные поверхности могут вызывать ошибки отражения измерений и требовать калибровки.

Осмотр больших габаритов: тигли диаметром > 500 мм требуют специального оборудования, что увеличивает затраты.

3.7.2 Неразрушающий контроль (УЗИ, рентген, компьютерная томография)

Принцип процесса

Неразрушающий контроль (НК) использует ультразвуковую, рентгеновскую или компьютерную томографию для обнаружения дефектов (например, пористости, трещин, включений) внутри вольфрамовых тиглей без повреждения их структуры. Неразрушающий контроль является критически важным этапом в обеспечении надежности тигля.

Требования к оборудованию:

Ультразвуковой детектор: частота от 1 до 10 МГц, диаметр зонда от 5 до 10 мм.

Оборудование для рентгеновского контроля: энергия от 100 до 300 кВ, подходит для толстостенных тиглей.

Компьютерный томограф: разрешение 0,01 мм для 3D-анализа дефектов.

Калибровочный образец: образец вольфрама с известными дефектами для калибровки оборудования.

Параметры детектирования

Ультразвуковой:

Частота: 5 МГц (обычное обнаружение), 10 МГц (высокоточное обнаружение).

Контактная жидкость: вода или гель для обеспечения пропускания звуковой волны.

Разрешение дефектов: $\geq 0,1$ мм.

Рентгеновский:

Время выдержки: от 10 до 60 секунд, в зависимости от толщины стенки.

Энергия: 150 кВ (толщина стенки < 10 мм), 250 кВ (толщина стенки > 10 мм).

Разрешение дефектов: $\geq 0,2$ мм.

Кт:

Толщина сканирующего слоя: от 0,05 до 0,2 мм.

Время восстановления: от 5 до 20 минут, в зависимости от размера тигля.

Разрешающая способность к дефектам: $\geq 0,05$ мм.

Технологические преимущества

Высокая чувствительность: компьютерная томография может обнаруживать небольшие дефекты размером до 0,05 мм.

Комплексный: рентген и компьютерная томография обеспечивают трехмерное распределение дефектов, а ультразвук подходит для быстрого скрининга.

Без повреждений: не влияет на производительность и срок службы тигля.

Технические проблемы

Высокая плотность помех: высокая плотность вольфрама ($19,25 \text{ г/см}^3$) ослабляет проникновение рентгеновского излучения, что требует высокоэнергетического оборудования.

Сложная геометрия: Обнаружение тиглей специальной формы требует многоракурсного сканирования, что увеличивает сложность.

Высокая стоимость: оборудование для компьютерной томографии и эксплуатационные расходы высоки, что делает его пригодным для высокотехнологичных приложений.

3.7.3 Анализ химического состава и микроструктуры

Принцип процесса

Анализ химического состава и микроструктуры. Чистота материала и характеристики микроструктуры (такие как размер зерна и распределение фаз) вольфрамового тигля проверяются с помощью спектроскопического анализа и микроскопических наблюдений, чтобы убедиться, что они соответствуют требованиям применения.

Требования к оборудованию:

Рентгенофлуоресцентный спектрометр (РФА): определяет содержание элементов с точностью до $\pm 0,01\%$.

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS): анализ следовых примесей

с пределом обнаружения <1 ppb.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ): наблюдение за зёрнами и дефектами с разрешением < 1 нм.

Дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD): анализ ориентации зёрен и фазовой структуры.

Параметры детектирования

Химический состав:

Чистота вольфрама: $\geq 99,95\%$ (обычный), $\geq 99,999\%$ (для полупроводников).

Частота тестирования: от 5% до 10% от каждой партии.

Микроструктура:

Размер зёрна: от 10 до 50 μm (обычный), от 5 до 20 μm (высокая производительность).

Пористость: <1%, проанализирована с помощью СЭМ-изображений.

Распределение фаз: Убедитесь, что нет аномальных фаз (например, оксидов или карбидов).

Технологические преимущества

Высокая точность: ICP-MS обнаруживает примеси на уровне ppb для обеспечения сверхвысокой чистоты.

Комплексность: SEM и EBSD предоставляют полную информацию о зёрнах, дефектах и фазах.

Гарантия качества: Химический и структурный анализ обеспечивает стабильную производительность тигля.

Технические проблемы

Подготовка образца: Твёрдость вольфрама затрудняет резку и полировку, требуя алмазных инструментов.

Обнаружение следов: Обнаружение примесей со сверхнизким содержанием примесей требует высокочувствительного оборудования и высокой стоимости.

Комплексный анализ: обработка данных EBSD требует специализированного программного обеспечения и персонала.

3.7.4 Испытание на высокотемпературные характеристики (тепловой удар, ползучесть, усталость)

Принцип процесса

В ходе испытаний на высокотемпературные характеристики оцениваются характеристики теплового удара, ползучести и усталостной прочности вольфрамовых тиглей путем моделирования реальных условий использования для обеспечения их надежности в высокотемпературных средах.

Требования к оборудованию:

Печь для испытаний на тепловой удар: диапазон температур от 25°C до 2500°C, скорость

нагрева $> 100^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Тестер на ползучесть : применяйте постоянное напряжение (от 10 до 100 МПа) при температуре от 1800°C до 2200°C .

Усталостная испытательная машина: частота циклического нагружения от 1 до 10 Гц, температура от 1000°C до 2000°C .

Испытательное оборудование: инфракрасный термометр, датчик перемещения, точность $\pm 0,01$ мм.

Параметры детектирования

Испытание на тепловой удар:

Разница температур: от 1000°C до 2000°C (например, цикл от 2000°C до 25°C).

Количество циклов: от 50 до 500 циклов, в зависимости от требований к применению.

Обнаружение трещин: проникновение под микроскоп или краситель, длина трещины $< 0,1$ мм.

Испытание на ползучесть:

Напряжение: от 20 до 80 МПа.

Температура: от 1800°C до 2200°C .

Время работы: от 100 до 1000 часов, измеряемая скорость деформации ($< 0,1\%$).

Испытание на усталость:

Циклическое напряжение: ± 50 МПа.

Температура: от 1000°C до 2000°C .

Количество циклов: от 10^4 до 10^6 для обнаружения усталостных трещин.

Технологические преимущества

Реалистичное моделирование: условия испытаний приближены к реальным условиям использования для обеспечения надежности.

Оптимизация производительности: Данные испытаний помогают улучшить процесс и увеличить срок службы тигля.

Проверка качества: Убедитесь, что тигли соответствуют строгим требованиям аэрокосмической и атомной промышленности.

Технические проблемы

Высокие требования к оборудованию: оборудование для высокотемпературных испытаний должно выдерживать высокую температуру 2500°C , что является дорогостоящим.

Длительные циклы испытаний: Испытания на ползучесть и усталость могут занимать недели, что влияет на производительность.

Сложные данные: данные о производительности при высоких температурах должны быть профессионально проанализированы, что увеличивает техническую сложность.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

3.7.5 Система сертификации качества и прослеживаемости

Принцип процесса

Система сертификации качества и прослеживаемости гарантирует, что производство, тестирование и поставка вольфрамовых тиглей соответствуют международным и отраслевым стандартам за счет создания стандартизированных процессов управления качеством и механизмов прослеживаемости продукции. Система прослеживаемости записывает информацию на каждом этапе от сырья до готовой продукции, облегчая устранение неполадок и повышение качества.

Оборудование и инструменты

Система управления качеством: Программная платформа на основе ISO 9001:2015, которая записывает данные производства и контроля.

Система прослеживаемости: штрих-код или RFID-метка, которая коррелирует партию, параметры процесса и результаты испытаний тигля.

Инструменты анализа данных: программное обеспечение Statistical Process Control (SPC) для анализа колебаний качества.

Система документооборота: электронное архивирование производственных записей, протоколов испытаний и сертификационных документов.

Параметры реализации

Критерии аккредитации:

ISO 9001:2015 (Управление качеством).

ISO 14001:2015 (Экологический менеджмент).

GB/T 3459-2022 (технические требования к вольфрамовым тиглям).

Прослеживаемость:

Сырье: партия вольфрамового порошка, поставщик, химический состав.

Процесс: спекание, механическая обработка, параметры постобработки.

Проверка: размеры, неразрушающий контроль, результаты эксплуатационных испытаний.

Срок хранения данных: не менее 5 лет, более 10 лет для высокотехнологичных приложений (например, в атомной промышленности).

Периодичность аудита: внутренние аудиты проводятся раз в 6 месяцев, а внешние – раз в год.

Технологические преимущества

Соответствие требованиям: Соответствие международным и национальным стандартам и повышение конкурентоспособности на рынке.

Прозрачность: Система прослеживаемости повышает доверие клиентов и облегчает обнаружение проблем.

Постоянное совершенствование: SPC-анализ выявляет узкие места качества и оптимизирует производственные процессы.

Технические проблемы

Управление данными: Крупномасштабное производство требует эффективных систем хранения и поиска данных.

Высокая стоимость: Внедрение систем сертификации и прослеживаемости требует дополнительных инвестиций.

Сложность: Многоканальная трассируемость требует сотрудничества между отделами, что усложняет управление.

3.7 Контроль качества и испытания вольфрамового тигля

Контроль качества и испытания лежат в основе обеспечения производительности, надежности и стабильности вольфрамовых тиглей. В связи с применением вольфрамовых тиглей в таких требовательных областях, как полупроводниковая, аэрокосмическая и атомная промышленность, точность их размеров, чистота материала, микроструктура и высокотемпературные характеристики должны соответствовать строгим стандартам. В этой главе будут всесторонне рассмотрены испытания размеров и геометрических допусков, неразрушающие испытания, анализ химического состава и микроструктуры, высокотемпературные испытания, а также системы сертификации качества и прослеживаемости, а также объединен практический опыт мировых компаний по производству вольфрама и отраслевая информация, предоставленная Chinatungsten Online, для глубокого анализа принципов, оборудования, параметров, преимуществ и проблем каждой технологии тестирования.

3.7.1 Испытание размерных и геометрических допусков

Принцип процесса

Испытание размерных и геометрических допусков Проверьте геометрические размеры (диаметр, толщина стенки, высота) и геометрические допуски (округлость, параллельность, концентричность) вольфрамового тигля с помощью высокоточного измерительного оборудования, чтобы убедиться, что он соответствует проектным спецификациям. Точная геометрия имеет решающее значение для установки, теплопередачи и производительности тигля, особенно в таких областях, как выращивание монокристаллического кремния или высокотемпературное плавление.

Требования к оборудованию:

Координатно-измерительная машина (КИМ): оснащена лазером или контактным щупом, точность измерения составляет $\pm 0,001$ мм, подходит для сложных геометрических форм.

Лазерный дальномер: бесконтактное измерение с разрешением 0,01 мм для быстрой проверки размеров.

Профилометр: Измерьте округлость, профиль поверхности и геометрический допуск с точностью до $\pm 0,005$ мм.

Оптический проектор: для двумерного измерения небольших тиглей с увеличением от 50 до

200 раз.

Высотомер и цифровой штангенциркуль: используются для простого контроля размеров, точность $\pm 0,01$ мм.

Параметры детектирования

Допуски по размерам:

Диаметр и высота: $\pm 0,05$ мм (для обычных применений), $\pm 0,02$ мм (тигли для полупроводников).

Толщина стенки: $\pm 0,03$ мм (обычная), $\pm 0,01$ мм (высокая точность).

Геометрические допуски:

Округлость: $\leq 0,02$ мм (обычная), $\leq 0,01$ мм (высокая точность).

Параллельность: $\leq 0,015$ мм.

Концентричность: $\leq 0,01$ мм.

Частота измерения: от 10% до 20% отбора проб на партию, 100% полная проверка для критически важных областей применения, таких как аэрокосмическая промышленность.

Требования к окружающей среде: температура $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, влажность $< 50\%$, избегать теплового расширения или помех влажности.

Стандарт калибровки: Для обеспечения точности оборудования используются калибровочные блоки, сертифицированные по стандарту ISO 10360.

Технологические преимущества

Высокая точность: КИМ и лазерные дальномеры достигают субмикронной точности и соответствуют жестким допускам.

Автоматизация: Интегрированная автоматизированная измерительная система может обрабатывать большие партии тиглей для повышения эффективности.

Универсальность: Профилографы и оптические проекторы проверяют как размерные, так и поверхностные особенности.

Запись данных: Оцифровка результатов измерений для упрощения прослеживаемости качества и статистического анализа.

Технические проблемы

Сложная геометрия: Для тиглей специальной формы или больших размеров (диаметр > 500 мм) требуются многоосевые КИМ, что может привести к высоким затратам на оборудование.

Поверхностное отражение: Высококачественные вольфрамовые поверхности могут привести к ошибкам лазерных измерений, поэтому оптический тракт необходимо откалибровать.

Время измерения: Для полного осмотра больших тиглей требуется много времени, и необходимо сбалансировать эффективность и точность.

Чувствительность к окружающей среде: колебания температуры или вибрации могут повлиять на результаты измерений, поэтому требуется постоянная температура и влажность

окружающей среды.

CTIA GROUP LTD
Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

- Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.
- High purity: purity of $\geq 99.95\%$ minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.
- Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.
- High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.
- High strength and wear resistance: Ensuring long service life.
- Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

- Rare earth metal melting:** Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.
- Vacuum coating:** Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.
- High-temperature furnaces:** Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C.
- Chemical synthesis:** Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.
- Metal smelting and refining:** Used for melting and refining high-purity metals.
- Sapphire crystal growth:** Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between 2000–2500°C.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696
Website: www.tungsten.com.cn

3.7.2 Неразрушающий контроль (УЗИ, рентген, компьютерная томография)

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Принцип процесса

Неразрушающий контроль (НК) использует методы ультразвуковой, рентгеновской или компьютерной томографии (КТ) для обнаружения дефектов (например, пористости, трещин, включений) внутри и на поверхности вольфрамовых тиглей без повреждения их структуры. Неразрушающий контроль играет ключевую роль в обеспечении надежности и безопасности тиглей, особенно в атомной промышленности и полупроводниковой промышленности.

Требования к оборудованию:

Ультразвуковой детектор: Оснащенный высокочастотным датчиком (от 1 до 15 МГц), он подходит для обнаружения небольших трещин.

Рентгеновское досмотровое оборудование: энергетическое напряжение от 100 до 400 кВ, оснащенное цифровой системой визуализации.

Компьютерный томограф: высокое разрешение (0,01 мм), поддержка 3D-реконструкции дефектов.

Система контактной жидкости: водная или гелевая среда для обеспечения пропускания ультразвука.

Калибровочный образец: образец вольфрама с известными дефектами (например, пористостью 0,1 мм) для калибровки оборудования.

Параметры детектирования

Ультразвуковой контроль:

Частота: 5 МГц (обычное обнаружение), от 10 до 15 МГц (высокоточное обнаружение).

Тип зонда: продольный или зонд сдвиговой волны, диаметр от 5 до 10 мм.

Разрешающая способность дефектов: $\geq 0,1$ мм (трещина), $\geq 0,2$ мм (пористость).

Контактная жидкость: вода или гель, толщина от 0,1 до 0,5 мм.

Рентгеновский контроль:

Энергия: 150 кВ (толщина стенки <10 мм), 300 кВ (толщина стенки >10 мм).

Время выдержки: от 10 до 60 секунд, в зависимости от толщины тигля.

Разрешающая способность дефектов: $\geq 0,2$ мм (пористость), $\geq 0,1$ мм (трещина).

КТ:

Толщина слоя сканирования: от 0,05 до 0,2 мм, в зависимости от размера тигля.

Разрешение: от 0,01 до 0,05 мм для обнаружения мелких включений.

Время реконструкции: от 5 до 30 минут на создание 3D модели дефекта.

Технологические преимущества

Высокая чувствительность: компьютерная томография может обнаруживать крошечные дефекты размером до 0,05 мм, а ультразвук подходит для быстрого скрининга.

Комплексность: рентген и компьютерная томография обеспечивают трехмерное распределение внутренних дефектов, выявляя скрытые проблемы.

Неразрушающий: не влияет на производительность и срок службы тигля.

Визуализация данных: 3D-модель, созданная с помощью КТ, облегчает анализ дефектов и совершенствование процессов.

Технические проблемы

Высокая плотность помех: высокая плотность вольфрама ($19,25 \text{ г/см}^3$) ослабляет проникновение рентгеновского излучения, что требует высокоэнергетического оборудования.

Сложная геометрия: тигли специальной формы необходимо сканировать под разными углами, что увеличивает время и сложность обнаружения.

Высокая стоимость: оборудование для компьютерной томографии имеет высокие инвестиционные и эксплуатационные расходы, что делает его пригодным для высокотехнологичных приложений.

Технология работы: НК требует профессиональной эксплуатации и высоких требований к интерпретации данных.

3.7.3 Анализ химического состава и микроструктуры

Принцип процесса

Анализ химического состава и микроструктуры. Чистота материала, содержание примесей и свойства микроструктуры (например, размер зерна, распределение фаз, пористость) вольфрамовых тиглей проверяются с помощью спектроскопического анализа, микроскопических наблюдений и методов дифракции. Эти анализы гарантируют, что химическая стабильность и механические свойства тигля соответствуют требованиям применения.

Требования к оборудованию:

Рентгенофлуоресцентный спектрометр (РФА): обнаруживает основные элементы и примеси с точностью до $\pm 0,01\%$.

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS): Следовые примеси анализируются с пределом обнаружения $< 0,1 \text{ ppb}$.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ): наблюдение за зернами, порами и дефектами с разрешением $< 1 \text{ нм}$.

Дифрактометр обратного рассеяния электронов (EBSD): анализирует ориентацию зерен и фазовую структуру с точностью до $\pm 0,1^\circ$.

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ): анализ наноразмерных структур с разрешением $< 0,1 \text{ нм}$.

Параметры детектирования

Химический состав:

Чистота вольфрама: $\geq 99,95\%$ (обычные), $\geq 99,999\%$ (полупроводниковая или атомная промышленность).

Примесные элементы: C, O, N, Fe, Ni, Mo и др., содержание $< 50 \text{ ppm}$ (обычные), $< 10 \text{ ppm}$

(высокой чистоты).

Периодичность тестирования: от 5% до 10% отбора проб на партию, полная проверка ключевых областей применения.

Микроструктура:

Размер зерна: от 10 до 50 μm (обычный), от 5 до 20 μm (высокая производительность).

Пористость: <1% (анализ изображений SEM), <0,5% (высокотехнологичные приложения).

Распределение фаз: отсутствие аномальных фаз (например, оксидов, карбидов), проверено с помощью дифрактометра.

Граничные характеристики зерен: EBSD анализирует граничные углы зерен для оптимизации трещиностойкости.

Технологические преимущества

Сверхвысокая точность: ICP-MS обнаруживает примеси в диапазоне ppb для обеспечения чистоты материала.

Комплексный анализ: SEM и EBSD предоставляют полную информацию о зернах, дефектах и фазах.

Прогнозирование производительности: данные микроструктуры помогают оптимизировать работу при высоких температурах.

Гарантия качества: Обеспечение химической и структурной согласованности каждой партии тиглей.

Технические проблемы

Подготовка образца: Твердость вольфрама затрудняет резку, полировку и истончение, требуя алмазных инструментов и ионного разбавления.

Обнаружение следов: Анализ со сверхнизким содержанием примесей требует высокочувствительного оборудования и высоких эксплуатационных расходов.

Сложные данные: Для интерпретации данных EBSD и TEM требуется профессиональное программное обеспечение и персонал.

Трудоемкость: Высокоточный анализ (например, ПЭМ) занимает много времени, что влияет на эффективность производства.

3.7.4 Испытание на высокотемпературные характеристики (тепловой удар, ползучесть, усталость)

Принцип процесса

В ходе высокотемпературных эксплуатационных испытаний оцениваются характеристики теплового удара, ползучести и усталостной прочности вольфрамовых тиглей путем моделирования реальных условий использования (например, высокотемпературных циклов, длительных нагрузок). Эти испытания гарантируют надежность и долговечность тигля в экстремальных условиях, таких как температура выше 2000 °C.

Требования к оборудованию:

Печь для испытаний на тепловой удар: диапазон температур от 25°C до 2600°C, скорость нагрева > 100°C/с, оснащена системой быстрого охлаждения.

Тестер ползучести: применяет постоянное напряжение (от 10 до 100 МПа), температуру от 1800°C до 2300°C, точность перемещения $\pm 0,001$ мм.

Усталостная испытательная машина: частота циклического нагружения от 1 до 20 Гц, температура от 1000°C до 2200°C, точность усилия $\pm 0,1$ Н.

Испытательное оборудование: инфракрасный термометр (точность ± 1 °C), лазерный датчик смещения (точность $\pm 0,01$ мм), микроскоп (анализ трещин).

Параметры детектирования

Испытание на тепловой удар:

Перепад температур: от 1000°C до 2000°C (например, от 2000°C до 25°C в быстром цикле).

Количество циклов: от 50 до 1000 циклов, в зависимости от требований приложения.

Обнаружение трещин: оптический микроскоп или проникание красителем, длина трещины < 0,1 мм квалифицирована.

Окружающая среда: Вакуум или инертный газ (аргон, содержание кислорода < 5 ppm).

Испытание на ползучесть:

Напряжение: от 20 до 100 МПа, моделируемая реальная нагрузка.

Температура: от 1800°C до 2300°C, близкая к условиям использования.

Наработка: от 100 до 2000 часов, измеряемая скорость деформации (< 0,1% квалифицированно).

Атмосфера: вакуум или аргон для предотвращения окисления.

Испытание на усталость:

Циклическое напряжение: от ± 50 до ± 200 МПа, имитирует термическое циклическое нагружение.

Температура: от 1000°C до 2200°C.

Количество циклов: от 10^4 до 10^7 раз, обнаружение усталостных трещин (< квалификация 0,05 мм).

Частота: от 5 до 10 Гц, баланс эффективности и точности.

Технологические преимущества

Реалистичное моделирование: условия испытаний приближены к фактическим условиям использования и прогнозируют срок службы тигля.

Оптимизация производительности: Данные испытаний помогают усовершенствовать процесс для улучшения теплового удара и сопротивления ползучести.

Проверка надежности: Убедитесь, что тигель соответствует строгим требованиям аэрокосмической и атомной промышленности.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Поддержка данных: предоставление количественных показателей (таких как скорость ползучести, усталостная долговечность) для упрощения оценки заказчиком.

Технические проблемы

Высокие требования к оборудованию: Оборудование для высокотемпературных испытаний должно выдерживать температуру 2600 °C, а затраты на производство и техническое обслуживание высоки.

Длительные циклы испытаний: Испытания на ползучесть и усталость могут занять от нескольких недель до нескольких месяцев, что влияет на производительность.

Контроль окружающей среды: Необходимо строго контролировать работу высокотемпературного вакуума или инертной атмосферы для предотвращения окисления или загрязнения.

Интерпретация данных: Сложные тестовые данные должны быть профессионально проанализированы, что увеличивает техническую сложность.

3.7.5 Система сертификации качества и прослеживаемости

Принцип процесса

Система сертификации качества и прослеживаемости гарантирует, что производство, тестирование и поставка вольфрамовых тиглей соответствуют международным и отраслевым стандартам (таким как ISO 9001, GB/T 3459-2022) путем создания стандартизированного процесса управления качеством и механизма отслеживания продукции. Система прослеживаемости записывает информацию на каждом этапе, от сырья до готовой продукции, что упрощает устранение неполадок, повышает качество и доверие клиентов.

Оборудование и инструменты

Система управления качеством: цифровая платформа на основе ISO 9001:2015, которая записывает данные о производстве, контроле и доставке.

Система прослеживаемости: штрих-код, QR-код или RFID-метка с партией, параметрами процесса и результатами испытаний тигля.

Инструменты анализа данных: программное обеспечение для статистического управления технологическим процессом (SPC) для анализа колебаний качества и тенденций дефектов.

Система документооборота: электронное архивирование производственных записей, протоколов испытаний, сертификационных документов и отзывов клиентов.

Технология блокчейн: Некоторые предприятия используют блокчейн для обеспечения невозможности подделки данных и повышения достоверности отслеживаемости.

Параметры реализации

Критерии аккредитации:

ISO 9001:2015 (Система менеджмента качества).

ISO 14001:2015 (Система экологического менеджмента).

GB/T 3459-2022 (технические требования к вольфрамовым тиглям).

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

ASTM B760-07 (Стандартная спецификация на вольфрамовые изделия).

Прослеживаемость:

Сырье: партия вольфрамового порошка, поставщик, химический состав, гранулометрический состав.

Параметры процесса: температура спекания, допуски на обработку, условия постобработки.

Результаты испытаний: размер, неразрушающий контроль, химический состав, высокотемпературные показатели.

Информация о доставке: имя клиента, дата поставки, номер партии.

Срок хранения данных: 5 лет для повседневных приложений и более 10 лет для высокотехнологичных приложений (например, в атомной промышленности).

Периодичность аудита: внутренний аудит каждые 6 месяцев, внешний аудит один раз в год, независимый сертификационный обзор каждые 3 года.

Технологические преимущества

Соответствие требованиям: Соответствие международным и национальным стандартам и повышение конкурентоспособности на рынке.

Прозрачность: Прослеживаемость всего процесса повышает доверие клиентов и способствует быстрому выявлению проблем с качеством.

Непрерывное совершенствование: анализ SPC выявляет узкие места технологического процесса и оптимизирует эффективность и качество производства.

Цифровое управление: электронные системы сокращают количество ручных ошибок и повышают надежность данных.

Технические проблемы

Управление данными: Крупномасштабное производство требует эффективных систем хранения, поиска и анализа данных.

Затраты на внедрение: Инвестиции и обслуживание систем сертификации, прослеживаемости и оцифровки обходятся дорого.

Сотрудничество между отделами: Прослеживаемость должна охватывать цепочку поставок, производство и инспекцию, а управление является сложным.

Безопасность данных: необходимо предотвратить утечку или фальсификацию данных, а внедрить технологию блокчейн сложно.

3.8 Передовая технология изготовления вольфрамового тигля

С развитием Индустрии 4.0 и интеллектуального производства технологии производства вольфрамовых тиглей развиваются в направлении высокой точности, высокой эффективности и экологичности. Передовые производственные технологии значительно улучшили производительность тигля, производительность и возможности настройки за счет внедрения аддитивного производства, лазерной обработки, микро-нанопроизводства и интеллектуальных производственных систем. В этой главе мы подробно обсудим аддитивное

производство (3D-печать), лазерное плавление и плазменное напыление, технологию микро-нанопроизводства, интеллектуальное производство и приложения Индустрии 4.0 в сочетании с практикой глобальных компаний, производящих вольфрам, и отраслевой информацией Chinatungsten Online, а также всесторонне анализируем принципы, оборудование, параметры, преимущества и проблемы этих технологий.

