

Что такое нагревательный элемент MoSi₂

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Оглавление

Глава 1 Введение

- 1.1 Обзор нагревательных элементов MoSi_2
- 1.2 История развития нагревательных элементов MoSi_2
- 1.3 Статус применения нагревательных элементов MoSi_2
- 1.4 Области применения нагревательных элементов MoSi_2

Глава 2 Характеристики нагревательных элементов MoSi_2 и факторы, на них влияющие

- 2.1 Физические свойства нагревательных элементов MoSi_2
- 2.2 Удельное сопротивление нагревательных элементов MoSi_2
- 2.3 Характеристики стойкости к высоким температурам нагревательных элементов MoSi_2 к высокотемпературному окислению
- 2.5 Теплопроводность и температуропроводность нагревательных элементов MoSi_2
- 2.6 Устойчивость нагревательных элементов MoSi_2 к термическому удару
- 2.7 Устойчивость нагревательных элементов MoSi_2 к термическому удару
- 2.8 Термическая усталость нагревательных элементов MoSi_2
- 2.9 Состояние поверхности нагревательного элемента MoSi_2
 - 2.9.1 Обычно используемые типы защитных покрытий
 - 2.9.2 Исследование поверхностных трещин и адгезии покрытия
 - 2.9.3 Формирование и защита поверхностной оксидной пленки SiO_2
- 2.10 Проблемы поверхности нагревательных элементов MoSi_2 и их решения
- 2.11 Факторы, влияющие на термодинамические свойства нагревательных элементов MoSi_2
 - 2.11.1 Влияние рабочей температуры
 - 2.11.2 Влияние атмосферы
 - 2.11.3 Влияние частоты нагрева/охлаждения
 - 2.11.4 Влияние рабочего напряжения
 - 2.11.5 Влияние плотности тока
 - 2.11.6 Влияние метода установки
 - 2.11.7 Влияние качества и чистоты компонентов
 - 2.11.8 Эффект обработки защитным покрытием
- 2.12 CTIA GROUP LTD MoSi_2 Нагревательный элемент MSDS

Глава 3. Структура и конструкция нагревательных элементов MoSi_2

- 3.1 Распространенные конструкции нагревательных элементов MoSi_2
 - 3.1.1 U-образный нагревательный элемент MoSi_2
Нагревательный элемент MoSi_2 типа W
 - 3.1.3 Спиральный нагревательный элемент MoSi_2
Нагревательный элемент MoSi_2 прямого стержневого типа
 - 3.1.5 Сравнение U-образных, W-образных и прямых структурных конструкций
- 3.2 Размеры нагревательного элемента MoSi_2 (распространенные — Φ 6/12 и Φ 9/18)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3 Оптимальная конструкция теплового поля и структуры холодного конца
- 3.4 Проектирование электрических соединений и опорных систем
- 3.5 Конструкция клеммы и способ подключения
- 3.6 Ключевые моменты проектирования кастомизации продукта

Глава 4. Процесс изготовления нагревательного элемента MoSi_2

- 4.1 Принципы выбора и пропорционирования сырья
- 4.2 Порошковая металлургия и процесс изостатического прессования
- 4.3 Технология высокотемпературного спекания и последующей обработки
- 4.4 Технология нанесения защитного слоя на поверхность
- 4.5 Технология сварки и обработки концов

Глава 5. Тест производительности нагревательного элемента MoSi_2

- 5.1 Тест зависимости сопротивления от температуры
- 5.2 Испытание на взаимосвязь между сроком службы при высоких температурах и стойкостью к тепловому удару
- 5.3 Испытание стабильности в окислительной среде
- 5.4 Испытание нагревательного элемента на твердость
- 5.5 Испытание на взаимосвязь между стойкостью к окислению и температурой
- 5.6 Связь между шероховатостью поверхности стержня и удельным сопротивлением
- 5.7 Влияние равномерности покрытия стержня на срок службы
- 5.8 Связь между сроком службы и напряжением сцепления
- 5.9 Механизмы растрескивания, изгиба и отрыва концов
- 5.10 Анализ микроструктуры и исследование видов отказов

Глава 6 Установка нагревательных элементов MoSi_2

- 6.1 Подготовка к установке
- 6.2 Подробные шаги установки
- 6.3 Замечания по установке
- 6.4 Технические характеристики безопасной эксплуатации
- 6.5 Общие неисправности и руководство по техническому обслуживанию
 - 6.5.1 Причины и решения поломки нагревательного элемента
 - 6.5.2 Причины отслоения оксидного слоя и восстановительная обработка
 - 6.5.3 Методы ежедневного обслуживания нагревательных элементов
 - 6.5.4 Технология замены и переработки нагревательных элементов
- 6.6 Типичные методы установки в промышленных печах

Глава 7 Стандарты испытаний и сертификация нагревательных элементов MoSi_2

- 7.1 Метод испытания производительности нагревательного элемента
- 7.2 Анализ стандартов ISO, ASTM и других
- 7.3 Тест на адаптацию к окружающей среде
- 7.4 Виды отказов и методы прогнозирования срока службы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.5 Требования безопасности и электротехнических норм

Глава 8 Применение нагревательных элементов MoSi₂

- 8.1 Применение нагревательных элементов MoSi₂ в металлургической промышленности
 - 8.1.1 Плавка и термическая обработка металлов
 - 8.1.2 Процесс высокотемпературного спекания
 - 8.1.3 Оборудование для термообработки
- 8.2 Применение нагревательных элементов MoSi₂ в керамической промышленности
 - 8.2.1 Обжиг керамики и глазуровывание
 - 8.2.2 Приготовление специальных керамических материалов
- 8.3 Применение нагревательных элементов MoSi₂ в фотоэлектрической промышленности
 - 8.3.1 Высокотемпературный процесс производства кремниевых пластин
 - 8.3.2 Оборудование для производства солнечных элементов
- 8.4 Применение нагревательных элементов MoSi₂ в полупроводниковой промышленности
 - 8.4.1 Отжиг пластин и процесс диффузии
 - 8.4.2 Эпитаксиальный рост полупроводников
 - 8.4.3 Оборудование для высокотемпературного травления
 - 8.4.4 Оборудование для вакуумного нанесения покрытий
- 8.5 Применение нагревательных элементов MoSi₂ в стекольной промышленности
 - 8.5.1 Плавка стекла
 - 8.5.2 Обработка стекла
- 8.6 Применение нагревательных элементов MoSi₂ при получении новых энергетических материалов
 - 8.6.1 Спекание материалов литиевых аккумуляторов
 - 8.6.2 Водородная энергетика и топливные элементы
- 8.7 Применение нагревательных элементов MoSi₂ в защите окружающей среды и катализе
 - 8.7.1 Очистка отходящих газов
 - 8.7.2 Регенерация катализатора
 - 8.7.3 Использование ресурсов твердых отходов
- 8.8 Применение нагревательных элементов MoSi₂ в других областях
 - 8.8.1 Испытания аэрокосмических материалов
 - 8.8.2 Вспомогательное оборудование атомной промышленности
 - 8.8.3 Высокотемпературная синтетическая химия
 - 8.8.4 MoSi₂ Стержневой трансформатор

Глава 9 Сравнение нагревательных элементов MoSi₂ с другими нагревательными материалами

- 9.1 Сравнение с вольфрамовыми нагревательными элементами
- 9.2 Сравнение с компонентами из карбида кремния
- 9.3 Анализ стоимости нагревательного элемента, эффективности и пригодности к применению

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 10. Соответствующие стандарты и спецификации для нагревательных элементов MoSi₂

10.1 Китайский национальный стандарт для нагревательных элементов MoSi₂

10.2 Международные стандарты для нагревательных элементов MoSi₂

10.3 Стандарты нагревательных элементов MoSi₂ в Европе, Америке, Японии, Корее и других странах

приложение:

Глоссарий

Ссылки



CTIA GROUP LTD Кремний-молибденовый стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 1 Введение

1.1 Обзор нагревательных элементов MoSi₂

Дисилицид молибдена (MoSi₂) — это интерметаллическое соединение с химической формулой MoSi₂. Он имеет высокую температуру плавления (около 2030 °C), отличную стойкость к высокотемпературному окислению и хорошую электро- и теплопроводность. Он широко используется в области высокотемпературного нагрева, поскольку обладает характеристиками как металла, так и керамики. В качестве резистивного нагревательного материала нагревательные элементы из дисилицида молибдена в основном используются в электрическом нагревательном оборудовании в высокотемпературной окислительной атмосфере. При высокой температуре на его поверхности образуется плотная защитная пленка из диоксида кремния (SiO₂), которая эффективно предотвращает дальнейшее внутреннее окисление, тем самым продлевая срок службы. Нагревательные элементы из MoSi₂ могут стабильно работать в диапазоне температур 500-1850 °C и подходят для промышленных и научно-исследовательских областей, таких как спекание керамики, плавка стекла, термическая обработка металлов, высокотемпературное спекание и лабораторные высокотемпературные печи. По сравнению с другими нагревательными материалами, такими как карбид кремния (SiC), дисилицид молибдена имеет более высокую рабочую температуру и лучшую стойкость к высокотемпературному окислению, но его низкотемпературная хрупкость и ограничения по характеристикам ползучести при высокой температуре также ограничивают некоторые структурные применения. В настоящее время нагревательные элементы MoSi₂ имеют различные формы, включая U-образную, W-образную, L-образную и индивидуальные формы, которые могут широко соответствовать потребностям различных промышленных печей.

1.2 История развития нагревательных элементов MoSi₂

Изучение дисилицида молибдена как высокотемпературного материала началось в начале 20 века, но его применение в качестве нагревательного элемента началось в середине 20 века. В 1904 году ученые впервые сообщили о кристаллической структуре MoSi₂ и подтвердили, что это тетрагональный кристалл α-типа с высокой температурой плавления и характеристиками интерметаллического соединения. Однако из-за ограничений технологии приготовления и чистоты материала в то время MoSi₂ в основном использовался как объект лабораторных исследований, а не как промышленный материал. В 1930-х годах, с углубленным исследованием высокотемпературных сплавов и керамических материалов, MoSi₂ начал привлекать внимание из-за его превосходной стойкости к высокотемпературному окислению и проводимости. Исследователи обнаружили, что защитная пленка SiO₂, образованная на поверхности MoSi₂ в высокотемпературной окислительной атмосфере, может значительно улучшить его долговечность, что заложило теоретическую основу для последующей разработки нагревательных элементов.

В 1947 году шведская компания Kanthal стала лидером в производстве первого промышленного нагревательного стержня из дисилицида молибдена , что ознаменовало официальный выход

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нагревательных элементов MoSi_2 на стадию коммерческого применения. Эти ранние нагревательные стержни в основном использовались в высокотемпературных промышленных печах с максимальной рабочей температурой около 1600°C . Kanthal значительно улучшил механическую прочность и стойкость к окислению компонентов за счет оптимизации процесса спекания и технологии легирования MoSi_2 . В 1950-х и 1960-х годах с появлением передовых технологий подготовки, таких как вакуумное спекание и плазменное напыление, эффективность производства и производительность нагревательных элементов MoSi_2 были дополнительно улучшены. Форма элемента изменилась с одного прямого стержня на U-образный и L-образный, чтобы удовлетворить потребности различных типов печей. Кроме того, исследователи улучшили хрупкость MoSi_2 при низких температурах и свойства ползучести при высоких температурах путем легирования редкоземельными элементами или другими металлами (такими как W и Nb), что еще больше расширило область его применения.

В 1980-х годах Китай начал реализовывать промышленное производство нагревательных элементов из дисилицида молибдена. На раннем этапе он в основном полагался на импортные технологии, но постепенно сформировал независимые возможности исследований и разработок. В этот период максимальная рабочая температура нагревательных элементов MoSi_2 была увеличена до 1800°C , и они широко используются в таких отраслях, как керамика, стекло и огнеупорные материалы. В этот период шведская компания Kanthal выпустила нагревательный элемент Kanthal Super 1900, который имеет максимальную рабочую температуру 1850°C и стал отраслевым эталоном. Успех этого продукта обусловлен использованием высокочистого сырья и улучшением технологии сварки холодного и горячего конца, что значительно повышает стабильность элемента в циклах высоких и низких температур.

С 1990-х годов фокус исследований и разработок нагревательных элементов MoSi_2 сместился в сторону оптимизации производительности и расширения области применения. Новые процессы подготовки, такие как горячее прессование, спекание в реакционной среде и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (CVC), значительно улучшили плотность и механические свойства материала. В то же время разработка технологии покрытия MoSi_2 позволила использовать его в качестве высокотемпературного защитного покрытия в аэрокосмической области, например, для лопаток газовых турбин и компонентов реактивных двигателей. Кроме того, разработка наноразмерных порошков MoSi_2 позволила изготавливать высокопроизводительные композитные материалы, частично решив проблему его низкотемпературной хрупкости. С точки зрения мирового рынка, рыночная стоимость нагревательных элементов MoSi_2 составляла приблизительно 103 млн долларов США в 2016 году и, как ожидается, достигнет 135 млн долларов США в 2022 году, с годовым темпом роста в 4,7%, что отражает его постоянный спрос в высокотемпературной промышленной области.

Хотя нагревательные элементы MoSi_2 хорошо работают в высокотемпературных полях, их разработка все еще сталкивается с трудностями. Хрупкость при низких температурах и недостаточные свойства ползучести при высоких температурах ограничивают их применение в качестве конструкционных материалов, в то время как высокие производственные затраты также

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вливают на их конкурентоспособность на низкоуровневом рынке. В будущем направления исследований могут быть сосредоточены на разработке композитных материалов, модификации легирования и новых процессах подготовки для дальнейшего улучшения характеристик и снижения затрат.

1.3 Состояние применения нагревательных элементов из дисилицида молибдена

из дисилицида молибдена (MoSi_2) играют важную роль в мировой высокотемпературной промышленности благодаря своей превосходной стойкости к высокотемпературному окислению, рабочей температуре до 1850°C и стабильным электрическим свойствам. Этот элемент широко используется в высокотемпературных электропечах в промышленном производстве, научных исследованиях и специальной обработке материалов. Его основным преимуществом является то, что он может стабильно работать в течение длительного времени в окислительной атмосфере, а плотная защитная пленка из диоксида кремния (SiO_2), образующаяся на поверхности, эффективно предотвращает внутреннее окисление, тем самым значительно продлевая срок его службы. В последние годы достижения в области материаловедения и производственных процессов способствовали улучшению характеристик нагревательных элементов из MoSi_2 . Например, за счет модификации легирования и передовой технологии спекания были улучшены низкотемпературная хрупкость и высокотемпературная ползучесть элемента, что позволило адаптировать его к более сложным рабочим условиям.

На мировом рынке спрос на нагревательные элементы MoSi_2 продолжает расти, особенно в керамической, стекольной и полупроводниковой промышленности. Шведская компания Kanthal доминирует на рынке со своей серией продуктов Kanthal Super (например, Kanthal Super 1900), которые известны своими превосходными высокотемпературными характеристиками и надежностью. Предприятия в Китае, Японии и США также активно разрабатывают и производят нагревательные элементы MoSi_2 , среди которых Китай имеет значительные преимущества в контроле затрат и крупномасштабном производстве. С точки зрения производственного процесса, такие технологии, как горячее прессование спекания, реакционное спекание и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), улучшили плотность и механические свойства материала, а форма элемента также развилась от одного прямого стержня до U-образной, W-образной, L-образной и индивидуальных форм для удовлетворения потребностей различных конструкций печей. Кроме того, разработка наноразмерных порошков MoSi_2 открыла новые области применения для высокопроизводительных композитных материалов и покрытий, таких как высокотемпературные защитные покрытия в аэрокосмической и энергетической промышленности.

Хотя нагревательные элементы MoSi_2 хорошо работают в высокотемпературных полях, они все еще сталкиваются с некоторыми проблемами. Хрупкость при низких температурах ограничивает его потенциал в определенных структурных применениях, в то время как высокие производственные затраты заставляют его сталкиваться с конкуренцией со стороны альтернативных материалов, таких как карбид кремния (SiC) на низкоуровневом рынке. Текущие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

исследования направлены на улучшение механических свойств путем легирования редкоземельными элементами или металлами (такими как W, Nb) и разработку новых композитных материалов для повышения стойкости к тепловому удару и долговечности. С появлением интеллектуальных высокотемпературных печей требования к точному контролю температуры и длительному сроку службы нагревательных элементов MoSi₂ были дополнительно улучшены, что способствовало разработке соответствующих технологий управления и оптимизации материалов. В будущем, по мере роста мирового спроса на эффективные, энергосберегающие и экологически чистые методы производства, ожидается, что нагревательные элементы MoSi₂ будут использоваться в более новых областях.

1.4 Области применения нагревательных элементов MoSi₂

из дисилицида молибдена широко используются во многих отраслях промышленности благодаря своей высокой температурной стабильности, стойкости к окислению и превосходным электрическим свойствам. Ниже приведены основные области применения: В керамической промышленности нагревательные элементы из MoSi₂ являются ключевыми компонентами в процессах спекания и высокотемпературной обработки для производства конструкционной керамики, функциональной керамики и огнеупорных материалов. Его максимальная рабочая температура 1850 °C может удовлетворить требования к спеканию высокопроизводительной керамики, такой как оксид алюминия, диоксид циркония и нитрид кремния, гарантируя качество продукции и стабильность процесса. В стекольной промышленности нагревательные элементы из MoSi₂ широко используются в высокотемпературных печах и печах отжига для производства оптического стекла, листового стекла и специального стекла. Его стойкость к окислению и долговечность позволяют ему непрерывно работать в высокотемпературной окислительной атмосфере, что значительно повышает эффективность производства.

В области термической обработки металлов нагревательные элементы MoSi₂ используются в процессах высокотемпературного отжига, закалки и пайки, особенно для обработки нержавеющей стали, титановых сплавов и жаропрочных сплавов. Его возможности быстрого нагрева и точного регулирования температуры улучшают качество продукции и эффективность процесса. В полупроводниковой промышленности высокотемпературные диффузионные печи и печи окисления часто используют нагревательные элементы MoSi₂ для термообработки кремниевых пластин и процессов осаждения тонких пленок. Его высокая чистота и стабильность отвечают строгим требованиям полупроводниковой промышленности к чистой среде и точному контролю температуры.

В аэрокосмической отрасли MoSi₂ используется не только в качестве нагревательного элемента, но и в виде покрытия для защитных покрытий на лопатках газовых турбин и компонентах реактивных двигателей. Его стойкость к высокотемпературному окислению и коррозионная стойкость позволяют ему хорошо работать в экстремальных условиях. В области научных исследований нагревательные элементы MoSi₂ широко используются в высокотемпературных экспериментальных печах в лабораториях материаловедения, физики и химии, таких как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термогравиметрические анализаторы, дифференциальные сканирующие калориметры и оборудование для высокотемпературного синтеза, для поддержки разработки новых материалов. В огнеупорной и металлургической промышленности нагревательные элементы MoSi_2 используются для высокотемпературной обработки в процессах спекания огнеупоров и металлургических процессах, таких как производство металлов и сплавов высокой чистоты, а их высокая эффективность и длительный срок службы снижают производственные затраты.

В области энергетики и защиты окружающей среды нагревательные элементы MoSi_2 используются в высокотемпературных мусоросжигательных печах, испытательном оборудовании твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) и системах термической обработки отходов, помогая добиться чистого производства и эффективного использования энергии. Нагревательные элементы MoSi_2 выигрывают от усовершенствования свойств материала и технологии производства. Различные отрасли промышленности предъявляют различные требования к производительности. Например, керамическая и стекольная промышленность уделяют больше внимания стабильности и сроку службы при высоких температурах, в то время как полупроводниковая промышленность подчеркивает высокую чистоту и точность регулирования температуры. В будущем, поскольку различные отрасли промышленности предъявляют более высокие требования к производительности высокотемпературного оборудования, ожидается, что нагревательные элементы MoSi_2 добьются прорыва в большем количестве областей за счет оптимизации материалов и инноваций в процессах.



CTIA GROUP LTD Кремний-молибденовый стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

Molybdenum disilicide (MoSi₂) heating elements are high-performance ceramic electric heating materials widely used in industrial furnace applications. In high-temperature oxidizing atmospheres, MoSi₂ forms a dense silica (SiO₂) protective layer on its surface, which effectively prevents further oxidation. It exhibits excellent oxidation resistance and thermal stability, allowing stable operation under high temperatures for extended periods.

2. Features of MoSi₂ Heating Element

Low thermal expansion coefficient: Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.

Excellent oxidation resistance: Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.

Extremely high working temperature: Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.

Good high-temperature electrical resistance characteristics: MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

Model (d1/d2)	Hot End Diameter (d1)	Cold End Diameter (d2)	Hot Zone Length (Le)	Cold Zone Length (Lu)	Common Types
φ3/6	3 mm	6 mm	100–300 mm	150–250 mm	Straight / U-type
φ4/9	4 mm	9 mm	100–500 mm	200–300 mm	Straight / U-type
φ6/12	6 mm	12 mm	100–600 mm	200–350 mm	Straight / U-type / W-type
φ9/18	9 mm	18 mm	150–800 mm	250–400 mm	Straight / U-type / W-type
φ12/24	12 mm	24 mm	200–1000 mm	300–500 mm	Straight / U-type / W-type

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries

Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals

High-temperature laboratory furnaces

Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 2 Характеристики нагревательных элементов MoSi₂ и факторы, на них влияющие

2.1 Физические свойства нагревательных элементов MoSi₂

Дисилицид молибдена (MoSi₂) — это интерметаллическое соединение, сочетающее в себе характеристики металлов и керамики. Его физические свойства определяют его превосходную производительность в качестве высокотемпературного нагревательного элемента. Кристаллическая структура MoSi₂ — тетрагональная α-типа (тип C11b) с пространственной группой I4/mmm, которая обладает высокой симметрией и стабильностью. Его температура плавления составляет около 2030 °C, что позволяет ему сохранять структурную целостность при экстремально высоких температурах. Плотность составляет 6,24 г/см³, что относительно мало, что помогает снизить вес нагревательного элемента и подходит для конструкций сложной формы. Коэффициент теплового расширения MoSi₂ составляет около $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (от комнатной температуры до 1000 °C), что хорошо сочетается с обычными керамическими матричными материалами (такими как оксид алюминия и диоксид циркония), снижая риск растрескивания, вызванного термическим напряжением.

MoSi₂ составляет около 45 Вт/(м·К) при комнатной температуре и постепенно уменьшается с ростом температуры, но он все еще может эффективно передавать тепло при высоких температурах, обеспечивая равномерный нагрев нагревательного элемента. Он имеет высокую твердость, с твердостью по Виккерсу около 1200 HV, и имеет хорошую износостойкость, но его хрупкость при низких температурах (вязкость разрушения около 2-3 МПа·м^{1/2}) делает его восприимчивым к механическим повреждениям от ударов.

Стойкость MoSi₂ к окислению особенно выдающаяся в высокотемпературных окислительных атмосферах. На поверхности будет образовываться плотная защитная пленка SiO₂ при температуре выше 800 °C, эффективно предотвращая дальнейшую диффузию кислорода и защищая внутреннюю структуру от окислительной эрозии. Эта особенность позволяет ему работать в течение длительного времени в окислительной атмосфере с максимальной рабочей температурой до 1850 °C.

MoSi₂ влияет множество факторов. Чистота сырья является ключевым фактором. Высокочистый MoSi₂ может уменьшить ослабление границ зерен, вызванное примесями, и улучшить механические свойства и стойкость к окислению. Такие процессы подготовки, как горячее прессование, спекание или реакционное спекание, повлияют на плотность материала. Чем выше плотность, тем лучше стойкость к окислению и теплопроводность. Легирование (например, добавление Al, W или редкоземельных элементов) может улучшить его низкотемпературную хрупкость и свойства ползучести при высоких температурах, но может немного снизить стойкость к окислению. Кроме того, рабочая среда (например, тип атмосферы и частота температурного цикла) также оказывает значительное влияние на стабильность физических свойств. Например, в восстановительной атмосфере защитная пленка SiO₂ может выйти из строя, что приведет к ускоренной деградации материала.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Удельное сопротивление нагревательных элементов MoSi₂

Удельное сопротивление нагревательных элементов MoSi₂ является основным параметром производительности MoSi₂ как электрического нагревательного материала, который напрямую влияет на эффективность нагрева и точность регулирования температуры. Удельное сопротивление MoSi₂ показывает нелинейные характеристики с изменениями температуры. При комнатной температуре его удельное сопротивление составляет около $2,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{см}$. По мере повышения температуры удельное сопротивление постепенно увеличивается, достигая около $4,0 \times 10^{-5}$ при температуре около 1000 °C. $\Omega \cdot \text{см}$. Эта положительная характеристика температурного коэффициента позволяет нагревательному элементу MoSi₂ автоматически регулировать мощность при высоких температурах, предотвращать перегрев и повышать безопасность. Выше 1000 °C удельное сопротивление медленно увеличивается и становится стабильным, что помогает точно контролировать температуру в диапазоне высоких температур.

MoSi₂ зависит от состава материала, микроструктуры и внешней среды. Чистота и содержание примесей в сырье оказывают значительное влияние на удельное сопротивление. Например, примеси, такие как железо и алюминий, увеличат удельное сопротивление и снижат стабильность, в то время как высокочистый MoSi₂ демонстрирует более стабильные электрические свойства. Размер зерна и характеристики границ зерен также имеют решающее значение. Меньшие размеры зерна обычно сопровождаются более высоким сопротивлением границ зерен, что приводит к немного более высокому удельному сопротивлению, но улучшенной механической прочности. Влияние процесса приготовления на удельное сопротивление также существенно. MoSi₂, полученный методом горячего прессования со спеканием, имеет более высокую плотность, меньше дефектов границ зерен и более низкое и стабильное удельное сопротивление, в то время как образцы, полученные реакционным спеканием, могут иметь более высокое удельное сопротивление из-за более высокой пористости.

Модификация легирования является важным средством регулировки удельного сопротивления MoSi₂. Добавление вольфрама (W) или ниобия (Nb) может снизить удельное сопротивление и повысить высокотемпературную проводимость, но может пожертвовать некоторыми антиокислительными свойствами. Легирование редкоземельными элементами (такими как Y₂O₃) стабилизирует изменение удельного сопротивления с температурой за счет улучшения структуры границ зерен. Влияние рабочей среды на удельное сопротивление нельзя игнорировать. В окислительной атмосфере образование защитной пленки SiO₂ мало влияет на удельное сопротивление, но в восстановительной или вакуумной среде на поверхности может происходить улетучивание Si, что приводит к постепенному увеличению удельного сопротивления, влияя на долгосрочную стабильность.

MoSi₂ необходимо оптимизировать в соответствии с конкретными приложениями. Например, печи для спекания керамики требуют стабильного сопротивления для обеспечения равномерного нагрева, в то время как печи для термообработки полупроводников требуют более низкого сопротивления для быстрого повышения температуры. В практических приложениях

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

согласование сопротивления конструкции холодного конца (обычно легированного более проводящим материалом) и горячего конца может повысить общую эффективность и сократить потери энергии.

2.3 Характеристики стойкости к высоким температурам нагревательных элементов MoSi₂

из дисилицида молибдена (MoSi₂) являются одним из основных свойств электронагревательных материалов, которое напрямую влияет на его эффективность нагрева, точность регулирования температуры и срок службы. В диапазоне высоких температур удельное сопротивление MoSi₂ показывает относительную стабильность. По сравнению с быстрым ростом от комнатной температуры до 1000 °C, рост удельного сопротивления в высокотемпературной секции значительно замедляется. Например, при комнатной температуре удельное сопротивление MoSi₂ составляет около $2,0 \times 10^{-5}$ Ом·см и увеличивается примерно до $4,0 \times 10^{-5}$ при 1000 °C Ом·см, в то время как при 1500 °C оно составляет около $4,5 \times 10^{-5}$ Ом·см, а затем изменяется меньше по мере дальнейшего повышения температуры. Это свойство положительного температурного коэффициента (PTC) позволяет MoSi₂ автоматически регулировать выходную мощность при высоких температурах, избегать перегрева и повышать безопасность. В то же время он обеспечивает стабильную работу для приложений, требующих точного контроля температуры, таких как спекание керамики и термообработка полупроводников. Стабильность характеристик высокотемпературного сопротивления обусловлена структурой интерметаллического соединения MoSi₂, механизм проводимости которого в основном основан на металлических связях. Даже при высоких температурах усиленная вибрация решетки приводит к увеличению рассеяния электронов, и проводимость остается на высоком уровне. Однако длительная высокотемпературная эксплуатация может вызвать небольшой дрейф удельного сопротивления, который в основном вызван изменениями состава, вызванными ростом поверхностной защитной пленки SiO₂ или улетучиванием следов Si, а также микроструктурной эволюцией, вызванной термическим напряжением (например, ростом зерен или ослаблением границ зерен).

Факторы, влияющие на свойства сопротивления при высоких температурах, включают чистоту материала, модификацию легирования и рабочую среду. Высокочистый MoSi₂ может снизить нестабильность сопротивления, вызванную примесями (такими как Fe и Al), и обеспечить постоянство электрических характеристик. Легирование металлическими элементами (такими как W и Nb) может снизить удельное сопротивление и повысить проводимость при высоких температурах, но может немного снизить стойкость к окислению, в то время как легирование редкоземельными элементами (такими как Y₂O₃) стабилизирует изменение удельного сопротивления с температурой за счет оптимизации структуры границ зерен. В окислительной атмосфере защитная пленка SiO₂ мало влияет на удельное сопротивление, но в восстановительной или вакуумной среде улетучивание Si приведет к постепенному увеличению удельного сопротивления и ускорению старения компонента. Процесс приготовления также оказывает важное влияние на характеристики сопротивления. MoSi₂, полученный методом горячего прессования со спеканием, имеет высокую плотность, меньше дефектов границ зерен и более стабильные характеристики сопротивления, в то время как образцы, полученные реакционным

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

спеканием, с более высокой пористостью могут иметь ухудшение характеристик из-за локальной неравномерности тока. В практических приложениях холодный конец обычно легируется высокопроводящими материалами для снижения сопротивления, а оптимизация согласования сопротивления между холодным и горячим концами может повысить энергоэффективность. Регулярное обслуживание и предотвращение экстремальных температурных циклов может помочь поддерживать долгосрочную стабильность характеристик высокотемпературного резистора.

2.4 нагревательных элементов MoSi₂ к высокотемпературному окислению

Высокотемпературная стойкость к окислению нагревательных элементов из дисилицида молибдена является ключевой особенностью для долговременной стабильной работы в окислительной атмосфере, что делает его предпочтительным материалом для высокотемпературных электропечей. Выше 800 °C на поверхности MoSi₂ быстро образуется плотная защитная пленка из диоксида кремния (SiO₂). Эта пленка имеет низкий коэффициент диффузии кислорода и хорошую способность к самовосстановлению, эффективно предотвращая проникновение кислорода внутрь и защищая подложку от окислительной коррозии. Ее реакция окисления выглядит следующим образом: $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$, где MoO₃ улетучивается при высоких температурах, а оставшийся SiO₂ образует сплошной защитный слой. В диапазоне 1200-1850 °C эта защитная пленка позволяет MoSi₂ стабильно работать в течение длительного времени в окислительной атмосфере, что делает его пригодным для высокотемпературных процессов, таких как спекание керамики и плавка стекла. Однако в диапазоне низких температур 400-700 °C MoSi₂ склонен к «вредительству», окисляясь с образованием незащищенной смеси MoO₃ и SiO₂, что приводит к измельчению материала, особенно при частых температурных циклах. Чтобы избежать этой проблемы, этот температурный диапазон обычно быстро прощается в практических приложениях. MoSi₂ имеет плохую стойкость к окислению в восстановительной атмосфере (например, H₂) или вакуумной среде, поскольку защитная пленка SiO₂ не может быть сформирована или разрушается, что приводит к улетучиванию Si и деградации материала, поэтому он не подходит для таких сред. Факторы, влияющие на стойкость к высокотемпературному окислению, включают чистоту материала, микроструктуру и модификацию легирования. Высокочистый MoSi₂ может уменьшить окисление границ зерен, вызванное примесями, и повысить плотность пленок SiO₂. Плотные микроструктуры (например, полученные путем горячего прессования и спекания) могут сократить пути диффузии кислорода и улучшить стойкость к окислению. Легирование редкоземельными элементами (например, Y₂O₃) или оксидами может улучшить адгезию и способность к самовосстановлению пленок SiO₂, в то время как легирование некоторыми металлами (например, W) может снизить стойкость к окислению за счет изменения кинетики окисления. Влажность рабочей среды также может влиять на стойкость к окислению. В условиях высокой влажности пленки SiO₂ могут подвергаться реакциям гидратации, что снижает защитный эффект. Для повышения стойкости к высокотемпературному окислению современные нагревательные элементы MoSi₂ часто используют технологию покрытия поверхности (например, покрытия Al₂O₃ или ZrO₂) для усиления защитного эффекта или улучшения плотности материала.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

за счет оптимизации процесса спекания. В практических приложениях поддержание стабильной окислительной атмосферы и избежание частых низкотемпературных циклов являются ключом к продлению срока службы антиоксиданта.

2.5 Теплопроводность и температуропроводность нагревательных элементов MoSi₂

Теплопроводность и температуропроводность нагревательных элементов MoSi₂ являются важными показателями их теплопроводности, которые напрямую влияют на скорость нагрева, однородность температуры и энергоэффективность. Теплопроводность MoSi₂ составляет около 45 Вт/(м·К) при комнатной температуре и постепенно уменьшается с повышением температуры до около 25 Вт/(м·К) при 1000 °С, а затем падает до около 15 Вт/(м·К) при 1500 °С. Хотя теплопроводность уменьшается при высоких температурах, MoSi₂ все еще может эффективно передавать тепло и обеспечивать равномерное распределение температуры в печи, что подходит для таких применений, как спекание керамики и плавка стекла, где требуется высокая тепловая однородность.

Изменение теплопроводности в основном обусловлено колебанием решетки и электронным механизмом теплопроводности MoSi₂. При низких температурах электронная теплопроводность является доминирующей, в то время как при высоких температурах усиленное рассеяние фононов вызывает уменьшение теплопроводности. Температуропроводность MoSi₂ ($\alpha = k / (\rho \cdot c)$, где k — теплопроводность, ρ — плотность, а c — удельная теплоемкость) также изменяется с температурой.

При комнатной температуре удельная теплоемкость MoSi₂ составляет около 0,45 Дж/(г·К), плотность — 6,24 г/см³, а коэффициент термодиффузии — около $1,6 \times 10^{-5}$ м²/с; при высоких температурах удельная теплоемкость немного увеличивается, а коэффициент термодиффузии уменьшается из-за уменьшения теплопроводности. Факторы, влияющие на теплопроводность и коэффициент термодиффузии, включают чистоту материала, микроструктуру и модификацию легирования. Примеси (такие как Fe и C) увеличивают рассеяние фононов и уменьшают теплопроводность, в то время как высокочистый MoSi₂ имеет более высокую теплопроводность. MoSi₂ с высокой плотностью (например, горячепрессованные спеченные образцы) имеет более высокую теплопроводность, в то время как образцы с высокой пористостью имеют более низкую теплопроводность из-за рассеивания тепла порами.

Эффект модификации легирования сложен. Добавление W может немного увеличить теплопроводность, в то время как легирование оксидами редкоземельных металлов может снизить теплопроводность из-за рассеяния по границам зерен. В практических приложениях теплопроводность и температуропроводность необходимо оптимизировать в соответствии с типом печи и процессом. Например, печи для термообработки полупроводников требуют более высокой теплопроводности для достижения быстрого нагрева, в то время как большие печи для спекания керамики уделяют больше внимания тепловой однородности. Оптимизация процесса подготовки (например, увеличение плотности) и рациональное проектирование формы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

компонентов (например, увеличение площади поверхности горячего конца) могут улучшить теплопроводность и сократить потери энергии.

2.6 Устойчивость нагревательных элементов MoSi_2 к термическому удару

из дисилицида молибдена (MoSi_2) относятся к их способности противостоять растрескиванию или разрушению, вызванному термическим напряжением при быстрых изменениях температуры, и являются важным показателем для оценки их надежности в условиях высокотемпературного циклирования. Устойчивость MoSi_2 к термическому удару тесно связана с его низким коэффициентом теплового расширения и умеренной теплопроводностью. Эти характеристики позволяют MoSi_2 лучше рассеивать термическое напряжение при быстром нагреве и охлаждении и снижать концентрацию внутренних напряжений, вызванную температурными градиентами. Однако низкотемпературная хрупкость MoSi_2 все еще может вызывать микротрещины или разрывы в условиях сильного термического удара, особенно при частых циклах высоких и низких температур. Характеристики устойчивости к термическому удару напрямую влияют на срок службы и надежность нагревательных элементов MoSi_2 в таких приложениях, как печи для спекания керамики и стекловаренные печи, которые требуют быстрого нагрева или охлаждения. Основными факторами, влияющими на устойчивость к термическому удару, являются чистота материала, микроструктура и процесс подготовки.

Высокоочищенный MoSi_2 может уменьшить ослабление границ зерен, вызванное примесями (такими как Fe и Al), тем самым снижая риск распространения трещин, вызванных тепловым ударом. С точки зрения микроструктуры, плотный MoSi_2 (например, полученный путем горячего прессования и спекания) имеет меньше пор и дефектов и может эффективно рассеивать термическое напряжение, в то время как образцы с более высокой пористостью склонны к локальной концентрации напряжений при термическом ударе, что приводит к растрескиванию. Модификация легирования также оказывает значительное влияние на устойчивость к термическому удару. Например, добавление оксидов редкоземельных металлов (таких как Y_2O_3) или оксида алюминия (Al_2O_3) может увеличить прочность границ зерен и повысить стойкость к термическому удару, в то время как легирование некоторыми металлами (такими как W) может немного снизить устойчивость к термическому удару из-за изменений характеристик теплового расширения. Скорость изменения температуры и частота циклов в рабочей среде являются ключевыми внешними факторами. Быстрые циклы термического удара (например, резкое падение температуры с 1500°C до комнатной температуры) усугубляют накопление термических напряжений и сокращают срок службы компонентов.

В практических приложениях оптимизация стратегии контроля температуры в печи (например, медленное повышение и понижение температуры) и проектирование разумной формы компонента (например, избегание острых краев для снижения концентрации напряжений) могут значительно улучшить устойчивость к термическому удару. Кроме того, технология поверхностного покрытия (например, покрытие SiC или Al_2O_3) может дополнительно улучшить стойкость MoSi_2 к термическому удару и продлить срок его службы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.7 Устойчивость нагревательных элементов MoSi₂ к термическому удару

Термостойкость нагревательных элементов MoSi₂ относится к их способности противостоять растрескиванию или ухудшению производительности при экстремальных градиентах температур или мгновенных тепловых ударах (например, прямое воздействие холодного воздуха или жидкостного охлаждения). Она тесно связана с термостойкостью, но подчеркивает мгновенные и резкие изменения температуры. Термостойкость MoSi₂ выигрывает от его низкого коэффициента теплового расширения и умеренной теплопроводности, которые вместе позволяют материалу лучше рассеивать термические напряжения при мгновенных изменениях температуры. Однако из-за низкой вязкости разрушения MoSi₂ он может испытывать распространение микротрещин или даже макроскопическое разрушение в условиях жесткого термического удара, особенно в диапазоне температур «чумы» 400-700 °C, где термостойкость может усугубить окисление и порошкообразование, что приведет к разрушению материала. Термостойкость имеет решающее значение для применения нагревательных элементов MoSi₂ в высокотемпературных печах с быстрым запуском и выключением или в неоднородных средах нагрева, таких как процессы формования стекла или термообработки металла. Факторами, влияющими на устойчивость к тепловому удару, являются состав материала, микроструктура и внешняя среда.

