

MoSi₂가열소자는 무엇 입니까

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

텅스텐, 몰리브덴 및 희토류 산업을 위한 지능형 제조 분야의 글로벌 리더

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 그룹 소개

CTIA GROUP LTD 는 CHINATUNGSTEN ONLINE 이 설립한 완전 자회사로, 독립적인 법인격을 갖추고 있습니다. 산업 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 소재의 지능적이고 통합적이며 유연한 설계 및 제조를 촉진하는 데 전념하고 있습니다. 1997년 www.chinatungsten.com 을 시작점으로 설립된 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 중국 최초의 최고급 텅스텐 제품 웹사이트로, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업에 중점을 둔 중국을 선도하는 전자상거래 기업입니다. CTIA 그룹은 텅스텐과 몰리브덴 분야에서 30 년 가까이 쌓아온 심층적인 경험을 활용하여 모회사의 탁월한 설계 및 제조 역량, 우수한 서비스, 글로벌 비즈니스 명성을 계승하여 텅스텐 화학물질, 텅스텐 금속, 시멘트 카바이드, 고밀도 합금, 몰리브덴 및 몰리브덴 합금 분야에서 포괄적인 애플리케이션 솔루션 제공업체가 되었습니다.

지난 30 년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 20 개 이상의 다국어 텅스텐 및 몰리브덴 전문 웹사이트를 구축하여 20 개 이상의 언어를 지원하고 있으며, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 뉴스, 가격, 시장 분석 자료를 백만 페이지 이상 보유하고 있습니다. 2013 년부터 위챗 공식 계정인 "CHINATUNGSTEN ONLINE"은 4 만 건 이상의 정보를 게시하여 약 10 만 명의 팔로워를 확보 하고 전 세계 수십만 명의 업계 전문가에게 매일 무료 정보를 제공하고 있습니다. 웹사이트 클러스터와 공식 계정 누적 방문자 수가 수십억 회를 기록하며, CHINATUNGSTEN ONLINE 은 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업 분야에서 세계적으로 인정받는 권위 있는 정보 허브로 자리매김했습니다. 24 시간 다국어 뉴스, 제품 성능, 시장 가격, 시장 동향 서비스를 제공합니다.

CTIA 그룹은 CHINATUNGSTEN ONLINE 의 기술과 경험을 바탕으로 고객 맞춤형 니즈 충족에 집중합니다. AI 기술을 활용하여 특정 화학 조성 및 물리적 특성(입자 크기, 밀도, 경도, 강도, 치수 및 공차 등)을 가진 텅스텐 및 몰리브덴 제품을 고객과 공동으로 설계 및 생산합니다. 금형 개봉, 시제품 제작, 마무리, 포장 및 물류에 이르는 전 공정 통합 서비스를 제공합니다. 지난 30 년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 전 세계 13 만 명 이상의 고객에게 50 만 종 이상의 텅스텐 및 몰리브덴 제품에 대한 R&D, 설계 및 생산 서비스를 제공하여 맞춤형, 유연하고 지능적인 제조의 기반을 마련했습니다. CTIA 그룹은 이러한 기반을 바탕으로 산업 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 소재의 지능형 제조 및 통합 혁신을 더욱 심화하고 있습니다.

CTIA GROUP 의 한스 박사와 그의 팀은 30 년 이상의 업계 경험을 바탕으로 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 지식, 기술, 텅스텐 가격 및 시장 동향 분석을 작성하여 공개하고 텅스텐 업계와 자유롭게 공유해 왔습니다. 1990 년대부터 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 전자상거래 및 국제 무역, 그리고 초경합금 및 고밀도 합금의 설계 및 제조 분야에서 30 년 이상의 경력을 쌓아 온 한 박사는 국내외 텅스텐 및 몰리브덴 제품 분야의 저명한 전문가입니다. CTIA GROUP 팀은 업계에 전문적이고 고품질의 정보를 제공한다는 원칙을 고수하며, 생산 관행 및 시장 고객 요구에 기반한 기술 연구 논문, 기사 및 산업 보고서를 지속적으로 작성하여 업계에서 폭넓은 호평을 받고 있습니다. 이러한 성과는 CTIA 그룹의 기술 혁신, 제품 홍보, 업계 교류에 대한 탄탄한 지원을 제공하며, 이를 통해 회사가 글로벌 텅스텐 및 몰리브덴 제품 제조와 정보 서비스 분야에서 선두주자로 발돋움하는 데 기여할 것입니다.



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

목차

제 1 장 서론

- 1.1 MoSi₂ 발열체 개요
- 1.2 MoSi₂ 발열체의 발전 역사
- 1.3 MoSi₂ 발열체의 응용 현황
- 1.4 MoSi₂ 발열체의 응용 산업

제 2 장 MoSi₂ 발열체의 특성 및 영향 요인

- 2.1 MoSi₂ 발열체의 물리적 특성
- 2.2 MoSi₂ 발열체의 저항률
- 2.3 MoSi₂ 발열체의 내고온 특성
- 2.4 MoSi₂ 발열체의 고온 내산화성
- 2.5 MoSi₂ 발열체의 열전도율 및 열확산율
- 2.6 MoSi₂ 발열체의 열충격 안정성
- 2.7 MoSi₂ 발열체의 열피로 성능
- 2.8 MoSi₂ 발열체의 표면 상태
 - 2.8.1 일반적으로 사용되는 보호 코팅 종류
 - 2.8.2 표면 균열 및 코팅 접착력 연구
 - 2.8.3 표면 SiO₂ 산화막의 형성과 보호
- 2.9 MoSi₂ 발열체의 표면 문제 및 해결 방안
- 2.10 MoSi₂ 발열체의 열역학적 특성에 영향을 미치는 요인
 - 2.10.1 운전 온도의 영향
 - 2.10.2 분위기의 영향
 - 2.10.3 가열/냉각 빈도의 영향
 - 2.10.4 운전 전압의 영향
 - 2.10.5 전류 밀도의 영향
 - 2.10.6 설치 방법의 영향
 - 2.10.7 부품 품질과 순도의 영향
 - 2.10.8 코팅 보호 처리의 영향
- 2.11 CTIA GROUP LTD MoSi₂ 발열체 MSDS

제 3 장 MoSi₂ 발열체의 구조 및 설계

- 3.1 MoSi₂ 발열체의 일반적인 구조
 - 3.1.1 U 형 MoSi₂ 발열체
 - 3.1.2 W 형 MoSi₂ 발열체
 - 3.1.3 나선형 MoSi₂ 발열체
 - 3.1.4 직봉형 MoSi₂ 발열체
 - 3.1.5 U 형, W 형 및 직선형 구조 설계 비교
- 3.2 MoSi₂ 발열체의 크기 설계 (일반적으로 Φ6/12 와 Φ9/18)
- 3.3 열장 및 냉단 구조의 최적 설계
- 3.4 전기 연결 및 지지 시스템 설계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.5 단자 구조 및 연결 방법
- 3.6 제품 맞춤 설계의 핵심 사항

제 4 장 MoSi₂ 발열체의 제조 공정

- 4.1 원료 선택 및 배합 원칙
- 4.2 분말야금 및 등압 성형 공정
- 4.3 고온 소결 및 후처리 기술
- 4.4 표면 보호층 기술
- 4.5 용접 및 단부 처리 기술

제 5 장 MoSi₂ 발열체의 성능 시험

- 5.1 저항률과 온도 관계 시험
- 5.2 고온 사용 수명과 열충격 성능의 관계 시험
- 5.3 산화 환경에서의 안정성 시험
- 5.4 발열체의 경도 시험
- 5.5 내산화성과 온도의 관계 시험
- 5.6 로드 표면 거칠기와 저항률의 관계
- 5.7 로드 코팅 균일성이 사용 수명에 미치는 영향
- 5.8 사용 수명과 응력 커플링의 관계
- 5.9 균열, 휨 및 단부 용융 메커니즘
- 5.10 미세 구조 분석 및 파손 모드 연구

제 6 장 MoSi₂ 발열체의 설치

- 6.1 설치 전 준비 사항
- 6.2 상세 설치 단계
- 6.3 설치 주의 사항
- 6.4 안전 운전 규격
- 6.5 일반적인 고장 및 유지 보수 가이드
 - 6.5.1 발열체 파손의 원인 및 해결 방법
 - 6.5.2 산화층 박리의 원인 및 재생 처리
 - 6.5.3 발열체의 일상 유지 보수 방법
 - 6.5.4 발열체 교체 및 재활용 기술
- 6.6 산업로에서의 전형적인 설치 방법

제 7 장 MoSi₂ 발열체의 시험 표준 및 인증

- 7.1 발열체 성능 시험 방법
- 7.2 ISO, ASTM 등 표준 분석
- 7.3 환경 적응성 시험
- 7.4 파손 모드 및 수명 예측 방법
- 7.5 안전 및 전기 규격 요구 사항

제 8 장 MoSi₂ 발열체의 응용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 8.1 제철冶金 산업에서의 MoSi_2 발열체 응용
 - 8.1.1 금속 제련 및 열처리
 - 8.1.2 고온 소결 공정
 - 8.1.3 열처리 장비
- 8.2 세라믹 산업에서의 MoSi_2 발열체 응용
 - 8.2.1 세라믹 소성 및 유약 처리
 - 8.2.2 특수 세라믹 재료 제조
- 8.3 태양광 산업에서의 MoSi_2 발열체 응용
 - 8.3.1 실리콘 웨이퍼 제조를 위한 고온 공정
 - 8.3.2 태양전지 생산 장비
- 8.4 반도체 산업에서의 MoSi_2 발열체 응용
 - 8.4.1 웨이퍼 어닐링 및 확산 공정
 - 8.4.2 반도체 에피택셜 성장
 - 8.4.3 고온 식각 장비
 - 8.4.4 진공 코팅 장비
- 8.5 유리 제조 산업에서의 MoSi_2 발열체 응용
 - 8.5.1 유리 용융
 - 8.5.2 유리 가공
- 8.6 신에너지 재료 제조에서의 MoSi_2 발열체 응용
 - 8.6.1 리튬 배터리 재료 소결
 - 8.6.2 수소 에너지 및 연료 전지
- 8.7 환경 보호 및 촉매 분야에서의 MoSi_2 발열체 응용
 - 8.7.1 폐가스 처리
 - 8.7.2 촉매 재생
 - 8.7.3 고체 폐기물 자원화 이용
- 8.8 기타 분야에서의 MoSi_2 발열체 응용
 - 8.8.1 항공 우주 재료 시험
 - 8.8.2 원자력 산업 보조 장비
 - 8.8.3 고온 합성 화학
 - 8.8.4 MoSi_2 로드 변압기

제 9 장 MoSi_2 발열체와 다른 발열 재료의 비교

- 9.1 텅스텐 발열체와의 비교
- 9.2 탄화규소 부품과의 비교
- 9.3 발열체 비용, 효율 및 응용 적합성 분석

제 10 장 MoSi_2 발열체의 관련 표준 및 사양

- 10.1 MoSi_2 발열체의 중국 국가 표준
- 10.2 MoSi_2 발열체의 국제 표준
- 10.3 유럽, 미국, 일본, 한국 등 국가의 MoSi_2 발열체 표준

부록:

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

용어집

참고 문헌



CTIA GROUP LTD 실리콘 몰리브덴 막대

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

1 장 소개

1.1 MoSi₂ 발열체 개요

몰리브덴 이규화물 (MoSi₂)은 화학식 MoSi₂ 를 갖는 금속간 화합물입니다 . 높은 용점(약 2030℃), 우수한 고온 산화 저항성, 좋은 전기 및 열 전도성을 가지고 있습니다. 금속과 세라믹의 특성을 모두 가지고 있기 때문에 고온 가열 분야에서 널리 사용됩니다. 저항 가열 재료로서 몰리브덴 이규 화물 발열체는 고온 산화 분위기에서 전기 가열 장비에 주로 사용됩니다. 고온에서 표면에 치밀한 이산화규소(SiO₂) 보호막이 생성되어 추가적인 내부 산화를 효과적으로 방지하여 수명을 연장합니다. MoSi₂ 발열체는 500~1850℃의 온도 범위에서 안정적으로 작동할 수 있으며 세라믹 소결, 유리 용해, 금속 열처리, 고온 소결 및 실험실 고온로와 같은 산업 및 과학 연구 분야에 적합합니다. 탄화규소(SiC)와 같은 다른 발열체에 비해 이규화 몰리브덴은 작동 온도가 더 높고 고온 산화 저항성이 우수하지만, 저온 취성 및 고온 크리프 성능 한계로 인해 일부 구조적 적용에 제약이 있습니다. 현재 MoSi₂ 발열체 는 U 자형, W 자형, L 자형 및 맞춤형 형상 등 다양한 형상을 갖추고 있어 다양한 산업용로의 요구를 충족할 수 있습니다.

1.2 MoSi₂ 발열체의 발전 역사

고온 재료로서의 이규화몰리브덴 에 대한 연구는 20 세기 초에 시작되었지만, 발열체로서의 응용은 20 세기 중반에 시작되었습니다.1904 년에 과학자들은 처음으로 MoSi₂ 의 결정 구조를 보고했고 그것이 높은 녹는점과 금속간 화합물의 특성을 가진 정방정계 α 형 결정임을 확인했습니다.그러나 당시 제조 기술과 재료 순도의 한계로 인해 MoSi₂ 는 산업용 재료보다는 주로 실험실 연구 대상으로 사용되었습니다.1930 년대에 고온 합금과 세라믹 재료에 대한 심도 있는 연구로 MoSi₂ 는 우수한 고온 산화 저항성과 전도성으로 인해 주목을 받기 시작했습니다.연구원들은 고온 산화 분위기에서 MoSi₂ 의 표면에 형성된 SiO₂ 보호막이 내구성을 크게 향상시킬 수 있다는 것을 발견했고, 이는 이후 발열체 개발의 이론적 토대를 마련했습니다.

1947 년 스웨덴의 칸탈(Kanthal)이 최초로 산업화된 이규화 몰리브덴 가열 봉을 생산하여 MoSi₂ 가열 소자가 공식적으로 상용화 단계에 진입했습니다.이러한 초기 가열봉은 주로 고온 산업용로에서 사용되었으며 최대 작동 온도는 약 1600℃ 였습니다. 칸탈은 MoSi₂ 의 소결 공정과 도핑 기술을 최적화하여 부품의 기계적 강도와 내산화성을 크게 향상시켰습니다 .1950 년대와 1960 년대에 진공 소결 및 플라즈마 용사와 같은 고급 제조 기술이 등장하면서 MoSi₂ 가열 소자의 생산 효율과 성능이 더욱 향상되었습니다.소자의 모양은 단일 직선 막대에서 U 형과 L 형으로 발전하여 다양한 노유형의 요구를 충족했습니다. 또한 연구진은 희토류 원소나 다른 금속(예: W, Nb)을 도핑하여 MoSi₂ 의 저온 취성과 고온 크리프 특성을 개선하고, 그 적용 범위를 더욱 확대했습니다.

1980 년대 중국은 이규화 몰리브덴 발열체의 산업 생산을 실현하기 시작했습니다. 초기에는 주로 수입 기술에 의존했지만 점차 독자적인 연구 개발 역량을 갖추게

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

되었습니다. 이 시기에 MoSi₂ 발열체의 최대 작동 온도는 1800℃로 높아졌으며, 세라믹, 유리, 내화재 등 산업 분야에서 널리 사용되고 있습니다. 이 시기에 스웨덴의 칸탈(Kanthal)사는 최대 작동 온도가 1850℃에 달하는 칸탈 슈퍼 1900 발열체를 출시하여 업계의 벤치마크가 되었습니다. 이 제품의 성공은 고순도 원료 사용과 콜드엔드 및 핫엔드 용접 기술의 개선으로 이루어졌으며, 고온 및 저온 사이클에서 발열체의 안정성이 크게 향상되었습니다.

MoSi₂ 발열체 의 연구 개발 초점은 성능 최적화 및 응용 프로그램 확장으로 전환되었습니다. 열간 프레싱 소결, 반응 소결 및 자체 전파 고온 합성(SHS)과 같은 새로운 제조 공정은 재료의 밀도와 기계적 특성을 크게 개선했습니다. 동시에, MoSi₂ 코팅 기술의 개발로 가스터빈 블레이드 및 제트 엔진 구성 요소와 같은 항공 우주 분야에서 고온 보호 코팅으로 사용할 수 있게 되었습니다. 또한 나노 스케일 MoSi₂ 분말의 개발로 고성능 복합 재료를 제조할 수 있게 되어 저온 취성 문제가 부분적으로 해결되었습니다. 글로벌 시장 측면에서 MoSi₂ 발열체 시장 가치는 2016 년에 약 1 억 300 만 달러였으며 고온 산업 분야에서의 지속적인 수요를 반영하여 연평균 성장률 4.7%로 2022 년에 1 억 3,500 만 달러에 도달할 것으로 예상됩니다.

MoSi₂ 발열체는 고온 영역에서 우수한 성능을 보이지만, 개발에는 여전히 어려움이 있습니다. 저온 취성과 불충분한 고온 크리프 특성은 구조재로서의 적용을 제한하며, 높은 생산 비용 또한 저가 시장에서의 경쟁력에 영향을 미칩니다. 향후 연구 방향은 성능 향상 및 비용 절감을 위한 복합재 개발, 도핑 개질, 그리고 새로운 제조 공정에 집중될 것입니다.

1.3 MoSi₂ 발열체의 응용 현황

이규화 몰리브덴 (MoSi₂) 발열체는 뛰어난 고온 내산화성, 최대 1850℃ 의 작동 온도, 안정적인 전기적 특성으로 인해 세계 고온 산업에서 중요한 역할을 합니다. 이 발열체는 산업 생산, 과학 연구 및 특수 소재 가공 분야의 고온 전기로에 널리 사용됩니다. 핵심적인 장점은 산화 분위기에서 장기간 안정적으로 작동할 수 있으며, 표면에 생성된 치밀한 이산화규소(SiO₂) 보호막이 내부 산화를 효과적으로 방지하여 수명을 크게 연장한다는 것입니다. 최근 재료 과학 및 제조 공정의 발전으로 MoSi₂ 발열체의 성능이 향상되었습니다. 예를 들어, 도핑 개질 및 첨단 소결 기술을 통해 저온 취성 및 고온 크리프 특성이 개선되어 더욱 까다로운 작업 환경에도 적용할 수 있게 되었습니다.

글로벌 시장에서 MoSi₂ 발열체에 대한 수요는 특히 세라믹, 유리 및 반도체 산업에서 지속적으로 증가하고 있습니다. 스웨덴의 Kanthal 회사는 우수한 고온 성능과 신뢰성으로 유명한 Kanthal Super 시리즈 제품(예: Kanthal Super 1900) 으로 시장을 장악하고 있습니다. 중국, 일본 및 미국의 기업들도 MoSi₂ 발열체를 적극적으로 개발 및 생산하고 있으며, 그중 중국은 비용 관리 및 대량 생산에서 상당한 우위를 점하고 있습니다. 제조 공정 측면에서 열간 압착 소결, 반응 소결 및 자체 전파 고온 합성(SHS)과 같은 기술은 재료의 밀도와 기계적 특성을 향상시켰으며, 요소의 모양도 단일 직선 막대에서 U 자형, W 자형, L 자형 및 맞춤형 모양으로 발전하여 다양한 펄니스 설계의 요구를 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또한, 나노 크기의 MoSi_2 분말의 개발로 항공우주 및 에너지 산업의 고온 보호 코팅과 같은 고성능 복합 소재 및 코팅에 대한 새로운 응용 분야가 열렸습니다.

MoSi_2 발열체는 고온 분야에서 우수한 성능을 보이지만 여전히 몇 가지 과제에 직면해 있습니다. 저온 취성으로 인해 특정 구조적 응용 분야에서 잠재력이 제한되고, 높은 생산 비용으로 인해 저가 시장에서 탄화규소(SiC)와 같은 대체 재료와 경쟁해야 합니다. 현재 연구 초점에는 희토류 원소 또는 금속(예: W, Nb)을 도핑하여 기계적 특성을 개선하고 열충격 저항성과 내구성을 개선하기 위한 새로운 복합 재료를 개발하는 것이 포함됩니다. 지능형 고온로의 등장으로 MoSi_2 발열체의 정밀한 온도 제어 및 긴 수명에 대한 요구 사항이 더욱 향상되어 관련 제어 기술 개발과 재료 최적화가 촉진되었습니다. 앞으로 효율적이고 에너지 절약적이며 환경 친화적인 생산 방법에 대한 글로벌 수요가 증가함에 따라 MoSi_2 발열체는 더 많은 신흥 분야에 사용될 것으로 예상됩니다.

1.4 MoSi_2 발열체의 응용 산업

이규화 몰리브덴 발열체는 고온 안정성, 내산화성 및 우수한 전기적 특성으로 인해 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있습니다. 주요 응용 분야는 다음과 같습니다. 세라믹 산업에서 MoSi_2 발열체는 구조용 세라믹, 기능성 세라믹 및 내화 재료 생산을 위한 소결 및 고온 가공 공정의 핵심 부품입니다. 최대 작동 온도 1850°C 는 알루미늄, 지르코니아, 질화규소와 같은 고성능 세라믹의 소결 요건을 충족하여 제품 품질과 공정 안정성을 보장합니다. 유리 산업에서 MoSi_2 발열체는 광학 유리, 평판 유리 및 특수 유리 생산을 위한 고온로 및 어닐링로에서 널리 사용됩니다. 내산화성과 긴 수명 특성으로 인해 고온 산화 분위기에서 연속 작동이 가능하여 생산 효율을 크게 향상시킵니다.

금속 열처리 분야에서 MoSi_2 발열체는 고온 어닐링, 담금질 및 브레이징 공정, 특히 스테인리스강, 티타늄 합금 및 고온 합금의 처리에 사용됩니다. 빠른 가열 속도와 정밀한 온도 제어 능력은 제품 품질과 공정 효율을 향상시킵니다. 반도체 산업에서 고온 확산로와 산화로는 실리콘 웨이퍼 열처리 및 박막 증착 공정에 MoSi_2 가열 소자를 사용하는 경우가 많습니다. MoSi_2 는 높은 순도와 안정성으로 반도체 산업의 엄격한 청정 환경 및 정밀 온도 제어 요건을 충족합니다.

항공우주 분야에서 MoSi_2 는 발열체로 사용될 뿐만 아니라 가스터빈 블레이드와 제트 엔진 부품의 보호 코팅에도 사용됩니다. 고온 산화 및 내부식성이 뛰어나 극한 환경에서도 우수한 성능을 발휘합니다. 과학 연구 분야에서 MoSi_2 발열체는 열중량 분석기, 시차 주사 열량계, 고온 합성 장비 등 재료 과학, 물리, 화학 실험실의 고온 실험로에서 널리 사용되어 새로운 소재 개발을 지원합니다. 내화 및 야금 산업에서 MoSi_2 발열체는 내화 소결 및 야금 공정에서 고온 처리에 사용되며, 고순도 금속 및 합금 생산과 같은 용도로 사용되며, 높은 효율과 긴 수명으로 생산 비용을 절감할 수 있습니다. 에너지 및 환경 보호 분야에서 MoSi_2 발열체는 고온 소각로, 고체산화물연료전지(SOFC) 시험장비, 폐기물열처리 시스템에 사용되어 깨끗한 생산과 효율적인 에너지 활용을 달성하는 데 도움이 됩니다. MoSi_2 발열체는 재료 특성 및 제조

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술의 발전으로 이점을 얻고 있습니다. 산업마다 성능 요구 사항이 다릅니다. 예를 들어, 세라믹 및 유리 산업은 고온 안정성과 수명에 더 많은 관심을 기울이는 반면, 반도체 산업은 고순도 및 온도 제어 정확성을 강조합니다. 앞으로 다양한 산업에서 고온 장비 성능에 대한 요구가 높아짐에 따라, MoSi_2 발열체는 재료 최적화 및 공정 혁신을 통해 더 많은 분야에서 획기적인 발전을 이룰 것으로 예상됩니다.