3.8.1 Аддитивное производство (напечатанный на 3D-принтере вольфрамовый тигель)

Принцип процесса

Аддитивное производство (3D-печать) напрямую создает вольфрамовые тигли со сложной геометрией путем нанесения вольфрамового порошка или материалов из вольфрамового сплава слой за слоем. В отличие от традиционной порошковой металлургии и механической обработки, 3D-печать не требует пресс-форм и позволяет быстро создавать прототипы сложных структур, таких как ребра жесткости полостей или пористые конструкции. К распространенным методам относятся селективное лазерное плавление (SLM), электронно-лучевое плавление (EBM) и струйная обработка связующим.

Требования к оборудованию:

Оборудование SLM: мощный волоконный лазер (от 500 Вт до 2 кВт) с камерой в среде инертного газа.

Оборудование EBM: мощность электронного луча от 3 до 6 кВт, вакуумная среда (до 10^{-4} Па).

Оборудование для впрыска связующего: высокоточное сопло (разрешение < 50 мкм) с печью для спекания.

Система обработки порошка: система просеивания и восстановления для обеспечения равномерного размера частиц порошка (от 10 до 50 мкм).

Контрольно-измерительное оборудование: компьютерный томограф (для выявления внутренних дефектов), лазерный профилограф (для проверки геометрической точности).

Технологические параметры

Над уровнем моря:

Мощность лазера: от 500 до 1000 Вт.

Скорость сканирования: от 0,5 до 2 м/с.

Толщина слоя: от 20 до 50 мкм.

Атмосфера: Аргон, содержание кислорода < 100 ppm.

EBM:

Мощность электронного луча: от 3 до 5 кВт.

Скорость сканирования: от 1 до 5 м/с.

Толщина слоя: от 50 до 100 мкм.

Вакуум: от 10^{-4} до 10^{-5} Па.

Струйка связующего:

Скорость впрыска связующего: от 10 до 50 пл/капля.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Температура спекания: от 1800°C до 2200°C.

Время спекания: от 4 до 8 часов.

Атмосфера: вакуумная или водородная.

Технологические преимущества

Сложная геометрия: могут быть изготовлены тигли специальной формы, которые трудно получить с помощью обычных процессов (например, встроенные каналы охлаждения).

Эффективность использования материала: Коэффициент извлечения порошка >95%, сокращение отходов сырья.

Быстрое прототипирование: от проектирования до готового продукта требуется всего несколько дней, что подходит для настройки небольших объемов.

Оптимизация производительности: Градиентный дизайн материала может улучшить локальные свойства (например, коррозионную стойкость внутренней стенки).

Технические проблемы

Плотность: Плотность напечатанных на 3D-принтере тиглей (<99%) немного ниже, чем при традиционном спекании, и должна быть оптимизирована для последующей обработки.

Качество поверхности: Шероховатость напечатанной поверхности (Ra от 5 до 20 мкм) должна быть обработана или отполирована.

Стоимость оборудования: SLM и EBM оборудование имеют высокие инвестиции и высокие эксплуатационные расходы.

Требования к порошку: требуется ультратонкий, сферический вольфрамовый порошок (<20 мкм), что увеличивает стоимость материала.

3.8.2 Лазерное плавление и плазменное напыление

Принцип процесса

При лазерном плавлении и плазменном напылении высокоэнергетический источник тепла используется для нанесения функциональных покрытий на поверхность вольфрамовых тиглей или ремонта локальных дефектов, улучшая их стойкость к истиранию, окислению и коррозии. При лазерном плавлении используется лазерный луч для плавления вольфрамового порошка или порошка сплава с образованием покрытия; При плазменном напылении порошок распыляется на поверхность через плазменную дугу, создавая толстое покрытие.

Требования к оборудованию:

Оборудование для лазерного плавления: волоконные лазеры (от 1 до 10 кВт) с пятиосевым каскадом движения.

Оборудование для плазменного напыления: Плазменный пистолет (мощность от 40 до 100 кВт) с системой подачи порошка.

Система обработки порошков: просеивающее и сушильное оборудование, обеспечивающее размер частиц порошка от 10 до 100 мкм.

Испытательное оборудование: толщиномер покрытия (точность $\pm 1\mu\text{m}$), тестер на царапины

(испытание на адгезию).

Контроль атмосферы: Камера инертного газа (аргона или гелия) с содержанием кислорода < 50 ppm.

Технологические параметры

Лазерное слияние:

Мощность лазера: от 2 до 5 кВт.

Скорость сканирования: от 0,5 до 2 м/мин.

Скорость подачи порошка: от 5 до 20 г/мин.

Толщина покрытия: от 50 до 500 мкм.

Атмосфера: Аргон, содержание кислорода < 100 ppm.

Плазменное напыление:

Мощность плазмы: от 50 до 80 кВт.

Расстояние распыления: от 100 до 200 мм.

Скорость подачи порошка: от 20 до 50 г/мин.

Толщина покрытия: от 100 до 1000 мкм.

Расход газа: аргон 50 л/мин, водород 5 л/мин.

Технологические преимущества

Высокоэффективные покрытия: покрытия SiC или WC, сформированные методом лазерного плавления, имеют твердость HV 2500, а покрытия MoSi₂, подвергнутые плазменному напылению, обладают отличной стойкостью к окислению.

Локальный ремонт: точный ремонт изношенных или треснувших участков для продления срока службы тигля.

Универсальность: подходит для широкого спектра материалов покрытий (например, вольфрамовый сплав, керамика).

Быстрый процесс: время нанесения однослойного покрытия составляет <1 час, что подходит для крупносерийного производства.

Технические проблемы

Адгезия: Разница в коэффициенте теплового расширения между покрытием и вольфрамовой подложкой может привести к скололиванию, и граница раздела нуждается в оптимизации.

Термическое напряжение: Высокоэнергетические источники тепла могут вызвать образование микротрещин в подложке, поэтому поступление тепла необходимо контролировать.

Шероховатость поверхности: Покрытие плазменным напылением Ra > 10μm, требуется вторичная обработка.

Высокая стоимость: инвестиции в лазерное и плазменное оборудование большие, порошковые материалы дорогие.

3.8.3 Технология микропроизводства

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Принцип процесса

В микропроизводстве используется лазерная микрообработка, ионно-лучевое травление или химическое осаждение из газовой фазы (CVD) для изготовления микроразмерных (от 1 до 100 мкм) или наноразмерных (<1 мкм) структур на поверхности вольфрамовых тиглей, таких как микропереходы, микроканалы или нанопокрывтия. Эти структуры улучшают тепловое излучение, смачиваемость или противообрастающие свойства тиглей, что делает их особенно подходящими для полупроводниковых и оптических применений.

Требования к оборудованию:

Фемтосекундные лазеры: ширина импульса < 500 фс, мощность от 1 до 5 кВт, для микрообработки.

Устройства с сфокусированным ионным пучком (FIB): энергия ионов от 10 до 50 кэВ, разрешение < 10 нм.

Оборудование для нанесения нанопокрывтий: низкотемпературная система CVD (от 400°C до 800°C) для нанесения нанопокрывтий.

Оборудование для детектирования: атомно-силовой микроскоп (АСМ, разрешение < 0,1 нм), СЭМ (наблюдение за микро-наноструктурами).

Чистое помещение: класс ISO 5 (класс 100) для предотвращения загрязнения твердыми частицами.

Технологические параметры

Фемтосекундная лазерная микрообработка:

Длительность импульса: от 100 до 500 фс.

Мощность: от 1 до 3 кВт.

Скорость сканирования: от 0,1 до 1 м/с.

Размер элемента: от 1 до 50 мкм (микроканалы или микролунки).

Ионно-лучевое травление:

Энергия ионов: от 20 до 40 кэВ.

Плотность луча: от 0,1 до 1 А/см².

Глубина травления: от 0,1 до 10 мкм.

Вакуум: ниже 10⁻⁶ Па.

Нано-CVD-покрытие:

Температура: от 400°C до 600°C.

Прекурсор: SiH₄ (покрытие на основе SiC) или WF₆ (покрытие на основе вольфрама).

Толщина покрытия: от 10 до 100 нм.

Атмосфера: низкое давление (10⁻¹ Па).

Технологические преимущества

Преимущества: Микропористая структура повышает эффективность теплового излучения, а нанопокрывтия улучшают противообрастающие характеристики.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Высокая точность: фемтосекундный лазер и FIB позволяют достичь субмикронной точности обработки.

Индивидуализация: Конкретные микроструктуры (например, оптические отражатели) могут быть спроектированы в соответствии с требованиями приложения.

Технические проблемы

Эффективность обработки: Скорость обработки Micro-nano низкая, подходит для небольших площадей или приложений с высокой добавленной стоимостью.

Стоимость оборудования: Фемтосекундный лазер и оборудование FIB имеют высокие инвестиционные и сложные эксплуатационные расходы.

Повреждение поверхности: Ионно-лучевое травление может привести к образованию кристаллических дефектов, требующих последующей обработки.

Требования к чистоте: Для микро-нанобработки требуется сверхчистая среда, что увеличивает эксплуатационные расходы.

3.8.4 Интеллектуальное производство и приложения Индустрии 4.0

Принцип процесса

Интеллектуальное производство и Индустрия 4.0 оптимизирует производственный процесс вольфрамовых тиглей с помощью Интернета вещей (IoT), искусственного интеллекта (ИИ), анализа больших данных и технологий автоматизации, а также реализует цифровое управление всей цепочкой от проектирования до поставки. Эти технологии повышают производительность, стабильность качества и контроль процесса, снижая при этом энергопотребление и процент брака.

Оборудование и инструменты

Система Интернета вещей: датчики (температуры, давления, перемещения) и промышленная интернет-платформа для сбора производственных данных в режиме реального времени.

Система искусственного интеллекта: модели машинного обучения для оптимизации параметров процесса и прогнозирования отказов оборудования.

Средства автоматизации: шестиосевой робот (для погрузочно-разгрузочных работ, обработки), автоматическая система загрузки и разгрузки.

Платформа цифровых двойников: моделирование производственного процесса тигля и оптимизация конструкции и процесса.

Инструменты анализа больших данных: системы анализа на основе Hadoop или Spark, которые обрабатывают терабайты производственных данных.

Параметры реализации

Интернет вещей:

Количество датчиков: от 10 до 50 на устройство, частота дискретизации от 1 Гц до 1 кГц.

Передача данных: 5G или Industrial Ethernet с задержкой < 10 мс.

Хранение данных: Облачное хранилище, емкостью > 1 ПБ, хранится более 5 лет.

Оптимизация искусственного интеллекта:

Тип модели: глубокая нейронная сеть (DNN) или обучение с подкреплением (RL).

Обучающие данные: $>10^5$ технологические записи, охватывающие температуру, давление, частоту дефектов.

Цель оптимизации: $< 0,5\%$ процента брака и снижение энергопотребления на 10%.

Автоматизация:

Точность робота: $\pm 0,01$ мм (обработка), $\pm 0,05$ мм (обработка).

Время цикла: от 5 до 10 минут на тигель.

Уровень автоматизации: $>80\%$ (ключевые процессы).

Цифровой двойник:

Точность моделирования: геометрическая погрешность $< 0,1$ мм, погрешность производительности $< 5\%$.

Частота обновления: в реальном времени (< 1 секунда) или пакетно (ежечасно).

Диапазон моделирования: от прессования порошка до постобработки.

Технологические преимущества

Эффективное производство: автоматизация и оптимизация на основе искусственного интеллекта повышают эффективность производства на 20–30%.

Стабильное качество: Интернет вещей и аналитика больших данных снизили процент брака до менее чем 0,3%.

Профилактическое обслуживание: искусственный интеллект прогнозирует отказы оборудования и сокращает время простоя на 80%.

Гибкая настройка: цифровой двойник поддерживает быструю итерацию проекта в соответствии с индивидуальными потребностями клиентов.

Технические проблемы

Интеграция технологий: Интернет вещей, искусственный интеллект и автоматизация должны быть бесшовно интегрированы, а системы сложны.

Безопасность данных: производственные данные должны быть защищены от утечки, а также требуется расширенное шифрование и контроль доступа.

Стоимость внедрения: Инвестиции в интеллектуальную производственную систему велики, и малым и средним предприятиям трудно их одержать.

Подготовка кадров: необходимо возвращать междисциплинарные таланты, которые владеют технологиями ИИ и Индустрии 4.0.



Вольфрамовый тигель CTIA GROUP LTD

Глава 4 Технология и инновации в производстве вольфрамовых тиглей

Технология производства вольфрамового тигля быстро развивается в направлении автоматизации, интеллекта, экологичности и высокой производительности для удовлетворения строгих потребностей полупроводниковой, аэрокосмической, атомной промышленности и других областей. В этой главе будут подробно рассмотрены вопросы автоматизации и интеллектуального производства, энергосбережения и защиты окружающей среды, экономики замкнутого цикла и управления ресурсами вольфрамового тигля, а также изучение передовых технологий в сочетании с практическим опытом мировых компаний по производству вольфрама и отраслевой информацией, предоставленной Chinatungsten Online, и всесторонне проанализированы принципы, оборудование, параметры. Преимущества и проблемы этих технологий.

4.1 Автоматизация вольфрамового тигля и интеллектуальное производство

Компания Automation & Intelligent Production значительно повысила эффективность производства, стабильность качества и управляемость процессом вольфрамовых тиглей за счет внедрения станков с ЧПУ, робототехники, Интернета вещей (IoT), искусственного интеллекта (ИИ) и принятия решений на основе данных. Эти технологии лежат в основе концепции «Индустрия 4.0» в вольфрамовой промышленности.

4.1.1 Обработка с ЧПУ и роботизированная автоматизация

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Принцип процесса

При обработке с числовым программным управлением (ЧПУ) используются высокоточные станки с компьютерным управлением для токарной обработки, фрезерования, сверления и шлифования вольфрамовых тиглей для обеспечения геометрической точности и качества поверхности. Роботизированная автоматизация автоматизирует обработку материалов, загрузку и выгрузку заготовок, помощь в обработке и контроль с помощью шестиосевых роботов или коллаборативных роботов (коботов), сокращая ручное вмешательство и повышая эффективность производства.

Требования к оборудованию:

Станки с ЧПУ: 5- или 7-осевые обрабатывающие центры с алмазными или кубическими инструментами из нитрида бора (CBN), скорость вращения шпинделя от 5 000 до 20 000 об/мин и точность позиционирования $\pm 0,001$ мм.

Роботизированная система: Шестиосевой робот (нагрузка от 5 до 50 кг) с системой визуального распознавания (разрешение $< 0,1$ мм) и датчиками контроля силы (точность $\pm 0,1$ Н).

Автоматизированная сборочная линия: встроенная система загрузки и разгрузки, конвейерная лента и приспособление, время цикла от 5 до 15 секунд на штуку.

Испытательное оборудование: лазерный дальномер (точность $\pm 0,01$ мм) и координатно-измерительная машина (КИМ, точность $\pm 0,001$ мм).

Технологические параметры

Обработка на станках с ЧПУ:

Скорость резки: от 10 до 50 м/мин (высокая твердость вольфрама требует высокого крутящего момента на низкой скорости).

Подача: от 0,02 до 0,2 мм/об

Глубина реза: от 0,1 до 0,5 мм для предотвращения микротрещин.

Охлаждающая жидкость: масляная среда высокого давления с расходом от 20 до 40 л/мин.

Роботизированная автоматизация:

Скорость обработки: от 0,5 до 2 м/с, точность $\pm 0,05$ мм.

Визуальное распознавание: время обработки составляет $< 0,1$ секунды, а коэффициент распознавания $> 99,5\%$.

Усилие смыкания: от 50 до 500 Н, подходит для тиглей разных размеров.

Уровень автоматизации: 90% $>$ ключевых процессов.

Технологические преимущества

Высокая точность: обработка с ЧПУ контролирует допуск на размеры на уровне $\pm 0,01$ мм, что соответствует требованиям полупроводниковой промышленности.

Эффективность: роботизированная автоматизация сокращает время цикла на 30–50 процентов.

Стабильность: Автоматизация снижает количество человеческих ошибок и повышает согласованность партии до 99,8%.

Безопасность: Роботы заменяют опасные процессы (например, высокотемпературную обработку) и снижают профессиональные риски.

Технические проблемы

Стоимость оборудования: Инвестиции в пятиосевые ЧПУ и роботизированные системы высоки, что трудно позволить себе малым и средним предприятиям.

Сложное программирование: ЧПУ и роботы должны быть настроены для увеличения времени разработки.

Сложность обслуживания: Высокоточное оборудование нуждается в регулярной калибровке и обслуживании, а технические требования высоки.

Адаптивность: Сложная конструкция автоматизированных приспособлений для тиглей небольшой или специальной формы.

4.1.2 Цифровизация производственных линий и интеграция Интернета вещей

Принцип процесса

Цифровая производственная линия соединяет оборудование, датчики и системы управления с помощью технологии IoT для сбора и анализа производственных данных (таких как температура, давление и размер) в режиме реального времени для мониторинга и оптимизации всего процесса. Интеграция с Интернетом вещей обеспечивает возможность подключения устройств, обмена данными и удаленного управления для повышения прозрачности и контроля производства.

Требования к оборудованию:

Датчики IoT: датчики температуры (точность $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$), давления ($\pm 0,1$ кПа), смещения ($\pm 0,01$ мм), частота дискретизации от 1 Гц до 10 кГц.

Платформа промышленного интернета: поддержка 5G или промышленного Ethernet, задержка передачи данных < 5 мс.

Периферийные вычислительные устройства: обрабатывайте данные в режиме реального времени с вычислительной мощностью > 10 терафлопс.

Система хранения данных: облачный или локальный сервер, емкость > 1 ПБ, срок хранения данных > 5 лет.

Система визуализации: панель мониторинга в режиме реального времени, разрешение 4K, поддержка многотерминального доступа.

Технологические параметры

Развертывание датчиков: от 10 до 50 датчиков на машину, охватывающих процессы спекания, обработки и контроля.

Сбор данных: частота дискретизации от 1 до 100 Гц (обычная), 1 кГц (высокодинамичный процесс).

Скорость передачи: > 100 Мбит/с для обеспечения производительности в режиме реального

времени.

Обработка данных: задержка периферийных вычислений < 10 мс, а цикл облачного анализа < 1 минуту.

Надежность системы: коэффициент онлайн-работы оборудования составляет > 99,9%, а целостность данных > 99,99%.

Технологические преимущества

Мониторинг в режиме реального времени: собираются все данные процесса, а время обнаружения аномалий составляет <1 секунду.

Прозрачное управление: статус производства визуализируется в режиме реального времени, а менеджеры могут принимать решения удаленно.

Повышение эффективности: Интернет вещей оптимизирует планирование ресурсов и повышает эффективность производства на 20–30%.

Прослеживаемость качества: запись данных поддерживает прослеживаемость дефектов, а время позиционирования сокращается на 70%.

Технические проблемы

Безопасность данных: для предотвращения утечки требуется расширенное шифрование (например, AES-256) и контроль доступа.

Системная интеграция: протокол мультибрендовых устройств не унифицирован и требует настраиваемых интерфейсов.

Зависимость от сети: сбои в работе сетей 5G или Ethernet могут повлиять на производительность в режиме реального времени.

Затраты на внедрение: Развертывание датчиков и облачных платформ требует больших первоначальных инвестиций.

4.1.3 Применение искусственного интеллекта в оптимизации процессов

Принцип процесса

Искусственный интеллект (ИИ) анализирует производственные данные с помощью машинного обучения (ML), глубокого обучения (DL) и обучения с подкреплением (RL) для оптимизации параметров процесса, прогнозирования отказов оборудования и улучшения контроля качества. ИИ определяет наилучшую комбинацию ключевых переменных, таких как температура спекания, допуски обработки и т. д., снижая затраты на метод проб и ошибок.

Требования к оборудованию:

Вычислительная платформа AI: GPU кластер (вычислительная мощность > 100 TFLOPS) или TPU для запуска моделей ML/DL.

Система сбора данных: высокочастотный датчик (выше 1 кГц) для сбора таких данных, как температура, давление, частота дефектов и т. д.

Инструменты разработки моделей: TensorFlow, PyTorch или AutoML, которые поддерживают быструю итерацию.

Интерфейс взаимодействия человека с компьютером: поддержка рекомендации параметров

процесса и аномальной тревоги, время отклика составляет $< 0,5$ секунды.
Хранение данных: поддержка $>10^5$ записей процессов, срок хранения > 5 лет.

Технологические параметры

Типы моделей: сверточная нейронная сеть (CNN, анализ изображений), рекуррентная нейронная сеть (RNN, временные ряды), обучение с подкреплением (оптимизация процессов).

Обучающие данные: записи $>10^6$, охватывающие спекание, обработку, тестирование и другие процессы.

Цели оптимизации:

Процент брака: $<0,3\%$.

Потребление энергии: снижение на 10-20%.

Эффективность производства: повышение на 15-25%.

Точность прогнозирования: коэффициент прогнозирования сбоев составляет $>95\%$, а ошибка оптимизации параметров — $<1\%$.

Частота обновления: модель обновляется еженедельно или ежемесячно для адаптации к новым данным.

Технологические преимущества

Оптимизация процесса: ИИ рекомендует оптимальную температуру спекания и параметры обработки, а процент брака снижается до 0,2%.

Профилактическое обслуживание: Прогнозирование отказов оборудования сокращает время простоя до 80%.

Адаптивное управление: Корректируйте процесс в режиме реального времени в ответ на изменения в сырье или окружающей среде.

Экономия средств: оптимизируйте энергопотребление и использование материалов, снижая производственные затраты на 10–15 процентов.

Технические проблемы

Качество данных: Требуется высококачественные, многомерные данные, а стоимость сбора высока.

Сложные модели: обучение моделей глубокого обучения требует больших вычислительных мощностей и времени.

Интерпретируемость: Рекомендуемые ИИ параметры должны быть проверены инженерами для обеспечения надежности.

Технические барьеры: для разработки ИИ требуются междисциплинарные команды, что затрудняет внедрение для малых и средних предприятий.

4.1.4 Производственные решения на основе данных

Принцип процесса

При принятии производственных решений на основе данных используется анализ больших данных и статистическое управление процессами (SPC) для анализа производственных

данных (например, размера, процента дефектов, энергопотребления) из производственных данных в режиме реального времени для улучшения процессов, распределения ресурсов и управления качеством. Эти решения повышают производительность, снижают затраты и обеспечивают качество продукции.

Требования к оборудованию:

Платформа больших данных: на базе Hadoop или Spark обрабатывает терабайты данных с временем анализа < 1 час.

Программное обеспечение SPC: Minitab или JMP, анализ колебаний качества, точность графика управления $\pm 0,01\%$.

Инструменты визуализации данных: Tableau или Power BI для создания отчетов и контрольных диаграмм в режиме реального времени.

Система облачных вычислений: AWS или Azure, которая поддерживает хранение данных на уровне петабайт и параллельные вычисления.

Система поддержки принятия решений (DSS): интегрирует искусственный интеллект и SPC для предоставления рекомендаций по автоматизированному принятию решений.

Технологические параметры

Типы данных: допуски по размерам, процент брака, энергопотребление, рабочее состояние оборудования, характеристики сырья.

Частота: в реальном времени (<1 секунда) или пакетная (ежечасная или ежедневная).

Контрольный предел: верхний и нижний предел SPC (например, $\pm 3\sigma$), процент дефектов < 0,5%.

Типы отчетов: диаграмма Парето, контрольная диаграмма, гистограмма, точечная диаграмма.

Цикл принятия решений: в режиме реального времени (критические процессы) или ежедневно (сводный анализ).

Технологические преимущества

Точное принятие решений: анализ данных сокращает время обнаружения проблем с качеством на 60%.

Оптимизация ресурсов: увеличение использования оборудования и сырья на 15–20 процентов.

Улучшение качества: SPC контролирует уровень брака партии ниже 0,3%.

Динамическая корректировка: данные в режиме реального времени помогают быстро реагировать на изменения рыночного спроса.

Технические проблемы

Интеграция данных: данные из нескольких источников должны быть стандартизированы и сложны в обработке.

Сложность анализа: терабайты данных требуют эффективных алгоритмов и вычислительной мощности.

Требования к персоналу: специалисты по обработке и анализу данных и инженеры должны сотрудничать, а стоимость обучения высока.

Стабильность системы: облачная платформа должна быть высокодоступной, чтобы предотвратить потерю данных.

4.2 Технология энергосбережения и защиты окружающей среды вольфрамовых тиглей

Энергосберегающие и природоохранные технологии снижают энергопотребление и воздействие на окружающую среду при производстве вольфрамовых тиглей за счет оптимизации конструкции печи для спекания, рекуперации отходящего тепла, низкоуглеродного производства и чистых технологий, а также достигают цели «зеленого» производства.

4.2.1 Проектирование высокоэффективной печи для спекания

Принцип процесса

Высокоэффективные печи для спекания снижают потери тепла и повышают энергоэффективность за счет оптимизации нагревательных элементов, изоляции и систем контроля температуры. В современных печах для спекания используются моделируемые тепловые поля и интеллектуальное управление для обеспечения однородности температуры и минимального потребления энергии.

Требования к оборудованию:

Нагревательный элемент: вольфрам или графит высокой чистоты, устойчивый к 2600°C, срок службы > 5000 часов.

Теплоизоляция: диоксид циркония (ZrO_2) или композиты из углеродного волокна, теплопроводность < 0,1 Вт/м·К.

Контроль температуры: ПИД-регулятор, точность $\pm 1^\circ C$, встроенный инфракрасный термометр.

Вакуумная система: турбомолекулярный насос, степень вакуума 10^{-5} Па, предотвращает окисление.

Программное обеспечение для моделирования: ANSYS или COMSOL для моделирования тепловых полей и распределения энергии.

Технологические параметры

Температура спекания: от 1800°C до 2400°C, контролируемый градиент ($\pm 5^\circ C$).

Скорость нагрева: от 5 до 15°C/мин, баланс эффективности и напряжения.

Время выдержки: от 2 до 12 часов, в зависимости от размера тигля.

Энергопотребление: 10 кВтч на килограмм вольфрамового < (высокоэффективная печь), от 15 до 20 кВтч для обычных печей.

Тепловой КПД: >80%, оптимизирован по теплоизоляции и тепловому полю.

Технологические преимущества

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Низкое энергопотребление: высокоэффективные печи для спекания снижают потребление энергии на 20–30 процентов.

Высокая однородность: отклонение теплового поля $< 10^{\circ}\text{C}$, снижение частоты дефектов.

Длительный срок службы: на 50% больше срок службы нагревательных элементов и изоляции.

Экологичность: сокращение потребления электроэнергии и выбросов в соответствии со стандартами экологичного производства.

Технические проблемы

Стоимость оборудования: Высокие инвестиции в высокоэффективную печь для спекания, срок окупаемости от 3 до 5 лет.

Сложное проектирование: Моделирование теплового поля требует профессиональной команды и поддержки программного обеспечения.

Требования к обслуживанию: высокотемпературные изоляционные материалы необходимо регулярно заменять, что является дорогостоящим.

Технические барьеры: необходимо настраивать и развивать передовые системы управления.