MoSi₂ с более высокой чистотой может снизить концентрацию напряжений, вызванных примесями на границах зерен, и улучшить стойкость к тепловому удару. Плотная микроструктура (например, полученная путем горячего прессования или реакционного спекания) может эффективно снизить распространение трещин, вызванных тепловым ударом, в то время как образцы с более высокой пористостью имеют плохую устойчивость к тепловому удару из-за большего количества дефектов. Модификация легирования оказывает двойное влияние на устойчивость к тепловому удару. Например, добавление редкоземельных элементов (например, La₂O₃) может улучшить сцепление границ зерен и улучшить устойчивость к трещинам, в то время как некоторое легирование металлами может снизить устойчивость из-за несоответствия теплового расширения. Интенсивность теплового удара (например, впрыскивание холодного воздуха или жидкостное охлаждение) и количество циклов в рабочей среде могут существенно повлиять на производительность. Сильный тепловой удар может вызвать растрескивание защитной пленки поверхности SiO₂ и снизить стойкость к окислению. В практических приложениях оптимизация конструкции компонента (например, использование U-образных или W-образных структур для увеличения рассеивания термического напряжения) и контроль условий термического удара (например, избегание прямого воздействия холодной среды) могут улучшить термостойкость. Кроме того, технологии модификации поверхности (например, нанесение высокопрочных керамических покрытий) могут повысить термостойкость MoSi₂ и уменьшить распространение трещин.

2.8 Термическая усталость нагревательных элементов MoSi₂

Характеристики термической усталости нагревательных элементов MoSi₂ относятся к их способности противостоять ухудшению характеристик (например, повышению удельного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сопротивления, снижению механической прочности или ухудшению поверхностной защитной пленки) при повторяющихся циклах высокой температуры и низкой температуры и являются ключевым показателем для оценки их долгосрочной надежности.

Характеристики термической усталости MoSi_2 совместно зависят от его низкого коэффициента термического расширения, умеренной теплопроводности и стойкости к высокотемпературному окислению. В окислительной атмосфере защитная пленка SiO_2 , образованная на поверхности MoSi_2 , может оставаться стабильной в течение нескольких термических циклов и замедлять деградацию материала. Однако в процессе термической усталости повторяющиеся термические и механические напряжения могут вызывать возникновение и расширение микротрещин, особенно в MoSi_2 со значительной низкотемпературной хрупкостью, где термическая усталость может вызвать разрушение компонента или дрейф электрических характеристик. Кроме того, в диапазоне температур «чумы» 400-700 °C циклы термической усталости могут усугубить окислительное измельчение и ускорить разрушение материала.

Характеристики термической усталости напрямую влияют на срок службы нагревательных элементов MoSi_2 в таких применениях, как спекание керамики и термическая обработка металлов, требующих частых термических циклов. Факторы, влияющие на характеристики термической усталости, включают чистоту материала, микроструктуру, модификацию легирования и рабочую среду.

Высокочистый MoSi_2 может уменьшить ослабление границ зерен, вызванное примесями, и снизить риск возникновения трещин термической усталости. Плотные микроструктуры (например, образцы, полученные методом горячего прессования и спекания) могут эффективно рассеивать циклическое термическое напряжение и улучшать термическую усталостную долговечность, в то время как образцы с более высокой пористостью склонны к разрушению из-за концентрации напряжений. Модификация легирования оказывает важное влияние на характеристики термической усталости. Например, добавление оксидов редкоземельных металлов (например, Y_2O_3) или оксида алюминия может повысить прочность границ зерен и замедлить распространение трещин, в то время как легирование некоторыми металлами может снизить характеристики термической усталости из-за несоответствия термического расширения. Амплитуда термического цикла, частота и тип атмосферы в рабочей среде оказывают значительное влияние на характеристики термической усталости.

Например, в восстановительной или вакуумной среде разрушение защитной пленки SiO_2 вызовет улетучивание Si и ускорит термическую усталостную деградацию. В практических приложениях оптимизация параметров термического цикла (например, снижение скорости нагрева и охлаждения), улучшение конструкции компонентов (например, увеличение прочности горячего конца) и использование технологии покрытия поверхности (например, покрытия SiC или ZrO_2) могут значительно улучшить характеристики термической усталости. Регулярный осмотр и техническое обслуживание также могут эффективно продлить срок службы нагревательных элементов MoSi_2 при термической усталости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.9 Состояние поверхности нагревательного элемента MoSi₂

из дисилицида молибдена (MoSi₂) оказывают важное влияние на их высокотемпературные характеристики, срок службы и надежность. Характеристики поверхности MoSi₂ в основном отражаются в его естественно образованной оксидной пленке SiO₂, микроструктуре поверхности и характеристиках нанесенного защитного покрытия. В высокотемпературной окислительной атмосфере на поверхности MoSi₂ выше 800 ° C образуется плотная защитная пленка SiO₂. Эта пленка является ключом к его превосходной стойкости к окислению, которая может эффективно предотвращать диффузию кислорода внутрь и защищать подложку от окислительной коррозии. Однако состояние поверхности зависит не только от оксидной пленки, но и тесно связано с дефектами поверхности (такими как микротрещины, поры), качеством покрытия и эволюцией поверхности при длительном использовании. Состояние поверхности MoSi₂ напрямую определяет его стабильность в условиях высокотемпературных циклов, термического удара и термической усталости, особенно в таких высокотребовательных приложениях, как спекание керамики, плавка стекла и термическая обработка полупроводников.

Качество состояния поверхности зависит от многих факторов, включая чистоту материала, процесс подготовки и рабочую среду. Высокочистый MoSi₂ может уменьшить ослабление границ зерен, вызванное поверхностными примесями (такими как Fe, Al), и создать более однородную и плотную Пленка SiO₂ . Процессы подготовки, такие как горячее прессование спеканием или реакционное спекание, оказывают значительное влияние на шероховатость поверхности и пористость. Поверхность MoSi₂, полученная путем горячего прессования спеканием, более гладкая и имеет меньше дефектов, что способствует образованию стабильной оксидной пленки, в то время как образцы, полученные реакционным спеканием, могут снизить защитный эффект из-за большего количества поверхностных пор. Тип атмосферы, влажность и частота температурных циклов в рабочей среде также будут влиять на состояние поверхности. Например, среда с высокой влажностью может привести к гидратации пленки SiO₂ и снижению ее защитной способности, в то время как частые температурные циклы могут вызвать трещины на поверхности или отслоение покрытия. Для оптимизации состояния поверхности современные нагревательные элементы MoSi₂ часто повышают стойкость к окислению и долговечность за счет модификации поверхности (например, технологии нанесения покрытия) или оптимизации процесса (например, полировки поверхности).

Долгосрочная стабильность состояния поверхности имеет решающее значение для производительности нагревательных элементов MoSi₂. При длительной эксплуатации при высоких температурах поверхностная пленка SiO₂ может стать тоньше из-за улетучивания Si или улетучивания MoO₃, особенно в восстановительной или вакуумной среде, и способность защиты поверхности будет значительно снижена. Кроме того, возникновение и распространение поверхностных микротрещин может усугубляться термическим напряжением или механическим напряжением, особенно в условиях теплового удара или термической усталости. В практических приложениях регулярный контроль состояния поверхности, оптимизация скоростей нагрева и охлаждения и использование защитных покрытий являются эффективными мерами для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поддержания производительности поверхности нагревательных элементов MoSi₂. В будущем, с развитием технологии поверхностной инженерии, оптимизация состояния поверхности MoSi₂ станет важным направлением для улучшения его комплексной производительности.

2.9.1 Обычно используемые типы защитных покрытий

Для дальнейшего повышения стойкости к окислению, термостойкости и характеристик термической усталости нагревательных элементов из дисилицида молибдена в элементах MoSi₂ широко используется технология нанесения поверхностного покрытия. Обычные типы защитных покрытий включают оксидные покрытия, карбидные покрытия и композитные покрытия, каждое из которых нацелено на конкретные требования к производительности и среды применения. Оксидные покрытия являются наиболее распространенным выбором, среди которых покрытия из оксида алюминия (Al₂O₃) и оксида циркония (ZrO₂) предпочтительны из-за их высокой температуры плавления, химической стабильности и низкого коэффициента диффузии кислорода. Покрытия из Al₂O₃ наносятся методом плазменного напыления или химического осаждения из паровой фазы (CVD) для формирования плотного защитного слоя при высоких температурах, что значительно улучшает стойкость к окислению и термостойкость MoSi₂, особенно для окислительных атмосфер 1500-1800 °C.

ZrO₂ часто используются в приложениях, требующих высокой термостойкости, таких как высокотемпературные компоненты аэрокосмической промышленности, благодаря их превосходным свойствам термического барьера. Карбидные покрытия в основном представляют собой карбид кремния (SiC), поскольку их коэффициенты термического расширения хорошо соответствуют коэффициентам подложки MoSi₂, что может снизить термическое напряжение между покрытием и подложкой и снизить риск откола. Покрытия SiC наносятся с помощью процессов плазменного напыления или реакционного спекания, которые не только повышают стойкость к окислению, но и улучшают износостойкость поверхности, что делает их пригодными для использования в средах с высоким износом, таких как печи для спекания керамики. Композитные покрытия были в центре внимания разработок в последние годы, такие как композитные покрытия Al₂O₃ - SiC или ZrO₂-Y₂O₃, которые объединяют преимущества нескольких материалов для обеспечения более комплексной защиты. Например, композитные покрытия Al₂O₃ - SiC объединяют высокую стойкость к окислению Al₂O₃ и стойкость к тепловому удару SiC, что делает их пригодными для компонентов MoSi₂ в сложных рабочих условиях.

Выбор типа покрытия должен быть оптимизирован в соответствии с конкретной средой применения. Например, печи для термообработки полупроводников требуют высокочистых покрытий, чтобы избежать загрязнения, в то время как печи для плавки стекла уделяют больше внимания термостойкости покрытия и коррозионной стойкости. Процесс подготовки покрытия также оказывает значительное влияние на производительность.

Плазменное напыление позволяет формировать толстые и плотные покрытия, которые подходят для промышленного применения, в то время как процесс CVD позволяет получать более

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

однородные и тонкие покрытия с более высокой адгезией, которые подходят для высокоточных требований. Кроме того, необходимо точно контролировать толщину и однородность покрытия.

Слишком толстое покрытие может треснуть из-за несоответствия термических напряжений, а слишком тонкое покрытие может не обеспечить адекватной защиты. В будущем ожидается, что разработка наноструктурированных покрытий и многослойных композитных покрытий еще больше улучшит эксплуатационные характеристики поверхности нагревательных элементов MoSi₂.

2.9.2 Исследование поверхностных трещин и адгезии покрытия

Поверхностные трещины и адгезия покрытия нагревательных элементов MoSi₂ являются ключевыми факторами, влияющими на их состояние поверхности и долгосрочную надежность. Поверхностные трещины обычно вызваны термическим напряжением, механическим напряжением или производственными дефектами, особенно в условиях теплового удара или термической усталости. Низкотемпературная хрупкость MoSi₂ (вязкость разрушения составляет около 2-3 МПа·м^{1/2}) позволяет легко образовывать микротрещины при быстрых изменениях температуры или механических вибрациях. Эти трещины могут распространяться вдоль границ зерен, в конечном итоге приводя к разрушению компонента или разрушению защитной пленки SiO₂. В диапазоне температур «чумы» 400-700 °C поверхностные трещины могут усугубить окисление и порошкообразование, еще больше ухудшая состояние поверхности. Адгезия покрытия определяет, может ли защитное покрытие прилипать к подложке MoSi₂ в течение длительного времени, чтобы предотвратить отслаивание или растрескивание. Покрытия с недостаточной адгезией склонны отслаиваться во время высокотемпературных циклов, подвергая подложку воздействию окислительных или коррозионных сред, тем самым сокращая срок службы компонента. На образование поверхностных трещин влияет множество факторов. Чистота материала является важным фактором. Высокочистый MoSi₂ может уменьшить примеси на границах зерен и снизить вероятность возникновения трещин. Микроструктура оказывает значительное влияние на распространение трещин. Плотный MoSi₂ (например, спекание горячим прессованием) имеет меньше пор и дефектов, что может эффективно препятствовать распространению трещин, в то время как образцы с более высокой пористостью склонны к растрескиванию из-за концентрации напряжений. Модификация легирования может улучшить стойкость поверхности к трещинам. Например, добавление редкоземельных оксидов (например, Y₂O₃) может увеличить силу связи на границах зерен и уменьшить распространение трещин, в то время как легирование определенными металлами (например, W) может увеличить риск возникновения трещин из-за несоответствия теплового расширения. Процесс подготовки и обработка поверхности также имеют решающее значение. Полировка поверхности может уменьшить начальные дефекты, в то время как шероховатые поверхности могут стать точками возникновения трещин.

Исследования адгезии покрытий в основном сосредоточены на характеристиках интерфейса, согласовании теплового расширения и процессе нанесения покрытия. Разница в коэффициенте

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплового расширения между MoSi_2 и покрытиями (такими как Al_2O_3 и SiC) вызовет термическое напряжение на интерфейсе, влияющее на адгезию. Например, покрытия SiC обычно лучше, чем покрытия Al_2O_3 , потому что их коэффициенты теплового расширения ближе к MoSi_2 . Технология обработки интерфейса (такая как конструкция переходного слоя) может значительно улучшить адгезию. Например, добавление переходного слоя SiC между подложкой MoSi_2 и покрытием Al_2O_3 может смягчить несоответствие теплового напряжения. Процесс нанесения покрытия также оказывает важное влияние на адгезию. Покрытие, сформированное плазменным напылением, имеет сильную адгезию, но могут быть микропоры, в то время как покрытие, сформированное процессом CVD, более однородно и имеет более высокую адгезию. Термоциклирование и факторы окружающей среды (такие как влажность и атмосфера) будут дополнительно проверять адгезию. Высокая влажность окружающей среды может вызвать химические реакции на границе покрытия и снизить адгезию. Исследования показали, что оптимизация толщины покрытия и дизайна интерфейса (например, градиентное покрытие) может значительно улучшить адгезию и снизить риск трещин и отслаивания.

2.9.3 Формирование и защита поверхностной оксидной пленки SiO_2

SiO_2 на поверхности нагревательного элемента MoSi_2 является основой его стойкости к высокотемпературному окислению, что определяет его долговременную стабильность и срок службы в окислительной атмосфере. Выше 800°C поверхность MoSi_2 реагирует $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$, образуя плотную пленку SiO_2 . Эта пленка имеет низкий коэффициент диффузии кислорода и хорошую способность к самовосстановлению, что может эффективно предотвращать проникновение кислорода в подложку и защищать MoSi_2 от дальнейшей окислительной эрозии. В диапазоне $1200\text{--}1850^\circ\text{C}$ пленка SiO_2 остается стабильной, что позволяет нагревательному элементу MoSi_2 работать в течение длительного времени в высокотемпературной окислительной атмосфере. Максимальная рабочая температура может достигать 1850°C , и широко используется в спекании керамики, плавлении стекла и других процессах. Однако в диапазоне температур «чумы» $400\text{--}700^\circ\text{C}$ MoSi_2 окисляется, образуя не защищающую смесь MoO_3 и SiO_2 , что приводит к образованию рыхлого слоя пленки и порошкообразному превращению материала, что серьезно влияет на эффективность защиты поверхности. Чтобы избежать «чумы», этот температурный диапазон обычно быстро проходится в практических приложениях.

SiO_2 влияет множество факторов. Чистота материала имеет решающее значение для качества пленки. Высокочистый MoSi_2 может производить более плотную и однородную пленку SiO_2 , в то время как примеси (такие как Fe и Al) могут вызывать дефекты пленки и снижать защитный эффект. Микроструктура также играет важную роль. Плотный MoSi_2 (например, спекание горячим прессованием) имеет меньше поверхностных пор, что способствует образованию сплошной пленки SiO_2 , в то время как образцы с высокой пористостью могут образовывать неровный слой пленки и снижать стойкость к окислению. Модификация легирования оказывает двойное влияние на производительность пленок SiO_2 . Оксиды редкоземельных элементов (такие как Y_2O_3) могут улучшить адгезию и стабильность пленки, в то время как легирование определенными металлами (такими как W) может снизить качество пленки из-за изменений в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

кинетики окисления. Атмосфера и влажность в рабочей среде оказывают существенное влияние на формирование и защиту пленок SiO_2 . В среде с высокой влажностью пленка SiO_2 может подвергаться реакциям гидратации с образованием рыхлой силикатной структуры, что снижает ее защитную способность. В восстановительной или вакуумной среде пленка SiO_2 не может быть сформирована или разрушается, что приводит к улетучиванию Si и деградации подложки.

Пленка SiO_2 является ключом к производительности нагревательного элемента MoSi_2 . Во время длительной работы при высокой температуре пленка SiO_2 может стать тоньше из-за улетучивания Si или MoO_3 , особенно при экстремальной температуре, близкой к 1850°C , слой пленки может быть частично поврежден. Частые тепловые циклы также могут привести к растрескиванию или отслаиванию слоя пленки, что снижает защитный эффект. Для повышения стабильности пленки SiO_2 современные элементы MoSi_2 часто используют технологию модификации поверхности, такую как предварительная окислительная обработка для формирования начального плотного слоя пленки, или добавляют защитные покрытия (например, Al_2O_3 или SiC) для повышения стойкости к тепловому удару и долговечности пленки. В практических приложениях поддержание стабильной окислительной атмосферы, избегание сред с высокой влажностью и оптимизация параметров термического цикла являются эффективными мерами для поддержания защитных характеристик пленки SiO_2 . В будущем направления исследований могут быть сосредоточены на оптимизации кинетики формирования пленки SiO_2 и разработке композитных защитных слоев для дальнейшего улучшения характеристик поверхности и срока службы нагревательных элементов MoSi_2 .

2.10 Проблемы с поверхностью нагревательных элементов MoSi_2 и их решения

из дисилицида молибдена (MoSi_2) являются важными факторами, влияющими на их высокотемпературные характеристики и срок службы, в основном включая поверхностные трещины, окисление «чумы», деградацию защитной пленки SiO_2 и отслоение покрытия. Эти проблемы особенно значительны в высокотемпературных циклах, термическом ударе или определенных атмосферных условиях, что может привести к ухудшению характеристик компонента или даже к выходу из строя. Поверхностные трещины обычно вызваны термическим напряжением, механическим напряжением или производственными дефектами. Низкотемпературная хрупкость MoSi_2 позволяет легко образовывать микротрещины при быстрых изменениях температуры или механических вибрациях, которые затем расширяются в макротрещины, ослабляя стойкость к окислению и механическую прочность. В диапазоне температур «чумы» $400-700^\circ\text{C}$ поверхность MoSi_2 окисляется, образуя незащищенную смесь MoO_3 и SiO_2 , что приводит к измельчению материала и серьезному повреждению состояния поверхности. При длительной эксплуатации при высоких температурах защитная пленка SiO_2 может истончаться из-за улетучивания Si или улетучивания MoO_3 . Особенно при экстремальной температуре, близкой к 1850°C , слой пленки может быть частично поврежден, что снижает эффект защиты. Нанесенное защитное покрытие может отслаиваться из-за несоответствия теплового расширения или недостаточного сцепления интерфейса, подвергая подложку воздействию окислительных или коррозионных сред.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Решить проблему поверхностных трещин можно путем оптимизации процесса подготовки и модификации материала. Процесс горячего прессования и спекания может улучшить плотность MoSi_2 , уменьшить поверхностные поры и дефекты и, таким образом, снизить вероятность возникновения трещин. Легирование редкоземельными оксидами (такими как Y_2O_3) или оксидом алюминия может повысить прочность границ зерен и замедлить распространение трещин. Полировка поверхности может уменьшить начальные дефекты и снизить концентрацию напряжений. Чтобы бороться с окислением «чумы», в практических приложениях температура обычно быстро повышается в диапазоне температур 400-700 °C, чтобы сократить время образования не защищающих оксидов. Кроме того, предварительная окислительная обработка может предварительно создать плотную пленку SiO_2 на поверхности для повышения способности противостоять «чуме». Для поддержания стабильности пленки SiO_2 можно улучшить адгезию пленки, добавив редкоземельные элементы, или можно использовать композитное покрытие для повышения стойкости к тепловому удару и долговечности. Для проблемы отслаивания покрытия оптимизация процесса нанесения покрытия (например, химическое осаждение из паровой фазы или плазменное напыление) и дизайн интерфейса (например, добавление переходного слоя SiC) могут улучшить прочность связи и уменьшить несоответствие термических напряжений. В практических приложениях эффективными мерами по продлению срока службы нагревательных элементов MoSi_2 являются контроль скорости нагрева и охлаждения, избегание сред с высокой влажностью и регулярная проверка состояния поверхности.

В будущем направление решения поверхностных проблем может быть сосредоточено на разработке наноструктурированных покрытий и многослойных композитных покрытий для дальнейшего повышения стабильности пленок SiO_2 и прочности сцепления покрытий. Кроме того, интеллектуальная технология мониторинга может использоваться для обнаружения поверхностных условий в реальном времени, своевременной корректировки рабочих параметров и продления срока службы компонентов. Комплексное применение этих методов может эффективно смягчить поверхностные проблемы нагревательных элементов MoSi_2 и повысить их надежность в высокотемпературных применениях, таких как спекание керамики и плавка стекла.

2.11 Факторы, влияющие на термодинамические свойства нагревательных элементов MoSi_2

Термодинамические свойства нагревательных элементов MoSi_2 , включая теплопроводность, коэффициент теплового расширения, удельную теплоемкость и температуропроводность, напрямую влияют на их эффективность нагрева, однородность температуры и стойкость к тепловому удару. На эти свойства влияют внутренние свойства материала (такие как состав и микроструктура) и внешняя среда (такая как рабочая температура и атмосфера). Теплопроводность MoSi_2 составляет около 45 Вт/(м·К) при комнатной температуре и падает до около 15 Вт/(м·К) при высокой температуре (1500 °C), обеспечивая хорошую теплопередающую способность, но снижение теплопроводности с температурой повлияет на быструю эффективность нагрева. Его коэффициент теплового расширения составляет около $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что хорошо согласуется с керамическим материалом матрицы и снижает термическое напряжение,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

но его низкотемпературная хрупкость делает его легко трескающимся при термическом ударе. Удельная теплоемкость составляет около $0,45 \text{ Дж/(г}\cdot\text{K)}$, которая немного увеличивается при высокой температуре, влияя на температуропроводность. Эти термодинамические свойства совместно определяют производительность MoSi_2 в высокотемпературных печах.

Чистота материала является ключевым фактором, влияющим на термодинамические свойства. Высокочистый MoSi_2 может уменьшить рассеяние фононов, вызванное примесями (такими как Fe и C), улучшить теплопроводность, уменьшить дефекты границ зерен и улучшить распределение термических напряжений. Микроструктура оказывает значительное влияние на термодинамические свойства. Плотный MoSi_2 (например, полученный путем горячего прессования и спекания) имеет более высокую теплопроводность и стойкость к термическому удару, в то время как образцы с высокой пористостью имеют низкие характеристики из-за рассеянного тепла и концентрации напряжений. Модификация легирования может оптимизировать термодинамические свойства. Например, добавление W может немного увеличить теплопроводность, но может увеличить термическое напряжение из-за несоответствия термического расширения; легирование оксидом редкоземельных металлов (таким как Y_2O_3) может повысить прочность границ зерен и улучшить стойкость к термическому удару. Процессы подготовки, такие как горячее прессование или реакционное спекание, также оказывают важное влияние на термодинамические свойства. Образцы высокой плотности обычно демонстрируют лучшую теплопроводность и стойкость к термическому удару.

Влияние внешней среды на термодинамические свойства нельзя игнорировать. Рабочая температура и атмосфера напрямую влияют на теплопроводность, тепловое расширение и термостойкость, изменяя состояние поверхности и внутреннюю структуру материала. В практических приложениях оптимизация конструкции компонента (например, увеличение площади поверхности горячего конца) и управление условиями эксплуатации (например, стабилизация температурного градиента) могут улучшить термодинамические характеристики и удовлетворить потребности таких сложных приложений, как спекание керамики и термообработка полупроводников.

2.11.1 Влияние рабочей температуры

Рабочая температура является основным фактором, влияющим на термодинамические свойства нагревательных элементов MoSi_2 , который напрямую определяет производительность его теплопроводности, коэффициента теплового расширения и стойкости к тепловому удару. В диапазоне от комнатной температуры до 1000°C теплопроводность MoSi_2 падает с примерно $45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ до примерно $25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, в основном из-за усиленного рассеяния фононов и уменьшенного вклада электронной теплопроводности при высоких температурах. В диапазоне высоких температур $1000\text{--}1850^\circ\text{C}$ теплопроводность дополнительно падает до примерно $15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, но она все еще может соответствовать требованиям теплопередачи в таких приложениях, как спекание керамики и плавление стекла. Коэффициент теплового расширения немного увеличивается при высоких температурах, но остается в диапазоне $8\text{--}9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

хорошо соответствует керамической матрице и снижает термическое напряжение. Однако вязкость разрушения MoSi_2 при высоких температурах низкая ($2-3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), и микротрещины легко образуются из-за термического напряжения при быстром повышении и понижении температуры, что влияет на стабильность термодинамических свойств. Высокотемпературная эксплуатация также повлияет на формирование и стабильность защитной пленки SiO_2 . Выше 800°C плотная пленка SiO_2 эффективно защищает подложку, но при экстремальной температуре, близкой к 1850°C , улетучивание Si и улетучивание MoO_3 может привести к истончению слоя пленки, что снижает долгосрочную стабильность термодинамических свойств. В диапазоне температур «чумы» $400-700^\circ\text{C}$ образование не защищающих оксидов приведет к измельчению материала, что еще больше ухудшит теплопроводность и стойкость к тепловому удару. Для снижения неблагоприятного воздействия рабочей температуры в практических приложениях стабильность термодинамических свойств может быть улучшена за счет оптимизации скоростей нагрева и охлаждения, использования предварительной окислительной обработки для формирования начальной пленки SiO_2 и нанесения защитного покрытия (например, Al_2O_3 или SiC). С точки зрения конструкции компонента использование структур U-типа или W-типа может рассеивать тепловые напряжения и улучшать термодинамические характеристики при высоких температурах.

2.11.2 Влияние атмосферы

Атмосфера оказывает значительное влияние на термодинамические свойства нагревательных элементов MoSi_2 , в основном за счет изменения состояния поверхности и внутренней структуры материала. В окислительной атмосфере защитная пленка SiO_2 , образующаяся на поверхности MoSi_2 , может эффективно поддерживать стабильность термодинамических свойств. Низкий коэффициент диффузии кислорода пленки SiO_2 обеспечивает долговременную постоянство теплопроводности и коэффициента теплового расширения, одновременно защищая подложку от окислительной коррозии. Однако окислительная атмосфера с высокой влажностью может привести к гидратации пленки SiO_2 , образуя рыхлую силикатную структуру, снижая теплопроводность и стойкость к тепловому удару. В восстановительной атмосфере (такой как H_2) или вакуумной среде пленка SiO_2 не может быть сформирована или разрушается, что приводит к улетучиванию Si и деградации подложки, значительному снижению теплопроводности, а повышенное термическое напряжение может вызвать трещины, серьезно влияющие на термодинамические свойства.

Инертные атмосферы (такие как Ar , N_2) оказывают незначительное влияние на термодинамические свойства MoSi_2 , но длительная эксплуатация может медленно образовывать пленку SiO_2 из-за присутствия следовых количеств кислорода, слегка изменяя теплопроводность. Примеси в атмосфере (такие как сульфиды и хлориды) могут реагировать с поверхностью MoSi_2 , образуя не защитные соединения, снижая стабильность термодинамических свойств. Чтобы справиться с влиянием атмосферы, в практических приложениях следует отдавать предпочтение стабильной окислительной атмосфере, чтобы избежать высокой влажности или восстановительных сред. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al_2O_3) могут повысить

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионную стойкость и поддерживать термодинамические свойства. Кроме того, регулярный контроль чистоты атмосферы и состояния поверхности компонента, а также оптимизация рабочих параметров (например, контроль влажности атмосферы) являются эффективными мерами для обеспечения стабильности термодинамических свойств нагревательного элемента MoSi₂.

2.11.3 Влияние частоты нагрева/охлаждения

оказывает значительное влияние на термодинамические свойства нагревательных элементов из дисилицида молибдена (MoSi₂), особенно в приложениях, требующих частого термического цикла, таких как печи для спекания керамики, печи для отжига стекла и оборудование для термической обработки металлов. Термодинамические свойства MoSi₂, включая теплопроводность, коэффициент теплового расширения и температуропроводность, подвергаются воздействию термического напряжения во время быстрых циклов нагрева/охлаждения. Частые термические циклы приводят к тому, что термические напряжения многократно воздействуют на микроструктуру MoSi₂, что может вызвать возникновение и распространение микротрещин, особенно из-за его низкотемпературной хрупкости (вязкость разрушения около 2-3 МПа·м^{1/2}), что снижает теплопроводность и стойкость к тепловому удару. Кроме того, в «критическом» диапазоне температур 400–700 °C быстрые термоциклы могут усилить образование не обладающих защитными свойствами оксидов (смеси MoO₃ и SiO₂), что приведет к порошкообразному покрытию поверхности и дальнейшему ухудшению термодинамических свойств.

Влияние частоты нагрева/охлаждения тесно связано с температурным диапазоном и скоростью цикла. В крупномасштабных циклах от высокой температуры (1200-1850 °C) до низкой температуры (комнатная температура или 400-700 °C) термическое напряжение более существенно, что может вызвать растрескивание или отслоение защитной пленки SiO₂, ослабляя стойкость к окислению и теплопроводность. Высокочастотные циклы (например, нагрев и охлаждение несколько раз в час) ускорят усталостное повреждение микроструктуры и сократят срок службы компонента, в то время как низкочастотные циклы (например, один раз в день) относительно мало влияют на термодинамические свойства. Чистота материала и микроструктура имеют решающее значение для устойчивости к термическим циклам. Высокочистый MoSi₂ может уменьшить ослабление границ зерен, вызванное примесями, и снизить риск распространения трещин. Плотные микроструктуры (например, полученные методом горячего прессования и спекания) могут эффективно рассеивать термическое напряжение и повышать стойкость к термической усталости, в то время как образцы с более высокой пористостью склонны к растрескиванию из-за концентрации напряжений. Легирование также может улучшить характеристики термоциклирования. Например, добавление редкоземельных оксидов (например, Y₂O₃) может повысить прочность границ зерен и замедлить распространение трещин. Чтобы смягчить неблагоприятные эффекты частоты нагрева/охлаждения, в практических приложениях можно предпринять ряд мер оптимизации. Управление скоростями нагрева и охлаждения может снизить накопление термического напряжения и избежать быстрого прохождения через температурный диапазон 400-700 °C для подавления «чумного» окисления. Поверхностные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

покрытия (например, Al_2O_3 или SiC) могут повысить стойкость к термическому удару и стабильность пленок SiO_2 , продлевая срок службы термоциклирования. Оптимизация конструкции компонента (например, использование U-образных или W-образных структур) может рассеивать термическое напряжение и уменьшать возникновение трещин. Регулярная проверка состояния поверхности и регулировка параметров термического цикла также могут эффективно повысить стабильность термодинамических свойств нагревательного элемента MoSi_2 для удовлетворения потребностей приложений с высокочастотным термическим циклом.

2.11.4 Влияние рабочего напряжения

Рабочее напряжение является ключевым внешним фактором, влияющим на термодинамические характеристики и стабильность работы нагревательных элементов MoSi_2 , и напрямую связано с его эффективностью нагрева, распределением температуры и сроком службы. Удельное сопротивление MoSi_2 имеет положительную температурную характеристику коэффициента, которая составляет около $2,0 \times 10^{-5}$ при комнатной температуре. $\Omega \cdot \text{см}$, увеличивается до около $4,0 \times 10^{-5}$ при 1000°C $\Omega \cdot \text{см}$, около $4,5 \times 10^{-5}$ при 1500°C $\Omega \cdot \text{см}$. Это свойство позволяет MoSi_2 адаптивно регулировать выходную мощность при различных напряжениях, но это может иметь неблагоприятное влияние на термодинамические свойства в условиях высокого напряжения или нестабильного напряжения. Высокое напряжение приводит к быстрому нагреву компонента и созданию большого термического напряжения, особенно в MoSi_2 , который имеет значительную низкотемпературную хрупкость, что может вызвать микротрещины и снизить теплопроводность и стойкость к тепловому удару. Кроме того, высокое напряжение может вызвать локальный перегрев, ускорить испарение Si или MoO_3 поверхностной защитной пленки SiO_2 , сделать пленку тоньше и ослабить стойкость к окислению.

Колебания напряжения также являются важным фактором, влияющим на термодинамические свойства. Частые колебания напряжения могут вызывать нестабильность тока, что приводит к неравномерному распределению температуры внутри компонента, увеличению концентрации термических напряжений, а затем вызывает микроструктурные повреждения или поверхностные трещины. Длительная работа под высоким напряжением может ускорить старение MoSi_2 , например, дрейф сопротивления или рост зерен, и снизить температуропроводность и теплопроводность. Чистота материала и микроструктура играют важную роль в устойчивости к эффектам напряжения. Высокочистый MoSi_2 может уменьшить локальную неравномерность сопротивления, вызванную примесями, и снизить риск перегрева. Плотные микроструктуры (например, полученные путем горячего прессования и спекания) могут улучшить способность рассеивать термические напряжения и повысить устойчивость к колебаниям напряжения. Леггирующие модификации (например, добавление W или Nb) могут оптимизировать удельное сопротивление и улучшить электротермическую стабильность под напряжением, но устойчивость к окислению должна быть сбалансирована.

Чтобы смягчить неблагоприятные эффекты используемого напряжения, необходимо оптимизировать стратегию управления напряжением в практических приложениях.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Использование стабильной системы электропитания и регулятора напряжения может уменьшить колебания и обеспечить равномерный нагрев. Конструкция согласования сопротивления холодного конца и горячего конца (например, легирование холодного конца высокопроводящим материалом) может снизить риск локального перегрева и повысить энергоэффективность. Нанесение защитного покрытия (например, SiC или Al_2O_3) может повысить стойкость поверхности к окислению и устойчивость к термическим нагрузкам, а также продлить срок службы компонента. Кроме того, регулярный мониторинг входного напряжения и состояния поверхности компонента в сочетании с соответствующей конструкцией кривой нагрева (например, медленный нагрев) может эффективно поддерживать термодинамические свойства нагревательного элемента MoSi₂ и удовлетворять потребности высокоточных приложений, таких как спекание керамики и термообработка полупроводников.

2.11.5 Влияние плотности тока

оказывает важное влияние на термодинамические свойства и долговременную стабильность нагревательных элементов MoSi₂ и напрямую определяет его мощность нагрева, распределение температуры и поведение материала при старении. Как резистивный нагревательный материал, выходная мощность MoSi₂ пропорциональна квадрату плотности тока ($P = I^2R$), поэтому высокая плотность тока значительно увеличит температуру элемента, влияя на теплопроводность, тепловое расширение и стойкость к тепловому удару. Теплопроводность MoSi₂ ниже при высокой температуре (около 15 Вт/(м·К) при 1500 °C), чем при комнатной температуре (45 Вт/(м·К)). Высокая плотность тока может вызвать локальный перегрев и создать большое тепловое напряжение, особенно в MoSi₂ со значительной низкотемпературной хрупкостью, которая легко может вызвать микротрещины или растрескивание поверхностной защитной пленки SiO₂, что снижает термодинамические свойства. Кроме того, высокая плотность тока может ускорить улетучивание Si или MoO₃ из пленки SiO₂, что сделает пленку тоньше и ослабит стойкость к окислению, особенно при экстремальной температуре, близкой к 1850 °C. Равномерность распределения плотности тока имеет решающее значение для термодинамических характеристик. Неравномерная плотность тока (например, локальная высокая плотность тока, вызванная дефектами конструкции компонентов или плохим контактом) приведет к увеличению градиентов температуры, повышению термического напряжения и риска трещин, а также снижению температуропроводности. Длительная работа при высокой плотности тока может вызвать дрейф сопротивления или микроструктурную деградацию MoSi₂ (например, рост зерен или ослабление границ зерен), что еще больше повлияет на теплопроводность и стойкость к тепловому удару. Чистота и микроструктура материала оказывают значительное влияние на толерантность к плотности тока. Высокочистый MoSi₂ может уменьшить локальную неравномерность сопротивления, вызванную примесями, и снизить риск перегрева. Плотные микроструктуры (например, горячее прессование и спекание) могут улучшить возможности рассеивания термического напряжения и повысить устойчивость к удару плотности тока. Модификация легирования (например, добавление Y₂O₃) может оптимизировать структуру границ зерен, стабилизировать удельное сопротивление и улучшить термодинамические свойства при плотности тока.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Для смягчения неблагоприятных эффектов используемой плотности тока необходимо оптимизировать конструкцию компонента и условия эксплуатации в практических приложениях. U-образные или W-образные компоненты с однородной конструкцией поперечного сечения могут обеспечить равномерное распределение плотности тока и уменьшить локальный перегрев. Согласование сопротивления между холодным и горячим концами (например, легирование холодного конца высокопроводящими материалами) может снизить концентрацию плотности тока и повысить энергоэффективность. Нанесение защитного покрытия (например, Al_2O_3 или SiC) может повысить стойкость поверхности к окислению и термическому напряжению и продлить срок службы компонента. Использование контроллера тока для стабилизации входного тока, предотвращения чрезмерной плотности тока и регулярной проверки состояния поверхности и электрических свойств компонента являются эффективными мерами для поддержания стабильности термодинамических свойств нагревательного элемента MoSi_2 . Эти стратегии оптимизации могут удовлетворить потребности приложений высокой мощности, таких как плавка стекла и термическая обработка металлов.

2.11.6 Влияние метода установки

Н как важный фактор, влияющий на термодинамические характеристики и срок службы нагревательных элементов из дисилицида молибдена (MoSi_2), напрямую связан с распределением термического напряжения, однородностью температуры и механической стабильностью. Термодинамические свойства MoSi_2 , включая теплопроводность, коэффициент теплового расширения и температуропроводность, могут быть ухудшены термическим или механическим напряжением при ненадлежащих методах установки. Обычные методы установки включают вертикальную подвеску, горизонтальную опору и зажим, каждый из которых по-разному влияет на термодинамические свойства. Вертикальная подвеска является наиболее распространенным методом установки нагревательных элементов MoSi_2 . Она подходит для U-образных или W-образных элементов.

Он может уменьшить механические ограничения и обеспечить свободное тепловое расширение элементов при высоких температурах, тем самым уменьшая тепловое напряжение. Однако, если точка подвеса не спроектирована должным образом (например, концентрация напряжений в точке контакта), это может привести к локальным трещинам и снизить теплопроводность и стойкость к тепловому удару. Горизонтальная установка опоры обычно используется для элементов прямого стержневого типа, но необходимо убедиться, что материал опоры (например, оксид алюминия высокой чистоты) соответствует коэффициенту теплового расширения MoSi_2 , в противном случае концентрация напряжений может быть вызвана несоответствием теплового расширения, что повлияет на температуропроводность. Метод фиксации зажимом более распространен в небольших печах, но чрезмерное усилие зажима может вызвать микротрещины в MoSi_2 из-за низкотемпературной хрупкости, тем самым ослабляя термодинамические свойства.