CTIA GROUP LTD 실리콘 몰리브덴 로드

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

제 2 장 MoSi₂ 발열체의 특성 및 영향 요인

2.1 MoSi₂ 발열체 의 물리적 특성

몰리브덴 디실리사이드 (MoSi₂)는 금속과 세라믹의 특성을 결합한 금속간 화합물입니다. 그 물리적 특성은 고온 발열체로서 탁월한 성능을 결정합니다. MoSi₂ 의 결정 구조는 I4/mmm 의 공간군을 갖는 정방정계 α 형(C11b 형)으로 높은 대칭성과 안정성을 갖습니다. 녹는점은 약 2030℃로 매우 높은 온도에서 구조적 무결성을 유지할 수 있습니다. 밀도는 6.24 g/cm³로 비교적 낮아 발열체의 무게를 줄이는 데 도움이 되며 복잡한 형상 설계에 적합합니다. MoSi₂ 의 열팽창 계수 는 약 $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (실온~1000℃)로 일반적인 세라믹 매트릭스 재료(예: 알루미나 및 지르코니아)와 잘 일치하여 열 응력으로 인한 균열 위험을 줄입니다.

MoSi₂ 는 실온에서 약 45 W/(m·K)이며 온도가 증가함에 따라 점차 감소하지만 고온에서도 열을 효과적으로 전달하여 발열체의 균일한 가열을 보장합니다. 경도가 높아 비커스 경도가 약 1200 HV 이고 내마모성이 우수하지만 저온에서는 취성(파괴 인성 약 2-3 MPa·m^{1/2})으로 기계적 충격 손상에 취약합니다. MoSi₂ 의 산화 저항성은 고온 산화 분위기에서 특히 뛰어납니다. 800℃ 이상에서는 표면에 치밀한 SiO₂ 보호막이 생성되어 산소의 추가 확산을 효과적으로 방지하고 내부 구조를 산화 침식으로부터 보호합니다. 이 특징으로 인해 최대 작동 온도가 1850℃ 에 달하는 산화 분위기에서 장시간 작동할 수 있습니다.

MoSi₂ 는 여러 요인의 영향을 받습니다. 원료의 순도가 핵심입니다. 고순도 MoSi₂ 는 불순물로 인한 결정립계 약화를 줄이고 기계적 성질과 내산화성을 향상시킬 수 있습니다. 열간 가압 소결이나 반응 소결과 같은 제조 공정은 재료의 밀도에 영향을 미칩니다. 밀도가 높을수록 내산화성과 열전도도가 우수합니다. 도핑 개질(예: Al, W 또는 희토류 원소 첨가)은 저온 취성 및 고온 크리프 특성을 향상시킬 수 있지만 내산화성이 약간 저하될 수 있습니다. 또한, 작업 환경(분위기 유형 및 온도 사이클 빈도 등)도 물리적 성질의 안정성에 상당한 영향을 미칩니다. 예를 들어, 환원 분위기에서 SiO₂ 보호막이 손상되어 재료의 열화가 가속화될 수 있습니다.

2.2 MoSi₂ 가열 소자 의 저항률

MoSi₂ 발열체 의 저항률은 전기 발열체로서 MoSi₂ 의 핵심 성능 매개변수로, 가열 효율과 온도 제어 정확도에 직접적인 영향을 미칩니다. MoSi₂ 의 저항률은 온도 변화에 따라 비선형적인 특성을 보입니다. 실온에서 저항률은 약 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 입니다. 온도가 상승함에 따라 저항률은 점차 증가하여 1000℃ 부근에서 약 $4.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 에 도달합니다. 이러한 양의 온도 계수 특성 덕분에 MoSi₂ 발열체는 고온에서 자동으로 출력을 조절하고 과열을 방지하며 안전성을 향상시킵니다. 1000℃ 이상에서는 저항률이 서서히 증가하여 안정되어 고온 영역에서 온도를 정확하게 제어하는 데 도움이 됩니다. MoSi₂ 는 재료 조성, 미세 구조 및 외부 환경의 영향을 받습니다. 원료의 순도와 불순물 함량은 저항률에 상당한 영향을 미칩니다. 예를 들어, 철이나 알루미늄과 같은 불순물은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

저항률을 높이고 안정성을 감소시키는 반면, 고순도 MoSi_2 는 더욱 일관된 전기적 특성을 나타냅니다. 결정립 크기와 결정립계 특성 또한 중요합니다. 일반적으로 결정립계 크기가 작을수록 결정립계 저항이 높아져 저항률이 약간 높아지지만 기계적 강도는 향상됩니다. 제조 공정이 저항률에 미치는 영향 또한 중요합니다. 열간 가압 소결로 제조된 MoSi_2 는 밀도가 높고 결정립계 결함이 적으며 저항률이 낮고 안정적입니다. 반면, 반응 소결로 제조된 샘플은 기공률이 높아 저항률이 더 높을 수 있습니다.

MoSi_2 의 저항률을 조정하는 중요한 수단입니다. 텅스텐(W)이나 니오븀(Nb)을 첨가하면 저항률을 낮추고 고온 전도성을 향상시킬 수 있지만, 산화 방지 특성이 일부 저하될 수 있습니다. 희토류 원소 도핑(예: Y_2O_3)은 결정립계 구조를 개선하여 온도에 따른 저항률 변화를 안정화합니다. 저항률에 대한 작업 환경의 영향은 무시할 수 없습니다. 산화 분위기에서는 SiO_2 보호막 형성이 저항률에 거의 영향을 미치지 않지만, 환원성 또는 진공 환경에서는 표면에서 Si 휘발이 발생하여 저항률이 점차 증가하여 장기 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다.

MoSi_2 발열체는 특정 용도에 따라 최적화되어야 합니다. 예를 들어, 세라믹 소결로는 균일한 가열을 보장하기 위해 안정적인 저항률이 필요한 반면, 반도체 열처리로는 빠른 온도 상승을 위해 낮은 저항률이 필요합니다. 실제 적용에서는 저온부(일반적으로 전도성이 더 높은 물질로 도핑됨)와 고온부의 저항률을 일치시키는 설계를 통해 전체 효율을 향상시키고 에너지 손실을 줄일 수 있습니다.

2.3 MoSi_2 발열체의 내고온 특성

몰리브덴 디실리사이드 (MoSi_2) 발열체는 전기 발열체의 핵심 특성 중 하나로, 발열 효율, 온도 제어 정확도, 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. 고온 범위에서 MoSi_2 의 저항률은 상대적으로 안정적입니다. 실온에서 1000°C 까지 급격히 증가하는 것과 비교했을 때, 고온 구간에서는 저항률 증가가 상당히 둔화됩니다. 예를 들어, 실온에서 MoSi_2 의 저항률은 약 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 이며, 1000°C $\Omega \cdot \text{cm}$ 에서 약 4.0×10^{-5} 로 증가하고, 1500°C 에서는 약 $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 이며, 그 이후로는 온도가 더 높아질수록 변화가 적습니다. 이러한 양의 온도 계수(PTC) 특성 덕분에 MoSi_2 는 고온에서 자동으로 출력을 조절하고 과열을 방지하며 안전성을 향상시킬 수 있습니다. 동시에 세라믹 소결 및 반도체 열처리와 같이 정밀한 온도 제어가 필요한 응용 분야에 안정적인 성능을 제공합니다. 고온 저항 특성의 안정성은 전도성 메커니즘이 주로 금속 결합에 기반한 MoSi_2 의 금속간 화합물 구조에서 비롯됩니다. 고온에서도 강화된 격자 진동은 전자 산란을 증가시키고 전도성은 높은 수준으로 유지됩니다. 그러나 장기간 고온 작동은 저항률에 약간의 드리프트를 일으킬 수 있으며, 이는 주로 표면 SiO_2 보호막의 성장이나 미량 Si 휘발로 인한 조성 변화와 열 응력(예: 결정립 성장 또는 결정립계 약화)으로 인한 미세 구조 변화로 인해 발생합니다.

고온 저항 특성에 영향을 미치는 요인에는 재료 순도, 도핑 변형, 작업 환경 등이 있습니다. 고순도 MoSi_2 는 불순물(예: Fe, Al)로 인한 저항 불안정성을 줄이고 전기적 성능의 일관성을 유지할 수 있습니다. 금속 원소(예: W, Nb)를 도핑하면 저항률을 낮추고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고온 전도도를 향상시킬 수 있지만, 산화 저항성이 약간 감소할 수 있습니다. 희토류 원소(예: Y_2O_3)를 도핑하면 결정립계 구조를 최적화하여 온도에 따른 저항률 변화를 안정화합니다. 산화 분위기에서 SiO_2 보호막은 저항률에 거의 영향을 미치지 않지만, 환원 또는 진공 환경에서는 Si 휘발로 인해 저항률이 점진적으로 증가하고 부품 노화가 가속화됩니다. 제조 공정 또한 저항 특성에 중요한 영향을 미칩니다. 열간 가압 소결로 제조된 $MoSi_2$ 는 밀도가 높고 결정립계 결합이 적으며 저항 특성이 더 안정적이지만, 기공률이 높은 반응 소결 시편은 국부적인 전류 불균일로 인해 성능이 저하될 수 있습니다. 실제 적용에서는 저항을 줄이기 위해 콜드 엔드(cold end)를 일반적으로 고전도성 물질로 도핑합니다. 콜드 엔드와 핫 엔드 사이의 저항 매칭을 최적화하면 에너지 효율을 향상시킬 수 있습니다. 정기적인 유지보수를 수행하고 극한 온도 사이클링을 피하면 고온 저항 특성의 장기적인 안정성을 유지하는 데 도움이 됩니다.

2.4 $MoSi_2$ 발열체의 고온 내산화성

디실리사이드 발열체의 고온 산화 저항성은 산화 분위기에서 장기간 안정적으로 작동하는 데 중요한 특징이므로 고온 전기로에 적합한 재료입니다. $800^\circ C$ 이상에서는 $MoSi_2$ 표면에 조밀한 이산화규소(SiO_2) 보호막이 빠르게 형성됩니다. 이 막은 산소 확산 계수가 낮고 자체 복구 능력이 뛰어나 산소가 내부로 침투하는 것을 효과적으로 방지하고 기판을 산화 부식으로부터 보호합니다. 산화 반응은 다음과 같습니다. $2MoSi_2 + 7O_2 \rightarrow 2MoO_3 + 4SiO_2$, 여기서 MoO_3 는 고온에서 휘발되고 나머지 SiO_2 는 연속적인 보호층을 형성합니다. $1200\sim 1850^\circ C$ 범위에서 이 보호막은 $MoSi_2$ 가 산화 분위기에서 장시간 안정적으로 작동할 수 있게 하여 세라믹 소결 및 유리 용해와 같은 고온 공정에 적합합니다. 그러나 $400\sim 700^\circ C$ 의 저온 범위에서는 $MoSi_2$ 가 "페스팅(pesting)" 현상이 발생하기 쉽고, 산화되어 MoO_3 와 SiO_2 의 비보호 혼합물을 형성하여 재료 분해를 유발하며, 특히 낮은 온도 사이클에서 이러한 현상이 발생합니다. 이러한 문제를 방지하기 위해 실제 적용에서는 이 온도 범위를 빠르게 통과하는 것이 일반적입니다.

$MoSi_2$ 는 환원 분위기(예: H_2) 또는 진공 환경에서 산화 저항성이 좋지 않습니다. SiO_2 보호막이 형성되지 않거나 파괴되어 Si 휘발 및 재료 열화를 초래하기 때문입니다. 따라서 이러한 환경에 적합하지 않습니다. 고온 산화 저항성에 영향을 미치는 요인에는 재료 순도, 미세 구조 및 도핑 수정이 포함됩니다. 고순도 $MoSi_2$ 는 불순물로 인한 결정립계 산화를 줄이고 SiO_2 필름의 밀도를 높일 수 있습니다. 고밀도 미세 구조(예: 열간 프레스 및 소결로 얻은 것)는 산소 확산 경로를 줄이고 산화 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 희토류 원소(예: Y_2O_3) 또는 산화물로 도핑하면 SiO_2 필름의 접착력과 자가 치유 능력을 향상시킬 수 있는 반면 일부 금속 도핑(예: W)은 산화 동역학을 변경하여 산화 저항성을 감소시킬 수 있습니다. 작업 환경의 습도도 산화 저항성에 영향을 미칠 수 있습니다. 고습 환경에서 SiO_2 필름은 수화 반응을 겪어 보호 효과가 감소할 수 있습니다. 고온 산화 저항성을 향상시키기 위해 최신 $MoSi_2$ 발열체는 표면 코팅 기술(예: Al_2O_3 또는 ZrO_2 코팅)을 사용하여 보호 효과를 강화하거나 소결 공정을 최적화하여 재료 밀도를 향상시킵니다. 실제 적용에서는 안정적인 산화 분위기를 유지하고 낮은 온도 사이클을 피하는 것이 산화 방지제 수명 연장의 핵심입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.5 MoSi₂ 발열체의 열전도율 및 열확산율

2 발열체 의 열전도도와 열확산도는 열전도도를 나타내는 중요한 지표로, 가열 속도, 온도 균일성, 에너지 효율에 직접적인 영향을 미칩니다. MoSi₂ 의 열전도도는 실온에서 약 45 W/(m·K)이며, 온도가 증가함에 따라 점차 감소하여 1000℃에서는 약 25 W/(m·K)에 이르고, 1500℃에서는 약 15 W/(m·K) 로 더욱 낮아집니다 . 고온에서는 열전도도가 감소하지만, MoSi₂ 는 여전히 효과적으로 열을 전달하고 가열로 내 균일한 온도 분포를 유지할 수 있어 높은 열 균일성이 요구되는 세라믹 소결 및 유리 용융과 같은 응용 분야에 적합합니다.

열전도도 변화는 주로 MoSi₂ 의 격자 진동과 전자 열전도 메커니즘에 기인합니다 . 저온에서는 전자 열전도도가 지배적인 반면, 고온에서는 포논 산란이 증가하여 열전도도가 감소합니다. MoSi₂ 의 열확산도 ($\alpha = k / (\rho \cdot c)$), 여기서 k 는 열전도도, ρ 는 밀도, c 는 비열) 또한 온도에 따라 변합니다.

MoSi₂ 의 비열은 약 0.45 J/(g·K)이고, 밀도는 6.24 g/cm³이며, 열 확산 계수는 약 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 입니다. 고온에서는 비열이 약간 증가하고 열전도도의 감소로 인해 열 확산 계수가 감소합니다. 열전도도와 열 확산 계수에 영향을 미치는 요인에는 재료 순도, 미세 구조 및 도핑 수정이 포함됩니다. 불순물(예: Fe 및 C)은 포논 산란을 증가시키고 열전도도를 감소시키는 반면, 고순도 MoSi₂ 는 더 높은 열전도도를 갖습니다. 고밀도 MoSi₂ (예: 열간 압축 소결 샘플)는 더 높은 열전도도를 갖는 반면, 높은 다공성을 갖는 샘플은 기공에서 열 산란으로 인해 열전도도가 낮습니다.

도핑 변형의 효과는 복잡합니다. W 를 첨가하면 열전도도가 약간 증가하는 반면, 희토류 산화물 도핑은 결정립계 산란으로 인해 열전도도가 감소할 수 있습니다. 실제 적용에서는 열전도도와 열확산도를 노의 종류와 공정에 따라 최적화해야 합니다. 예를 들어, 반도체 열처리로는 빠른 가열을 위해 더 높은 열전도도가 필요한 반면, 대형 세라믹 소결로는 열 균일성에 더 많은 주의를 기울입니다. 준비 공정(예: 밀도 증가)을 최적화하고 부품 형상을 합리적으로 설계(예: 고온부 표면적 증가)하면 열전도도를 향상시키고 에너지 손실을 줄일 수 있습니다.

2.6 MoSi₂ 발열체의 열충격 안정성

이규화 몰리브덴 (MoSi₂) 발열체는 급격한 온도 변화 시 열응력으로 인한 균열이나 파단에 저항하는 능력을 나타내며, 고온 사이클링 환경에서의 신뢰성을 평가하는 중요한 지표입니다. MoSi₂ 의 열충격 안정성은 낮은 열팽창 계수 및 적절한 열전도도와 밀접한 관련이 있습니다. 이러한 특성 덕분에 MoSi₂ 는 급격한 가열 및 냉각 시 열응력을 더 잘 분산시키고 온도 구배로 인한 내부 응력 집중을 줄일 수 있습니다. 그러나 MoSi₂ 의 저온 취성은 심각한 열충격 조건, 특히 낮은 고온 및 저온 사이클에서 여전히 미세균열이나 파단을 유발할 수 있습니다. 열충격 안정성은 세라믹 소결로 및 유리 용해로와 같이 급격한 가열 또는 냉각이 필요한 응용 분야에서 MoSi₂ 발열체의 수명과 신뢰성에 직접적인 영향을 미칩니다. 열충격 안정성에 영향을 미치는 주요 요인으로는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료 순도, 미세구조 및 제조 공정이 있습니다. 고순도 MoSi_2 는 불순물(예: Fe, Al)로 인한 결정립계 약화를 줄여 열충격으로 인한 균열 전파 위험을 줄일 수 있습니다. 미세구조 측면에서, 고밀도 MoSi_2 (예: 열간 프레스 및 소결)는 기공과 결함이 적어 열응력을 효과적으로 분산시킬 수 있는 반면, 기공률이 높은 시편은 열충격 시 국부적인 응력 집중으로 인해 균열이 발생하기 쉽습니다. 도핑 변형 또한 열충격 안정성에 상당한 영향을 미칩니다. 예를 들어, 희토류 산화물(예: Y_2O_3)이나 산화알루미늄(Al_2O_3)을 첨가하면 결정립계 강도가 증가하고 열충격 저항성이 향상될 수 있지만, 일부 금속 도핑(예: W)은 열팽창 특성 변화로 인해 열충격 안정성을 약간 저하시킬 수 있습니다. 작업 환경의 온도 변화율과 사이클 빈도는 주요 외부 요인입니다. 급격한 열충격 사이클(예: 1500°C 에서 실온으로의 급격한 온도 강하)은 열응력 축적을 심화시키고 부품 수명을 단축시킵니다. 실제 적용에서는 가열로 내 온도 제어 전략(예: 느린 온도 상승 및 하강)을 최적화하고, 적절한 부품 형상(예: 응력 집중을 줄이기 위해 날카로운 모서리를 피하는 것)을 설계하면 열충격 안정성을 크게 향상시킬 수 있습니다. 또한, 표면 코팅 기술(예: SiC 또는 Al_2O_3 코팅)을 사용하면 MoSi_2 의 열충격 저항성을 더욱 향상시키고 수명을 연장할 수 있습니다.

2.7 MoSi_2 발열체의 열피로 성능

MoSi_2 발열체의 열충격 안정성은 극한 온도 구배 또는 순간적인 열충격(예: 냉기 또는 액체 냉각에 직접 노출) 하에서 균열이나 성능 저하를 방지하는 능력을 의미합니다. 이는 열충격 안정성과 밀접한 관련이 있지만, 순간적이고 급격한 온도 변화에 중점을 둡니다. MoSi_2 의 열충격 안정성은 낮은 열팽창 계수와 적절한 열전도도를 통해 얻어지며, 이러한 특성은 순간적인 온도 변화에서 열응력을 더 잘 분산시킵니다. 그러나 MoSi_2 의 낮은 파괴인성으로 인해 심각한 열충격 조건, 특히 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 "플레이그" 온도 범위에서는 미세균열이 전파되거나 거시적인 파괴가 발생할 수 있습니다. 이러한 조건에서는 열충격이 산화 및 분진 발생을 악화시켜 재료 파손으로 이어질 수 있습니다. 열충격 안정성은 빠른 시동 및 정지가 필요한 고온로 또는 유리 성형이나 금속 열처리 공정과 같이 불균일한 가열 환경에서 MoSi_2 발열체를 적용하는 데 매우 중요합니다. 열충격 안정성에 영향을 미치는 요인으로는 재료 구성, 미세구조, 외부 환경 등이 있습니다.

MoSi_2 는 결정립계에서 불순물로 인한 응력 집중을 줄이고 열충격 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 고밀도 미세구조(예: 열간 프레스 또는 반응 소결)는 열충격으로 인한 균열 전파를 효과적으로 줄일 수 있는 반면, 기공률이 높은 시료는 결함이 많아 열충격 안정성이 낮습니다. 도핑 변형은 열충격 안정성에 이중적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 희토류 원소(예: La_2O_3)를 첨가하면 결정립계 결합을 강화하고 균열 저항성을 향상시킬 수 있지만, 일부 금속 도핑은 열팽창 불일치로 인해 안정성을 저하시킬 수 있습니다. 열충격 강도(예: 냉풍 주입 또는 액체 냉각)와 작업 환경에서의 사이클 횟수는 성능에 상당한 영향을 미칠 수 있습니다. 심한 열충격은 표면 SiO_2 보호막에 균열을 유발하고 산화 저항성을 감소시킬 수 있습니다. 실제 적용에서는 부품 설계를 최적화(예: 열응력 분산을 높이기 위해 U 자형 또는 W 자형 구조 사용)하고 열충격 조건을 제어(예: 저온 매체에 직접 노출되지 않도록 함)하면 열충격 안정성을 향상시킬 수 있습니다. 또한,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면 개질 기술(고인성 세라믹 코팅 등)을 사용하면 MoSi_2 의 열충격 저항성을 높이고 균열 확산을 줄일 수 있습니다 .

2.8 MoSi_2 발열체 의 열 피로 성능

2 발열체 의 열 피로 성능은 반복적인 고온-저온 사이클에서 성능 저하(저항률 증가, 기계적 강도 저하, 표면 보호막 열화 등)에 저항하는 능력을 나타내며, 장기 신뢰성 평가의 핵심 지표입니다. MoSi_2 의 열 피로 성능은 낮은 열팽창 계수, 적절한 열전도도, 그리고 고온 산화 저항성의 영향을 받습니다. 산화성 분위기에서 MoSi_2 표면에 형성된 SiO_2 보호막은 여러 번의 열 사이클 동안 안정성을 유지하여 재료 열화를 늦출 수 있습니다. 그러나 열 피로 과정에서 반복적인 열 및 기계적 응력은 미세 균열의 발생 및 확장을 유발할 수 있으며, 특히 저온 취성이 큰 MoSi_2 의 경우 , 열 피로는 부품 파손 또는 전기적 성능 드리프트를 유발할 수 있습니다. 또한, 400~700°C 의 "플래그" 온도 범위에서는 열 피로 사이클이 산화 분해를 악화시키고 재료 파손을 가속화할 수 있습니다. 열 피로 성능은 세라믹 소결 및 금속 열처리와 같이 빈번한 열 사이클이 필요한 응용 분야에서 MoSi_2 발열체 의 수명에 직접적인 영향을 미칩니다 . 열 피로 성능에 영향을 미치는 요인으로서는 재료 순도, 미세 구조, 도핑 변화, 작업 환경 등이 있습니다.

고순도 MoSi_2 는 불순물로 인한 결정립계 약화를 줄이고 열 피로 균열 위험을 줄일 수 있습니다. 고밀도 미세구조(예: 열간 프레스 소결 시편)는 반복 열응력을 효과적으로 분산시키고 열 피로 수명을 향상시킬 수 있는 반면, 기공률이 높은 시편은 응력 집중으로 인해 파손되기 쉽습니다. 도핑 변화는 열 피로 성능에 중요한 영향을 미칩니다. 예를 들어, 희토류 산화물(예: Y_2O_3)이나 알루미늄을 첨가하면 결정립계 강도를 높이고 균열 전파를 억제할 수 있지만, 일부 금속 도핑은 열팽창 불일치로 인해 열 피로 성능을 저하시킬 수 있습니다. 작업 환경의 열 사이클 진폭, 주파수 및 분위기 유형은 열 피로 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 예를 들어, 환원 또는 진공 환경에서 SiO_2 보호막이 파손되면 Si 휘발이 발생하여 열 피로 열화가 가속화됩니다. 실제 적용에서는 열 사이클 매개변수 최적화(예: 가열 및 냉각 속도 감소), 부품 설계 개선(예: 고온부 강도 향상), 그리고 표면 코팅 기술(예: SiC 또는 ZrO_2 코팅) 을 통해 열 피로 성능을 크게 향상시킬 수 있습니다. 정기적인 점검 및 유지보수를 통해 MoSi_2 발열체 의 열 피로 수명을 효과적으로 연장할 수도 있습니다 .