4.2.2 Рекуперация отходящего тепла и рециркуляция энергии

Принцип процесса

Рекуперация отходящего тепла улавливает отходящее тепло, образующееся при спекании и обработке, через теплообменники и системы накопления энергии для предварительного нагрева сырья, нагрева чистящих жидкостей или нагрева. Рециркуляция энергии преобразует рекуперированную тепловую энергию в электрическую или механическую энергию, что еще больше снижает потребление энергии.

Требования к оборудованию:

Теплообменник: пластинчатого или трубчатого типа, эффективность теплопередачи $> 90\%$, сопротивление 1000°C .

Система накопления энергии: материал с фазовым переходом (PCM) или аккумулятирование тепла на расплавленных солях с плотностью хранения энергии > 200 кДж/кг.

Термоэлектрические генераторы: исходя из эффекта Зеебека, эффективность преобразования составляет от 10% до 15%.

Система трубопроводов: термостойкая нержавеющая сталь, потери тепла $< 5\%$.

Система управления: контроллер ПЛК, мониторинг теплового потока и распределения энергии в режиме реального времени.

Технологические параметры

Температура отходящего тепла: от 300°C до 1000°C (вытяжка агломерационной печи), от 100°C до 200°C (технологическое охлаждение).

Скорость рекуперации: Теплообменник рекуперировывает от 70% до 90% отработанного тепла.

Время хранения энергии: от 6 до 24 часов для удовлетворения нестабильного спроса.

КПД выработки электроэнергии: от 10% до 12% для термоэлектрических генераторов, генерирующих от 0,1 до 0,2 кВтч на килограмм отработанного тепла.

Срок службы системы: 10 лет > теплообменника, 5000 циклов > материалом для накопления энергии.

Технологические преимущества

Снижение энергопотребления: Рекуперация отработанного тепла снижает общее потребление энергии на 15–25 процентов.

Экономия средств: Снижение счетов за электроэнергию и топливо, срок окупаемости от 2 до 4 лет.

Экологические преимущества: снижение выбросов CO₂, от 0,5 до 1 тонны на тонну вольфрама.

Гибкость: Отработанное тепло можно использовать для различных целей, повышая энергоэффективность.

Технические проблемы

Инвестиции в оборудование: Теплообменники и системы накопления энергии являются дорогостоящими и требуют долгосрочного восстановления.

Потери тепла: потери тепла в трубопроводах и процессах хранения энергии должны быть сведены к минимуму.

Системная интеграция: рекуперация отходящего тепла должна быть бесшовно интегрирована в существующие производственные линии.

Комплексное обслуживание: Высокотемпературные теплообменники необходимо регулярно чистить и осматривать.

4.2.3 Низкоуглеродное производство и «зеленое» производство

Принцип процесса

Низкоуглеродное производство снижает углеродный след при производстве вольфрамовых тиглей за счет использования возобновляемых источников энергии, оптимизации процессов и снижения зависимости от ископаемого топлива. Зеленое производство сочетает в себе чистые технологии и управление окружающей средой для достижения целей в области устойчивого развития.

Требования к оборудованию:

Системы возобновляемой энергетики: солнечная (фотоэлектрическая, КПД >20%) или ветровая (мощность >5 МВт).

Печь для спекания с низким содержанием углерода: электрический нагрев вместо газового, КПД > 90%.

Система улавливания углерода: химическая абсорбция или мембранное разделение, коэффициент улавливания > 80%.

Оборудование для мониторинга окружающей среды: анализатор выбросов (CO₂, NO_x) с

точностью до $\pm 0,1$ ppm.

Система менеджмента ISO 14001: Цифровая платформа, которая регистрирует выбросы углерода и данные об окружающей среде.

Технологические параметры

Энергетический баланс: $>50\%$ возобновляемой энергии и $20\% <$ ископаемое топливо.

Выбросы углекислого газа: 1 тонна CO_2 на тонну вольфрамового $<$ (с низким содержанием углерода), от 2 до 3 тонн при обычном производстве.

Коэффициент улавливания: Системы улавливания углерода улавливают от 80% до 90% выбросов.

Периодичность мониторинга: в режиме реального времени (данные о выбросах), ежемесячно (экологический отчет).

Цикл сертификации: аудит ISO 14001 ежегодно, оценка углеродного следа ежеквартально.

Технологические преимущества

Низкий уровень выбросов: сокращение углеродного следа на $50-70\%$ в соответствии с глобальными целями по сокращению выбросов.

Ценность бренда: Экологичное производство повышает имидж компании и привлекает экологически сознательных клиентов.

Политическая поддержка: В соответствии с политикой углеродной нейтральности, получать субсидии или налоговые льготы.

Устойчивое развитие: сокращение потребления ресурсов и продление срока службы промышленной цепочки.

Технические проблемы

Затраты на энергию: Инвестиции в инфраструктуру возобновляемых источников энергии высоки, а срок окупаемости составляет от 5 до 10 лет.

Технологическая трансформация: Низкоуглеродное оборудование должно трансформировать существующие производственные линии, что повлияет на краткосрочные производственные мощности.

Стоимость улавливания: Системы улавливания углерода дороги в эксплуатации и должны быть оптимизированы для повышения эффективности.

Давление со стороны регулирующих органов: Глобальные стандарты выбросов углерода отличаются, и они должны адаптироваться к требованиям многих стран.

4.2.4 Более чистые технологии производства

Принцип процесса

Более чистые производственные технологии обеспечивают экологически чистое производство за счет сокращения выбросов выхлопных газов, жидких отходов и твердых отходов, а также оптимизации процессов очистки, переработки и последующей обработки. Эти технологии включают в себя нетоксичные чистящие средства, циркуляцию мертвых вод

и высокоэффективные системы фильтрации.

Требования к оборудованию:

Оборудование для очистки: Ультразвуковой очиститель (от 40 до 80 кГц) с использованием нейтральных или биологических чистящих средств.

Система циркуляции воды: очиститель с обратным осмосом (RO) с восстановлением > 95%.

Оборудование для очистки отходящих газов: адсорбция активированным углем или каталитическое сжигание, эффективность очистки > 99%.

Оборудование для переработки твердых бытовых отходов: высокотемпературный мусоросжигательный завод или компрессор, производительность очистки составляет >90%.

Система мониторинга: Мониторинг выбросов в режиме реального времени с точностью до $\pm 0,01$ ppm.

Технологические параметры

Чистящее средство: pH от 6 до 8, биоразлагаемое > 90%.

Коэффициент восстановления воды: >95%, качество очищенной воды < 10 мкСм/см.

Очистка отходящих газов: $\text{NO}_x < 10$ ppm, ЛОС < 5 ppm.

Сокращение твердых отходов: 50 кг на тонну вольфрама < (более чистое производство), 100 кг для обычных >.

Периодичность мониторинга: в режиме реального времени (выхлопные газы, отработанная жидкость), ежедневно (твердые отходы).

Технологические преимущества

Охрана окружающей среды: сокращение сброса отходов на 70-90% в соответствии с экологическими нормами.

Экономия средств: рециркуляция воды и материалов снижает эксплуатационные расходы на 20%.

Здоровье и безопасность: Нетоксичные чистящие средства снижают риски для здоровья на рабочем месте.

Соответствие: Соответствует международным стандартам, таким как REACH и RoHS.

Технические проблемы

Технические затраты: Высокие инвестиции в уборочное оборудование и системы мониторинга.

Адаптация к технологическим процессам: чистящие средства и циркуляционные системы должны быть совместимы с существующими процессами.

Сложное регулирование: Многие страны имеют разные экологические стандарты и должны быть гибкими и адаптируемыми.

Сбалансированная производительность: моющие средства должны быть эффективными и экологически чистыми.

4.3 Экономика замкнутого цикла вольфрамового тигля и управление ресурсами

Экономика замкнутого цикла и управление ресурсами обеспечивают эффективность использования ресурсов и экологическую устойчивость при производстве вольфрамовых тиглей за счет переработки отходов, утилизации газов и жидкостей, оптимизации цепочки поставок и оценки жизненного цикла.

4.3.1 Переработка и повторное использование вольфрамового лома

Принцип процесса

Переработка вольфрамового лома превращает отходы переработки, тигли с истекшим сроком службы и переработанные материалы в вольфрамовый порошок высокой чистоты путем физической сортировки, химической очистки и металлургической обработки, который может быть повторно использован в производстве. Процесс переработки снижает добычу сырья, снижая затраты и воздействие на окружающую среду.

Требования к оборудованию:

Сортировочное оборудование: магнитный сепаратор и вихретоковый сепаратор для отделения вольфрама и других металлов.

Оборудование для химической очистки: резервуар кислотного выщелачивания и ионообменная колонна, чистота > 99,95%.

Металлургическое оборудование: вакуумная плавильная печь или электродуговая печь, температура обработки > 3000°C.

Оборудование для приготовления порошка: шаровая мельница и распылительная сушилка с размером частиц от 5 до 20 мкм.

Оборудование для обнаружения: ICP-MS (примесь < 10 ppm), анализатор размера частиц (точность ± 0,1 мкм).

Технологические параметры

Коэффициент извлечения: >90% (вольфрамовый лом), >95% (лом высокой чистоты).

Чистота: переработанный вольфрамовый порошок >99,95%, примеси (Fe, Ni) < 50 ppm.

Размер частиц: от 5 до 20 мкм, подходит для спекания и 3D-печати.

Энергопотребление: 5 МВтч на тонну вольфрама < восстановлено, 10 МВтч > традиционной добыче.

Время обработки: от 1 до 2 дней на сортировку и очистку, от 3 до 5 дней на металлургическую обработку.

Технологические преимущества

Экономия ресурсов: переработка вольфрама снижает добычу руды на 80-90%.

Снижение затрат: от 50% до 60% от стоимости переработки новых материалов.

Экологические преимущества: сокращение отходов горнодобывающей промышленности и потребления энергии, сокращение выбросов CO₂ на 70%.

Система мертвого контура: позволяет перерабатывать отходы в новые тигли.

Технические проблемы

Контроль примесей: Невольфрамовые элементы в ломе должны быть эффективно удалены.

Технически сложность: химическая очистка и металлургическая обработка требуют точного контроля.

Разнообразие отходов: Состав отходов из разных источников сильно различается, что требует гибких процессов.

Экономичность: Небольшие предприятия по переработке имеют низкую экономию за счет масштаба и нуждаются в централизации.

4.3.2 Переработка отходящих газов и жидких отходов в производственном процессе

Принцип процесса

При очистке выхлопных газов и отходов используются технологии адсорбции, катализа, фильтрации и нейтрализации для удаления загрязняющих веществ (например, NO_x, ЛОС, кислотных отходов), образующихся при спекании, переработке и очистке, чтобы обеспечить соответствие выбросов экологическим стандартам.

Требования к оборудованию:

Очистка отходящих газов: адсорбционная башня с активированным углем (скорость адсорбции >99%), каталитическая печь сгорания (скорость очистки > 98%).

Переработка отходов: реактор нейтрализации (pH от 6 до 8), система мембранной фильтрации (рекуперация > 90%).

Фильтрационное оборудование: высокоэффективный фильтр для твердых частиц (HEPA), размер частиц < 0,3 мкм.

Оборудование для мониторинга: газовый хроматографический масс-спектрометр (ГХ-МС, точность ±0,01 ppm), pH-метр (точность ± 0,01).

Автоматическое управление: система ПЛК, корректировка параметров обработки в режиме реального времени.

Технологические параметры

Выхлопные газы:

NO_x: <10 ppm, ЛОС: <5 ppm.

Скорость очистки: >99% (каталитическое горение), >95% (адсорбция).

Частота излучения: непрерывный мониторинг, ежечасная регистрация.

Отходы щелочного раствора:

pH: от 6,5 до 7,5 (после нейтрализации).

Тяжелые металлы: <0,1 ppm (вольфрам, никель и др.).

Восстановление: >90% (вода), >80% (химикаты).

Расход энергии: <0,5 кВт·ч на тонну выхлопных газов, <1 кВт·ч на тонну отработанного щелока.

Технологические преимущества

Соответствие требованиям по выбросам: Соответствует стандартам EPA, ЕС и GB без экологических штрафов.

Рекуперация ресурсов: вода и химические вещества в отработанной жидкости могут быть использованы повторно, что снижает затраты.

Охрана окружающей среды: сокращение выбросов загрязняющих веществ на 90% и охрана экосистемы.

Автоматическое управление: мониторинг в режиме реального времени снижает трудозатраты и повышает эффективность.

Технические проблемы

Затраты на утилизацию: Высокоэффективное оборудование и высокие затраты на химикаты.

Разнообразие загрязняющих веществ: Состав отходящих газов и отработанных жидкостей в различных процессах сложен, что требует сочетания нескольких технологий.

Требования к мониторингу: Непрерывный мониторинг требует высокоточного оборудования и специалистов.

Техническое обслуживание системы: Фильтры и реакторы необходимо регулярно заменять, что увеличивает эксплуатационные расходы.

4.3.3 Устойчивое управление цепочками поставок

Принцип процесса

Устойчивое управление цепочками поставок снижает углеродный след, потери ресурсов и воздействие на окружающую среду за счет оптимизации закупок сырья, логистики и сотрудничества с поставщиками. Эти меры включают в себя «зеленые» закупки, оптимизацию логистики и экологическую оценку поставщиков.

Оборудование и инструменты

Система управления цепочками поставок: SAP или Oracle SCM для интеграции данных о закупках, запасах и логистике.

Инструменты анализа углеродного следа: SimaPro или GaBi для расчета выбросов углерода в цепочке поставок.

Программное обеспечение для оптимизации логистики: Route4Me или OptimoRoute для планирования транспортных маршрутов с низким уровнем выбросов углерода.

Система экологической оценки: сертифицированная по стандарту ISO 14001 платформа для оценки экологических показателей поставщиков.

Технология блокчейн: записывает происхождение сырья для обеспечения прозрачности и отслеживаемости.

Параметры реализации

«Зеленые» закупки: > 80% сырья поступает из устойчивых источников (например, переработанный вольфрам или минералы с низким содержанием углерода).

Углеродный след: 0,5 тонны CO₂ на тонну < выбросов в цепочке поставок вольфрама.
Эффективность логистики: снижение энергопотребления при транспортировке на 20% и использование транспортных средств на 90% >.
Оценка поставщиков: Ежегодно проводится аудит, экологическая оценка составляет > 85 из 100.
Прозрачность данных: записи блокчейна охватывают 95% > цепочки поставок.

Технологические преимущества

Низкоуглеродные поставки: сокращение выбросов углекислого газа в цепочке поставок на 50–70%.
Оптимизация затрат: от 15% до 20% экономии на логистике и управлении запасами.
Соответствие нормативным требованиям: Соответствие экологическим требованиям для клиентов и нормативным требованиям.
Улучшение бренда: Устойчивая цепочка поставок повышает имидж корпоративной социальной ответственности.

Технические проблемы

Сложная координация: Глобальная цепочка поставок требует многостороннего сотрудничества и сложна в управлении.
Сбор данных: Стандартизировать данные об окружающей среде поставщиков сложно, и необходима единая платформа.
Первоначальная стоимость: высокие инвестиции в «зеленые» закупки и блокчейн-систему.
Различия в регулировании: Экологические стандарты варьируются от страны к стране, что требует гибкости для адаптации.

4.3.4 Оценка жизненного цикла (LCA)

Принцип процесса

Оценка жизненного цикла (LCA) направляет совершенствование процессов и устойчивое проектирование путем количественной оценки воздействия вольфрамовых тиглей на окружающую среду (например, энергопотребления, выбросов, потребления ресурсов) вольфрамовых тиглей от добычи сырья до переработки по окончании срока службы. LCA охватывает этапы сырья, производства, использования и утилизации.

Оборудование и инструменты

Программное обеспечение LCA: SimaPro, GaBi или OpenLCA для многомерных данных.
База данных: Ecoinvent или ELCD, которая предоставляет экологические данные о материалах и энергии.
Вычислительная платформа: высокопроизводительный компьютер, который обрабатывает терабайты данных и анализирует их < 1 день.
Система экологических индикаторов: ReCiPe или TRACI, оценивает углеродный след, водный след и т.д.

Инструменты для создания отчетов: Tableau или Excel для создания LCA-отчетов и диаграмм.

Параметры реализации

Область оценки: от колыбели до могилы, включая добычу, производство, использование, переработку.

Экологические показатели:

Углеродный след: <2 тонны CO₂ на тонну вольфрама.

Энергопотребление: <20 МВтч.

Водный след: < 500 м³.

Источники данных: внутренние данные (80%), база данных Ecoinvent (20%).

Период анализа: ежегодно или по каждому выпуску нового продукта.

Погрешность: Погрешность данных составляет <10%, что подтверждается моделированием методом Монте-Карло.

Технологические преимущества

Комплексная оценка: LCA выявляет горячие точки окружающей среды на протяжении всего жизненного цикла и направляет улучшения.

Поддержка принятия решений: предоставление количественных данных для оптимизации конструкций и процессов.

Соответствие: Соответствует стандартам ISO 14040/14044 и отвечает требованиям заказчика.

Рыночная конкуренция: продукты с низким воздействием на окружающую среду более привлекательны.

Технические проблемы

Сложность данных: многоступенчатый сбор и интеграция данных занимает много времени.

Точность модели: внешняя база данных может отклоняться от фактической ситуации и нуждается в проверке.

Профессиональные требования: LCA требует знаний в области экологии и инженерии, а команда имеет высокий порог.

Высокая стоимость: программное обеспечение, базы данных и аналитика стоят дорого и трудно доступны малым и средним предприятиям.

4.4 Освоение передовых технологий вольфрамового тигля

Изучение передовых технологий способствует прорыву в производительности вольфрамового тигля за счет внедрения наноматериалов, высокоэнтروпийных сплавов, квантовых вычислений и биомиметического производства для удовлетворения потребностей будущих высокотехнологичных приложений.

4.4.1 Нановольфрамовый порошок и ультратонкий вольфрамовый тигель

Принцип процесса

Нанопорошок вольфрама (размер частиц < 100 нм) получают методом осаждения из паровой

фазы или химического восстановления для спекания ультрамелкозернистых вольфрамовых тиглей (зерна < 1 мкм). Ультрамелкозернистая структура повышает прочность, ударную вязкость и стойкость к тепловому удару тигля, что делает его пригодным для экстремальных условий, таких как термоядерные реакторы.

Требования к оборудованию:

Приготовление нанопорошков: реактор химического осаждения из газовой фазы (CVD) при температуре от 800 °C до 1200 °C.

Агломерационное оборудование: Печь горячего изостатического прессования (ГИП) с давлением от 100 до 200 МПа и температурой от 1800°C до 2200°C.

Работа с порошком: ультразвуковой диспергатор для предотвращения агломерации нанопорошка.

Аппаратура детектирования: просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ, разрешение $< 0,1$ нм), анализатор размера частиц (точность ± 1 нм).

Чистое помещение: класс ISO 4 (класс 10) для предотвращения загрязнения нанопорошками.

Технологические параметры

Размер частиц порошка: от 10 до 100 нм, однородность ± 5 нм.

Условия спекания:

Температура: от 1800°C до 2000°C (сниженный рост зерна).

Давление: 150 МПа (НП).

Продолжительность: от 1 до 3 часов.

Размер зерна: от 0,5 до 1 мкм (ультрамелкозернистые), обычные > 10 мкм.

Плотность: $> 99,5\%$, пористость $< 0,1\%$.

Улучшение эксплуатационных характеристик: прочность > 1000 МПа (традиционная < 800 МПа), стойкость к тепловому удару > 1000 циклов.

Технологические преимущества

Высокая производительность: увеличение прочности и ударной вязкости тиглей с ультратонким зерном на 30–50 процентов.

Устойчивость к экстремальным условиям: в 2 раза более устойчива к тепловому удару и радиации, подходит для ядерных применений.

Тонкая структура: нанопорошок поддерживает сложную геометрию и подходит для 3D-печати.

Длительный срок службы: срок службы увеличен на 50%, что снижает стоимость замены.

Технические проблемы

Стоимость порошка: Цена нановольфрамового порошка в 5-10 раз выше, чем у обычного порошка.

Проблема агрегации: нанопорошок легко агломерировать, и для этого требуется специальная технология диспергирования.

Сложность спекания: ультратонкие кристаллы должны точно контролировать температуру и давление, а требования к оборудованию высоки.

Крупномасштабность: Широкомасштабное применение производства нанопорошков и спекания еще не реализовано.

4.4.2 Высокоэнтروпийные сплавы и композитные тигли

Принцип процесса

Высокоэнтропийные сплавы (ГЭА) состоят из пяти или более металлов (например, вольфрама, молибдена, ниобия, тантала, циркония) в соотношениях, близких к эквимоларным, и обладают превосходной термостойкостью, стойкостью к окислению и ползучести. Композитные тигли сочетают в себе вольфрам с керамикой (например, SiC, ZrC) или углеродными материалами (например, графеном) для повышения коррозионной стойкости и термической стабильности.

Требования к оборудованию:

Подготовка сплава: вакуумная дуговая плавильная печь, температура $> 3000^{\circ}\text{C}$, степень вакуума 10^{-5} Па.

Литье композитов: печь для спекания горячим прессом с давлением от 50 до 100 МПа и температурой 2000°C .

Смешивание порошков: планетарная мельница, однородность $\pm 1\%$.

Испытательное оборудование: XRD (фазовый анализ), SEM (микроструктура), высокотемпературная испытательная машина (эксплуатационные испытания).

Обрабатывающее оборудование: станок лазерной резки (точность $\pm 0,01$ мм), шлифовальный станок с ЧПУ (шероховатость поверхности $Ra < 0,1$ мкм).

Технологические параметры

Высокоэнтропийные сплавы:

Состав: W-Mo-Nb-Ta-Zr (молярное соотношение 1:1:1:1:1).

Время плавления: от 3 до 5 раз для обеспечения однородности.

Эксплуатационные характеристики: Прочность > 1500 МПа (2000°C), антиоксидантная температура $> 1800^{\circ}\text{C}$.

Композиты:

Состав: вольфрам + 20% SiC или 5% графен.

Условия спекания: 2000°C , 80 МПа, 2 часа.

Свойства: твердость $> \text{HV } 3000$, теплопроводность > 100 Вт/м·К.

Плотность: $> 99\%$, пористость $< 0,5\%$.

Технологические преимущества

Сверхвысокая производительность: тигли HEA в два раза прочнее тиглей из чистого вольфрама при температуре 2000°C .

Универсальность: Композиты сочетают в себе твердость, теплопроводность и коррозионную стойкость.

Устойчивость к экстремальным условиям: подходит для термоядерной, аэрокосмической и химической промышленности.

Гибкость конструкции: регулируемые соотношения сплавов и композитов в соответствии с конкретными потребностями.

Технические проблемы

Сложность приготовления: НЕА нужно расплавить много раз, а контроль состава сложный.

Проблемы совместимости: композиты имеют большие различия в коэффициентах теплового расширения, что может легко привести к растрескиванию.

Высокая стоимость: Металлы высокой чистоты и нанокерамика стоят дорого.

Сложность обработки: Формование и последующая обработка материалов высокой твердости требуют специальных процессов.

4.4.3 Применение квантовых вычислений в материальном дизайне

Принцип процесса

Квантовые вычисления используют кубиты и квантовые алгоритмы, такие как вариационные квантовые решатели (VQE), для моделирования поведения материалов вольфрамовых тиглей на атомном уровне для оптимизации соотношений сплавов, кристаллических структур и прогнозов производительности. Квантовые вычисления в сотни раз быстрее классических, что ускоряет разработку новых материалов.

Требования к оборудованию:

Квантовые калькуляторы: сверхпроводящие квантовые процессоры (>100 кубитов), такие как IBM Quantum или Google Sycamore.

Классический вычислительный кластер: облегчает обработку данных, с вычислительной мощностью > 1 PFLOPS.

Программное обеспечение для моделирования: Qiskit, Cirq или PennyLane для квантово-классических гибридных вычислений.

База данных: Materials Project, которая предоставляет данные о вольфраме и сплавах.

Испытательное оборудование: источник излучения синхротронного излучения (для проверки результатов моделирования), ПЭМ (структура атомного уровня).

Технологические параметры

Кубиты: от 50 до 200 кубитов с частотой ошибок $<0,1\%$.

Масштаб моделирования: $>10^4$ атомов, время моделирования < 1 час (классические расчеты > 1 неделя).

Алгоритмы: VQE (структурная оптимизация), квантовый метод Монте-Карло (прогнозирование производительности).

Точность: погрешность расчета энергии $< 0,01$ эВ, структурная погрешность $< 0,1$ Å.

Ввод данных: Данные о кристаллической и электронной структуре вольфрама, сплавов и композитов.

Технологические преимущества

Быстрое проектирование: циклы разработки новых материалов были сокращены с нескольких лет до нескольких месяцев.

Высокая точность: погрешность прогнозирования квантового моделирования составляет <1%, что лучше, чем у классических методов.

Сложные системы: моделирование высокоэнтропийных сплавов и наноструктур, раздвигая границы классических вычислений.

Инновации: Ускорьте высокую производительность вольфрамовых тиглей в соответствии с будущими потребностями.

Технические проблемы

Нехватка оборудования: Квантовые калькуляторы ограничены в количестве и дороги в доступе.

Зрелость технологий: квантовые вычисления в настоящее время находятся на ранних стадиях, и количество ошибок необходимо еще больше сократить.

Требования к данным: Для моделирования требуются высококачественные экспериментальные данные, которые трудно получить.

Профессионалы: Квантовые вычисления требуют междисциплинарных знаний в области физики, вычислений и материаловедения.

4.4.4 Биоинспирированные материалы и биомиметическое производство

Принцип процесса

Материалы, вдохновленные биологией, имитируют природные высокоэффективные структуры (например, слоистую структуру раковин, пористую конструкцию костей) для разработки материалов на основе вольфрама с самовосстановлением, легким весом и высокой прочностью. Биомиметическое производство использует 3D-печать и технологию самосборки для репликации биологических структур для создания новых вольфрамовых тиглей.

Требования к оборудованию:

Оборудование для 3D-печати: многокомпонентный SLM-принтер, поддерживающий вольфрамовые и керамические композиты.

Самособирающаяся система: наноманипулятивная платформа для управления структурой молекулярного уровня (точность < 1 нм).

Программное обеспечение для биомиметического проектирования: биомимикрия или САПР для моделирования биологических структур.

Аппаратура детектирования: АСМ (структура поверхности, разрешение < 0,1 нм), микрокомпьютерная томография (внутренняя структура).

Экспериментальное оборудование: высокотемпературная испытательная машина (проверка самовосстанавливающихся характеристик), усталостная испытательная машина.

Технологические параметры

Состав материала: вольфрам + нанокерамика (например, ZrC) или полимеры, соотношение от 10:1 до 5:1.

Параметры печати:

Толщина слоя: от 10 до 50 мкм.

Мощность лазера: от 500 до 1000 Вт.