Метод установки также влияет на стабильность и стойкость к окислению поверхностной защитной пленки SiO_2 . Неравномерное напряжение установки может привести к растрескиванию

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхностного слоя пленки, особенно в диапазоне температур «чумы» 400-700 °C, где трещины могут усугубить образование не защитных оксидов, снизить теплопроводность и стойкость к тепловому удару. Кроме того, метод установки косвенно влияет на распределение тока и однородность температуры. Например, плохой контакт может привести к увеличению локальной плотности тока, вызывая перегрев и ускоряя деградацию пленки SiO₂. Чтобы оптимизировать воздействие метода установки, следует выбрать конструкцию установки, которая соответствует типу печи в реальных приложениях, например, использовать высокочистые керамические опоры для уменьшения несоответствия теплового расширения и использовать гибкие зажимы для уменьшения механического напряжения. Обеспечение хорошего контакта между точкой установки и холодным концом MoSi₂ может улучшить однородность тока и уменьшить локальный перегрев. Регулярная проверка износа и ослабления крепления в месте установки в сочетании с разумной скоростью нагрева и охлаждения (например, 5–10 °C/мин) позволяет эффективно поддерживать термодинамические свойства нагревательного элемента MoSi₂ и продлевать срок его службы в таких областях применения, как спекание керамики и плавка стекла.

2.11.7 Влияние качества и чистоты компонентов

MoSi₂ являются основными внутренними факторами, влияющими на их термодинамические свойства, напрямую определяя их теплопроводность, коэффициент теплового расширения, стойкость к тепловому удару и долговременную стабильность. Высокочистый MoSi₂ (чистота обычно ≥99,5%) может значительно улучшить термодинамические свойства. Его теплопроводность составляет около 45 Вт/(м·К) при комнатной температуре и около 15 Вт/(м·К) при 1500 °C. Его коэффициент тепловой диффузии составляет около $1,6 \times 10^{-5}$ м²/с при комнатной температуре и около $0,8 \times 10^{-5}$ м²/с при 1500 °C. Высокочистые материалы могут уменьшать рассеяние фононов и ослабление границ зерен, вызванное примесями (такими как Fe, Al и C), тем самым улучшая теплопроводность и возможности рассеивания термических напряжений. Наличие примесей может привести к локальной неоднородности сопротивления, увеличить концентрацию термических напряжений, снизить стойкость к тепловому удару и даже вызвать микротрещины, особенно на низкотемпературной стадии хрупкости MoSi₂. Кроме того, примеси могут реагировать с кислородом, образуя незащитные оксиды, ослабляя плотность поверхностной защитной пленки SiO₂, снижая стабильность стойкости к окислению и термодинамические свойства, особенно в диапазоне температур «чумы» 400-700 °C, где примеси будут усугублять измельчение материала.

MoSi₂, полученный методом горячего прессования спеканием, имеет высокую плотность (близкую к более чем 98% от теоретической плотности), низкую пористость и лучшую теплопроводность и термостойкость, чем образцы, полученные методом реакционного спекания или самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (CBC). Компоненты с высокой пористостью имеют низкую теплопроводность из-за рассеивания тепла в порах и концентрации напряжений и склонны к растрескиванию во время термических циклов, что снижает коэффициент термодиффузии. Высококачественные компоненты MoSi₂ также должны иметь однородную микроструктуру и умеренный размер зерна (обычно 10-50 мкм). Чрезмерно крупные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

зерна могут привести к снижению прочности границ зерен, в то время как слишком мелкие зерна могут увеличить рассеяние границ зерен и снизить теплопроводность. Модификация легирования может дополнительно оптимизировать эффекты качества и чистоты. Например, добавление редкоземельных оксидов (таких как Y_2O_3) может улучшить связь границ зерен и улучшить стойкость к тепловому удару, в то время как высокочистые легирующие добавки могут избежать введения дополнительных примесей.

Для улучшения качества и чистоты компонентов необходимо выбирать высокочистое сырье (например, высокочистые порошки Mo и Si), а процесс подготовки должен строго контролироваться в практических приложениях. Горячее прессование, спекание или плазменное напыление могут улучшить плотность и уменьшить пористость и дефекты. Связи контроля качества (например, рентгеновская дифракция и сканирующая электронная микроскопия) могут гарантировать чистоту компонентов и однородность микроструктуры. Нанесение защитных покрытий (например, SiC или Al_2O_3) может дополнительно компенсировать отсутствие стойкости к окислению материалов низкой чистоты. Регулярный контроль состояния поверхности и производительности компонентов в сочетании со стабильными условиями эксплуатации (например, предотвращение высокой влажности или восстановительной атмосферы) может максимизировать термодинамические свойства нагревательных элементов MoSi₂ для удовлетворения потребностей приложений с высоким спросом, таких как термическая обработка полупроводников и термическая обработка металлов.

2.11.8 Эффект обработки защитным покрытием

Защитная обработка покрытия оказывает важное влияние на термодинамические свойства нагревательных элементов MoSi₂ и может значительно повысить их стойкость к окислению, стойкость к тепловому удару и стабильность теплопроводности. Обычно используемые защитные покрытия включают оксидные покрытия (такие как Al_2O_3 , ZrO_2), карбидные покрытия (например, SiC) и композитные покрытия (например, Al_2O_3 - SiC), которые образуют плотный защитный слой для восполнения дефицита пленки SiO₂ на поверхности MoSi₂ в экстремальных условиях. Покрытие Al_2O_3 может эффективно улучшить стойкость к окислению и поддерживать стабильность теплопроводности (около 15 Вт/(м·К) при 1500 °C) благодаря своей высокой температуре плавления (около 2050 °C) и низкому коэффициенту диффузии кислорода (около 10^{-14} см²/с при 1500 °C), особенно в высокотемпературной окислительной атмосфере (1200-1850 °C).

SiC имеет лучшее соответствие между коэффициентом теплового расширения (около $4,5 \times 10^{-6}$ К⁻¹) и MoSi₂ (около $8,1 \times 10^{-6}$ К⁻¹), что снижает несоответствие термических напряжений и улучшает стойкость к тепловому удару, что делает его пригодным для сред с высоким термическим циклом, таких как печи для спекания керамики. Композитные покрытия объединяют преимущества нескольких материалов. Например, покрытия Al_2O_3 - SiC обладают как высокой стойкостью к окислению, так и стойкостью к тепловому удару, что значительно улучшает долгосрочную стабильность термодинамических свойств.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Улучшение термодинамических свойств покрытиями тесно связано с их адгезией, толщиной и однородностью. Высококачественные покрытия (например, полученные методом химического осаждения из паровой фазы (CVD)) обладают высокой адгезией и однородностью, могут эффективно рассеивать термическое напряжение и поддерживать стабильность коэффициента термической диффузии (около $0,8 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ при 1500°C). Слишком толстые покрытия ($>100 \text{ мкм}$) могут вызывать растрескивание из-за несоответствия термического расширения и снижать теплопроводность, в то время как слишком тонкие покрытия ($<10 \text{ мкм}$) могут не обеспечивать адекватной защиты. Процесс нанесения покрытия также оказывает значительное влияние на термодинамические свойства. Плазменное напыление может образовывать толстые и плотные покрытия, которые подходят для промышленного применения, но могут иметь микропоры и немного снижать теплопроводность; тонкие покрытия, полученные с помощью процессов CVD, более однородны, имеют низкое термическое напряжение и подходят для высокоточных требований. Покрытия также могут уменьшить воздействие «чумного» окисления ($400\text{-}700^\circ\text{C}$). Например, покрытия SiC могут ингибировать образование не защитного MoO_3 и защищать термодинамические свойства.

Долгосрочная стабильность покрытия зависит от рабочей среды. В среде с высокой влажностью покрытие Al_2O_3 может подвергаться реакции гидратации, что снижает теплопроводность; в восстановительной или вакуумной среде покрытие может ухудшаться из-за улетучивания Si, что влияет на коэффициент термодиффузии. Чтобы оптимизировать воздействие обработки защитой покрытия, необходимо выбрать соответствующий тип покрытия и процесс в соответствии с требованиями применения в реальных приложениях. Например, высокочистые покрытия CVD предпочтительны для печей термообработки полупроводников, а толстые покрытия SiC могут использоваться для печей плавления стекла. Конструкция интерфейса (например, добавление переходного слоя SiC) может улучшить сцепление и снизить риск отслоения. Регулярный контроль целостности покрытия и состояния поверхности в сочетании со стабильной окислительной атмосферой и соответствующими скоростями нагрева и охлаждения (например, $5\text{-}10^\circ\text{C}/\text{мин}$) может максимизировать защитный эффект покрытия на термодинамические свойства нагревательного элемента MoSi_2 и продлить его срок службы в высокотемпературных приложениях.

2.12 Паспорт безопасности нагревательного элемента MoSi_2 от CTIA GROUP LTD

предоставляет информацию о безопасном использовании, хранении и обращении с нагревательными элементами из дисилицида молибдена (MoSi_2), производимыми CTIA GROUP LTD. MoSi_2 — это интерметаллическое соединение с превосходной стойкостью к высокотемпературному окислению и электропроводностью. Оно широко используется в высокотемпературных промышленных и лабораторных печах (например, для спекания керамики, плавки стекла и термообработки металлов). Ниже приводится подробное описание содержания паспорта безопасности нагревательных элементов MoSi_2 CTIA GROUP LTD на основе характеристик материалов MoSi_2 и отраслевых стандартов, включая его физические и химические свойства, идентификацию опасностей, безопасную эксплуатацию и аварийные меры.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Состав материала : Нагревательные элементы MoSi₂ компании CTIA GROUP LTD в основном состоят из дисилицида молибдена (химическая формула: MoSi₂, номер CAS: 12136-78-6) с чистотой обычно $\geq 99,5\%$ и могут содержать следовые добавки (такие как оксиды редкоземельных металлов или оксид алюминия) для повышения производительности. MoSi₂ — это керамический материал с серым металлическим внешним видом, тетрагональной кристаллической структурой α -типа (тип C11b), плотностью около 6,24 г/см³, температурой плавления около 2030 °C и электропроводностью. Нагревательный элемент обычно имеет форму U, W или прямой стержень, а на поверхности в высокотемпературной окислительной атмосфере образуется плотная защитная пленка SiO₂. Возможные примеси включают Fe, Al, C и т. д., а содержание обычно составляет менее 0,1% в зависимости от производственной партии и процесса легирования.

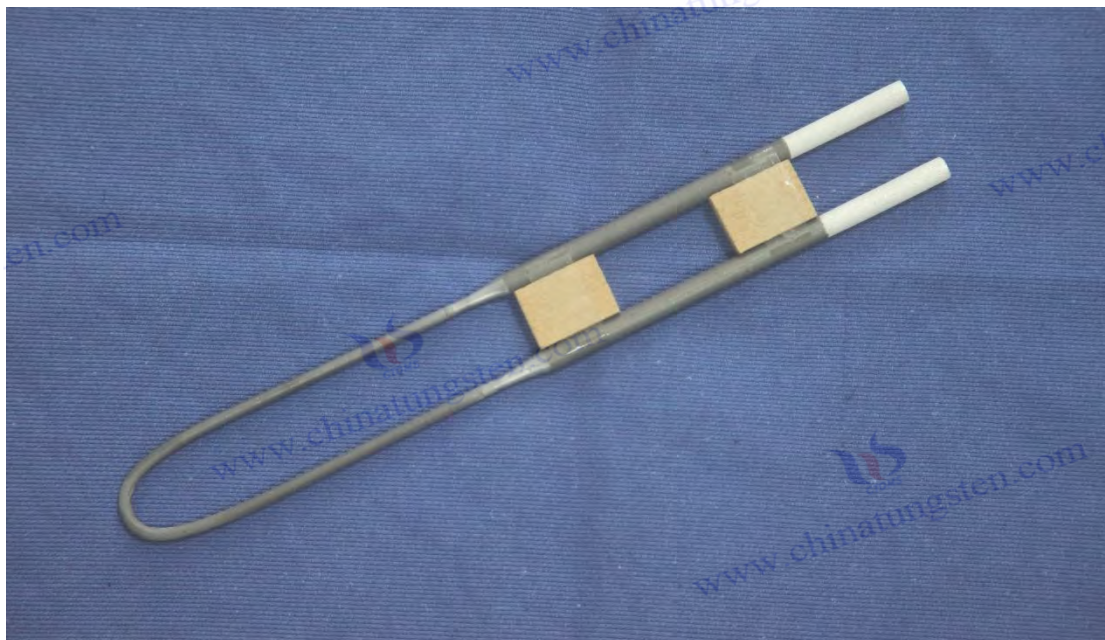
Идентификация опасности : Нагревательные элементы MoSi₂ относительно безопасны при нормальном использовании при высокой температуре, но при определенных условиях могут существовать следующие опасности. С точки зрения физических опасностей MoSi₂ является хрупким при комнатной температуре и может легко сломаться из-за механического воздействия или неправильного обращения, что приводит к острым осколкам, которые могут вызвать порезы. С точки зрения химических опасностей MoSi₂ будет подвергаться низкотемпературному окислению в диапазоне температур «чумы» 400-700 °C, образуя смесь MoO₃ и SiO₂, которая может выделять следовые количества паров MoO₃ (которые могут раздражать дыхательные пути и глаза). В восстановительной или вакуумной среде улетучивание Si может вызвать деградацию материала и выделение паров кремния, которых следует избегать при вдыхании. С точки зрения экологических опасностей MoSi₂ сам по себе оказывает незначительное воздействие на окружающую среду, но выброшенные компоненты необходимо обрабатывать как опасные отходы, чтобы избежать загрязнения.

Безопасность эксплуатации и меры защиты: Для обеспечения безопасного использования нагревательных элементов MoSi₂ CTIA GROUP LTD в MSDS приведены следующие инструкции по эксплуатации. Надевайте защитные перчатки (например, термостойкие перчатки) и очки при работе, избегайте прямого контакта с острыми краями и не допускайте механического повреждения или травмирования людей мусором. Во время установки следует использовать соответствующие методы крепления (например, вертикальную подвеску или гибкое крепление), чтобы избежать чрезмерного механического напряжения, вызывающего поломку. При использовании убедитесь, что система электропитания имеет пропорциональное управление, фазовый триггер и функцию ограничения тока, чтобы избежать непропорционального переключения или «внезапных» методов электропитания, которые могут повредить компоненты. При хранении его следует поместить в сухую, неагрессивную газовую среду, чтобы избежать поверхностной коррозии, вызванной влажностью или кислотной атмосферой.

Хранение и транспортировка: Нагревательные элементы MoSi₂ необходимо хранить в сухом и чистом месте с контролируемой температурой 5-35°C и относительной влажностью ниже 70%. Избегайте контакта с кислотными веществами или средами с высокой влажностью, чтобы предотвратить коррозию поверхности или деградацию пленки SiO₂. Используйте пенопластовые

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

или деревянные ящики для транспортировки и фиксируйте компоненты, чтобы предотвратить поломку из-за вибрации или удара. Упаковка должна быть промаркирована знаками «хрупкое» и «влагонепроницаемое», а также должен быть приложен документ MSDS для справки. Во время транспортировки необходимо соблюдать правила перевозки опасных грузов (например, UN3077, экологически опасные вещества), чтобы обеспечить безопасное прибытие.



CTIA GROUP LTD Кремний-молибденовый стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

Molybdenum disilicide (MoSi₂) heating elements are high-performance ceramic electric heating materials widely used in industrial furnace applications. In high-temperature oxidizing atmospheres, MoSi₂ forms a dense silica (SiO₂) protective layer on its surface, which effectively prevents further oxidation. It exhibits excellent oxidation resistance and thermal stability, allowing stable operation under high temperatures for extended periods.

2. Features of MoSi₂ Heating Element

Low thermal expansion coefficient: Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.

Excellent oxidation resistance: Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.

Extremely high working temperature: Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.

Good high-temperature electrical resistance characteristics: MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

Model (d1/d2)	Hot End Diameter (d1)	Cold End Diameter (d2)	Hot Zone Length (Le)	Cold Zone Length (Lu)	Common Types
φ3/6	3 mm	6 mm	100–300 mm	150–250 mm	Straight / U-type
φ4/9	4 mm	9 mm	100–500 mm	200–300 mm	Straight / U-type
φ6/12	6 mm	12 mm	100–600 mm	200–350 mm	Straight / U-type / W-type
φ9/18	9 mm	18 mm	150–800 mm	250–400 mm	Straight / U-type / W-type
φ12/24	12 mm	24 mm	200–1000 mm	300–500 mm	Straight / U-type / W-type

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries

Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals

High-temperature laboratory furnaces

Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 3. Структура и конструкция нагревательных элементов MoSi₂

3.1 Распространенные конструкции нагревательных элементов MoSi₂

из дисилицида молибдена (MoSi₂) широко используются в высокотемпературных промышленных печах и лабораторном оборудовании благодаря их превосходной стойкости к высокотемпературному окислению, электропроводности и максимальной рабочей температуре. Конструкция конструкции напрямую влияет на эффективность нагрева, однородность температуры, стойкость к тепловому удару и срок службы. Обычные конструкции нагревательных элементов MoSi₂ включают U-тип, W-тип, L-тип, прямой стержневой тип и индивидуальные формы, среди которых U-тип и W-тип являются наиболее популярными из-за их эффективного распределения тепла и гибких методов установки. Эти конструкции обычно состоят из горячего конца (теплогенерирующей части) и холодного конца (соединительной части). Горячий конец генерирует тепло при высокой температуре, а холодный конец снижает сопротивление за счет легирования высокопроводящими материалами (такими как алюминий или вольфрам), чтобы обеспечить стабильность соединения с источником питания. При проектировании конструкции элементов MoSi₂ необходимо всесторонне учитывать размер печи, мощность нагрева, частоту термического цикла и способ установки для удовлетворения потребностей различных областей применения, таких как спекание керамики, плавка стекла и термическая обработка металлов.

Оптимизация конструкции имеет решающее значение для производительности нагревательных элементов MoSi₂. Длина, размеры поперечного сечения и способ соединения горячего и холодного концов должны быть точно согласованы, чтобы обеспечить равномерное распределение тока и избежать локального перегрева. Диаметр горячего конца обычно составляет 6-12 мм, а диаметр холодного конца в 1,5-2 раза больше горячего конца, чтобы снизить температуру холодного конца и продлить срок службы. Геометрическая форма элемента (например, радиус изгиба U-типа или W-типа) влияет на распределение термического напряжения. Разумная конструкция изгиба может снизить риск образования трещин от термического удара. Чистота материала (обычно $\geq 99,5\%$) и процесс подготовки (например, горячее прессование и спекание) оказывают значительное влияние на структурную целостность. Высокочистый и плотный MoSi₂ может уменьшить микродефекты и улучшить сопротивление термической усталости. Обработка поверхности (например, полировка или покрытие) также может повысить стойкость к окислению и термодинамические свойства. В практических приложениях выбор конструкции должен быть настроен в соответствии с пространством в печи, требованиями к распределению температуры и ограничениями установки. Например, U-тип подходит для небольших печей, а W-тип подходит для больших печей, чтобы обеспечить более равномерный нагрев.

3.1.1 U-образный нагревательный элемент MoSi₂

U-образные нагревательные элементы MoSi₂ являются одной из наиболее распространенных конструкций и широко используются в небольших и средних высокотемпературных печах, таких как лабораторные муфельные печи и печи для спекания керамики, благодаря своей простой,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

компактной конструкции и эффективной производительности нагрева. Структура U-образного элемента состоит из двух параллельных горячих концов, соединенных U-образным изгибом, а холодный конец расположен в верхней части горячего конца и подключен к источнику питания. Главное преимущество U-образной конструкции заключается в том, что его горячий конец может обеспечивать концентрированную высокотемпературную зону, что подходит для применений, требующих локальной высокой плотности тепла, таких как спекание в окислительной атмосфере с максимальной температурой до 1800 °C. Длина горячего конца U-образного элемента обычно составляет 100–500 мм, а конкретная длина настраивается в соответствии с размером печи и требованиями к мощности. Диаметр горячего конца составляет 6–9 мм, а диаметр холодного конца — 12–18 мм, что обеспечивает низкое сопротивление и эффективную передачу тока.

Термодинамические характеристики U-образного элемента выигрывают от его компактной геометрии. Расстояние между горячими концами (обычно 20-50 мм) оптимизирует однородность температуры и снижает концентрацию термических напряжений. Радиус изгиба U-образной конструкции должен быть точно спроектирован. Слишком малый радиус может вызвать концентрацию напряжений и увеличить риск образования трещин от термического удара, в то время как слишком большой радиус может снизить эффективность нагрева. Положительный температурный коэффициент удельного сопротивления MoSi_2 (около $2,0 \times 10^{-5}$ при комнатной температуре) $\text{Om} \cdot \text{cm}$, около $4,5 \times 10^{-5}$ при 1500 °C $\text{Om} \cdot \text{cm}$) позволяет U-образному элементу автоматически регулировать мощность при высоких температурах, что делает его пригодным для приложений с точным контролем температуры. Однако элементы U-образной формы могут образовывать микротрещины из-за накопления напряжений в соединении между горячим и холодным концами во время частых термических циклов, особенно в MoSi_2 , который имеет значительную низкотемпературную хрупкость (вязкость разрушения составляет около 2-3 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Для улучшения термостойкости и срока службы элементов U-образной формы процессы горячего прессования и спекания могут увеличить плотность материала, а поверхностные покрытия (такие как SiC или Al_2O_3) могут повысить стойкость к окислению и сопротивление термической усталости. С точки зрения монтажа U-образные элементы обычно подвешиваются вертикально, а холодный конец фиксируется керамическим зажимом для снижения механического напряжения. Во время монтажа необходимо обеспечить хороший контакт холодного конца с источником питания, чтобы избежать локального перегрева. В практических применениях U-образные элементы должны избегать быстрого прохождения через «чумной» температурный диапазон 400-700 °C, чтобы предотвратить образование не защитных оксидов (смесь MoO_3 и SiO_2), вызывающих пыление поверхности. Техническое обслуживание U-образных элементов включает регулярный осмотр целостности изгибов и точек соединения, а также контроль состояния защитной пленки SiO_2 для обеспечения ее долговременной стабильности в окислительной атмосфере.

3.1.2 Нагревательный элемент MoSi_2 типа W

типа W широко используются в больших высокотемпературных печах или сценариях, требующих однородных температурных полей, таких как стекловаренные печи, промышленные печи для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

спекания керамики и оборудование для термической обработки металлов, из-за их сложной геометрии и большей площади нагрева. Структура элемента типа W состоит из нескольких параллельных горячих концов, соединенных непрерывными изгибами в форме W, обычно содержащих три или более горячих концов, а холодные концы расположены с обеих сторон или сверху и подключены к источнику питания. Его главное преимущество заключается в том, что он может охватывать большую площадь печи и обеспечивать более равномерное распределение температуры, что подходит для больших печей или многозонных нужд нагрева. Длина горячего конца элемента типа W обычно составляет 200-1000 мм, диаметр - 6-12 мм, а диаметр холодного конца - 12-24 мм. Конкретный размер настраивается в соответствии с потребляемой мощностью и конструкцией печи. Плотность тепловой мощности обычно составляет 15-20 Вт/см² (при 1700 °C), что позволяет удовлетворить требования высокой выходной мощности при сохранении равномерности температуры.

Термодинамические характеристики элемента W-типа выигрывают от его конструкции с несколькими горячими концами. Расстояние между несколькими горячими концами (обычно 30-60 мм) может оптимизировать распределение теплового излучения и уменьшить локальный перегрев и концентрацию термических напряжений. Радиус изгиба конструкции W-типа должен точно контролироваться. Слишком малый радиус может привести к концентрации напряжений и увеличить риск растрескивания от термического удара, в то время как слишком большой радиус может снизить эффективность нагрева. Положительный температурный коэффициент (PTC) сопротивления MoSi₂ позволяет элементу W-типа адаптивно регулировать мощность при высоких температурах, чтобы обеспечить точный контроль температуры и стабильность. Однако элемент W-типа может образовывать микротрещины из-за накопления напряжений на нескольких изгибах и в точках соединения горячего конца и холодного конца во время частых термических циклов, особенно когда низкотемпературная хрупкость MoSi₂ значительна (вязкость разрушения составляет около 2-3 МПа·м^{1/2}). Процесс горячего прессования спекания может увеличить плотность материала (близко к более чем 98% от теоретической плотности), уменьшить микродефекты и повысить сопротивление термической усталости. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al₂O₃) могут дополнительно улучшить стойкость к окислению и стойкость к тепловому удару, продлевая срок службы компонентов в высокотемпературных окислительных атмосферах (до 1800-1850°C).

С точки зрения установки компоненты W-типа обычно подвешиваются вертикально или поддерживаются горизонтально, при этом холодный конец фиксируется зажимом или опорой из высокочистой керамики для снижения механического напряжения и обеспечения теплового расширения. Во время установки необходимо обеспечить хороший контакт холодного конца с источником питания, чтобы избежать локального перегрева, вызванного контактным сопротивлением. Сложная форма компонента W-типа требует более высокой точности установки, например, обеспечения симметричного расположения каждого горячего конца для поддержания равномерного распределения тока. В практических приложениях необходимо избегать быстрого прохождения через температурный диапазон «чумы» 400-700 °C, чтобы предотвратить образование не защищающих оксидов (смесь MoO₃ и SiO₂), которые вызывают поверхностное

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

порошкование. Техническое обслуживание компонентов W-типа требует регулярной проверки целостности изгибов, точек соединения и поверхностной защитной пленки SiO_2 для обеспечения ее долговременной стабильности в окислительной атмосфере. Техническое обслуживание компонентов W-типа также включает в себя контроль температуры холодного конца (обычно поддерживаемой ниже 400°C) для предотвращения перегрева, приводящего к ухудшению состояния точек соединения.

Для оптимизации производительности элементов W-типа требования к распределению температуры конкретного типа печи могут быть выполнены путем увеличения количества горячих концов или регулировки расстояния между горячими концами во время проектирования. Например, в большой стекловаренной печи элемент W-типа с несколькими горячими концами может использоваться для достижения равномерного нагрева на большой площади. Полировка или покрытие поверхности может уменьшить дефекты поверхности и улучшить стойкость к тепловому удару и стойкость к окислению. В практических применениях установка элементов W-типа должна учитывать динамику теплового потока печи, а элементы должны быть расположены разумно, чтобы избежать концентрации тепла или недостаточного тепла. Регулярная очистка внутренней части печи для предотвращения загрязнения поверхности элемента примесями также является важной мерой для продления срока службы элемента W-типа. Сложная структура элемента W-типа дает ему значительное преимущество при использовании в больших промышленных печах, но также предъявляет более высокие требования к точности изготовления и технологии установки.

3.1.3 нагревательный элемент MoSi_2

Спиральный нагревательный элемент MoSi_2 представляет собой специальную конструкцию, подходящую для применений, требующих высокой плотности тепла и компактной площади нагрева, таких как небольшие лабораторные трубчатые печи, оборудование для термического анализа или специальные промышленные печи. Структура спирального элемента состоит из стержня MoSi_2 , намотанного в спиральный горячий конец, а холодный конец расположен на обоих концах спирали для подключения источника питания. Его главное преимущество заключается в том, что он может обеспечивать высокую тепловую мощность в ограниченном пространстве. Форма спирали увеличивает площадь поверхности горячего конца и повышает эффективность теплового излучения, что подходит для применений, требующих быстрого нагрева и точного контроля температуры. Диаметр горячего конца спирального элемента обычно составляет 4-9 мм, а количество витков спирали и шаг (обычно 5-20 мм) проектируются в соответствии с размером печи и требованиями к мощности. Диаметр холодного конца составляет 8-18 мм для обеспечения низкого сопротивления и эффективной передачи тока. Плотность тепловой мощности может достигать $20\text{--}25 \text{ Вт/см}^2$ (при 1700°C), что выше, чем у U-типа и W-типа, и подходит для высокотемпературных локальных сценариев отопления.

Термодинамические характеристики спиральных элементов обусловлены их большой площадью поверхности и компактной конструкцией. Спиральная структура может обеспечить равномерное

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тепловое излучение и снизить температурные градиенты, что подходит для нужд цилиндрического нагрева в трубчатых печах. Однако сложная геометрия спиральной формы увеличивает сложность производства. Кривизна и шаг спирали должны точно контролироваться. Слишком плотная спираль может вызвать концентрацию термических напряжений и увеличить риск образования трещин, особенно на низкотемпературной стадии хрупкости MoSi_2 (вязкость разрушения составляет около $2\text{--}3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$). Положительный температурный коэффициент удельного сопротивления MoSi_2 позволяет спиральным элементам адаптивно регулировать мощность при высоких температурах, чтобы обеспечить точность регулирования температуры. Для повышения стойкости к тепловому удару и срока службы процесс спекания горячим прессованием может увеличить плотность материала (близко к более чем 98% от теоретической плотности) и уменьшить микродефекты. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al_2O_3 с коэффициентами теплового расширения приблизительно $4,5\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ и $8\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ соответственно) могут повысить стойкость к окислению и термическую усталость, продлевая срок службы компонентов в высокотемпературных окислительных атмосферах (до 1800°C).

С точки зрения монтажа спиральные элементы обычно закрепляются горизонтально или вертикально, а холодный конец фиксируется высокочистой керамической опорой. Необходимо обеспечить, чтобы спиральная часть не была механически ограничена для обеспечения теплового расширения. Особое внимание следует уделять однородности спиральной структуры во время монтажа, чтобы избежать деформации или трещин, вызванных напряжением при монтаже. В практических приложениях необходимо быстро пройти через «чумной» температурный диапазон $400\text{--}700^\circ\text{C}$, чтобы предотвратить образование не защитных оксидов (смесь MoO_3 и SiO_2) и вызвать пыление поверхности. Техническое обслуживание спиральных элементов требует регулярного осмотра шага спирали, точек соединения холодного конца и целостности защитной пленки поверхности SiO_2 для обеспечения ее стабильности в окислительной атмосфере. Из-за высокой стоимости изготовления спиральных элементов и строгих требований к точности монтажа их применение в основном сосредоточено в высокоточном лабораторном оборудовании или специальных промышленных печах.

3.1.4 Нагревательный элемент MoSi_2 прямого стержневого типа

MoSi_2 прямого стержневого типа представляет собой простую линейную структуру, подходящую для типов печей, требующих линейного нагрева на большом расстоянии, таких как туннельные печи, печи непрерывной термообработки или некоторые крупные промышленные печи. Структура элемента прямого стержневого типа состоит из одного прямого горячего конца, а холодный конец расположен на обоих концах или на одном конце для подключения к источнику питания. Его основными преимуществами являются простая структура, низкая стоимость производства, простота крупномасштабного производства и установки, а также пригодность для покрытия зон нагрева на большом расстоянии. Длина горячего конца элемента прямого стержневого типа обычно составляет $300\text{--}2000 \text{ мм}$, диаметр - $6\text{--}12 \text{ мм}$, а диаметр холодного конца - $12\text{--}24 \text{ мм}$. Конкретный размер настраивается в соответствии с длиной печи и требованиями к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мощности. Плотность мощности нагрева обычно составляет 15-18 Вт/см² (при 1700 °C), что подходит для равномерного нагрева со средней и низкой плотностью мощности.

Термодинамические характеристики прямых стержневых элементов ограничены их линейной конструкцией. Распределение температуры по длине горячего конца может быть не таким равномерным, как у U-типа или W-типа. Особенно при нагреве на большом расстоянии может возникнуть явление высокой температуры в середине и низкой температуры на обоих концах. Для улучшения равномерности температуры распределение сопротивления можно оптимизировать путем регулировки диаметра горячего конца или сегментированного легирования. Положительный температурный коэффициент удельного сопротивления MoSi₂ (около $2,0 \times 10^{-5}$ при комнатной температуре) $\Omega \cdot \text{см}$, около $4,5 \times 10^{-5}$ при 1500 °C $\Omega \cdot \text{см}$) позволяет компонентам прямого стержневого типа адаптивно регулировать мощность при высоких температурах, но их линейная структура может приводить к образованию микротрещин из-за концентрации напряжений на обоих концах горячего конца во время частых тепловых циклов, особенно когда низкотемпературная хрупкость MoSi₂ значительна (вязкость разрушения составляет около 2-3 МПа·м^{1/2}). Процесс горячего прессования спекания может увеличить плотность материала, уменьшить микродефекты и повысить стойкость к тепловому удару и стойкость к термической усталости. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al₂O₃) могут дополнительно улучшить стойкость к окислению и стабильность поверхности, продлевая срок службы компонентов в высокотемпературных окислительных атмосферах (до 1800 °C).

С точки зрения установки, прямые стержневые элементы обычно поддерживаются горизонтально или подвешиваются вертикально, а холодный конец фиксируется зажимом из высокочистой керамики. Необходимо обеспечить равномерное распределение точек опоры, чтобы избежать провисания или поломки элемента. Во время установки следует уделять особое внимание качеству контакта между холодным концом и источником питания, чтобы избежать локального перегрева, вызванного контактным сопротивлением. В практических приложениях необходимо быстро пройти через температурный диапазон «чумы» 400-700 °C, чтобы предотвратить образование не защищающих оксидов и вызвать поверхностное порошкование. Для поддержания прямых стержневых элементов необходимо регулярно проверять целостность поверхности горячего конца, точки соединения холодного конца и защитной пленки SiO₂, а также контролировать температуру холодного конца (обычно поддерживаемую ниже 400 °C), чтобы предотвратить перегрев и деградацию. Благодаря простой конструкции прямых стержневых элементов затраты на их изготовление и обслуживание невысоки, однако требования к равномерности температуры высоки, а компоновку необходимо оптимизировать в сочетании с конструкцией печи.

3.1.5 Сравнение U-образных, W-образных и прямых структурных конструкций

U-образные, W-образные и прямые стержневые нагревательные элементы MoSi₂ являются наиболее распространенными конструкциями среди нагревательных элементов MoSi₂, каждый из которых имеет свои собственные характеристики, подходит для различных типов печей и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сценариев применения. U-образные элементы известны своей компактной конструкцией и централизованной нагревательной способностью. Длина горячего конца обычно составляет 100–500 мм, диаметр — 6–9 мм, а плотность мощности может достигать 20 Вт/см² (при 1700 °C). Они подходят для печей малого и среднего размера (таких как лабораторные муфельные печи и печи для спекания керамики), которым требуется локальная высокая плотность тепла. Его преимуществами являются простая конструкция, простота установки и высокая тепловая эффективность, но горячий конец покрывает небольшую площадь, а однородность температуры ограничивается расстоянием между горячим концом (обычно 20–50 мм). Микротрещины склонны возникать на соединении между горячим концом и холодным концом во время частых тепловых циклов. W-образные элементы обеспечивают большую площадь нагрева с конструкцией с несколькими горячими концами. Длина горячего конца составляет 200-1000 мм, диаметр - 6-12 мм, а плотность мощности - 15-20 Вт/см². Они подходят для больших печей (таких как стекловаренные печи и промышленные печи для спекания керамики), которым требуется равномерное температурное поле. Его преимущества - более равномерное распределение температуры и высокая устойчивость к термическому напряжению, но он сложен в изготовлении, дорог, а множественные изгибы увеличивают риск образования трещин от теплового удара. Элементы прямого стержневого типа известны своей линейной структурой с длиной горячего конца 300-2000 мм, диаметром 6-12 мм и плотностью мощности 15-18 Вт/см², что подходит для туннельных печей или печей непрерывной термообработки с линейным нагревом на большие расстояния. Его преимущества - низкая стоимость производства и простая установка, но плохая равномерность температуры, и трещины легко образуются на обоих концах горячего конца из-за концентрации напряжений.

С точки зрения термодинамических свойств теплопроводность (около 45 Вт/(м·К) при комнатной температуре и около 15 Вт/(м·К) при 1500°C) и коэффициент теплового расширения (около $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) трех структур схожи, но геометрическая форма влияет на распределение термического напряжения. Изгибающаяся конструкция U-типа и W-типа может рассеивать термическое напряжение, а стойкость к тепловому удару лучше, чем у типа прямого стержня, но тип прямого стержня имеет более высокую механическую стабильность из-за отсутствия точек концентрации изгибающего напряжения при дальнем нагреве.

С точки зрения стойкости к окислению все три структуры полагаются на поверхностную защитную пленку SiO₂ (коэффициент диффузии кислорода составляет около $10^{-13} \text{ см}^2 / \text{с}$ при 1500 °C), но W-тип имеет большую площадь поверхности, а образование и поддержание пленки SiO₂ более равномерное, а стойкость к окислению немного лучше. Прямой стержневой тип может вызвать локальную деградацию пленки SiO₂ из-за неравномерной температуры при дальнем нагреве. С точки зрения характеристик термоциклирования U-тип и W-тип склонны к микротрещинам при частых термоциклах из-за своей сложной геометрии, в то время как прямой стержневой тип более устойчив к термической усталости из-за своей простой структуры, но распределение температуры необходимо оптимизировать.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

С точки зрения установки и обслуживания, U-образные элементы подходят для вертикального подвешивания, и установка проста, но следует уделять внимание контакту холодного конца; W-образные элементы необходимо устанавливать точно и симметрично, и обслуживание сложное, но они подходят для больших печей; прямые стержни гибкие для установки, но их необходимо равномерно поддерживать, чтобы предотвратить провисание. Производственный процесс оказывает схожее воздействие на три структуры. Горячее прессование и спекание могут улучшить плотность (близко к 98%), а поверхностные покрытия (такие как SiC или Al₂O₃) могут повысить стойкость к окислению и стойкость к тепловому удару. При выборе U-типа подходит для небольших высокоточных печей, W-типа подходит для больших печей с равномерным нагревом, а тип прямого стержня подходит для линейного нагрева на большие расстояния. Его необходимо всесторонне рассмотреть в соответствии с конструкцией печи, требованиями к мощности и частотой термического цикла.

3.2 Габаритная конструкция нагревательных элементов MoSi₂

из дилицида молибдена (MoSi₂) являются ключом к оптимизации их производительности, что напрямую влияет на эффективность нагрева, распределение температуры, стойкость к тепловому удару и срок службы. Размер нагревательных элементов MoSi₂ обычно определяется диаметром и длиной горячего конца и холодного конца, а также соотношением горячего конца к холодному концу. Обычные спецификации включают Ф6/12 (диаметр горячего конца 6 мм, диаметр холодного конца 12 мм) и Ф9/18 (диаметр горячего конца 9 мм, диаметр холодного конца 18 мм). Эти конструкции размеров должны быть определены комплексно на основе размера печи, требований к мощности, частоты термического цикла и метода установки, чтобы обеспечить эффективный нагрев и долговременную стабильность в высокотемпературной окислительной атмосфере. Спецификация Ф6/12 подходит для печей малого и среднего размера (таких как лабораторные муфельные печи и печи для спекания керамики). Диаметр его горячего конца небольшой, а плотность мощности высокая, что подходит для применений, требующих быстрого нагрева и централизованного нагрева. Спецификация Ф9/18 подходит для больших печей (например, стекловаренных печей, промышленных печей для термообработки). Она имеет больший диаметр горячего конца и немного меньшую плотность мощности (обычно 15-20 Вт/см²), но может обеспечить более равномерное распределение температуры и более высокую механическую прочность, а также подходит для нагрева большой площади или высокой нагрузки.

Основная цель проектирования размера — сбалансировать электротермические и механические свойства горячего конца и холодного конца. Диаметр горячего конца определяет сопротивление и мощность нагрева. Меньшие горячие концы (например, 6 мм) имеют более высокое сопротивление и подходят для приложений с высокой плотностью мощности, но имеют более низкую стойкость к тепловому удару и механическую прочность. Большие горячие концы (например, 9 мм) имеют более низкое сопротивление и умеренную плотность мощности, но лучшую стойкость к тепловому удару и срок службы. Диаметр холодного конца обычно в 1,5–2 раза больше, чем у горячего конца (например, 6/12 или 9/18), а удельное сопротивление уменьшается за счет легирования высокопроводящими материалами (например, алюминием или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамом) (около $0,5 \times 10^{-5}$ Ом·см при комнатной температуре), чтобы гарантировать, что температура холодного конца остается ниже 400 °C для предотвращения перегрева и деградации. Длина горячего конца (обычно 100–1000 мм) должна быть настроена в соответствии с глубиной печи и зоной нагрева. Слишком короткий может вызвать концентрацию тепла, а слишком длинный может вызвать неравномерную температуру. Длина холодного конца (обычно 50–300 мм) должна быть достаточно большой, чтобы пройти через стенку печи, обеспечить стабильное соединение с источником питания и избежать теплопередачи от горячего конца к холодному.