2.8.1 일반적으로 사용되는 보호 코팅 종류

몰리브덴 디실리사이드 (MoSi_2) 발열체는 고온 성능, 사용 수명 및 신뢰성에 중요한 영향을 미칩니다. MoSi_2 의 표면 특성은 주로 자연적으로 형성된 SiO_2 산화막, 표면 미세 구조 및 적용된 보호 코팅의 성능에 반영됩니다. 고온 산화 분위기에서 800°C 이상에서 MoSi_2 표면에 치밀한 SiO_2 보호막 이 생성됩니다 . 이 막은 뛰어난 산화 저항성의 핵심으로, 산소가 내부로 확산되는 것을 효과적으로 방지하고 기판을 산화 부식으로부터 보호할 수 있습니다. 그러나 표면 상태는 산화막의 영향을 받을 뿐만 아니라 표면 결함(예: 미세 균열, 기공), 코팅 품질 및 장기 사용 중 표면 변화와도 밀접한 관련이 있습니다. MoSi_2 의 표면 상태 는 고온 사이클, 열충격 및 열 피로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

조건에서의 안정성을 직접적으로 결정하며, 특히 세라믹 소결, 유리 용융 및 반도체 열처리와 같은 수요가 높은 응용 분야에서 그렇습니다.

표면 상태의 품질은 재료 순도, 제조 공정 및 작업 환경 등 여러 요인의 영향을 받습니다. 고순도 MoSi_2 는 표면 불순물(예: Fe, Al)로 인한 결정립계 약화를 줄이고 더욱 균일하고 조밀한 표면을 생성할 수 있습니다. SiO_2 필름, 열간 압착 소결이나 반응 소결 같은 제조 공정은 표면 거칠기와 기공률에 상당한 영향을 미칩니다. 열간 압착 소결로 제조된 MoSi_2 의 표면은 더 매끄럽고 결함이 적어 안정적인 산화막 형성에 도움이 되지만, 반응 소결된 샘플은 표면 기공이 많아 보호 효과가 감소할 수 있습니다. 작업 환경의 분위기 유형, 습도 및 온도 사이클 빈도도 표면 상태에 영향을 미칩니다. 예를 들어, 습도가 높은 환경에서는 SiO_2 필름이 수화되어 보호 능력이 감소할 수 있으며, 잦은 온도 사이클은 표면 균열이나 코팅 박리를 유발할 수 있습니다. 표면 상태를 최적화하기 위해 최신 MoSi_2 발열체는 표면 개질(예: 코팅 기술)이나 공정 최적화(예: 표면 연마)를 통해 내산화성과 내구성을 향상시키는 경우가 많습니다.

표면 상태의 장기적인 안정성은 MoSi_2 발열체의 성능에 매우 중요합니다. 고온에서 장기간 작동하는 경우, 특히 환원 또는 진공 환경에서 Si 휘발 또는 MoO_3 휘발로 인해 표면 SiO_2 필름이 얇아질 수 있으며 표면 보호 능력이 크게 감소합니다. 또한, 표면 미세 균열의 시작 및 전파는 특히 열충격 또는 열 피로 조건에서 열 응력 또는 기계적 응력에 의해 악화될 수 있습니다. 실제 적용에서 표면 상태의 정기적인 검사, 가열 및 냉각 속도의 최적화, 보호 코팅의 사용은 MoSi_2 발열체의 표면 성능을 유지하는 효과적인 조치입니다. 앞으로 표면 엔지니어링 기술의 발전으로 MoSi_2 의 표면 상태 최적화가 전반적인 성능을 개선하는 중요한 방향이 될 것입니다.

2.8.2 표면 균열 및 코팅 접착력 연구

발열체의 내산화성, 열충격 안정성 및 열피로 성능을 더욱 향상시키기 위해 MoSi_2 소자에 표면 코팅 기술이 널리 사용되고 있습니다. 일반적인 보호 코팅 유형에는 산화물 코팅, 탄화물 코팅, 복합 코팅이 있으며, 각각 특정 성능 요구 사항 및 적용 환경을 목표로 합니다. 산화물 코팅이 가장 일반적으로 선택되며, 그중에서도 높은 융점, 화학적 안정성 및 낮은 산소 확산 계수로 인해 산화알루미늄(Al_2O_3) 및 산화지르코늄(ZrO_2) 코팅이 선호됩니다. Al_2O_3 코팅은 플라즈마 용사 또는 화학 기상 증착(CVD)으로 도포하여 고온에서 치밀한 보호층을 형성하여 특히 1500~1800°C의 산화 분위기에서 MoSi_2 의 내산화성과 내열충격성을 크게 향상시킵니다.

ZrO_2 코팅은 우수한 열 차단 특성으로 인해 고온 항공우주 부품과 같이 높은 열충격 안정성이 요구되는 분야에 자주 사용됩니다. 탄화물 코팅은 주로 탄화규소(SiC)로 구성되는데, 이는 열팽창 계수가 MoSi_2 기판의 열팽창 계수와 잘 일치하여 코팅과 기판 사이의 열응력을 줄이고 박리 위험을 줄일 수 있기 때문입니다. SiC 코팅은 플라즈마 용사 또는 반응 소결 공정을 통해 도포되며, 이는 내산화성을 향상시킬 뿐만 아니라 표면 내마모성을 향상시켜 세라믹 소결로와 같은 고마모 환경에서 사용하기에 적합합니다. 최근 몇 년 동안 복합 코팅 개발이 활발히 진행되어 왔으며, Al_2O_3 - SiC

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또는 $ZrO_2 - Y_2 O_3$ 복합 코팅은 여러 소재의 장점을 결합하여 더욱 포괄적인 보호 기능을 제공합니다. 예를 들어, $Al_2 O_3 - SiC$ 복합 코팅은 $Al_2 O_3$ 의 높은 내산화성 과 SiC 의 내열충격성을 결합하여 복잡한 작업 조건에서 $MoSi_2$ 부품 에 적합합니다 .

코팅 유형 선택은 특정 적용 환경에 따라 최적화되어야 합니다. 예를 들어, 반도체 열처리로는 오염 방지를 위해 고순도 코팅이 필요한 반면, 유리 용해로는 코팅의 내열충격성과 내식성에 더욱 주의를 기울입니다. 코팅 준비 공정 또한 성능에 상당한 영향을 미칩니다.

플라즈마 용사는 두껍고 조밀한 코팅을 형성할 수 있어 산업 규모 적용에 적합합니다. 반면, CVD 공정은 더욱 균일하고 얇으며 접착력이 높은 코팅을 형성할 수 있어 고정밀 요구 사항에 적합합니다. 또한, 코팅의 두께와 균일도는 정밀하게 제어되어야 합니다.

코팅이 너무 두꺼우면 열 응력 불일치로 인해 균열이 발생할 수 있으며, 코팅이 너무 얇으면 적절한 보호 기능을 제공하지 못할 수 있습니다. 앞으로 나노구조 코팅 및 다층 복합 코팅의 개발을 통해 $MoSi_2$ 발열체의 표면 성능이 더욱 향상될 것으로 예상됩니다.

2.8.3 표면 SiO_2 산화막의 형성과 보호

$MoSi_2$ 발열체 의 표면 균열과 코팅 접착력은 표면 상태와 장기 신뢰성에 영향을 미치는 핵심 요소입니다. 표면 균열은 일반적으로 열응력, 기계적 응력 또는 제조 결함, 특히 열충격이나 열피로 조건에서 발생합니다. $MoSi_2$ 의 저온 취성 (파괴인성 약 $2\sim3 MPa\cdot m^{1/2}$)은 급격한 온도 변화나 기계적 진동 시 미세균열을 쉽게 발생시킵니다. 이러한 균열은 결정립계를 따라 확장되어 결국 부품의 파괴 또는 SiO_2 보호막의 파손으로 이어질 수 있습니다. $400\sim700^\circ C$ 의 "플레이그" 온도 범위에서는 표면 균열이 산화 및 분진 발생을 악화시켜 표면 상태를 더욱 악화시킬 수 있습니다. 코팅 접착력은 보호 코팅이 $MoSi_2$ 기판에 장기간 접착되어 박리 또는 균열을 방지할 수 있는지 여부를 결정합니다. 접착력이 부족한 코팅은 고온 사이클 동안 탈락하기 쉽고, 기판을 산화 또는 부식 환경에 노출시켜 부품 수명을 단축시킵니다. 표면 균열 형성은 여러 요인의 영향을 받습니다. 재료 순도는 중요한 요소입니다. 고순도 $MoSi_2$ 는 결정립계 불순물을 줄이고 균열 발생 가능성을 낮출 수 있습니다. 미세 구조는 균열 전파에 상당한 영향을 미칩니다. 고밀도 $MoSi_2$ (예 : 열간 프레스 소결)는 기공과 결함이 적어 균열 전파를 효과적으로 억제할 수 있지만, 기공률이 높은 시편은 응력 집중으로 인해 균열이 발생하기 쉽습니다. 도핑 개질은 표면 균열 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 예를 들어, 희토류 산화물(예: $Y_2 O_3$)을 첨가하면 결정립계 결합력을 강화하고 균열 전파를 줄일 수 있지만, 특정 금속 도핑(예: W)은 열팽창 불일치로 인한 균열 위험을 증가시킬 수 있습니다. 전처리 공정 및 표면 처리 또한 중요합니다. 표면 연마는 초기 결함을 줄일 수 있지만, 거친 표면은 균열 발생 지점이 될 수 있습니다.

코팅 접착력에 대한 연구는 주로 계면 특성, 열 팽창 매칭 및 코팅 공정에 초점을 맞춥니다. $MoSi_2$ 와 코팅($Al_2 O_3$ 및 SiC 와 같은) 간의 열 팽창 계수 차이는 계면에서 열 응력을 유발하여 접착력에 영향을 미칩니다. 예를 들어, SiC 코팅은 열 팽창

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

계수가 MoSi_2 에 더 가깝기 때문에 일반적으로 Al_2O_3 코팅 보다 우수합니다 . 계면 처리 기술(예: 전이층 설계)은 접착력을 크게 향상시킬 수 있습니다.예를 들어, MoSi_2 기판과 Al_2O_3 코팅 사이에 SiC 전이층을 추가하면 열 응력 불일치를 완화할 수 있습니다.코팅 공정도 접착력에 중요한 영향을 미칩니다.플라즈마 용사로 형성된 코팅은 접착력이 강하지만 미세 기공이 있을 수 있는 반면, CVD 공정으로 생성된 코팅은 더 균일하고 접착력이 높습니다.열 사이클링 및 환경 요인(예: 습도 및 분위기)은 접착력을 추가로 테스트합니다.고습 환경은 코팅 계면에서 화학 반응을 일으켜 접착력을 감소시킬 수 있습니다. 연구에 따르면 코팅 두께와 인터페이스 설계(예: 그래디언트 코팅)를 최적화하면 접착력이 크게 향상되고 균열 및 벗겨짐 위험이 줄어드는 것으로 나타났습니다.

2.9 MoSi_2 발열체의 표면 문제 및 해결 방안

MoSi_2 발열체 표면의 SiO_2 산화막은 고온 내산화성의 핵심이며, 산화 분위기에서 장기적인 안정성과 수명을 결정합니다. 800°C 이상에서 MoSi_2 표면은 $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$ 로 반응하여 치밀한 SiO_2 막을 생성합니다. 이 막은 산소 확산 계수가 낮고 자가 치유 능력이 뛰어나 산소가 기판으로 침투하는 것을 효과적으로 방지하고 MoSi_2 가 추가 산화 침식으로부터 보호합니다. $1200\sim 1850^\circ\text{C}$ 범위에서 SiO_2 막은 안정적으로 유지되어 MoSi_2 발열체가 고온 산화 분위기에서 장시간 작동할 수 있도록 합니다. 최대 작동 온도는 1850°C 에 달할 수 있으며 세라믹 소결, 유리 용해 및 기타 공정에 널리 사용됩니다. 그러나 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 "플라그" 온도 범위에서는 MoSi_2 가 산화되어 MoO_3 와 SiO_2 의 비보호 혼합물을 생성하여 필름층이 느슨해지고 재료가 분말 화되어 표면 보호 성능에 심각한 영향을 미칩니다. "플라그"를 방지하기 위해 실제 적용에서는 이 온도 범위를 빠르게 통과하는 것이 일반적입니다.

SiO_2 필름은 많은 요인의 영향을 받습니다.재료 순도는 필름 품질에 중요합니다.고순도 MoSi_2 는 더 조밀하고 균일한 SiO_2 필름을 생성 할 수 있는 반면 불순물(예: Fe 및 Al)은 필름 결함을 유발하고 보호 효과를 감소시킬 수 있습니다.미세 구조도 중요한 역할을 합니다.고밀도 MoSi_2 (예 : 열간 프레스 소결)는 표면 기공이 적어 연속적인 SiO_2 필름 형성에 도움이 되는 반면 , 다공성 이 높은 샘플은 고르지 않은 필름 층을 형성하고 산화 저항성을 감소시킬 수 있습니다.도핑 수정은 SiO_2 필름 의 성능에 이중 효과를 미칩니다 . 희토류 산화물(예: Y_2O_3)은 필름의 접착력과 안정성을 개선할 수 있는 반면 특정 금속 도핑(예: W)은 산화 동역학의 변화로 인해 필름의 품질을 저하시킬 수 있습니다.작업 환경의 분위기와 습도는 SiO_2 필름 의 형성과 보호에 상당한 영향을 미칩니다 . 고습 환경에서는 SiO_2 박막이 수화 반응을 일으켜 느슨한 규산염 구조를 형성하여 보호력이 저하될 수 있습니다. 환원 또는 진공 환경에서는 SiO_2 박막이 형성되지 않거나 파괴되어 Si 휘발 및 기판 열화를 초래합니다.

SiO_2 필름 은 MoSi_2 발열체 의 성능에 핵심입니다 . 고온에서 장기간 작동하는 경우 Si 또는 MoO_3 의 휘발로 인해 SiO_2 필름이 얇아질 수 있으며 , 특히 1850°C 에 가까운 극한 온도에서는 필름 층이 부분적으로 손상될 수 있습니다 . 잦은 열 사이클로 인해 필름 층에 균열이 생기거나 벗겨져 보호 효과가 떨어질 수도 있습니다. SiO_2 필름

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

의 안정성을 높이기 위해 현대의 MoSi_2 소자는 종종 표면 개질 기술을 사용합니다. 예를 들어, 사전 산화 처리로 초기 고밀도 필름 층을 형성하거나 보호 코팅(예: Al_2O_3 또는 SiC)을 추가하여 필름의 열 충격 저항성과 내구성을 높입니다. 실제 적용에서 안정적인 산화 분위기를 유지하고, 습도가 높은 환경을 피하고, 열 사이클 매개변수를 최적화하는 것이 SiO_2 필름의 보호 성능을 유지하는 효과적인 조치입니다. 향후 연구 방향은 SiO_2 필름의 형성 속도론을 최적화하고 복합 보호층을 개발하여 MoSi_2 발열체의 표면 성능과 수명을 더욱 개선하는 데 집중될 수 있습니다.

2.10 MoSi_2 발열체의 표면 문제 및 해결 방안

이규화 몰리브덴 (MoSi_2) 발열체는 고온 성능 및 수명에 영향을 미치는 중요한 요인으로, 주로 표면 균열, "플라그(plague)" 산화, SiO_2 보호막 열화, 코팅 박리 등이 있습니다. 이러한 문제는 고온 사이클, 열충격 또는 특정 분위기 환경에서 특히 심각하며, 부품 성능 저하 또는 고장으로 이어질 수 있습니다. 표면 균열은 일반적으로 열 응력, 기계적 응력 또는 제조 결함으로 인해 발생합니다. MoSi_2 는 저온 취성이 강하기 때문에 급격한 온도 변화나 기계적 진동으로 인해 미세 균열이 발생하기 쉽고, 이는 거시 균열로 확대되어 내산화성과 기계적 강도를 약화시킵니다. $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 "플라그" 온도 범위에서는 MoSi_2 표면이 산화되어 MoO_3 와 SiO_2 의 비보호 혼합물을 생성하여 재료의 분쇄 및 표면 상태의 심각한 손상을 초래합니다. 장기간 고온 작동 시 Si 휘발 또는 MoO_3 휘발로 인해 SiO_2 보호막이 얇아질 수 있습니다. 특히 1850°C 에 가까운 극한 온도에서는 보호막층이 부분적으로 손상되어 보호 효과가 감소할 수 있습니다. 또한, 열팽창 불일치 또는 계면 접합 불량으로 인해 적용된 보호막이 벗겨져 기판이 산화 또는 부식성 환경에 노출될 수 있습니다.

표면 균열 문제는 제조 공정 최적화 및 재료 개질을 통해 해결할 수 있습니다. 열간 가압 소결 공정은 MoSi_2 의 밀도를 향상시키고 표면 기공과 결함을 줄여 균열 발생 가능성을 낮출 수 있습니다. 희토류 산화물(예: Y_2O_3) 또는 알루미늄 도핑은 결정립계 강도를 높이고 균열 전파를 억제할 수 있습니다. 표면 연마는 초기 결함과 응력 집중을 줄일 수 있습니다. "플레이그" 산화를 처리하기 위해 실제 적용에서는 일반적으로 온도를 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 온도 범위로 빠르게 높여 비보호 산화물 생성 시간을 단축합니다. 또한, 전산화 처리를 통해 표면에 치밀한 SiO_2 피막을 미리 생성하여 "플레이그"에 대한 저항성을 향상시킬 수 있습니다. SiO_2 피막의 안정성을 유지하기 위해 희토류 원소를 첨가하여 피막의 접착력을 향상시키거나, 복합 코팅을 사용하여 열충격 저항성과 내구성을 향상시킬 수 있습니다. 코팅 박리 문제의 경우, 코팅 공정(예: 화학 기상 증착 또는 플라즈마 용사)과 계면 설계(예: SiC 전이층 추가)를 최적화하면 접합 강도를 향상시키고 열응력 불일치를 줄일 수 있습니다. 실제 적용에서는 가열 및 냉각 속도 제어, 고습 환경 회피, 그리고 표면 상태 정기 점검이 MoSi_2 발열체의 수명을 연장하는 효과적인 방법입니다.

향후 표면 문제 해결 방향은 나노구조 코팅 및 다층 복합 코팅 개발에 집중되어 SiO_2 박막의 안정성과 코팅의 접합 강도를 더욱 향상시킬 수 있을 것입니다. 또한, 지능형 모니터링 기술을 활용하여 표면 상태를 실시간으로 감지하고, 작동 매개변수를 적시에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

조정하며, 부품의 수명을 연장할 수 있습니다. 이러한 방법들을 종합적으로 적용하면 MoSi₂ 발열체의 표면 문제를 효과적으로 완화하고 세라믹 소결 및 유리 용융과 같은 고온 응용 분야에서 신뢰성을 향상시킬 수 있습니다.

2.10.1 운전 온도의 영향

2 발열체 의 열역학적 특성은 가열 효율, 온도 균일성 및 열충격 저항성에 직접적인 영향을 미칩니다. 이러한 특성은 재료의 고유 특성(예: 조성 및 미세 구조)과 외부 환경(예: 작동 온도 및 분위기)의 영향을 받습니다. MoSi₂ 의 열전도도는 실온에서 약 45 W/(m·K)이고 고온(1500℃)에서 약 15 W/(m·K)로 떨어져 좋은 열전달 용량을 보장하지만 온도에 따른 열전도도 감소는 급속 가열 효율에 영향을 미칩니다. 열팽창 계수는 약 $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 로 세라믹 매트릭스 재료와 잘 맞아 열응력을 줄여주지만 저온 취성으로 인해 열충격을 받으면 균열이 생기기 쉽습니다. 비열은 약 0.45 J/(g·K)이며, 고온에서 약간 증가하여 열확산도에 영향을 미칩니다. 이러한 열역학적 특성은 고온로에서 MoSi₂ 의 성능을 결정합니다.

재료 순도는 열역학적 특성에 영향을 미치는 핵심 요소입니다. 고순도 MoSi₂ 는 불순물(예: Fe 및 C)로 인한 포논 산란을 줄이고, 열전도도를 향상시키며, 결정립계 결함을 줄이고, 열응력 분포를 개선할 수 있습니다. 미세 구조는 열역학적 특성에 상당한 영향을 미칩니다. 고밀도 MoSi₂ (예: 열간 프레스 및 소결)는 열전도도와 열충격 저항성이 더 높은 반면, 기공률이 높은 샘플은 열 산란과 응력 집중으로 인해 성능이 저하됩니다. 도핑 개질은 열역학적 특성을 최적화할 수 있습니다. 예를 들어, W 를 첨가하면 열전도도가 약간 증가하지만 열팽창 불일치로 인해 열응력이 증가할 수 있습니다. 희토류 산화물(예: Y₂O₃) 도핑은 결정립계 강도를 높이고 열충격 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 열간 프레스 또는 반응 소결과 같은 제조 공정 또한 열역학적 특성에 중요한 영향을 미칩니다. 고밀도 샘플은 일반적으로 더 나은 열전도도와 열응력 저항성을 나타냅니다.

외부 환경이 열역학적 특성에 미치는 영향은 무시할 수 없습니다. 작동 온도와 분위기는 재료의 표면 상태와 내부 구조를 변화시켜 열전도도, 열팽창, 열충격 저항성에 직접적인 영향을 미칩니다. 실제 적용에서는 부품 설계 최적화(예: 고온부 표면적 증가) 및 작동 조건 제어(예: 온도 구배 안정화)를 통해 열역학적 성능을 향상시키고 세라믹 소결 및 반도체 열처리와 같은 까다로운 응용 분야의 요구를 충족할 수 있습니다.

2.10.2 분위기의 영향

작동 온도는 MoSi₂ 발열체의 열역학적 특성에 영향을 미치는 핵심 요소로, 열전도도, 열팽창 계수 및 열충격 저항성의 성능을 직접 결정합니다. 실온에서 1000℃ 범위에서 MoSi₂ 의 열전도도는 약 45 W/(m·K)에서 약 25 W/(m·K)로 떨어지며, 이는 주로 고온에서 향상된 포논 산란과 감소된 전자 열전도도의 기여 때문입니다. 1000–1850℃의 고온 범위에서 열전도도는 약 15 W/(m·K)로 더 떨어지지만 세라믹 소결 및 유리 용융과 같은 응용 분야의 열전달 요구 사항을 충족할 수 있습니다. 열팽창 계수는 고온에서 약간

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

증가하지만 $8-9 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 범위에 머물러 세라믹 매트릭스와 잘 일치하고 열 응력을 줄여줍니다. 그러나 고온에서 MoSi_2 의 파괴인성은 $2 \sim 3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 낮고, 급격한 온도 상승 및 하강 시 열응력으로 인해 미세균열이 쉽게 발생하여 열역학적 특성의 안정성에 영향을 미칩니다. 고온 작동은 SiO_2 보호막의 형성 및 안정성에도 영향을 미칩니다. 800°C 이상에서는 치밀한 SiO_2 피막이 기판을 효과적으로 보호하지만, 1850°C 에 가까운 극한 온도에서는 Si 휘발 및 MoO_3 휘발로 인해 피막층이 얇아져 열역학적 특성의 장기 안정성이 저하될 수 있습니다. $400 \sim 700^\circ\text{C}$ 의 "플라그" 온도 범위에서는 비보호 산화물의 생성으로 인해 재료가 분쇄되어 열전도도 및 열충격 저항성이 더욱 저하됩니다. 실제 적용에서는 작동 온도의 악영향을 줄이기 위해 가열 및 냉각 속도를 최적화하고, 초기 SiO_2 피막을 형성하기 위한 전산화 처리를 수행하고, Al_2O_3 또는 SiC 와 같은 보호 코팅을 적용하여 열역학적 특성의 안정성을 향상시킬 수 있습니다. 부품 설계 측면에서 U형 또는 W형 구조를 사용하면 열응력을 분산시키고 고온에서 열역학적 성능을 향상시킬 수 있습니다.