Скорость печати: от 0,5 до 2 м/с.

Самостоятельная сборка:

Температура: от 25 °C до 100 °C (молекулярная самосборка).

Время: от 1 до 24 часов.

Размер структуры: от 1 нм до 100 мкм.

Производительность:

Прочность: >1200 МПа.

Скорость самовосстановления: >80% (ремонт микротрещин).

Вес: на 10-20% легче чистого вольфрама.

Технологические преимущества

Высокая производительность: Биомиметическая структура увеличивает прочность и ударную вязкость на 30-40%.

Самовосстановление: микротрещины автоматически ремонтируются, а срок службы продлевается в 2 раза.

Легкость: пористые или многослойные конструкции уменьшают вес на 15% и снижают энергопотребление.

Экологичность: биомиметические материалы снижают потребление ресурсов и соответствуют принципу «зеленого» производства.

Технические проблемы

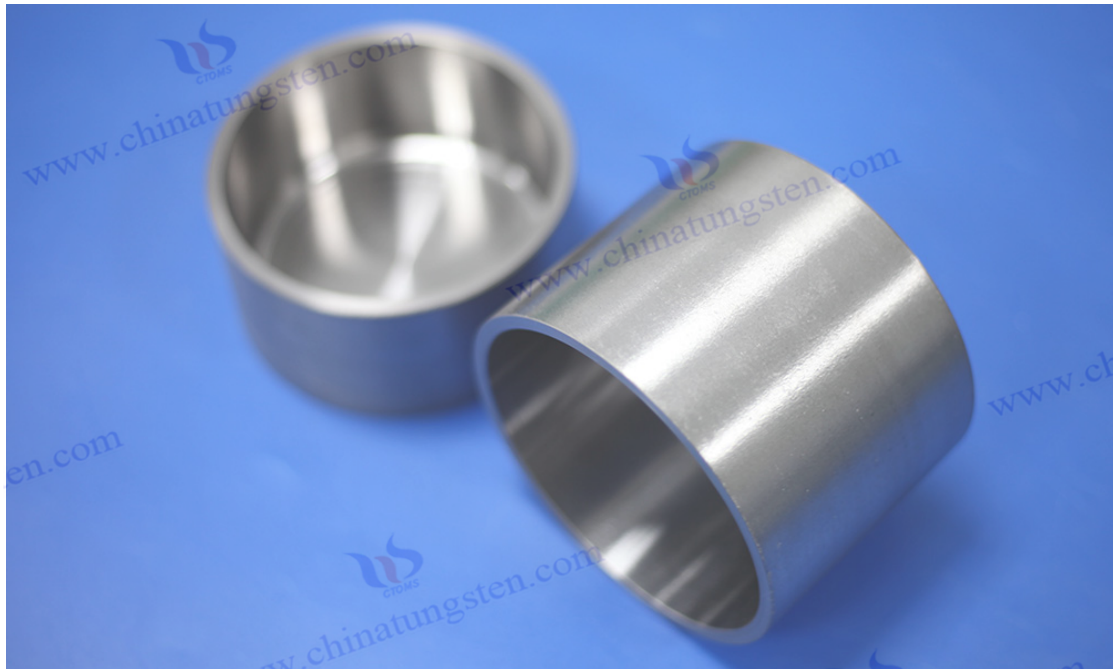
Технически сложность: биомиметическое проектирование и самосборка требуют междисциплинарных технологий.

Сложность изготовления: Точность управления наноразмерной структурой чрезвычайно высока.

Высокая стоимость: инвестиции в оборудование для 3D-печати и самостоятельной сборки велики, а коммерциализация затруднена.

Цикл проверки: Новые материалы нужно долго тестировать, а подача заявки и продвижение идут медленно.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и



Вольфрамовый тигель CTIA GROUP LTD

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of $\geq 99.95\%$ minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

Rare earth metal melting: Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

Vacuum coating: Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

High-temperature furnaces: Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C .

Chemical synthesis: Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

Metal smelting and refining: Used for melting and refining high-purity metals.

Sapphire crystal growth: Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between $2000\text{--}2500^{\circ}\text{C}$.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Глава 5 Применение вольфрамового тигля

Вольфрамовые тигли играют ключевую роль в ряде высокотехнологичных областей благодаря своей высокой температуре плавления (3422°C), отличной термостойкости, коррозионной стойкости и высокой твердости. В этой главе будет подробно рассмотрен широкий спектр применения вольфрамовых тиглей в металлургической, полупроводниковой и электронной промышленности, химической промышленности, научных исследованиях, аэрокосмической и оборонной промышленности, энергетической промышленности, а также в новых и междисциплинарных приложениях, а также представлен глубокий анализ требований к технологическим процессам, показателей эффективности, преимуществ и проблем каждого сценария применения.

5.1 Металлургическая промышленность

Вольфрамовые тигли используются в металлургической промышленности для высокотемпературной плавки, подготовки сплавов и процессов порошковой металлургии для удовлетворения высоких требований к редкоземельным металлам, драгоценным металлам, суперсплавам и формованию металлических порошков. Высокая температура плавления и химическая стабильность делают его незаменимым контейнером в экстремальных условиях.

5.1.1 Выплавка редкоземельных металлов и драгоценных металлов

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для плавления в вакууме или инертной атмосфере редкоземельных металлов (например, лантана, церия, неодима) и драгоценных металлов (например, золота, платины, родия) для обеспечения высокой чистоты и отсутствия загрязнений. Редкоземельные металлы широко используются в магнитных материалах и катализаторах, а драгоценные металлы – в ювелирном деле и промышленном катализе.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая термостойкость: выдерживает от 1800 °C до 2800 °C для предотвращения деформации или плавления тигля.

Химически инертный: не реагирует с расплавленными редкоземельными элементами и драгоценными металлами, примесями, вносимыми < 10 ppm.

Чистота поверхности: Ra<0,1 мкм, снижающая адгезию металла.

Стабильность размеров: коэффициент теплового расширения < $4,5 \times 10^{-6}/K$, отклонение размеров < 0,05мм.

Срок службы: > 50 циклов плавления, однородность толщины стенки $\pm 0,02$ мм.

Технологические преимущества

Высокая чистота: вольфрамовый тигель обеспечивает > чистоту выплавляемого металла 99,99%, что отвечает потребностям высокотехнологичных приложений.

Антикоррозийный: устойчив к сильному восстановлению редкоземельных металлов и

продлевает срок службы.

Эффективная теплопередача: теплопроводность $> 100 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, равномерный нагрев расплава.

Индивидуализация: тигли диаметром от 50 до 500 мм могут быть изготовлены для различных типов печей.

Технические проблемы

Высокотемпературное напряжение: Повторное термическое циклирование может привести к образованию микротрещин, которые требуют оптимизированной термической обработки.

Высокая стоимость: вольфрамовые тигли высокой чистоты стоят дорого, и необходимо сбалансировать производительность и экономичность.

Комплексная очистка: остатки после плавления необходимо очищать в несколько этапов, что увеличивает сложность процесса.

Ограничения по размеру: Очень большие тигли ($> 500 \text{ мм}$) сложны в изготовлении, а их стоимость удваивается.

5.1.2 Производство жаропрочных и суперсплавов

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются в вакуумной индукционной плавке (VIM) или дуговой плавке жаропрочных сплавов (таких как сплавы на основе никеля, кобальта) и суперсплавов для производства лопаток турбин авиационных двигателей, компонентов газовых турбин и т. д. Жаропрочные сплавы плавятся при температуре от $1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а вольфрамовые тигли обеспечивают стабильную высокотемпературную среду.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая термостойкость: выдерживают более 2000°C , стойкость к тепловому удару > 500 циклов.

Антиоксидант: содержание кислорода $< 5 \text{ ppm}$ в атмосфере вакуума или аргона.

Механическая прочность: прочность на разрыв $> 800 \text{ МПа}$, для предотвращения деформации при высоких температурах.

Равномерность толщины стенки: $\pm 0,01 \text{ мм}$, для обеспечения постоянства теплового поля.

Стойкость к истиранию: твердость $> \text{HV } 400$, стойкость к эрозии при расплаве.

Технологические преимущества

Высокая температурная стабильность: вольфрамовый тигель сохраняет структуру нетронутой при температуре $2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а скорость деформации $< 0,1\%$.

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с никелем, кобальтом или добавленными элементами (например, ниобием, танталом).

Длительный срок службы: его можно повторно использовать от 30 до 50 раз, что снижает производственные затраты.

Эффективное производство: поддержка выплавки больших объемов сплавов для удовлетворения потребностей аэрокосмической отрасли.

Технические проблемы

Термическое напряжение: Циклическое воздействие высоких температур приводит к накоплению напряжения, которое необходимо устранить с помощью последующей обработки.

Загрязнение сплава: Следовые количества растворенного вольфрама могут повлиять на свойства жаропрочного сплава, поэтому требуется нанесение покрытия на поверхность.

Сложность производства: Тигли большого размера (>300 мм) нуждаются в прецизионном спекании, а их стоимость высока.

Высокое энергопотребление: Высокотемпературная плавка потребляет много энергии, поэтому необходимо оптимизировать конструкцию теплового поля.

5.1.3 Металлопорошковая металлургия и литье под давлением

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются в процессе спекания металлов порошковой металлургии (PM) и литья металлов под давлением (MIM) для подготовки высокопроизводительных деталей (например, компонентов из вольфрамового сплава, инструментов из карбида вольфрама). Тигель удерживает вольфрамовый порошок или другие металлические порошки при высоких температурах, обеспечивая качество спекания.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая температурная производительность: от 1600°C до 2200°C, стойкость к тепловому удару > 300 циклов.

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с порошками или связующими, примесями < 20 ppm.

Точность размеров: допуск по внутреннему диаметру $\pm 0,02$ мм, подходит для прецизионных форм.

Качество поверхности: $Ra < 0,2$ мкм, для предотвращения адгезии порошка.

Теплопроводность: >120 Вт/м·К, равномерное спекание.

Технологические преимущества

Высокая консистенция: Тигель обеспечивает равномерное тепловое поле с плотностью > 99% спеченных деталей.

Долговечность: он может выдерживать несколько циклов спекания и имеет срок службы > 200 раз.

Гибкость: Поддерживает широкий спектр порошков (например, вольфрам, молибден, кобальт) для различных процессов.

Эффективное производство: сокращение времени спекания и увеличение выхода деталей.

Технические проблемы

Загрязнение порошка: Испарение связующего может загрязнить тигель и требует регулярной очистки.

Тепловое расширение: разница в тепловом расширении между тиглем и порошком может привести к напряжению, и конструкцию необходимо оптимизировать.

Требования к миниатюризации: Трудно изготовить небольшие тигли (<50 мм) для MIM.

Контроль затрат: высокопроизводительные тигли должны сочетать производительность и экономичность.

5.2 Полупроводниковая и электронная промышленность

Вольфрамовые тигли используются в полупроводниковой и электронной промышленности для выращивания кристаллов, получения сложных полупроводников, осаждения тонких пленок и терморегулирования, а их высокая чистота и устойчивость к высоким температурам отвечают строгим требованиям микроэлектронной промышленности к чистоте и стабильности материалов.

5.2.1 Кристаллический рост монокристаллического кремния и сапфира (метод Чохральского, метод Киропулоса)

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются в методах Чохральского (Чехральский) и Киропулоса (Кентукки) для выращивания монокристаллического кремния и сапфира (Al_2O_3), для производства кремниевых пластин (фотовольтаика, интегральные схемы) и сапфировых подложек (светодиоды, лазеры). Тигли подвергаются воздействию высоких температур от 1600°C до 2000°C и коррозии расплава.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Сверхвысокая чистота: чистота вольфрама > 99,999% и примеси < 1 ppb для предотвращения кристаллических дефектов.

Высокая термостойкость: от 1800°C до 2000°C, тепловой удар > 1000 раз.

Обработка поверхности: Ra < 0,05 мкм, уменьшить кристаллические включения.

Стабильность размеров: диаметр от 100 до 500 мм, отклонение толщины стенки $\pm 0,01$ мм.

Коррозионная стойкость: Устойчив к химическому воздействию расплавленного кремния и оксида алюминия.

Технологические преимущества

Кристаллы высокой чистоты: вольфрамовые тигли снижают попадание примесей до 0,1 ppb и < частоту дефектов кристаллов 0,01%.

Длительный срок службы: его можно повторно использовать от 50 до 100 раз, что снижает производственные затраты.

Равномерное тепловое поле: теплопроводность > 110 Вт/м·К для обеспечения равномерного роста кристаллов.

Опора большого размера: удовлетворите потребности 300-миллиметровых кремниевых пластин и крупных сапфировых кристаллов.

Технические проблемы

Высокотемпературная деформация: Длительная высокая температура может привести к микродеформации тигля, поэтому толщина стенки должна быть оптимизирована.

Адгезия кремния: Расплавленный кремний может прилипнуть к тиглям и требует специального покрытия или очистки.

Высокая стоимость: вольфрамовый тигель сверхвысокой чистоты имеет высокую стоимость производства и должен производиться в больших масштабах.

Термическое напряжение: Быстрое повышение и понижение температуры может привести к образованию трещин, поэтому контроль температуры необходимо контролировать поэтапно.

5.2.2 Получение сложных полупроводниковых материалов (GaAs, GaN)

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются в жидкофазной эпитаксии (LPE) или горизонтальной бринелле (HB) для выращивания сложных полупроводников, таких как арсенид галлия (GaAs, чипы 5G), нитрид галлия (GaN, силовые устройства). Тигли должны выдерживать температуру от 1400 °C до 1800 °C и коррозионные расплавы.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с расплавленным галлием, мышьяком или азотом, примесями < 5 ppb.

Высокая температура: от 1500°C до 1800°C, тепловой удар > 500 раз.

Качество поверхности: Ra<0,1µm, для предотвращения дефектов кристаллов.

Точность размеров: допуск по внутреннему диаметру ±0,02 мм, подходит для точного выращивания кристаллов.

Антиокислительный: содержание кислорода < 1 ppm в вакууме или инертной атмосфере.

Технологические преимущества

Кристаллы высокой чистоты: Тигель обеспечивает чистоту GaAs и GaN > 99,9999%.

Эффективный рост: равномерное тепловое поле увеличивает выход кристаллов на 20%.

Коррозионная стойкость: Устойчив к сильной коррозии мышьяка и галлия, срок службы > 50 раз.

Настройка: Поддерживает малые (50 мм) и средние (200 мм) тигли.

Технические проблемы

Риск коррозии: Расплавленный мышьяк может разрушать тигель и требует поверхностного упрочнения.

Контроль атмосферы: требуется инертный газ высокой чистоты, что увеличивает эксплуатационные расходы.

Незначительные дефекты: Немного более высокая шероховатость поверхности может привести к смещению кристаллов.

Высокая стоимость: Цена вольфрамовых тиглей высокой чистоты высока, и

производственный процесс необходимо оптимизировать.

5.2.3 PVD и CVD

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для физического осаждения из газовой фазы (PVD) и химического осаждения из газовой фазы (CVD) для испарения или реактивного осаждения тонкопленочных материалов (например, металлов, керамики, оксидов) для производства чипов, дисплеев и оптических покрытий. Тигли должны выдерживать температуру от 1200 °C до 2000 °C и реактивные газы.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая температурная стабильность: от 1500°C до 2000°C без испарения и разложения.

Химически инертный: устойчив к реакционным газам, таким как хлорид и фтор, примесям < 10 ppb.

Теплопроводность: >100 Вт/м·К для обеспечения равномерного испарения.

Размерный ряд: диаметр от 20 до 200 мм, толщина стенки от 1 до 5 мм.

Обработка поверхности: Ra < 0,2 мкм для предотвращения разбрызгивания материала.

Технологические преимущества

Пленки высокой чистоты: тигли содержат примеси до 1 ppb для удовлетворения требований к стружке.

Эффективное осаждение: равномерное тепловое поле увеличивает скорость осаждения на 30%.

Мультиматериальная поддержка: подходит для испарения титана, алюминия, кремния и других материалов.

Длительный срок службы: его можно использовать повторно более 100 раз, что снижает затраты.

Технические проблемы

Газовая коррозия: реакционные газы CVD могут вызывать коррозию тиглей и должны быть защищены покрытиями.

Контроль температуры: Для предотвращения неравномерного осаждения требуется точный контроль температуры ($\pm 2^\circ\text{C}$).

Миниатюризация: Микротигли (<20 мм) сложны в производстве и дороги.

Комплексная очистка: Отложенные остатки необходимо очищать в несколько этапов, что увеличивает процесс.

5.2.4 Микроэлектронная упаковка и управление температурным режимом

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для высокотемпературного спекания и терморегулирования в микроэлектронной упаковке, подготовки подложек с высокой

теплопроводностью (таких как композиты из вольфрама и меди) или радиаторов, а также используются в мощных чипах и светодиодной упаковке. Тигли должны выдерживать температуру от 1000 °C до 1500 °C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Теплопроводность: >120 Вт/м·К, быстрый отвод тепла.

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с медью, серебром и другими инкапсулирующими материалами, примесями < 20 ppm.

Точность размеров: допуск $\pm 0,01$ мм, подходит для прецизионных форм.

Качество поверхности: Ra < 0,1 мкм, предотвращает прилипание материала.

Стойкость к тепловому удару: > 300 циклов, без трещин.

Технологические преимущества

Эффективное рассеивание тепла: он поддерживает работу мощных чипов с тепловым сопротивлением < 0,5 К/Вт.

Высокая надежность: тигель обеспечивает чистоту инкапсулирующего материала > 99,99%.

Миниатюризация: Опорный микротигель (<30 мм) для адаптации к упаковке чипов.

Длительный срок службы: от 50 до 80 раз повторное использование, снижение затрат.

Технические проблемы

Микропроизводство: Небольшие тигли требуют высокоточной обработки и являются дорогостоящими.

Тепловое расширение: разница в тепловом расширении между вольфрамом и материалом инкапсуляции может вызвать напряжение.

Поверхностное загрязнение: Для предотвращения загрязнения твердыми частицами требуется сверхчистая окружающая среда.

Контроль энергопотребления: Высокотемпературное спекание имеет высокое энергопотребление, и процесс необходимо оптимизировать.

5.3 Химическая промышленность

Вольфрамовые тигли используются в химической промышленности для высокотемпературного синтеза катализаторов, сильных коррозионных реакций и химической очистки высокой чистоты, а его коррозионная стойкость и устойчивость к высоким температурам соответствуют требованиям суровых химических сред.

5.3.1 Синтез высокотемпературных катализаторов

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются в катализаторах высокотемпературного синтеза (таких как катализаторы на основе платины и палладия), в нефтехимии и в области защиты окружающей среды. Тигли должны выдерживать температуру от 1200 °C до 1800 °C и реактивные газы (например, аммиак, хлор).

Требования к эксплуатационным характеристикам

Коррозионная стойкость: Устойчив к кислотным, щелочным и окисляющим газам, потеря поверхности $< 0,01$ мм/год.

Высокая температура: от 1500°C до 1800°C , тепловой удар > 200 раз.

Химически инертен: не вступает в реакцию с прекурсорами катализатора, примесями < 10 ppm.

Обработка поверхности: $Ra < 0,2$ мкм, для предотвращения адгезии катализатора.

Размерный ряд: диаметр от 50 до 300 мм, толщина стенки от 2 до 10 мм.

Технологические преимущества

Катализатор высокой чистоты: тигель снижает внесение примесей до 5 ppm, обеспечивая каталитическую эффективность.

Долговечность: его можно использовать повторно более 50 раз, что снижает производственные затраты.

Равномерный нагрев: теплопроводность > 100 Вт/м·К для улучшения консистенции синтеза.

Гибкость: Поддерживает широкий спектр каталитических систем (например, драгоценных металлов, оксидов).

Технические проблемы

Газовая коррозия: хлор или аммиак могут разрушать тигель и требовать упрочнения поверхности.

Высокотемпературное испарение: некоторые предшественники катализаторов могут осаждаться и нуждаются в регулярной очистке.

Высокая стоимость: Вольфрамовые тигли с высокой коррозионной стойкостью дороги в производстве и нуждаются в оптимизации.

Контроль атмосферы: требуется инертный газ высокой чистоты, что увеличивает эксплуатационные расходы.

5.3.2 Высокотемпературные химические реакционные сосуды

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются в качестве емкостей для сильных коррозионных химических реакций для обработки сильных кислот (таких как азотная кислота, фтористоводородная кислота), сильных щелочей или высокотемпературных расплавленных солей при производстве специальных химикатов. Тигли должны выдерживать температуру от 1000°C до 1600°C и экстремальные химические среды.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Коррозионная стойкость: Устойчив к химическим веществам pH от 0 до 14 со скоростью коррозии $< 0,005$ мм/год.

Высокая температурная стабильность: от 1200°C до 1600°C , без испарения и разложения.

Механическая прочность: прочность на разрыв > 600 МПа, предотвращающая поломку контейнера.

Качество поверхности: $Ra < 0,1$ мкм, восстанавливает остатки реагента.

Равномерность толщины стенки: $\pm 0,02$ мм, для обеспечения устойчивости к давлению.

Технологические преимущества

Чрезвычайно устойчив к коррозии: поддерживает сильные кислотно-щелочные реакции, срок службы тигля > 100 раз.

Высокая безопасность: химически инертный обеспечивает отсутствие загрязнения в реакционных процессах.

Универсальность: подходит для расплавленных солей, кислотных растворов и высокотемпературных газовых реакций.

Эффективное производство: равномерное тепловое поле увеличивает скорость реакции на 20%.

Технические проблемы

Сильная коррозия: фтористоводородная кислота может вызвать микрокоррозию и требует специального покрытия.

Сложность очистки: Остатки реакции необходимо очищать в несколько этапов, что увеличивает процесс.

Высокая температура: Быстрое нарастание и падение температуры могут привести к образованию трещин, поэтому необходимо оптимизировать термообработку.

Высокая стоимость: Для тиглей с высокой коррозионной стойкостью требуется вольфрам сверхвысокой чистоты, который стоит дорого.

5.3.3 Рафинирование и рафинирование высокочистых химических веществ

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для вакуумной дистилляции или сублимации химических веществ высокой чистоты (таких как кремний высокой чистоты, бор, фосфор) в полупроводниковой и фотоэлектрической промышленности. Тигель должен быть сверхвысокой чистоты и не содержать загрязнений.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Сверхвысокая чистота: чистота вольфрама $> 99,9999\%$, примеси $< 0,1$ ppb.

Высокие температуры: от 1400°C до 1800°C , тепловой удар > 300 раз.

Отделка поверхности: $Ra < 0,05$ мкм, предотвращает химическую адгезию.

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с парами и плавками, загрязняет < 1 ppb.

Точность размеров: допуск $\pm 0,01$ мм, подходит для прецизионного оборудования.

Технологические преимущества

Сверхвысокая чистота: тигель снижает содержание химических примесей до $0,05$ ppb в

соответствии с требованиями к полупроводникам.

Длительный срок службы: может быть повторно использован от 80 до 120 раз, что снижает затраты.

Эффективная рафинирование: однородное тепловое поле повышает эффективность переработки на 25%.

Настройка: Поддерживает малые (20 мм) и средние (150 мм) тигли.

Технические проблемы

Требования к сверхчистым помещениям: Требуется производство и очистка чистых помещений класса 4 ISO.

Высокотемпературное испарение: Следовые количества вольфрама могут загрязнять химические вещества и должны быть защищены покрытием.

Сложность производства: Вольфрамовый тигель сверхвысокой чистоты требует сложного процесса и высокой стоимости.

Контроль атмосферы: требуется сверхвысокий вакуум (10^{-6} Па), что увеличивает требования к оборудованию.

5.4 Научные исследования

Вольфрамовые тигли используются в научных исследованиях для испытаний высокотемпературных материалов, моделирования экстремальных условий, синтеза передовых материалов и экспериментов по синхротронному излучению, а их высокая стабильность и долговечность поддерживают передовые научные исследования.

5.4.1 Эксплуатационные испытания высокотемпературных материалов

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для проверки температуры плавления, термической стабильности, стойкости к окислению и механических свойств новых материалов, а также используются в материаловедении и инженерных исследованиях. Диапазон температур испытания составляет от 1500°C до 3000°C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Чрезвычайно высокая температура: выдерживают от 2800°C до 3000°C, устойчивы к тепловому удару > 200 раз.

Химически инертен: не вступает в реакцию с исследуемыми материалами, примесями < 10 ppm.

Механическая прочность: прочность на разрыв > 700 МПа, устойчивость к высокотемпературному разрушению.

Гибкий размер: от 20 до 200 мм в диаметре, подходит для различных экспериментов.

Теплопроводность: >100 Вт/м·К для обеспечения равномерного нагрева.

Технологические преимущества

Поддержка высоких температур: близка к температуре плавления вольфрама (3422°C) для экстремальных испытаний.

Высокая надежность: структура тигля стабильна, а согласованность экспериментальных данных > 99,5%.

Совместимость с различными материалами: поддерживает испытания металлов, керамики и композитных материалов.

Длительный срок службы: от 50 до 100 повторных использований, снижение стоимости экспериментов.

Технические проблемы

Высокотемпературная деформация: Он может быть незначительно деформирован, когда он близок к температуре плавления, и конструкцию необходимо оптимизировать.

Загрязнение материала: Следовые количества испаряющегося вольфрама могут повлиять на испытание и должны быть защищены покрытием.

Миниатюризация: Микротигли (<20 мм) сложны в производстве и дороги.

Контроль атмосферы: требуется вакуум высокой чистоты или инертный газ, что увеличивает сложность эксперимента.

5.4.2 Эксперименты по моделированию экстремальных условий

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для моделирования экстремальных сред (например, ядерных реакторов, планетарных атмосфер) и проверки характеристик материалов при высокой температуре, высоком давлении или коррозионных условиях. Экспериментальная температура составляет от 1500 °C до 2800 °C, а атмосфера включает в себя вакуум, окисляющие или восстановительные газы.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая термостойкость: от 2500°C до 2800°C, тепловой удар > 300 раз.

Коррозионная стойкость: Устойчив к окислению, восстановлению и плазменным средам, скорость коррозии < 0,01 мм/год.

Механическая стабильность: прочность на сжатие > 1000 МПа для предотвращения поломки.

Качество поверхности: Ra < 0,1 мкм, снижает взаимодействие с материалом.

Совместимость с атмосферой: поддерживается вакуум (10^{-5} Па) или высокое давление (>10 МПа).

Технологические преимущества

Экстремальная допуск: поддерживает экспериментальные условия, близкие к температуре плавления для ядерных и аэрокосмических исследований.

Высокая надежность: производительность тигля стабильна, а экспериментальная повторяемость составляет > 99%.

Гибкость: Адаптация к различным атмосферам и давлениям для проведения сложных экспериментов.

Длительный срок службы: от 50 до 80 раз можно использовать повторно, что снижает затраты.

Технические проблемы

Сложная среда: переменная атмосфера и давление затрудняют конструкцию тигля.