При проектировании размера также необходимо учитывать термодинамические свойства MoSi₂. Его теплопроводность (около 45 Вт/(м·К) при комнатной температуре и около 15 Вт/(м·К) при 1500 °C) и коэффициент теплового расширения (около $8,1 \times 10^{-6}$ К⁻¹, от комнатной температуры до 1000 °C) влияют на распределение термического напряжения. Горячие концы меньшего диаметра (например, 6 мм) склонны к концентрации термического напряжения во время быстрых термических циклов, что приводит к микротрещинам, особенно на низкотемпературной стадии хрупкости MoSi₂ (вязкость разрушения составляет около 2–3 МПа·м^{1/2}). Горячие концы большего диаметра (например, 9 мм) могут лучше рассеивать термическое напряжение и повышать стойкость к тепловому удару. Процесс подготовки имеет решающее значение для точности размеров. Горячее прессование и спекание могут обеспечить плотность компонентов (близкую к 98%) и размерную однородность, а также уменьшить микродефекты. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al₂O₃) могут повысить стойкость к окислению и термическую усталость, а также повысить надежность размерного проектирования. В практических приложениях выбор размера должен быть оптимизирован в сочетании с типом печи и условиями эксплуатации. Например, Ф6/12 подходит для высокоточных лабораторных печей, а Ф9/18 подходит для крупных промышленных печей. Необходимо избегать быстрого прохождения через температурный диапазон «чумы» 400–700 °C, чтобы предотвратить поверхностное порошкование.

3.3 Оптимальная конструкция теплового поля и структуры холодного конца

Оптимизация конструкции теплового поля и структуры холодного конца нагревательных элементов MoSi₂ является ключом к достижению эффективного нагрева, равномерного распределения температуры и длительного срока службы. Конструкция теплового поля направлена на обеспечение того, чтобы распределение температуры в печи соответствовало требованиям процесса (таким как точность керамического спекания $\pm 5^\circ\text{C}$), что достигается путем оптимизации компоновки горячего конца, формы и плотности мощности. Теплопроводность MoSi₂ (около 15 Вт/(м·К) при 1500°C) и положительный температурный коэффициент удельного сопротивления (около $4,5 \times 10^{-5}$ при 1500°C) очень высоки. Ом·см требует, чтобы конструкция теплового поля точно соответствовала количеству и расстоянию между горячими концами. Например, расстояние между горячими концами U-образных элементов (20–50 мм) подходит для централизованного нагрева небольших печей, а расстояние между несколькими горячими концами W-образных элементов (30–60 мм) подходит для равномерного нагрева больших печей. Оптимизация теплового поля также должна учитывать тепловое излучение и конвекцию. Площадь поверхности и расположение горячих концов (например, симметричная компоновка)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

напрямую влияют на распределение тепла. Увеличение количества горячих концов или использование спиральных элементов может улучшить равномерность теплового поля, но это увеличит сложность производства. Проектирование плотности мощности должно быть умеренным ($15\text{--}25\text{ Вт/см}^2$ при $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$). Слишком высокая плотность мощности может вызвать локальный перегрев и снизить стабильность защитной пленки SiO_2 .

Оптимизация структуры холодного конца направлена на снижение температуры холодного конца (обычно $\leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) и улучшение стабильности электрического соединения и срока службы компонентов. Холодный конец легируется высокопроводящими материалами (например, алюминием) для снижения удельного сопротивления (около $0,5 \times 10^{-5}\text{ }\Omega \cdot \text{см}$), для уменьшения тепловыделения, а его диаметр ($12\text{--}24\text{ мм}$) в $1,5\text{--}2$ раза больше, чем у горячего конца, для улучшения рассеивания тепла. Длина холодного конца ($50\text{--}300\text{ мм}$) должна быть достаточно большой, чтобы пройти через стенку печи, войти в зону низкой температуры и подключиться к источнику питания, но слишком большая длина может увеличить материальные затраты.

Соединение между холодным концом и горячим концом является точкой концентрации напряжений, и для плавного перехода с целью снижения термического напряжения и микротрещин требуется постепенное легирование или технология сварки (например, плазменная сварка). Поверхность холодного конца часто покрывается проводящим покрытием (например, алюминизированным слоем) для улучшения проводимости контакта и предотвращения окисления. Оптимизация конструкции холодного конца также требует рассмотрения среды рассеивания тепла, например, снижения температуры холодного конца с помощью керамической изоляционной втулки или воздушной конвекции для предотвращения перегрева и ухудшения точки соединения.

Скоординированная оптимизация структуры горячего поля и холодного конца должна сочетаться с конструкцией печи и условиями эксплуатации. Моделирование теплового поля (например, конечно-элементный анализ) может предсказать распределение температуры и направить компоновку горячего конца и распределение мощности. Конструкция рассеивания тепла холодного конца должна соответствовать материалам герметизации стенок печи и изоляции (например, волокну из оксида алюминия) для обеспечения стабильности температуры холодного конца. Низкотемпературная хрупкость MoSi_2 (стойкость к разрушению около $2\text{--}3\text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) требует оптимизированной конструкции, чтобы избежать быстрого термического цикла через «чумной» диапазон $400\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ для предотвращения образования не защищающих оксидов.

Поверхностные покрытия (например, SiC с коэффициентом теплового расширения около $4,5 \times 10^{-6}\text{ К}^{-1}$) могут повысить стойкость горячего конца к окислению и коррозионную стойкость холодного конца. В практическом применении регулярная проверка равномерности теплового поля и состояния соединения холодного конца, а также регулировка скорости нагрева и охлаждения ($5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C/мин}$) могут обеспечить долговременную стабильность структуры горячего поля и холодного конца, а также удовлетворить высокие требования таких применений, как термообработка полупроводников и плавка стекла.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4 Проектирование электрических соединений и опорных систем

Электрическое соединение и конструкция опорной системы нагревательных элементов MoSi₂ имеют решающее значение для их эксплуатационной стабильности, эффективности нагрева и срока службы. Электрическая система соединения должна обеспечивать низкоомный контакт между холодным концом и источником питания для предотвращения локального перегрева и потери мощности. В то же время опорная система должна обеспечивать механическую поддержку, допускать тепловое расширение и снижать тепловые напряжения и риски образования трещин. Удельное сопротивление холодного конца MoSi₂ (около $0,5 \times 10^{-5}$ Ом·см при комнатной температуре) намного ниже, чем у горячего конца ($2,0 \times 10^{-5}$ Ом·см), а проводимость оптимизируется путем алюминирования или легирования высокопроводящими материалами (например, вольфрамом). Электрические соединения обычно используют высокопроводящий зажим (например, медный или алюминиевый сплав) для фиксации холодного конца. Поверхность зажима должна быть покрыта никелем или серебром для предотвращения окисления и обеспечения того, чтобы контактное сопротивление было менее 0,01 Ом. К точке соединения необходимо приложить соответствующее усилие зажима (обычно 5-10 Н/см²). Слишком сильное затягивание может привести к хрупкому разрушению MoSi₂ (вязкость разрушения составляет около 2-3 МПа·м^{1/2}), а слишком слабое может вызвать искрение или перегрев.

Конструкция электрического соединения также должна учитывать тип источника питания и систему управления. Компоненты MoSi₂ подходят для источников питания с пропорциональным управлением или с фазовым запуском и должны быть оснащены функцией ограничения тока (максимальная плотность тока ≤ 10 А/мм²), чтобы избежать непропорционального переключения или «внезапного» повреждения компонентов источником питания. Регуляторы напряжения и трансформаторы могут стабилизировать вход (обычно 20–100 В) и соответствовать положительному изменению температурного коэффициента удельного сопротивления MoSi₂ (около $4,5 \times 10^{-5}$ при 1500 °C). Ом·см). Соединение холодного конца должно быть оснащено устройством отвода тепла (например, рубашкой воздушного или водяного охлаждения), чтобы поддерживать температуру холодного конца ≤ 400 °C и не допускать ухудшения точки соединения. Выбранный кабель должен быть устойчивым к высоким температурам (например, кабель из сплава на основе никеля) и соответствовать размеру холодного конца, чтобы избежать чрезмерного сопротивления контакта. Для повышения надежности соединения можно использовать проводящую пасту или прокладку из алюминиевой фольги для повышения проводимости контакта.

Конструкция опорной системы должна обеспечивать механическую стабильность и свободу теплового расширения элементов MoSi₂. Обычными материалами опор являются высокочистый оксид алюминия или оксид циркония (ZrO₂), которые соответствуют коэффициенту теплового расширения MoSi₂ ($8,1 \times 10^{-6}$ К⁻¹) для снижения теплового напряжения. Формы опор включают зажимы, подвесные крюки и опорные балки. Вертикальная подвеска подходит для элементов U-образной и W-образной формы, а горизонтальная опора подходит для прямых стержневых элементов. Опора должна быть спроектирована как гибкая структура, чтобы позволить MoSi₂

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

расширяться при высоких температурах (около 0,8% линейного расширения при 1500 °C) для предотвращения концентрации напряжений. Поверхность опоры должна быть гладкой, чтобы предотвратить износ защитной пленки SiO₂ на поверхности MoSi₂. Систему поддержки также необходимо скоординировать с изоляционным материалом печи (например, волокном из оксида алюминия), чтобы гарантировать, что горячий конец будет находиться в зоне нагрева, а холодный конец — в зоне низкой температуры.

Согласованная конструкция системы электрического соединения и кронштейна должна учитывать рабочую среду и частоту тепловых циклов. Быстрое прохождение через «чумной» диапазон 400-700 °C может предотвратить образование не защитных оксидов и защитить точки соединения и поверхности кронштейна. Регулярная проверка состояния контакта зажима, износа кронштейна и температуры холодного конца, очистка оксидов точек соединения и регулировка силы зажима могут продлить срок службы системы. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al₂O₃) могут повысить коррозионную стойкость холодного конца и долговечность кронштейна. В реальных приложениях система электрического соединения и кронштейна должна быть настроена в соответствии с типом печи (например, трубчатая печь, ящичная печь) и применением (например, спекание керамики, термическая обработка металла), чтобы обеспечить стабильную работу нагревательного элемента MoSi₂ в высокотемпературной окислительной атмосфере.

3.5 Конструкция клеммы и способ подключения

Структура клеммы и способ подключения нагревательного элемента из дисилицида молибдена (MoSi₂) оказывают ключевое влияние на его электрические характеристики, механическую стабильность и срок службы. Клемма обычно относится к части холодного конца, которая отвечает за подключение к системе питания. Она должна обеспечивать контакт с низким сопротивлением, высокую проводимость и стойкость к высокотемпературной коррозии, выдерживая при этом тепловое расширение и механическое напряжение. Удельное сопротивление холодного конца MoSi₂ (около $0,5 \times 10^{-5}$ при комнатной температуре) Ом·см) значительно ниже, чем у горячего конца (около $2,0 \times 10^{-5}$ при комнатной температуре) за счет легирования высокопроводящими материалами. Ом·см), а его диаметр обычно в 1,5-2 раза больше, чем у горячего конца (например, спецификации Ф6/12 или Ф9/18), чтобы уменьшить выделение тепла и поддерживать температуру холодного конца ниже 400 °C. Конструкция концевой структуры должна оптимизировать зону перехода между холодным концом и горячим концом, чтобы снизить концентрацию напряжений и предотвратить возникновение микротрещин, особенно на низкотемпературной стадии хрупкости MoSi₂ (вязкость разрушения составляет около 2-3 МПа·м^{1/2}). Обычные концевые структуры включают прямые, изогнутые и конические типы переходов. Прямые холодные концы подходят для U-образных и прямых стержневых элементов. Изогнутые холодные концы (например, изгибы на 90°) подходят для W-образных или ограниченных по пространству печей. Конический тип перехода сглаживает соединение между горячим концом и холодным концом за счет постепенного изменения диаметра для снижения термического напряжения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Методы соединения в основном включают зажимное соединение, сварное соединение и болтовое соединение. Зажимное соединение является наиболее распространенным методом. Для фиксации холодного конца используется зажим с высокой проводимостью (например, медный или алюминиевый сплав, никелевый или серебряный, покрытый на поверхности). Контактное сопротивление должно контролироваться ниже 0,01 Ом. Усилие зажима должно быть умеренным (5-10 Н/см²). Слишком сильное может вызвать хрупкое разрушение MoSi₂, а слишком слабое может вызвать искрение или локальный перегрев. Для повышения проводимости контакта на поверхность холодного конца можно нанести алюминизированное покрытие или проводящую пасту. Сварное соединение соединяет холодный конец с проводящим соединением (например, сплав на основе никеля) с помощью плазменной сварки или контактной сварки. Оно подходит для высокоточных применений, но во время процесса сварки необходимо контролировать температуру, чтобы избежать ухудшения состояния горячего конца. Болтовое соединение подходит для больших промышленных печей. Холодный конец фиксируется болтами и прокладками, устойчивыми к высоким температурам. Его легко установить, но сопротивление контакта немного выше. Его необходимо регулярно проверять на предмет ослабления. Метод подключения должен соответствовать системе электропитания. Для компонентов MoSi₂ рекомендуется использовать пропорциональные блоки питания или блоки питания с фазовым запуском с функцией ограничения тока (максимальная плотность тока ≤ 10 А/мм²), чтобы избежать повреждения компонентов непропорциональными переключателями.

Оптимизация структуры клеммы и метода соединения должна учитывать термоциклирование и факторы окружающей среды. Частые термоциклы могут вызвать накопление термического напряжения в соединении холодного конца, вызывая микротрещины или повышенное контактное сопротивление, особенно в диапазоне температур «чумы» 400-700 °C, где не защитные оксиды (смеси MoO₃ и SiO₂) могут разъедать точки соединения. Для повышения долговечности холодный конец можно покрыть защитным слоем SiC или Al₂O₃ (коэффициент теплового расширения составляет приблизительно $4,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ и $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ соответственно) для повышения стойкости к окислению и коррозии. Конструкция рассеивания тепла (например, воздушное охлаждение или керамические изоляционные рукава) может поддерживать холодный конец на низком уровне и продлевать срок службы точки соединения. В практических приложениях регулярная проверка целостности зажима или паяного соединения, очистка окисла и регулировка силы зажима могут обеспечить долгосрочную стабильность клеммного соединения. Конструкция концевой конструкции и способ соединения также должны быть согласованы с изоляционным материалом печи (например, волокном из оксида алюминия) и системой кронштейнов, чтобы гарантировать, что холодный конец находится в зоне низких температур и соответствует требованиям надежности высокотемпературных применений, таких как спекание керамики и плавка стекла.

3.6 Ключевые моменты проектирования кастомизации продукта

Индивидуальная конструкция нагревательных элементов MoSi₂ является ключом к соблюдению конкретных типов печей и технологических требований, включая комплексную оптимизацию структуры, размера, модификации материала и условий эксплуатации. Индивидуальная

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

конструкция требует определения формы, плотности мощности, температурного диапазона и способа установки элемента в соответствии со сценарием применения (например, лабораторная трубчатая печь, промышленная печь для спекания керамики, стекловаренная печь или печь для термической обработки полупроводников) для достижения эффективного нагрева, равномерного температурного поля и длительного срока службы. Термодинамические свойства MoSi_2 и его положительный температурный коэффициент удельного сопротивления обеспечивают гибкость для индивидуальной конструкции, но его низкотемпературная хрупкость требует, чтобы при проектировании полностью учитывались тепловое напряжение и механическая стабильность. Ниже приведены несколько ключевых моментов для индивидуальной конструкции.

Во-первых, настройка структуры и размера должна соответствовать геометрии печи и требованиям к нагреву. U-образные элементы (диаметр горячего конца 6-9 мм, длина 100-500 мм) подходят для централизованного нагрева небольших печей, W-образные элементы (длина горячего конца 200-1000 мм) подходят для равномерного нагрева больших печей, спиральные типы подходят для высоких требований к плотности тепла трубчатых печей, а прямые стержневые типы подходят для линейного нагрева на большие расстояния. Соотношение диаметров горячего конца к холодному концу (например, Ф6/12 или Ф9/18) необходимо оптимизировать в соответствии с плотностью мощности, а длину и расстояние между горячим концом необходимо моделировать с помощью теплового поля (например, конечно-элементного анализа) для обеспечения однородности температуры ($\pm 5^\circ\text{C}$). Длина холодного конца (50-300 мм) должна быть достаточной для прохождения через стенку печи и входа в зону низкой температуры. Для специальных типов печей могут потребоваться нестандартные формы (например, Г-образные или многоизгибные), а радиус изгиба должен точно контролироваться (обычно ≥ 10 мм) для снижения концентрации термических напряжений.

Во-вторых, модификация материала и обработка поверхности являются важными звеньями в индивидуальном дизайне. Чистота MoSi_2 ($\geq 99,5\%$) напрямую влияет на стойкость к окислению и теплопроводность. Высокочистое сырье может уменьшить ослабление границ зерен, вызванное примесями (такими как Fe и Al). Легирование (например, добавление Y_2O_3 или Al_2O_3) может повысить прочность границ зерен и улучшить стойкость к тепловому удару, что подходит для применений с частыми термическими циклами. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al_2O_3) могут продлить срок службы защитных пленок SiO_2 и повысить способность противостоять окислению «чумы». Толщину покрытия (10-50 мкм) необходимо оптимизировать в соответствии с рабочей температурой и атмосферой. Слишком толстый слой может вызвать отслаивание, а слишком тонкий приведет к недостаточной защите. Процесс подготовки (например, горячее прессование и спекание) должен обеспечивать плотность (близкую к 98%), уменьшать микроскопические дефекты и улучшать механические и термодинамические свойства.

В-третьих, настройка условий эксплуатации должна учитывать температуру, атмосферу и частоту термического цикла. Максимальная рабочая температура компонентов MoSi_2 может достигать 1850°C в окислительной атмосфере, но ее необходимо снизить до уровня ниже 1500°C в восстановительной или вакуумной среде, чтобы предотвратить разрушение пленки SiO_2 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Индивидуальная конструкция должна определять тип атмосферы (например, содержание влаги, содержание примесей). Высокая влажность может вызвать гидратацию пленки SiO_2 и снизить теплопроводность. Приложения с высокими частотами термического цикла (например, термообработка полупроводников) должны оптимизировать скорости нагрева и охлаждения ($5-10\text{ }^\circ\text{C/мин}$), чтобы избежать быстрого прохождения через $400-700\text{ }^\circ\text{C}$. Система управления питанием должна соответствовать характеристикам сопротивления MoSi_2 , использовать пропорциональный источник питания и быть оснащена регулятором напряжения ($20-100\text{ В}$) и функцией ограничения тока для предотвращения перегрузки.

Наконец, индивидуальная конструкция для установки и обслуживания должна быть согласована с конструкцией печи. Вертикальная подвеска подходит для элементов U-образной и W-образной формы, горизонтальная опора подходит для прямого стержневого типа, а материал кронштейна (например, оксид алюминия с коэффициентом теплового расширения около $8 \times 10^{-6}\text{ К}^{-1}$) должен соответствовать MoSi_2 для обеспечения теплового расширения (около $0,8\%$, $1500\text{ }^\circ\text{C}$). Электрические соединения должны использовать высокопроводящие зажимы или сварные соединения, чтобы гарантировать, что контактное сопротивление составляет менее $0,01\text{ }\Omega$. Индивидуальная конструкция должна содержать рекомендации по техническому обслуживанию, включая регулярную проверку температуры холодного конца, состояния пленки SiO_2 и целостности точки соединения, а также очистку печи от примесей (например, оксидов щелочных металлов). Благодаря моделированию теплового поля, оптимизации материалов и подбору условий эксплуатации индивидуальные конструкции могут соответствовать эксплуатационным требованиям конкретных применений и продлевать срок службы нагревательных элементов MoSi_2 в условиях высоких температур.



CTIA GROUP LTD Кремний-молибденовый стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

Molybdenum disilicide (MoSi₂) heating elements are high-performance ceramic electric heating materials widely used in industrial furnace applications. In high-temperature oxidizing atmospheres, MoSi₂ forms a dense silica (SiO₂) protective layer on its surface, which effectively prevents further oxidation. It exhibits excellent oxidation resistance and thermal stability, allowing stable operation under high temperatures for extended periods.

2. Features of MoSi₂ Heating Element

Low thermal expansion coefficient: Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.

Excellent oxidation resistance: Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.

Extremely high working temperature: Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.

Good high-temperature electrical resistance characteristics: MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

Model (d1/d2)	Hot End Diameter (d1)	Cold End Diameter (d2)	Hot Zone Length (Le)	Cold Zone Length (Lu)	Common Types
φ3/6	3 mm	6 mm	100–300 mm	150–250 mm	Straight / U-type
φ4/9	4 mm	9 mm	100–500 mm	200–300 mm	Straight / U-type
φ6/12	6 mm	12 mm	100–600 mm	200–350 mm	Straight / U-type / W-type
φ9/18	9 mm	18 mm	150–800 mm	250–400 mm	Straight / U-type / W-type
φ12/24	12 mm	24 mm	200–1000 mm	300–500 mm	Straight / U-type / W-type

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries

Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals

High-temperature laboratory furnaces

Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 4. Процесс изготовления нагревательного элемента MoSi_2

4.1 Принципы выбора и пропорционирования сырья

Нагревательные элементы из дисилицида молибдена (MoSi_2) начинаются с выбора и пропорции сырья, качество которого напрямую влияет на термодинамические свойства, стойкость к окислению и срок службы элементов. MoSi_2 — это интерметаллическое соединение с химической формулой MoSi_2 . Его необходимо синтезировать из высокочистого молибденового (Mo) и кремниевого (Si) сырья, обычно получаемого в виде порошка методом порошковой металлургии. Основной принцип выбора сырья — обеспечить высокую чистоту (обычно $\geq 99,5\%$) и низкое содержание примесей для снижения риска ослабления границ зерен и не защитного окисления. Для порошка молибдена требуется чистота $\geq 99,9\%$, а содержание основных примесей (таких как Fe, Al, C) должно быть менее $0,01\%$, поскольку Fe и Al могут вызывать коррозию границ зерен и снижать стойкость к тепловому удару; примеси углерода могут образовывать карбиды и влиять на удельное сопротивление. Кремниевый порошок также должен быть высокой чистоты ($\geq 99,9\%$), чтобы избежать неметаллических примесей, таких как кислород и азот, которые вызывают дефекты в защитной пленке SiO_2 . Распределение размеров частиц является еще одним ключевым фактором. Размер частиц порошка молибдена и кремниевого порошка обычно контролируется на уровне 1-10 мкм. Слишком большие частицы могут вызвать неравномерное спекание, в то время как слишком маленькие частицы увеличат стоимость подготовки.

Принцип пропорционирования основан на стехиометрическом соотношении MoSi_2 (молярное соотношение $\text{Mo}:\text{Si} = 1:2$), а теоретическое массовое соотношение молибдена и кремния составляет около 2,55:1. Для обеспечения полной реакции фактическая пропорция может немного отклоняться от стехиометрического соотношения, например, содержание кремния увеличивается на 0,5-1%, чтобы компенсировать потери на улетучивание во время высокотемпературного спекания. Модификация легирования является важным средством оптимизации производительности. Обычно используемые легирующие добавки включают оксиды редкоземельных металлов (такие как Y_2O_3 , La_2O_3 , добавляемый в количестве 0,1-1 мас. %) для повышения прочности границ зерен и стойкости к тепловому удару, или оксид алюминия для повышения стабильности пленки SiO_2 . Легирующие добавки должны быть высокой чистоты ($\geq 99,95\%$), чтобы избежать попадания дополнительных примесей. Процесс дозирования необходимо проводить в инертной атмосфере (например, аргоне) или в вакуумной среде, чтобы предотвратить окисление сырья. Равномерность смешивания имеет решающее значение для конечной производительности. Для смешивания обычно используются планетарные шаровые мельницы или смесители V-типа, а время и скорость шарового измельчения контролируются, чтобы избежать разрушения частиц или загрязнения.

Выбор и пропорция сырья также должны учитывать процесс подготовки и требования к применению. Например, спекание горячим прессованием требует более мелких частиц (1-5 мкм) для повышения плотности (близкой к 98%), в то время как самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) может принимать немного более крупные частицы (5-10 мкм)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

для снижения затрат. Для высокоточных применений (таких как термообработка полупроводников) необходимо выбирать сверхчистое сырье ($\geq 99,99\%$), а точность пропорции ($\pm 0,1\%$) должна строго контролироваться. Процесс контроля качества включает анализ химического состава (например, ICP-MS) и определение распределения размеров частиц (например, лазерный анализатор размера частиц), чтобы гарантировать, что сырье соответствует требованиям проекта. Разумный выбор и пропорция сырья закладывают основу для последующего формования и спекания, обеспечивая стабильность и надежность нагревательных элементов MoSi_2 в высокотемпературных окислительных атмосферах.

4.2 Порошковая металлургия и процесс изостатического прессования

Порошковая металлургия является основным процессом для производства нагревательных элементов MoSi_2 . В сочетании с изостатическим прессованием он может производить высокоплотные и высокопроизводительные элементы, подходящие для U-образных, W-образных, прямых стержневых и спиральных структур. Процесс порошковой металлургии включает четыре основных этапа: смешивание сырья, формование, спекание и последующую обработку. Среди них изостатическое прессование является ключевой технологией формования, которая может обеспечить размерную точность и микроструктурную однородность элементов. Теплопроводность (около $15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при 1500°C), коэффициент теплового расширения (около $8,1 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) и стойкость к окислению MoSi_2 зависят от высокой плотности ($\geq 98\%$) и низкого уровня дефектов. Сочетание порошковой металлургии и изостатического прессования может эффективно удовлетворить эти требования.

Смешивание сырья : процесс смешивания равномерно смешивает порошок молибдена высокой чистоты и порошок кремния в стехиометрическом соотношении ($\text{Mo}:\text{Si} = 1:2$) или в соотношении, слегка богатом кремнием (кремний увеличен на $0,5\text{-}1\%$), обычно с использованием планетарной шаровой мельницы или смесителя V-типа в инертной атмосфере (например, аргона) или в вакуумной среде. Средой шаровой мельницы является оксид алюминия высокой чистоты или диоксид циркония, соотношение шаров к материалу контролируется от $2:1$ до $5:1$, а время смешивания составляет $4\text{-}8$ часов, чтобы гарантировать равномерное распределение частиц без внесения загрязнений. Легирующие добавки (например, Y_2O_3 , Al_2O_3 , добавляемый в количестве $0,1\text{-}2 \text{ мас. \%}$), добавляется на этапе смешивания, и размер его частиц необходимо контролировать, чтобы обеспечить равномерное распределение. Смешанный порошок просеивают для удаления агломерированных частиц и сушат для удаления влаги.

Изостатическое прессование : Изостатическое прессование (холодное изостатическое прессование, CIP) является основной технологией формирования нагревательных элементов MoSi_2 . Смешанный порошок прессуется в желаемую форму (например, U-образную, W-образную или прямую стержневую сырую массу) путем приложения равномерного давления в жидкой среде (например, воде или масле). Преимуществами изостатического прессования являются равномерное давление и высокая плотность сырой массы, что может уменьшить неравномерную усадку при последующем спекании. Формовочная форма обычно изготавливается из гибкого

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

резинового или полиуретанового материала, который устойчив к давлению и не вступает в химическую реакцию с порошком MoSi_2 . Параметры процесса включают давление, время выдержки и равномерность заполнения порошком, и необходимо гарантировать, что сырая масса не имеет трещин или расслоений. Сложные формы (например, спирали) могут потребовать сегментированного формования или сочетания с технологией предварительного формования. Для повышения прочности сырой массы можно добавить небольшое количество органического связующего, которое удаляется при последующем предварительном спекании.

Процесс спекания : Спекание является ключевым этапом в порошковой металлургии, который позволяет сырому телу MoSi_2 достигать высокой плотности и формировать стабильную тетрагональную кристаллическую структуру α -типа. Обычные методы спекания включают спекание горячим прессованием (HP) и спекание без давления . Спекание горячим прессованием больше подходит для высокопроизводительных нагревательных элементов MoSi_2 . Спекание горячим прессованием проводится в вакууме или инертной атмосфере (аргон) с контролируемой температурой 1600-1800 °C, давлением 20-40 МПа и временем выдержки 1-3 часа. В процессе спекания молибден реагирует с кремнием, образуя MoSi_2 , в то время как легирующие добавки (такие как Y_2O_3) способствуют межзеренному склеиванию и уменьшают пористость. Температура спекания должна точно контролироваться. Слишком высокая температура может вызвать улетучивание Si и снизить качество пленки SiO_2 ; слишком низкая температура может привести к недостаточной плотности, что повлияет на теплопроводность и термостойкость. Спекание без давления подходит для чувствительных к стоимости применений с температурой 1700-1900 °C, но плотность низкая, что может увеличить риск микротрещин.

Постобработка : Спеченные компоненты MoSi_2 требуют постобработки, включая полировку поверхности, размерную обрезку и нанесение защитных покрытий. Полировка поверхности (с использованием алмазного круга) удаляет поверхностные дефекты и снижает риск концентрации термических напряжений. Размерная обрезка гарантирует, что компоненты соответствуют проектным спецификациям. Защитные покрытия наносятся методом плазменного напыления или химического осаждения из паровой фазы (CVD) для повышения стойкости к окислению и стойкости к «чумному» окислению. Ссылки на контроль качества включают тестирование плотности (метод Архимеда), анализ микроструктуры (SEM) и измерение удельного сопротивления, чтобы гарантировать, что характеристики компонента соответствуют требованиям применения керамического спекания, плавки стекла и т. д.

Оптимизация процессов порошковой металлургии и изостатического прессования требует всестороннего рассмотрения стоимости и производительности. Горячее прессование в сочетании с изостатическим прессованием может производить компоненты высокой плотности, подходящие для высокоточных применений (например, термообработка полупроводников); спекание без давления является недорогим и подходит для крупномасштабных промышленных печей. Управление процессом должно избегать «чумного» температурного диапазона 400-700 °C, чтобы предотвратить образование не защищающих оксидов. Регулярно проверяйте чистоту сырья,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

качество сырого тела и параметры спекания, чтобы гарантировать стабильность и надежность нагревательных элементов MoSi_2 в высокотемпературных окислительных атмосферах.

4.3 Технология высокотемпературного спекания и последующей обработки

Высокотемпературное спекание является основным процессом в производстве нагревательных элементов из дисилицида молибдена (MoSi_2). Он направлен на преобразование сформированного сырого тела в компонент с высокой плотностью ($\geq 98\%$ теоретической плотности), превосходными механическими свойствами и стабильной тетрагональной кристаллической структурой α -типа, гарантируя, что его теплопроводность, стойкость к окислению и стойкость к тепловому удару соответствуют требованиям высокотемпературных применений. Процесс спекания обычно проводится в вакууме или инертной атмосфере (например, аргона) для предотвращения окисления. Обычные методы включают горячее прессование спекания (HP), спекание без давления и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (SHS). Горячее прессование спекания является основным процессом для высокопроизводительных компонентов MoSi_2 . Температура контролируется на уровне $1600\text{--}1800^\circ\text{C}$, давление составляет $20\text{--}40$ МПа, а время выдержки составляет 1-3 часа. Высокая температура позволяет молибдену полностью реагировать с кремнием с образованием MoSi_2 , в то время как легирующая примесь способствует межзеренному сцеплению и уменьшает пористость. Температура спекания должна точно контролироваться. Если она слишком высокая, Si может улетучиться и ослабить качество поверхностной защитной пленки SiO_2 ; если она слишком низкая, плотность будет недостаточной ($<95\%$), что снизит теплопроводность и стойкость к тепловому удару.

Технология постобработки имеет решающее значение для оптимизации производительности компонентов MoSi_2 , включая полировку поверхности, размерную обрезку и тестирование производительности. Полировка поверхности использует алмазные шлифовальные круги или абразивы из оксида алюминия для удаления поверхностных дефектов (таких как микропоры и спекающиеся узелки), образующихся во время спекания, снижения концентрации термических напряжений и повышения стойкости к тепловому удару. Размерная обрезка гарантирует, что компоненты соответствуют проектным спецификациям с помощью прецизионной обработки (такой как резка с ЧПУ) для соответствия требованиям точности структур, таких как U-образные, W-образные или спиральные формы. Тестирование производительности включает тестирование плотности (метод Архимеда, цель $\geq 98\%$), анализ микроструктуры и измерение удельного сопротивления для обеспечения постоянства электрических и тепловых характеристик компонентов. Предварительная окислительная обработка может создать плотную защитную пленку SiO_2 на поверхности для повышения стойкости к окислению и способности противостоять окислению «чумы». Постобработку также необходимо проводить в инертной атмосфере, избегая температурного диапазона $400\text{--}700^\circ\text{C}$, чтобы предотвратить образование не защитных оксидов (смесь MoO_3 и SiO_2). Высококачественная постобработка может значительно улучшить стабильность и срок службы компонентов MoSi_2 в высокотемпературных окислительных атмосферах, отвечая требованиям высокоточных приложений, таких как термическая обработка полупроводников.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.4 Технология нанесения защитного слоя на поверхность

Технология нанесения защитного слоя на поверхность является важной частью производства нагревательных элементов MoSi₂. При нанесении защитного покрытия повышается стойкость к окислению, стойкость к тепловому удару и коррозионная стойкость, а также увеличивается срок службы элемента в высокотемпературной окислительной атмосфере. MoSi₂ естественным образом образует защитную пленку SiO₂ при температуре выше 800 °C, но при экстремальных температурах или частых термических циклах пленка SiO₂ может истончаться из-за улетучивания Si или MoO₃, особенно в диапазоне температур «чумы» 400-700 °C, который склонен к порошкообразованию. Поверхностный защитный слой компенсирует недостатки пленки SiO₂ путем нанесения оксидного покрытия (например, Al₂O₃, ZrO₂), карбидное покрытие (например, SiC) или композитное покрытие (например, Al₂O₃ - SiC). Покрытие Al₂O₃ (температура плавления около 2050 °C) наносится методом плазменного напыления или химического осаждения из паровой фазы (CVD) толщиной 10-50 мкм. Оно имеет высокую стойкость к окислению и низкий коэффициент диффузии кислорода и подходит для печей для спекания керамики. Покрытие SiC наносится методом реакционного спекания или CVD толщиной 20-100 мкм. Оно имеет повышенную стойкость к тепловому удару и износостойкость и подходит для печей для плавления стекла. Композитные покрытия сочетают в себе преимущества нескольких материалов, таких как Al₂O₃ - SiC покрытия, обладающие как высокой стойкостью к окислению, так и стойкостью к термическим ударам, и подходящие для сложных условий эксплуатации.

Процесс нанесения покрытия оказывает значительное влияние на производительность. Плазменное напыление может образовывать толстые и плотные покрытия, которые подходят для промышленного производства, но могут иметь микропоры, которые немного снижают теплопроводность. Процесс CVD производит однородные, тонкие покрытия (10-30 мкм) с высокой адгезией и низким термическим напряжением, которые подходят для высокоточных применений, но стоимость относительно высока. Толщину покрытия необходимо точно контролировать. Слишком толстый слой может вызвать отслаивание из-за несоответствия теплового расширения, а слишком тонкий может обеспечить недостаточную защиту. Конструкция интерфейса (например, добавление переходного слоя SiC) может улучшить связь между покрытием и подложкой MoSi₂ и снизить термическое напряжение. Покрытие также должно выдерживать высокую влажность или коррозионную атмосферу (например, серосодержащие газы). Покрытия Al₂O₃ могут гидратироваться в средах с высокой влажностью, и параметры процесса должны быть оптимизированы. Контроль качества включает измерение толщины покрытия (ультразвуковым методом или с помощью СЭМ), испытание на адгезию (методом царапания) и испытание на стойкость к окислению для обеспечения эксплуатационных характеристик покрытия. Оптимизация технологии поверхностного защитного слоя должна сочетаться со средой применения. Печи для термообработки полупроводников требуют высокочистых CVD-покрытий, чтобы избежать загрязнения, а стеклоплавильные печи предпочитают толстые покрытия SiC для повышения стойкости к тепловому удару. Регулярная проверка целостности покрытия и быстрое прохождение через температурный диапазон 400-700 °C могут предотвратить «чумное» окисление и деградацию покрытия. В будущем ожидается, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

наноструктурированные покрытия и многослойные композитные покрытия еще больше улучшат поверхностные характеристики компонентов MoSi_2 для соответствия более строгим требованиям высокотемпературного применения.

4.5 Технология сварки и обработки концов

Технология сварки и обработки концов является заключительным этапом производства нагревательного элемента MoSi_2 , который направлен на обеспечение стабильности и электротермических характеристик соединения холодного конца с источником питания, при этом оптимизируя структуру конца для выдерживания механических и термических нагрузок. Холодный конец MoSi_2 легируется высокопроводящими материалами (такими как алюминий или вольфрам) для снижения удельного сопротивления. Диаметр в 1,5-2 раза больше диаметра горячего конца и должен быть небольшим, чтобы предотвратить деградацию из-за перегрева. Технология сварки используется для соединения холодного конца с проводящим соединением (таким как сплав на основе никеля или медный сплав), обеспечивая низкое контактное сопротивление ($<0,01$ Ом) и высокую механическую прочность. Распространенные методы сварки включают плазменную сварку и контактную сварку. Плазменная сварка выполняется в инертной атмосфере (например, аргона), а температура контролируется на уровне 1200-1400 °C. Он может образовывать равномерный и высокопрочный сварной шов, который подходит для высокоточных применений (например, термообработки полупроводников). Контактная сварка использует высокий ток для быстрого нагрева холодного конца и соединения. Она недорога, но однородность сварки немного хуже, что подходит для промышленных печей. В процессе сварки следует избегать чрезмерных температур, чтобы предотвратить деградацию кристаллической структуры MoSi_2 на горячем конце или повреждение пленки SiO_2 .

Технология обработки концов включает обработку поверхности холодного конца, размерную обрезку и нанесение проводящего покрытия. Поверхность холодного конца механически полируется для удаления оксидных слоев и дефектов для улучшения качества контакта с зажимом или сваркой. Размерная обрезка использует обработку с ЧПУ или алмазную резку для обеспечения того, чтобы диаметр и длина холодного конца соответствовали проектному допуску и подходили для U-образных, W-образных или прямых стержневых компонентов. Проводящие покрытия (например, алюминизированные слои толщиной 5-20 мкм) наносятся методом гальванопокрытия или термического напыления для повышения проводимости холодного конца, снижения контактного сопротивления и предотвращения окислительной коррозии. Обработка концов также должна оптимизировать переходную зону между горячим концом и холодным концом, используя технологию конического перехода или градиентного легирования для сглаживания распределения термических напряжений и снижения риска образования микротрещин (вязкость разрушения MoSi_2 составляет около $2-3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Процесс обработки необходимо проводить в инертной атмосфере, чтобы избежать «чумного» диапазона температур 400-700°C и предотвратить образование не обладающих защитными свойствами оксидов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оптимизация сварки и обработки концов должна учитывать условия эксплуатации и методы установки. Частые тепловые циклы могут вызывать концентрацию напряжений в сварном шве или конце, поэтому необходимо регулярно проверять целостность сварного шва и температуру холодного конца. Защитные покрытия (например, SiC или Al_2O_3 , толщиной 10-50 мкм) могут быть нанесены на холодный конец для повышения коррозионной стойкости и стойкости к тепловому удару. Контроль качества включает испытание прочности сварного шва (испытание на растяжение или сдвиг), измерение контактного сопротивления и анализ микроструктуры (SEM) для обеспечения производительности конца. В практических приложениях сварка и обработка концов должны быть согласованы с системами электрических соединений (например, медными зажимами) и конструкцией кронштейна (подложка из оксида алюминия) для обеспечения долгосрочной стабильности нагревательных элементов $MoSi_2$ в высокотемпературных окислительных атмосферах для соответствия требованиям применения спекания керамики, плавления стекла и т. д.