2.10.3 가열/냉각 빈도의 영향

대기는 주로 표면 상태와 재료의 내부 구조를 변경하여 MoSi_2 발열체의 열역학적 특성에 상당한 영향을 미칩니다. 산화성 분위기에서 MoSi_2 표면에 생성된 SiO_2 보호막은 열역학적 특성의 안정성을 효과적으로 유지할 수 있습니다. SiO_2 막의 낮은 산소 확산 계수는 열전도도와 열팽창 계수의 장기적인 일관성을 보장하는 동시에 기판을 산화 부식으로부터 보호합니다. 그러나 습도가 높은 산화성 분위기에서는 SiO_2 막이 수화되어 느슨한 규산염 구조를 형성하고 열전도도와 열충격 저항성을 감소시킬 수 있습니다. 환원성 분위기(예: H_2) 또는 진공 환경에서는 SiO_2 막이 형성되지 않거나 파괴되어 Si 휘발 및 기판 분해, 열전도도의 상당한 감소 및 증가된 열 응력으로 인해 균열이 유발되어 열역학적 특성에 심각한 영향을 미칠 수 있습니다.

불활성 분위기(예: Ar , N_2)는 MoSi_2 의 열역학적 특성에 거의 영향을 미치지 않지만, 장기간 작동하면 미량의 산소가 존재하여 SiO_2 필름이 천천히 형성되어 열전도도가 약간 변경될 수 있습니다. 대기 중의 불순물(예: 황화물 및 염화물)은 MoSi_2 의 표면과 반응하여 비보호 화합물을 형성하여 열역학적 특성의 안정성을 감소시킬 수 있습니다. 대기의 영향에 대처하기 위해 실제 적용에서는 높은 습도 또는 환원 환경을 피하기 위해 안정적인 산화 분위기를 선호해야 합니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 내식성을 향상시키고 열역학적 특성을 유지할 수 있습니다. 또한, 분위기 순도와 구성 요소의 표면 상태를 정기적으로 검사하고 작동 매개변수(예: 분위기 습도 제어)를 최적화하는 것은 MoSi_2 발열체의 열역학적 특성의 안정성을 보장하는 효과적인 조치입니다.

2.10.4 운전 전압의 영향

이규화물(MoSi_2) 발열체의 열역학적 특성에 상당한 영향을 미치며, 특히 세라믹 소결로, 유리 어닐링로, 금속 열처리 장비와 같이 빈번한 열 사이클이 필요한 응용 분야에서 그렇습니다. 열전도도, 열팽창 계수, 열확산도를 포함한 MoSi_2 의 열역학적 특성은 급속 가열/냉각 사이클 동안 발생하는 열응력에 의해 영향을 받습니다. 빈번한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열 사이클은 MoSi_2 의 미세 구조에 열응력이 반복적으로 작용하게 하여 미세균열의 발생 및 전파를 유발할 수 있으며, 특히 저온 취성(파괴 인성 약 $2\sim3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)으로 인해 열전도도와 열충격 저항성이 감소합니다. 또한 $400\sim700^\circ\text{C}$ 의 "플레이그" 온도 범위에서는 빠른 열 사이클링으로 인해 비보호 산화물(MoO_3 와 SiO_2 의 혼합물)이 형성되기 쉬워 표면 분말화가 발생하고 열역학적 특성이 더욱 저해됩니다.

가열/냉각 빈도의 영향은 사이클의 온도 범위 및 속도와 밀접한 관련이 있습니다. 고온($1200\sim1850^\circ\text{C}$)에서 저온(실온 또는 $400\sim700^\circ\text{C}$)으로의 대규모 사이클에서는 열응력이 더욱 크게 발생하여 SiO_2 보호막의 균열이나 박리를 유발하여 내산화성과 열전도도를 약화시킬 수 있습니다. 고주파 사이클(예: 시간당 여러 번 가열 및 냉각)은 미세구조의 피로 손상을 가속화하고 부품 수명을 단축시키는 반면, 저주파 사이클(예: 하루에 한 번)은 열역학적 특성에 비교적 적은 영향을 미칩니다. 재료의 순도와 미세구조는 열 사이클 내성에 매우 중요합니다. 고순도 MoSi_2 는 불순물로 인한 결정립계 약화를 줄이고 균열 전파 위험을 줄일 수 있습니다. 고밀도 미세구조(예: 열간 프레스 및 소결)는 열응력을 효과적으로 분산시키고 열피로 저항성을 향상시킬 수 있지만, 기공률이 높은 시편은 응력 집중으로 인해 균열이 발생하기 쉽습니다. 도핑 개질은 열 사이클링 성능도 향상시킬 수 있습니다. 예를 들어, 희토류 산화물(예: Y_2O_3)을 첨가하면 결정립계 강도를 높이고 균열 전파를 억제할 수 있습니다. 가열/냉각 빈도의 악영향을 완화하기 위해 실제 적용 분야에서 다양한 최적화 조치를 취할 수 있습니다. 가열 및 냉각 속도를 제어하면 열 응력 누적을 줄이고 $400\sim700^\circ\text{C}$ 온도 범위를 빠르게 통과하지 않도록 하여 "플레이그" 산화를 억제할 수 있습니다. 표면 코팅(예: Al_2O_3 또는 SiC)은 열충격 저항성과 SiO_2 필름의 안정성을 향상시켜 열 사이클 수명을 연장할 수 있습니다. 부품 설계를 최적화(예: U 자형 또는 W 자형 구조 사용)하면 열 응력을 분산시키고 균열 발생을 줄일 수 있습니다. 표면 상태를 정기적으로 점검하고 열 사이클 매개변수를 조정하면 MoSi_2 발열체의 열역학적 특성 안정성을 효과적으로 확장하여 고주파 열 사이클 응용 분야의 요구를 충족할 수 있습니다.

2.10.5 전류 밀도의 영향

MoSi_2 발열체의 열역학적 성능과 작동 안정성에 영향을 미치는 주요 외부 요인이며 가열 효율, 온도 분포 및 사용 수명과 직접적인 관련이 있습니다. MoSi_2 의 저항률은 양의 온도 계수 특성을 가지며 실온에서 약 2.0×10^{-5} 이고 1000°C $\Omega\cdot\text{cm}$ 에서 약 4.0×10^{-5} , 1500°C $\Omega\cdot\text{cm}$ 에서 약 4.5×10^{-5} 로 증가합니다. 이러한 특성으로 인해 MoSi_2 는 다른 전압에서 전력 출력을 적응적으로 조정할 수 있지만 고전압 또는 불안정한 전압 조건에서 열역학적 특성에 부정적인 영향을 미칠 수 있습니다. 고전압으로 인해 구성 요소가 빠르게 가열되고 큰 열 응력이 발생하며 특히 저온 취성이 큰 MoSi_2 에서 미세 균열을 유도하고 열전도도와 열충격 저항성을 감소시킬 수 있습니다. 또한 고전압은 국부 과열을 일으킬 수 있으며, 표면 SiO_2 보호막의 Si 또는 MoO_3 의 휘발을 촉진하고, 막이 얇아지고, 산화 저항성이 약해질 수 있습니다.

전압 변동 또한 열역학적 특성에 영향을 미치는 중요한 요인입니다. 잦은 전압 변동은 전류 불안정성을 유발하여 부품 내부의 온도 분포를 불균일하게 만들고, 열응력 집중을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

증가시켜 미세 구조 손상이나 표면 균열을 유발할 수 있습니다. 장기간 고전압 작동은 저항률 드리프트 또는 입자 성장과 같은 MoSi_2 의 노화를 가속화 하고 열확산도와 열전도도를 감소시킬 수 있습니다. 재료 순도와 미세 구조는 전압 영향에 대한 내성에 중요한 역할을 합니다. 고순도 MoSi_2 는 불순물로 인한 국부적인 저항 불균일을 줄이고 과열 위험을 줄일 수 있습니다. 고밀도 미세 구조(예: 열간 프레스 및 소결)는 열응력 분산 능력을 향상시키고 전압 변동에 대한 내성을 강화할 수 있습니다. 도핑 변형(예: W 또는 Nb 첨가)은 저항률을 최적화하고 전압 하에서 전열 안정성을 향상시킬 수 있지만, 산화 저항의 균형을 맞춰야 합니다.

사용 전압의 악영향을 완화하기 위해 실제 적용에서 전압 제어 전략을 최적화해야 합니다. 안정적인 전원 공급 시스템과 전압 레귤레이터를 사용하면 변동을 줄이고 균일한 가열을 보장할 수 있습니다. 콜드 엔드와 핫 엔드의 저항 매칭 설계(예: 콜드 엔드에 고전도성 물질 도핑)는 국부 과열 위험을 줄이고 에너지 효율을 향상시킬 수 있습니다. 보호 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)을 적용하면 표면 산화 저항과 열 응력 내성을 향상시키고 부품 수명을 연장할 수 있습니다. 또한, 전압 입력 및 부품 표면 상태를 정기적으로 모니터링하고 적절한 가열 곡선 설계(예: 저속 가열)를 결합하면 MoSi_2 발열체의 열역학적 특성을 효과적으로 유지하고 세라믹 소결 및 반도체 열처리와 같은 고정밀 응용 분야의 요구를 충족할 수 있습니다.

2.10.6 설치 방법의 영향

MoSi_2 발열체 의 열역학적 특성과 장기 안정성에 중요한 영향을 미치며 가열 전력, 온도 분포 및 재료 노화 거동을 직접 결정합니다. 저항성 가열 재료인 MoSi_2 의 출력은 전류 밀도의 제곱에 비례하므로($P = I^2R$), 높은 전류 밀도는 요소의 온도를 크게 높여 열전도도, 열팽창 및 열충격 저항에 영향을 미칩니다. MoSi_2 의 열전도도는 실온($45 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)보다 고온(1500°C 에서 약 $15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)에서 낮습니다. 높은 전류 밀도는 특히 저온 취성이 큰 MoSi_2 에서 국부 과열을 유발하고 큰 열 응력을 발생시킬 수 있으며, 이는 표면 SiO_2 보호막 에 미세 균열이나 균열이 발생하기 쉽고 열역학적 특성을 감소시킵니다. 또한, 높은 전류 밀도는 SiO_2 필름 의 Si 또는 MoO_3 의 휘발을 가속화하여 필름을 더 얇게 만들고 산화 저항성을 약화시킬 수 있으며, 특히 1850°C 에 가까운 극한 온도에서 그렇습니다.

전류 밀도 분포의 균일성은 열역학적 성능에 매우 중요합니다. 불균일한 전류 밀도(예: 부품 설계 결함 또는 접촉 불량으로 인한 국부적인 높은 전류 밀도)는 온도 구배 증가, 열 응력 및 균열 위험 증가, 열 확산율 감소로 이어집니다. 장기간의 고전류 밀도 작동은 MoSi_2 의 저항률 드리프트 또는 미세 구조 열화 (예: 결정립 성장 또는 결정립계 약화)를 유발하여 열전도도 및 열충격 저항에 더욱 영향을 미칠 수 있습니다. 재료 순도와 미세 구조는 전류 밀도 허용 오차에 상당한 영향을 미칩니다. 고순도 MoSi_2 는 불순물로 인한 국부적인 저항 불균일성을 줄이고 과열 위험을 줄일 수 있습니다. 고밀도 미세 구조(예: 열간 프레스 및 소결 준비)는 열 응력 분산 능력을 향상시키고 전류 밀도 충격에 대한 저항성을 강화할 수 있습니다. 도핑 개질(예: Y_2O_3 첨가)은 결정립계 구조를 최적화하고 저항률을 안정화하며 전류 밀도 하에서 열역학적 특성을 개선할 수

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있습니다. 사용되는 전류 밀도의 악영향을 완화하기 위해 실제 응용 분야에서 부품 설계 및 작동 조건을 최적화해야 합니다. 균일한 단면 설계를 가진 U자형 또는 W자형 부품은 균일한 전류 밀도 분포를 보장하고 국부 과열을 줄일 수 있습니다. 콜드 엔드와 핫 엔드 사이의 저항 매칭(예: 콜드 엔드를 고전도성 재료로 도핑)은 전류 밀도 집중을 줄이고 에너지 효율을 향상시킬 수 있습니다. 보호 코팅(예: Al_2O_3 또는 SiC)을 적용하면 표면 산화 저항과 열 응력 저항을 향상시키고 부품의 수명을 연장할 수 있습니다. 전류 컨트롤러를 사용하여 입력 전류를 안정화하고 과도한 전류 밀도를 방지하며 부품의 표면 상태와 전기적 특성을 정기적으로 점검하는 것은 MoSi_2 발열체의 열역학적 특성 안정성을 유지하는 효과적인 방법입니다. 이러한 최적화 전략은 유리 응용 및 금속 열처리와 같은 고전력 응용 분야의 요구를 충족할 수 있습니다.

2.10.7 부품 품질과 순도의 영향

H는 이규화 몰리브덴 (MoSi_2) 발열체의 열역학적 성능 및 수명에 중요한 영향을 미치는데, 이는 열응력 분포, 온도 균일성 및 기계적 안정성과 직접적인 관련이 있습니다. 열전도도, 열팽창 계수, 열확산도를 포함한 MoSi_2 의 열역학적 특성은 부적절한 설치 방법에서 열 또는 기계적 응력에 의해 악영향을 받을 수 있습니다. 일반적인 설치 방법에는 수직 현수, 수평 지지, 클램핑이 있으며, 각각 열역학적 특성에 미치는 영향이 다릅니다. 수직 현수는 MoSi_2 발열체의 가장 일반적인 설치 방법이며, U자형 또는 W자형 발열체에 적합합니다.

이 방법은 기계적 제약을 줄이고 고온에서 요소의 자유로운 열팽창을 허용하여 열응력을 감소시킬 수 있습니다. 그러나 현수 지점이 적절하게 설계되지 않으면(예: 접촉 지점의 응력 집중) 국부 균열이 발생하고 열전도도와 열충격 저항성이 저하될 수 있습니다. 수평 지지대 설치의 일반적으로 직선 막대형 요소에 사용되지만, 지지 재료(예: 고순도 알루미늄)가 MoSi_2 의 열팽창 계수와 일치하도록 해야 합니다. 그렇지 않으면 열팽창 불일치로 인해 응력 집중이 발생하여 열확산율에 영향을 미칠 수 있습니다. 클램핑 고정 방법은 소형로에서 더 일반적이지만, 과도한 클램핑 힘은 저온 취성으로 인해 MoSi_2 에 미세 균열을 발생시켜 열역학적 특성을 악화시킬 수 있습니다.

설치 방법은 표면 SiO_2 보호막의 안정성과 내산화성에 영향을 미칩니다. 설치 응력이 불균일하면 표면 막층에 균열이 발생할 수 있으며, 특히 400~700℃의 "플레그(plague)" 온도 범위에서 균열이 발생하면 비보호 산화물 형성이 심화되고 열전도도와 열충격 저항성이 저하될 수 있습니다. 또한, 설치 방법은 전류 분포 및 온도 균일성에 간접적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 접촉 불량은 국부 전류 밀도 증가로 이어져 과열을 유발하고 SiO_2 막 열화를 가속화할 수 있습니다. 설치 방법의 영향을 최적화하려면 실제 적용 환경에서 열팽창 불일치를 줄이기 위해 고순도 세라믹 지지대를 사용하고 기계적 응력을 줄이기 위해 유연한 클램핑을 사용하는 등 노 유형에 맞는 설치 설계를 선택해야 합니다. 설치 지점과 MoSi_2 저온부 사이의 접촉을 양호하게 유지하면 전류 균일성이 향상되고 국부 과열이 감소합니다. 설치 지점의 마모 및 느슨함을 정기적으로 점검하고, 적절한 가열 및 냉각 속도(예: 5~10℃/분)를 유지하면 MoSi_2 가열

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

요소의 열역학적 특성을 효과적으로 유지하고 세라믹 소결 및 유리 용해와 같은 응용 분야에서 수명을 연장할 수 있습니다.

MoSi₂ 발열체는 열역학적 특성에 영향을 미치는 핵심적인 고유 요소로, 열전도도, 열팽창 계수, 열충격 저항성 및 장기 안정성을 직접적으로 결정합니다. 고순도 MoSi₂ (순도 ≥99.5%)는 열역학적 특성을 크게 향상시킬 수 있습니다. 열전도도는 실온에서 약 45 W/(m·K), 1500℃에서 약 15 W/(m·K)입니다. 열확산 계수는 실온에서 약 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 1500℃에서 약 $0.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 입니다. 고순도 재료는 불순물(예: Fe, Al, C)로 인한 포논 산란 및 결정립계 약화를 줄여 열전도도 및 열응력 분산 성능을 향상시킬 수 있습니다. 불순물의 존재는 국부적인 저항 불균일성을 초래하고, 열응력 집중을 증가시키며, 열충격 저항을 감소시키고, 심지어 미세균열을 유발할 수 있으며, 특히 MoSi₂의 저온 취성 단계에서 이러한 현상이 두드러집니다. 또한, 불순물은 산소와 반응하여 비보호 산화물을 형성하여 표면 SiO₂ 보호막의 밀도를 약화시키고, 내산화성 및 열역학적 특성의 안정성을 저하시킬 수 있으며, 특히 400~700℃의 "플라그" 온도 범위에서는 불순물이 재료의 분해를 악화시킵니다. MoSi₂는 높은 밀도(이론 밀도의 98% 이상에 가까움)와 낮은 기공률을 가지며, 반응 소결이나 자기 전파 고온 합성(SHS)으로 제조된 샘플보다 열전도도와 열충격 저항성이 우수합니다. 기공률이 높은 부품은 기공 산란열과 응력 집중으로 인해 열전도도가 낮고, 열 사이클 중 균열이 발생하기 쉬워 열확산 계수가 감소합니다.

고품질 MoSi₂ 부품은 균일한 미세 구조와 적절한 결정립 크기(일반적으로 10~50μm)를 가져야 합니다. 결정립이 너무 크면 결정립계 강도가 감소할 수 있으며, 너무 작으면 결정립계 산란이 증가하고 열전도도가 감소할 수 있습니다. 도핑 개질은 품질 및 순도 향상 효과를 더욱 최적화할 수 있습니다. 예를 들어, 희토류 산화물(예: Y₂O₃)을 첨가하면 결정립계 결합을 강화하고 열충격 저항성을 향상시킬 수 있으며, 고순도 도펀트는 추가 불순물의 유입을 방지할 수 있습니다.

부품의 품질과 순도를 향상시키려면 고순도 원료(예: 고순도 Mo 및 Si 분말)를 선택하고 실제 적용 시 제조 공정을 엄격하게 관리해야 합니다. 열간 압착 소결 또는 플라즈마 용사는 밀도를 향상시키고 기공률과 결함을 줄일 수 있습니다. 품질 관리 링크(예: X 선 회절 및 주사 전자 현미경)를 통해 부품의 순도와 미세 구조의 균일성을 확보할 수 있습니다. 보호 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)을 적용하면 저순도 재료의 산화 저항성 부족을 더욱 보완할 수 있습니다. 부품의 표면 상태 및 성능을 정기적으로 검사하고 안정적인 작동 조건(예: 높은 습도 또는 환원 분위기 회피)을 유지하면 MoSi₂ 발열체의 열역학적 특성을 극대화하여 반도체 열처리 및 금속 열처리와 같은 수요가 높은 응용 분야의 요구를 충족할 수 있습니다.

2.11.8 코팅 보호 처리의 효과

MoSi₂ 발열체의 열역학적 특성에 중요한 영향을 미치며, 내산화성, 내열충격성 및 열전도도 안정성을 크게 향상시킬 수 있습니다. 일반적으로 사용되는 보호 코팅에는 산화물 코팅(예: Al₂O₃, ZrO₂), 카바이드 코팅(예: SiC) 및 복합 코팅(예: Al₂O₃ -

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SiC)은 극한 조건에서 MoSi₂ 표면 의 SiO₂ 필름 부족을 보완하기 위해 치밀한 보호층을 형성합니다 .Al₂ O₃ 코팅은 높은 용점(약 2050 ℃)과 낮은 산소 확산 계수(약 10⁻¹⁴ cm²/s, 1500℃)로 인해 산화 저항성을 효과적으로 향상시키고 열전도도(약 1500℃에서 m·K)의 안정성을 유지할 수 있으며, 특히 고온 산화 분위기(1200~1850℃)에서 효과적입니다.

SiC 코팅은 열팽창 계수(약 4.5×10⁻⁶K⁻¹) 와 MoSi₂ (약 8.1×10⁻⁶K⁻¹) 의 일치도가 더 높아 열응력 불일치를 줄이고 열충격 저항성을 향상시켜 세라믹 소결로와 같은 고온 사이클 환경에 적합합니다. 복합 코팅은 여러 재료의 장점을 결합합니다. 예를 들어, Al₂ O₃ - SiC 코팅은 높은 산화 저항성과 열충격 저항성을 모두 갖추고 있어 열역학적 특성의 장기 안정성을 크게 향상시킵니다.

코팅에 의한 열역학적 특성 향상은 접착력, 두께 및 균일성과 밀접한 관련이 있습니다. 고품질 코팅(예: 화학 기상 증착(CVD) 코팅)은 높은 접착력과 균일성을 가지며, 열응력을 효과적으로 분산시키고 열확산 계수(1500℃ 에서 약 0.8×10⁻⁵ m²/s)의 안정성을 유지합니다. 코팅 두께가 너무 두꺼우면(>100μm) 열팽창 불일치로 인한 균열이 발생하고 열전도도가 감소할 수 있으며, 코팅 두께가 너무 얇으면(<10μm) 적절한 보호 기능을 제공하지 못할 수 있습니다. 코팅 공정 또한 열역학적 특성에 상당한 영향을 미칩니다. 플라즈마 용사는 두껍고 조밀한 코팅을 형성할 수 있으며, 이는 산업 규모 적용에 적합하지만 미세 기공이 발생하여 열전도도가 약간 감소할 수 있습니다. CVD 공정으로 생성된 얇은 코팅은 더 균일하고 열응력이 낮으며 고정밀 요구 사항에 적합합니다. 코팅은 또한 "플레이그" 산화(400-700℃)의 영향을 줄일 수 있습니다. 예를 들어, SiC 코팅은 비보호적 MoO₃ 의 형성을 억제 하고 열역학적 특성을 보호할 수 있습니다.

코팅의 장기 안정성은 작업 환경의 영향을 받습니다. 습도가 높은 환경에서는 Al₂ O₃ 코팅이 수화 반응을 일으켜 열전도도가 감소할 수 있습니다. 환원 또는 진공 환경에서는 Si 휘발로 인해 코팅이 열화되어 열확산 계수에 영향을 미칠 수 있습니다. 코팅 보호 처리의 효과를 최적화하려면 실제 적용 분야에서 적용 요건에 따라 적절한 코팅 유형과 공정을 선택해야 합니다. 예를 들어, 반도체 열처리에는 고순도 CVD 코팅이 선호되며, 유리 용해에는 두꺼운 SiC 코팅을 사용할 수 있습니다. 계면 설계(예: SiC 전이층 추가)를 통해 접합력을 향상시키고 박리 위험을 줄일 수 있습니다. 코팅 무결성 및 표면 상태를 정기적으로 검사하고 안정적인 산화 분위기와 적절한 가열 및 냉각 속도(예: 5~10℃/분)를 유지하면 MoSi₂ 발열체의 열역학적 특성에 대한 코팅의 보호 효과를 극대화 하고 고온 적용 분야에서 수명을 연장할 수 있습니다.