Высокая температурная нагрузка: экстремальные условия могут привести к образованию микротрещин и потребовать последующей обработки.

Высокая стоимость: Высокопроизводительные вольфрамовые тигли дороги в производстве и нуждаются в оптимизации.

Сложность обнаружения: состояние тигля должно быть неразрушающим после эксперимента, а технические требования высоки.

5.4.3 Синтез и характеристика современных материалов

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для синтеза современных материалов (таких как высокоэнтропийные сплавы, сверхпроводящие материалы, наноматериалы) и определения характеристик их физических свойств при высоких температурах. Тигель обеспечивает стабильную высокотемпературную среду для обеспечения чистоты синтеза материала.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Сверхвысокая температура: температура синтеза до 2500°C, тепловой удар > 200 раз.

Требования к чистоте: 1 ppm < примесей во избежание загрязнения материала.

Равномерный нагрев: теплопроводность > 120 Вт/м·К для обеспечения однородности синтеза.

Контроль атмосферы: регулируемая окислительная и восстановительная атмосферы для поддержки точного определения характеристик.

Технологические преимущества

Чистота материала: Тигель не участвует в химических реакциях, обеспечивая качество материала.

Высокая стабильность: Он может быть стабильно синтезирован при высоких температурах для обеспечения стабильных свойств материала.

Универсальность: Поддерживает различные методы синтеза, такие как суперлегирование, осаждение из газовой фазы.

Длительный срок службы: можно повторно использовать от 50 до 100 раз, что снижает затраты.

Технические проблемы

Контроль атмосферы: Требуется точный контроль атмосферы, что увеличивает сложность эксперимента.

Сложность синтеза: Колебания температуры во время синтеза могут повлиять на структуру

материала.

Высокотемпературное испарение: вольфрамовые материалы испаряются в небольших количествах при высоких температурах, поэтому конструкцию необходимо оптимизировать.

5.4.4 Эксперименты по синхротронному излучению и рассеянию нейтронов

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются в экспериментах по синхротронному излучению и рассеянию нейтронов для размещения высокотемпературных образцов (например, металлов, керамики) для структурного и физического анализа. Экспериментальная температура составляет от 1000°C до 2000°C, что требует высокой стабильности и низкого уровня фоновых помех.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая температурная стабильность: от 1500°C до 2000°C без испарения и разложения.

Низкий фон: чистота вольфрама > 99,99%, снижение рентгеновской или нейтронной интерференции.

Механическая прочность: прочность на разрыв > 600 МПа, устойчивость к высокотемпературному разрушению.

Точность размеров: допуск $\pm 0,01$ мм, подходит для прецизионных инструментов.

Качество поверхности: Ra < 0,1 мкм, снижение загрязнения образца.

Технологические преимущества

Низкий уровень помех: вольфрам высокой чистоты снижает фоновый шум эксперимента, а точность данных > 99,5%.

Поддержка высоких температур: удовлетворяет потребности в высокотемпературных системах синхротронного излучения и рассеяния нейтронов.

Высокая надежность: структура тигля стабильна, а экспериментальная повторяемость составляет > 99%.

Настройка: поддержка микро (10 мм) и средних (100 мм) тиглей.

Технические проблемы

Сверхвысокая чистота: требуется 99,999% вольфрама, а стоимость производства высока.

Высокотемпературное испарение: следовые количества вольфрама могут влиять на данные и должны быть защищены покрытиями.

Миниатюризация: Микротигли требуют высокоточной обработки, что сложно.

Сложность эксперимента: он должен быть бесшовно согласован с оборудованием для синхротронного излучения.

5.5 Аэрокосмическая и оборонная промышленность

Вольфрамовые тигли используются в аэрокосмической и оборонной промышленности для производства высокотемпературных компонентов, испытаний материалов и систем

термоконтроля благодаря высокой температуре плавления и механической прочности, отвечающим экстремальным экологическим требованиям.

5.5.1 Производство сопел и камер сгорания ракетных двигателей

Обзор приложения

Вольфрамовый тигель используется для выплавки и спекания сопел ракетных двигателей и материалов камеры сгорания для получения композитов с вольфрамовой матрицей или жаропрочных сплавов, которые могут выдерживать температуру горения выше 3000°C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Чрезвычайно высокая температура: от 2800°C до 3100°C, устойчивость к тепловому удару > 200 раз.

Механическая прочность: прочность на разрыв > 1000 МПа, для предотвращения разрушения при высокой температуре.

Антиоксидант: вакуумная или аргоновая атмосфера, содержание кислорода < 1 ppm.

Стабильность размеров: отклонение толщины стенки $\pm 0,01$ мм, тепловое расширение $< 4,5 \times 10^{-6}/K$.

Стойкость к истиранию: твердость > HV 500, стойкость к высокотемпературному вымыванию воздухом.

Технологические преимущества

Высокая термостойкость: близка к температуре плавления вольфрама, поддерживает экстремальные условия горения.

Высокая надежность: тигель обеспечивает чистоту материала > 99,99% и стабильную производительность.

Длительный срок службы: от 30 до 50 раз повторное использование, снижение производственных затрат.

Опора большого размера: диаметр от 300 до 500 мм для удовлетворения потребностей крупных компонентов.

Технические проблемы

Высокое температурное напряжение: Вблизи точки плавления может произойти микрорастрескивание, поэтому необходимо оптимизировать термообработку.

Риск окисления: требуется сверхвысокий вакуум или инертный газ, что увеличивает затраты.

Сложность производства: Крупногабаритные вольфрамовые тигли высокой чистоты имеют высокую стоимость и сложный процесс.

Комплексная очистка: высокотемпературные остатки необходимо очищать в несколько этапов, что увеличивает процесс.

5.5.2 Испытание высокотемпературных конструкционных материалов

Обзор приложения

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Вольфрамовые тигли используются для проверки характеристик высокотемпературных конструкционных материалов (например, вольфрамовых сплавов, керамических матричных композитов) для аэрокосмической промышленности, моделирования двигателей или входных сред при температурах от 2000 °C до 3000 °C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Экстремально высокая температура: от 2500°C до 3000°C, устойчив к тепловому удару > 200 раз.

Химически инертен: не вступает в реакцию с исследуемыми материалами, примесями < 5 ppm.

Механическая прочность: прочность на сжатие > 1200 МПа, для предотвращения поломки.

Теплопроводность: >100 Вт/м·К для обеспечения равномерного нагрева.

Гибкий размер: от 20 до 200 мм в диаметре, подходит для различных экспериментов.

Технологические преимущества

Поддержка высоких температур: близка к температуре плавления вольфрама, соответствует моделированию среды при входе в атмосферу.

Высокая надежность: производительность тигля стабильна, а постоянство данных испытаний > 99,5%.

Совместимость с различными материалами: поддерживает испытания металлов, керамики и композитных материалов.

Долгий срок службы: от 50 до 80 повторных использований, снижение стоимости экспериментов.

Технические проблемы

Высокотемпературная деформация: Длительная высокая температура может привести к микродеформации, и конструкцию необходимо оптимизировать.

Загрязнение материала: Следовые количества испаряющегося вольфрама могут повлиять на испытание и должны быть защищены покрытием.

Миниатюризация: Микротигли (<20 мм) сложны в производстве и дороги.

Контроль атмосферы: требуется вакуум высокой чистоты или инертный газ, что добавляет сложности.

5.5.3 Компоненты высокотемпературного оборудования военного назначения

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для плавления и спекания компонентов военного высокотемпературного оборудования, таких как сопла ракет, броневые материалы и высокотемпературные датчики, и выдерживают температуру от 2000 °C до 2800 °C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая температура: от 2500 °C до 2800 °C, тепловой удар > 200 раз.

Механическая прочность: прочность на разрыв > 1000 МПа для предотвращения поломки.
Антиоксидант: вакуумная или аргоновая атмосфера, содержание кислорода < 1 ppm.
Стойкость к истиранию: твердость > HV 500, устойчивость к высокотемпературной эрозии.
Точность размеров: допуск $\pm 0,01$ мм, подходит для прецизионных деталей.

Технологические преимущества

Высокая термостойкость: поддержка экстремальных военных условий, стабильная производительность.

Высокая чистота: Тигель гарантирует, что чистота материала составляет > 99,99%, что соответствует военному стандарту.

Длительный срок службы: от 40 до 60 раз повторное использование, снижение производственных затрат.

Настройка: Поддержка сложной геометрии и небольших тиглей (<50 мм).

Технические проблемы

Высокая температурная нагрузка: Быстрое нарастание и падение температуры могут привести к образованию трещин, поэтому необходимо оптимизировать термообработку.

Стоимость изготовления: Цена вольфрамового тигля высокой чистоты высока, и требуется крупносерийное производство.

Комплексная очистка: остатки военного материала нуждаются в специальной очистке для ускорения процесса.

Требования к конфиденциальности: Военные приложения требуют строгого управления данными и процессами.

5.5.4 Спутниковая система терморегулирования

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для спекания и тестирования материалов для спутниковых систем терморегулирования, а также для приготовления композитов с вольфрамовой матрицей с высокой теплопроводностью (таких как вольфрамовая медь) для радиаторов и тепловых трубок, которые могут выдерживать от 1000°C до 1500°C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Теплопроводность: >120 Вт/м·К, быстрый отвод тепла.

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с медью, серебром и т.д., примесями < 10 ppm.

Точность размеров: допуск $\pm 0,01$ мм, подходит для прецизионных форм.

Качество поверхности: Ra < 0,1 мкм, предотвращает прилипание материала.

Стойкость к тепловому удару: > 300 циклов, без трещин.

Технологические преимущества

Эффективное рассеивание тепла: поддерживает мощные спутниковые устройства с

тепловым сопротивлением $< 0,5$ К/Вт.

Высокая надежность: тигель обеспечивает чистоту материала $> 99,99\%$.

Миниатюризация: опорный микротигель (< 30 мм) для адаптации к производству тепловых трубок.

Длительный срок службы: от 50 до 80 раз повторное использование, снижение затрат.

Технические проблемы

Микропроизводство: Небольшие тигли требуют высокоточной обработки и являются дорогостоящими.

Тепловое расширение: разница в тепловом расширении между вольфрамом и композитными материалами может привести к напряжению.

Поверхностное загрязнение: Для предотвращения загрязнения твердыми частицами требуется сверхчистая окружающая среда.

Контроль энергопотребления: Высокотемпературное спекание имеет высокое энергопотребление, и процесс необходимо оптимизировать.

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of $\geq 99.95\%$ minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

Rare earth metal melting: Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

Vacuum coating: Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

High-temperature furnaces: Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C .

Chemical synthesis: Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

Metal smelting and refining: Used for melting and refining high-purity metals.

Sapphire crystal growth: Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between $2000\text{--}2500^{\circ}\text{C}$.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

5.6 Энергетика

Вольфрамовые тигли используются в энергетической промышленности в ядерных реакторах, фотовольтаике, топливных элементах и термоядерном синтезе, где их высокотемпературные характеристики и радиационная стойкость отвечают строгим требованиям энергетических технологий.

5.6.1 Высокотемпературные компоненты ядерных реакторов

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для плавления и спекания высокотемпературных компонентов ядерных реакторов (таких как регулирующие стержни и теплообменники) для получения материалов на основе вольфрама, которые могут выдерживать температуру от 2000°C до 2800°C и сильные радиационные среды.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Экстремально высокая температура: от 2500°C до 2800°C, > 200-кратный тепловой удар.

Радиационная стойкость: Устойчив к нейтронному и гамма-излучению, затухание характеристик <5% (10 лет).

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с расплавленным натрием или ураном, примесями < 5 ppm.

Механическая прочность: прочность на разрыв > 1000 МПа для предотвращения поломки.

Стабильность размеров: отклонение толщины стенки $\pm 0,01$ мм, тепловое расширение < $4,5 \times 10^{-6}/K$.

Технологические преимущества

Высокая термостойкость: поддержка экстремальных условий эксплуатации ядерных реакторов и стабильная производительность.

Радиационная стойкость: Устойчив к высокоэнергетическому излучению, подходит для применения в ядерной энергетике.

Длительный срок службы: от 30 до 50 раз повторное использование, снижение производственных затрат.

Высокая чистота: Тигель гарантирует, что чистота материала > 99,99%.

Технические проблемы

Радиационное старение: высокая радиация может привести к ухудшению качества материала, поэтому время воздействия необходимо контролировать.

Риск окисления: для предотвращения окисления требуется высокий вакуум или инертный газ.

Сложность производства: Стоимость производства вольфрамового тигля высокой чистоты высока, а процесс сложен.

5.6.2 Производство фотоэлектрических солнечных материалов

Обзор приложения

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

Вольфрамовые тигли используются для спекания и плавления фотоэлектрических солнечных материалов, таких как перовскитные солнечные элементы, и выдерживают высокие температуры от 1000°C до 1500°C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая температурная производительность: >1200°C, высокая стабильность.

Химически инертен: не вступает в реакцию с перовскитными материалами, примесями < 5 ppm.

Точность размеров: допуск $\pm 0,01$ мм, подходит для прецизионных форм.

Качество поверхности: $Ra < 0,1 \mu m$, предотвращает загрязнение материала.

Технологические преимущества

Высокая температурная стабильность: поддержка производства высокоэффективных фотоэлектрических материалов, а также стабильная производительность.

Высокая чистота: Тигель гарантирует, что чистота материала > 99,99%.

Длительный срок службы: от 30 до 50 раз повторное использование, снижение производственных затрат.

Технические проблемы

Высокие требования к чистоте: Тигель должен поддерживать высокую чистоту для предотвращения загрязнения.

Контроль высокой температуры: Требуется точная система контроля температуры, чтобы избежать перегрева.

Миниатюрное производство: маленькие тигли сложны и дороги в производстве.

5.6.3 Изготовление компонентов термоядерного реактора

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для спекания и плавления компонентов термоядерных реакторов, таких как материал первой стенки реакторов токамака, и подвергаются воздействию экстремально высоких температур и радиации.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Экстремально высокая температура: от 2800°C до 3000°C, устойчивость к тепловому удару > 500 раз.

Радиационная стойкость: стойкость к нейтронному излучению, затухание <2% (100 лет).

Механическая прочность: прочность на разрыв > 1200 МПа, для предотвращения поломки.

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с дейтерием и тритием, а также примесями < 5 ppm.

Точность размеров: допуск $\pm 0,01$ мм, подходит для прецизионного проектирования.

Технологические преимущества

Экстремально высокая температура: близка к температуре плавления вольфрама,

поддерживает среду плавления.

Радиационная стойкость: устойчив к нейтронному излучению, подходит для длительного использования.

Высокая чистота: Тигель гарантирует, что чистота материала > 99,99%.

Длительный срок службы: от 50 до 100 раз повторное использование, снижение производственных затрат.

Технические проблемы

Высокая температурная нагрузка: Длительное использование может привести к термическому напряжению, и конструкция должна быть оптимизирована.

Эффекты радиации: Нейтронное излучение оказывает большее влияние на производительность тигля.

5.6.4 Материалы термоядерных реакторов

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для плавления и спекания материалов термоядерных реакторов, таких как материалы на основе вольфрама для плазменной облицовки, ПФМ, и выдерживают от 2500 °C до 3000 °C и сильные плазменные удары.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Чрезвычайно высокая температура: от 2800°C до 3000°C, устойчивость к тепловому удару > 200 раз.

Радиационная стойкость: устойчив к нейтронной и плазменной бомбардировке, затухание производительности <3% (10 лет).

Механическая прочность: прочность на разрыв > 1200 МПа, для предотвращения поломки.

Коррозионная стойкость: устойчив к гелию и водородной плазме, скорость коррозии < 0,005 мм/год.

Стабильность размеров: отклонение толщины стенки $\pm 0,01$ мм, тепловое расширение < $4,5 \times 10^{-6}/K$.

Технологические преимущества

Высокая термостойкость: близка к температуре плавления вольфрама для удовлетворения потребностей термоядерной среды.

Радиационная стойкость: вольфрамовый тигель обеспечивает долговременную стабильность материала и соответствует требованиям ИТЭР.

Высокая чистота: примеси вводятся < 1 ppm для обеспечения производительности СМП.

Длительный срок службы: от 30 до 50 раз повторное использование, снижение затрат.

Технические проблемы

Плазменный удар: сильная плазма может привести к повреждению поверхности и требует защиты покрытия.

Высокое температурное напряжение: Вблизи точки плавления может произойти микрорастрескивание, поэтому необходимо оптимизировать термообработку.

Стоимость производства: вольфрамовый тигель сверхвысокой чистоты имеет высокую цену и должен производиться в больших масштабах.

Комплексная очистка: остатки сплавленного материала нуждаются в специальной очистке для ускорения процесса.

5.7 Новые и сквозные приложения

Вольфрамовые тигли продемонстрировали уникальные преимущества в новых областях, таких как ювелирное дело, медицина, 3D-печать и квантовые технологии, расширяя границы их применения.

5.7.1 Производство ювелирных изделий высокого класса и предметов роскоши

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются в ювелирных изделиях высокого класса и производстве предметов роскоши для выплавки драгоценных металлов (например, платины, золота) и синтетических драгоценных камней (например, искусственных алмазов, сапфиров) и выдерживают температуру от 1400 °C до 2000 °C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая чистота: чистота вольфрама > 99,99%, примеси < 10 ppm.

Высокая термостойкость: от 1600°C до 2000°C, тепловой удар > 200 раз.

Обработка поверхности: Ra<0,05 мкм, для предотвращения адгезии металла.

Точность размеров: допуск $\pm 0,01$ мм, подходит для прецизионных форм.

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с драгоценными металлами или драгоценными камнями.

Технологические преимущества

Продукт высокой чистоты: тигель снижает внесение примесей до 5 ppm, обеспечивая качество ювелирных изделий.

Равномерное тепловое поле: улучшает консистенцию драгоценных камней и металлов, а коэффициент дефектов < 0,1%.

Длительный срок службы: от 50 до 80 раз повторное использование, снижение затрат.

Настройка: Поддерживает малые (20 мм) и средние (100 мм) тигли.

Технические проблемы

Поверхностное загрязнение: Для предотвращения загрязнения твердыми частицами требуется сверхчистая окружающая среда.

Высокотемпературное испарение: следовые количества вольфрама могут повлиять на драгоценные камни, поэтому требуется защита покрытия.

Миниатюризация: микротигли сложны в производстве и дороги.

Контроль затрат: вольфрамовые тигли высокой чистоты должны сочетать производительность и экономичность.

5.7.2 Производство медицинских имплантатов и устройств

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются для плавки и спекания медицинских имплантатов (таких как титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы) и деталей устройств, подготовки костных имплантатов, сердечных стентов и т. Д., Выдерживают от 1200°C до 1800°C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Сверхвысокая чистота: чистота вольфрама > 99,999%, примеси < 1 ppb.

Высокая термостойкость: от 1400°C до 1800°C, тепловой удар > 200 раз.

Качество поверхности: Ra<0,05 мкм, предотвращает загрязнение материала.

Химическая стабильность: не вступает в реакцию с титаном, хромом и т.д., а также < загрязнения в 1 ppb.

Точность размеров: допуск $\pm 0,01$ мм, подходит для прецизионных форм.

Технологические преимущества

Биосовместимость: Тигель гарантирует, что чистота материала > 99,999% и соответствует медицинским стандартам.

Равномерное тепловое поле: улучшение консистенции имплантата, частота дефектов < 0,05%.

Длительный срок службы: от 60 до 100 раз повторное использование, снижение затрат.

Миниатюризация: Поддерживает миниатюрные тигли (<30 мм) для адаптации к медицинским компонентам.

Технические проблемы

Требования к сверхчистым помещениям: Требуется производство и очистка чистых помещений класса 3 ISO.

Высокотемпературное испарение: следовые количества вольфрама могут загрязнить материал и должны быть защищены покрытием.

Стоимость производства: вольфрамовый тигель сверхвысокой чистоты имеет высокую цену, и процесс необходимо оптимизировать.

Строгое регулирование: Применение в медицине регулируется стандартами FDA и ISO 13485.

5.7.3 Высокотемпературные пресс-формы в 3D-печати и аддитивном производстве

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются в качестве высокотемпературных форм в 3D-печати и аддитивном производстве для хранения металлических порошков (например, титана, вольфрамовых сплавов) для селективного лазерного плавления (SLM) или электронно-лучевого плавления (EBM) и выдерживают температуру от 1500 °C до 2200 °C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Высокая температурная производительность: от 1800°C до 2200°C, тепловой удар > 300 раз.
Химическая стабильность: не вступает в реакцию с расплавленным металлом, примесями < 10 ppm.
Отделка поверхности: Ra<0,1µm, предотвращает адгезию порошка.
Точность размеров: допуск ±0,02 мм, подходит для прецизионных форм.
Стойкость к истиранию: твердость > HV 400, стойкость к вымыванию порошка.

Технологические преимущества

Высокая точность: тигель поддерживает сложные геометрические формы, а точность формования > 99,5%.
Равномерное тепловое поле: увеличите плотность напечатанных на 3D-принтере деталей на >99,8%.
Длительный срок службы: от 50 до 80 раз повторное использование, снижение затрат.
Поддержка из нескольких материалов: подходит для порошков вольфрама, титана, никеля и других материалов.

Технические проблемы

Загрязнение порошка: Расплавленный порошок может прилипнуть к тиглю и нуждаться в покрытии или очистке.
Высокая температурная нагрузка: Быстрое нарастание и падение температуры могут привести к образованию трещин, поэтому необходимо оптимизировать термообработку.
Миниатюризация: Микроформы (< 50 мм) сложны в производстве и дороги.
Высокое энергопотребление: высокотемпературная 3D-печать потребляет много энергии, и процесс необходимо оптимизировать.

5.7.4 Квантовые технологии и получение сверхпроводящих материалов

Обзор приложения

Вольфрамовые тигли используются при синтезе и спекании квантовых технологий и сверхпроводящих материалов (таких как иттрий-барий-медь-кислород, YBCO), для изготовления квантовых вычислительных чипов и сверхпроводящих катушек, которые выдерживают от 1200°C до 1800°C.

Требования к эксплуатационным характеристикам

Сверхвысокая чистота: чистота вольфрама > 99,9999%, примеси < 0,1 ppb.
Высокая термостойкость: от 1400°C до 1800°C, тепловой удар > 200 раз.
Обработка поверхности: Ra<0,05 мкм, предотвращает загрязнение материала.
Химическая стабильность: не вступает в реакцию с оксидами или медью, загрязнения < 0,5 ppb.
Точность размеров: допуск ± 0,01 мм, подходит для прецизионных экспериментов.

Технологические преимущества

Сверхвысокая чистота: тигель вводит примеси до 0,05 ppb, что соответствует требованиям квантовых чипов.

Равномерное тепловое поле: улучшают консистенцию сверхпроводящих материалов, а процент дефектов < 0,01%.

Длительный срок службы: от 60 до 100 раз повторное использование, снижение затрат.

Миниатюризация: поддержка миниатюрного тигля (<20 мм) для адаптации к квантовым устройствам.

Технические проблемы

Требования к сверхчистым помещениям: Требуется производство и очистка чистых помещений класса 3 ISO.

Высокотемпературное испарение: следовые количества вольфрама могут загрязнить материал и должны быть защищены покрытием.

Стоимость производства: вольфрамовый тигель сверхвысокой чистоты имеет высокую цену, и процесс необходимо оптимизировать.

Сложность эксперимента: он должен быть согласован со сверхпроводящим оборудованием, что увеличивает сложность.



Вольфрамовые тигли CTIA GROUP LTD

Глава 6 Преимущества, недостатки и проблемы вольфрамового тигля

Вольфрамовые тигли широко используются в высокотемпературных полях благодаря своим превосходным свойствам, но они также сталкиваются с проблемами при производстве и

Уведомление об авторских правах и юридической ответственности

применении. В этой главе анализируются его сильные стороны, ограничения и области, требующие улучшения.

6.1 Анализ преимуществ вольфрамового тигля

6.1.1 Сверхвысокая температура плавления и термическая стабильность

Характеристики: температура плавления вольфрама 3422 °C, коэффициент теплового расширения $4,5 \times 10^{-6}/K$, 3000 °C сохраняет структурную стабильность.

Преимущества: Устойчив к экстремальным температурам, циклам теплового удара > 500 раз, подходит для термоядерного синтеза, аэрокосмической промышленности и т. Д.

Применение: Рост монокристаллического кремния, плавление жаропрочных сплавов, равномерное термическое поле, скорость деформации <0,1%.

6.1.2 Превосходная химическая инертность

Характеристики: Устойчив к кислотам и щелочам, расплавленному металлу и химически активному газу, скорость коррозии < 0,01 мм/год.

Преимущества: Не вступает в реакцию с расплавленным кремнием, галлием, платиной и т.д., а в <1 ppb вводятся примеси.

Применение: выращивание полупроводниковых кристаллов, химическое рафинирование высокой чистоты, чистота > 99,999%.

6.1.3 Высокая надежность и длительный срок службы

Характеристики: прочность на разрыв > 800 МПа, твердость > HV 400, срок службы 50-100 раз.

Преимущества: Стабильная производительность при многократном использовании, постоянство партии > 99,5%.

Применение: Производство фотоэлектрических кремниевых пластин, синтез катализаторов, снижение затрат на замену.

6.1.4 Способность адаптироваться к экстремальным условиям

Характеристики: Устойчив к радиационному и плазменному воздействию, затухание работоспособности <5% (10 лет).

Преимущества: поддержка экстремальных условий, таких как ядерные реакторы и моделирование планетарной атмосферы.

Применение: материал ПФМ с ядерным синтезом, высокотемпературные испытания в аэрокосмической отрасли, стабильная работа > 1000 часов.

6.2 Ограничения и проблемы вольфрамовых тиглей

6.2.1 Высокие затраты на производство и обработку

Проблема: Вольфрамовые тигли высокой чистоты нуждаются в сложном спекании и обработке на станках с ЧПУ, а их стоимость в 5-10 раз выше, чем у обычных тиглей.

Отдача: Сложна для малого и среднего бизнеса, срок окупаемости 3-5 лет.

Задача: Процесс необходимо оптимизировать для снижения затрат на сырье и энергию.

6.2.2 Хрупкость и сложность обработки при комнатной температуре

Проблема: Вольфрам имеет высокую твердость (HV 400) при комнатной температуре, легко поддается хрупкости, а для обработки требуются алмазные инструменты.

Воздействие: Микро или сложные тигли сложны в обработке, процент брака составляет >5%.

Задача: Разработка вольфрамовых сплавов с более высокой ударной вязкостью или новых технологий обработки.

6.2.3 Производственные ограничения для тиглей большого размера

Проблема: Для тигля диаметром >500 мм требуется большая печь для спекания, а равномерность толщины стенок $\pm 0,05$ мм трудно гарантировать.

Последствия: Длительный производственный цикл, умножение затрат, ограничение фотоэлектрических и металлургических применений.