CTIA GROUP LTD Молибденовый силикатный стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 5. Тест производительности нагревательного элемента MoSi₂

5.1 Тест зависимости сопротивления от температуры

Удельное сопротивление является ключевым электротермическим параметром производительности нагревательных элементов из дисилицида молибдена (MoSi₂), который напрямую влияет на их эффективность нагрева, выходную мощность и точность регулирования температуры. MoSi₂ имеет характеристику сопротивления с положительным температурным коэффициентом (PTC), и удельное сопротивление увеличивается с ростом температуры, что позволяет ему адаптивно регулировать мощность при высоких температурах и подходит для высокотемпературных применений, таких как спекание керамики и плавка стекла (до 1800-1850 °C). Испытание связи между удельным сопротивлением и температурой предназначено для количественной оценки характеристик сопротивления MoSi₂ при различных температурах, проверки его электротермической стабильности и предоставления данных для проектирования компонентов и оптимизации рабочих параметров. Испытание обычно проводится в лабораторной или промышленной печи с использованием высокоточного тестера сопротивления (например, четырехзондового метода) и печи с контролируемой температурой для обеспечения надежности данных.

Метод испытания включает в себя помещение нагревательного элемента MoSi₂ (например, U-типа, W-типа, общие спецификации Ф6/12 или Ф9/18) в печь с контролируемой окислительной атмосферой, постепенное повышение температуры и измерение удельного сопротивления в диапазоне от комнатной температуры (25 °C) до 1800 °C. Испытательное оборудование включает в себя высокоточный источник питания постоянного тока (режим постоянного тока или постоянного напряжения, плотность тока ≤ 10 А/мм²), цифровой мультиметр (точность $\pm 0,1\%$) и термопару (типа K или S, точность ± 1 °C). Во время испытания необходимо быстро пройти через «чумной» температурный диапазон 400-700 °C, чтобы избежать образования не защитных оксидов (смесь MoO₃ и SiO₂), которые влияют на удельное сопротивление. Удельное сопротивление (ρ) рассчитывается по формуле $\rho = R \cdot A/L$, где R — измеренное сопротивление, A — площадь поперечного сечения горячего конца, а L — длина горячего конца. Испытательная среда поддерживает окислительную атмосферу, а влажность составляет менее 30%, чтобы гарантировать стабильность защитной пленки SiO₂ на поверхности.

MoSi₂ составляет около $2,0 \times 10^{-5}$ при комнатной температуре. Ом·см, которое значительно увеличивается с ростом температуры и составляет приблизительно $4,0 \times 10^{-5}$ при 1000 °C Ом·см, около $4,5 \times 10^{-5}$ при 1500 °C Ом·см, до $4,8 \times 10^{-5}$ при 1800 °C Ом·см. Эта положительная характеристика температурного коэффициента позволяет элементу MoSi₂ иметь стабильную выходную мощность при высоких температурах, но это также означает, что холодный конец (легированный алюминием или вольфрамом, с удельным сопротивлением около $0,5 \times 10^{-5}$ Ом·см) должен поддерживаться низким, чтобы избежать перегрева. Результаты испытаний показывают, что изменение удельного сопротивления с температурой зависит от чистоты и микроструктуры материала. Кривая удельного сопротивления высокочистого MoSi₂ более стабильна, а флуктуация

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

удельного сопротивления компонентов высокой плотности невелика. Легирование может дополнительно стабилизировать удельное сопротивление и уменьшить рассеяние по границам зерен. Испытание также должно регистрировать влияние термоциклирования на удельное сопротивление. После нескольких термоциклов удельное сопротивление может немного увеличиться, и необходимо оценить долгосрочную стабильность.

Меры предосторожности при испытаниях включают калибровку точности оборудования, обеспечение стабильных соединений холодного конца (контактное сопротивление $< 0,01$ Ом) и избегание восстановительной или высоковлажной атмосферы (влажность $> 70\%$ может вызвать гидратацию пленки SiO_2). Данные испытаний анализируются путем подгонки кривых сопротивления-температуры (например, квадратичных полиномов) для оптимизации конструкции компонентов и систем управления питанием. В практических приложениях результаты испытаний сопротивления определяют рабочие параметры компонентов MoSi_2 для обеспечения электротермических характеристик и точности регулирования температуры в высокотемпературных окислительных атмосферах.

5.2 Испытание на взаимосвязь между сроком службы при высоких температурах и стойкостью к тепловому удару

Срок службы при высоких температурах и характеристики теплового удара являются ключевыми показателями производительности нагревательных элементов MoSi_2 , которые определяют их надежность и долговечность в высокотемпературных окислительных атмосферах (до $1800\text{--}1850$ °C). Срок службы при высоких температурах относится ко времени, в течение которого элемент может непрерывно работать при целевой температуре без существенного ухудшения производительности (например, дрейфа сопротивления, распространения микротрещин или разрушения пленки SiO_2), а характеристики теплового удара относятся к способности элемента противостоять растрескиванию при быстрых изменениях температуры (например, термоциклировании или быстром охлаждении и нагреве). Низкотемпературная хрупкость и «чумное» окисление MoSi_2 делают его уязвимым к повреждениям при термических циклах. Тестирование связи между сроком службы при высоких температурах и характеристиками теплового удара предназначено для оценки долговечности элемента в реальных рабочих условиях (например, спекание керамики, термическая обработка металла) и обеспечивает основу для оптимизации материалов и конструкций. Методы испытаний включают долгосрочные испытания при высоких температурах и испытания на цикл теплового удара. Испытание на длительную высокотемпературную работу проводится в печи с окислительной атмосферой. Элемент MoSi_2 (например, U-типа или W-типа, $\Phi 6/12$ или $\Phi 9/18$) помещается при целевой температуре, плотность мощности контролируется на уровне $15\text{--}20$ Вт/см², и он непрерывно работает в течение $1000\text{--}5000$ часов, и регистрируются изменение удельного сопротивления, состояние поверхностной пленки SiO_2 и эволюция микроструктуры. Испытательное оборудование включает в себя высокотемпературную печь (точность ± 5 °C), тестер сопротивления (метод четырех зондов, точность $\pm 0,1\%$) и микроскоп (SEM, анализ трещин и слоев пленки). Испытание на цикл термического удара имитирует быстрый нагрев и охлаждение. Типичные условия: циклы 25-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1500°C, скорость нагрева и охлаждения 10-20°C/мин, циклы 100-1000 раз и быстрый проход через 400-700°C, чтобы избежать окисления "чумы". После испытаний оценивали количество трещин (оптический микроскоп, увеличение 50-200×), толщину пленки SiO₂ и изменения механической прочности (испытание на трехточечный изгиб, прочность на разрыв около 200-300 МПа).

Результаты испытаний показывают, что срок службы компонентов MoSi₂ может достигать более 5000 часов при 1500 °C и около 1000-2000 часов при 1800 °C. Срок службы зависит от стабильности пленки SiO₂. При высоких температурах улетучивание Si и улетучивание MoO₃ может привести к тому, что слой пленки станет тоньше (<5 мкм), уменьшится стойкость к окислению и увеличится удельное сопротивление на 10-20%, что может привести к ухудшению характеристик. Высококачественные компоненты MoSi₂ (≥99,5%) и горячепрессованные спеченные компоненты (плотность ≥98%) имеют более длительный срок службы, поскольку примеси (такие как Fe, Al) и поры уменьшают ослабление границ зерен и возникновение трещин. Модификация легирования (например, Y₂O₃, 0,1-1 вес. %) может повысить прочность границ зерен и продлить срок службы на 10-20%. С точки зрения термостойкости микротрещины после термоциклирования в основном появляются в соединении горячий конец-холодный конец. Компоненты типа W имеют лучшую термостойкость, чем компоненты типа U, благодаря своей конструкции с несколькими горячими концами, а компоненты с прямыми стержнями имеют лучшую трещиностойкость благодаря своей линейной структуре. Покрытие поверхности может значительно улучшить термостойкость, уменьшить распространение трещин (плотность трещин уменьшается на 30-50%) и отслаивание пленки SiO₂. Меры предосторожности при испытаниях включают поддержание окислительной атмосферы, избегание высокой влажности (влажность > 70%) и восстановительной среды (вызывающей разрушение пленки SiO₂), а также регулярную калибровку термпар и тестеров сопротивления. Данные испытаний направляют оптимизацию материалов (например, легирование) и структурное проектирование (например, оптимизацию радиуса изгиба) компонентов MoSi₂ с помощью моделей прогнозирования срока службы (например, модель Аррениуса) и статистического анализа трещин. В практических приложениях результаты испытаний используются для формулирования планов технического обслуживания (например, регулярных проверок трещин и слоев пленки) и рабочих параметров для обеспечения долгосрочной надежности и термостойкости нагревательных элементов MoSi₂ в высокотемпературных печах.

5.3 Испытание стабильности в окислительной среде

Испытание стабильности в окислительной среде является ключом к оценке долговременной работы нагревательных элементов из дисилицида молибдена (MoSi₂) в высокотемпературной окислительной атмосфере (до 1800-1850 °C), уделяя особое внимание образованию и сохранению защитной пленки SiO₂ на его поверхности, его антиоксидантным свойствам и стабильности его микроструктуры. MoSi₂ достигает превосходной стойкости к окислению в окислительной атмосфере за счет образования плотной защитной пленки SiO₂ на его поверхности, но улетучивание Si или MoO₃ при высоких температурах может привести к истончению слоя пленки, особенно в диапазоне температур «чумы» 400-700 °C, где склонно происходить незащитное

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

окисление, приводящее к образованию смеси MoO_3 и SiO_2 , что приводит к измельчению материала. Испытание на стабильность предназначено для количественной оценки срока службы, изменения удельного сопротивления и состояния поверхности элементов MoSi_2 в окислительной среде, а также для получения надежных данных для высокотемпературных применений, таких как спекание керамики и плавка стекла.

Методы испытаний включают испытание на долгосрочное окислительное воздействие и испытание на циклическое окисление. Испытание на долгосрочное окислительное воздействие помещает элемент MoSi_2 (например, U-типа, W-типа, Ф6/12 или Ф9/18) в высокотемпературную окислительную атмосферу печи, температура контролируется на уровне 1500-1800 °C, плотность мощности составляет 15-20 Вт/см², и он работает непрерывно в течение 1000-5000 часов. Испытательное оборудование включает высокотемпературную печь, тестер сопротивления (метод четырех зондов, точность $\pm 0,1\%$), сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) и рентгеновский дифрактометр (XRD) для анализа толщины пленки SiO_2 (цель 10-20 мкм), морфологии поверхности и фазового состава. Испытание на циклическое окисление имитирует термический цикл в реальных рабочих условиях с условиями 25-1500°C или 25-1800°C, скоростью нагрева и охлаждения 5-10°C/мин, количеством циклов 100-1000 раз и быстрым прохождением через 400-700°C, чтобы избежать «чумного» окисления. После испытания оценивались изменения удельного сопротивления, целостность пленки SiO_2 , количество трещин и потеря массы.

Результаты испытаний показывают, что компоненты MoSi_2 обладают высокой стабильностью в окислительной атмосфере при 1500 °C, со сроком службы более 5000 часов, пленка SiO_2 остается плотной (толщина 10-15 мкм), а увеличение удельного сопротивления составляет менее 10%. Высокочистые компоненты MoSi_2 и горячепрессованные спеченные компоненты (плотность $\geq 98\%$) обладают лучшей стабильностью, меньшим количеством дефектов пленки и скоростью потери массы менее 0,5 мг/см²/1000 ч. Модификация легирования (например, Y_2O_3 , 0,1-1 мас. %) может улучшить адгезию пленки SiO_2 и уменьшить отслаивание. Испытания на циклическое окисление показывают, что трещины от термического удара в основном возникают в соединении горячего конца-холодного конца, а компонент W-типа немного лучше, чем U-типа из-за его конструкции с несколькими горячими концами. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al_2O_3 , толщина 10-50 мкм) могут значительно улучшить стабильность и снизить потерю массы на 30-50%. При проведении испытания следует избегать высокой влажности (влажность > 70%) или содержащей серу атмосферы, чтобы предотвратить гидратацию или коррозию пленки SiO_2 .

5.4 Испытание нагревательного элемента на твердость

Испытание на твердость является важным средством оценки механических свойств нагревательных элементов MoSi_2 , которое напрямую отражает их устойчивость к износу, механическим нагрузкам и росту трещин при термическом ударе. Как интерметаллическое соединение, MoSi_2 имеет высокую твердость, но его низкотемпературная хрупкость позволяет легко получать микротрещины во время механического удара или термического цикла. Испытание на твердость предназначено для количественной оценки твердости поверхности и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроструктурной прочности компонентов MoSi_2 , обеспечивая основу для оптимизации производственных процессов (таких как горячее прессование, спекание) и модификации легирования, а также для удовлетворения требований механической стабильности таких применений, как спекание керамики и термическая обработка металлов.

Метод испытания использует испытание на твердость по Виккерсу. Твердомер по Виккерсу используется для нанесения отпечатка на поверхность элемента MoSi_2 (горячий конец и холодный конец), и измеряется диагональная длина отпечатка (точность $\pm 0,1$ мкм) для расчета значения твердости. Испытание проводится при комнатной температуре, а поверхность образца должна быть чистой, чтобы избежать влияния оксидного слоя или примесей. Испытание на твердость при высокой температуре использует твердомер высокой температуры для имитации реальных рабочих условий. Оно должно проводиться в инертной атмосфере (например, аргоне) для предотвращения окисления. Для оценки однородности твердости контрольные точки охватывают горячий конец, холодный конец и зону перехода горячий конец-холодный конец, по крайней мере, с 5 точками в каждой области, и берется среднее значение (отклонение $< 5\%$). Вспомогательные испытания включают микроструктурный анализ и оценку распространения трещин.

Результаты испытаний показывают, что твердость по Виккерсу при комнатной температуре компонентов MoSi_2 составляет 8-10 ГПа, которая падает примерно до 4-6 ГПа при 1500°C из-за скольжения границ зерен и эффектов размягчения при высоких температурах. Высокочистые компоненты MoSi_2 и горячепрессованные спеченные компоненты (плотность $\geq 98\%$) имеют более высокую твердость (близкую к 10 ГПа) из-за низкой пористости ($< 2\%$) и меньшего количества дефектов границ зерен. Легирующая модификация (например, Y_2O_3 или Al_2O_3 , 0,1-2 мас. %) может увеличить твердость на 5-10%, поскольку оксиды редкоземельных металлов усиливают силу связи границ зерен. Твердость холодного конца немного ниже, чем горячего конца (около 7-9 ГПа), поскольку легирование алюминием или вольфрамом снижает прочность кристалла. Твердость может упасть на 5-15% после термоциклирования из-за накопления микротрещин. Поверхностные покрытия могут значительно улучшить износостойкость поверхности, но отслоение покрытия может обнажить подложку. Испытание требует контролируемой глубины вдавливания ($< 10\%$ толщины образца) для избежания матричных эффектов, а результаты используются для оценки механической прочности компонентов во время установки, эксплуатации и обслуживания.

5.5 Испытание на взаимосвязь между стойкостью к окислению и температурой

Испытание на стойкость к окислению и зависимость от температуры является основой испытания производительности нагревательного элемента MoSi_2 , целью которого является оценка его окислительного поведения при различных температурах, образования и стабильности защитной пленки SiO_2 , а также потери массы материала и изменения удельного сопротивления для предоставления надежных данных для высокотемпературных применений (таких как плавка стекла и термообработка полупроводников). Стойкость к окислению MoSi_2 зависит от поверхностной защитной пленки SiO_2 , которая образует плотный слой пленки выше 800°C , но

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

склонна к образованию не защищающих оксидов в диапазоне температур «чумы» 400-700 °C, что приводит к порошкообразованию; при температуре около 1850 °C улетучивание Si может привести к истончению слоя пленки. Испытание предназначено для количественной оценки изменения стойкости к окислению в зависимости от температуры и оптимизации рабочей температуры и стратегии обслуживания.

Методы испытаний включают испытание на окисление при постоянной температуре и испытание на окисление при переменной температуре. Испытание на окисление при постоянной температуре помещает элемент MoSi₂ (например, U-типа, W-типа, Ф6/12 или Ф9/18) в печь с окислительной атмосферой с диапазоном температур 400-1800 °C, временем работы 100-1000 часов и плотностью мощности 15-20 Вт/см². Испытательное оборудование включает высокотемпературную печь (точность ±5 °C), прецизионные весы (точность ±0,1 мг), СЭМ и XRD для измерения скорости потери массы (мг/см²/ч), толщины пленки SiO₂ и фазового состава. Испытание на окисление при переменной температуре имитирует термоциклирование с условиями 25-1500°C или 25-1800°C, скоростью нагрева и охлаждения 5-10°C/мин, 50-500 циклов и быстрым прохождением через 400-700°C. После испытания оценивались изменение удельного сопротивления (метод четырех зондов, точность ±0,1%), целостность пленки (СЭМ) и плотность трещин (оптический микроскоп, увеличение 50-200×).

Результаты испытаний показывают, что MoSi₂ имеет наилучшую стойкость к окислению при 800-1500 °C, толщина пленки SiO₂ стабильна, скорость потери массы составляет менее 0,2 мг/см²/1000 ч, а увеличение удельного сопротивления составляет менее 10%. При 400-700 °C не защитное окисление приводит к тому, что скорость потери массы достигает 1-2 мг/см²/100 ч, а удельное сопротивление увеличивается на 20-30%, и необходимо быстро пройти через этот диапазон. При 1800 °C улетучивание Si усиливается, пленка SiO₂ становится тоньше, скорость потери массы увеличивается до 0,5-1 мг/см²/1000 ч, а срок службы сокращается до 1000-2000 часов. Высокоочищенный MoSi₂ и горячепрессованные спеченные компоненты (плотность ≥98%) обладают более высокой стойкостью к окислению и меньшим количеством дефектов пленки. Модификация легирования улучшает адгезию пленки и снижает скорость потери массы на 20-30%. Покрытие поверхности значительно повышает стойкость к окислению, особенно при 1800 °C, где скорость потери массы снижается на 40-60%. При проведении испытания следует избегать высокой влажности или восстановительной атмосферы, чтобы обеспечить надежность данных. Результаты используются для руководства оптимизацией рабочей температуры (рекомендуется 1500-1700 °C) и плана обслуживания (например, регулярный осмотр мембранного слоя) с помощью анализа кинетики окисления (например, параболической модели).

5.6 Связь между шероховатостью поверхности стержня и удельным сопротивлением

Шероховатость поверхности является важным фактором, влияющим на электротермические характеристики нагревательных элементов из дисилицида молибдена (MoSi₂), и напрямую связана с однородностью его удельного сопротивления и распределения тока. Шероховатость поверхности компонентов MoSi₂ в основном определяется производственным процессом (таким

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

как горячее прессование и изостатическое прессование) и последующей обработкой (такой как полировка и пескоструйная обработка). Поверхности с высокой шероховатостью могут привести к локальной концентрации тока, неравномерному тепловому напряжению и неравномерному образованию защитной пленки SiO_2 , тем самым влияя на стабильность удельного сопротивления. Тестирование взаимосвязи между шероховатостью поверхности и удельным сопротивлением направлено на количественную оценку влияния морфологии поверхности на электротермические характеристики, обеспечивает основу для оптимизации производственных процессов и проектирования компонентов и особенно подходит для сценариев высокоточного контроля температуры, таких как спекание керамики и плавка стекла.

Метод испытания использует измеритель шероховатости поверхности (например, профилометр или атомно-силовой микроскоп с точностью $\pm 0,01$ мкм) для измерения параметров шероховатости поверхности (таких как R_a , R_z) стержня MoSi_2 . Зона испытания охватывает горячий конец и холодный конец, а поверхность образца должна быть чистой, чтобы избежать помех от примесей. Испытание сопротивления использует метод четырех зондов (точность $\pm 0,1\%$), измерения проводятся в диапазоне от комнатной температуры до 1800°C в сочетании с образцами различной шероховатости. Испытательная среда представляет собой окислительную атмосферу, а диапазон температур «чумы» $400-700^\circ\text{C}$ быстро проходит, чтобы избежать образования не защищающих оксидов. Удельное сопротивление (ρ) рассчитывается по формуле $\rho = R \cdot A / L$, где R - измеренное сопротивление, A - площадь поперечного сечения, а L - длина испытания. В ходе испытания необходимо зарегистрировать влияние шероховатости поверхности на образование пленки SiO_2 (наблюдение с помощью СЭМ, увеличение $50-200\times$) и равномерность распределения тока (инфракрасный термометр, точность $\pm 1^\circ\text{C}$).

сопротивление стержней MoSi_2 с меньшей шероховатостью поверхности более стабильно и имеет меньший диапазон колебаний, поскольку гладкая поверхность снижает локальную концентрацию тока и накопление термического напряжения. Поверхности с высокой шероховатостью могут привести к локальному увеличению сопротивления, поскольку дефекты поверхности увеличивают рассеяние по границам зерен и неравномерные пути тока.

Полированный элемент MoSi_2 имеет более однородную пленку SiO_2 (толщина $10-15$ мкм) при высоких температурах, с меньшим изменением сопротивления, что подходит для высокоточных применений. Пескоструйно обработанные или шероховатые поверхности склонны к микротрещинам во время термических циклов, что увеличивает колебания сопротивления и влияет на долгосрочную стабильность. Испытание требует калибровки точности оборудования, контроля соединений холодного конца и атмосферных условий, а также избегания высокой влажности (влажность $> 70\%$), вызывающей гидратацию пленки SiO_2 . Данные анализируются путем подгонки кривой шероховатости-сопротивления и используются для оптимизации процесса обработки поверхности (например, химической полировки или плазменного напыления) с целью улучшения электротермических характеристик и точности контроля температуры элементов MoSi_2 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.7 Влияние равномерности покрытия стержня на срок службы

Покрывание поверхности нагревательных элементов MoSi_2 (например, SiC , Al_2O_3 , толщиной 10-50 мкм) является ключом к улучшению термостойкости и коррозионной стойкости. Равномерность покрытия напрямую влияет на стабильность защитной пленки SiO_2 , скорость окисления и срок службы элемента. Неравномерное покрытие может привести к недостаточной локальной стойкости к окислению, концентрации термических напряжений или отслаиванию, а также сократить время работы элемента в высокотемпературной окислительной среде (например, спекание керамики, производство полупроводников). Тестирование влияния равномерности покрытия на срок службы направлено на оценку влияния качества покрытия на долговечность компонента и предоставление данных для оптимизации процессов нанесения покрытий (например, химическое осаждение из паровой фазы и плазменное напыление).

Методы испытаний включают определение однородности покрытия и испытание на долговечность при высоких температурах. Однородность покрытия анализируется с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, точность $\pm 0,1$ мкм) и рентгеновского спектрометра (ЭДС), измеряя распределение толщины покрытия и однородность состава (соотношение Si/C в SiC или соотношение Al/O в Al_2O_3). Образцы включают стержни MoSi_2 с различными процессами покрытия (такими как покрытие CVD, напыление), а испытательная зона охватывает зону перехода горячего конца и холодного конца. Испытание на долговечность при высоких температурах проводится в печи с окислительной атмосферой с температурным диапазоном 1500-1800 °C, плотностью мощности 15-20 Вт/см², временем работы 1000-5000 часов и быстрым прохождением 400-700 °C, чтобы избежать окисления «гниения». Тест регистрирует скорость потери массы (прецизионные весы, точность $\pm 0,1$ мг), состояние пленки SiO_2 (наблюдение с помощью СЭМ) и изменение удельного сопротивления (четырёхзондовый метод, точность $\pm 0,1\%$). Вспомогательные тесты включают адгезию покрытия и стойкость к тепловому удару.

MoSi_2 с высокой однородностью покрытия (отклонение толщины $< 5\%$) значительно расширяются, поскольку однородное покрытие способствует стабильному образованию пленки SiO_2 и снижает локальное окисление и отслаивание. Покрытия CVD показывают более длительный срок службы при 1800 °C из-за их высокой плотности и адгезии, что делает их пригодными для приложений с высоким спросом. Если напыляемое покрытие имеет неравномерную толщину (отклонение $> 10\%$), оно может отслаиваться в зоне перехода горячий конец-холодный конец, в результате чего пленка SiO_2 становится тоньше, ускоряя окислительную деградацию и сокращая ее срок службы. Однородные покрытия также уменьшают плотность микротрещин в термических циклах и повышают стойкость к тепловому удару. Испытание требует контроля атмосферы и скоростей нагрева и охлаждения, чтобы избежать высокой влажности или восстановительной среды (которые приводят к разрушению пленки SiO_2). Полученные данные определяют стратегии оптимизации процесса нанесения покрытия и технического обслуживания (например, регулярную проверку целостности покрытия) посредством анализа зависимости толщины

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

покрытия от срока службы для обеспечения долгосрочной надежности компонентов MoSi_2 в высокотемпературных окислительных средах.

5.8 Связь между сроком службы и напряжением сцепления

MoSi_2 влияет сочетание термического напряжения, механического напряжения и воздействия окружающей среды, особенно в высокотемпературных окислительных атмосферах и частых термических циклах. Тепловое напряжение возникает из-за градиента температуры, вызванного быстрым нагревом и охлаждением, механическое напряжение возникает из-за вибрации при установке или эксплуатации, а воздействие окружающей среды связано с окислительной или коррозионной атмосферой. Сцепление напряжений может вызвать распространение микротрещин, отслаивание пленки SiO_2 или дрейф сопротивления, тем самым сокращая срок службы элемента. Тестирование связи между сроком службы и сцеплением напряжений направлено на количественную оценку влияния напряжения на долговечность элементов MoSi_2 , обеспечивает основу для оптимизации конструкции (например, формы, кронштейна) и рабочих параметров (например, скорости нагрева и охлаждения), и подходит для высокотемпературных применений, таких как спекание керамики и обработка стекла.

Методы испытаний включают моделирование напряжений и испытание на долговечность. Моделирование напряжений использует анализ конечных элементов (FEA) для оценки распределения термических напряжений в зоне перехода «горячее-холодное» (на основе коэффициента теплового расширения и теплопроводности MoSi_2) в сочетании с механическими испытаниями на прочность (испытание на трехточечный изгиб, точность $\pm 0,1$ МПа). Испытание на долговечность проводится в печи с окислительной атмосферой при температуре 1500-1800 °C, плотности мощности 15-20 Вт/см², времени работы 1000-5000 часов и условиях термического цикла 25-1500 °C. Испытательные образцы включают U-образные и W-образные элементы MoSi_2 (Ф6/12 или Ф9/18), а также наносятся некоторые поверхностные покрытия (например, SiC). Тест регистрирует скорость потери массы (прецизионные весы, точность $\pm 0,1$ мг), плотность трещин (SEM, увеличение 50-200×), состояние пленки SiO_2 и изменение удельного сопротивления (метод четырех зондов). Экологическое напряжение моделируется путем введения следов коррозионных газов (таких как SO_2) для оценки воздействия на жизнь.

Результаты испытаний показывают, что термическое напряжение является основным фактором, влияющим на срок службы компонентов MoSi_2 . Быстрое повышение и понижение температуры приводит к концентрации напряжений в переходной зоне между горячим концом и холодным концом, увеличивает плотность микротрещин и сокращает срок службы. Компонент W-типа имеет более равномерное распределение напряжений благодаря конструкции с несколькими горячими концами, и его срок службы лучше, чем у U-типа. Механическое напряжение (такое как вибрация или неправильная установка) усугубляет распространение трещин, снижает вязкость разрушения и сокращает срок службы. Покрытие поверхности значительно смягчает эффект связи напряжений, а равномерное покрытие уменьшает отколы, вызванные термическим напряжением, и продлевает срок службы. Легирование (такое как Y_2O_3) улучшает прочность границ зерен и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

снижает чувствительность к напряжению. Экологическое напряжение (такое как коррозионная атмосфера) ускоряет деградацию пленки SiO_2 , и атмосферу необходимо строго контролировать. Для испытания требуются калиброванные термодатчики (точность $\pm 1^\circ\text{C}$) и зажимы. Данные позволяют оптимизировать конструкцию (например, увеличить радиус изгиба) и эксплуатационные параметры с помощью моделей зависимости срока службы от напряжения (например, анализа Вейбулла) для обеспечения долгосрочной надежности компонентов MoSi_2 в условиях высоких температур и сложных напряжений.

5.9 Механизмы растрескивания, изгиба и отрыва концов

При длительной эксплуатации при высоких температурах нагревательные элементы из дисилицида молибдена часто выходят из строя из-за растрескивания, изгиба и абляции концов. Эти проблемы не только снижают стабильность их работы, но и напрямую влияют на безопасность эксплуатации и срок службы всей системы отопления.

Большинство явлений растрескивания связаны с термическим напряжением. Когда нагревательный элемент быстро нагревается или охлаждается в условиях высокой температуры, градиент температуры между внутренними и внешними слоями материала велик, что может легко вызвать неравномерное тепловое расширение внутри материала, тем самым вызывая концентрацию термического напряжения. Если структурная конструкция необоснованна, геометрические размеры асимметричны или в компонентах имеются микроскопические дефекты (такие как поры и включения), термическое напряжение приведет к расширению микротрещин и в конечном итоге к формированию макроскопических трещин. Кроме того, если толщина пленки оксида кремния, образованной в процессе окисления, неравномерна, это также может вызвать растрескивание из-за разницы напряжений, особенно во время резкого охлаждения при высокой температуре или охлаждения при выключении.

Изгиб часто происходит, когда конструкция подвески или опоры нестабильна во время использования или когда материал подвергается пластической деформации при высоких температурах из-за силы тяжести или внешних механических сил. Хотя MoSi_2 является хрупкой керамикой с низкой пластичностью, его структура будет подвергаться определенной степени вязкого течения в условиях высоких температур (более 1500°C), особенно тонкостенные и длинноконсольные конструкции, которые склонны к изгибу под действием собственного веса при высоких температурах. После образования изгиба также увеличивается риск распространения трещин при повторном нагреве.

Абляция конца является распространенным явлением локального отказа нагревательных элементов MoSi_2 , в основном сосредоточенным в области, подключенной к электроду или где сосредоточена высокая плотность тока. Эта область часто страдает от сильного окисления или испарения из-за чрезмерного контактного сопротивления, пробоя дуги, накопления тепла или недостаточной местной циркуляции воздуха. В условиях высокой температуры и высокого тока на поверхности MoSi_2 могут образовываться локальные горячие точки, что приводит к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

повышенному испарению кремния и разрушению структуры защитной пленки, образуя, таким образом, абляционные ямки или полости расплава. Кроме того, если конец не обработан должным образом, например, недостаточно удалена оксидная пленка, плохое качество сварки или недостаточная площадь контакта, процесс абляции также будет ускорен. Чтобы отсрочить или избежать вышеуказанных отказов, необходимо оптимизировать конструкцию конструкции, процесс установки, электрическое управление и среду использования и т. д. Например, применение разумного метода поддержки для снижения концентрации термических напряжений, управление скоростью нагрева для снижения риска теплового удара, улучшение структуры концевой токопроводящей контактной для снижения контактного сопротивления и обеспечение целостности оксидной пленки могут эффективно продлить срок службы компонента.

5.10 Анализ микроструктуры и исследование видов отказов

Микроструктурный анализ является основным средством понимания механизма отказа нагревательных элементов MoSi_2 , который может выявить основные причины физических, химических и механических изменений в высокотемпературных средах на уровне тела материала. Путем микроскопического наблюдения за поперечным сечением, поверхностью и внутренней структурой элемента до и после работы можно определить структуру зерна, изменения фазовых границ, поведение роста оксидной пленки и потенциальное распределение микротрещин.

В среде высокотемпературного окисления на поверхности материала MoSi_2 образуется плотная защитная пленка SiO_2 , и между пленкой и подложкой образуется четкая граница раздела. Если при длительном использовании происходят высокотемпературные колебания или химическая коррозия, это может привести к отслаиванию границы раздела или образованию пористого оксидного слоя, что влияет на защитные характеристики. Кроме того, микроскопический анализ часто выявляет наличие небольшого количества частиц второй фазы в MoSi_2 , таких как Mo_5Si_3 , которые также оказывают определенное влияние на общую структурную стабильность при различных степенях окисления.

Исследования режимов отказа в основном сосредоточены на путях распространения трещин, механизмах разрыва оксидного слоя, тенденциях диффузии элементов и поведении фазовых изменений. Микроскопический анализ часто проводится совместно с сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) и энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС), которые могут четко показать, что трещины в основном возникают из слабо связанных областей на границах зерен, или макроскопические повреждения вызваны поровыми соединениями, вызванными окислительным стрессом. Кроме того, анализируя различия в толщине оксидной пленки, образованной при разных рабочих температурах и времени, можно сделать вывод о кинетике окисления, тем самым устанавливая модель скорости деградации материала.

Исследования показывают, что большинство отказов в основном вызваны комбинированным воздействием «окисление + термическое напряжение + структурные дефекты», то есть материал образует защитную пленку при высокотемпературном окислении, но разница напряжений во

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

время термического цикла приводит к разрыву пленки, в результате чего новая открытая поверхность продолжает окисляться, что приводит к концентрации напряжений и расширению микротрещин и в конечном итоге приводит к разрушению общей структуры материала. Эта циклическая и постепенная картина накопления является типичным поведением термической коррозионной усталости.

Для улучшения сопротивления отказу будущие исследования могут ввести следовые добавки (такие как Al, Zr и т. д.) в матрицу MoSi_2 для улучшения стабильности оксидной пленки или использовать двухфазную или градиентную структуру для снятия термического напряжения. Кроме того, контролируя размер зерна, оптимизируя процесс спекания и увеличивая плотность, можно эффективно улучшить однородность микроструктуры, снизить уровень дефектов и улучшить общее сопротивление отказу.



CTIA GROUP LTD Кремний-молибденовый стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 6 Установка нагревательных элементов MoSi₂

6.1 Подготовка к установке

При установке нагревательного элемента MoSi₂ требуется систематическая подготовка, чтобы обеспечить бесперебойную работу последующих операций и избежать повреждения элемента или ухудшения производительности из-за неправильной эксплуатации. Во-первых, технические характеристики, уровни напряжения, параметры мощности и размеры нагревательного элемента должны быть проверены на соответствие оборудованию согласно чертежам конструкции и инструкции по эксплуатации нагревательного оборудования. При необходимости следует провести физическое сравнение, чтобы исключить влияние ошибок модели на работу системы.

Во-вторых, проверьте, целы ли структура полости нагревательной печи, опорное устройство, крепление электрода и изоляционный материал, особенно для подтверждения того, что место установки чистое, без примесей и имеет хорошие изоляционные характеристики. Печь должна быть сухой, чтобы влага не мешала высокотемпературной оксидной пленке или не вызывала короткое замыкание.

Инструменты и вспомогательные материалы, используемые в процессе установки, также должны быть подготовлены заранее, включая керамические кронштейны, зажимы из нержавеющей стали, динамометрические инструменты, изоляционные прокладки и термостойкие проводящие материалы. Операторы должны носить чистые изоляционные перчатки и им строго запрещено прикасаться голыми руками к нагревающимся частям компонентов MoSi₂, чтобы избежать загрязнения маслом, влияющего на образование оксидной пленки.

Кроме того, монтажникам следует предоставить базовую подготовку по технике безопасности, чтобы разъяснить рабочие процедуры, меры предосторожности и защитные меры, которые необходимо соблюдать при транспортировке и обращении с компонентами. Для нового оборудования, используемого впервые, следует также провести испытание на повышение температуры пустой печи, чтобы проверить, соответствуют ли электрическая система управления и поведение теплового расширения корпуса печи ожиданиям.

6.2 Подробные шаги установки

Монтаж нагревательных элементов MoSi₂ должен осуществляться строго в соответствии со стандартными этапами, чтобы гарантировать, что они имеют хороший электрический контакт, тепловую поддержку и возможности защиты от окисления в реальной эксплуатации. Ниже приведены основные этапы стандартизированного процесса установки:

Первый шаг — подтвердить позиционирование: подтвердить положение установки каждого нагревательного элемента в соответствии с чертежами оборудования и идентификацией компонентов. Особое внимание следует уделять симметрии и балансу электродов при

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

параллельном подключении нескольких элементов, чтобы избежать локального перегрева, вызванного неравномерной нагрузкой. Второй шаг — закрепить опору: поместить нагревательный элемент MoSi_2 на керамический кронштейн или опорную конструкцию и соответствующим образом отрегулировать его положение, чтобы гарантировать, что нагревательная часть находится по центру и не загорожена пространством печи. Опорная конструкция должна обладать определенной степенью гибкости, чтобы адаптироваться к деформации элемента во время теплового расширения и избегать растрескивания, вызванного механическими ограничениями. Третий шаг — подключение электрода: используйте специальное приспособление для электрода, чтобы надежно соединить проводящий конец с силовым проводом. Приспособление должно быть нажато, но не слишком сильно, чтобы предотвратить поломку компонента. Поверхность соединения должна быть чистой, и при необходимости можно использовать высокотемпературную проводящую пасту для улучшения контактного сопротивления. Во время установки электрод и кабель должны быть изолированы соответствующими изоляционными материалами, чтобы предотвратить дуговой разряд. Четвертый шаг — осмотр и тонкая настройка: после подключения всех компонентов проверьте их высоту установки, горизонтальность и параллельность, чтобы убедиться, что каждый компонент равномерно нагружен и расположен разумно. В частности, проверьте, является ли приспособление симметричным и однородным, чтобы предотвратить неравномерное распределение тока.

Шаг 5, системный тест: Перед включением питания используйте мультиметр или тестер изоляции, чтобы проверить, находится ли значение сопротивления в пределах нормы. После включения питания сначала проведите предварительный нагрев с низким напряжением в течение короткого времени, чтобы наблюдать, нет ли аномального нагрева, искр, аномального шума и т. д. Убедившись, что все в порядке, постепенно увеличивайте температуру. Шаг 6, тепловая стабильность работы: Перед формальным производством рекомендуется провести полный цикл нагрева-изоляции-охлаждения, чтобы проверить стабильность рабочего состояния компонента и равномерность распределения тепла оборудования. Если обнаружено какое-либо аномальное явление, машину следует немедленно остановить для проверки, чтобы избежать необратимого повреждения компонентов.

Благодаря стандартизированным этапам установки можно эффективно снизить частоту отказов нагревательных элементов из дисилицида молибдена на начальном этапе эксплуатации, обеспечив их долгосрочную стабильную работу, продлив срок их службы и заложив хорошую основу для безопасной и эффективной эксплуатации высокотемпературного оборудования.

6.3 Замечания по установке

При установке нагревательных элементов MoSi_2 особое внимание следует уделять ряду ключевых деталей, чтобы избежать повреждения элемента, ненормальной работы печи или нестабильной работы системы из-за ошибок эксплуатации. Прежде всего, нагревательный элемент представляет собой хрупкий керамический материал и требует осторожного обращения при транспортировке и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

установке. Категорически запрещается подвергать его ударам, изгибам или воздействию силы тяжести. В частности, при затягивании зажима электрода не следует применять чрезмерный крутящий момент, чтобы предотвратить локальную концентрацию напряжений, которая может привести к трещинам в элементе.

Во-вторых, поверхность компонента должна быть чистой, особенно нагревательная часть. Категорически запрещается контакт со смазкой, влагой или примесями, чтобы не повлиять на его поведение при высокотемпературном окислении. Операторам необходимо надевать чистые изолирующие перчатки, чтобы поверхность компонента не была искусственно загрязнена в течение всего процесса установки.