2.11 CTIA GROUP LTD MoSi₂ 가열 소자 MSDS

CTIA GROUP LTD.에서 생산하는 이규화 몰리브덴 (MoSi₂) 발열체의 안전한 사용, 보관 및 취급에 대한 정보를 제공합니다 . MoSi₂ 는 고온 산화 저항성과 전기 전도성이 뛰어난 금속간 화합물입니다. 고온 산업 및 실험실용 가열로(예: 세라믹 소결, 유리 용해, 금속 열처리)에 널리 사용됩니다. 다음은 MoSi₂ 소재의 특성과 산업 표준을 기반으로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

한 CTIA GROUP LTD MoSi₂ 발열체 의 MSDS 내용에 대한 자세한 설명입니다 . 여기에는 물리적 및 화학적 특성, 위험 식별, 안전 작동 및 비상 조치가 포함됩니다.

재료 식별 및 구성 : CTIA GROUP LTD 의 MoSi₂ 발열체는 주로 몰리브덴 디실리사이드 (화학식: MoSi₂ , CAS 번호: 12136-78-6)로 구성되며 순도는 보통 ≥99.5%이고 성능 향상을 위해 미량 첨가제(희토류 산화물 또는 산화 알루미늄 등)가 포함될 수 있습니다. MoSi₂ 는 회색 금속 외관, 정방정계 α 형(C11b 형) 결정 구조, 약 6.24g/cm³의 밀도, 약 2030°C의 녹는점, 전기 전도성을 갖는 세라믹 소재입니다. 발열체는 보통 U자형, W 자형 또는 직선 막대이며 고온 산화 분위기에서 표면에 치밀한 SiO₂ 보호막이 형성됩니다. 가능한 불순물에는 Fe, Al, C 등이 포함되며, 생산 배치 및 도핑 공정에 따라 함량은 보통 0.1% 미만입니다.

위험 식별 : MoSi₂ 발열체는 일반적인 고온 사용 시에는 비교적 안전하지만, 특정 조건에서는 다음과 같은 위험이 존재할 수 있습니다. 물리적 위험 측면에서, MoSi₂ 는 실온에서 취성이 있어 기계적 충격이나 부적절한 취급으로 인해 쉽게 파손될 수 있으며, 날카로운 파편으로 인해 상처를 입을 수 있습니다. 화학적 위험 측면에서, MoSi₂ 는 400~700°C의 "플라그" 온도 범위에서 저온 산화를 거치면서 MoO₃ 와 SiO₂ 의 혼합물이 생성되고, 미량의 MoO₃ 증기 (호흡기와 눈에 자극을 줄 수 있음)가 방출될 수 있습니다. 환원 또는 진공 환경에서는 Si 의 휘발로 인해 재료가 분해되고 실리콘 증기가 방출될 수 있으므로 흡입을 피해야 합니다. 환경적 위험 측면에서, MoSi₂ 자체는 환경에 미치는 영향이 적지만, 폐기된 부품은 오염을 방지하기 위해 유해 폐기물로 처리해야 합니다.

안전작업 및 보호 조치 : CTIA GROUP LTD MoSi₂ 발열체 의 안전한 사용을 위해 MSDS 는 다음과 같은 작동 지침을 제공합니다. 취급 시에는 보호 장갑(고온 내열 장갑 등)과 보안경을 착용하고, 날카로운 모서리에 직접 닿지 않도록 하며, 기계적 손상이나 파편으로 인한 부상을 방지하십시오. 설치 시에는 과도한 기계적 응력으로 인한 파손을 방지하기 위해 적절한 고정 방법(수직 지지 또는 유연한 클램핑 등)을 사용해야 합니다. 사용 시에는 전원 공급 시스템이 비례 제어, 위상 트리거 방식인지, 그리고 전류 제한 기능이 있는지 확인하여 비례하지 않는 스위칭이나 "갑작스러운" 전원 공급 방식으로 인한 부품 손상을 방지해야 합니다. 보관 시에는 습기나 산성 환경으로 인한 표면 부식을 방지하기 위해 건조하고 부식성이 없는 가스 환경에 보관해야 합니다.

보관 및 운송 : MoSi₂ 발열체는 건조하고 깨끗한 환경에서 5~35°C 의 온도와 70% 이하의 상대 습도로 보관해야 합니다. 표면 부식이나 SiO₂ 필름의 열화를 방지하기 위해 산성 물질이나 고습 환경과의 접촉을 피하십시오. 운반 시에는 폼이나 나무 상자를 사용하고, 진동이나 충격으로 인한 파손을 방지하기 위해 부품을 고정하십시오. 포장에는 "취급 주의" 및 "방습" 표시를 하고, MSDS 문서를 첨부하여 참조해야 합니다. 운송 시에는 안전한 배송을 위해 위험물 운송 규정(예: UN3077, 환경 유해 물질)을 준수해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 3 장 MoSi₂ 발열체의 구조 및 설계

3.1 MoSi₂ 발열체의 일반적인 구조

몰리브덴 이규화물 (MoSi₂) 발열체는 우수한 고온 산화 저항성, 전기 전도성 및 최대 작동 온도로 인해 고온 산업용로 및 실험실 장비에 널리 사용됩니다. 구조 설계는 가열 효율, 온도 균일성, 열충격 저항 및 사용 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. MoSi₂ 발열체의 일반적인 구조에는 U 형, W 형, L 형, 직선 막대형 및 맞춤형 모양이 있으며, 효율적인 열 분배와 유연한 설치 방법으로 인해 U 형과 W 형이 가장 널리 사용됩니다. 이러한 구조는 일반적으로 핫 엔드(발열부)와 콜드 엔드(연결부)로 구성됩니다. 핫 엔드는 고온에서 열을 발생시키고 콜드 엔드는 전원 공급 장치와의 연결 안정성을 보장하기 위해 고전도성 물질(예: 알루미늄 또는 텅스텐)로 도핑하여 저항을 줄입니다. MoSi₂ 소자의 구조 설계는 세라믹 소결, 유리 용융, 금속 열처리 등 다양한 응용 분야의 요구 사항을 충족하기 위해 용광로 크기, 가열 전력, 열 사이클 빈도 및 설치 방법을 포괄적으로 고려해야 합니다.

MoSi₂ 발열체 의 성능에 매우 중요합니다 . 균일한 전류 분포를 보장하고 국부 과열을 방지하기 위해 고온부와 저온부의 길이, 단면 치수 및 연결 방법을 정밀하게 일치시켜야 합니다. 고온부의 직경은 일반적으로 6~12mm 이고, 저온부의 직경은 고온부의 1.5~2 배로 하여 저온부의 온도를 낮추고 수명을 연장합니다. 발열체의 기하학적 형상(예: U 형 또는 W 형의 굽힘 반경)은 열응력 분포에 영향을 미칩니다. 적절한 굽힘 설계는 열충격 균열 위험을 줄일 수 있습니다. 재료 순도(일반적으로 ≥99.5%)와 열간 프레스 및 소결과 같은 제조 공정은 구조적 무결성에 상당한 영향을 미칩니다. 고순도 및 고밀도 MoSi₂ 는 미세 결함을 줄이고 열 피로 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 표면 처리(예: 연마 또는 코팅)는 내산화성과 열역학적 특성을 향상시킬 수도 있습니다. 실제 적용에서는 가열로 내부 공간, 온도 분포 요구 사항 및 설치 제약 조건에 따라 구조적 설계를 맞춤화해야 합니다. 예를 들어, U 형은 소형 가열로에 적합하고, W 형은 대형 가열로에 적합하여 더욱 균일한 가열을 제공합니다.

3.1.1 U 자형 MoSi₂ 가열소자

U 자형 MoSi₂ 발열체는 가장 일반적인 구조 중 하나이며, 간단하고 컴팩트한 설계와 효율적인 가열 성능으로 인해 실험실용 박스형로 및 세라믹 소결로와 같은 중소형 고온로에 널리 사용됩니다. U 자형 발열체의 구조는 U 자형 굽힘으로 연결된 두 개의 평행한 고온부로 구성되며, 저온부는 고온부 상단에 위치하여 전원 공급 장치에 연결됩니다. U 자형 설계의 주요 장점은 고온부가 집중된 고온 영역을 제공할 수 있다는 점인데, 이는 최대 1800°C 의 산화 분위기 소결과 같이 국부적으로 높은 열 밀도가 요구되는 응용 분야에 적합합니다. U 자형 발열체의 고온부 길이는 일반적으로 100~500mm 이며, 특정 길이는 노 크기 및 전력 요구 사항에 따라 맞춤 제작됩니다. 고온부 직경 은 6~9mm, 저온부 직경은 12~18mm 로 낮은 저항과 효율적인 전류 전달을 보장합니다. U 자형 소자의 열역학적 성능은 컴팩트한 형상으로부터 이점을 얻습니다. 고온 단부 사이의 거리(일반적으로 20~50mm)는 온도 균일성을 최적화하고 열응력

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

집중을 줄입니다. U 자형 구조의 굽힘 반경은 정밀하게 설계되어야 합니다. 반경이 너무 작으면 응력 집중이 발생하여 열충격 균열 위험이 높아지고, 반경이 너무 크면 가열 효율이 저하될 수 있습니다. MoSi_2 의 정온도계수 저항률 (상온에서 약 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, 1500°C 에서 약 $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$)은 U 자형 소자가 고온에서 자동으로 전력을 조절하여 정밀 온도 제어 응용 분야에 적합하도록 합니다. 그러나 U 자형 소자는 빈번한 열 사이클 동안 고온 단부와 저온 단부 사이의 연결부에 응력이 축적되어 미세 균열이 발생할 수 있으며, 특히 저온 취성 (파괴 인성 약 $2 \sim 3 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 이 큰 MoSi_2 의 경우 더욱 그렇습니다. U 자형 요소의 열 충격 저항성과 수명을 개선하기 위해 열간 압착 및 소결 공정을 통해 재료 밀도를 높일 수 있으며, 표면 코팅(SiC 또는 Al_2O_3 등)을 통해 산화 저항성과 열 피로 저항성을 강화할 수 있습니다.

설치 측면에서 U 자형 요소는 일반적으로 수직으로 설치되며, 기계적 응력을 줄이기 위해 냉각부는 세라믹 클램프로 고정됩니다. 설치 중에는 국부 과열을 방지하기 위해 냉각부가 전원 공급 장치와 잘 접촉하도록 해야 합니다. 실제 적용 시, U 자형 요소는 표면 파우더 형성을 유발하는 비보호 산화물(MoO_3 와 SiO_2 의 혼합물) 생성을 방지하기 위해 $400 \sim 700^\circ\text{C}$ 의 "플레이그" 온도 범위를 빠르게 통과하지 않도록 해야 합니다. U 자형 요소의 유지보수에는 굽힘 및 연결 지점의 무결성을 정기적으로 검사하고, 산화 분위기에서 SiO_2 보호막의 상태를 모니터링하여 장기적인 안정성을 보장하는 것이 포함됩니다.

3.1.2 W 형 MoSi_2 발열체

W 형 MoSi_2 가열 소자는 복잡한 형상과 더 큰 가열 면적으로 인해 유리 용해로, 산업용 세라믹 소결로, 금속 열처리 장비와 같이 균일한 온도 영역이 필요한 대형 고온로 또는 시나리오에서 널리 사용됩니다. W 형 소자의 구조는 일반적으로 3 개 이상의 핫 엔드를 포함하는 연속적인 W 자형 굽힘으로 연결된 여러 개의 평행한 핫 엔드로 구성되며, 콜드 엔드는 양쪽 또는 상단에 위치하여 전원 공급 장치에 연결됩니다. 주요 장점은 더 넓은 노 영역을 커버하고 더 균일한 온도 분포를 제공할 수 있다는 것인데, 이는 대형 노 또는 다중 구역 가열 요구 사항에 적합합니다. W 형 소자의 핫 엔드 길이는 일반적으로 $200 \sim 1000 \text{mm}$, 직경은 $6 \sim 12 \text{mm}$, 콜드 엔드 직경은 $12 \sim 24 \text{mm}$ 입니다. 특정 크기는 전력 수요 및 노 설계에 따라 맞춤 제작됩니다. 가열 전력 밀도는 일반적으로 $15 \sim 20 \text{W/cm}^2$ (1700°C 에서)로, 온도 균일성을 유지하면서 높은 전력 출력 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

W 형 소자의 열역학적 성능은 다중 핫엔드 설계의 이점을 제공합니다. 여러 핫엔드 사이의 간격(일반적으로 $30 \sim 60 \text{mm}$)은 열 복사 분포를 최적화하고 국부 과열 및 열응력 집중을 줄일 수 있습니다. W 형 구조의 굽힘 반경은 정밀하게 제어해야 합니다. 반경이 너무 작으면 응력 집중으로 이어져 열충격 균열 위험이 높아지고, 반경이 너무 크면 가열 효율이 떨어질 수 있습니다. MoSi_2 의 양의 온도 계수(PTC) 저항률은 W 형 소자가 고온에서 전력을 적응적으로 조절하여 정밀한 온도 제어 및 안정성을 보장할 수 있도록 합니다. 그러나 W 형 소자는 빈번한 열 사이클 동안 여러 굽힘 및 핫엔드-콜드엔드 연결 지점에서 응력이 누적되어 미세 균열이 발생할 수 있으며, 특히 MoSi_2 의 저온 취성이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

클 때 (과괴 인성이 약 $2\sim 3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) 그렇습니다. 열간 가압 소결 공정은 재료의 밀도를 증가시키고(이론 밀도의 98% 이상에 근접), 미세 결함을 줄이며, 열 피로 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 내산화성과 내열충격성을 더욱 향상시켜 고온 산화 분위기(최대 $1800\sim 1850^\circ\text{C}$)에서 부품의 수명을 연장할 수 있습니다.

설치 측면에서 W 형 부품은 일반적으로 수직으로 매달거나 수평으로 지지하며, 저온부는 고순도 세라믹 클램프 또는 지지대를 사용하여 기계적 응력을 줄이고 열팽창을 허용합니다. 설치 중에는 접촉 저항으로 인한 국부적인 과열을 방지하기 위해 저온부가 전원 공급 장치와 잘 접촉하도록 해야 합니다. W 형 부품의 복잡한 형상은 균일한 전류 분포를 유지하기 위해 각 고온부를 대칭으로 배치하는 등 더 높은 설치 정확도를 요구합니다. 실제 적용에서는 표면 파우더 형성을 유발하는 비보호 산화물(MoO_3 와 SiO_2 의 혼합물)의 형성을 방지하기 위해 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 "플레이그" 온도 범위를 빠르게 통과하지 않도록 해야 합니다. W 형 부품의 유지보수는 산화성 분위기에서 장기적인 안정성을 보장하기 위해 곱힘, 연결 지점 및 표면 SiO_2 보호막의 무결성을 정기적으로 검사해야 합니다. W 형 구성 요소의 유지 관리에는 연결 지점의 성능 저하를 유발하는 과열을 방지하기 위해 저온단 온도(일반적으로 400°C 이하로 유지)를 모니터링하는 작업도 포함됩니다.

W 형 소자의 성능을 최적화하기 위해, 설계 과정에서 핫엔드 수를 늘리거나 핫엔드 간격을 조정하여 특정 노 유형의 온도 분포 요건을 충족할 수 있습니다. 예를 들어, 대형 유리 용해로에서는 다중 핫엔드 W 형 소자를 사용하여 넓은 영역에 걸쳐 균일한 가열을 달성할 수 있습니다. 표면 연마 또는 코팅은 표면 결함을 줄이고 열충격 저항성과 산화 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 실제 적용에서 W 형 소자를 설치할 때는 노의 열 흐름 역학을 고려해야 하며, 열 집중이나 열 부족을 방지하기 위해 소자를 합리적으로 배치해야 합니다. 불순물이 소자 표면을 오염시키지 않도록 노 내부를 정기적으로 청소하는 것 또한 W 형 소자의 수명을 연장하는 중요한 조치입니다. W 형 소자의 복잡한 구조는 대형 산업용 노에서 사용하는 데 상당한 이점을 제공하지만, 제조 정확도와 설치 기술에 대한 요구 사항도 더 높습니다.

3.1.3 나선형 MoSi_2 가열 소자

나선형 MoSi_2 가열 소자는 소형 실험실 튜브 퍼니스, 열 분석 장비 또는 특정 산업용 퍼니스와 같이 높은 열 밀도와 컴팩트한 가열 면적이 필요한 응용 분야에 적합한 특수 구조입니다. 나선형 소자의 구조는 나선형 핫 엔드에 감긴 MoSi_2 막대로 구성되며 콜드 엔드는 전원 공급 장치를 연결하기 위해 나선형의 양쪽 끝에 위치합니다. 주요 장점은 제한된 공간에서 높은 열 전력을 제공할 수 있다는 것입니다. 나선형 모양은 핫 엔드의 표면적을 늘리고 열 복사 효율을 향상시켜 빠른 가열과 정밀한 온도 제어가 필요한 응용 분야에 적합합니다. 나선형 소자의 핫 엔드 직경은 일반적으로 $4\sim 9\text{mm}$ 이며, 나선형 턴 수와 피치(일반적으로 $5\sim 20\text{mm}$)는 퍼니스 크기 및 전력 요구 사항에 따라 설계됩니다. 콜드 엔드 직경은 낮은 저항과 효율적인 전류 전송을 보장하기 위해 $8\sim$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

18mm 입니다. 가열 전력 밀도는 $20\sim 25\text{ W/cm}^2(1700^\circ\text{C})$ 에 도달할 수 있으며, 이는 U 형 및 W 형보다 높으며 고온 국부 가열 시나리오에 적합합니다.

나선형 요소의 열역학적 성능은 높은 표면적과 콤팩트한 설계에 기인합니다. 나선형 구조는 균일한 열 복사를 제공하고 온도 구배를 줄여 관로의 원통형 가열 요구에 적합합니다. 그러나 나선형 형상의 복잡한 기하학적 구조는 제조의 어려움을 가중시킵니다. 나선형 곡률과 피치는 정밀하게 제어되어야 합니다. 나선형이 너무 조여지면 열 응력 집중이 발생하고 균열 위험이 증가할 수 있으며, 특히 MoSi_2 의 저온 취성 단계(파괴 인성은 약 $2\sim 3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)에서 더욱 그렇습니다. MoSi_2 의 정온도계수 저항률은 나선형 요소가 고온에서 출력을 적응적으로 조절하여 온도 제어 정확도를 보장할 수 있도록 합니다. 열충격 저항성과 수명을 향상시키기 위해 열간 가압 소결 공정은 재료의 밀도(이론 밀도의 98% 이상)를 높이고 미세 결함을 줄일 수 있습니다. 표면 코팅(열팽창 계수가 각각 약 $4.5\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 및 $8\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 인 SiC 또는 Al_2O_3 등)은 산화 저항성과 열 피로 저항성을 향상시켜 고온 산화 분위기(최대 1800°C)에서 구성 요소의 수명을 연장할 수 있습니다.

설치 측면에서 나선형 요소는 일반적으로 수평 또는 수직으로 고정되며, 냉각부는 고순도 세라믹 지지대로 고정됩니다. 나선형 부분이 열팽창을 허용하기 위해 기계적으로 구속되지 않도록 해야 합니다. 설치 중 나선형 구조의 균일성에 특히 유의하여 설치 응력으로 인한 변형이나 균열을 방지해야 합니다. 실제 적용에서는 비보호 산화물(MoO_3 와 SiO_2 의 혼합물) 생성 및 표면 분진 발생을 방지하기 위해 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 "플러그" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 나선형 요소의 유지보수는 산화 분위기에서 안정성을 보장하기 위해 나선형 피치, 냉각부 연결 지점 및 표면 SiO_2 보호막의 무결성을 정기적으로 검사해야 합니다. 나선형 요소의 높은 제조 비용과 엄격한 설치 정확도 요구 사항으로 인해 주로 고정밀 실험실 장비 또는 특수 산업용로에 사용됩니다.

3.1.4 직봉형 MoSi_2 가열소자

직선 막대형 MoSi_2 가열 소자는 터널로, 연속 열처리로 또는 일부 대형 산업용로와 같이 장거리 선형 가열이 필요한 용광로 유형에 적합한 단순하고 선형적인 구조입니다. 직선 막대형 요소의 구조는 단일 직선형 핫 엔드로 구성되며 콜드 엔드는 양쪽 끝 또는 한쪽 끝에 위치하여 전원 공급 장치에 연결됩니다. 주요 장점은 구조가 간단하고 제조 비용이 낮으며 대량 생산 및 설치가 쉽고 장거리 가열 영역을 포괄하는 데 적합하다는 것입니다. 직선 막대형 요소의 핫 엔드 길이는 일반적으로 $300\sim 2000\text{mm}$, 직경은 $6\sim 12\text{mm}$, 콜드 엔드 직경은 $12\sim 24\text{mm}$ 입니다. 특정 크기는 용광로 길이 및 전력 요구 사항에 따라 맞춤 제작됩니다. 가열 전력 밀도는 일반적으로 $15\sim 18\text{ W/cm}^2(1700^\circ\text{C})$ 이며 중간 및 낮은 전력 밀도의 균일 가열 응용 분야에 적합합니다.

직선 막대형 소자의 열역학적 성능은 선형 설계로 인해 제한됩니다. 핫엔드 길이 방향의 온도 분포는 U 형 또는 W 형 소자만큼 균일하지 않을 수 있습니다. 특히 장거리 가열 시 중간 부분은 고온이고 양단은 저온인 현상이 발생할 수 있습니다. 온도 균일성을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

개선하기 위해 핫엔드 직경을 조정하거나 분할 도핑을 통해 저항 분포를 최적화할 수 있습니다. MoSi_2 의 양의 온도 계수 저항률 (상온에서 약 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, 1500°C 에서 약 $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$)은 직선 막대형 부품이 고온에서 전력을 적응적으로 조절할 수 있도록 하지만, 선형 구조는 빈번한 열 사이클 동안 핫엔드 양단의 응력 집중으로 인해 미세 균열을 생성할 수 있으며, 특히 MoSi_2 의 저온 취성이 클 때(파괴 인성이 약 $2 \sim 3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 그렇습니다. 열간 가압 소결 공정은 재료 밀도를 높이고, 미세 결함을 줄이며, 열충격 저항성과 열피로 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 내산화성과 표면 안정성을 더욱 향상시켜 고온 산화 분위기(최대 1800°C)에서 부품의 수명을 연장할 수 있습니다.

설치 측면에서 직선 막대형 요소는 일반적으로 수평으로 지지되거나 수직으로 매달리며, 저온부는 고순도 세라믹 클램프로 고정됩니다. 요소의 처짐이나 파손을 방지하기 위해 지지점이 고르게 분포되도록 해야 합니다. 설치 시에는 접촉 저항으로 인한 국부 과열을 방지하기 위해 저온부와 전원 공급 장치 사이의 접촉 품질에 특히 주의해야 합니다. 실제 적용에서는 비보호 산화물 생성 및 표면 분진 발생을 방지하기 위해 $400 \sim 700^\circ\text{C}$ 의 "전염병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 직선 막대형 요소를 유지하려면 고온부 표면, 저온부 연결 지점 및 SiO_2 보호막의 무결성을 정기적으로 점검하고, 과열 및 성능 저하를 방지하기 위해 저온부 온도(일반적으로 400°C 미만)를 모니터링해야 합니다. 직선 막대형 요소는 구조가 간단하기 때문에 제조 및 유지 보수 비용이 낮지만, 온도 균일성에 대한 요구 사항이 높으므로 노 설계와 함께 레이아웃을 최적화해야 합니다.