Задача: Усовершенствовать агломерационное оборудование и повысить консистенцию больших тиглей.

6.2.4 Сырьевые поставки и геополитические риски

Проблема: Вольфрамовая руда концентрируется в глобальном масштабе, на предложение влияет геополитика, а цена колеблется > 20%.

Воздействие: нехватка сырья может нарушить производство и привести к неконтролируемым затратам.

Задача: Создать систему вторичной переработки для снижения зависимости от сырой руды.

6.3 Направление усовершенствования вольфрамового тигля

6.3.1 Оптимизация затрат и крупносерийное производство

Направление: Внедрение автоматической сборочной линии и рекуперации отработанного тепла для снижения потребления энергии на 20-30%.

Цель: снизить себестоимость продукции до 50% от текущего уровня и сократить срок окупаемости до 2 лет.

Технология: Модульная печь для спекания, AI оптимизация параметров процесса.

6.3.2 Разработка новых материалов и композиционных процессов

Направление: Исследование и разработка высокоэнтропийных сплавов на основе вольфрама и вольфрамо-керамических композиционных материалов, с повышением ударной вязкости на 30%.

Цель: Снизить хрупкость при комнатной температуре и продлить срок службы до 150 раз.

Технология: спекание нановольфрамового порошка, композитный тигель для 3D-печати.

6.3.3 Повышение точности и эффективности обработки

Направление: Лазерная обработка, внедрено сверхточное ЧПУ, допуск $\pm 0,005$ мм.

Цель: Процент брака снижен до <2%, а эффективность обработки увеличена на 50%.

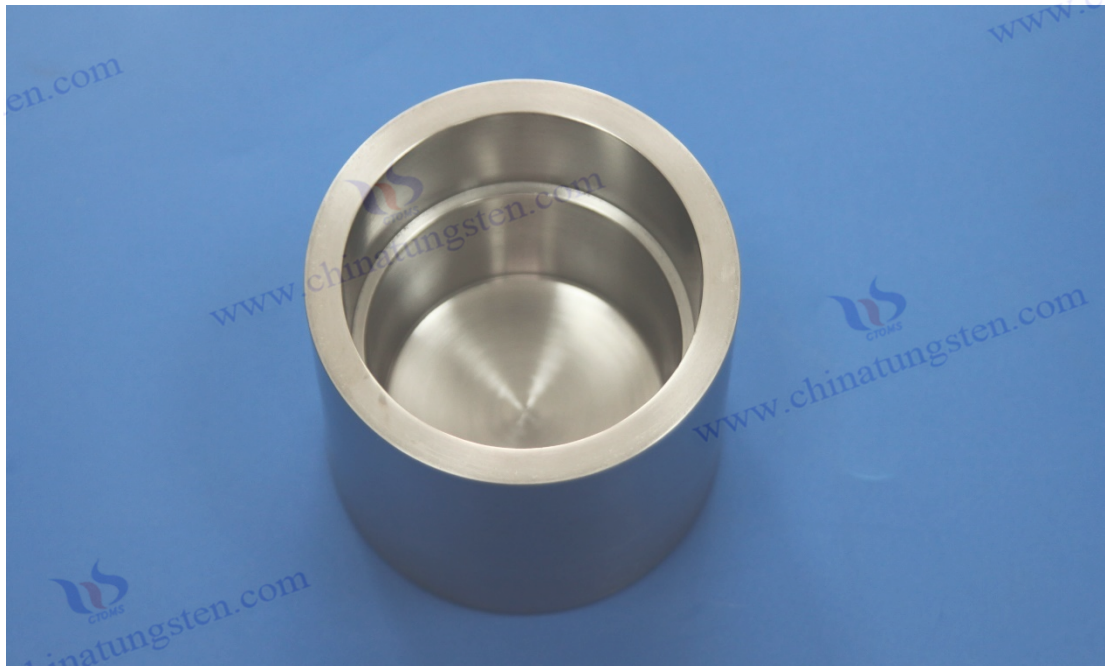
Технология: роботизированная обработка, система обнаружения в режиме реального времени.

6.3.4 Интеллектуальное и автоматизированное производство

Направление: Интегрируйте Интернет вещей и искусственный интеллект, отслеживайте температуру и давление в режиме реального времени, а погрешность составит <1%.

Цель: повышение эффективности производства на 30% и постоянство качества > 99,9%.

Технология: сетевая производственная линия 5G, система принятия решений на основе данных.



Вольфрамовый тигель CTIA GROUP LTD

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of $\geq 99.95\%$ minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

Rare earth metal melting: Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

Vacuum coating: Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

High-temperature furnaces: Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C .

Chemical synthesis: Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

Metal smelting and refining: Used for melting and refining high-purity metals.

Sapphire crystal growth: Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between $2000\text{--}2500^{\circ}\text{C}$.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

Глава 7 Меры предосторожности при использовании вольфрамового тигля

Использование вольфрамовых тиглей должно строго соответствовать техническим характеристикам, чтобы обеспечить безопасность, эффективность и долговечность. В этой главе описываются требования к установке, окружающей среде, обслуживанию и устранению неполадок.

7.1 Характеристики установки и эксплуатации вольфрамового тигля

7.1.1 Осмотр и подготовка тиглей перед установкой

Осмотр: Отсутствие трещин и царапин на визуальной поверхности, допуск по размерам $\pm 0,01$ мм.

Очистка: Ультразвуковая очистка (40 кГц) этанолом высокой чистоты с остаточным $< 0,1$ мкг/см².

Подготовка: Убедитесь, что печь чистая, вакуум составляет $< 10^{-5}$ Па, а чистота инертного газа составляет $> 99,999\%$.

Установка: С помощью специального зажима контроль усилия < 500 Н во избежание механических повреждений.

7.1.2 Меры безопасности при работе при высоких температурах

Защита: Надевайте устойчивые к высоким температурам перчатки и очки, а также изолируйте рабочую зону.

Контроль температуры: скорость нагрева $5-15^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, максимум 3000°C , погрешность $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Мониторинг: Запись температуры и давления в режиме реального времени, аномальная реакция на сигнал тревоги < 1 секунду.

Аварийный: Оборудован системой пожаротушения, охлаждается > 2 часа после отключения электроэнергии перед открытием печи.

7.1.3 Предотвращение термических напряжений и механических повреждений

Термический стресс: повышение и понижение температуры поэтапно, время увлажнения 2-12 часов, цикл теплового удара < 500 раз.

Механические повреждения: Избегайте удара о твердые предметы, усилие зажима < 300 Н.

Защита: Использование керамической прокладки снижает контактное напряжение, а скорость деформации $< 0,1\%$.

7.2 Экологические требования к использованию вольфрамовых тиглей

7.2.1 Регулирование температуры и атмосферы

Температура: $1500-3000^{\circ}\text{C}$, точность контроля температуры $\pm 1^{\circ}\text{C}$, однородность теплового поля $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Атмосфера: вакуумная (10^{-6} Па) или высокочистая аргон (содержание кислорода < 1 ppm).

Контроль: инфракрасный термометр (точность $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$), газоанализатор (точность $\pm 0,01$ ppm).

7.2.2 Избегайте контакта с несовместимыми материалами

Противопоказания: сильные окислители (например, азотная кислота), расплавленные щелочные металлы, для предотвращения коррозии.

Защита: поверхностное покрытие (например, SiC, WC), скорость коррозии < 0,005 мм/год.

Изоляция: Вкладыш с графитом высокой чистоты или диоксидом циркония с добавлением примесей < 1 ppb.

7.2.3 Предотвращение загрязнения и внесения примесей

Чистота: Эксплуатация в чистых помещениях класса ISO 4 с < твердых частиц 0,1 мкм.

Очистка: Ультразвуковая, деионизированная вода (проводимость < 1 мкСм/см) перед каждым использованием.

Хранение: Вакуумное, влажность < 30%, предотвращает окисление или адсорбцию.

7.3 Обслуживание вольфрамового тигля в процессе эксплуатации

7.3.1 Регулярный осмотр и чистка

Осмотр: После каждых 10 использований проверяйте наличие трещин и деформаций с помощью микроскопа с разрешением < 1 мкм.

Очистка: Ультразвуковая (40-80 кГц) + нейтральное моющее средство с остатком 0,05 мкг/см² <.

Частота: Очищайте после каждого использования и тщательно проверяйте каждый месяц.

7.3.2 Мониторинг поверхностных повреждений и трещин

Мониторинг: лазерное сканирование (точность ± 0,01 мм), обнаружение трещин > 0,1 мм.

Журнал: Глубина повреждения, расположение, срок архивации > 5 лет.

Лечение: шлифовка незначительных повреждений (Ra < 0,1 мкм), сильное соскабливание трещин.

7.3.3 Оценка и оптимизация ресурса

Оценка: Запишите количество использований, температуру, атмосферу и < 5% ошибки прогнозирования срока службы.

Оптимизация: Отрегулируйте скорость нарастания (< 10°C/мин), чтобы продлить срок службы до 80 раз.

Замена: Замена, когда потеря толщины стенки > 10% или трещина > 0,2 мм.

7.4 Поиск и устранение неисправностей вольфрамового тигля

7.4.1 Распространенные проблемы (трещины, деформация, загрязнение)

Трещина: Из-за термического напряжения или механического воздействия длина > 0,1 мм.

Деформация: отклонение толщины стенки при высокой температуре > 0,05 мм, что влияет на тепловое поле.

Загрязнение: поверхностный остаток > 0,1 мкг/см², что влияет на чистоту материала.

7.4.2 Диагностика неисправностей и методы их устранения

Диагностика: Рентгеновский неразрушающий контроль (разрешение $< 0,01$ мм) для анализа глубины трещины.

Ремонт: Шлифовка мелких трещин + покрытие, повторная калибровка деформационного тигля (допуск $\pm 0,02$ мм).

Обработка загрязнений: многоступенчатая очистка (ультразвуковая + травление) с остаточными $< 0,01$ мкг/см².

7.4.3 Порядок реагирования на чрезвычайные ситуации и отключения

Чрезвычайная ситуация: Немедленно остановите печь при обнаружении трещин или утечек и охладите в течение > 2 часов.

Отключение: Выключено, газ аргон ($> 99,999\%$), давление 0,1 МПа.

Записи: время отказа, причины и меры по его устранению, срок архивирования > 5 лет.



Вольфрамовый тигель CTIA GROUP LTD

Глава 8 Транспортировка и хранение вольфрамовых тиглей

Будучи ценным и высокопроизводительным металлическим контейнером, вольфрамовые тигли требуют специальных мер управления во время транспортировки и хранения, чтобы гарантировать, что продукция не будет физически повреждена, корродирована или не будет иметь других проблем с качеством до и после доставки. В этой главе будут представлены основные эксплуатационные характеристики и меры предосторожности, которые следует соблюдать в процессе циркуляции вольфрамовых тиглей.

Уведомление об авторских правах и юридической ответственности

6.1 Требования к транспортировке вольфрамового тигля

Вольфрамовый тигель должен по возможности избегать сильной вибрации, столкновений и сжатия во время транспортировки, чтобы предотвратить деформацию, разрыв или царапины на поверхности. Для этого транспортная упаковка должна быть изготовлена из прочных, сухих и ударопрочных материалов, таких как деревянные ящики, поролоновые прокладки, мягкие прокладки и т.д. При этом предупреждающие знаки, такие как «хрупкий» и «не взвешивать», должны быть четко обозначены, чтобы привлечь внимание персонала транспорта.

Если речь идет о междугородней перевозке или многократной перевалке, рекомендуется использовать для упаковки специальный деревянный ящик или металлический ящик, а внутри упаковки установить буферный слой для поглощения внешнего воздействия. Кроме того, его следует избегать во время транспортировки, чтобы избежать смешивания с коррозионными, влажными или летучими веществами во избежание химических повреждений.

6.2 Условия хранения вольфрамового тигля

При хранении вольфрамового тигля его следует размещать в сухом, проветриваемом и чистом помещении, а также избегать прямых солнечных лучей и высокой влажности, чтобы предотвратить окисление поверхности или влагу ржавчины. Место хранения должно быть вдали от коррозионных химических веществ, таких как сильные кислоты, сильные щелочи и соли, чтобы избежать контактных реакций.

При хранении на складе вольфрамовый тигель должен быть помещен в заводскую упаковку или завернут в мягкий материал, чтобы предотвратить появление царапин на поверхности. При длительном хранении рекомендуется регулярно проводить осмотр, чтобы убедиться, что упаковка находится в хорошем состоянии и что влажность окружающей среды должным образом контролируется.

6.3 Меры предосторожности при обращении с вольфрамовыми тиглями

При обращении с вольфрамовыми тиглями с ними следует обращаться осторожно, чтобы избежать жестокого обращения. Для более крупных тиглей следует использовать вспомогательные инструменты, такие как подъемные ленты и тележки, для обеспечения безопасности людей и продуктов. При этом погрузочно-разгрузочные работы должны выполняться персоналом, знакомым с характеристиками изделия, чтобы предотвратить повреждения, вызванные неправильной эксплуатацией.

При извлечении вольфрамового тигля из транспортной упаковки сначала следует убедиться, что структура упаковки устойчива, чтобы избежать случайного соскальзывания или повреждения, вызванного случайной распаковкой.

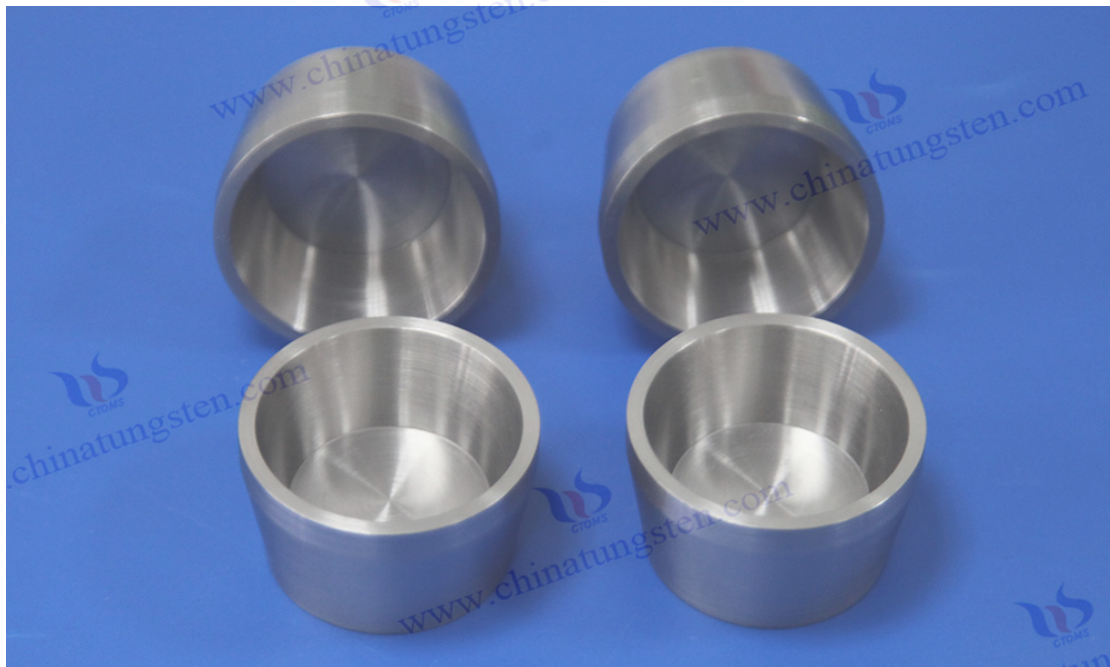
У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

6.4 Документация и маркировка вольфрамового тигля

В целях усиления управления каждая партия вольфрамового тигля должна сопровождаться транспортными записями, складскими документами и необходимыми этикетками продукции, включая модель, количество, номер производственной партии, дату прибытия и другую информацию, чтобы облегчить последующую прослеживаемость и управление качеством. Этикетка должна быть прочно прикреплена и не должна отклеиваться или расплываться.

6.5 Обработка исключений вольфрамового тигля

Если упаковка повреждена, поверхность продукта поцарапана, деформирована и т.д., ее следует немедленно подвесить и уведомить соответствующий руководящий персонал для утилизации во время транспортировки или хранения. При необходимости следует сообщить о повреждениях или повторно проверить их в соответствии с технологическим процессом, чтобы убедиться, что последующее использование продукта соответствует основным требованиям качества.



Вольфрамовый тигель CTIA GROUP LTD

Глава 9 Вольфрамовый тигель Устойчивое развитие и переработка

Поскольку вольфрамовые тигли являются ценным и устойчивым к высоким температурам промышленным компонентом, экологичность и переработка имеют решающее значение для сохранения ресурсов, защиты окружающей среды и экономических выгод. В этой главе подробно обсуждаются вопросы управления жизненным циклом, переработки, соблюдения экологических норм и практики экономики замкнутого цикла вольфрамовых тиглей в сочетании с опытом глобальных компаний, производящих вольфрамовые тигли, и отраслевой

Уведомление об авторских правах и юридической ответственности

информацией, предоставленной Chinatungsten Online, анализируются технические детали, технологические проблемы и будущие направления развития, а также направлены на содействие «зеленой» трансформации индустрии вольфрамовых тиглей.

9.1 Управление жизненным циклом вольфрамового тигля

Управление жизненным циклом охватывает весь процесс производства вольфрамового тигля, начиная с добычи сырья и заканчивая производством, использованием и переработкой, с целью снижения воздействия на окружающую среду, оптимизации использования ресурсов и повышения устойчивости.

9.1.1 Оценка полного цикла от производства до использования

Принцип процесса

Оценка жизненного цикла (LCA) выявляет ключевые звенья и оптимизирует конструкцию путем количественной оценки потребления ресурсов, использования энергии и выбросов в окружающую среду вольфрамовых тиглей на каждой стадии. Жизненный цикл вольфрамового тигля включает в себя добычу сырья, очистку, производство, транспортировку, использование и переработку.

Процесс оценки

Добыча сырья: добыча вольфрамовой руды (вольфрамита или шеелита), чистота обогащения > 99,5%, энергопотребление около 5000 кВт*ч на тонну вольфрамового концентрата.

Рафинирование и производство: приготовление вольфрамового порошка (чистота > 99,999%), спекание (температура 1800-2500°C), энергопотребление около 10-15 МВтч/тонна тигля.

Транспортировка: воздушная или морская, со средним выбросом углерода 0,5-2 кг CO₂/тонно·км.

Применение: Применение при высоких температурах (1500-3000°C), срок службы 50-100 раз, потребление энергии на техническое обслуживание около 0,1-0,5 МВтч/время.

Переработка: сбор, очистка, дробление и химическая очистка отходов в тиглях с потреблением энергии около 5-8 МВтч/т.

Технические параметры

Расход ресурсов: 1,5-2 тонны вольфрамовой руды на тонну тигля, и около 10-15 тонн побочных продуктов (хвостов).

Энергоэффективность: 70% потребления энергии на стадии производства приходится на весь цикл, а 50% потребления энергии < потребление энергии на стадии рекуперации.

Выбросы: Выбросы около 20-30 тонн CO₂ на тонну тигельной продукции и < 5 тонн выбросов на этапе использования.

Продолжительность жизненного цикла: около 2-5 лет от производства до утилизации, в зависимости от частоты использования.

Преимущества и проблемы

Преимущества: LCA выявляет звенья с высоким энергопотреблением (такие как спекание), которые могут снизить потребление энергии на 20% после оптимизации; Продление срока службы тигля (> 80 циклов) и снижение потребности в ресурсах.

Задача: Высокое воздействие на окружающую среду на стадии добычи и переработки, высокие затраты на очистку хвостов; Сбор данных LCA должен быть скоординирован по всей цепочке поставок, что является очень сложным процессом.

9.1.2 Анализ воздействия на окружающую среду и углеродного следа

Принцип процесса

Анализ углеродного следа количественно определяет выбросы парниковых газов вольфрамовых тиглей на протяжении всего цикла в сочетании с оценкой воздействия на окружающую среду (водные ресурсы, почва, экология) для обеспечения основы для зеленого дизайна. Воздействие вольфрамовых тиглей на окружающую среду обусловлено в основном энергоемким производством и добычей полезных ископаемых.

Анализируйте контент

Углеродный след:

Горнодобывающая промышленность: CO₂ выбрасывается около 5-8 тонн на тонну вольфрамового концентрата, а источником энергии в основном является ископаемое топливо.

Производство: При спекании и переработке выделяется около 15-20 тонн CO₂, а на электроэнергию приходится >80%.

Транспортировка: 0,5-1 кг CO₂/тонно·км от воздушного транспорта и 0,1-0,2 кг CO₂/тонна·км от моря.

Применение: Косвенные выбросы (электроэнергии) от работы при высоких температурах составляют около 0,05-0,2 тонны CO₂/время.

Вторичная переработка: При химической очистке выделяется около 3-5 тонн CO₂, что составляет 25% производственных выбросов.

Другие воздействия на окружающую среду:

Водные ресурсы: На обогащение расходуется 50-100 м³ на тонну вольфрамового концентрата, а сточные воды нуждаются в очистке до ХПК<50 мг/л.

Почва и экология: Добыча полезных ископаемых и уничтожение земель около 0,1-0,5 гм²/10 000 тонн шахты, требуется экологическое восстановление.

Твердые отходы: хвосты и отходы спекания представляют собой тигель плотностью около 10-20 тонн/тонну, который необходимо обезвредить.

Технические параметры

Общий углеродный след: выбросы CO₂ составляют около 25-35 тонн на тонну тигельного цикла, а на производственную стадию приходится 60%-70%.

Расход воды: 100-200 м³/т тигля во всем цикле, 10 м³ < в стадии восстановления.

Коэффициент утилизации твердых отходов: Коэффициент восстановления хвостов

составляет >50%, а коэффициент восстановления отходов тиглей составляет >90%.

Экологическое восстановление: Норма рекультивации земель составляет > 80%, а срок восстановления – 3-5 лет.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Анализ углеродного следа направляет низкоуглеродное производство (например, использование возобновляемых источников энергии), что может сократить выбросы на 15-20%; Рециркуляция сточных вод снижает потребление воды на 30%.

Задача: Трудно существенно снизить энергопотребление при производстве вольфрама высокой чистоты; Данные о выбросах углерода в глобальной цепочке поставок не являются единообразными, а точность анализа ограничена.

9.1.3 Устойчивое проектирование и производство

Принцип процесса

Экологичная конструкция снижает потребление ресурсов и воздействие на окружающую среду, продлевает срок службы вольфрамового тигля и улучшает пригодность к переработке за счет оптимизации выбора материалов, производственных процессов и ассортимента продукции.

Проектные мероприятия

Оптимизация материала: использование вольфрамового порошка высокой чистоты (чистота > 99,999%) снижает количество примесей и увеличивает срок службы тигля в 100 раз.

Конструктивное исполнение: равномерность толщины стенки $\pm 0,01$ мм, снижение термических напряжений, уменьшение скорости растрескивания < 0,1%.

Энергосберегающий процесс: плазменное спекание (снижение энергопотребления на 20%) или рекуперация отработанного тепла (повышение эффективности на 15%).

Модульная конструкция: тигель собирается секциями, что удобно для частичной замены и снижает норму отходов на 50%.

Зеленая энергия: более 70% электроэнергии, используемой для производства, поступает из ветровой или солнечной энергии, а выбросы углерода сокращаются на 30%.

Технология изготовления

3D-печать: точный контроль формы тигля, использования материала > 95%, отходов < 5%.

Автоматическое спекание: искусственный интеллект оптимизирует температурную кривую (погрешность $\pm 1^{\circ}\text{C}$), снижая потребление энергии на 10%.

Обработка поверхности: покрытие SiC или WC (толщина 0,05-0,1 мм), повышение коррозионной стойкости, продление срока службы на 30%.

Контроль качества: рентгеновский неразрушающий контроль (разрешение < 0,01 мм), дефектность < 0,05%.

Технические параметры

Утилизация материала: >90%, лом < тигель 0,1 тонны/тонну.

Потребление энергии: Потребление энергии при производстве < 12 МВтч/т, что на 15% ниже, чем при традиционном процессе.

Срок службы: в среднем 80-120 циклов, процент брака <5%.

Выбросы углекислого газа: «Зеленое» производство сокращает выбросы CO₂ до 15-20 тонн тиглей.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Экологичная конструкция продлевает срок службы тигля на 50% и снижает выбросы углерода за весь цикл на 20%; Модульная конструкция для легкой переработки.

Задача: Высокие инвестиции в оборудование для 3D-печати и экологически чистой энергетики, увеличивающие первоначальную стоимость на 20%; Новый процесс должен быть проверен на стабильность в течение длительного периода времени.

9.2 Переработка и повторное использование вольфрамового тигля

Переработка и повторное использование лежат в основе устойчивого развития вольфрамовых тиглей, а отработанные тигли превращаются в высококачественные продукты благодаря эффективным процессам переработки и контролю качества, сокращая потери ресурсов.

9.2.1 Процесс переработки вольфрамового тигля

Принцип процесса

При восстановлении вольфрамового тигля вольфрам (чистота > 99,9%) извлекается из отходов тиглей путем физического дробления, химической очистки и переработки для приготовления новых продуктов (таких как вольфрамовый порошок, тигли или сплавы).

Процесс переработки

Сбор и сортировка: Тигли для отходов сортируются по размеру (20-500 мм), чистоте (>99,9%) и степени загрязнения и транспортируются в центр переработки.

Очистка: Ультразвуковая очистка (40-80 кГц), деионизированная вода (проводимость <1 мСм/см), удаление остатков < 0,01 мкг/см² с поверхности.

Дробление: гидравлическая дробилка (давление > 100 МПа), размер частиц 0,1-5мм, эффективность дробления > 95%.

Химическая очистка:

Кислотное выщелачивание: для растворения примесей использовали HNO₃ или HCl (концентрация 5-10 моль/л), а коэффициент извлечения вольфрама составил >98%.

Осаждение: NH₄OH был добавлен для получения паравольфрамата аммония (АПТ) с чистотой > 99,95%.

Прокаливание: 800-1000°C, образуется WO₃, содержание кислорода <0,1 ppm.

Восстановление: приготовили H₂ в атмосфере (900-1100°C), вольфрамовый порошок (размер частиц 0,5-5 мкм), чистота > 99,999%.

Обработка: спекание или прессование для формирования новых тиглей или других вольфрамовых изделий.

Технические параметры

Восстановление: Восстановление вольфрама >95% и примесей < 10 ppm.

Потребление энергии: 5-8 МВтч/тонна энергии на вторичную переработку, что составляет 50% от потребления энергии на производстве.

Переработка отходов: Нейтрализуйте кислые отходы до pH 6-8 с ХПК < 50 мг/л.

Цикл обработки: 15-30 дней для восстановления одной партии, производственная мощность 0,5-2 тонны/месяц.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Процесс переработки сокращает отходы ресурсов до <5% и снижает потребность в сырой руде на 30%; Вольфрамовый порошок высокой чистоты может быть использован непосредственно в производстве новых тиглей.