Кроме того, соединение между электродом и проводом должно обеспечивать хороший контакт и равномерное зажимание, чтобы избежать абляции конца или аномальной температуры из-за чрезмерного контактного сопротивления. В то же время расстояние между компонентами должно быть постоянным, чтобы избежать перегрузки и сгорания некоторых компонентов из-за неравномерного теплового поля или отклонения тока. Кроме того, особое внимание следует уделять температуре, влажности и чистоте среды установки. Внутри печи не должно быть пыли и воды. Если это влажная среда, ее необходимо полностью высушить, чтобы избежать поломки или повреждения изоляции, вызванных водяным паром во время высокотемпературной работы.

6.4 Технические характеристики безопасной эксплуатации

Для обеспечения безопасной и стабильной работы системы нагревательных элементов MoSi₂ операторы должны строго соблюдать следующие правила техники безопасности: Перед включением питания необходимо убедиться, что вся проводка исправна, изоляция в хорошем состоянии, а система управления функционирует нормально. При работе с оборудованием надевайте изоляционные перчатки, очки и защитную одежду. Категорически запрещается прикасаться голыми руками к горячим деталям или конструкциям под напряжением. Компонент следует нагревать медленно, чтобы избежать теплового удара, вызванного внезапным включением. Особенно при первом использовании или повторном запуске после длительного простоя следует использовать метод пошагового нагрева, чтобы компонент мог постепенно адаптироваться к термической среде. Строго запрещено открывать дверцу печи или прикасаться к поверхности компонентов без разрешения во время работы. Осмотр или наблюдение должны проводиться после отключения питания и достаточного охлаждения.

При обнаружении любых отклонений (таких как искры, дуги, ненормальные шумы, локальное покраснение и т. д.) немедленно отключите питание и проверьте. Принудительная эксплуатация строго запрещена. При замене компонентов или креплений электродов необходимо в первую очередь отключить основное электропитание и убедиться в отсутствии остаточного напряжения, чтобы гарантировать полную безопасность рабочей среды. Регулярная проверка надежности электропроводки, износа зажимов, а также скопления углерода и пыли в печи является важной мерой для обеспечения долгосрочной безопасной эксплуатации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5 Общие неисправности и руководство по техническому обслуживанию

из дисилицида молибдена могут возникнуть следующие типичные неисправности, и обслуживающий персонал должен обладать базовыми навыками оценки и обработки данных:

Выгорание конца : обычно проявляется как локальное плавление или почернение соединения электрода. Возможные причины включают чрезмерное контактное сопротивление, дуговой разряд или ослабленные кабели. Проверьте, плотно ли прижат зажим, чистая ли контактная поверхность, и замените сгоревшие детали соответствующим образом.

Поверхностные трещины : в основном вызваны термическим ударом или механическим напряжением. Рекомендации по обслуживанию включают регулировку скорости нагрева, оптимизацию опорной конструкции и регулярный осмотр компонентов на предмет микротрещин.

Неравномерный нагрев : может быть вызван неравномерным расположением компонентов, неравномерным распределением мощности или ухудшением производительности отдельных компонентов. Зону нагрева следует перераспределить, а значение сопротивления каждой группы компонентов следует проверить.

Поломка компонента : часто вызвана неправильным обращением, неравномерной силой установки или длительной перегрузкой. Записи об эксплуатации следует просмотреть, чтобы проверить наличие внешних силовых помех и заменить новые компоненты.

Ошибка запуска : Если система не может нормально нагреться, это может быть связано с неисправностью цепи, неисправным модулем управления питанием или повреждением компонента. Проверьте вход питания, контакт электрода и выход управления по одному.

Для продления срока службы компонентов рекомендуется проводить плановый осмотр раз в неделю, в том числе проверять прочность соединения электродов, чистоту печи и нормальный ли подъем температуры. Для оборудования, работающего на высокой частоте, комплексное техническое обслуживание следует проводить каждый квартал, а рабочие параметры следует регистрировать для долгосрочного анализа тенденций.

6.5.1 Причины и решения поломки нагревательного элемента

из дисилицида молибдена (MoSi_2) являются распространенным видом отказа при работе при высоких температурах, что напрямую влияет на стабильность работы оборудования и эффективность производства. Разрушение в основном вызвано такими факторами, как термическое напряжение, механическое напряжение, дефекты материала и неправильные условия эксплуатации. Как интерметаллическое соединение, MoSi_2 имеет высокую твердость, но низкую вязкость разрушения (около $2\text{--}3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$). Он легко образует микротрещины и расширяется под сложным напряжением, что приводит к разрушению. Анализ причины разрушения и принятие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

целевых решений могут значительно улучшить срок службы компонента, который подходит для высокотемпературных процессов, таких как спекание керамики и плавка стекла.

Причины разрушения: Концентрация термического напряжения: Быстрое повышение и понижение температуры вызывает чрезмерный температурный градиент в переходной зоне между горячим концом и холодным концом. Разница в коэффициенте термического расширения (около $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) вызывает высокое термическое напряжение и вызывает трещины. Частые термические циклы усугубляют распространение микротрещин. Механическое напряжение: Неправильная установка или вибрация во время эксплуатации вызывают концентрацию механического напряжения, особенно на изгибах U-образных или W-образных компонентов. Дефекты материала: Пористость (плотность $<98\%$), примеси на границах зерен (такие как Fe, Al) или неравномерный размер зерна во время производственного процесса снижают вязкость разрушения, и трещины легко распространяются вдоль дефектов. Неправильные условия эксплуатации: Чрезмерная плотность мощности приводит к локальному перегреву, а нахождение в «критическом» диапазоне температур 400–700 °C в течение слишком длительного времени приводит к образованию не обладающих защитными свойствами оксидов (например, MoO_3), что ослабляет прочность материала.

Решение: Оптимизировать скорость нагрева и охлаждения: контролировать скорость нагрева и охлаждения на уровне 5-10 °C/мин, быстро пройти 400-700 °C и уменьшить тепловое напряжение. Использовать пропорциональный источник питания управления (напряжение 20-100 В) для достижения плавной температурной кривой и уменьшения концентрации напряжений в переходной зоне между горячим концом и холодным концом. Улучшить конструкцию установки: использовать кронштейны из высокочистого оксида алюминия, чтобы соответствовать характеристикам MoSi_2 для уменьшения механического напряжения. Зажимы умеренно тугие, чтобы избежать чрезмерного затягивания или вибрации. Компоненты типа W предпочтительны для больших печей из-за их более равномерного распределения напряжений благодаря конструкции с несколькими горячими концами. Улучшить качество материала: использовать горячее прессование спеканием (плотность $\geq 98\%$) и легирование (например, Y_2O_3 , 0,1-1 вес. %) для оптимизации прочности границ зерен, контроля размера зерна и уменьшения пор и примесей. Полировка поверхности уменьшает точки зарождения трещин. Стандартизируйте условия эксплуатации: поддерживайте плотность мощности 15-20 Вт/см², контролируйте окислительную атмосферу и избегайте восстановительных или высоковлажных сред, которые повреждают пленку SiO_2 . Регулярно калибруйте термопару (точность $\pm 1^\circ\text{C}$) и систему электропитания, чтобы предотвратить локальный перегрев. Покрытие поверхности: нанесите покрытие SiC или Al_2O_3 для повышения стойкости к тепловому удару и прочности, а также для уменьшения распространения трещин. Покрытие CVD более эффективно из-за его высокой адгезии (критическая нагрузка при испытании на царапину $>3 \text{ кг}$).

Предложения по внедрению : Анализ разрушения при разрушении необходимо сочетать с SEM (увеличение 50-200×) для наблюдения за морфологией трещин и XRD-анализом фазового состава для определения причины разрушения. Запишите количество термических циклов и изменений

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мощности во время работы, чтобы установить модель прогнозирования срока службы. Оптимизация конструкции и рабочих параметров может снизить риск разрушения на 30-50% и продлить срок службы компонентов MoSi_2 до более чем 5000 часов.

6.5.2 Причины отслоения оксидного слоя и восстановительная обработка

Защитная пленка SiO_2 нагревательных элементов MoSi_2 является ключом к их антиокислительной защите в окислительных атмосферах. Отслоение приведет к обнажению подложки, ускорит окислительную деградацию и значительно сократит срок службы. Отслоение оксидного слоя в основном вызвано термическим напряжением, дефектами покрытия, рабочей средой и длительным старением. Тестирование и восстановление проблемы отслоения оксидного слоя может эффективно восстановить производительность компонента и подходит для высокотемпературных окислительных сред, таких как производство полупроводников и спекание керамики.

Причины отслаивания: Тепловой стресс: Быстрое повышение и понижение температуры или частые тепловые циклы вызывают разницу в коэффициентах теплового расширения между пленкой SiO_2 и подложкой MoSi_2 , что приводит к высокому напряжению сдвига, в результате чего слой пленки растрескивается или отслаивается. Дефекты покрытия: Неравномерная толщина поверхностного покрытия или недостаточная адгезия (критическая нагрузка при испытании на царапину <2 кг) приводит к локальному отслаиванию, разрушая целостность пленки SiO_2 . Производственные дефекты (такие как поры или трещины) увеличивают риск отслаивания. Влияние рабочей среды: Высокая влажность (влажность $> 70\%$) или коррозионная атмосфера вызывают гидратацию или химическую коррозию пленки SiO_2 , что снижает адгезию. «Чумовое» окисление при $400-700^\circ\text{C}$ генерирует не защищающий MoO_3 , разрушая структуру пленки. Длительное старение: при температуре 1800°C , близкой к пределу использования MoSi_2 , Si улетучивается и приводит к истончению пленки SiO_2 , а слой пленки растрескивается или отслаивается после длительной эксплуатации.

Метод обработки регенерацией: Очистите поверхность: После остановки печи используйте мягкую щетку или сжатый воздух, чтобы удалить свободные оксиды в области отслоения. При необходимости слегка промойте ее разбавленным раствором кислоты (pH 4-5) и тщательно высушите, чтобы избежать остаточных едких веществ. Высокотемпературная регенерация: Запустите при $1500-1600^\circ\text{C}$ в окислительной атмосфере в течение 2-4 часов, чтобы способствовать регенерации пленки SiO_2 . Быстро пройдите $400-700^\circ\text{C}$, чтобы избежать «чумного» окисления. Повторное покрытие: Используйте плазменное напыление или технологию CVD для повторного покрытия SiC или Al_2O_3 в сильно отслоившихся областях, чтобы обеспечить равномерную толщину. Покрытие CVD больше подходит для сценариев с высоким спросом из-за его высокой плотности. Оптимизируйте рабочие параметры: Уменьшите скорость нагрева и охлаждения до $5-10^\circ\text{C}/\text{мин}$, контролируйте плотность мощности до $15-20\text{ Вт}/\text{см}^2$ и избегайте локального перегрева. Используйте пропорциональный источник питания и точные термодары (точность $\pm 1^\circ\text{C}$) для поддержания стабильного теплового поля. Улучшите контроль окружающей

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

среды: Поддерживайте окислительную атмосферу в печи и строго контролируйте влажность и содержание едких газов. Регулярно проверяйте уплотнение печи, чтобы предотвратить попадание влаги или загрязняющих веществ.

Предложения по внедрению : Для анализа отслаивания морфология пленки должна быть исследована с помощью СЭМ, а химический состав должен быть проанализирован с помощью ЭДС для определения механизма отслаивания. После регенерации следует проверить удельное сопротивление и скорость потери массы (прецизионные весы, точность $\pm 0,1$ мг) для проверки эффекта восстановления пленки SiO_2 .

6.5.3 Методы ежедневного обслуживания нагревательных элементов

MoSi_2 являются ключом к продлению срока службы, обеспечению стабильной работы и снижению затрат на обслуживание. Техническое обслуживание направлено на поддержание целостности пленки SiO_2 , предотвращение повреждений от напряжений и поддержание чистой среды в печи, что подходит для высокотемпературных применений, таких как керамика, стекло и полупроводники. Стандартизированные методы технического обслуживания могут снизить риск таких отказов, как трещины, отслоение оксидного слоя и дрейф сопротивления.

Метод обслуживания: Регулярно проверяйте состояние поверхности: После каждых 500-1000 часов работы останавливайте печь, чтобы проверить поверхность элемента MoSi_2 (горячий конец и холодный конец), и используйте оптический микроскоп, чтобы наблюдать за целостностью пленки SiO_2 , трещинами или признаками отслоения. Аккуратно почистите щеткой, чтобы удалить свободную пыль, и запишите аномальные области, чтобы оценить срок службы. Очистите печь: Очищайте печь каждый месяц или после каждых 100 тепловых циклов, используя сжатый воздух или мягкую щетку, чтобы удалить оксиды, металлические примеси (например, Fe_2O_3) или летучие отложения (например, соединения щелочных металлов), чтобы предотвратить загрязнение пленки SiO_2 или коррозию. Контролируйте рабочие условия: Поддерживайте окислительную атмосферу и быстро проходите 400-700 °C, чтобы избежать окисления «чумы». Контролируйте плотность мощности и температуру холодного конца, чтобы предотвратить перегрев или дрейф сопротивления. Проверьте электрические соединения: проверяйте зажим и подключение питания каждые 1000 часов, удалите оксидные или карбидные отложения и убедитесь в хорошем контакте. Откалибруйте пропорциональный источник питания управления и термопару (точность $\pm 1^\circ\text{C}$), чтобы избежать колебаний напряжения или отклонений контроля температуры. Поддерживайте кронштейн и установку: проверьте кронштейн из высокочистого оксида алюминия, чтобы убедиться в отсутствии трещин или деформаций, и поддерживайте его в соответствии с тепловым расширением MoSi_2 . Отрегулируйте натяжку зажима, чтобы предотвратить концентрацию механических напряжений, и регулярно смазывайте разъемы (используйте высокотемпературную смазку). Запишите данные об эксплуатации: создайте журнал эксплуатации для записи количества тепловых циклов, температурных кривых, плотности мощности и изменений удельного сопротивления (измеренных методом четырех зондов). Прогнозируйте срок службы с помощью анализа данных (например, модели Вейбулла) и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

заблаговременно заменяйте стареющие компоненты. Защита покрытия поверхности: Если используется покрытие SiC или Al₂O₃, регулярно проверяйте целостность покрытия и при необходимости наносите повторное покрытие (CVD или плазменное напыление). Избегайте механических царапин или химической коррозии (например, кислотных очистителей), чтобы не повредить покрытие.

Предложения по внедрению : Разработайте план обслуживания и обучите операторов его внедрению стандартизированным образом. Используйте SEM и EDS для анализа неисправных образцов и оптимизации стратегий обслуживания. Строго контролируйте атмосферу и чистоту в печи и оптимизируйте компоновку компонентов в сочетании с моделированием теплового поля, чтобы сократить расходы на обслуживание на 20–30 % и гарантировать, что компоненты MoSi₂ могут стабильно работать более 5000 часов при 1500 °C. Обратите внимание на безопасность во время обслуживания. После остановки печи подождите, пока температура не опустится до комнатной, и отключите питание, чтобы избежать поражения электрическим током или ожогов.

6.5.4 Технология замены и переработки нагревательных элементов

Замена нагревательных элементов является ключевым звеном для обеспечения стабильной работы системы отопления MoSi₂. По мере увеличения срока эксплуатации элементы будут деградировать или даже ломаться из-за таких факторов, как термическая усталость, окислительное повреждение или механическое повреждение. Их необходимо заменять вовремя, чтобы предотвратить выход из строя оборудования и остановку производства. В процессе замены необходимо строго соблюдать рабочие процедуры для обеспечения безопасности и качества монтажа.

Перед заменой сначала отключите питание печи и дождитесь, пока компоненты остынут до безопасной температуры, чтобы избежать ожогов и вторичных повреждений, вызванных термическим напряжением. Избегайте сильного вытягивания и столкновения во время разборки, и осторожно разделяйте компоненты и крепления электродов, чтобы не повредить окружающую конструкцию. Разобранные старые компоненты следует классифицировать и хранить для последующей переработки и повторного использования.

Технология переработки и повторного использования имеет большое значение в применении нагревательных элементов из дисилицида молибдена. Материалы из дисилицида молибдена сами по себе имеют высокую ценность. Переработка не только экономит затраты, но и соответствует концепции зеленой защиты окружающей среды. Обычные процессы переработки включают сбор старых компонентов, механическое дробление, химическую обработку и очистку материала. Удаляя оксидный слой и примеси, извлекаются высокочистые элементы молибдена и кремния для повторной подготовки новых нагревательных элементов или других материалов на основе молибдена. Кроме того, некоторые слегка окисленные и неповрежденные компоненты могут продолжать использоваться после очистки поверхности и регенерации оксидного слоя, что продлевает срок их службы. Передовые технологии переработки также включают вакуумную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

редукцию, горячее изостатическое прессование и другие процессы для максимального восстановления свойств материала. Предприятия должны создать полную систему переработки, оснащенную специализированным оборудованием и техническими специалистами для обеспечения безопасного и эффективного процесса переработки.

6.6 Типичные методы установки в промышленных печах

Существуют различные способы установки нагревательных элементов MoSi_2 в промышленных печах. Обычно они проектируются в соответствии со структурой печи, требованиями к процессу и спецификациями элементов, стремясь достичь равномерного нагрева, высокой эффективности и простоты обслуживания. Ниже приведены несколько типичных способов установки:

Подвесная установка : Этот тип установки распространен в печах с защитой атмосферы и вакуумных печах. Нагревательный элемент подвешивается сверху или с обеих сторон печи и фиксируется с помощью изолирующих кронштейнов, чтобы обеспечить свободное расширение элемента и избежать контакта со стенкой печи или другими элементами. Этот метод удобен для замены и обслуживания элемента и подходит для рабочих условий, требующих быстрой замены элемента.

Встроенная установка : нагревательный элемент непосредственно встраивается в огнеупорный материал печи или керамический кронштейн для формирования устойчивой опорной конструкции. Этот метод устойчив и менее подвержен механическим воздействиям, подходит для промышленных печей, которые непрерывно работают при высоких температурах. Недостатком является то, что замена более сложная и требует демонтажа части огнеупорного материала.

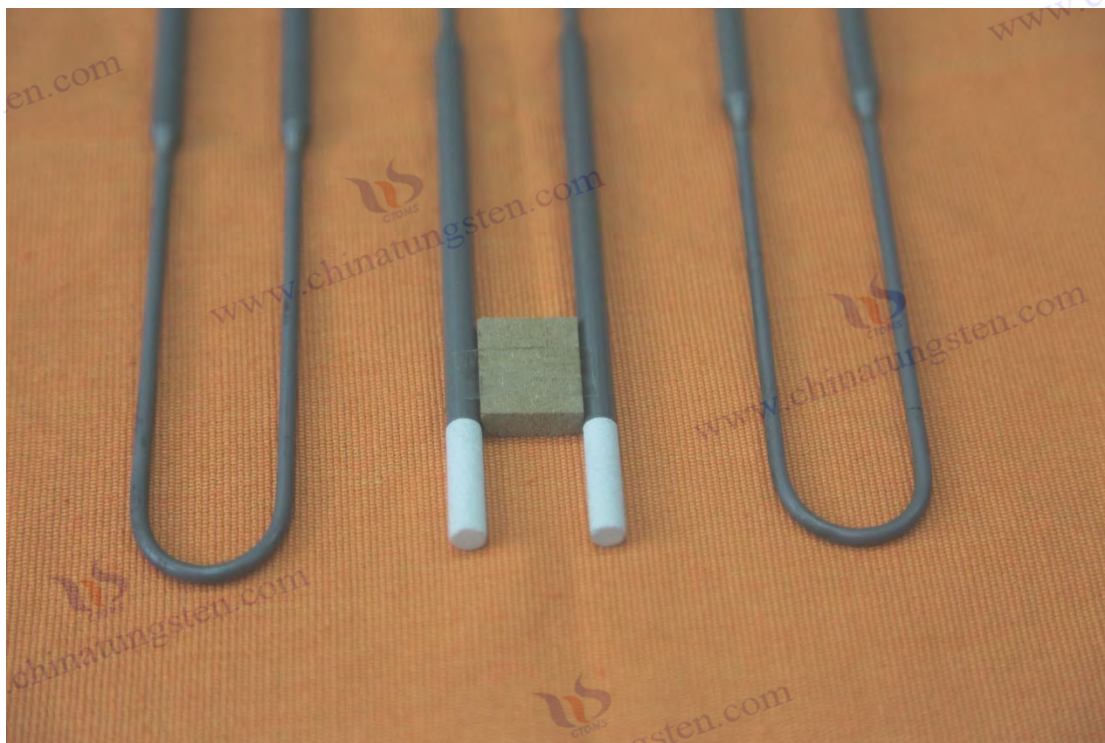
Фиксированная установка кронштейна : используйте специальные металлические или керамические кронштейны для фиксации нагревательных элементов в разных положениях печи, например, на дне, боковой стенке или сверху. Конструкция кронштейна должна учитывать тепловое расширение и изоляционные характеристики, чтобы гарантировать равномерное напряжение элементов. Этот метод подходит для больших промышленных печей и позволяет добиться точной компоновки и оптимизировать распределение теплового поля.

Установка на плоской основе : уложите компоненты на поверхность нагрева, например, на нагревательную плиту или платформу, обычно используемую в плоских печах и печах для отжига. Установка на плоской основе может обеспечить равномерное распределение тепла, но требует, чтобы компоненты были достаточно плоскими и имели опору для предотвращения изгиба и деформации.

Установка спирали : нагревательные элементы расположены в спиральной или спиральной форме, подходящей для цилиндрических или вертикальных печей. Этот метод позволяет экономить место, увеличить площадь нагрева и облегчить регулировку плотности мощности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В практических приложениях часто объединяют несколько методов установки для удовлетворения потребностей сложных процессов. Проект должен полностью учитывать характеристики теплового расширения компонентов, требования к электроизоляции, простоту установки и демонтажа, а также факторы окружающей среды, такие как тип атмосферы и температурный градиент. Кроме того, в процессе установки убедитесь, что нагревательный элемент надежно подключен к источнику питания и хорошо изолирован, чтобы избежать утечек и локального перегрева. Регулярно проверяйте состояние установки и вовремя регулируйте кронштейны и зажимы, чтобы тепловое поле в печи было равномерным и стабильным, тем самым повышая эффективность нагрева и срок службы элемента.



CTIA GROUP LTD Молибденовый силикатный стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

Molybdenum disilicide (MoSi₂) heating elements are high-performance ceramic electric heating materials widely used in industrial furnace applications. In high-temperature oxidizing atmospheres, MoSi₂ forms a dense silica (SiO₂) protective layer on its surface, which effectively prevents further oxidation. It exhibits excellent oxidation resistance and thermal stability, allowing stable operation under high temperatures for extended periods.

2. Features of MoSi₂ Heating Element

Low thermal expansion coefficient: Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.

Excellent oxidation resistance: Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.

Extremely high working temperature: Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.

Good high-temperature electrical resistance characteristics: MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

Model (d1/d2)	Hot End Diameter (d1)	Cold End Diameter (d2)	Hot Zone Length (Le)	Cold Zone Length (Lu)	Common Types
φ3/6	3 mm	6 mm	100–300 mm	150–250 mm	Straight / U-type
φ4/9	4 mm	9 mm	100–500 mm	200–300 mm	Straight / U-type
φ6/12	6 mm	12 mm	100–600 mm	200–350 mm	Straight / U-type / W-type
φ9/18	9 mm	18 mm	150–800 mm	250–400 mm	Straight / U-type / W-type
φ12/24	12 mm	24 mm	200–1000 mm	300–500 mm	Straight / U-type / W-type

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries

Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals

High-temperature laboratory furnaces

Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 7 Стандарты испытаний и сертификация нагревательных элементов MoSi₂

7.1 Метод испытания производительности нагревательного элемента

MoSi₂ являются важной частью обеспечения их качества и надежности, охватывая определение множества ключевых показателей, включая электрические свойства, механические свойства, тепловые свойства и долговечность. Прежде всего, испытание электрических характеристик в основном включает определение значения сопротивления и температурного коэффициента элемента. С помощью прецизионных приборов для измерения сопротивления изменение сопротивления элемента проверяется в различных температурных условиях для оценки стабильности и постоянства его электрических характеристик. Равномерность и линейное изменение сопротивления имеют решающее значение для проектирования и использования нагревательных элементов.

Испытания механических свойств в основном включают испытания на твердость и испытания на изгиб. Испытания на твердость обычно используют твердомеры Виккерса или Роквелла для измерения изменений твердости компонентов в условиях нагрева и охлаждения, отражающих механическую прочность и износостойкость материала. Испытание на изгиб применяет определенное механическое напряжение для наблюдения за упругой деформационной способностью и пределом прочности компонента для оценки его способности противостоять механическим повреждениям.

Испытание тепловых характеристик включает определение коэффициента теплового расширения и испытание на термическую стабильность. Испытание коэффициента теплового расширения использует прибор для измерения теплового расширения для измерения изменения длины компонента в процессе нагрева, чтобы гарантировать, что при проектировании зарезервировано достаточное пространство для теплового расширения, чтобы избежать повреждений, вызванных термическим напряжением. Испытание на термическую стабильность использует эксперимент с непрерывным нагревом при высокой температуре для наблюдения за сопротивлением, морфологией и структурными изменениями компонента для оценки его долгосрочной стабильности в высокотемпературной среде.

Кроме того, испытание на стойкость к окислению является важным показателем для оценки срока службы нагревательных элементов MoSi₂. При проведении долгосрочных экспериментов по нагреву в имитированной окислительной среде определяются образование, толщина и отслаивание оксидной пленки для определения стойкости элемента к окислению. Анализ режима отказа объединяет анализ разрушения и микроструктурное тестирование для выявления потенциальных слабых мест и механизмов отказа нагревательных элементов.

Эти методы испытаний дополняют друг друга и всесторонне отражают уровень эксплуатационных характеристик нагревательных элементов из дисилицида молибдена, обеспечивая научную основу и техническую гарантию для производства и применения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Анализ стандартов ISO, ASTM и других

Международная организация по стандартизации (ISO) и Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM) разработали ряд стандартов для нагревательных элементов и связанных с ними материалов, охватывающих такие аспекты, как качество продукции, методы испытаний и правила безопасности, которые играют ключевую роль в обеспечении качества и производительности нагревательных элементов из MoSi_2 . Что касается стандартов ISO, то основные стандарты, связанные с нагревательными элементами MoSi_2 , включают анализ состава материала, допуски размеров, испытания механических свойств и испытания на адаптируемость к окружающей среде. Например, стандарт системы менеджмента качества ISO 9001 обеспечивает систематическое и непрерывное улучшение контроля качества в процессе производства. Серия стандартов ISO 22007 включает методы испытаний на тепловое расширение материалов, предоставляя справочные данные для проектирования и использования. Стандарты ISO для электронной керамики и материалов, устойчивых к высоким температурам, охватывают оценку электрических и тепловых свойств.

Стандарты ASTM имеют долгую историю и широко используются в области испытаний материалов. Стандарт ASTM E1131 определяет общую процедуру термического анализа материалов, которая подходит для определения термической стабильности и поведения фазового перехода компонентов MoSi_2 . Стандарт ASTM E384 охватывает методы испытаний на микротвердость и широко используется для оценки твердости. ASTM E1820 предоставляет руководство по испытаниям на трещиностойкость, чтобы помочь проанализировать поведение компонентов при разрушении. Существуют также стандарты, такие как ASTM B193, для измерения удельного сопротивления металлических материалов, чтобы гарантировать точность испытаний электрических характеристик. Кроме того, ISO и ASTM имеют соответствующие руководства по спецификациям безопасности и требованиям к эксплуатационным характеристикам нагревательных элементов для промышленных печей, такие как стандарт электробезопасности серии IEC 60519, который охватывает проектирование и безопасность эксплуатации высокотемпературного электронагревательного оборудования. Эти стандарты имеют большое руководящее значение для производителей при проектировании нагревательных элементов MoSi_2 , которые соответствуют требованиям международного рынка. В реальных приложениях компании часто объединяют стандарты ISO и ASTM для разработки внутренних процессов тестирования, чтобы гарантировать, что продукция соответствует как международным стандартам, так и потребностям клиентов. Калибровка испытательного оборудования и сертификация квалификации операторов также обычно проводятся в соответствии с соответствующими стандартами для повышения надежности и авторитетности результатов тестирования.

7.3 Тест на адаптацию к окружающей среде

Испытание на адаптируемость к окружающей среде является ключевым звеном в оценке того, могут ли нагревательные элементы из дисилицида молибдена стабильно работать в различных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рабочих средах. Этот тип испытания в основном имитирует работу нагревательных элементов в различных условиях, таких как температура, влажность, состав атмосферы и механическая вибрация. Во-первых, испытание на высокотемпературный цикл обнаруживает влияние термического напряжения, вызванного термическим расширением и сжатием элемента, на структуру материала и его характеристики посредством повторного нагрева и охлаждения и проверяет его стойкость к термической усталости. Испытание на влажную тепловую среду имитирует использование в условиях высокой влажности, наблюдает за стабильностью оксидного слоя на поверхности элемента и затрагивает ли это электрические свойства, а также гарантирует, что нагревательный элемент не выйдет из строя в изоляции или не подвергнется коррозии во влажной среде. Кроме того, испытание на адаптируемость к атмосфере фокусируется на моделировании поведения нагревательного элемента в окислительной, восстановительной или инертной атмосфере. Контролируя состав атмосферы в печи, проверяются скорость окисления и антиокислительные характеристики нагревательного элемента в различных атмосферах, чтобы гарантировать, что он сохраняет хороший срок службы в сложных рабочих условиях. Испытание на механическую вибрацию и удар проверяет, могут ли элемент и его монтажная конструкция выдерживать механические повреждения, вызванные вибрацией во время транспортировки и эксплуатации.

Испытания на адаптируемость к окружающей среде могут в полной мере отразить надежность нагревательных элементов в реальных условиях применения, обеспечить научную основу для выбора материалов, проектирования и обслуживания, а также снизить риск отказов, вызванных факторами окружающей среды.

7.4 Виды отказов и методы прогнозирования срока службы

Анализ режима отказа является основой для понимания механизма повреждения нагревательных элементов MoSi_2 и продления срока их службы. К распространенным режимам отказа относятся термическое усталостное растрескивание, отслоение оксидного слоя, разрушение, вызванное механическим напряжением, и локальная абляция. С помощью макроскопического наблюдения и микроструктурного анализа вышедших из строя компонентов можно выявить начальное положение и путь расширения трещин, а также оценить изменения материала до отказа, такие как крупные зерна, увеличенные поры и аномальная толщина оксидного слоя.

Прогнозирование срока службы обычно использует ускоренные испытания срока службы в сочетании с теоретическими моделями. Ускоренные испытания быстро воспроизводят процесс повреждения, с которым могут столкнуться компоненты во время длительного использования, путем увеличения рабочей температуры, увеличения количества тепловых циклов или увеличения механической нагрузки, а также сбора данных об отказах. Используя эти данные в сочетании с соответствующими теориями механики разрушения, термодинамики и материаловедения, создается математическая модель для прогнозирования срока службы нагревательных элементов в нормальных условиях эксплуатации. Обычно используемые модели включают модель термической активации Аррениуса и модель усталости Коффина-Мэнсона.

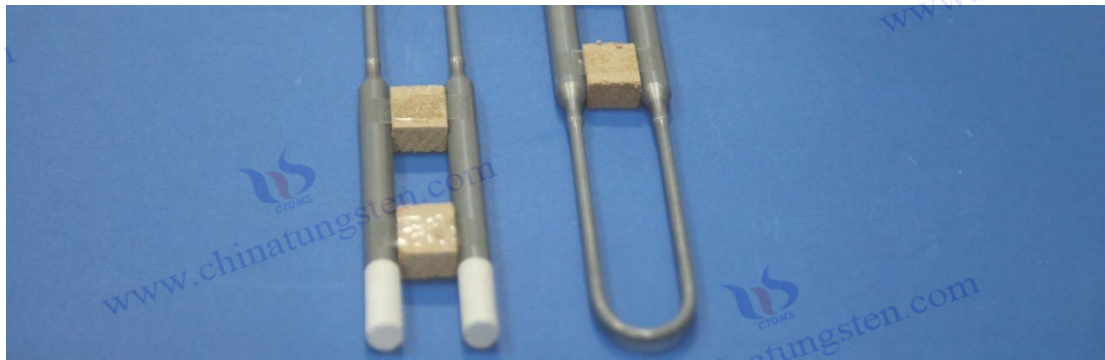
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Кроме того, статистический анализ, основанный на данных об отказах, таких как распределение Вейбулла, помогает оценить надежность и характеристики распределения срока службы продукта. Благодаря прогнозированию срока службы производители могут оптимизировать конструкцию компонентов и выбор материалов, предоставляя пользователям разумные рекомендации по техническому обслуживанию и циклу замены для снижения частоты отказов и эксплуатационных расходов.

7.5 Требования безопасности и электротехнических норм

Безопасность и электрические характеристики являются основой для обеспечения безопасной и стабильной работы нагревательных элементов MoSi₂ и их систем. Рабочая температура нагревательного элемента чрезвычайно высока и предполагает переключение высокого тока. Соответствующие стандарты электробезопасности должны строго соблюдаться для предотвращения несчастных случаев, таких как поражение электрическим током, короткое замыкание и пожар. Как правило, сопротивление изоляции нагревательного элемента должно достигать указанного значения, а состояние его изоляции регулярно проверяется во время использования для предотвращения утечки, вызванной старением изоляции.

Электрическая часть соединения должна использовать клеммы, изоляционные материалы и процессы соединения, которые соответствуют национальным или международным стандартам, чтобы обеспечить хороший контакт и достаточную механическую прочность и термостойкость. Система заземления должна быть спроектирована разумно, чтобы эффективно снизить риск поражения электрическим током. Система электропитания должна быть оснащена защитой от перегрузки, утечки и короткого замыкания для своевременного отключения электропитания в нештатных ситуациях, чтобы обеспечить безопасность персонала и оборудования. Кроме того, персонал, занимающийся установкой и обслуживанием, должен соблюдать правила техники безопасности и быть оснащен необходимыми защитными средствами. Предупреждающие знаки и средства изоляции должны быть установлены в высокотемпературных рабочих зонах для предотвращения случайного прикосновения и ожогов. Сертификации безопасности соответствующего оборудования и компонентов, такие как сертификация CE и сертификация UL, также обеспечивают поддержку доступа на рынок и гарантии безопасности.



CTIA GROUP LTD Молибденовый силикатный стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 8 Применение нагревательных элементов MoSi₂

8.1 Применение нагревательных элементов MoSi₂ в металлургической промышленности

из дисилицида молибдена (MoSi₂) широко используются в процессах плавки металлов, термообработки и высокотемпературного спекания в металлургической промышленности благодаря их превосходным высокотемпературным характеристикам, хорошей стойкости к окислению и стабильным электротермическим характеристикам. Теплопроводность, коэффициент теплового расширения и положительное температурное сопротивление коэффициента сопротивления MoSi₂ позволяют ему обеспечивать эффективный и равномерный нагрев, удовлетворяя потребности металлургической промышленности в высоких температурах, точном контроле температуры и длительном сроке службы. Элементы MoSi₂ достигают превосходной стойкости к окислению благодаря защитной пленке SiO₂, образованной на поверхности в окислительной атмосфере, что подходит для длительной эксплуатации металлургических печей. Обычные структуры элементов MoSi₂ (такие как U-тип, W-тип, Ф6/12 или Ф9/18) могут быть настроены в соответствии с типом печи и требованиями процесса и широко используются в печах для плавки металла, печах для термообработки и печах для спекания. Оптимизация применения компонентов MoSi₂ должна избегать «критического» температурного диапазона 400–700 °C, быстро повышать и понижать температуру для снижения образования не обладающих защитными свойствами оксидов (смесь MoO₃ и SiO₂), а также комбинировать поверхностные покрытия (например, SiC или Al₂O₃) для повышения стойкости к тепловому удару и срока службы.

В металлургической промышленности преимущества нагревательных элементов MoSi₂ включают высокую плотность мощности, стабильный контроль температуры и длительный срок службы. Гибкость конструкции поддерживает различные типы печей, такие как муфельные печи, туннельные печи и вакуумные печи, чтобы удовлетворить потребности в обработке различных металлических материалов. Для установки требуются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, чтобы соответствовать характеристикам теплового расширения MoSi₂ и снизить механическое напряжение. Электрические соединения требуют использования зажимов с низким сопротивлением и пропорциональных источников питания для обеспечения стабильности работы. Применение элементов MoSi₂ также требует учета контроля атмосферы, чтобы избежать восстановительных или высоковлажных сред, которые вызывают разрушение пленки SiO₂.

8.1.1 Плавка и термическая обработка металлов

MoSi₂ в плавке и термической обработке металлов в основном сосредоточены в высокотемпературных плавильных печах, печах отжига и закалочных печах и используются для обработки металлических материалов, таких как алюминий, медь, сталь и титановые сплавы. Плавка металлов требует точного контроля температуры печи в диапазоне 1000-1600 °C. Положительный температурный коэффициент удельного сопротивления элементов MoSi₂ позволяет им адаптивно регулировать мощность и обеспечивать стабильную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотемпературную среду. Элементы MoSi₂ U-типа и W-типа обычно используются в небольших и средних плавильных печах с длиной горячего конца 100-500 мм и плотностью мощности 15-20 Вт/см². Они могут быстро достигать точки плавления (например, 660 °C для алюминия и 1085 °C для меди) и поддерживать равномерное температурное поле. В процессах термообработки, таких как отжиг и закалка, элементы MoSi₂ обеспечивают стабильный нагрев при 1200-1500°C, гарантируя измельчение зерна металла и оптимизацию производительности. Например, отжиг стали требует выдержки при 1200-1300°C, а теплопроводность и термостойкость компонентов MoSi₂ поддерживают быстрый нагрев и термоциклирование.

MoSi₂ в плавке и термической обработке металлов обладают высокой стойкостью к окислению и длительным сроком службы. В окислительной атмосфере защитная пленка SiO₂ эффективно предотвращает деградацию материала, а скорость потери массы при 1500 °C составляет менее 0,2 мг/см²/1000 ч. Покрытие поверхности может дополнительно улучшить стойкость к тепловому удару и коррозионную стойкость и подходит для металлургических сред, содержащих следы серы или углерода. При установке элементы U-типа подвешиваются вертикально, элементы W-типа подходят для равномерного нагрева больших печей, а холодный конец усиливается алюминизированным покрытием. Во время работы необходимо избегать быстрого прохождения через 400-700 °C, чтобы предотвратить окисление «чумы», а скорость нагрева и охлаждения контролируется на уровне 5-10 °C/мин. Техническое обслуживание включает регулярную проверку целостности пленки SiO₂ и состояния соединения холодного конца, а также очистку печи от примесей (таких как оксид железа) для предотвращения загрязнения. Ограничением элементов MoSi₂ является то, что рабочая температура должна быть снижена в восстановительной или вакуумной среде, чтобы предотвратить разрушение пленки SiO₂. В практических приложениях оптимизация компоновки компонентов в сочетании с моделированием теплового поля может значительно повысить эффективность и качество плавки и термообработки металла.