3.1.5 U자형, W자형 및 직선형 구조 설계 비교

U자형, W자형, 직선 막대형 MoSi_2 발열체는 MoSi_2 발열체 중 가장 일반적인 구조로, 각각 고유한 특성을 가지고 있어 다양한 노 유형 및 적용 분야에 적합합니다. U자형 발열체는 컴팩트한 디자인과 중앙 집중식 가열 용량으로 유명합니다. 고온부 길이는 일반적으로 $100 \sim 500 \text{ mm}$, 직경은 $6 \sim 9 \text{ mm}$ 이며, 출력 밀도는 1700°C 에서 20 W/cm^2 에 달할 수 있습니다. 국부적으로 높은 열 밀도가 요구되는 중소형 노(예: 실험실용 박스형 노, 세라믹 소결로)에 적합합니다. 구조가 간단하고 설치가 용이하며 열 효율이 높다는 장점이 있지만, 고온부가 차지하는 면적이 작고 온도 균일도는 고온부 간격(일반적으로 $20 \sim 50 \text{ mm}$)에 의해 제한됩니다. 잦은 열 사이클 동안 고온부와 저온부 연결부에 미세 균열이 발생하기 쉽습니다. W자형 발열체는 다중 고온부 설계로 더 넓은 가열 면적을 제공합니다. 핫엔드 길이는 $200 \sim 1000 \text{ mm}$, 직경은 $6 \sim 12 \text{ mm}$, 전력 밀도는 $15 \sim 20 \text{ W/cm}^2$ 입니다. 균일한 온도장이 필요한 대형로(예: 유리 용해로 및 산업용 세라믹 소결로)에 적합합니다. 장점은 온도 분포가 균일하고 열 응력에 대한 저항성이 강하지만 제조가 복잡하고 비용이 많이 들며 여러 번 구부리면 열 충격 균열 위험이 높아집니다. 직선 막대형 요소는 선형 구조로 알려져 있으며 핫엔드 길이는 $300 \sim 2000 \text{ mm}$, 직경은 $6 \sim 12 \text{ mm}$, 전력 밀도는 $15 \sim 18 \text{ W/cm}^2$ 로 장거리 선형 가열이 가능한 터널로 또는 연속 열처리기에 적합합니다. 장점은 제조 비용이 낮고 설치가 간단하지만 온도 균일성이 좋지 않고 응력 집중으로 인해 핫엔드 양쪽 끝에 균열이 쉽게 발생합니다. 열역학적 특성의 관점에서 볼 때, 세 구조의 열전도도(실온에서 약 $45 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) 및 1500°C 에서 약 $15 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)와 열팽창계수(약 $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)는 유사하지만, 기하학적 형태는 열응력

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분포에 영향을 미칩니다. U 형과 W 형의 굽힘 설계는 열응력을 분산시킬 수 있으며, 열충격 저항성은 직봉형보다 우수하지만, 직봉형은 장거리 가열 시 굽힘 응력 집중점이 없어 기계적 안정성이 더 높습니다.

내산화성 측면에서 세 가지 구조 모두 표면 SiO_2 보호막(산소 확산 계수는 1500°C 에서 약 $10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$)에 의존하지만 W 형은 표면적이 더 크고 SiO_2 막의 형성 및 유지가 더 균일하며 내산화성이 약간 더 우수합니다. 직봉형은 장거리 가열 시 온도 불균일로 인해 국부적인 SiO_2 막 열화가 발생할 수 있습니다. 열 사이클 성능 측면에서 U 형과 W 형은 복잡한 형상으로 인해 빈번한 열 사이클에서 미세 균열이 발생하기 쉬운 반면, 직봉형은 구조가 간단하여 열 피로에 더 강하지만 온도 분포는 최적화되어야 합니다.

설치 및 유지 보수 측면에서 U 형 요소는 수직 매달기에 적합하며 설치가 간단하지만 냉단 접촉에 주의해야 합니다. W 형 요소는 정밀하고 대칭적으로 설치해야 하며 유지 보수가 복잡하지만 대형 용광로에 적합합니다. 직선 막대는 설치가 유연하지만 처짐을 방지하기 위해 균등하게 지지해야 합니다. 제조 공정은 세 가지 구조에 유사한 영향을 미칩니다. 열간 프레스 및 소결은 밀도(98%에 가까움)를 향상시킬 수 있으며 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 산화 저항성과 열충격 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 선택 시 U 형은 소형 고정밀 용광로에 적합하고 W 형은 대형 균일 가열로에 적합하며 직선 막대형은 장거리 선형 가열에 적합합니다. 용광로 설계, 전력 요구 사항 및 열 사이클 빈도에 따라 종합적으로 고려해야 합니다.

3.2 MoSi_2 가열소자의 치수 설계

이규화 몰리브덴 (MoSi_2) 발열체는 성능 최적화의 핵심 요소이며, 가열 효율, 온도 분포, 열충격 저항성 및 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. MoSi_2 발열체의 크기는 일반적으로 고온부와 저온부의 직경과 길이, 그리고 고온부와 저온부의 비율에 따라 결정됩니다. 일반적인 규격으로는 $\Phi 6/12$ (고온부 직경 6mm, 저온부 직경 12mm) 및 $\Phi 9/18$ (고온부 직경 9mm, 저온부 직경 18mm)이 있습니다. 이러한 크기 설계는 고온 산화 분위기에서 효율적인 가열과 장기적인 안정성을 보장하기 위해 퍼니스 크기, 전력 요구 사항, 열 사이클 빈도 및 설치 방법을 기반으로 종합적으로 결정되어야 합니다. $\Phi 6/12$ 규격은 소형 및 중형 퍼니스(예: 실험실용 박스 퍼니스 및 세라믹 소결로)에 적합합니다. 고온부 직경이 작고 전력 밀도가 높아 급속 가열 및 중앙 집중식 가열이 필요한 응용 분야에 적합합니다. $\Phi 9/18$ 규격은 대형 가열로(예: 유리 용해로, 산업용 열처리로)에 적합합니다. 고온부 직경이 더 크고 출력 밀도는 약간 낮지만(일반적으로 $15\sim 20 \text{ W}/\text{cm}^2$), 더 균일한 온도 분포와 더 높은 기계적 강도를 제공할 수 있으며, 넓은 면적 또는 고부하 가열 시나리오에 적합합니다.

크기 설계의 핵심 목표는 핫엔드와 콜드엔드의 전기열 및 기계적 특성의 균형을 맞추는 것입니다. 핫엔드 직경은 저항과 가열 전력을 결정합니다. 작은 핫엔드(예: 6mm)는 저항이 더 높고 고전력 밀도 응용 분야에 적합하지만 열 충격 저항성과 기계적 강도가 낮습니다. 큰 핫엔드(예: 9mm)는 저항이 낮고 전력 밀도는 적당하지만 열 충격 저항성과 수명이 더 좋습니다. 콜드엔드 직경은 일반적으로 핫엔드의 1.5-2 배(예: 6/12 또는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9/18)이고 고전도성 재료(예: 알루미늄 또는 텅스텐)(실온에서 약 $0.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$)로 도핑하여 저항률을 줄여 콜드엔드 온도가 400°C 미만으로 유지되어 과열 및 성능 저하를 방지합니다. 핫엔드 길이(일반적으로 100~1000mm)는 퍼니스 깊이와 가열 영역에 따라 맞춤 설정해야 합니다. 너무 짧으면 열이 집중될 수 있고, 너무 길면 온도 불균일을 초래할 수 있습니다. 냉각부 길이(일반적으로 50~300mm)는 전원 공급 장치와의 안정적인 연결을 보장하고 가열부에서 냉각부로 열전도를 방지하기 위해 노벽을 통과할 수 있을 만큼 충분히 길어야 합니다.

크기 설계는 MoSi_2 의 열역학적 특성도 고려해야 합니다. 열전도도(실온에서 약 $45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 및 1500°C 에서 약 $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)와 열팽창 계수(실온~ 1000°C 에서 약 $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)는 열 응력 분포에 영향을 미칩니다. 더 작은 직경의 핫 엔드(예: 6mm)는 빠른 열 사이클 동안 열 응력이 집중되어 미세 균열이 발생하기 쉽고, 특히 MoSi_2 의 저온 취성 단계에서 미세 균열이 발생합니다(파괴 인성은 약 $2 \sim 3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). 더 큰 직경의 핫 엔드(예: 9mm)는 열 응력을 더 잘 분산시키고 열 충격 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 준비 공정은 치수 정확도에 매우 중요합니다. 열간 프레싱 및 소결은 구성 요소 밀도(98%에 가까움)와 치수 균일성을 보장하고 미세 결함을 줄일 수 있습니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 내산화성과 내열 피로성을 향상시키고 치수 설계의 신뢰성을 높일 수 있습니다. 실제 적용에서는 용광로 유형 및 작동 조건에 맞춰 크기 선택을 최적화해야 합니다. 예를 들어, $\Phi 6/12$ 는 고정밀 실험실 용광로에 적합하고, $\Phi 9/18$ 은 대형 산업용 용광로에 적합합니다. 표면 분진 발생을 방지하려면 $400 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 의 "플레이그" 온도 범위를 빠르게 통과하지 않도록 해야 합니다.

3.3 열장 및 저온단 구조의 최적 설계

MoSi_2 가열 소자의 열장 및 콜드 엔드 구조의 최적화 설계는 효율적인 가열, 균일한 온도 분포 및 긴 수명을 달성하는 데 중요합니다. 열장 설계는 퍼니스의 온도 분포가 공정 요구 사항(예: 세라믹 소결의 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 정확도)을 충족하도록 하는 것을 목표로 하며, 이는 핫 엔드 레이아웃, 모양 및 전력 밀도를 최적화하여 달성됩니다. MoSi_2 의 열전도도(1500°C 에서 약 $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)와 양의 온도 계수 저항률(1500°C 에서 약 $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$)은 열장 설계가 핫 엔드의 수와 간격을 정확하게 일치시켜야 합니다. 예를 들어, U 자형 요소(20~50mm)의 핫 엔드 간격은 소형 퍼니스의 중앙 가열에 적합하고 W 자형 요소(30~60mm)의 다중 핫 엔드 간격은 대형 퍼니스의 균일한 가열에 적합합니다. 열장 최적화는 열 복사와 대류도 고려해야 합니다. 핫엔드의 표면적과 배열(예: 대칭형 레이아웃)은 열 분포에 직접적인 영향을 미칩니다. 핫엔드의 수를 늘리거나 나선형 요소를 사용하면 열장의 균일성을 향상시킬 수 있지만, 제조 복잡성이 증가합니다. 전력 밀도 설계는 적정 수준(1700°C 에서 $15 \sim 25 \text{ W}/\text{cm}^2$)이어야 합니다. 전력 밀도가 너무 높으면 국부 과열이 발생하고 SiO_2 보호막의 안정성이 저하될 수 있습니다.

콜드 엔드 구조 최적화는 콜드 엔드 온도(일반적으로 $\leq 400^{\circ}\text{C}$)를 낮추고 전기적 연결 안정성과 구성 요소 수명을 개선하는 것을 목표로 합니다. 콜드 엔드는 저항률(약 $0.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$)을 낮추고 발열을 줄이기 위해 고전도성 재료(예: 알루미늄)로 도핑되며, 직경(12~24mm)은 열 방출을 향상시키기 위해 핫 엔드의 1.5~2 배입니다. 콜드 엔드의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

길이(50~300mm)는 노벽을 통과하고 저온 구역에 들어가 전원 공급 장치에 연결할 수 있을 만큼 길어야 하지만 너무 길면 재료 비용이 증가할 수 있습니다.콜드 엔드와 핫 엔드 사이의 연결은 응력 집중점이며, 열 응력과 미세 균열을 줄이기 위해 부드러운 전환을 만들기 위해 점진적인 도핑 또는 용접 기술(예: 플라즈마 용접)이 필요합니다.콜드 엔드의 표면은 종종 접촉 전도성을 향상시키고 산화를 방지하기 위해 전도성 코팅(예: 알루미늄 도금층)으로 코팅됩니다. 냉각단 설계를 최적화하려면 세라믹 절연 슬리브나 공기 대류를 통해 냉각단 온도를 낮추는 등 방열 환경을 고려해야 하며, 이를 통해 과열과 연결 지점의 열화를 방지해야 합니다.

고온 영역과 저온 영역 구조의 조율된 최적화는 용광로 설계 및 운전 조건과 결합되어야 합니다. 열장 시뮬레이션(예: 유한 요소 해석)을 통해 온도 분포를 예측하고 고온 영역 레이아웃 및 전력 할당을 결정할 수 있습니다. 저온 영역 방열 설계는 저온 영역 온도의 안정성을 보장하기 위해 용광로 벽의 밀봉재 및 단열재(예: 알루미늄나 섬유)와 일치해야 합니다. MoSi_2 의 저온 취성(약 $2\sim3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 의 파괴 인성)은 비보호 산화물 형성을 방지하기 위해 $400\sim700^\circ\text{C}$ 의 "플레이그" 온도 범위에서의 급격한 열 사이클링을 피하도록 최적화된 설계를 요구합니다. 표면 코팅(예: 열팽창 계수가 약 $4.5\times10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 인 SiC)은 고온 영역의 내산화성과 저온 영역의 내식성을 향상시킬 수 있습니다. 실제 응용 분야에서는 열장 균일성과 저온단 연결 상태를 정기적으로 검사하고 가열 및 냉각 속도($5\sim10^\circ\text{C}/\text{분}$)를 조정하면 고온장 및 저온단 구조의 장기 안정성을 확보하고 반도체 열처리, 유리 용해 등 수요가 높은 응용 분야를 충족할 수 있습니다.

3.4 전기 연결 및 지원 시스템 설계

MoSi_2 가열 소자의 전기적 연결 및 지지 시스템 설계는 작동 안정성, 가열 효율 및 서비스 수명에 매우 중요합니다. 전기적 연결 시스템은 국부적 과열 및 전력 손실을 방지하기 위해 콜드 엔드와 전원 공급 장치 간의 저저항 접촉을 보장해야 합니다. 동시에 지지 시스템은 기계적 지지를 제공하고 열 팽창을 허용하며 열 응력 및 균열 위험을 줄여야 합니다. MoSi_2 의 콜드 엔드 저항률(실온에서 약 $0.5\times10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}$)은 핫 엔드($2.0\times10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}$)보다 훨씬 낮으며 전도도는 고전도성 물질(예: 텅스텐)로 알루미늄 도금하거나 도핑하여 최적화됩니다. 전기적 연결은 일반적으로 고전도성 클램프(예: 구리 또는 알루미늄 합금)를 사용하여 콜드 엔드를 고정합니다. 클램프 표면은 산화를 방지하고 접촉 저항이 0.01Ω 미만이 되도록 니켈이나 은으로 도금해야 합니다. 적절한 클램핑력(일반적으로 $5\sim10 \text{ N}/\text{cm}^2$)을 연결 지점에 가해야 합니다. 너무 세게 조이면 MoSi_2 의 취성 파괴(파괴인성 약 $2\sim3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)가 발생할 수 있으며, 너무 느슨하면 아크 발생이나 과열이 발생할 수 있습니다.

전기 연결 설계 시에는 전원 공급 장치 유형과 제어 시스템도 고려해야 합니다. MoSi_2 부품은 비례 제어 또는 위상 트리거 전원 공급 장치에 적합하며, 비례하지 않는 스위칭이나 부품의 "갑작스러운" 전원 공급 장치 손상을 방지하기 위해 전류 제한 기능(최대 전류 밀도 $\leq 10 \text{ A}/\text{mm}^2$)을 갖춰야 합니다. 전압 조정기와 변압기는 입력 전압(일반적으로 $20\sim100 \text{ V}$)을 안정화하고 MoSi_2 의 양의 온도 계수 저항률 변화(1500°C 에서 약 4.5×10^{-5})에 맞춰야 합니다. $\Omega\cdot\text{cm}$). 저온 연결부에는 냉각부 온도를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\leq 400^{\circ}\text{C}$ 로 유지하여 연결 지점의 열화를 방지하기 위한 방열 장치(예: 공랭식 또는 수랭식 재킷)를 장착해야 합니다. 케이블은 고온 내성(예: 니켈 기반 합금 케이블)을 사용하고 과도한 접촉 저항을 방지하기 위해 저온 연결부 크기에 맞는 제품을 선택해야 합니다. 연결 신뢰성을 개선하기 위해 전도성 페이스트나 알루미늄 호일 개스킷을 사용하여 접촉 전도성을 강화할 수 있습니다.

지지 시스템 설계는 MoSi_2 요소의 기계적 안정성과 열 팽창 자유도를 보장해야 합니다. 일반적인 지지 재료는 고순도 알루미늄 또는 산화지르코늄(ZrO_2)으로, 열 응력을 줄이기 위해 MoSi_2 의 열 팽창 계수($8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)와 일치 합니다. 지지 형태에는 클램프, 서스펜션 후크 및 지지 빔이 포함됩니다. 수직 서스펜션은 U 자형 및 W 자형 요소에 적합하고 수평 지지는 직선 막대 요소에 적합합니다. 지지는 응력 집중 을 피하기 위해 고온에서 MoSi_2 가 팽창할 수 있도록 유연한 구조로 설계해야 합니다(1500°C 에서 약 0.8% 선형 팽창). 지지 표면은 MoSi_2 표면의 SiO_2 보호 필름 이 마모되는 것을 방지하기 위해 매끄러워야 합니다 . 또한 지지 시스템은 가열부가 가열 영역에 노출되고 냉각부가 저온 영역에 위치하도록 하기 위해 가열로 단열재(알루미늄 섬유 등)와 조정되어야 합니다 .

전기 연결 및 브래킷 시스템의 조화로운 설계는 작동 환경과 열 사이클 빈도를 고려해야 합니다. $400\sim 700^{\circ}\text{C}$ 의 "플레이그" 온도를 빠르게 통과하면 비보호성 산화물 형성을 방지하고 연결 지점과 브래킷 표면을 보호할 수 있습니다. 클램프의 접촉 상태, 브래킷 마모 및 저온부 온도를 정기적으로 점검하고, 연결 지점 산화물을 세척하고, 클램핑력을 조정하면 시스템 수명을 연장할 수 있습니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 저온부의 내식성과 브래킷의 내구성을 향상시킬 수 있습니다. 실제 적용에서는 고온 산화 분위기에서 MoSi_2 발열체의 안정적인 작동을 보장하기 위해 전기 연결 및 브래킷 시스템을 노 유형(예: 관로, 박스로) 및 용도(예: 세라믹 소결, 금속 열처리)에 따라 맞춤 설계해야 합니다 .

3.5 단자 구조 및 연결 방법

몰리브덴 디실리사이드 (MoSi_2) 발열체의 단자 구조와 연결 방법은 전기적 성능, 기계적 안정성 및 수명에 중요한 영향을 미칩니다. 단자는 일반적으로 전력 시스템에 연결하는 역할을 하는 콜드 엔드 부분을 말합니다. 열 팽창과 기계적 응력을 견디는 동시에 낮은 저항 접촉, 높은 전도성 및 고온 내식성을 보장해야 합니다. MoSi_2 콜드 엔드 의 저항률 (실온에서 약 $0.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$)은 전도성이 높은 재료로 도핑하여 핫 엔드(실온에서 약 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$)보다 상당히 낮습니다. 그리고 그 직경은 일반적으로 핫 엔드(예: $\Phi 6/12$ 또는 $\Phi 9/18$ 사양)의 1.5-2 배로 열 발생을 줄이고 콜드 엔드 온도를 400°C 이하로 유지합니다. 끝단 구조 설계는 응력 집중을 줄이고 미세균열 발생을 방지하기 위해 저온단과 고온단 사이의 천이 영역을 최적화해야 하며, 특히 MoSi_2 의 저온 취성 단계 (파괴인성 약 $2\sim 3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)에서 이러한 현상이 발생해야 합니다. 일반적인 끝단 구조에는 직선형, 곡선형, 테이퍼형 천이형이 있습니다. 직선형 저온단은 U 자형 및 직선 막대형 요소에 적합합니다. 곡선형 저온단(예: 90° 굽힘)은 W 자형 또는 공간 제약형로에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적합합니다. 테이퍼형 천이형은 점진적인 직경 변화를 통해 고온단과 저온단 사이의 연결을 매끄럽게 하여 열응력을 감소시킵니다.

연결 방법에는 주로 클램핑 연결, 용접 연결 및 볼트 연결이 있습니다. 클램핑 연결이 가장 일반적인 방법입니다. 고전도성 클램프(예: 구리 또는 알루미늄 합금, 표면에 니켈 또는 은 도금)를 사용하여 콜드 엔드를 고정합니다. 접촉 저항은 0.01Ω 미만으로 제어해야 합니다. 클램핑 힘은 적당해야 합니다($5-10\text{ N/cm}^2$). 너무 조이면 MoSi_2 의 취성 파괴가 발생할 수 있고 너무 느슨하면 아크 또는 국부 과열이 발생할 수 있습니다. 접촉 전도성을 높이기 위해 콜드 엔드 표면에 알루미늄 코팅이나 전도성 페이스트를 도포할 수 있습니다. 용접 연결은 플라스마 용접 또는 저항 용접을 사용하여 콜드 엔드를 전도성 조인트(예: 니켈 기반 합금)에 연결합니다. 고정밀 응용 분야에 적합하지만 핫 엔드의 열화를 방지하기 위해 용접 공정 중 온도를 제어해야 합니다. 볼트 연결은 대형 산업용 퍼니스에 적합합니다. 콜드 엔드는 고온 내성 볼트와 개스킷으로 고정됩니다. 설치가 쉽지만 접촉 저항이 약간 높습니다. 정기적으로 느슨함을 점검해야 합니다. 연결 방법은 전원 공급 시스템과 일치해야 합니다. MoSi_2 부품은 비비레 스위치로 인한 부품 손상을 방지하기 위해 전류 제한 기능(최대 전류 밀도 $\leq 10\text{ A/mm}^2$)이 있는 비레 제어 또는 위상 트리거 전원 공급 장치를 사용하는 것이 좋습니다.

단자 구조 및 연결 방법 최적화는 열 사이클링 및 환경 요인을 고려해야 합니다. 잦은 열 사이클링은 저온부 연결부에 열 응력 축적을 유발하여 미세 균열이나 접촉 저항 증가를 유발할 수 있으며, 특히 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 "악화" 온도 범위에서 비보호 산화물(MoO_3 와 SiO_2 의 혼합물)이 연결부를 부식시킬 수 있습니다. 내구성 향상을 위해 저온부를 SiC 또는 Al_2O_3 보호층(열팽창 계수는 각각 약 $4.5\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 및 $8\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$)으로 코팅하여 내산화성과 내식성을 향상시킬 수 있습니다. 방열 설계(예: 공랭식 또는 세라믹 절연 슬리브)는 저온부를 낮게 유지하고 연결부의 수명을 연장할 수 있습니다. 실제 적용에서는 클램프 또는 솔더 접합부의 무결성을 정기적으로 점검하고, 산화물을 청소하고, 클램핑력을 조정함으로써 단자 연결부의 장기적인 안정성을 보장할 수 있습니다. 또한, 끝단 구조와 연결 방법의 설계는 저온 구역에 차가운 끝이 위치하고 세라믹 소결 및 유리 용해와 같은 고온 응용 분야의 신뢰성 요구 사항을 충족하도록 용광로 단열재(예: 알루미나 섬유)와 브래킷 시스템과 조화를 이루어야 합니다.

3.6 제품 맞춤형 설계의 핵심 포인트

MoSi_2 발열체의 맞춤형 설계는 특정 노 유형 및 공정 요건을 충족하는 데 핵심적인 요소이며, 구조, 크기, 재료 변형 및 작동 조건을 종합적으로 최적화하는 것을 포함합니다. 맞춤형 설계는 효율적인 가열, 균일한 온도 영역 및 긴 수명을 달성하기 위해 적용 시나리오(예: 실험실용 튜브로, 산업용 세라믹 소결로, 유리 용해로 또는 반도체 열처리로)에 따라 발열체의 형상, 전력 밀도, 온도 범위 및 설치 방법을 결정해야 합니다. MoSi_2 의 열역학적 특성과 양의 온도 계수 저항률은 맞춤형 설계에 유연성을 제공하지만, 저온 취성으로 인해 설계 시 열 응력과 기계적 안정성을 충분히 고려해야 합니다. 맞춤형 설계의 몇 가지 핵심 사항은 다음과 같습니다. 첫째, 구조와 크기의 맞춤화는 용광로의 기하학 및 가열 요구 사항과 일치해야 합니다. U 자형 요소(핫 엔드 직경 $6-9\text{mm}$, 길이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

100-500mm)는 소형 용광로의 중앙 가열에 적합하고, W 자형 요소(핫 엔드 길이 200-1000mm)는 대형 용광로의 균일 가열에 적합하며, 나선형 유형은 관형 용광로의 높은 열 밀도 요구 사항에 적합하고, 직선 막대 유형은 장거리 선형 가열에 적합합니다. 핫 엔드와 콜드 엔드의 직경 비율(예: $\Phi 6/12$ 또는 $\Phi 9/18$)은 전력 밀도에 따라 최적화해야 하며, 핫 엔드 길이와 간격은 열장(예: 유한 요소 해석)으로 시뮬레이션하여 온도 균일성($\pm 5^{\circ}\text{C}$)을 보장해야 합니다. 콜드 엔드 길이(50-300mm)는 용광로 벽을 통과하여 저온 구역에 들어가기에 충분해야 합니다. 특수한 용광로 유형에는 비표준 모양(예: L 자형 또는 다중 굽힘형)이 필요할 수 있으며, 열 응력 집중을 줄이기 위해 굽힘 반경을 정밀하게 제어해야 합니다(일반적으로 $\geq 10\text{mm}$).