Задача: Загрязнение отходов тигля (например, остатков кремния, галлия) увеличивает сложность очистки; Затраты на жидкую очистку отходов химической очистки высоки.

9.2.2 Текущее состояние и проблемы технологии переработки

статус-кво

Основные технологии: гидрометаллургия (кислотное выщелачивание + осаждение) и пирометаллургия (высокотемпературный обжиг + восстановление), коэффициент извлечения 90%-98%.

Оборудование: автоматическая дробилка (КПД > 95%), высокотемпературная печь (регулирование температуры $\pm 1^{\circ}\text{C}$), ионообменная система (чистота > 99,99%).

Масштабы: Глобальная мощность переработки составляет около 5 000-10 000 тонн в год, что составляет 20% спроса на вольфрамовую продукцию.

Применение: Переработанный вольфрам используется в тиглях, сплавах, твердых инструментах, а качество близко к первичному вольфраму.

Технические проблемы

Отделение примесей: Тигель для отходов содержит следовые количества кремния, галлия и платины, а затраты на разделение составляют 30% от стоимости восстановления.

Высокое энергопотребление: Расход энергии на химическую очистку и снижение высоких температур составляет 5-8 МВтч/т, и процесс необходимо оптимизировать.

Маленькие тигли: тигли диаметром < 50 мм трудно поддаются дроблению, а эффективность восстановления составляет < 90%.

Переработка отработанных жидкостей: на тонну отработанного тигля образуется 0,5-1 м³ отработанной жидкости, а для ее обработки до ХПК требуется многоступенчатая нейтрализация < 50 мг/л.

Направление совершенствования

Новые технологии: электрохимическая очистка (снижение энергопотребления на 20%), плазменный обжиг (повышение эффективности на 15%).

Автоматизация: ИИ контролирует параметры очистки (погрешность < 0,1%), а коэффициент восстановления увеличивается до >98%.

Зеленая химия: очистка с низкой концентрацией кислот (<5 моль/л), снижение количества отработанной жидкости на 50%.

Малогабаритное оборудование: Разработка микродробилки, подходящей для малогабаритных тиглей, с эффективностью >95%.

Технические параметры

Эффективность переработки: 90%-98% в настоящее время, 99% целевой >.

Целевой показатель энергопотребления: <5 МВтч/т, что на 30% ниже текущей ситуации.

Сброс отработанных жидкостей: <0,3 м³/т, ХПК<30 мг/л.

Содержание примесей: 5 ppm примесей вольфрамового порошка < восстановлено для применения с высокой степенью чистоты.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Технология вторичной переработки снижает добычу сырой руды на 30% и воздействие на окружающую среду на 20%; Вольфрамовый порошок высокой чистоты удовлетворяет потребности полупроводников.

Задача: На обоснование индустриализации новых технологий уходит 3-5 лет; Инвестиции в оборудование для переработки малых тиглей высоки, и малым и средним предприятиям трудно его продвигать.

9.2.3 Контроль качества переработанной продукции

Принцип процесса

Контроль качества переработанных продуктов гарантирует, что переработанные вольфрамовые изделия (например, тигли, сплавы) обладают теми же свойствами (чистота, прочность, долговечность), что и первичные продукты, чтобы удовлетворить потребности высокотехнологичных приложений.

Меры контроля качества

Химический анализ: ICP-MS определяет чистоту вольфрамового порошка (>99,999%), примеси <1 ppb (Si, Fe, C).

Физический тест: лазерный анализ размеров частиц (размер частиц 0,5-5 мкм), микроскопический контроль однородности зерна (отклонение <5%).

Механические свойства: прочность на разрыв > 800 МПа, твердость > HV 400, термоудар > 500 циклов.

Качество поверхности: шероховатость Ra <0,05 мкм, поверхностный остаток <0,01 мкг/см².

Неразрушающий контроль: рентгеновская компьютерная томография (разрешение <0,01 мм),

дефектность <0,05%.

Процесс верификации

Тестирование партии: 10%-20% отбора проб на партию, процент сдачи > 99,5%.

Эксплуатационные испытания: имитация использования при высоких температурах (1500-3000°C), испытание на долговечность > 80 раз.

Сертификация: Соответствует ISO 9001, ASTM B760 (стандарт для вольфрамовых изделий), учет > 5 лет.

Система прослеживаемости: RFID или блокчейн записывает параметры партии восстановления и процесса, а уровень прослеживаемости > 99,9%.

Технические параметры

Чистота: Чистота восстановленного тигля > 99,999%, что сопоставимо с оригиналом.

Срок службы: 80-100 раз, что составляет 90% от исходного тигля.

Процент дефектов: <0,1%, трещина <0,1 мм.

Точность обнаружения: 0,1 ppb для химического анализа <, 0,01 мкм для физических измерений.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Строгий контроль качества гарантирует, что производительность тигля для переработки достигает более 90% от исходной, а стоимость снижается на 30%; Системы прослеживаемости повышают доверие клиентов.

Задача: Высокие инвестиции в высокоточное испытательное оборудование, составляющие 15% затрат на восстановление; Следовые примеси могут повлиять на применение в полупроводниках и потребовать дальнейшей оптимизации.

9.3 Экологические нормы и соответствие вольфрамового тигля

Производство, переработка и утилизация отходов вольфрамовых тиглей регулируются международными и национальными экологическими нормами, чтобы обеспечить экологически чистую и соответствующую требованиям работу.

9.3.1 Международные и национальные экологические нормы

Принцип процесса

Экологические нормы регулируют добычу ресурсов, производственные выбросы, обработку и переработку отходов в вольфрамовой тигельной промышленности, направленные на снижение экологического ущерба и загрязнения и обеспечение устойчивого развития.

Международные правила

REACH: Регламент ЕС по ограничению опасных химических веществ (например, гексафторида серы) при производстве вольфрама с летучими < 0,1 ppm.

RoHS: Ограничение содержания токсичных веществ в вольфрамовых изделиях в электронном оборудовании, содержание свинца и кадмия $< 0,01\%$.

Базельская конвенция: Контроль за трансграничной перевозкой вольфрамовых отходов, требуется лицензия на экспорт, уровень соблюдения $> 99\%$.

ISO 14001: Система экологического менеджмента, выбросы углерода, сточные воды, твердые отходы требуют ежегодного аудита.

Внутренние правила

Закон КНР «Об охране окружающей среды»: норма очистки хвостов составляет $> 80\%$, а ХПК сточных вод – < 50 мг/л.

«Закон о предотвращении и контроле загрязнения окружающей среды твердыми отходами»: Тигли для отходов должны быть переработаны отдельно, а коэффициент восстановления составляет $> 90\%$.

«Закон о поощрении более чистого производства»: потребление производственной энергии < 15 МВтч/тонну, а на зеленую энергию приходится $> 30\%$.

«Стандартные условия вольфрамовой промышленности»: коэффициент извлечения составляет $> 85\%$, а коэффициент извлечения обогащения – $> 90\%$.

Требования к реализации

Процесс соблюдения: Подайте оценку воздействия на окружающую среду (ОВОС) со сроком утверждения < 3 месяца.

Мониторинг: Оперативный мониторинг отходящих газов ($SO_2 < 200$ мг/м³) и сточных вод (pH 6-9) с точностью до $\pm 0,01\%$.

Записи: Данные об окружающей среде архивируются в течение 5 лет $> а прозрачность > 95\%$.

Наказание: За незаконный сброс будет наложен штраф в размере 10-1 миллиона юаней, а в серьезных случаях разрешение будет аннулировано.

Технические параметры

Процент омпииентности: $> 99,5\%$, ежегодный процент прохождения аудита $> 98\%$.

Норма выбросов: $CO_2 < 30$ тонн/тонну тигель, сточные воды < 100 м³/тонну.

Коэффициент восстановления: $> 90\%$ отходов тиглей, $> 50\%$ хвостов.

Периодичность мониторинга: ежедневно для отходящих газов и сточных вод, ежемесячно для твердых бытовых отходов.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Соблюдение нормативных требований снижает правовые риски и повышает конкурентоспособность на рынке; Регулирование стимулирует развитие «зеленых» технологий.

Проблема: различия в законодательстве между несколькими странами увеличивают затраты на соблюдение нормативных требований; Малые и средние предприятия не могут позволить себе затраты на высокочастотный мониторинг.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

9.3.2 Нормы удаления и сброса отходов

Принцип процесса

Отходы (хвосты, отработанные жидкие отходы, отходящие газы), образующиеся при производстве и переработке вольфрамовых тиглей, должны обрабатываться в соответствии со стандартами для снижения загрязнения окружающей среды и выполнения требований по выбросам.

Виды лома и утилизация

Хвосты: для хранения требуется облагораживающий шлак, содержащий $< 0,5\%$ вольфрама, непроницаемая мембрана (толщина $> 1\text{ мм}$), а коэффициент извлечения составляет $> 50\%$.

Отработанная жидкость: жидкость для травления отходов ($\text{pH} < 2$), нейтрализованная до $\text{pH} 6-9$, ХПК $< 50\text{ мг/л}$, тяжелые металлы $< 0,1\text{ мг/л}$.

Отходящий газ: отходящий газ спекания (содержащий SO_2 , NO_x), сбрасываемый после десульфурации и денитрификации, $\text{SO}_2 < 200\text{ мг/м}^3$, $\text{NO}_x < 100\text{ мг/м}^3$.

Твердые отходы: отходы представляют собой фрагменты тигля, коэффициент восстановления составляет $> 90\%$, а неперабатываемая часть безвредно вывозится на свалку.

Технология обработки

Хвосты: флотация + магнитная сепарация, 50% вольфрама $>$ восстановлено, а остальное используется для строительных материалов (прочность $> 10\text{ МПа}$).

Отработанная жидкость: многоступенчатая нейтрализация + ионный обмен, коэффициент переработки отработанной жидкости $> 80\%$.

Выхлопные газы: мокрая десульфурация (эффективность $> 95\%$), денитрификация SCR (эффективность $> 90\%$).

Твердые отходы: дробление + химическая очистка, коэффициент извлечения вольфрама $> 95\%$, затвердевание остатков отходов (выщелачивание тяжелых металлов $< 0,01\text{ мг/л}$).

Технические параметры

Утилизация хвостов: $> 80\%$, восстановленный вольфрам $> 0,3\%$.

Расход отработанной жидкости: ХПК $< 50\text{ мг/л}$, тяжелые металлы $< 0,05\text{ мг/л}$, скорость циркуляции $> 80\%$.

Выбросы отходящих газов: $\text{SO}_2 < 150\text{ мг/м}^3$, $\text{NO}_x < 80\text{ мг/м}^3$, твердые частицы $< 10\text{ мг/м}^3$.

Коэффициент утилизации твердых бытовых отходов: $> 90\%$, процент захоронения отходов $< 5\%$.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Эффективная переработка отходов снижает загрязнение окружающей среды на 80% , вторичная переработка экономит ресурсы на 30% ; Соблюдение законов и нормативных актов для улучшения корпоративного имиджа.

Задача: Высокие инвестиции в оборудование для очистки отработанных жидкостей и

отходящих газов, составляющие 20% эксплуатационных расходов; Технология улавливания хвостов нуждается в дальнейшей оптимизации.

9.3.3 Сертификация и аудит соответствия

Принцип процесса

Сертификация и аудит соответствия проверяют соответствие предприятий вольфрамовых тиглей с точки зрения охраны окружающей среды, качества и безопасности, а также обеспечивают соответствие нормативным документам и требованиям клиентов.

Тип сертификации

ISO 14001: Система экологического менеджмента, охватывающая производство, переработку, утилизацию отходов, цикл сертификации 3 года.

ISO 9001: Система управления качеством, чистота тигля, процент прохождения эксплуатационных испытаний > 99,5%.

OHSAS 18001: Охрана труда и техника безопасности, уровень несчастных случаев < 0,1%, охват обучением сотрудников 100%.

Зеленая сертификация: например, экологическая маркировка Китая, выбросы углерода < тигель производительностью 25 тонн/тонну.

Процесс аудита

Внутренний аудит: Ежеквартальная проверка экологических данных и записей об утилизации отходов с охватом > 95%.

Внешний аудит: сторонняя организация (например, SGS, TÜV), ежегодный аудит, уровень соответствия > 98%.

Предоставление данных: отработанные газы, сточные воды, данные о сбросе твердых отходов, загрузка в режиме реального времени в отдел охраны окружающей среды, ошибка < 1%.

Исправление: При обнаружении несоответствий период устранения составит < 30 дней, а процент прохождения проверки составит > 99%.

Технические параметры

Процент прохождения сертификации: > 98%, действителен в течение 3-5 лет.

Периодичность аудита: раз в 3 месяца внутренне, 1 раз в год внешний.

Точность данных: Мониторинг выбросов $\leq \pm 0,01\%$, архив > за 5 лет.

Процент исправления: Процент устранения несоответствующих элементов > 99%, а время ответа < 7 дней.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Сертификация повышает доверие рынка и привлекает «зеленые» инвестиции;

Аудиты обеспечивают соблюдение нормативных требований и снижают риск штрафов.

Задача: Высокие сборы за сертификацию и аудит, составляющие 10% от управленческих

расходов; Многостандартная координация увеличивает административную нагрузку.

9.4 Практика циркулярной экономики в вольфрамовом тигле

Экономика замкнутого цикла позволяет максимально повысить ценность вольфрамовых тиглей и сократить отходы ресурсов и воздействие на окружающую среду за счет управления замкнутым циклом, восстановления ресурсов и отраслевого сотрудничества.

9.4.1 Замкнутый цикл управления вольфрамовыми ресурсами

Принцип процесса

Управление замкнутым циклом объединяет восстановление, повторное использование и воспроизведение вольфрамовых тиглей для формирования системы переработки ресурсов, снижения зависимости от сырой руды и повышения эффективности использования ресурсов.

Меры по управлению

Сеть переработки: Создание глобального пункта переработки отходов с охватом > 80% и эффективностью сбора > 90%.

Цепочка повторного использования: переработанный вольфрамовый порошок используется непосредственно в новых тиглях, сплавах или инструментах с коэффициентом переработки > 70%.

Платформа данных: блокчейн записывает жизненный цикл тигля (производство, переработка, обработка), а уровень прослеживаемости > 99,9%.

Экологичная цепочка поставок: отдайте приоритет закупке переработанного вольфрама, сократите использование сырой руды на 30% и > соблюдение требований поставщиками на 95%.

Технические параметры

Коэффициент переработки: Уровень переработки вольфрамовых ресурсов > 70%, а целевой показатель > 85%.

Охват переработкой: 80% > основных рынках и 50% > малых и средних рынках.

Целостность данных: данные о жизненном цикле архивируются в течение > 5 лет, с погрешностью < 0,1%.

Зависимость от сырой руды: снижение на 30%-50%, мощность добычи < 5000 тонн/год.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Управление с обратной связью снижает потребление ресурсов на 30% и выбросы углерода на 20%; Платформа данных повышает эффективность цепочки поставок на 25%.

Задача: Создание глобальной сети переработки с высокими первоначальными инвестициями занимает 5-10 лет; Неравномерное качество восстановительного тигля должно быть стандартизировано.

9.4.2 Анализ экономических выгод от переработки

Принцип процесса

Экономические выгоды от переработки достигают устойчивого развития индустрии вольфрамовых тиглей за счет снижения стоимости сырья, снижения затрат на очистку окружающей среды и создания новых источников дохода.

Анализ преимуществ

Экономия средств: Стоимость переработанного вольфрама составляет около 50%-60% от первичного вольфрама, что позволяет сэкономить 0,5-10 000 юаней за тонну.

Затраты на охрану окружающей среды: сокращение переработки хвостов и отработанных жидкостей, экономия 20%-30% затрат на охрану окружающей среды, около 0,1-030000 юаней/тонну.

Новые поступления: реализация переработанного вольфрамового порошка, рентабельность 10-15%, годовой доход до 50 млн юаней (средние предприятия).

Окупаемость инвестиций: Срок окупаемости оборудования для переработки составляет 3-5 лет, а чистая приведенная стоимость (NPV) составляет >0.

Технические параметры

Снижение затрат: стоимость переработки тиглей < 80 000 юаней/тонну, а первоначальная стоимость > 150 000 юаней/тонну.

Рентабельность: норма прибыли от продажи переработанной продукции > 10%, а совокупная норма прибыли >8%.

Масштаб инвестиций: средние инвестиции в линию переработки в размере 0,5-100 миллионов юаней, производственная мощность 500-1000 тонн в год.

Срок окупаемости: 3-5 лет, внутренняя норма доходности (IRR) >15%.

Преимущества и проблемы

Преимущества: вторичная переработка снижает себестоимость продукции на 30% и повышает конкурентоспособность предприятий; Новые источники дохода, диверсифицированные модели получения прибыли.

Задача: Первоначальные инвестиции в оборудование для переработки высоки, а финансовое давление на малые и средние предприятия велико; Необходимо улучшить принятие рынком переработанных продуктов.

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of $\geq 99.95\%$ minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

Rare earth metal melting: Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

Vacuum coating: Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

High-temperature furnaces: Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C .

Chemical synthesis: Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

Metal smelting and refining: Used for melting and refining high-purity metals.

Sapphire crystal growth: Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between $2000\text{--}2500^{\circ}\text{C}$.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

9.4.3 Отраслевое сотрудничество и модели экономики замкнутого цикла

Принцип процесса

Отраслевое сотрудничество создает экосистему экономики замкнутого цикла за счет интеграции предприятий, занимающихся разведкой и добычей и переработкой, правительств и научно-исследовательских институтов для содействия устойчивому производству и переработке вольфрамовых тиглей.

Модель сотрудничества

Сотрудничество между промышленностью, университетами и научными исследованиями: Разработка высокоэффективных технологий восстановления (таких как электрохимическая очистка) с университетами и научно-исследовательскими институтами и повышение коэффициента извлечения до >99%.

Альянс цепочек поставок: сотрудничайте с горнодобывающими компаниями, производителями и переработчиками для создания замкнутой цепочки поставок с коэффициентом использования ресурсов > 80%.

Поддержка политики: сотрудничество с правительством в стремлении к субсидиям на переработку (0,1-05 000 юаней/тонну), снижению налогов > 10%.

Отраслевой стандарт: Сформулируйте спецификации восстановления вольфрамового тигля (такие как чистота > 99,99%, примеси < 5 ppm) и коэффициент продвижения > 90%.

Технические параметры

Охват кооперации: 70% участников отраслевого альянса >, а 50% малых и средних предприятий >.

Коэффициент извлечения: 85% > пилотных проектах и 70% в среднем по отрасли >.

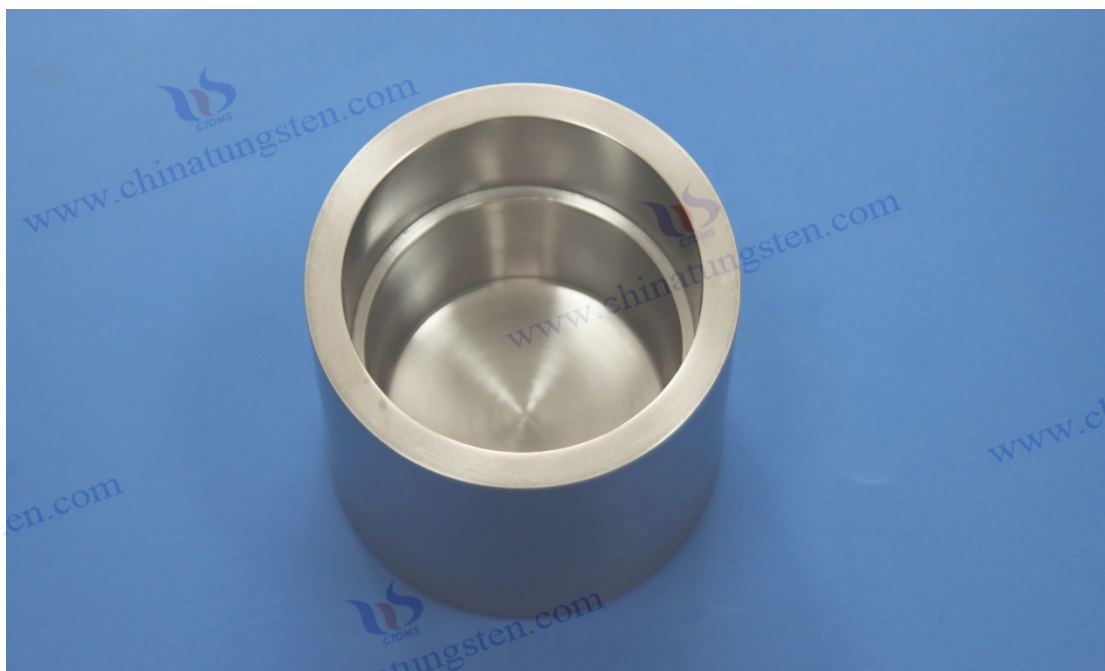
Темп продвижения технологии: 60% применения новой технологии переработки >, а цикл продвижения < 3 года.

Информирование общественности: Реклама экономики замкнутого цикла охватывает 80% > целевых потребителей, а уровень осведомленности > 90%.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Отраслевое сотрудничество снижает затраты на НИОКР на 20% и ускоряет продвижение технологий; Политика поддерживает увеличение уровня переработки на 30%.

Задачи: Распределение выгод от добычи и добычи необходимо координировать, а затраты на управление альянсом высоки; Малые и средние предприятия (МСП) имеют низкий уровень участия и нуждаются в стимулах.



Вольфрамовый тигель CTIA GROUP LTD

Глава 10 Стандарты и нормы для вольфрамовых тиглей

Вольфрамовые тигли являются высокопроизводительными промышленными компонентами, которые производятся, тестируются и применяются в соответствии со строгими стандартами и нормами для обеспечения качества, производительности и безопасности. В этом разделе подробно обсуждаются требования Китайских национальных стандартов (GB), Международной организации по стандартизации (ISO), Американских стандартов (ASTM) и других международных стандартов для вольфрамовых тиглей, в сочетании с практическим опытом мировых компаний, производящих вольфрам, и отраслевой информацией, предоставленной Chinatungsten Online, анализируются технические детали, методы испытаний и требования соответствия стандартов, и предоставляет стандартизированные рекомендации для производителей и пользователей.

10.1 Китайский национальный стандарт (GB)

Китайский национальный стандарт (GB) содержит подробные технические спецификации для производства, проверки и применения вольфрамовых тиглей, охватывающие свойства материалов, производственные процессы и контроль качества для обеспечения удовлетворения потребностей внутреннего и международного рынка.

10.1.1 GB/T 3875-2017: Общие технические условия на вольфрамовые изделия

Обзор стандарта

GB/T 3875-2017 определяет химический состав, физические свойства, процесс производства и методы испытаний вольфрамовых изделий (включая вольфрамовые тигли, вольфрамовые

Уведомление об авторских правах и юридической
ответственности

пластины, вольфрамовые стержни и т. д.), которые подходят для высокотемпературных промышленных применений (например, полупроводников, аэрокосмической промышленности).

Технические требования

Химический состав: чистота вольфрама >99,95%, содержание примесей (Fe, Ni, C и др.) <100 ppm, газообразных элементов (O, N) <50 ppm.

Физические свойства:

Плотность: > 19,1 г/см³ (спеченные), > 19,25 г/см³ (кованые).

Прочность на разрыв: > 600 МПа (комнатная температура), > 300 МПа (1000°C).

Твердость: > HV 350 (комнатная температура).

Качество поверхности: шероховатость Ra<0,2 мкм, без трещин, пористости и включений (диаметр > 0,1 мм).

Допуски по размерам: диаметр $\pm 0,05$ мм, толщина стенки $\pm 0,02$ мм, подходит для диаметров тиглей 20-500 мм.

Процесс изготовления: порошковая металлургия (температура спекания 1800-2500°C), вакуумная или инертная атмосфера (содержание кислорода < 10 ppm).

Метод испытаний:

Химический анализ: ICP-MS (точность $\pm 0,1$ ppm) для обнаружения примесей, газоанализатор (точность $\pm 0,01$ ppm) для измерения содержания O и N.

Физическое испытание: универсальная испытательная машина для измерения прочности на разрыв (погрешность $\pm 1\%$), твердомер по Виккерсу для измерения твердости (погрешность ± 5 HV).

Контроль поверхности: оптический микроскоп (разрешение < 1 мкм) для проверки на наличие дефектов, измеритель шероховатости поверхности (точность $\pm 0,01$ мкм).

Размерные измерения: лазерный дальномер (точность $\pm 0,01$ мм) с допусками по ISO 2768.

Требования к соответствию

Отчет об осмотре: Каждая партия предоставляет отчет о химическом составе, физических свойствах и размерах, который архивируется >в течение 5 лет.

Сертификация качества: соответствие ISO 9001, процент прохождения партии > 99,5%.

Применение: Он подходит для выращивания монокристаллического кремния, выплавки редкоземельных металлов и т.д., и отвечает потребностям высокой чистоты (>99,999%).

Преимущества и проблемы

Преимущества: Стандарт полностью охватывает эксплуатационные характеристики вольфрамовых изделий, а метод обнаружения является точным для обеспечения надежности тигля; Поддержка экспортной конкурентоспособности вольфрамовой промышленности Китая.

Задача: Высокие требования к чистоте увеличивают производственные затраты; Малому бизнесу сложно оснастить себя высокоточным досмотровым оборудованием.

10.1.2 GB/T 3459-2022: Технические требования к вольфрамовым тиглям

Обзор стандарта

GB/T 3459-2022 разработан специально для вольфрамовых тиглей и определяет их требования к проектированию, производству, проверке и упаковке для высокотемпературных применений в полупроводниковой, фотоэлектрической и металлургической промышленности.

Технические требования

Материал: чистота вольфрама >99,99%, примеси (Si, Fe, Mo) <50 ppm, газовые элементы <20 ppm.

Производительность:

Термостойкость: > 3000°C, термический удар > 500 раз, отсутствие трещин (>0,1 мм).

Теплопроводность: > 100 Вт/м·К (1000°C), обеспечивая равномерное тепловое поле $\pm 5^\circ\text{C}$.

Чистота поверхности: Ra<0,1 мкм, для предотвращения адгезии материала.

Размеры и конструкция:

Диаметр: 20-500 мм, толщина стенки 1-10 мм, допуск $\pm 0,02$ мм.

Форма: круглая или по индивидуальному заказу, отклонение толщины дна < 0,05 мм.

Производственный процесс: изостатическое прессование (давление > 200 МПа), вакуумное спекание (температура > 2200°C, содержание кислорода <5 ppm).

Упаковка: вакуумная (<10 Па), ударопрочная пена (толщина > 10 мм), в соответствии с GB/T 191.

Метод испытаний:

Эксплуатационные испытания: высокотемпературная печь, имитирующая работу при температуре 3000°C, испытание на тепловой удар (скорость повышения и падения температуры 10°C/мин), обнаружение трещин (рентгеновское излучение, разрешение < 0,01 мм).