8.1.2 Процесс высокотемпературного спекания

MoSi₂ в процессах высокотемпературного спекания в основном включают спекание металлической порошковой металлургии, керамических композитов и специальных сплавов и обычно используются в производстве высокопроизводительных сталей, сплавов на основе титана и твердых сплавов. Процесс спекания требует точного контроля температуры в диапазоне 1300-1800 °C для содействия уплотнению материала и росту зерна. Высокая плотность мощности и стабильный контроль температуры элементов MoSi₂ делают их идеальным выбором. Элементы W-типа и прямые стержневые элементы MoSi₂ часто используются в больших печах для спекания для обеспечения равномерного теплового поля и подходят для крупногабаритных заготовок. Спиральные элементы (диаметр горячего конца 4-9 мм) подходят для небольших трубчатых печей для удовлетворения потребностей высокоточного спекания. Теплопроводность и положительный температурный коэффициент сопротивления MoSi₂ обеспечивают равномерное распределение тепла во время спекания и уменьшают деформацию заготовки и трещины. При высокотемпературном спекании стойкость к окислению элементов MoSi₂ является ключевым преимуществом. Защитная пленка SiO₂ остается стабильной при 1500-1800 °C (толщина 10-15

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мкм) со скоростью потери массы $<0,5 \text{ мг/см}^2/1000 \text{ ч}$, что обеспечивает длительную эксплуатацию. Модификация легирования (например, Y_2O_3 , 0,1-1 мас. %) повышает прочность границ зерен, а поверхностное покрытие (например, Al_2O_3 , толщина 10-50 мкм) улучшает термостойкость и коррозионную стойкость, что подходит для атмосфер спекания, содержащих следы летучих примесей. При установке элементы W-типа поддерживаются горизонтально или подвешиваются вертикально, а кронштейны из высокочистого оксида алюминия снижают термическое напряжение. Для электрических соединений используются медные зажимы, а для обеспечения стабильности используются пропорциональные источники питания. Во время работы температура должна быстро превышать $400-700 \text{ }^\circ\text{C}$, чтобы избежать образования не защищающих оксидов, а скорость нагрева и охлаждения должна составлять $5-10 \text{ }^\circ\text{C/мин}$, чтобы снизить термическое напряжение (трещиностойкость MoSi_2 составляет около $2-3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$).

MoSi_2 при высокотемпературном спекании включают чувствительность к атмосфере и требования к обслуживанию. Атмосферы спекания, содержащие серу или углерод, могут вызывать коррозию пленки SiO_2 , а парциальное давление кислорода и влажность должны строго контролироваться. Регулярный осмотр поверхности компонента (наблюдение за слоем пленки с помощью СЭМ) и температуры холодного конца, а также очистка от примесей печи (таких как оксиды металлов) могут продлить срок службы. Оптимизация теплового поля (например, моделирование методом конечных элементов) обеспечивает однородность температуры и снижает дефекты в спеченных заготовках. Высокая производительность компонентов MoSi_2 делает их широко используемыми в производстве компонентов аэрокосмической техники, режущих инструментов и износостойких материалов в процессах высокотемпературного спекания для улучшения качества продукции и эффективности производства.

8.1.3 Оборудование для термообработки

MoSi_2 широко используются в оборудовании для термообработки в металлургической промышленности, охватывая печи отжига, закалочные печи, печи нормализации и печи отпуска, для улучшения механических свойств, коррозионной стойкости и технологических свойств металлических материалов. Оборудование для термообработки требует точного контроля температуры и равномерного теплового поля для обеспечения оптимизации структуры зерна металла и снятия напряжений. Положительный температурный коэффициент сопротивления элементов MoSi_2 позволяет им обеспечивать стабильный нагрев в диапазоне $1200-1500 \text{ }^\circ\text{C}$, подходящий для обработки таких материалов, как сталь, алюминиевые сплавы, медные сплавы и титановые сплавы. Элементы MoSi_2 U-образной формы подходят для небольших печей термообработки с длиной горячего конца 100-500 мм, обеспечивая централизованный нагрев и подходящие для мелкосерийного производства. Элементы W-образной формы и прямые стержневые подходят для больших печей непрерывной термообработки с длиной горячего конца 200-1000 мм, которые могут охватывать большую площадь нагрева и обеспечивать равномерность температуры. MoSi_2 в оборудовании для термообработки заключаются в их высокой стойкости к окислению и способности выдерживать частые термические циклы. В окислительной атмосфере защитная пленка SiO_2 обеспечивает долговременную стабильность элемента, что подходит для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

длительного сохранения тепла и быстрого повышения и понижения температуры в процессе термообработки. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al₂O₃) повышают стойкость к тепловому удару и коррозионную стойкость и подходят для сложных металлургических сред. Во время установки элемент фиксируется кронштейном из высокочистого оксида алюминия, а вертикальная подвеска или горизонтальная опора снижают механическое напряжение. Электрическое соединение использует зажим с низким сопротивлением, а пропорциональный управляющий источник питания обеспечивает точный контроль температуры. Во время работы необходимо быстро пройти 400-700 °C, чтобы избежать окисления «чумы», а скорость повышения и понижения температуры контролируется на уровне 5-10 °C/мин. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр пленки SiO₂, соединения холодного конца и чистку печи для предотвращения загрязнения примесями. Ограничением элементов MoSi₂ является необходимость понижения температуры использования в восстановительной атмосфере, а также необходимость строгого контроля атмосферы в печи. Оптимизация теплового поля и регулярное техническое обслуживание обеспечивают высокую эффективность и качество продукции оборудования для термообработки, которое широко используется в автомобильной, аэрокосмической и машиностроительной отраслях.

8.2 Применение нагревательных элементов MoSi₂ в керамической промышленности

MoSi₂ широко используются при обжиге керамики, глазуровании и подготовке специальных керамических материалов в керамической промышленности. Их высокая рабочая температура, стойкость к окислению и электротермическая стабильность отвечают требованиям керамических процессов для высокотемпературного и точного контроля температуры. Элементы MoSi₂ сохраняют стабильность в окислительной атмосфере благодаря поверхностной защитной пленке SiO₂ и подходят для печей для обжига керамики, печей для обжига глазури и специальных печей для спекания керамики. U-образные, W-образные и спиральные элементы MoSi₂ изготавливаются по индивидуальному заказу в зависимости от типа печи. U-образный подходит для небольших коробчатых печей, W-образный подходит для больших туннельных печей, а спиральный тип подходит для высокоточного спекания в трубчатых печах. Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением, а точный контроль температуры достигается с помощью пропорционального источника питания. Операция должна быстро пройти через 400-700°C, чтобы избежать окисления "чумы", скорость нагрева и охлаждения составляет 5-10°C/мин, а поверхностное покрытие улучшает термостойкость и срок службы. Применение элементов MoSi₂ в керамической промышленности значительно улучшает качество обжига и эффективность производства, удовлетворяя потребности традиционной керамики и передовой керамики.

8.2.1 Обжиг керамики и глазурование

MoSi₂ используются в муфельных печах, челночных печах и туннельных печах при обжиге керамики и глазуровании, а также используются для производства керамики повседневного использования, архитектурной керамики и художественной керамики. Обжиг керамики требует

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

спекания сырого тела и плавления глазури при температуре 1000-1400 °C. Положительный температурный коэффициент сопротивления элементов MoSi_2 обеспечивает стабильную высокотемпературную среду для обеспечения уплотнения керамических сырых тел и блеска глазури. Элементы MoSi_2 U-образной формы подходят для небольших печей, а элементы W-образной формы подходят для больших печей непрерывного обжига, обеспечивая равномерное тепловое поле для уменьшения растрескивания и деформации керамики. Обработка глазури требует точного контроля температуры для контроля плавления и кристаллизации глазури. Теплопроводность элементов MoSi_2 обеспечивает быстрый нагрев и изоляцию. Защитная пленка SiO_2 остается стабильной в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие повышает термостойкость и коррозионную стойкость, что подходит для обжига в атмосферах, содержащих летучие глазури. Установка и эксплуатация требуют контроля атмосферы и скоростей нагрева и охлаждения, а техническое обслуживание включает регулярный осмотр поверхности компонента и очистку печи. Компоненты MoSi_2 повышают эффективность и качество продукции в процессах обжига и глазурирования керамики и широко используются в керамическом производстве.

8.2.2 Приготовление специальных керамических материалов

MoSi_2 используются в печах для спекания и печах горячего прессования при изготовлении специальных керамических материалов. Они используются для производства передовой керамики, такой как оксид алюминия, диоксид циркония, нитрид кремния и карбид кремния, и широко используются в аэрокосмической, электронной и медицинской областях. Специальное керамическое спекание необходимо проводить при температуре 1400-1800 °C для достижения высокой плотности и отличных характеристик. Высокая плотность мощности и возможность точного регулирования температуры элементов MoSi_2 отвечают этим требованиям. Элементы W-типа и спиральные элементы MoSi_2 подходят для больших и малых печей для спекания, обеспечивая равномерное тепловое поле и уменьшая дефекты материала. Защитная пленка и поверхностное покрытие SiO_2 обеспечивают стабильность элементов в высокотемпературных окислительных атмосферах, а легирование повышает стойкость к тепловому удару и подходит для частых тепловых циклов. Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, электрические соединения обеспечивают контакт с низким сопротивлением, а атмосфера и скорости нагрева и охлаждения контролируются, чтобы избежать «чумного» окисления. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр компонентов и состояния печи для обеспечения долгосрочной надежности.

8.3 Применение нагревательных элементов MoSi_2 в фотоэлектрической промышленности

из дисилицида молибдена (MoSi_2) широко используются в фотоэлектрической промышленности для производства кремниевых пластин и оборудования для производства солнечных батарей благодаря их высокотемпературным характеристикам, стойкости к окислению и электротермической стабильности. Элементы MoSi_2 могут обеспечить точный контроль температуры и равномерное тепловое поле, отвечая требованиям высокой температуры и чистой среды фотоэлектрических процессов. Он достигает стойкости к окислению за счет защитной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пленки SiO_2 , образованной на поверхности в окислительной атмосфере, что подходит для длительной эксплуатации. Элементы MoSi_2 в форме U, W и прямом стержне настраиваются в соответствии с типом печи. U-образный тип подходит для небольших печей, а W-образный и прямой стержневой тип подходят для большого непрерывного оборудования. Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия для соответствия характеристикам теплового расширения, зажимы с низким сопротивлением используются для электрических соединений, а источники питания с пропорциональным управлением используются для обеспечения стабильности. Эксплуатация должна быстро проходить через «чумовой» температурный диапазон, чтобы избежать образования не защищающих оксидов, а поверхностные покрытия (такие как SiC или Al_2O_3) улучшают стойкость к тепловому удару и срок службы.

8.3.1 Высокотемпературный процесс производства кремниевых пластин

MoSi_2 используются в высокотемпературном процессе производства кремниевых пластин для вытягивания монокристаллического кремния, литья слитков мульткристаллического кремния и отжига кремниевых пластин. Эти процессы требуют высокотемпературной среды для плавления кремниевого сырья, управления ростом кристаллов или устранения дефектов кристаллов. Положительный температурный коэффициент удельного сопротивления элементов MoSi_2 обеспечивает стабильные возможности нагрева. Прямые стержневые и W-образные элементы MoSi_2 подходят для больших монокристаллических печей и печей для слитков, охватывая широкую область нагрева для обеспечения однородности теплового поля. Элементы U-образного типа подходят для небольших отжиговых печей для удовлетворения локальных высокотемпературных требований. Защитная пленка SiO_2 остается стабильной в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие повышает термостойкость и коррозионную стойкость, что подходит для чистой среды производства кремниевых пластин. Во время установки элемент фиксируется кронштейном из высокочистого оксида алюминия, а электрическое соединение обеспечивает контакт с низким сопротивлением. Эксплуатация требует контроля атмосферы и скоростей нагрева и охлаждения, чтобы избежать окислительного повреждения, а техническое обслуживание включает регулярный осмотр поверхности элемента и чистоты печи. Элементы MoSi_2 улучшают качество кристаллов и эффективность производства кремниевых пластин и широко используются в цепочке фотоэлектрической промышленности.

8.3.2 Оборудование для производства солнечных элементов

MoSi_2 используются в диффузионных печах, печах для спекания и печах для отжига в оборудовании для производства солнечных элементов для производства кристаллического кремния и тонкопленочных солнечных элементов. Процесс диффузии требует высокой температуры для легирования фосфора или бора для формирования PN-перехода, процесс спекания объединяет металлические электроды с кремниевыми пластинами, а процесс отжига оптимизирует производительность элемента. Элементы MoSi_2 обеспечивают точный контроль температуры и равномерные тепловые поля для удовлетворения требований этих процессов. U-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

образные и спиральные элементы MoSi_2 подходят для небольших диффузионных печей и печей для отжига, а элементы W-образной формы подходят для больших печей для спекания, чтобы гарантировать стабильность нагрева большой площади. Защитная пленка и поверхностное покрытие SiO_2 поддерживают длительную работу элемента в окислительной атмосфере, а стойкость к тепловому удару адаптируется к частым термическим циклам. Установка использует кронштейн из высокочистого оксида алюминия, а электрическое соединение использует пропорциональный источник питания для достижения точного контроля температуры. Операция должна быстро пройти через температурный диапазон «чумы», а техническое обслуживание включает проверку пленки SiO_2 и очистку печи, чтобы избежать загрязнения. Элементы MoSi_2 повышают эффективность производства солнечных элементов и производительность элементов и широко используются в области фотоэлектрической генерации электроэнергии.

8.4 Применение нагревательных элементов MoSi_2 в полупроводниковой промышленности

из дилицида молибдена (MoSi_2) широко используются в высокотемпературных процессах, таких как отжиг пластин, диффузионные процессы и эпитаксиальный рост в полупроводниковой промышленности из-за их высокотемпературных характеристик, стойкости к окислению и электротермической стабильности. Элементы MoSi_2 могут обеспечить точный контроль температуры и равномерное тепловое поле, отвечая потребностям производства полупроводников в чистой среде и высокоточном контроле температуры. Он имеет превосходную стойкость к окислению благодаря защитной пленке SiO_2 , образованной на поверхности в окислительной атмосфере, что подходит для длительной эксплуатации. U-образные, W-образные и спиральные элементы MoSi_2 настраиваются в соответствии с типом печи. U-образные и спиральные типы подходят для небольших высокоточных печей, а W-образные подходят для большого непрерывного оборудования. Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, чтобы соответствовать характеристикам теплового расширения MoSi_2 и снизить механическое напряжение. Для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением, а для обеспечения стабильности используются источники питания с пропорциональным управлением. Эксплуатация должна быстро проходить через температурный диапазон «чумы», чтобы избежать образования не защищающих оксидов, а поверхностные покрытия (такие как SiC или Al_2O_3) дополнительно улучшают термостойкость и срок службы. Регулярно проверяйте целостность пленки SiO_2 и состояние соединения холодного конца, очищайте печь, чтобы избежать загрязнения примесями, и обеспечьте надежность и эффективность компонентов в полупроводниковой промышленности.

8.4.1 Отжиг пластин и процесс диффузии

MoSi_2 используются в печах быстрого термического отжига (RTA), диффузионных печах и окислительных печах в процессах отжига и диффузии пластин для обработки кремниевых пластин и других полупроводниковых материалов. Отжиг пластин требует высоких температур для исправления дефектов решетки, активации легирующих примесей или улучшения свойств материала. Процесс диффузии формирует PN-переход посредством высокотемпературного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

легирования (например, фосфора и бора). Положительный температурный коэффициент удельного сопротивления элементов MoSi_2 обеспечивает стабильные возможности нагрева и гарантирует точный контроль температуры. U-образные и спиральные элементы MoSi_2 подходят для небольших печей отжига и диффузии, подходят для высокоточного мелкосерийного производства, а W-образные элементы подходят для больших диффузионных печей, чтобы обеспечить равномерное тепловое поле для обработки нескольких пластин.

Защитная пленка SiO_2 остается стабильной в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие повышает стойкость к тепловому удару и коррозионную стойкость, что подходит для чистой среды полупроводникового процесса. Во время установки элемент фиксируется кронштейном из высокочистого оксида алюминия, а электрическое соединение обеспечивает контакт с низким сопротивлением. Для работы требуются контролируемая атмосфера и скорости нагрева и охлаждения, чтобы избежать повреждения окислением. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр поверхности элемента и чистоты печи, чтобы предотвратить загрязнение пластины примесями (например, ионами металлов). Компоненты MoSi_2 повышают эффективность и качество процессов отжига и диффузии пластин и широко используются в производстве интегральных схем и силовых устройств.

8.4.2 Эпитаксиальный рост полупроводников

MoSi_2 используются в печах химического осаждения из паровой фазы (CVD) и оборудовании для молекулярно-лучевой эпитаксии (MBE) в эпитаксиальном росте полупроводников для выращивания высококачественных монокристаллических пленок, таких как кремний, германий и сложные полупроводники (такие как GaAs, SiC). Эпитаксиальный рост требует точного контроля теплового поля при высоких температурах для обеспечения качества кристаллов и однородности пленки. Высокая плотность мощности и возможность стабильного контроля температуры элементов MoSi_2 отвечают этим требованиям. Спиральные элементы MoSi_2 подходят для небольших печей CVD, обеспечивая централизованный нагрев для поддержки высокоточного роста. Элементы W-типа и прямые стержневые элементы подходят для больших эпитаксиальных печей для обеспечения однородности теплового поля для пластин большой площади.

Защитная пленка SiO_2 и элементы поверхностного покрытия поддерживают длительную работу в окислительных атмосферах или средах со следами кислорода, а стойкость к тепловому удару адаптируется к частым термическим циклам. Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, а для электрических соединений используются источники питания с пропорциональным управлением, что позволяет добиться точного контроля температуры. Эксплуатация требует быстрого прохождения через температурный диапазон «чумы», а техническое обслуживание включает проверку пленки SiO_2 и очистку печи для предотвращения загрязнения. Компоненты MoSi_2 повышают качество и эффективность производства эпитаксиально выращенных пленок и широко используются в производстве полупроводниковых приборов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.3 Оборудование для высокотемпературного травления

MoSi₂ используются в печах плазменного травления и печах термического травления в высокотемпературном травильном оборудовании для формирования рисунка на полупроводниковых пластинах. Высокотемпературные процессы травления требуют точного контроля температуры для оптимизации скорости травления и селективности и обеспечения точности микро-наномасштабных структур. Положительный температурный коэффициент сопротивления и равномерное тепловое поле элементов MoSi₂ отвечают этим требованиям. U-образные и спиральные элементы MoSi₂ подходят для небольших травильных печей, обеспечивая централизованный нагрев для поддержки высокоточных процессов, а элементы W-образной формы подходят для крупного оборудования для обеспечения постоянства температуры нескольких пластин. Защитные пленки SiO₂ остаются стабильными в окислительных атмосферах, а поверхностные покрытия (такие как SiC или Al₂O₃) повышают стойкость к тепловому удару и коррозионную стойкость для адаптации к едким газам (таким как хлор или фторид), которые могут присутствовать во время травления. Во время установки элементы фиксируются кронштейнами из высокочистого оксида алюминия, а для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением, чтобы обеспечить стабильность. Эксплуатация требует контроля атмосферы и скоростей нагрева и охлаждения, чтобы избежать повреждений от окисления. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр поверхности элементов и чистоты печи, чтобы предотвратить загрязнение пластин примесями. Компоненты MoSi₂ повышают точность обработки и эффективность оборудования для высокотемпературного травления и широко используются в обработке микроструктур в производстве полупроводников.

8.4.4 Оборудование для вакуумного нанесения покрытий

MoSi₂ используются в вакуумном напылительном оборудовании в системах физического осаждения из паровой фазы (PVD) и химического осаждения из паровой фазы (CVD) для нанесения металлических, оксидных или нитридных пленок, таких как TiN, Al₂O₃, для электродов или изолирующих слоев полупроводниковых приборов. Вакуумное напыление требует высоких температур для испарения или разложения исходных материалов. Высокая плотность мощности и точные возможности регулирования температуры элементов MoSi₂ обеспечивают однородность и качество пленки. U-образные и спиральные элементы MoSi₂ подходят для небольших вакуумных печей для нанесения покрытий, чтобы обеспечить локальные высокие температуры для поддержки высокоточного осаждения. W-образные и прямые стержневые элементы подходят для крупного оборудования, чтобы обеспечить однородность теплового поля подложек большой площади. В окислительной атмосфере или среде следов кислорода защитная пленка SiO₂ и поверхностное покрытие поддерживают длительную работу элемента, а стойкость к тепловому удару адаптируется к быстрому повышению и понижению температуры.

Установка использует кронштейн из высокочистого оксида алюминия, а электрическое соединение использует пропорциональный источник питания для достижения стабильного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контроля температуры. Операция должна быстро пройти через температурный диапазон «чумы», чтобы избежать повреждения окислением. Техническое обслуживание включает проверку пленки SiO_2 и очистку печи для предотвращения загрязнения. Компоненты MoSi_2 улучшают качество пленки и эффективность производства оборудования для вакуумного покрытия и широко используются при подготовке пленки полупроводниковых приборов.

8.5 Применение нагревательных элементов MoSi_2 в стекольной промышленности

из дисилицида молибдена (MoSi_2) широко используются при плавке и обработке стекла в стекольной промышленности благодаря своим превосходным высокотемпературным характеристикам, стойкости к окислению и электротермической стабильности. Элементы MoSi_2 могут обеспечить точный контроль температуры и равномерное тепловое поле, отвечая требованиям производства стекла к высокой температуре, длительной эксплуатации и чистой среде. Его превосходная стойкость к окислению достигается за счет защитной пленки SiO_2 , образованной на поверхности в окислительной атмосфере, которая подходит для суровых условий работы стекловаренных печей. Элементы MoSi_2 W-типа, U-типа и прямого стержня изготавливаются по индивидуальному заказу в соответствии с типом печи. Элемент W-типа подходит для больших плавильных печей для обеспечения равномерного нагрева, а элементы U-типа и прямого стержня подходят для небольших и средних печей обработки. Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, чтобы соответствовать характеристикам теплового расширения MoSi_2 и снизить механическое напряжение. Для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением, а для обеспечения стабильности используются источники питания с пропорциональным управлением. Операция должна быстро проходить через температурный диапазон «чумы», чтобы избежать образования не защищающих оксидов, а поверхностные покрытия (такие как SiC или Al_2O_3) дополнительно улучшают устойчивость к тепловому удару и срок службы. Регулярно проверяйте целостность пленки SiO_2 и состояние соединения холодного конца, очищайте печь, чтобы избежать загрязнения примесями, и обеспечьте надежность и эффективность компонентов в производстве стекла.

8.5.1 Плавка стекла

MoSi_2 используются в больших плавильных печах и небольших экспериментальных печах в процессе плавки стекла для производства плоского стекла, оптического стекла и специального стекла. Плавка стекла требует высоких температур для расплавления сырья (например, кварцевого песка, кальцинированной соды) в однородное жидкое стекло. Положительный температурный коэффициент сопротивления элементов MoSi_2 обеспечивает стабильную высокотемпературную среду для обеспечения качества и постоянства плавки.

MoSi_2 типа W подходят для больших плавильных печей непрерывного действия, охватывая широкую область нагрева и обеспечивая равномерное тепловое поле для уменьшения образования пузырьков и полос в стекле. Элементы типа U подходят для небольших плавильных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

печей и подходят для мелкосерийного производства специального стекла. Защитная пленка SiO_2 остается стабильной в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие повышает термостойкость и коррозионную стойкость для адаптации к летучим компонентам (таким как бораты), которые могут присутствовать в расплаве стекла. Во время установки элемент фиксируется кронштейном из высокочистого оксида алюминия, а электрическое соединение обеспечивает контакт с низким сопротивлением. Для работы требуются контролируемая атмосфера и скорости нагрева и охлаждения, чтобы избежать повреждений от окисления.

Техническое обслуживание включает регулярный осмотр поверхности элемента и чистоты печи для предотвращения загрязнения расплава стекла примесями (например, оксидами щелочных металлов). Компоненты MoSi_2 повышают эффективность плавки стекла и качество продукции и широко используются в производстве архитектурного, автомобильного и оптического стекла.

8.5.2 Обработка стекла

MoSi_2 используются в печах отжига, формовочных печах и печах горячей гибки в технологии обработки стекла для формования, отжига и обработки поверхности стеклянных изделий. Обработка стекла требует точного контроля температуры для устранения внутреннего напряжения, формы или улучшения характеристик стекла. Высокая плотность мощности и стабильная способность контроля температуры элементов MoSi_2 отвечают этим требованиям. Элементы MoSi_2 в форме U и прямого стержня подходят для печей отжига и горячей гибки небольшого и среднего размера, обеспечивая централизованный нагрев для поддержки обработки стекла сложной формы. Элементы W-образной формы подходят для больших формовочных печей для обеспечения равномерности температуры стеклянных пластин большой площади.

SiO_2 и поверхностное покрытие поддерживают длительную работу элементов в окислительной атмосфере, а термостойкость адаптируется к частым термическим циклам. Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, а для электрических соединений используется пропорциональная управляющая мощность для достижения точного контроля температуры. Эксплуатация должна быстро проходить через диапазон температур «чумы», а техническое обслуживание включает проверку пленки SiO_2 и очистку печи, чтобы избежать загрязнения. Элементы MoSi_2 повышают точность и эффективность обработки стекла и широко используются в производстве стеклянной тары, витринного стекла и архитектурного стекла.

8.6 Применение нагревательных элементов MoSi_2 при получении новых энергетических материалов

из дисилицида молибдена (MoSi_2) играют важную роль в подготовке новых энергетических материалов благодаря их превосходным высокотемпературным характеристикам, стойкости к окислению и электротермической стабильности. Они широко используются в сценариях с высоким спросом, таких как спекание материалов литиевых батарей, водородная энергетика и процессы, связанные с топливными элементами. Элементы MoSi_2 могут достигать превосходной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стойкости к окислению благодаря защитной пленке SiO_2 , образованной на поверхности в окислительной атмосфере, которая подходит для длительной высокотемпературной работы. В то же время их положительные температурные коэффициенты сопротивления обеспечивают точный контроль температуры и равномерное распределение теплового поля. Эти характеристики позволяют им соответствовать требованиям чистой среды, высокоточного контроля температуры и стойкости к термическому циклу при подготовке новых энергетических материалов.

Элементы MoSi_2 имеют различные структуры, такие как U-тип, W-тип, спиральный тип и прямой стержневой тип, которые могут быть настроены в соответствии с различными требованиями к оборудованию. U-тип и спиральный тип подходят для небольших высокоточных печей для спекания, а W-тип и прямой стержневой тип подходят для большого непрерывного производственного оборудования. Кронштейны из высокочистого оксида алюминия используются во время установки, чтобы соответствовать характеристикам теплового расширения MoSi_2 и снизить механическое напряжение и концентрацию теплового напряжения. Для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением, а стабильная работа достигается с помощью пропорционального управления питанием. Во время работы необходимо быстро пройти через диапазон температур «болезни», чтобы избежать образования не защищающих оксидов. Поверхностные покрытия (такие как SiC или Al_2O_3) дополнительно повышают термостойкость и коррозионную стойкость, а также продлевают срок службы компонентов. Регулярное техническое обслуживание включает проверку целостности пленки SiO_2 , состояния соединения холодного конца и чистоты печи, чтобы гарантировать отсутствие загрязнения примесями и соответствовать строгим требованиям к подготовке новых энергетических материалов. Элементы MoSi_2 обеспечивают надежную поддержку повышения производительности и эффективности производства новых энергетических материалов за счет оптимизации конструкции теплового поля и рабочих параметров.

8.6.1 Спекание материалов литиевых аккумуляторов

MoSi_2 широко используются при подготовке материалов положительного электрода, отрицательного электрода и твердого электролита в процессе спекания материалов литиевых батарей и используются для производства ключевых материалов, таких как оксид лития-кобальта, тройные материалы никеля-кобальта-марганца, фосфат лития-железа, отрицательный электрод графита и твердооксидный электролит. Спекание материалов литиевых батарей необходимо проводить при высоких температурах, чтобы способствовать росту кристаллов, улучшить плотность материала и электрохимические свойства. Высокая плотность мощности и возможности точного контроля температуры элементов MoSi_2 могут удовлетворить эти высокие требования. U-образные и спиральные элементы MoSi_2 подходят для небольших лабораторных печей для спекания, подходящих для разработки новых материалов для батарей или мелкосерийного производства, обеспечивая централизованный нагрев для обеспечения высокой точности процесса. W-образные и прямые стержневые элементы подходят для больших промышленных печей для спекания, которые могут охватывать широкую область нагрева и обеспечивать равномерное тепловое поле для поддержки крупномасштабного производства.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Защитная пленка SiO_2 остается стабильной в окислительной атмосфере, обеспечивая стойкость компонентов к окислению во время процесса спекания. Поверхностное покрытие (например, SiC или Al_2O_3) повышает стойкость к тепловому удару и коррозионную стойкость и адаптируется к летучим газам или следам коррозионных атмосфер (например, летучим веществам, содержащим соединения лития), которые могут существовать во время процесса спекания. Во время установки компоненты фиксируются кронштейнами из высокочистого оксида алюминия, вертикально подвешенными или горизонтально поддерживаемыми для снижения механического напряжения. Электрическое соединение использует зажим с низким сопротивлением, а пропорциональный источник питания управления используется для достижения точного контроля температуры. Операция требует строгого контроля атмосферы в печи, чтобы избежать разрушения пленки SiO_2 из-за восстановительной или высоковлажной среды, и быстро пройти через температурный диапазон «чумы», чтобы предотвратить образование не защитных оксидов. Техническое обслуживание включает в себя регулярный осмотр состояния поверхности компонентов, холодных конечных соединений и чистоты печи, а также удаление примесей, которые могут повлиять на чистоту материалов (например, оксидов щелочных металлов). Компоненты MoSi_2 оптимизируют конструкцию теплового поля и рабочие параметры, чтобы гарантировать, что материалы литевых батарей получают превосходную кристаллическую структуру и электрохимические свойства в процессе спекания, значительно улучшая емкость, срок службы и безопасность батарей. Они широко используются в электромобилях, системах хранения энергии и бытовой электронике.

8.6.2 Водородная энергетика и топливные элементы

MoSi_2 в основном используются при спекании материалов твердооксидных топливных элементов (SOFC), в процессе подготовки реакторов для производства водорода и высокотемпературных компонентов электролизеров, а также используются для производства электролитов, анодов, катодных материалов и высокотемпературных носителей катализаторов. Подготовка материалов для водородной энергетика и топливных элементов требует спекания или термической обработки при высоких температурах для оптимизации микроструктуры и производительности материалов. Стабильные высокотемпературные характеристики и равномерное распределение теплового поля элементов MoSi_2 могут соответствовать этим технологическим требованиям. Спиральные и U-образные элементы MoSi_2 подходят для небольших экспериментальных печей, подходят для разработки новых материалов топливных элементов или катализаторов и обеспечивают локальные высокие температуры для поддержки высокоточных процессов спекания или термической обработки. Элементы W-типа и прямые стержневые подходят для крупных промышленных печей для крупномасштабного производства компонентов SOFC или компонентов оборудования для производства водорода, чтобы обеспечить однородность теплового поля для уменьшения дефектов материала.

SiO_2 обеспечивает надежную защиту от окисления в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие (например, Al_2O_3 или SiC) повышает термостойкость и коррозионную стойкость, а также адаптируется к сложной атмосфере (например, водяному пару или следовым

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

восстановительным газам), которая может быть вовлечена в спекание материалов топливных элементов. При подготовке реакторов для производства водорода или компонентов электролизера элементы MoSi_2 поддерживают спекание или термическую обработку высокотемпературных носителей катализатора для обеспечения высокой активности и стабильности катализатора. Во время установки элементы фиксируются кронштейнами из высокочистого оксида алюминия, а для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением. Пропорциональный источник питания управления используется для достижения точного контроля температуры в соответствии с требованиями материалов SOFC для строгих температурных кривых. Операция требует контроля атмосферы печи, чтобы избежать повреждения мембраны SiO_2 высоковосстановительной средой и быстрого прохождения через диапазон температур «чумы», чтобы предотвратить окислительное повреждение. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр мембраны SiO_2 , соединения холодного конца и чистоты печи, чтобы гарантировать отсутствие загрязнения примесями, влияющих на эксплуатационные характеристики материала. Компоненты MoSi_2 улучшают электрохимические характеристики материалов топливных элементов и эффективность оборудования для производства водорода за счет оптимизации тепловых полей и параметров процесса. Они широко используются в чистой энергии, производстве водорода в промышленности и преобразовании энергии, оказывая важную поддержку коммерческому развитию технологии водородной энергетики.

8.7 Применение нагревательных элементов MoSi_2 в защите окружающей среды и катализе

из дисилицида молибдена (MoSi_2) широко используются при очистке отходящих газов, регенерации катализаторов и восстановлении ресурсов твердых отходов в области защиты окружающей среды и катализа благодаря их превосходным высокотемпературным характеристикам, стойкости к окислению и электротермической стабильности. Элементы MoSi_2 могут достигать превосходной стойкости к окислению благодаря защитной пленке SiO_2 , образованной на поверхности в окислительной атмосфере, и подходят для длительной высокотемпературной эксплуатации. Его положительные температурные коэффициенты сопротивления обеспечивают точный контроль температуры и равномерное распределение теплового поля, отвечая требованиям защиты окружающей среды и каталитических процессов для высоких температур, чистой среды и коррозионной стойкости. U-образные, W-образные, спиральные и прямые стержневые элементы MoSi_2 изготавливаются в соответствии с требованиями оборудования. U-образные и спиральные типы подходят для небольших высокоточных реакторов, а W-образные и прямые стержневые типы подходят для большого непрерывного технологического оборудования. Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, чтобы соответствовать характеристикам теплового расширения MoSi_2 и снизить механические и термические напряжения. Для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением, а стабильная работа достигается с помощью пропорциональных источников питания. Операция должна быстро проходить через температурный диапазон «болезни», чтобы избежать образования не защищающих оксидов. Покрытие поверхности (например, SiC или Al_2O_3) дополнительно повышает стойкость к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тепловому удару и коррозионную стойкость и продлевает срок службы компонентов. Регулярное техническое обслуживание включает проверку целостности пленки SiO_2 , состояния соединения холодного конца и чистоты печи, чтобы гарантировать отсутствие загрязнения примесями и соответствие высоким стандартам в области защиты окружающей среды и катализа. Элементы MoSi_2 обеспечивают ключевую поддержку эффективности и надежности очистки отработавших газов, регенерации катализатора и использования ресурсов твердых отходов за счет оптимизации конструкции теплового поля и рабочих параметров.

8.7.1 Очистка отходящих газов

MoSi_2 используются в высокотемпературных мусоросжигательных печах, печах каталитического окисления и печах пиролиза в процессе очистки отходящих газов для очистки промышленных отходящих газов, летучих органических соединений (ЛОС) и вредных газов (таких как NO_x , SO_x). Очистка отходящих газов требует высокой температуры для разложения вредных компонентов или стимулирования каталитических реакций. Высокая плотность мощности и возможность точного регулирования температуры элементов MoSi_2 гарантируют, что реактор достигает требуемой температуры и поддерживает равномерное тепловое поле, способствуя эффективному разложению и преобразованию отходящих газов. Элементы MoSi_2 W-типа и прямые стержневые элементы подходят для больших печей очистки отходящих газов, охватывая широкую область нагрева и поддерживая непрерывную очистку отходящих газов. Элементы U-типа и спиральные элементы подходят для небольших или лабораторных печей, подходят для высокоточных экспериментов или мелкомасштабной обработки. Защитная пленка SiO_2 остается стабильной в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие повышает термостойкость и коррозионную стойкость, адаптируясь к едким газам (таким как хлориды или сульфиды), которые могут присутствовать в отходящем газе. Во время установки элемент фиксируется кронштейном из высокочистого оксида алюминия, а электрическое соединение использует зажим с низким сопротивлением, который согласован с пропорциональным источником питания для достижения точного контроля температуры. Операция должна контролировать атмосферу в печи, чтобы избежать повреждения пленки SiO_2 высоковосстановительной средой и быстро проходить через температурный диапазон «болезни», чтобы предотвратить повреждение окислением. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр состояния поверхности компонентов и чистоты печи, а также удаление примесей, которые могут повлиять на эффект обработки. Компоненты MoSi_2 повышают эффективность разложения и уровень соответствия выбросов при очистке отходящих газов и широко используются в химической, энергетической и природоохранной промышленности.

8.7.2 Регенерация катализатора

MoSi_2 используются в высокотемпературных регенеративных печах и печах термической обработки в процессе регенерации катализаторов для восстановления активности катализаторов, таких как катализаторы каталитического крекинга в нефтехимии, катализаторы селективного каталитического восстановления (SCR) в области защиты окружающей среды и промышленные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

катализаторы (например, катализаторы на основе драгоценных металлов). После длительного использования катализатор будет дезактивирован из-за отложения углеродистых материалов, сульфидов или других отравляющих веществ на поверхности. Процесс регенерации должен сжигать эти отложения при высоких температурах, защищая микроструктуру и активные центры катализатора для восстановления его каталитических характеристик. Высокая плотность мощности и точные возможности регулирования температуры элементов MoSi_2 могут обеспечить стабильную высокотемпературную среду для обеспечения эффективности процесса регенерации и восстановления производительности катализатора.

U-образные и спиральные элементы MoSi_2 подходят для небольших регенеративных печей, подходят для лабораторных или мелкомасштабных процессов регенерации, обеспечивая централизованное отопление для поддержки высокоточного контроля температуры и отвечая потребностям конкретных катализаторов для строгих температурных кривых. W-образные и прямые стержневые элементы MoSi_2 подходят для крупных промышленных регенеративных печей, которые могут охватывать широкую область нагрева, обеспечивать равномерное тепловое поле для поддержки пакетной обработки катализатора и обеспечивать постоянство эффектов регенерации. Защитная пленка SiO_2 остается стабильной в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие (такое как SiC или Al_2O_3) повышает термостойкость и коррозионную стойкость и адаптируется к едким газам (таким как серосодержащие или хлорсодержащие атмосферы) или частым термическим циклам, которые могут существовать в процессе регенерации.

Во время установки элемент фиксируется кронштейном из высокочистого оксида алюминия, вертикально подвешивается или горизонтально поддерживается для снижения механического напряжения, а электрическое соединение использует зажим с низким сопротивлением, а пропорциональный источник питания управления используется для достижения точного контроля температуры. Операция требует строгого контроля атмосферы печи, чтобы избежать разрушения пленки SiO_2 средой с высоким восстановлением и быстрого прохождения через диапазон температур «чумы», чтобы предотвратить образование не защищающих оксидов. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр состояния поверхности элемента, соединения холодного конца и чистоты печи, а также удаление примесей (таких как оксиды металлов), которые могут повлиять на чистоту катализатора. Элементы MoSi_2 оптимизируют тепловое поле и параметры процесса для обеспечения высокой эффективности и эффекта восстановления активности регенерации катализатора и продления срока службы катализатора. Они широко используются в областях нефтехимии, охраны окружающей среды и промышленного катализа.

8.7.3 Использование ресурсов твердых отходов

MoSi_2 используются в высокотемпературных печах пиролиза, мусоросжигательных печах и печах спекания в процессах переработки твердых отходов для обработки промышленных твердых отходов, городского мусора, опасных отходов и извлечения ценных материалов (таких как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

металлы, керамика или стекло). Переработка твердых отходов требует высоких температур для разложения органических веществ, испарения вредных веществ или спекания компонентов твердых отходов для образования повторно используемых материалов. Стабильные высокотемпературные характеристики и равномерное распределение теплового поля элементов MoSi_2 могут соответствовать этим технологическим требованиям. Элементы MoSi_2 W-типа и прямые стержневые элементы подходят для больших печей пиролиза или сжигания, охватывая широкую область нагрева, поддерживая непрерывную обработку твердых отходов и обеспечивая эффективность и последовательность процесса пиролиза или спекания. Элементы MoSi_2 U-типа и спиральные элементы подходят для небольших экспериментальных печей или ресурсной обработки определенных твердых отходов, подходят для высокоточных процессов или целей НИОКР и обеспечивают централизованное отопление для оптимизации условий реакции. Защитная пленка SiO_2 обеспечивает надежную защиту от окисления в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие повышает стойкость к тепловому удару и коррозионную стойкость, адаптируясь к сложной атмосфере, которая может быть вовлечена в обработку твердых отходов (например, хлор, сера или летучие вещества тяжелых металлов). Во время установки компоненты фиксируются кронштейнами из высокочистого оксида алюминия, а для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением. Пропорциональный источник питания управления используется для достижения точного контроля температуры, чтобы соответствовать требованиям контроля использования ресурсов твердых отходов для определенных температурных кривых. Операция требует контроля атмосферы в печи, чтобы избежать повреждения пленки SiO_2 высоковосстановительной средой и быстрого прохождения через температурный диапазон «чумы» для предотвращения окислительного повреждения. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр пленки SiO_2 , соединения холодного конца и чистоты печи, а также удаление примесей, которые могут повлиять на качество продукции на основе ресурсов. Компоненты MoSi_2 способствуют эффективному разложению, восстановлению материалов и использованию ресурсов твердых отходов, обеспечивая надежную высокотемпературную среду, и широко используются в сфере защиты окружающей среды, экономики замкнутого цикла и отраслей переработки ресурсов.