MoSi_2 의 순도 ($\geq 99.5\%$)는 내산화성과 열전도도에 직접적인 영향을 미칩니다. 고순도 원료는 불순물(예: Fe 및 Al)로 인한 결정립계 약화를 줄일 수 있습니다. 도핑 개질(예: Y_2O_3 또는 Al_2O_3 첨가)은 결정립계 강도를 높이고 열충격 저항성을 향상시켜 빈번한 열 사이클 적용에 적합합니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 SiO_2 보호막의 수명을 연장하고 "플레이그" 산화에 대한 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 코팅 두께(10~50 μm)는 작동 온도 및 분위기에 따라 최적화해야 합니다. 너무 두껍게 하면 박리가 발생할 수 있으며, 너무 얇으면 보호 기능이 충분하지 않습니다. 열간 프레스 및 소결과 같은 준비 공정은 밀도(98%에 가까움)를 확보 하고, 미세 결함을 줄이며, 기계적 및 열역학적 특성을 향상시켜야 합니다.

셋째, 작동 조건의 맞춤 설정은 온도, 분위기 및 열 사이클 빈도를 고려해야 합니다. MoSi_2 구성 요소의 최대 작동 온도는 산화 분위기에서 1850°C 에 도달할 수 있지만 SiO_2 필름의 손상을 방지하기 위해 환원 또는 진공 환경에서 1500°C 미만으로 낮춰야 합니다. 맞춤형 설계는 분위기 유형(예: 수분 함량, 불순물 함량)을 명확히 해야 합니다. 고습 환경은 SiO_2 필름의 수화를 유발하고 열전도도를 감소시킬 수 있습니다. 높은 열 사이클 빈도(예: 반도체 열처리)가 있는 응용 분야는 $400-700^{\circ}\text{C}$ 를 빠르게 통과하는 것을 피하기 위해 가열 및 냉각 속도($5-10^{\circ}\text{C}/\text{분}$)를 최적화해야 합니다. 전력 제어 시스템은 MoSi_2 의 저항 특성과 일치해야 하고 비례 제어 전원 공급 장치를 사용해야 하며 과부하를 방지하기 위해 전압 조정기(20-100V) 및 전류 제한 기능이 있어야 합니다.

마지막으로, 설치 및 유지보수를 위한 맞춤형 설계는 퍼니스 구조와 조화를 이루어야 합니다. 수직 서스펜션은 U 자형 및 W 자형 요소에 적합하고, 수평 지지대는 직선 막대형에 적합하며, 브래킷 재료(예: 열팽창 계수가 약 $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 인 알루미늄)는 열팽창(약 0.8%, 1500°C)을 허용하기 위해 MoSi_2 와 일치해야 합니다. 전기 연결은 접촉 저항이 0.01Ω 미만이 되도록 고전도성 클램프 또는 용접 조인트를 사용해야 합니다. 맞춤형 설계는 콜드 엔드 온도, SiO_2 필름 상태 및 연결 지점 무결성의 정기적인 검사와 퍼니스 불순물(예: 알칼리 금속 산화물)의 세척을 포함한 유지보수 지침을 제공해야 합니다. 열장 시뮬레이션, 재료 최적화 및 작동 조건의 일치를 통해 맞춤형 설계는 특정 응용 분야의 성능 요구 사항을 충족하고 고온 환경에서 MoSi_2 발열체의 수명을 연장할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 4 장 MoSi₂ 발열체의 제조 공정

4.1 원자재 선정 및 배합 원칙

몰리브덴 이규화물 (MoSi₂) 발열체는 원료의 선택과 비율로 시작하며 , 원료의 품질은 열역학적 특성, 산화 저항성 및 소자의 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. MoSi₂ 는 화학식이 MoSi₂ 인 금속간 화합물입니다 . 고순도 몰리브덴(Mo)과 실리콘(Si) 원료에서 합성해야 하며, 일반적으로 분말 야금으로 분말 형태로 제조합니다. 원료 선택의 핵심 원칙은 높은 순도(일반적으로 ≥99.5%)와 낮은 불순물 함량을 보장하여 결정립계 약화 및 비보호 산화의 위험을 줄이는 것입니다.

몰리브덴 분말은 ≥99.9%의 순도가 필요하고 주요 불순물(예: Fe, Al, C)의 함량은 0.01% 미만이어야 합니다. Fe 와 Al 은 결정립계 부식을 유발하고 열충격 저항성을 감소시킬 수 있기 때문입니다. 탄소 불순물은 탄화물을 생성하고 저항률에 영향을 미칠 수 있습니다. 실리콘 분말은 SiO₂ 보호막 에 결합을 유발하는 산소 및 질소와 같은 비금속 불순물을 피하기 위해 고순도(≥99.9%)여야 합니다. 입자 크기 분포 또한 중요한 요소입니다. 몰리브덴 분말과 실리콘 분말의 입자 크기는 일반적으로 1~ 10μm 로 조절됩니다 . 입자가 너무 크면 소결이 불균일해질 수 있으며, 입자가 너무 작으면 제조 비용이 증가합니다.

MoSi₂ 의 화학양론비 (Mo:Si = 1:2 몰비) 에 기반하며 , 몰리브덴과 실리콘의 이론 질량비는 약 2.55:1 입니다. 완전한 반응을 보장하기 위해 실제 비율은 화학양론비에서 약간 벗어날 수 있습니다. 예를 들어, 고온 소결 중 휘발 손실을 보상하기 위해 실리콘 함량을 0.5~1% 증가시킵니다. 도핑 변경은 성능을 최적화하는 중요한 수단입니다. 일반적으로 사용되는 도판트에는 희토류 산화물(예: Y₂ O₃)이 있습니다. La₂ O₃ 를 0.1~ 1 중량 % 첨가하여 입계 강도와 내열충격성을 향상시키거나, 알루미늄을 첨가하여 SiO₂ 박막 의 안정성을 개선합니다 . 도판트는 추가 불순물의 유입을 방지하기 위해 고순도(≥99.95%)여야 합니다. 배합 공정은 원료의 산화를 방지하기 위해 아르곤과 같은 불활성 분위기 또는 진공 환경에서 수행해야 합니다. 혼합 균일성은 최종 성능에 매우 중요합니다. 일반적으로 혼합에는 행성형 볼 밀 또는 V 형 믹서를 사용하며, 볼 밀링 시간과 속도는 입자 파손이나 오염을 방지하기 위해 제어됩니다.

원료의 선택과 비율은 또한 준비 공정과 응용 프로그램 요구 사항을 고려해야 합니다. 예를 들어, 열간 프레싱 소결은 밀도(98%에 가까움)를 개선하기 위해 더 미세한 입자(1-5μm)가 필요한 반면 , 자체 전과 고온 합성(SHS)은 비용을 줄이기 위해 약간 더 큰 입자(5-10μm)를 수용할 수 있습니다 . 고정밀 응용 프로그램(예: 반도체 열처리)의 경우 초고순도 원료(≥99.99%)를 선택해야 하며 비율 정확도(±0.1%)를 엄격하게 관리해야 합니다. 품질 관리 프로세스에는 원료가 설계 요구 사항을 충족하는지 확인하기 위해 화학 성분 분석(예: ICP-MS) 및 입자 크기 분포 검출(예: 레이저 입자 크기 분석기)이 포함됩니다. 합리적인 원료 선택 및 비율은 이후의 성형 및 소결의 기초를 마련하여 고온 산화 분위기에서 MoSi₂ 발열체의 안정성과 신뢰성을 보장합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2 분말야금 및 등방압성형 공정

MoSi₂ 발열체 제조의 핵심 공정입니다. 등방성 가압 성형과 결합하면 U 자형, W 자형, 직선 막대형 및 나선형 구조에 적합한 고밀도 및 고성능 요소를 생산할 수 있습니다. 분말야금 공정은 원료 혼합, 성형, 소결 및 후처리의 네 가지 주요 단계로 구성됩니다. 이 중 등방성 가압 성형은 요소의 치수 정확도와 미세 구조 균일성을 보장할 수 있는 핵심 성형 기술입니다. MoSi₂의 열전도도(1500℃에서 약 15 W/(m·K)), 열팽창 계수(약 8.1×10⁻⁶ K⁻¹) 및 산화 저항성은 높은 밀도(≥98%)와 낮은 결함률에 따라 달라집니다. 분말야금과 등방성 가압 성형의 조합은 이러한 요구 사항을 효과적으로 충족할 수 있습니다.

원료 혼합 : 혼합 공정은 고순도 몰리브덴 분말과 실리콘 분말을 화학양론비(Mo:Si = 1:2) 또는 실리콘 함량이 약간 높은 비율(실리콘 함량 0.5~1% 증가)로 균일하게 혼합하는 공정입니다. 일반적으로 불활성 분위기(예: 아르곤) 또는 진공 환경에서 행성형 볼 밀 또는 V 형 믹서를 사용합니다. 볼 밀링 매질은 고순도 알루미늄 또는 지르코니아이며, 볼 대 재료 비율은 2:1~5:1로 조절하고, 혼합 시간은 입자가 오염 없이 고르게 분산되도록 4~8 시간입니다. 도펀트(예: Y₂O₃, Al₂O₃)는 혼합 단계에서 0.1~2 중량 %의 비율로 첨가되며, 입자 크기를 조절하여 균일한 분포를 유지해야 합니다. 혼합된 분말은 체질하여 응집된 입자를 제거하고 건조하여 수분을 제거합니다.

등압 가압 : 등압 가압(냉간 등압 가압, CIP)은 MoSi₂ 발열체를 성형하는 주요 기술입니다. 혼합된 분말은 액체 매질(예: 물 또는 오일) 내에서 균일한 압력을 가하여 원하는 형상(예: U 자형, W 자형 또는 직선 막대형 성형체)으로 가압됩니다. 등압 가압의 장점은 균일한 압력과 높은 성형체 밀도로, 후속 소결 과정에서 불균일한 수축을 줄일 수 있다는 것입니다. 성형 금형은 일반적으로 내압성이 뛰어나고 MoSi₂ 분말과 화학 반응이 없는 유연한 고무 또는 폴리우레탄 재질로 제작됩니다. 공정 변수에는 압력, 유지 시간, 분말 충전 균일성 등이 포함되며, 성형체에 균열이나 박리가 없는지 확인해야 합니다. 나선형과 같은 복잡한 형상은 분할 성형이 필요하거나 예비 성형 기술과 결합해야 할 수 있습니다. 성형체의 강도를 향상시키기 위해 소량의 유기 결합제를 첨가할 수 있으며, 이는 후속 예비 소결 과정에서 제거됩니다.

소결 공정 : 소결은 분말 야금의 핵심 단계로, MoSi₂ 그린 바디가 고밀도에 도달하고 안정적인 정방정계 α 형 결정 구조를 형성할 수 있게 합니다. 일반적인 소결 방법에는 열간 가압 소결(HP)과 무압 소결이 있습니다. 열간 가압 소결은 고성능 MoSi₂ 가열 요소에 더 적합합니다. 열간 가압 소결은 진공 또는 불활성 분위기(아르곤)에서 수행되며 온도는 1600~1800℃, 압력은 20~40MPa, 유지 시간은 1~3 시간입니다. 소결 공정 동안 몰리브덴은 실리콘과 반응하여 MoSi₂를 형성하는 반면 도펀트(예: Y₂O₃)는 결정립계 결합을 촉진하고 기공을 줄입니다. 소결 온도는 정밀하게 제어해야 합니다. 온도가 너무 높으면 Si 휘발이 발생하여 SiO₂ 필름의 품질이 저하될 수 있습니다. 온도가 너무 낮으면 밀도가 부족해져 열전도도와 열충격 저항성에 영향을 미칠 수 있습니다. 무압력 소결은 1700~1900℃의 온도에서 진행되므로 비용에 민감한 응용 분야에 적합하지만, 밀도가 낮아 미세 균열 위험이 높아질 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

후가공 : 소결된 MoSi_2 부품은 표면 연마, 치수 트리밍, 보호 코팅 적용을 포함한 후가공이 필요합니다. 다이아몬드 휠을 사용한 표면 연마는 표면 결함을 제거하고 열응력 집중 위험을 줄입니다. 치수 트리밍은 부품이 설계 사양을 충족하는지 확인합니다. 보호 코팅은 플라즈마 용사 또는 화학 기상 증착(CVD)으로 도포하여 내산화성과 "플래그" 산화에 대한 저항성을 향상시킵니다. 품질 검사에는 밀도 시험(아르키메데스법), 미세 구조 분석(SEM), 저항률 측정이 포함되어 부품 성능이 세라믹 소결, 유리 용융 등의 적용 요건을 충족하는지 확인합니다.

분말 야금 및 등압 성형 공정 최적화에는 비용과 성능에 대한 포괄적인 고려가 필요합니다. 등압 성형과 열간 성형을 결합하면 반도체 열처리와 같은 고정밀 응용 분야에 적합한 고밀도 부품을 생산할 수 있습니다. 무압 소결은 비용이 저렴하고 대규모 산업용에 적합합니다. 공정 제어는 비보호성 산화물 생성을 방지하기 위해 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 "악화" 온도 범위를 피해야 합니다. 고온 산화 분위기에서 MoSi_2 발열체의 안정성과 신뢰성을 보장하기 위해 원료 순도, 소결체의 품질 및 소결 매개변수를 정기적으로 테스트해야 합니다.

4.3 고온소결 및 후가공 기술

이규화 몰리브덴 (MoSi_2) 발열체 제조의 핵심 공정입니다. 성형된 성형체를 고밀도(이론 밀도 98% 이상), 우수한 기계적 특성, 안정적인 정방정계 α 형 결정 구조를 가진 부품으로 변환하여 열전도도, 내산화성, 내열충격성이 고온 응용 분야의 요건을 충족하도록 합니다. 소결 공정은 일반적으로 산화 방지를 위해 진공 또는 아르곤과 같은 불활성 분위기에서 수행됩니다. 일반적인 방법으로는 열간 가압 소결(HP), 무압력 소결, 자가 전과 고온 합성(SHS) 등이 있습니다. 열간 가압 소결은 고성능 MoSi_2 부품의 주요 공정입니다. 온도는 $1600\sim 1800^\circ\text{C}$, 압력은 $20\sim 40\text{MPa}$, 유지 시간은 $1\sim 3$ 시간으로 제어됩니다. 고온은 몰리브덴이 실리콘과 완전히 반응하여 MoSi_2 를 형성하도록 하는 반면, 도펀트는 결정립계 결합을 촉진하고 기공률을 감소시킵니다. 소결 온도는 정밀하게 제어되어야 합니다. 온도가 너무 높으면 Si 가 휘발되어 표면 SiO_2 보호막의 품질이 저하될 수 있습니다. 온도가 너무 낮으면 밀도가 부족하여($<95\%$) 열전도도와 열충격 저항성이 저하됩니다.

표면 연마, 치수 트리밍, 성능 테스트를 포함하여 MoSi_2 부품의 성능 최적화에 매우 중요합니다. 표면 연마는 다이아몬드 연삭 휠이나 알루미늄 연마재를 사용하여 소결 과정에서 발생하는 표면 결함(미세 기공 및 소결 결절 등)을 제거하고, 열응력 집중을 줄이며, 열충격 저항성을 향상시킵니다. 치수 트리밍은 CNC 절삭과 같은 정밀 가공을 통해 부품이 설계 사양을 충족하도록 보장하여 U자형, W자형 또는 나선형과 같은 구조의 정확도 요건을 충족합니다. 성능 테스트에는 밀도 테스트(아르키메데스법, 목표 $\geq 98\%$), 미세 구조 분석, 저항률 측정이 포함되어 부품의 전기적 및 열적 성능의 일관성을 보장합니다. 전산화 처리는 표면에 치밀한 SiO_2 보호막을 형성하여 내산화성과 "플래그" 산화 방지 능력을 향상시킬 수 있습니다. 후처리는 비보호성 산화물(MoO_3 와 SiO_2 의 혼합물) 생성을 방지하기 위해 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 온도 범위를 피하여 불활성 분위기에서 수행해야 합니다. 고품질 후처리는 고온 산화 분위기에서 MoSi_2 부품의 안정성과

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수명을 크게 향상시켜 반도체 열처리와 같은 고정밀 응용 분야의 요구를 충족할 수 있습니다.

4.4 표면 보호층 기술

MoSi₂ 발열체 제조에 중요한 부분입니다. 보호 코팅을 적용하면 내산화성, 내열충격성, 내식성이 향상되고 고온 산화 분위기에서 발열체의 수명이 연장됩니다. MoSi₂ 는 800°C 이상에서 자연적으로 SiO₂ 보호막을 형성 하지만, 극한 온도 또는 잦은 열 사이클에서는 Si 또는 MoO₃ 의 휘발로 인해 SiO₂ 막이 얇아질 수 있으며, 특히 400~700°C 의 "플레이그" 온도 범위에서는 분말화되기 쉽습니다. 표면 보호층은 산화 코팅(예: Al₂O₃)을 적용하여 SiO₂ 막의 단점을 보완합니다. ZrO₂), 카바이드 코팅(예: SiC) 또는 복합 코팅(예: Al₂O₃ - SiC). Al₂O₃ 코팅(용점 약 2050°C)은 플라즈마 용사 또는 화학 기상 증착(CVD)으로 10~50μm 두께로 도포됩니다. 높은 산화 저항성과 낮은 산소 확산 계수 를 가지며 세라믹 소결로에 적합합니다. SiC 코팅은 반응 소결 또는 CVD 로 20~100μm 두께로 도포됩니다. 향상된 내열충격성과 내마모성을 가지며 유리 용해로에 적합합니다. 복합 코팅은 Al₂O₃ 와 SiC 등 여러 소재의 장점을 결합한 코팅입니다. 높은 산화 저항성과 열 충격 저항성을 모두 갖추고 복잡한 작업 조건에 적합한 코팅 입니다.

코팅 도포 공정은 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 플라즈마 용사는 두껍고 조밀한 코팅을 형성할 수 있어 산업 규모 생산에 적합하지만, 미세 기공이 생겨 열전도도가 약간 감소할 수 있습니다. CVD 공정은 높은 접착력과 낮은 열응력을 가진 균일하고 얇은 코팅(10~30μm)을 생성하여 고정밀 적용에 적합하지만 비용이 상대적으로 높습니다. 코팅 두께는 정밀하게 제어되어야 합니다. 너무 두껍게 하면 열팽창 불일치로 인해 박리가 발생할 수 있으며, 너무 얇으면 보호력이 부족할 수 있습니다. 계면 설계(예: SiC 전이층 추가)를 통해 코팅과 MoSi₂ 기판 간의 접합력을 향상시키고 열응력을 줄일 수 있습니다. 코팅은 또한 높은 습도 또는 부식성 분위기(예: 황 함유 가스)를 견뎌야 합니다. Al₂O₃ 코팅은 습도가 높은 환경에서 수화될 수 있으므로 공정 매개변수를 최적화해야 합니다. 품질 검사에는 코팅 두께 측정(초음파 또는 SEM), 접착력 시험(스크래치 시험), 내산화성 시험이 포함되어 코팅 성능을 보장합니다. 표면 보호층 기술의 최적화는 적용 환경과 결합되어야 합니다. 반도체 열처리로는 오염 방지를 위해 고순도 CVD 코팅이 필요하고, 유리 용해로는 열충격 저항성을 높이기 위해 두꺼운 SiC 코팅을 선호합니다. 코팅의 무결성을 정기적으로 점검하고 400~700°C 온도 범위를 빠르게 통과시키면 "플레이그" 산화 및 코팅 열화를 방지할 수 있습니다. 앞으로 나노구조 코팅 및 다층 복합 코팅은 MoSi₂ 부품의 표면 성능을 더욱 향상시켜 더욱 까다로운 고온 적용 요건을 충족할 것으로 예상됩니다.

4.5 용접 및 끝단 가공 기술

MoSi₂ 발열체 제조 의 최종 단계로, 전원 공급 장치에 대한 콜드 엔드 연결의 안정성과 전열 성능을 보장하는 동시에 기계적 및 열적 응력을 견딜 수 있도록 끝단 구조를 최적화하는 것을 목표로 합니다. MoSi₂ 콜드 엔드 는 저항률을 줄이기 위해

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고전도성 재료(예: 알루미늄 또는 텅스텐)로 도핑됩니다. 직경은 핫 엔드의 1.5~2 배이며 과열 열화를 방지하기 위해 낮게 유지해야 합니다. 용접 기술은 콜드 엔드를 전도성 조인트(예: 니켈 기반 합금 또는 구리 합금)에 연결하는 데 사용되어 낮은 접촉 저항(<0.01 Ω)과 높은 기계적 강도를 보장합니다. 일반적인 용접 방법에는 플라즈마 용접과 저항 용접이 있습니다. 플라즈마 용접은 불활성 분위기(예: 아르곤)에서 수행되며 온도는 1200~1400℃로 제어됩니다. 균일하고 고강도 용접을 형성할 수 있어 고정밀 응용 분야(예: 반도체 열처리)에 적합합니다. 저항 용접은 고전류를 사용하여 저온부와 접합부를 빠르게 가열합니다. 비용은 저렴하지만 용접 균일성이 다소 낮아 산업용에 적합합니다. 용접 공정 중 고온부의 MoSi_2 결정 구조가 손상되거나 SiO_2 피막이 손상되는 것을 방지하기 위해 과도한 온도는 피해야 합니다.

끝단 가공 기술에는 콜드 엔드 표면 처리, 치수 트리밍, 전도성 코팅 적용이 포함됩니다. 콜드 엔드 표면은 기계적으로 연마되어 산화층과 결함을 제거하여 클램프 또는 용접부와의 접촉 품질을 향상시킵니다. 치수 트리밍은 CNC 가공 또는 다이아몬드 절삭을 사용하여 콜드 엔드의 직경과 길이가 설계 공차를 충족하고 U 자형, W 자형 또는 직선 막대 부품에 적합하도록 합니다. 전도성 코팅(예: 5~20μm 두께의 알루미늄 도금층)은 콜드 엔드의 전도성을 향상시키고 접촉 저항을 줄이며 산화 부식을 방지하기 위해 전기 도금 또는 용사로 도포됩니다. 끝단 가공은 또한 원뿔형 전이 또는 기울기 도핑 기술을 사용하여 열 응력 분포를 원활하게 하고 미세 균열 위험을 줄여 핫 엔드와 콜드 엔드 사이의 전이 영역을 최적화해야 합니다(MoSi_2 파괴 인성은 약 $2\sim3\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). 가공 과정은 400~700℃의 "전염병" 온도 범위를 피하고 비보호 산화물의 형성을 방지하기 위해 불활성 분위기에서 수행되어야 합니다.