Поверхностный анализ: атомно-силовая микроскопия (АСМ, точность $\pm 0,001$ мкм) для измерения шероховатости, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) для проверки микроскопических дефектов.

Контроль размеров: Координатно-измерительная машина (КИМ, точность $\pm 0,005$ мм) с допусками по ISO 1101.

Химическое детектирование: GD-MS (масс-спектрометрия тлеющего разряда, точность $\pm 0,05$ ppm) для примесей.

Требования к соответствию

Контроль партии: 5%-10% отбора проб на партию, процент прохождения > 99,8%.

Сертификация: Он должен пройти независимое тестирование (например, SGS) и сообщить о соответствии требованиям CNAS.

Применение: Используется для выращивания монокристаллического кремния методом Чохральского и производства кристаллов сапфира, чистотой > 99,999%.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Стандарт оптимизирован для высокотемпературных применений в тиглях для обеспечения стабильной производительности; Метод обнаружения является передовым и поддерживает высокоточное производство.

Задача: Строгие требования к поверхности и чистоте затрудняют процесс; Инвестиции в испытательное оборудование высоки, а затраты на внедрение малыми и средними предприятиями высоки.

10.1.3 YB/T 5174-2020: Промышленный стандарт для вольфрамовых тиглей

Обзор стандарта

YB/T 5174-2020 является отраслевым стандартом для вольфрамовых тиглей, дополняющим GB/T 3459-2022, ориентированным на стандартизацию производственного процесса, контроль качества и требования к защите окружающей среды, и применим к предприятиям вольфрамовой промышленности Китая.

Технические требования

Сырье: размер частиц вольфрамового порошка 0,5-5 мкм, чистота > 99,99%, содержание O < 10 ppm.

Производительность:

Коррозионная стойкость: устойчив к коррозии расплавленного кремния и галлия, со скоростью коррозии < 0,01 мм/год.

Механическая прочность: прочность на разрыв > 700 МПа (комнатная температура), > 200 МПа (2000°C).

Термическая стабильность: скорость деформации < 0,1% при 3000°C, коэффициент теплового расширения < $4,5 \times 10^{-6}/K$.

Изготовление: CVD-покрытие (SiC, толщина 0,05-0,1 мм) для повышения коррозионной стойкости, чистота атмосферы спекания > 99,999%.

Охрана окружающей среды: ХПК производственных сточных вод < 50 мг/л, отходящие газы SO_2 < 200 мг/м³, коэффициент извлечения хвостов > 50%.

Метод испытаний:

Испытание на коррозию: погружение в расплавленный кремний (1600°C, 24 часа), измерение глубины коррозии (точность $\pm 0,001$ мм).

Механические испытания: испытание на растяжение при высоких температурах (2000°C,

погрешность $\pm 1\%$), испытание на твердость (погрешность ± 5 HV).

Испытания на охрану окружающей среды: оперативный мониторинг сточных вод (pH 6-9, точность $\pm 0,01$), выхлопных газов (твердые частицы < 10 мг/м³).

Контроль качества: полная проверка размера каждой партии (допуск $\pm 0,01$ мм), производительность отбора проб (процент сдачи $> 99,5\%$).

Требования к соответствию

Записи: Производство, испытания, архивирование данных об охране окружающей среды > 5 лет, прослеживаемость $> 99,9\%$.

Сертификация: соответствие стандарту ISO 14001, утилизация отходов должна быть одобрена местными органами охраны окружающей среды.

Применение: Подходит для производства фотоэлектрических кремниевых пластин и получения сложных полупроводников (таких как GaN).

Преимущества и проблемы

Преимущества: стандарты в сочетании с требованиями охраны окружающей среды для продвижения «зеленого» производства; Сильный, отраслево ориентированный и подходящий для китайского рынка.

Задача: Высокая частота испытаний на предмет защиты окружающей среды, увеличение эксплуатационных расходов; Малому бизнесу сложно выполнить все требования к проверке.

10.2 Стандарты Международной организации по стандартизации (ИСО)

Стандарт ISO представляет собой глобальную единую спецификацию для управления качеством, экологического менеджмента и высокотемпературных испытаний вольфрамовых тиглей, обеспечивая стабильность и надежность продукции на международном рынке.

10.2.1 ISO 9001:2015: Система менеджмента качества

Обзор стандарта

Стандарт ISO 9001:2015 определяет требования к системе менеджмента качества (СМК), применимой к производству, контролю вольфрамовых тиглей и управлению цепочкой поставок для обеспечения стабильности продукции и удовлетворенности клиентов.

Технические требования

Контроль процесса: от заготовки сырья до доставки готовой продукции процесс документируется, а отклонение составляет $< 1\%$.

Целевые показатели качества: процент прохождения партии $> 99,5\%$, процент жалоб клиентов $< 0,1\%$.

Испытания: полностью зафиксирован химический состав (чистота $> 99,99\%$), размеры (допуск $\pm 0,02$ мм), эксплуатационные характеристики (тепловой удар > 500 раз).

Постоянное совершенствование: ежегодный аудит качества, показатель реализации

мероприятий по улучшению > 95%.

Как это сделать

Документооборот: электронные записи о качестве, архивирование > 5 лет, уровень прослеживаемости > 99,9%.

Обучение: Годовой > обучения сотрудников составляет 20 часов, показатель охвата – 100%, а проходной балл > 95%.

Аудит: Внутренний аудит каждые 6 месяцев, внешний аудит каждый год, сертификация сроком на 3 года.

Отзывы клиентов: Ответ на жалобу < 24 часа, уровень разрешения > 98%.

Требования к соответствию

Сертификация: Требуется сертификация третьей стороны (например, TÜV, SGS), а процент успешно пройденных экзаменов составляет >98%.

Применение: Покрытие для вольфрамового тигля, производство, тестирование, упаковка, подходит для полупроводников, аэрокосмической промышленности.

Записи: Данные о качестве и аудиторские отчеты архивируются в течение > 5 лет, а прозрачность > 90%.

Преимущества и проблемы

Преимущества: повышение стабильности качества продукции и повышение конкурентоспособности на рынке; Высокое мировое признание, хорошо для экспорта.

Проблемы: высокая стоимость сертификации и аудита, сложность внедрения для малых и средних предприятий; Управление документами должно поддерживаться в цифровом формате.

10.2.2 ISO 14001:2015: Система экологического менеджмента

Обзор стандарта

Стандарт ISO 14001:2015 определяет требования к системе экологического менеджмента (EMS) для руководства экологическим менеджментом при производстве и переработке вольфрамовых тиглей с целью сокращения выбросов углерода и загрязнения отходами.

Технические требования

Экологические цели: выбросы углерода < тигель 30 тонн/т, ХПК <50 мг/л, коэффициент извлечения хвостов > 50%.

Управление ресурсами: на 90% > использование сырья и на 15% повышение энергоэффективности.

Переработка отходов: отходящий газ $SO_2 < 200$ мг/м³, отходы жидкие тяжелые металлы <0,1 мг/л, коэффициент утилизации твердых отходов >90%.

Мониторинг: онлайн-мониторинг окружающей среды (точность $\pm 0,01\%$), архивирование данных > 5 лет.

Как это сделать

Экологическая оценка: Ежегодная оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС), 100% охват.

Обучение: Обучение сотрудников по охране окружающей среды > 10 часов в год, с охватом > 95%.

Аудит: Ежеквартальный внутренний, ежегодный внешний, с долей исправления > 99%.

Зеленые технологии: рекуперация отходящего тепла (эффективность > 15%), возобновляемая энергия (> 30%).

Требования к соответствию

Сертификация: требуется сертификация ISO 14001, цикл составляет 3 года, а проходной балл составляет >98%.

Применение: Охват производства, переработки, утилизации отходов, соответствие требованиям REACH, RoHS.

Отчет: Данные об окружающей среде являются открытыми, прозрачность > 95%, а архивирование > 5 лет.

Преимущества и проблемы

Преимущества: снижение воздействия на окружающую среду на 20% и повышение «зеленого» имиджа предприятия; Соблюдение нормативных требований снижает риск штрафов.

Задача: Высокие инвестиции в оборудование для мониторинга окружающей среды, составляющие 10-15% эксплуатационных расходов; Малый и средний бизнес из всех сил пытается соответствовать требованиям к высокой частоте аудита.

10.2 Стандарты Международной организации по стандартизации (ИСО) (продолжение)

10.2.3 ISO 15730:2000: Испытание высокотемпературных свойств металлических материалов

Обзор стандарта

Стандарт ISO 15730:2000 определяет метод испытаний металлических материалов на эксплуатационные характеристики в высокотемпературных средах, который подходит для оценки термической стабильности, механической прочности и коррозионной стойкости вольфрамовых тиглей с целью обеспечения их надежности в экстремальных условиях.

Технические требования

Температура испытания: от 1000°C до 3000°C, точность регулирования температуры $\pm 2^\circ\text{C}$.

Показатели эффективности:

Прочность на разрыв: > 200 МПа (2000°C), погрешность $\pm 1\%$.

Тепловые удары: > 500 циклов (скорость повышения и падения температуры 10°C/мин), без трещин (>0,1 мм).

Коррозионная стойкость: Устойчив к расплавленному кремнию и галлию, скорость коррозии

< 0,01 мм/год.

Условия испытания: вакуум ($<10^{-5}$ Па) или инертная атмосфера (содержание кислорода <1 ppm).

Требования к образцу: сечения тигля (толщина 1-5 мм), шероховатость поверхности $Ra < 0,2$ мкм.

Метод испытаний:

Высокотемпературное растяжение: высокотемпературная универсальная испытательная машина (точность нагружения $\pm 0,5\%$), испытание на прочность при 2000°C .

Испытание на тепловой удар: быстрая рампа и температурная печь (скорость $10-20^{\circ}\text{C}/\text{мин}$), рентгеновская детекция трещин (разрешение $< 0,01$ мм).

Испытание на коррозию: иммерсионное испытание ($1600-2000^{\circ}\text{C}$, 24 часа), СЭМ-анализ глубины коррозии (точность $\pm 0,001$ мм).

Регистрация данных: электронное архивирование параметров и результатов испытаний за период > 5 лет.

Требования к соответствию

Отчетность: Для каждой партии предоставляются отчеты о высоких температурных характеристиках в соответствии с лабораторными стандартами ISO 17025.

Сертификация: Испытательное оборудование должно быть откалибровано (погрешность $< 0,5\%$), а результаты можно отследить.

Применение: Используется в ядерных реакторах, аэрокосмической высокотемпературной проверке компонентов.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Стандартные методы испытаний обеспечивают стабильную работу тиглей при высоких температурах для удовлетворения потребностей в экстремальных условиях эксплуатации; Высокое международное признание.

Задача: Оборудование для высокотемпературных испытаний стоит дорого, стоимость одного испытания составляет около 0,5-10 000 юаней, а сложное моделирование окружающей среды требует профессиональных навыков.

10.3 Американские стандарты (ASTM)

Стандарты ASTM содержат подробные рекомендации по спецификациям материалов, эксплуатационным испытаниям и химическому анализу вольфрамовых тиглей, которые широко используются на рынках Северной Америки и мира.

10.3.1 ASTM B760-07(2019): Стандартные технические условия на вольфрамовые листы, листы и фольгу

Обзор стандарта

ASTM B760-07 (2019) определяет химический состав, механические свойства и

производственные требования к вольфрамовым пластинам, листам и фольге и применим к производству сырья или компонентов для вольфрамового тигля.

Технические требования

Химический состав: чистота вольфрама >99,95%, примеси (Fe, Ni, C) <100 ppm, O <20 ppm.

Механические свойства:

Прочность на разрыв: > 550 МПа (комнатная температура), > 150 МПа (1000°C).

Относительное удлинение: >2% (комнатная температура), >5% (1000°C).

Твердость: > HV 300.

Качество поверхности: отсутствие трещин, пористость (>0,1 мм), шероховатость Ra <0,3 мкм.

Допуски по размерам: толщина $\pm 0,01$ мм, ширина $\pm 0,05$ мм, подходит для толщины стенок тигля 1-10 мм.

Производственный процесс: спекание горячим прессом (2000-2500°C), вакуумная или водородная атмосфера (содержание кислорода <5 ppm).

Метод испытаний:

Химический анализ: ICP-OES (точность $\pm 0,1$ ppm) для обнаружения примесей, анализатор LECO для обнаружения O, N (точность $\pm 0,01$ ppm).

Механические испытания: испытание на растяжение (ASTM E8, погрешность $\pm 1\%$), испытание на твердость (ASTM E18, погрешность ± 5 HV).

Контроль поверхности: ультразвуковая дефектоскопия (разрешение < 0,1 мм), шероховатость (точность $\pm 0,01$ мкм).

Контроль размеров: лазерное измерение (точность $\pm 0,005$ мм) в соответствии с ANSI B46.1.

Требования к соответствию

Инспекция: На каждую партию выдается сертификат материала (CoA), включая химический состав, эксплуатационные данные.

Сертификация: Соответствует стандарту AS9100 (Аэрокосмическая система качества), проходной балл составляет > 99,5%.

Применение: Используется в качестве сырья для аэрокосмических сопел и полупроводниковых тиглей.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Стандарт детально регламентирует характеристики сырья для обеспечения стабильности производства тиглей; Метод испытаний является проверенным и может использоваться во всем мире.

Задача: Высокие требования к чистоте увеличивают затраты на рафинирование; Ультратонкие пленки (<0,1 мм) трудно поддаются контролю.

10.3.2 ASTM E696-07(2018): Стандартная спецификация на вольфрамовые изделия

Обзор стандарта

Стандарт ASTM E696-07 (2018) учитывает требования к эксплуатационным характеристикам, производству и приемке вольфрамовых изделий, включая тигли, и подходит для высокотемпературной промышленности и научных исследований.

Технические требования

Материал: чистота вольфрама > 99,99%, примеси (Si, Mo, Fe) < 50 ppm, газовые элементы < 10 ppm.

Производительность:

Термостойкость: > 3000°C, цикл теплового удара > 500 раз, скорость деформации < 0,1%.

Коррозионная стойкость: Устойчив к расплавленным металлам (кремний, галлий), скорость коррозии < 0,01 мм/год.

Теплопроводность: > 100 Вт/м·К (1000°C).

Производство: порошковая металлургия или плазменное напыление, температура спекания > 2200°C, чистота атмосферы > 99,999%.

Размеры: диаметр 20-500 мм, допуск по толщине стенки $\pm 0,02$ мм, плоскостность дна < 0,05 мм.

Метод испытаний:

Эксплуатационные испытания: высокотемпературная печь (3000°C, контроль температуры $\pm 2^\circ\text{C}$) имитация использования, испытание на тепловой удар (ASTM E1461).

Испытание на коррозию: погружение в расплавленный кремний (1600°C, 48 часов), измерение потери массы (точность $\pm 0,001$ г).

Контроль размеров: КИМ (точность $\pm 0,005$ мм), анализ поверхности (СЭМ, точность $\pm 0,001$ мкм).

Химический анализ: GD-MS (точность $\pm 0,05$ ppm) для обнаружения примесей.

Требования к соответствию

Отчетность: Для каждой партии предоставляются отчеты о производительности, размерах, химических анализах, а архив > 5 лет.

Сертификация: Соответствует стандарту MIL-STD-810 (Военные испытания на воздействие окружающей среды) с процентом сдачи > 99,8%.

Применение: используется в ядерном синтезе, производстве фотоэлектрических кремниевых пластин.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Стандарт охватывает высокотемпературные характеристики и подходит для применения в экстремальных условиях; Метод испытаний точен, а данные достоверны.

Проблема: Стоимость высокотемпературных испытаний высока, около 0,5-10 000 юаней за один раз, а строгие требования к допускам увеличивают сложность производства.

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

10.3.3 ASTM E1447-09(2016): Метод химического анализа вольфрамовых материалов

Обзор стандарта

В стандарте ASTM E1447-09 (2016) указан метод химического анализа вольфрамовых материалов для определения чистоты и содержания примесей в вольфрамовых тиглях, чтобы обеспечить соблюдение требований высокой чистоты.

Технические требования

Элементы детектирования: Fe, Ni, Si, Mo, C, O, N и т.д., предел обнаружения <0,1 ppm.

Чистота: вольфрам >99,99%, общее количество примесей <50 ppm, газообразные элементы <10 ppm.

Пробоподготовка: секции тигля (0,5-1 г), поверхностная промывка (остаточная < 0,01 мкг/см²).

Точность: относительная погрешность <1%, повторяемость > 99,5%.

Метод испытаний:

ICP-MS: Обнаружение металлических примесей (Fe, Ni, Si), точность $\pm 0,1$ ppm, предел обнаружения 0,01 ppm.

Анализ LECO: измеряли содержание C, O, N, точность составила $\pm 0,01$ ppm, а предел обнаружения — 0,005 ppm.

GD-MS: Вольфрамовый анализ высокой чистоты с пределом обнаружения < 0,05 ppm, охватывающий > 20 элементов.

Обработка проб: кислотная солубилизация (HNO₃+HCl, концентрация 5 моль/л), ультразвуковая очистка (40 кГц).

Требования к соответствию

Лаборатория: требуется аккредитация ISO 17025, интервал калибровки оборудования < 6 месяцев.

Отчет: Результаты анализа, методы, ошибки, архив > за 5 лет, > прослеживаемость 99,9%.

Применение: Используется для проверки полупроводниковых и фотоэлектрических вольфрамовых тиглей высокой чистоты.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Высокоточный анализ гарантирует, что чистота тигля составляет > 99,999%, что удовлетворяет потребности полупроводников; Методологическая стандартизация, мировое признание.

Проблема: Стоимость оборудования GD-MS высока, а > одного устройства составляет 10 миллионов юаней; Для подготовки образцов требуется сверхчистая среда, что увеличивает затраты.

10.4 Другие международные стандарты

Другие международные стандарты (например, японский JIS, немецкий DIN, европейский EN) содержат дополнительные спецификации для производства, проверки и анализа

вольфрамовых тиглей для конкретных рынков и применений.

10.4.1 JIS H 4701:2015: Изделия из вольфрама и вольфрамовых сплавов

Обзор стандарта

Стандарт JIS H 4701:2015 определяет химический состав, свойства и производственные требования к изделиям из вольфрама и вольфрамовых сплавов, включая тигли, для высокотемпературной промышленности на японском рынке.

Технические требования

Химический состав: чистота вольфрама > 99,95%, примеси (Fe, Ni, C) < 100 ppm, O < 20 ppm.

Производительность:

Прочность на разрыв: > 600 МПа (комнатная температура), > 200 МПа (1000°C).

Твердость: > HV 350, тепловой удар > 500 циклов.

Шероховатость поверхности: Ra < 0,2 мкм, без трещин (> 0,1 мм).

Изготовление: Горячее изостатическое прессование (HIP, давление > 150 МПа), температура спекания 2000-2500°C.

Размеры: диаметр 20-300 мм, допуск $\pm 0,05$ мм, толщина стенки 1-8 мм.

Метод испытаний:

Химический анализ: ICP-OES (точность $\pm 0,1$ ppm), газовый анализ (точность $\pm 0,01$ ppm).

Механические испытания: испытание на растяжение (JIS Z 2241, погрешность $\pm 1\%$), испытание на твердость (JIS Z 2245).

Контроль поверхности: оптическая микроскопия (разрешение < 1 мкм), ультразвуковая дефектоскопия (разрешение < 0,1 мм).

Контроль размеров: лазерное измерение (точность $\pm 0,01$ мм) в соответствии с JIS B 0405.

Требования к соответствию

Отчетность: Для каждой партии предоставляется сертификат на материал в соответствии с JIS Z 9001.

Сертификация: Требуется проверка JQA (Японская ассоциация обеспечения качества), а проходной балл составляет > 99,5%.

Применение: используется в получении составных полупроводников (GaAs, GaN), прецизионных приборах.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Стандарт подходит для азиатского рынка, а метод обнаружения прост и эффективен; Поддерживает производство небольших тиглей (< 50 мм).

Проблемы: высокая стоимость сертификации на японском рынке и высокие барьеры входа для малых и средних предприятий; Стандартный цикл обновления длительный (5-10 лет).

10.4.2 DIN EN 10204:2004: Документы для проверки металлических изделий

Обзор стандарта

DIN EN 10204:2004 определяет тип и содержание инспекционной документации для металлических изделий, включая вольфрамовые тигли, обеспечивая прослеживаемость качества и пригодность для европейского рынка.

Технические требования

Тип файла:

2.1: Декларация о соответствии, подтверждающая, что товар соответствует требованиям заказа.

2.2: Протокол испытаний с указанием химического состава и эксплуатационных данных.

3.1: Сертификат проверки, выданный уполномоченным персоналом производителя, с подробными результатами испытаний.

3.2: Сертификат проверки третьей стороной (например, TÜV), подтверждающий независимость.

Содержание: Приложение: Химический состав ($> 99,99\%$), размеры ($\pm 0,02$ мм), эксплуатационные характеристики (тепловой удар > 500 циклов).

Записи: данные осмотра, номер партии, дата испытания, архив > 5 лет.

Как это сделать

Регистрация данных: электронный файл, PDF или XML, уровень прослеживаемости $> 99,9\%$.

Проверка: аудит производителя или третьей стороны (например, SGS), проходной $> 99,5\%$.

Язык: английский или немецкий, шрифт > 12 пт, разборчивый.

Распространение: Бумажный или электронный вариант предоставляется вместе с товаром, а срок доставки < 7 дней.

Требования к соответствию

Сертификация: Соответствует стандарту EN ISO/IEC 17050 и документ действителен в течение > 3 лет.

Применение: Используется в аэрокосмической отрасли, полупроводниковый вольфрамовый тигель, экспортируемый в Европу.

Аудит: Ежегодная проверка документов, процент ошибок $< 0,1\%$, процент исправления $> 99\%$.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Стандартная документация повышает доверие клиентов и упрощает доступ на рынок ЕС; Цифровизация снижает затраты на управление.

Проблема: Сертификат типа 3.2 должен быть проверен третьей стороной, а его стоимость составляет около 0,5-10 000 юаней за партию; Многоязычие требует повышенных затрат на перевод.

10.4.3 EN 10276-1:2000: Химический анализ высокотемпературных материалов

Обзор стандарта

Стандарт EN 10276-1:2000 определяет методы химического анализа высокотемпературных материалов, таких как вольфрам, чтобы гарантировать, что чистота и содержание примесей соответствуют требованиям для высокотемпературных применений.

Технические требования

Элементы детектирования: Fe, Ni, Si, Mo, C, O, N, предел обнаружения <0,1 ppm.

Чистота: вольфрам >99,99%, общее количество примесей <50 ppm, газообразные элементы <10 ppm.

Образец: секции тигля (0,5-2 г) с остаточным < 0,01 мкг/см².

Точность: относительная погрешность <1%, повторяемость > 99,5%.

Метод испытаний:

ICP-MS: Обнаружение металлических примесей с точностью $\pm 0,1$ ppm и пределом обнаружения 0,01 ppm.

TGA-MS: Измерение содержания O и N, точность $\pm 0,01$ ppm, предел обнаружения 0,005 ppm.

XRF: Экспресс-анализ ($\pm 0,5$ ppm) для первичного скрининга.

Обработка образца: кислоторастворимая (HNO₃, 5 моль/л), ультразвуковая очистка (40 кГц).

Требования к соответствию

Лаборатория: требуется аккредитация EN ISO/IEC 17025, интервал калибровки оборудования < 6 месяцев.

Отчет: Результаты анализа, методы, ошибки, архив за 5 лет, > прослеживаемость > 99,9%.

Применение: Используется для проверки ядерного реактора, аэрокосмического вольфрамового тигля.

Преимущества и проблемы

Преимущества: Высокоточный анализ для областей применения с высокой степенью чистоты (> 99,999%); Метод совместим с ASTM и может использоваться во всем мире.

Проблема: Оборудование TGA-MS является дорогостоящим, один > составляет 5 миллионов юаней; Для подготовки образцов требуется чистое помещение, что является дорогостоящим.



Вольфрамовые тигли CTIA GROUP LTD

Приложение

A. Глоссарий

Вольфрамовый тигель: контейнер из вольфрама высокой чистоты в качестве основного материала для высокотемпературного плавления или обработки материала.

Порошковая металлургия: технология изготовления металлических изделий методом порошкового прессования, спекания и других процессов.

Изостатическое прессование: процесс равномерного приложения давления в жидкой или газообразной среде с образованием порошка.

Метод Чохральского : процесс, используемый для выращивания монокристаллов, обычно используемый при получении полупроводниковых материалов.

Устойчивость к тепловому удару: способность материала противостоять растрескиванию при быстрых перепадах температуры.

Спекание: процесс нагрева порошкообразного материала ниже его температуры плавления с образованием твердого вещества.

Неразрушающий контроль: ультразвуковые, рентгеновские и другие методы для выявления внутренних дефектов материалов без повреждения образца.

Горячее изостатическое прессование (HIP): технология постобработки для улучшения плотности материалов при высоких температурах и давлениях.

Размер зерна : Средний размер кристаллов в микроструктуре материала, который влияет на механические свойства.

Высокотемпературная ползучесть: медленная деформация материала при длительном напряжении при высоких температурах.

Коэффициент теплового расширения: скорость изменения объема или длины материала

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и

при изменении температуры.

Шероховатость поверхности: Мера микрогеометрических характеристик поверхности, обычно выражаемая в Ra или Rz.

В. Ссылки

- [1] Национальный стандарт Китайской Народной Республики
- [2] Национальная стандартная информационная платформа государственных услуг (www.sac.gov.cn).
- [3] База данных международных стандартов ASTM
- [4] Каталог стандартов ISO
- [5] Chinatungsten Online, Обзор технологии спекания вольфрамовых тиглей, 2023 г.
- [6] Официальный аккаунт Chinatungsten в онлайн-WeChat, применение водородного спекания в производстве вольфрамовых тиглей, 2024 г.
- [7] Chinatungsten Online, Анализ повышения производительности для оптимизации температуры спекания, 2023 г.
- [8] Технический справочник по порошковой металлургии, Пресс металлургической промышленности, 2020 г.
- [9] Физико-химические свойства вольфрама, Пресса химической промышленности, 2019
- [10] Chinatungsten Online, Применение технологии градиентного спекания в вольфрамовом тигле, 2023 г.
- [11] Chinatungsten Online, Прогресс в технологии контроля размера вольфрамовых тиглей, 2022 г.

С. Список часто используемых инструментов и оборудования

Высокотемпературная печь для спекания (вакуум, защита атмосферы)
Изостатический пресс (холодное и горячее изостатическое прессование)
Обрабатывающие центры с ЧПУ (токарные, фрезерные, шлифовальные)
Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)
Рентгенофлуоресцентная спектроскопия (РФА)
Ультразвуковой детектор
Оборудование для высокотемпературных испытаний

У в е д о м л е н и е о б а в т о р с к и х п р а в а х и ю р и д и ч е с к о й
о т в е т с т в е н н о с т и