8.8 Применение нагревательных элементов MoSi_2 в других областях

из дисилицида молибдена (MoSi_2) продемонстрировали уникальную ценность для применения в высокотехнологичных областях, таких как аэрокосмическая и ядерная промышленность, благодаря своим превосходным высокотемпературным характеристикам, стойкости к окислению и электротермической стабильности. Элементы MoSi_2 могут достигать превосходной стойкости к окислению благодаря защитной пленке SiO_2 , образованной на поверхности в окислительной атмосфере, что подходит для длительной высокотемпературной эксплуатации. Его положительные температурные коэффициенты сопротивления обеспечивают точный контроль температуры и равномерное распределение теплового поля, отвечая требованиям сложных рабочих условий для высокой температуры, чистой среды и стойкости к термическому циклу. U-образные, W-образные, спиральные и прямые стержневые элементы MoSi_2 изготавливаются в соответствии с требованиями оборудования. U-образные и спиральные типы подходят для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

небольших высокоточных печей, а W-образные и прямые стержневые типы подходят для крупных испытаний или вспомогательного оборудования.

Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, чтобы соответствовать характеристикам теплового расширения MoSi_2 и снизить механическое и термическое напряжение. Для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением, а стабильная работа достигается с помощью пропорционального управления питанием. Операция должна быстро проходить через диапазон температур «болезни», чтобы избежать образования не защитных оксидов. Поверхностное покрытие (например, SiC или Al_2O_3) дополнительно повышает стойкость к тепловому удару и коррозионную стойкость и продлевает срок службы компонента. Регулярное техническое обслуживание включает проверку целостности пленки SiO_2 , состояния соединения холодного конца и чистоты печи, чтобы гарантировать отсутствие загрязнения примесями для соответствия строгим требованиям аэрокосмической и ядерной промышленности. Элементы MoSi_2 обеспечивают надежную поддержку для испытания материалов и эксплуатации оборудования в области высоких технологий за счет оптимизации конструкции теплового поля и рабочих параметров.

8.8.1 Испытания аэрокосмических материалов

MoSi_2 используются в высокотемпературных испытательных печах, печах для испытаний термических циклов и оборудовании для моделирования окружающей среды в испытаниях аэрокосмических материалов для проверки характеристик ключевых аэрокосмических материалов, таких как высокотемпературные сплавы, керамические матричные композиты и композиты на основе углеродного волокна. Аэрокосмические материалы должны проходить механические, термические и химические испытания эксплуатационных характеристик в условиях экстремально высоких температур для проверки их надежности в двигателях, лопатках турбин или системах тепловой защиты космических аппаратов.

Высокая плотность мощности и точные возможности регулирования температуры элементов MoSi_2 позволяют имитировать эти суровые условия. U-образные и спиральные элементы MoSi_2 подходят для небольших испытательных печей, обеспечивая централизованный нагрев для поддержки высокоточных испытаний, подходят для экспериментов по термическому воздействию или термическому циклу образцов небольшого размера. W-образные и прямые стержневые элементы подходят для больших испытательных печей, которые могут охватывать широкую область нагрева и обеспечивать равномерное тепловое поле для испытания крупных структурных деталей. Защитная пленка SiO_2 остается стабильной в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие повышает стойкость к тепловому удару и коррозионную стойкость, адаптируясь к окислительным или следовым коррозионным атмосферам, которые могут быть задействованы в испытании.

Во время установки элемент фиксируется кронштейном из высокочистого оксида алюминия, а электрическое соединение использует зажим с низким сопротивлением, который согласован с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пропорциональным источником питания для достижения точного управления температурной кривой. Операция требует строгого контроля атмосферы печи, чтобы избежать повреждения пленки SiO_2 восстановительной средой и быстрого прохождения через температурный диапазон «болезни», чтобы предотвратить повреждение окислением. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр состояния поверхности компонента, соединения холодного конца и чистоты печи, чтобы гарантировать, что никакие примеси не повлияют на результаты испытаний. Компоненты MoSi_2 поддерживают высокоточные испытания материалов для аэрокосмической отрасли, обеспечивая стабильную высокотемпературную среду и надежные характеристики термического цикла, предоставляя ключевые данные для разработки и сертификации материалов.

8.8.2 Вспомогательное оборудование атомной промышленности

MoSi_2 используются в высокотемпературных печах спекания, печах термической обработки и экспериментальных реакторах во вспомогательном оборудовании ядерной промышленности для подготовки ядерных топливных элементов, реакторных материалов и испытаний и обработки связанной высокотемпературной керамики или сплавов. Ядерная промышленность предъявляет чрезвычайно высокие требования к контролю температуры, чистоте и долговременной стабильности оборудования. Стабильные высокотемпературные характеристики и равномерное распределение теплового поля элементов MoSi_2 могут удовлетворить эти требования. U-образные и спиральные элементы MoSi_2 подходят для небольших экспериментальных печей, подходят для спекания и термической обработки частиц ядерного топлива или небольших реакторных материалов и обеспечивают высокоточный контроль температуры для обеспечения эксплуатационных характеристик материала. W-образные и прямые стержневые элементы подходят для большого вспомогательного оборудования, такого как печи для спекания ядерных топливных стержней или печи для термической обработки компонентов реактора, обеспечивая равномерный нагрев большой площади для поддержки массового производства.

пленка SiO_2 и поверхностное покрытие гарантируют, что компоненты могут работать в течение длительного времени в окислительной атмосфере или слегка коррозионной среде, а термостойкость может адаптироваться к частым термическим циклам. Для установки используются кронштейны из высокочистого оксида алюминия, а для электрических соединений используется пропорциональная управляющая мощность для достижения точного контроля температуры, чтобы соответствовать требованиям ядерной промышленности к строгим параметрам процесса. Для работы требуется контроль атмосферы печи, чтобы избежать повреждения пленки SiO_2 высоковосстановительной средой и быстрого прохождения через диапазон температур «чумы» для предотвращения окислительного повреждения. Техническое обслуживание включает регулярные проверки пленки SiO_2 , соединений холодного конца и чистоты печи, чтобы гарантировать отсутствие загрязнения примесями, влияющих на качество ядерных материалов. Элементы MoSi_2 поддерживают подготовку и проверку производительности ключевых материалов в ядерной промышленности, обеспечивая надежную высокотемпературную среду, предоставляя важные гарантии безопасности и эффективности ядерной энергетической технологии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.8.3 Высокотемпературная синтетическая химия

MoSi₂ используются в реакторах и экспериментальных печах в высокотемпературной синтетической химии для синтеза высокотемпературной керамики, интерметаллических соединений, функциональных материалов и высокоэффективных химикатов. Высокотемпературная синтетическая химия требует проведения реакций в строго контролируемых температурных условиях для обеспечения чистоты, кристаллической структуры и химических свойств продуктов. Высокая плотность мощности и точные возможности контроля температуры элементов MoSi₂ могут обеспечить стабильную реакционную среду. U-образные и спиральные элементы MoSi₂ подходят для небольших экспериментальных печей, подходят для лабораторного химического синтеза или новых исследований и разработок материалов, обеспечивая централизованный нагрев для высокоточного контроля температуры. W-образные и прямые стержневые элементы подходят для больших реакторов, поддерживая промышленное химическое или материальное производство, обеспечивая однородность теплового поля для снижения неравномерности реакций.

SiO₂ остается стабильной в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие (такое как SiC или Al₂O₃) повышает термостойкость и коррозионную стойкость, а также адаптируется к едким газам или летучим продуктам, которые могут присутствовать в процессе синтеза. Во время установки компоненты фиксируются кронштейнами из высокочистого оксида алюминия, а для электрических соединений используются зажимы с низким сопротивлением, а для достижения точного управления температурной кривой используется источник питания с пропорциональным управлением. Операция требует контроля атмосферы в печи, чтобы избежать разрушения пленки SiO₂ высоковосстановительной средой и быстрого прохождения через температурный диапазон «чумы» для предотвращения окислительного повреждения. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр состояния поверхности компонента, соединения холодного конца и чистоты печи, чтобы гарантировать отсутствие загрязнения примесями, которое влияет на качество синтезированного продукта. Компоненты MoSi₂ поддерживают эффективные реакции и качество продукта в высокотемпературной синтетической химии, обеспечивая надежную высокотемпературную среду, и широко используются в передовых материалах и химической промышленности.

8.8.4 Трансформатор со стержнем MoSi₂

MoSi₂ используются в качестве высокотемпературных источников нагрева в трансформаторных приложениях для испытания материалов трансформаторов, термообработки изоляционных материалов и высокотемпературных процессов в процессе производства. Производство трансформаторов включает высокотемпературную обработку листов кремнистой стали, изоляционной керамики или других материалов, устойчивых к высоким температурам. Стабильные высокотемпературные характеристики и равномерное распределение теплового поля элементов MoSi₂ могут соответствовать этим технологическим требованиям. U-образные и спиральные элементы MoSi₂ подходят для небольших печей термообработки, подходят для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

локального нагрева компонентов трансформатора или лабораторных испытаний и обеспечивают высокоточный контроль температуры для оптимизации свойств материала. W-образные и прямые стержневые элементы подходят для больших промышленных печей для отжига листов кремнистой стали или спекания изоляционных материалов, поддерживая массовое производство и обеспечивая однородность теплового поля. Защитная пленка SiO_2 обеспечивает надежную защиту от окисления в окислительной атмосфере, а поверхностное покрытие повышает стойкость к тепловому удару и коррозионную стойкость, адаптируясь к следам коррозионной атмосферы, которая может присутствовать в производстве трансформаторов. Установка использует кронштейн из высокочистого оксида алюминия, а электрическое соединение использует пропорциональный источник питания для достижения точного контроля температуры и обеспечения стабильности параметров процесса. Операция должна быстро проходить через диапазон температур «болезни», чтобы избежать повреждения окислением. Техническое обслуживание включает регулярный осмотр пленки SiO_2 , соединения холодного конца и чистоты печи, чтобы гарантировать, что никакие примеси не влияют на качество материала. Компоненты MoSi_2 обеспечивают надежную высокотемпературную среду, поддерживают термическую обработку и оптимизацию производительности ключевых материалов в производстве трансформаторов, повышают эффективность и надежность трансформаторов и широко используются в области производства энергетического оборудования.



CTIA GROUP LTD Молибденовый силикатный стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 9 Сравнение нагревательных элементов MoSi₂ с другими нагревательными материалами

из дисилицида молибдена (MoSi₂) широко используются в высокотемпературном нагреве благодаря своим превосходным высокотемпературным характеристикам, стойкости к окислению и электротермической стабильности. По сравнению с другими распространенными нагревательными материалами, такими как вольфрам и карбид кремния (SiC), элементы MoSi₂ обладают уникальными преимуществами в стойкости к окислению, диапазоне рабочих температур и технологической адаптивности, но у них также есть определенные ограничения. В этой главе сравниваются характеристики нагревательных элементов MoSi₂ с вольфрамовыми нагревательными элементами и элементами из карбида кремния, анализируются их различия в стоимости, эффективности и адаптивности к применению, а также даются рекомендации по выбору подходящих нагревательных материалов для различных рабочих условий. Элементы MoSi₂ следует устанавливать с кронштейнами из высокочистого оксида алюминия для соответствия характеристикам теплового расширения, а для электрических соединений следует использовать зажимы с низким сопротивлением, с пропорциональным управлением питанием для обеспечения стабильности. Эксплуатация должна быстро проходить через температурный диапазон «чумы», чтобы избежать образования не защищающих оксидов, а поверхностные покрытия (такие как SiC или Al₂O₃) могут повысить термостойкость и коррозионную стойкость. Регулярное техническое обслуживание включает проверку целостности пленки SiO₂ и состояния соединения холодного конца, чтобы убедиться в отсутствии загрязнения примесями.

9.1 Сравнение с вольфрамовыми нагревательными элементами

MoSi₂ и вольфрамовые нагревательные элементы имеют свои собственные преимущества в высокотемпературных приложениях, но существуют значительные различия в применимых сценариях и эксплуатационных характеристиках. Элементы MoSi₂ могут достигать превосходной стойкости к окислению благодаря защитной пленке SiO₂, образованной на поверхности в окислительной атмосфере, что подходит для длительной эксплуатации. Максимальная рабочая температура может достигать 1850 °C и широко используется в процессах в окислительных средах, таких как спекание керамики, плавка стекла и производство полупроводников. Положительные температурные коэффициенты удельного сопротивления MoSi₂ позволяют ему адаптивно регулировать мощность и обеспечивать стабильный контроль температуры, что подходит для приложений, требующих высокоточного контроля температуры. Он имеет умеренный коэффициент теплового расширения, хорошую стойкость к тепловому удару, может выдерживать частые тепловые циклы и подходит для U-образных, W-образных или спиральных структурных конструкций. Процесс производства элементов MoSi₂ (например, порошковая металлургия и изостатическое прессование) позволяет гибко настраивать формы для удовлетворения сложных требований печи. Однако MoSi₂ склонен к образованию не обладающих защитными свойствами оксидов в диапазоне температур «чумы» 400–700 °C, и для предотвращения деградации материала требуется быстрое повышение и понижение температуры, а для защиты пленки SiO₂ рабочую температуру необходимо понижать в восстановительной или вакуумной среде .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Напротив, вольфрамовые нагревательные элементы известны своей чрезвычайно высокой температурой плавления и превосходной механической прочностью, что делает их пригодными для сверхвысокотемпературных применений (например, термообработка металлов в вакууме или инертной атмосфере). Вольфрамовые элементы очень восприимчивы к окислению в окислительной атмосфере и должны работать под защитой вакуума или инертного газа, что ограничивает их использование в окислительных средах. Вольфрам имеет низкое удельное сопротивление и меньше изменяется с температурой, что делает его пригодным для сценариев, требующих высокой выходной мощности, но точность его регулирования температуры ниже, чем у MoSi_2 , что требует более сложной системы регулирования мощности. Вольфрамовые элементы имеют низкий коэффициент теплового расширения и плохую стойкость к тепловому удару. Частые тепловые циклы могут привести к хрупкому разрушению, ограничивая их применение при динамических тепловых нагрузках. Вольфрамовые элементы имеют высокие затраты на производство и обработку и их трудно настраивать по форме. В основном они представляют собой проволочные или стержневые конструкции, что ограничивает гибкость проектирования сложных типов печей. Кроме того, вольфрам имеет высокую плотность, что приводит к увеличению веса элемента и усложнению конструкции его установки и опоры.

Сравнение MoSi_2 и вольфрама показывает, что MoSi_2 имеет лучшую стойкость к окислению и точность регулирования температуры в окислительной атмосфере и подходит для таких отраслей промышленности, как производство керамики, стекла и полупроводников, в то время как вольфрам больше подходит для сверхвысокотемпературных применений (например, высокотемпературной плавки сплавов) в вакууме или инертной атмосфере. Выбор должен основываться на технологической среде, температурных требованиях и частоте термического цикла. Долговременная стабильность и гибкость MoSi_2 в окислительной среде делают его более выгодным в большинстве высокотемпературных печей.

9.2 Сравнение с компонентами из карбида кремния

Нагревательные элементы MoSi_2 и нагревательные элементы из карбида кремния (SiC) являются распространенным выбором в области высокотемпературного нагрева, но существуют очевидные различия в производительности и сценариях применения. Элементы MoSi_2 демонстрируют отличную стойкость к окислению в окислительной атмосфере благодаря поверхностной защитной пленке SiO_2 , а максимальная рабочая температура может достигать 1850°C , что подходит для высокоточных высокотемпературных процессов, таких как спекание керамики, плавка стекла и эпитаксиальный рост полупроводников. Его положительные характеристики удельного температурного коэффициента поддерживают адаптивное регулирование мощности, обеспечивают точный контроль температуры и подходят для приложений, требующих стабильного теплового поля. MoSi_2 имеет умеренный коэффициент теплового расширения, хорошую стойкость к тепловому удару и может выдерживать частые тепловые циклы. U-образные, W-образные и спиральные структуры подходят для различных конструкций печей. Процесс производства элементов MoSi_2 является гибким, и сложные формы могут быть изготовлены с помощью порошковой металлургии и изостатического прессования для удовлетворения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

индивидуальных потребностей. Однако MoSi_2 склонен к неэффективному окислению в диапазоне температур «чумы», требуя быстрого повышения и понижения температуры, а рабочую температуру необходимо понижать в восстановительной или вакуумной среде для защиты пленки SiO_2 .

SiC известны своей высокой твердостью, износостойкостью и химической стабильностью и широко используются в промышленных печах и средне- и высокотемпературных процессах. Элементы SiC также могут образовывать защитную пленку SiO_2 в окислительной атмосфере и обладают хорошей стойкостью к окислению, но их максимальная рабочая температура обычно ниже, чем у MoSi_2 , и подходят для процессов при 1300-1600 °C. Удельное сопротивление SiC более сложно изменяется с температурой, показывая характеристику отрицательного температурного коэффициента (сопротивление уменьшается при высоких температурах), что может привести к нестабильной выходной мощности, и для поддержания однородности температуры требуется точная система управления. Элементы SiC имеют более низкий коэффициент теплового расширения и немного устойчивы к тепловому удару, чем MoSi_2 . Частые тепловые циклы могут вызвать микротрещины, особенно в крупных элементах. Процесс изготовления элементов SiC (например, реакционное спекание или перекристаллизация) ограничивает сложность формы, которая обычно имеет форму стержня или трубки, а гибкость настройки ниже, чем у MoSi_2 . Кроме того, элементы SiC могут подвергаться локальной коррозии в агрессивных средах, содержащих серу или галогены, что требует дополнительных мер защиты поверхности.

Сравнение MoSi_2 и SiC показывает, что MoSi_2 имеет преимущества в более высоких температурных диапазонах и сценариях точного контроля температуры и подходит для высокотехнологичных отраслей, таких как производство полупроводников и специальной керамики, в то время как SiC больше подходит для средне- и высокотемпературных, чувствительных к затратам промышленных применений, таких как термическая обработка металлов и традиционное спекание керамики. При выборе необходимо учитывать температуру процесса, атмосферные условия и требования к термическому циклу.

9.3 Анализ стоимости нагревательного элемента, эффективности и пригодности к применению

Различия в стоимости, эффективности и пригодности для применения нагревательных элементов MoSi_2 , вольфрама и SiC напрямую влияют на их выбор в различных отраслях промышленности. Стоимость производства элементов MoSi_2 умеренная, а процессы порошковой металлургии и изостатического прессования являются зрелыми, что позволяет производить сложные формы (например, U-образные, W-образные, спиральные) для удовлетворения потребностей разнообразных типов печей. MoSi_2 имеет высокую эксплуатационную эффективность, а его положительные температурные коэффициенты сопротивления поддерживают адаптивное регулирование мощности, сокращают потери энергии и подходят для сценариев, требующих точного контроля температуры и длительной эксплуатации, таких как спекание керамики,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обработка стекла и производство полупроводников. MoSi_2 имеет превосходную стойкость к окислению в окислительной атмосфере и низкие затраты на техническое обслуживание, но ему необходимо быстро пройти через диапазон температур «чумы», чтобы избежать повреждения окислением, а поверхностные покрытия могут дополнительно продлить его срок службы. Элементы MoSi_2 имеют широкий спектр применения и подходят для высокотемпературных процессов в окислительной атмосфере, однако в восстановительной или вакуумной среде температуру необходимо понижать, что ограничивает их применение в некоторых видах сверхвысокотемпературной обработки металлов.

Стоимость производства вольфрамовых нагревательных элементов относительно высока из-за сложности обработки из-за его материала с высокой температурой плавления, и большинство из них имеют форму проволоки или стержней, поэтому изготовление сложных форм обходится дорого. Вольфрам имеет более высокую эффективность работы в вакууме или инертной атмосфере, что подходит для сверхвысокотемпературных применений (например, плавка высокотемпературных сплавов), но он очень легко окисляется в окислительной атмосфере, требуя дополнительной системы контроля атмосферы, что увеличивает расходы на эксплуатацию и обслуживание. Вольфрамовые элементы имеют низкую стойкость к тепловому удару, и частые тепловые циклы могут привести к трещинам. Стоимость обслуживания высока. Он подходит для сцен с чрезвычайно высокими требованиями к высокотемпературной и вакуумной среде, например, для испытаний материалов в аэрокосмической отрасли, но диапазон применения узок из-за ограничений атмосферы.

SiC имеют относительно низкую стоимость производства и относительно простой процесс реакционного спекания, что делает их пригодными для крупномасштабного производства стержневых или трубчатых элементов. Эффективность работы SiC высока в диапазоне средних и высоких температур, но его отрицательные температурные коэффициенты сопротивления могут привести к нестабильности мощности, требуя сложной системы управления для поддержания однородности температуры, что увеличивает эксплуатационные расходы. Элементы SiC имеют хорошую стойкость к окислению в окислительной атмосфере, но могут испытывать локальную деградацию в коррозионной атмосфере и имеют умеренные затраты на техническое обслуживание.



CTIA GROUP LTD Кремний-молибденовый стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

Molybdenum disilicide (MoSi₂) heating elements are high-performance ceramic electric heating materials widely used in industrial furnace applications. In high-temperature oxidizing atmospheres, MoSi₂ forms a dense silica (SiO₂) protective layer on its surface, which effectively prevents further oxidation. It exhibits excellent oxidation resistance and thermal stability, allowing stable operation under high temperatures for extended periods.

2. Features of MoSi₂ Heating Element

Low thermal expansion coefficient: Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.

Excellent oxidation resistance: Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.

Extremely high working temperature: Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.

Good high-temperature electrical resistance characteristics: MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

Model (d1/d2)	Hot End Diameter (d1)	Cold End Diameter (d2)	Hot Zone Length (Le)	Cold Zone Length (Lu)	Common Types
φ3/6	3 mm	6 mm	100–300 mm	150–250 mm	Straight / U-type
φ4/9	4 mm	9 mm	100–500 mm	200–300 mm	Straight / U-type
φ6/12	6 mm	12 mm	100–600 mm	200–350 mm	Straight / U-type / W-type
φ9/18	9 mm	18 mm	150–800 mm	250–400 mm	Straight / U-type / W-type
φ12/24	12 mm	24 mm	200–1000 mm	300–500 mm	Straight / U-type / W-type

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries

Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals

High-temperature laboratory furnaces

Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 10. Соответствующие стандарты и спецификации для нагревательных элементов MoSi₂

из дисилицида молибдена (MoSi₂) должны соответствовать строгим стандартам и спецификациям для обеспечения качества продукции, стабильности производительности и безопасности процесса. Во всем мире национальные стандарты Китая, международные стандарты и соответствующие стандарты Европы, Америки, Японии и Южной Кореи предоставляют техническое руководство по производству и использованию нагревательных элементов MoSi₂. Эти стандарты охватывают химический состав, физические свойства, производственный процесс, методы испытаний и спецификации применения материала. В этой главе подробно представлены китайские национальные стандарты, международные стандарты и соответствующие стандарты Европы, Америки, Японии и Южной Кореи для нагревательных элементов MoSi₂ с целью предоставления справочной информации для производителей, инженеров и пользователей. Стандартизация элементов MoSi₂ помогает унифицировать качество продукции, улучшить взаимозаменяемость и содействовать глобальной торговле и техническому сотрудничеству.

10.1 Китайский национальный стандарт для нагревательных элементов MoSi₂

Национальный стандарт Китая (GB/T) сформулировал ряд спецификаций для производства, тестирования производительности и применения нагревательных элементов MoSi₂, которые в основном управляются Национальным техническим комитетом по стандартизации цветных металлов (TC243) и другими учреждениями. Эти стандарты гарантируют стабильность производительности и безопасность элементов MoSi₂ в высокотемпературных окислительных средах и подходят для таких отраслей, как спекание керамики, плавка стекла и производство полупроводников. Соответствующие стандарты включают химический анализ материалов, тестирование физических свойств и технические требования к промышленному электронагревательному оборудованию. Например, стандарт химического состава элементов MoSi₂ определяет требования к содержанию и контролю примесей основных элементов, таких как молибден и кремний, для обеспечения стойкости к окислению и электротермической стабильности. Стандарты физических характеристик включают методы испытаний на удельное сопротивление, коэффициент теплового расширения, стойкость к тепловому удару и механическую прочность для обеспечения надежности элементов при высоких температурах и частых тепловых циклах. Кроме того, стандарты для промышленного электронагревательного оборудования выдвигают требования к установке, эксплуатации и обслуживанию элементов MoSi₂, такие как использование кронштейнов из высокочистого оксида алюминия для соответствия характеристикам теплового расширения, быстрое прохождение через температурный диапазон «чумы» для предотвращения образования не защищающих оксидов и регулярная проверка целостности защитной пленки SiO₂. Эти стандарты выпускаются Государственным управлением по регулированию рынка и Национальным управлением по стандартизации. Некоторые из них ссылаются на неэквивалентные международные стандарты (например, спецификации, связанные с ISO) или принимают их, чтобы адаптироваться к промышленным потребностям Китая и идти в ногу с международными стандартами.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2 Международные стандарты для нагревательных элементов MoSi₂

Международная организация по стандартизации (ISO) и Международная электротехническая комиссия (IEC) разработали международные стандарты, касающиеся нагревательных элементов MoSi₂, уделяя основное внимание высокотемпературным материалам, промышленному электронагревательному оборудованию и методам испытаний производительности. Эти стандарты обеспечивают единую техническую основу для глобального производства и применения элементов MoSi₂, охватывая свойства материалов, производственные процессы и спецификации испытаний. Например, стандарты ISO могут включать методы испытаний производительности для высокотемпературной керамики или интерметаллических соединений, включая испытания на стойкость к окислению, теплопроводность и удельное сопротивление, чтобы гарантировать долгосрочную стабильность элементов MoSi₂ в окислительных атмосферах. Стандарты IEC фокусируются на технических требованиях к промышленному электронагревательному оборудованию, определяя электрическое соединение, точность регулирования температуры и требования безопасности элементов MoSi₂, такие как использование зажимов с низким сопротивлением и конфигурация пропорциональных источников питания. Международные стандарты также включают методы испытаний на термостойкость и коррозионную стойкость компонентов в высокотемпературных средах, направляя производителей на оптимизацию поверхностных покрытий (таких как SiC или Al₂O₃) для продления срока службы. Кроме того, стандарты ISO и IEC подчеркивают эксплуатационные характеристики компонентов в определенных атмосферах (таких как окислительные или следовые кислородные среды), требующие быстрого прохождения через диапазоны низких температур, чтобы избежать «чумного» окисления. Эти стандарты способствуют взаимозаменяемости и техническому сотрудничеству компонентов MoSi₂ на мировом рынке и широко используются в областях керамики, полупроводников и подготовки новых энергетических материалов.

10.3 Стандарты нагревательных элементов MoSi₂ в Европе, Америке, Японии, Корее и других странах

MoSi₂ в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах формулируются агентствами по стандартизации каждой страны, объединяя местные промышленные потребности и международные стандарты, охватывающие свойства материалов, производственные процессы и спецификации применения. В Европе Европейский комитет по стандартизации (CEN) и другие институты (такие как Немецкий институт стандартов DIN и Британский институт стандартов BSI) сформулировали стандарты, относящиеся к высокотемпературным электрическим нагревательным элементам, включая химический состав, удельное сопротивление, коэффициент теплового расширения и методы испытаний на стойкость к окислению элементов MoSi₂.

Эти стандарты подчеркивают долгосрочную стабильность компонентов в окислительной атмосфере, определяют условия формирования и требования к коррозионной стойкости поверхностной защитной пленки SiO₂ и применимы к таким отраслям, как спекание керамики и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обработка стекла. Стандарт DIN может дополнительно уточнить спецификации установки элементов MoSi_2 , такие как использование кронштейнов из высокочистого оксида алюминия и низкоомная конструкция электрических соединений. Стандарты, разработанные Американским национальным институтом стандартов (ANSI), сосредоточены на производительности и безопасности промышленного электронагревательного оборудования, включая точность регулирования температуры и испытания производительности термического цикла элементов MoSi_2 для обеспечения их надежности при испытаниях полупроводниковых и аэрокосмических материалов.

Япония и Южная Корея разработали соответствующие спецификации для компонентов MoSi_2 через Японские промышленные стандарты (JIS) и Корейское агентство по технологиям и стандартам (KATS), сосредоточившись на применении в высокотемпературной керамике и производстве полупроводников, и определяя условия эксплуатации компонентов в окислительных и слабокоррозионных атмосферах, таких как быстрое повышение и понижение температуры, чтобы избежать «чумного» окисления. Эти стандарты обычно ссылаются на рамки ISO и IEC, но корректируются в соответствии с местными промышленными особенностями (например, потребностями Японии в точном производстве), подчеркивая высокоточный контроль температуры и долговечную конструкцию компонентов. Европейские, американские, японские и корейские стандарты способствуют применению и торговле компонентами MoSi_2 на мировом рынке посредством унифицированных методов испытаний и требований к качеству.



CTIA GROUP LTD Кремний-молибденовый стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение: Словарь терминов для нагревательных элементов MoSi₂

общие профессиональные термины и их определения в области нагревательных элементов из дисилицида молибдена (MoSi₂), которые предназначены для предоставления четких технических ссылок для производителей, инженеров и пользователей. Эти термины охватывают такие аспекты, как свойства материалов, производственные процессы, тестирование производительности и сценарии применения, помогая понять характеристики и спецификации использования нагревательных элементов MoSi₂.

термин	определение
Дисилицид молибдена (MoSi ₂)	Интерметаллическое соединение, состоящее из молибдена и кремния, имеющее высокую температуру плавления, высокую стойкость к окислению и превосходные электротермические свойства и часто используемое в высокотемпературных нагревательных элементах.
SiO ₂	MoSi ₂ в окислительной атмосфере для предотвращения дальнейшего окисления материала и повышения его высокотемпературной стабильности .
Окисление чумы	MoSi ₂ образует не обладающие защитными свойствами оксиды (например, смесь MoO ₃ и SiO ₂) в диапазоне температур 400–700 ° C, что приводит к измельчению и разрушению материала.
Положительный температурный коэффициент сопротивления (PTC)	MoSi ₂ , увеличивающееся с температурой, поддерживает адаптивное регулирование мощности и подходит для приложений с точным контролем температуры.
Горячий конец	MoSi ₂ обычно тоньше и отвечает за генерацию основного тепла. Обычные спецификации включают Ф6 мм или Ф9 мм.
Холодный спай	MoSi ₂ обычно толще (например, Ф12 мм или Ф18 мм) и легирован проводящими материалами для снижения удельного сопротивления .
U-образный элемент	Конструкция нагревательных элементов MoSi ₂ в форме буквы U подходит для небольших печей или центрального отопления, легко устанавливается и заменяется.
Компоненты W-типа	MoSi ₂ , W-образной формы, подходит для больших печей, обеспечивает равномерное тепловое поле и хорошую стойкость к тепловым ударам.
Спиральный элемент	MoSi ₂ подходит для трубчатых печей или высокоточного нагрева, с концентрированным тепловым полем и точным контролем температуры.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Прямой стержневой элемент	элементов MoSi ₂ подходит для равномерного нагрева больших площадей и часто используется в промышленных печах непрерывного действия.
Коэффициент теплового расширения	MoSi ₂ имеет температуру около $8,1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, что влияет на согласование конструкции компонентов и кронштейнов.
Устойчивость к термическому удару	MoSi ₂ выдерживать быстрые перепады температур без образования трещин связана с их вязкостью разрушения и свойствами теплового расширения.
Вязкость разрушения	MoSi ₂ противостоять распространению трещин, как правило, низкая, и процесс необходимо оптимизировать, чтобы снизить риск появления микротрещин.
Теплопроводность	MoSi ₂ проводить тепло влияет на равномерность теплового поля и эффективность нагрева.
Плотность мощности	Мощность нагрева на единицу площади отражает теплопроизводительность элемента MoSi ₂ и должна подбираться в соответствии с типом печи и процессом.
Горячее прессование (ГП)	Процесс производства компонентов из MoSi ₂ , в котором используется формование под высоким давлением и температурой для улучшения плотности и механических свойств.
Спекание без давления	Более дешевый процесс производства компонентов MoSi ₂ с немного меньшей плотностью, подходящий для менее требовательных применений.
Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС)	MoSi ₂ , получаемый путем воспламенения смешанного порошка Mo-Si с целью инициирования экзотермической реакции, является недорогим, но имеет низкую однородность.
Изостатическое прессование	MoSi ₂ с использованием равномерного давления подходят для изготовления деталей сложной формы.
Покрытие поверхности	Защитный слой (например, SiC, Al ₂ O ₃), нанесенный на поверхность MoSi ₂ , используется для повышения стойкости к термическим ударам и коррозии.
Плазменное напыление	Технология нанесения поверхностных покрытий методом высокотемпературного плазменного напыления с целью формирования плотного покрытия, пригодного для промышленного применения.
Химическое осаждение из паровой фазы (CVD)	Технология получения тонких, равномерных покрытий с высокой адгезией для высокоточных компонентов из MoSi ₂ .
Тест на сопротивление	Для измерения удельного сопротивления компонентов MoSi ₂ обычно используется метод четырех зондов для оценки электротермических характеристик.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тест на антиоксиданты	оценить стабильность компонентов MoSi ₂ в высокотемпературных окислительных атмосферах, измеряя толщину пленки SiO ₂ и потерю массы.
Испытание на устойчивость к тепловому удару	Эксперимент имитирует быстрое повышение и понижение температуры для проверки трещиностойкости компонентов MoSi ₂ и оценки изменений микротрещин и механической прочности.
Испытание на твердость по Виккерсу	MoSi ₂ с использованием твердомера по Виккерсу отражает износостойкость и механические свойства.
Окислительная атмосфера	Рабочая среда, содержащая кислород (парциальное давление кислорода $\geq 0,2$ атм), является основным условием применения компонентов MoSi ₂ .
Восстановительная атмосфера	В среде, содержащей восстановительные газы, такие как водород или оксид углерода, рабочую температуру MoSi ₂ необходимо снизить, чтобы избежать разрушения пленки SiO ₂ .
Пропорциональный источник питания управления	, которая точно регулирует мощность компонентов MoSi ₂ , достигая стабильного температурного контроля благодаря положительным температурным коэффициентам.
Захват с низким сопротивлением	для подключения холодного спая MoSi ₂ к источнику питания, с низким контактным сопротивлением и гарантией электрической стабильности.
Кронштейн из высокочистого оксида алюминия	используется для поддержки компонентов MoSi ₂ , согласно коэффициенту теплового расширения для снижения термического напряжения.
Равномерность теплового поля	Равномерность распределения температуры в печи зависит от компоновки и теплопроводности компонентов MoSi ₂ и требует оптимизированной конструкции.
Модификация допинга	добавления небольшого количества элементов (таких как Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃) к MoSi ₂ для улучшения прочности границ зерен или стойкости к окислению.
Порошковая металлургия	Компоненты MoSi ₂ , полученные методом прессования и спекания порошка, подходят для производства сложных форм.
Коэффициент потери качества	MoSi ₂ при высокотемпературном окислении демонстрируют антиокислительные свойства.
Размер зерна	Размер кристаллического зерна в микроструктуре MoSi ₂ влияет на механическую прочность и стойкость к тепловому удару.

проиллюстрировать:

Этот глоссарий основан на методах производства, тестирования и применения нагревательных элементов MoSi₂ и ссылается на соответствующую литературу и технические данные. Определения терминов краткие и точные и применимы к областям керамики, стекла, полупроводников, новой энергии и защиты окружающей среды.

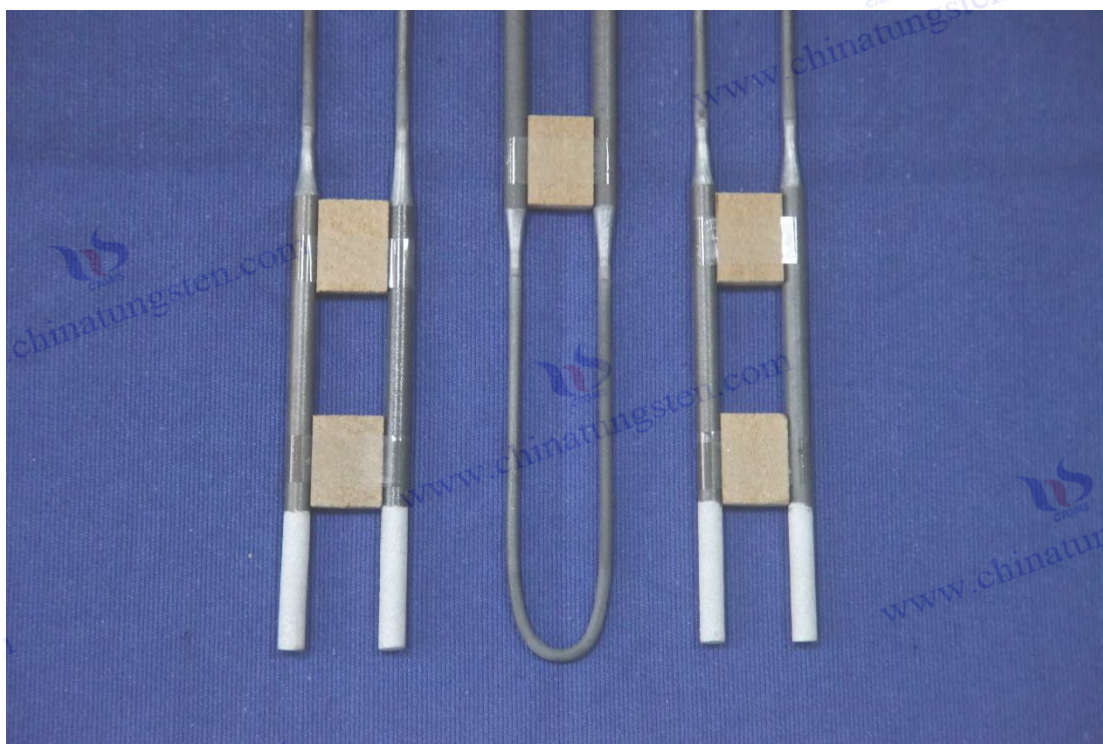
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Английская литература

- [1] Достижения в области материалов на основе MoSi_2 для высокотемпературных применений. Материаловедение и инженерия: А, 2010.
- [2] Электрические и тепловые свойства нагревательных элементов MoSi_2 . Ceramics International, 2005.
- [3] Дисульфид молибдена . American Elements.
- [4] Нагревательные элементы из дисилицида молибдена . Stanford Advanced Materials.
- [5] Руководство пользователя нагревательных элементов из дисилицида молибдена .
- [6] Материалы на основе MoSi_2 и их свойства. Журнал материаловедения, 1999.
- [7] Нагревательные элементы MoSi_2 . Kanthal ®.
- [8] Окислительное поведение материалов на основе MoSi_2 . Журнал Американского керамического общества, 2001.
- [9] Поверхностные покрытия для нагревательных элементов MoSi_2 . Технология поверхностей и покрытий, 2008.
- [10] Тепловой удар и усталостное поведение нагревательных элементов на основе MoSi_2 . Журнал исследований материалов, 2003.



CTIA GROUP LTD Кремний-молибденовый стержень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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