용접 및 끝단 가공 최적화는 작동 조건과 설치 방법을 고려해야 합니다. 잦은 열 사이클은 용접부 또는 끝단에 응력 집중을 유발할 수 있으므로, 용접 무결성과 저온단부 온도를 정기적으로 점검해야 합니다. 내식성과 내열충격성을 향상시키기 위해 저온단부에 보호 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3 , 두께 10~50μm)을 적용할 수 있습니다. 품질 검사에는 용접 강도 시험(인장 또는 전단 시험), 접촉 저항 측정, 미세 구조 분석(SEM)이 포함되어 최종 성능을 보장합니다. 실제 적용에서는 고온 산화 분위기에서 MoSi_2 발열체의 장기 안정성을 보장하기 위해 용접 및 끝단 가공을 전기 연결 시스템(예: 구리 클램프) 및 브래킷 설계(알루미늄 지지대)와 조화시켜야 하며, 세라믹 소결, 유리 용융 등의 적용 요건을 충족해야 합니다.



CTIA GROUP LTD 몰리브덴 규산염 막대

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

제 5 장 MoSi₂ 발열체의 성능 시험

5.1 저항률과 온도 관계 시험

이규화 몰리브덴 (MoSi₂) 발열체 의 주요 전열 성능 매개변수로 , 발열 효율, 출력 및 온도 제어 정확도에 직접적인 영향을 미칩니다. MoSi₂ 는 양의 온도 계수(PTC) 저항률 특성을 가지고 있으며, 온도가 증가함에 따라 저항률이 증가합니다. 따라서 고온에서 출력을 적응적으로 조절할 수 있으며, 세라믹 소결 및 유리 용융(최대 1800~1850°C)과 같은 고온 응용 분야에 적합합니다. 저항률과 온도 간의 관계 시험은 다양한 온도에서 MoSi₂ 의 저항 특성을 정량화하고, 전열 안정성을 검증하며, 부품 설계 및 작동 매개변수 최적화를 위한 데이터를 제공하기 위한 것입니다. 이 시험은 일반적으로 실험실 또는 산업용로에서 고정밀 저항 시험기(예: 4 탐침법)와 온도 제어로를 사용하여 데이터 신뢰성을 보장합니다.

시험 방법은 MoSi₂ 발열체(U 형, W 형, 공통 규격 Φ6/12 또는 Φ9/18 등)를 제어된 산화 분위기로 넣고 온도를 점진적으로 높이면서 실온(25°C)에서 1800°C 까지의 범위에서 저항률을 측정하는 것입니다. 시험 장비는 고정밀 DC 전원 공급 장치(정전류 또는 정전압 모드, 전류 밀도 $\leq 10 \text{ A/mm}^2$), 디지털 멀티미터(정확도 $\pm 0.1\%$), 그리고 열전대(K 형 또는 S 형, 정확도 $\pm 1^\circ\text{C}$)를 포함합니다. 시험 중에는 저항률에 영향을 미치는 비보호 산화물(MoO₃ 와 SiO₂ 의 혼합물)의 생성을 방지하기 위해 400~700°C 의 "플라그(plague)" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 저항률(ρ)은 $\rho = R \cdot A / L$ 공식으로 계산합니다. 여기서 R 은 측정 저항, A 는 핫엔드 단면적, L 은 핫엔드 길이입니다. 시험 환경은 산화성 분위기를 유지하고 습도는 30% 미만으로 유지하여 표면 SiO₂ 보호막의 안정성을 확보했습니다.

MoSi₂ 는 실온 에서 약 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 이며, 온도가 증가함에 따라 크게 증가하여 1000°C $\Omega \cdot \text{cm}$ 에서 약 $4.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, 1500°C $\Omega \cdot \text{cm}$ 에서 약 $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, 1800°C $\Omega \cdot \text{cm}$ 에서 최대 $4.8 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$... 고순도 MoSi₂ 의 저항률 곡선은 더 안정적이며, 고밀도 부품의 저항률 변동은 작습니다. 도핑을 변경하면 저항률을 더욱 안정화하고 결정립계 산란을 줄일 수 있습니다. 또한, 열 사이클링이 저항률에 미치는 영향을 기록해야 합니다. 여러 번의 열 사이클링 후 저항률이 약간 증가할 수 있으므로, 장기적인 안정성을 평가해야 합니다. 테스트 시 주의 사항에는 장비 정확도 교정, 안정적인 저온 연결(접촉 저항 $< 0.01 \Omega$), 환원성 또는 고습 환경(습도 70% 초과 시 SiO₂ 필름 수화 발생 가능) 회피 등이 포함됩니다. 테스트 데이터는 저항률-온도 곡선(예: 이차 다항식)을 적용하여 분석하여 부품 설계 및 전력 제어 시스템을 최적화합니다. 실제 적용에서 저항률 테스트 결과는 고온 산화성 환경에서 MoSi₂ 부품의 작동 매개변수를 결정하여 전열 성능 및 온도 제어 정확도를 보장합니다.

5.2 고온 수명과 열충격 성능의 관계에 대한 시험

고온 사용 수명과 열충격 성능은 MoSi₂ 발열체의 핵심 성능 지표로, 고온 산화 분위기(최대 1800~1850°C)에서의 신뢰성과 내구성을 결정합니다. 고온 사용 수명은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

발열체가 목표 온도에서 큰 성능 저하(예: 저항률 드리프트, 미세 균열 전파, SiO₂ 피막 손상) 없이 연속 작동할 수 있는 시간을 의미하며, 열충격 성능은 급격한 온도 변화(예: 열 사이클링 또는 급속 냉각 및 가열)에서 발열체가 균열에 저항하는 능력을 의미합니다. MoSi₂ 는 저온 취성과 "플래그" 산화로 인해 열 사이클에서 손상되기 쉽습니다. 고온 사용 수명과 열충격 성능 간의 관계를 시험하는 것은 실제 작동 조건(예: 세라믹 소결, 급속 열처리)에서 발열체의 내구성을 평가하고 재료 및 설계 최적화를 위한 기반을 제공하기 위한 것입니다. 시험 방법에는 장기 고온 작동 시험과 열충격 사이클 시험이 포함됩니다. 장기 고온 작동 시험은 산화 분위기에서 수행됩니다. MoSi₂ 소자(U 형 또는 W 형, Φ6/12 또는 Φ9/18 등)를 목표 온도에 놓고, 전력 밀도를 15~20 W/cm²로 제어하며, 1000~5000 시간 동안 연속 작동시켜 저항률 변화, 표면 SiO₂ 박막 상태 및 미세 구조 변화를 기록합니다. 시험 장비는 고온로(정확도 ±5℃), 저항 시험기(4 탐침법, 정확도 ±0.1%), 그리고 현미경(SEM, 균열 및 박막층 분석)을 포함합니다. 열충격 사이클 시험은 급속 가열 및 냉각을 시뮬레이션합니다. 일반적인 조건은 25~1500℃ 사이클, 10~20℃/분의 가열 및 냉각 속도, 100~1000 회 사이클, 그리고 "플래그" 산화를 방지하기 위해 400~700℃를 빠르게 통과하는 것입니다. 시험 후 균열의 개수(광학현미경, 배율 50~200 배), SiO₂ 피막 두께 및 기계적 강도 변화(3 점 굽힘 시험, 파괴 강도 약 200~300MPa)를 평가하였다.

MoSi₂ 구성 요소의 서비스 수명은 1500℃에서 5000 시간 이상, 1800℃에서 약 1000~2000 시간에 도달할 수 있습니다. 서비스 수명은 SiO₂ 필름의 안정성에 영향을 받습니다. 고온에서 Si 휘발 및 MoO₃ 휘발로 인해 필름 층이 더 얇아지고(<5 μm), 산화 저항이 감소하고 저항률이 10~20% 증가하여 성능이 저하될 수 있습니다. 고순도 MoSi₂ (≥99.5%) 및 열간 압축 소결 구성 요소(밀도 ≥98%)는 불순물(예: Fe, Al) 및 기공이 결정립계 약화 및 균열 시작을 줄이기 때문에 서비스 수명이 더 깁니다. 도핑 개질(예: Y₂O₃, 0.1~1 중량%)은 결정립계 강도를 높이고 서비스 수명을 10~20% 연장할 수 있습니다. 열충격 저항성 측면에서, 열 사이클링 후 미세균열은 주로 고온단-저온단 접합부에서 발생합니다. W 형 부품은 다중 고온단 설계로 인해 U 형 부품보다 열충격 저항성이 우수하고, 직선 막대형 부품은 선형 구조로 인해 균열 저항성이 더 우수합니다. 표면 코팅은 열충격 저항성을 크게 향상시키고 균열 전파(균열 밀도 30~50% 감소) 및 SiO₂ 피막 박리를 줄일 수 있습니다. 시험 시 주의사항으로는 산화 분위기 유지, 고습도(습도 > 70%) 및 환원 환경(SiO₂ 박막 손상 유발) 회피, 그리고 열전대 및 저항 시험기의 정기적인 교정 등이 있습니다. 시험 데이터는 수명 예측 모델(예: 아레니우스 모델) 및 균열 통계 분석을 통해 MoSi₂ 부품의 재료 최적화(예: 도핑) 및 구조 설계(예: 굽힘 반경 최적화)에 도움을 줍니다. 실제 적용에서는 시험 결과를 활용하여 고온로 내 MoSi₂ 발열체의 장기 신뢰성 및 열충격 안정성을 보장하기 위한 유지보수 계획(예: 균열 및 박막층 정기 검사) 및 작동 매개변수를 수립합니다.

5.3 산화 환경에서의 안정성 시험

산화 환경에서의 안정성 시험은 고온 산화 분위기(최대 1800~1850℃)에서 이규화몰리브덴(MoSi₂) 발열체의 장기 성능을 평가하는 핵심이며, 표면의 SiO₂ 보호막 형성 및 유지, 산화 방지 특성, 그리고 미세 구조의 안정성에 중점을 둡니다. MoSi₂ 는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산화 분위기 에서 표면에 치밀한 SiO_2 보호막을 형성하여 우수한 내산화성을 발휘하지만, 고온에서 Si 또는 MoO_3 가 휘발하면 보호막 층이 얇아질 수 있으며, 특히 비보호 산화가 발생하기 쉬운 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 "플레이그" 온도 범위에서는 MoO_3 와 SiO_2 의 혼합물이 생성 되어 재료가 분쇄될 수 있습니다. 안정성 시험은 산화 환경에서 MoSi_2 원소 의 수명, 저항률 변화 및 표면 상태를 정량화하고 세라믹 소결 및 유리 용융과 같은 고온 응용 분야에 대한 신뢰할 수 있는 데이터를 제공하도록 설계되었습니다.

시험 방법에는 장기 산화 노출 시험과 순환 산화 시험이 포함됩니다. 장기 산화 노출 시험은 MoSi_2 원소(예: U 형, W 형, $\Phi 6/12$ 또는 $\Phi 9/18$)를 고온 산화 분위기로 넣고 온도를 $1500\sim 1800^\circ\text{C}$ 로 조절하며, 전력 밀도는 $15\sim 20\text{ W/cm}^2$ 로 $1000\sim 5000$ 시간 동안 연속 운전합니다. 시험 장비에는 고온로, 저항 시험기(4 탐침법, 정확도 $\pm 0.1\%$), 주사 전자 현미경(SEM) 및 X 선 회절계(XRD)가 포함되어 SiO_2 필름 두께(목표 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$), 표면 형태 및 상 조성을 분석합니다. 순환 산화 시험은 실제 작업 조건에서 열 사이클을 시뮬레이션합니다. $25\sim 1500^\circ\text{C}$ 또는 $25\sim 1800^\circ\text{C}$ 의 온도 조건, $5\sim 10^\circ\text{C/분}$ 의 승온 및 냉각 속도, $100\sim 1000$ 회의 사이클 횟수, 그리고 "플레이그" 산화를 방지하기 위해 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 를 빠르게 통과하는 조건으로 진행됩니다. 시험 후 저항률 변화, SiO_2 피막의 건전성, 균열 수, 그리고 질량 손실을 평가했습니다.

시험 결과에 따르면 MoSi_2 구성 요소는 1500°C 의 산화 분위기에서 높은 안정성을 보이며, 수명이 5000 시간 이상이고, SiO_2 필름이 밀도가 유지되며(두께 $10\sim 15\mu\text{m}$), 저항률 증가가 10% 미만입니다. 고순도 MoSi_2 및 열간 압축 소결 구성 요소(밀도 $\geq 98\%$)는 안정성이 더 좋고, 필름 결함이 적으며, 질량 손실률이 $0.5\text{mg/cm}^2/1000\text{h}$ 미만입니다. 도핑 개질(예: Y_2O_3 , $0.1\sim 1$ 중량 %)은 SiO_2 필름의 접착력을 향상시키고 벗겨짐을 줄일 수 있습니다. 순환 산화 시험에 따르면 열충격 균열은 주로 핫엔드-콜드엔드 연결부에 나타나고 W 형 구성 요소는 다중 핫엔드 설계로 인해 U 형보다 약간 더 우수합니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3 , 두께 $10\sim 50\mu\text{m}$)은 안정성을 크게 향상시키고 질량 손실을 $30\sim 50\%$ 까지 줄일 수 있습니다. SiO_2 필름의 수화 또는 부식을 방지하기 위해 고습(습도 $>70\%$)이나 황 함유 분위기는 피해야 합니다.

5.4 발열체의 경도 시험

MoSi_2 발열체 의 기계적 특성을 평가하는 중요한 수단으로, 마모, 기계적 응력 및 열충격 균열 성장에 대한 저항성을 직접적으로 반영합니다. 금속간 화합물인 MoSi_2 는 높은 경도를 갖지만, 저온 취성으로 인해 기계적 충격이나 열 사이클링 중에 미세 균열이 발생하기 쉽습니다. 경도 시험은 MoSi_2 부품의 표면 경도와 미세 구조 강도를 정량화하여 열간 압축 소결 등 제조 공정 최적화 및 도핑 개질의 기반을 제공하고, 세라믹 소결 및 금속 열처리와 같은 응용 분야의 기계적 안정성 요건을 충족하도록 설계되었습니다.

MoSi_2 소자 의 표면 (핫 엔드 및 콜드 엔드)에 압입을 적용하고 압입의 대각선 길이를 측정하여 경도 값을 계산합니다(정확도 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$). 시험은 실온에서 수행되며, 산화층이나 불순물의 영향을 피하기 위해 샘플 표면은 깨끗해야 합니다. 고온 경도 시험은 고온 경도

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

시험기를 사용하여 실제 작동 조건을 시뮬레이션합니다. 산화를 방지하기 위해 불활성 분위기(예: 아르곤)에서 수행해야 합니다. 경도 균일성을 평가하기 위해 시험 지점은 핫 엔드, 콜드 엔드 및 핫 엔드-콜드 엔드 전이 영역을 포함하며 각 영역에 최소 5 개의 지점이 있고 평균값을 취합니다(편차 <5%). 보조 시험에는 미세 조직 분석 및 균열 전파 평가가 포함됩니다.

MoSi₂ 구성 요소의 실온 비커스 경도는 8-10 GPa이며 고온에서 결정립계 슬라이딩 및 연화 효과로 인해 1500°C 에서 약 4-6 GPa 로 떨어집니다. 고순도 MoSi₂ 및 열간 압축 소결 구성 요소(밀도 ≥ 98%)는 낮은 다공성(<2%)과 결정립계 결합이 적어 경도가 더 높습니다(10 GPa 에 가까움). 도핑 개질(예: Y₂O₃ 또는 Al₂O₃, 0.1-2 중량 %)은 희토류 산화물이 결정립계의 결합력을 강화하기 때문에 경도를 5-10% 증가시킬 수 있습니다. 알루미늄이나 텅스텐으로 도핑하면 결정의 강도가 감소하기 때문에 콜드 엔드의 경도는 핫 엔드(약 7-9 GPa)보다 약간 낮습니다. 열 사이클링 후 미세균열이 축적되어 경도가 5~15% 감소할 수 있습니다. 표면 코팅은 표면 내마모성을 크게 향상시킬 수 있지만, 코팅이 벗겨지면 기판이 노출될 수 있습니다. 이 시험은 매트릭스 효과를 방지하기 위해 제어된 압입 깊이(시료 두께의 10% 미만)가 필요하며, 그 결과는 설치, 작동 및 유지보수 중 부품의 기계적 내구성을 평가하는 데 사용됩니다.

5.5 산화저항성과 온도의 관계에 대한 시험

내산화성 및 온도 관계 시험은 MoSi₂ 발열체 성능 시험의 핵심으로, 다양한 온도에서의 산화 거동, SiO₂ 보호막의 형성 및 안정성, 그리고 재료 질량 손실 및 저항률 변화를 평가하여 고온 응용 분야(예: 유리 용융 및 반도체 열처리)에 대한 신뢰할 수 있는 데이터를 제공하는 것을 목표로 합니다. MoSi₂의 내산화성은 표면 SiO₂ 보호막에 따라 결정되는데, 이 보호막은 800°C 이상에서는 치밀한 피막층을 형성하지만, 400~700°C 의 "플레이그(plague)" 온도 범위에서는 비보호 산화물을 생성하여 분말화를 유발하기 쉽습니다. 1850°C 에 가까운 온도에서는 Si 휘발로 인해 피막층이 얇아질 수 있습니다. 이 시험은 온도에 따른 내산화성 변화를 정량화하고 작동 온도 및 유지 보수 전략을 최적화하도록 설계되었습니다.

시험 방법에는 일정 온도 산화 시험과 가변 온도 산화 시험이 포함됩니다. 일정 온도 산화 시험은 MoSi₂ 원소(예: U형, W형, Φ6/12 또는 Φ9/18)를 온도 범위가 400~1800°C, 작동 시간이 100~1000 시간, 전력 밀도가 15~20W/cm²인 산화 분위기로 넣습니다. 시험 장비에는 고온로(정확도 ±5°C), 정밀 저울(정확도 ±0.1mg), 질량 손실률(mg/cm²/h), SiO₂ 필름 두께 및 상 구성을 측정하는 SEM 및 XRD 가 포함됩니다. 가변 온도 산화 시험은 25~1500°C 또는 25~1800°C의 조건, 5~10°C/분의 가열 및 냉각 속도, 50~500 사이클 및 400~700°C를 빠르게 통과하는 열 사이클링을 시뮬레이션합니다. 시험 후, 저항률 변화(4 탐침법, 정확도 ±0.1%), 필름 무결성(SEM) 및 균열 밀도(광학 현미경, 배율 50~200 배)를 평가했습니다.

시험 결과에 따르면 MoSi₂는 800~1500°C에서 가장 우수한 내산화성을 보이며, SiO₂ 필름 두께가 안정적이고, 질량 손실률이 0.2mg/cm²/1000h 미만이며, 저항률 증가가 10%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

미만입니다. 400~700℃에서 비보호 산화로 인해 질량 손실률이 최대 1~2mg/cm²/100h 로 높아지고 저항률이 20~30% 증가하며 이 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 1800℃에서는 Si 휘발이 심해지고 SiO₂ 필름 이 더 얇아지며 질량 손실률이 0.5~1mg/cm²/1000h 로 증가하고 수명이 1000~2000 시간으로 단축됩니다. 고순도 MoSi₂ 및 열간 압축 소결 부품(밀도 ≥98%)은 내산화성이 더 강하고 필름 결함이 적습니다. 도핑 개질은 필름 접착력을 향상시키고 질량 손실률을 20~30% 감소시킵니다. 표면 코팅은 산화 저항성을 크게 향상시키며, 특히 1800℃에서 질량 손실률이 40~60% 감소합니다. 데이터 신뢰성을 보장하기 위해 시험은 고습도 또는 환원성 분위기를 피해야 합니다. 결과는 산화 반응 속도론 분석(예: 포물선 모델)을 통해 작동 온도(권장 1500~1700℃) 최적화 및 유지 관리 계획(예: 멤브레인층 정기 검사) 수립에 활용됩니다.

5.6 막대 표면 거칠기와 저항률의 관계

이규화 몰리브덴 (MoSi₂) 발열체 의 전열 성능에 영향을 미치는 중요한 요소이며 , 저항률 및 전류 분포의 균일성과 직접적인 관련이 있습니다. MoSi₂ 부품의 표면 거칠기는 주로 제조 공정(예: 열간 프레스 및 등방 프레스)과 후속 가공(예: 연마 및 샌드블라스팅)에 의해 결정됩니다. 표면 거칠기가 높으면 국부적인 전류 집중, 불균일한 열 응력, 그리고 SiO₂ 보호막 형성의 불균일성이 발생하여 저항률 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다. 표면 거칠기와 저항률 간의 관계를 테스트하는 것은 표면 형태가 전열 성능에 미치는 영향을 정량화하고, 제조 공정 및 부품 설계를 최적화하는 기반을 제공하는 것을 목표로 하며, 특히 세라믹 소결 및 유리 용융과 같은 고정밀 온도 제어 시나리오에 적합합니다. 시험 방법은 표면 거칠기 측정기(예: 프로파일로미터 또는 원자간력 현미경, 정확도 ±0.01 μm)를 사용하여 MoSi₂ 막대의 표면 거칠기 매개변수(예: Ra, Rz)를 측정합니다 . 시험 영역은 고온부와 저온부를 포함하며, 불순물의 간섭을 피하기 위해 시료 표면을 깨끗이 해야 합니다. 저항률 시험은 실온에서 1800℃의 범위에서 측정하는 4 탐침법(정확도 ±0.1%)을 사용하며, 다양한 거칠기의 시료를 결합합니다. 시험 환경은 산화성 분위기이며, 비보호 산화물의 형성을 방지하기 위해 400~700℃ 의 "플레이그" 온도 범위를 빠르게 통과합니다. 저항률(ρ)은 $\rho = R \cdot A / L$ 공식으로 계산합니다. 여기서 R 은 측정된 저항, A 는 단면적, L 은 시험 길이입니다. 시험은 표면 거칠기가 SiO₂ 필름 형성에 미치는 영향 (SEM 관찰, 배율 50~200 배)과 전류 분포의 균일성(적외선 온도계, 정확도 ±1℃)을 기록해야 합니다.

MoSi₂ 막대 의 저항률은 매끄러운 표면이 국부적인 전류 집중과 열 응력 축적을 줄이기 때문에 더 안정적이고 변동 범위가 더 작습니다. 표면 거칠기가 높으면 표면 결함으로 인해 결정립계 산란과 불균일한 전류 경로가 증가하여 저항률이 국부적으로 증가할 수 있습니다. 연마된 MoSi₂ 요소는 고온 에서 더 균일한 SiO₂ 필름(두께 10~15μm) 을 가지며 저항률 변화가 적어 고정밀 응용 분야에 적합합니다. 샌드블라스팅 또는 거친 표면은 열 사이클 중에 미세 균열이 발생하기 쉽고 이는 저항률 변동을 증가시키고 장기적인 안정성에 영향을 미칩니다. 이 테스트에는 장비 정확도 교정, 콜드 엔드 연결 및 대기 조건 제어, SiO₂ 필름의 수화를 유발하는 높은 습도(습도 > 70%)를 피하는 것이 필요합니다. 데이터는 거칠기-저항률 곡선에 맞춰 분석되고 표면 처리 공정(화학적 연마

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또는 플라즈마 분무 등)을 최적화하여 MoSi₂ 원소의 전열 성능과 온도 제어 정확도를 개선하는 데 사용됩니다.

5.7 막대 코팅 균일성이 서비스 수명에 미치는 영향

MoSi₂ 발열체(예: SiC, Al₂O₃, 두께 10~50μm)의 표면 코팅은 내열충격성과 내식성을 향상시키는 핵심 요소입니다. 코팅의 균일성은 SiO₂ 보호막의 안정성, 산화 속도 및 발열체의 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. 코팅이 불균일하면 국소 산화 저항성 부족, 열응력 집중 또는 박리가 발생할 수 있으며, 고온 산화 환경(예: 세라믹 소결, 반도체 제조)에서 발열체의 작동 시간이 단축될 수 있습니다. 코팅 균일성이 수명에 미치는 영향을 시험하는 것은 코팅 품질이 부품 내구성에 미치는 영향을 평가하고 코팅 공정(예: 화학 기상 증착 및 플라즈마 용사)을 최적화하기 위한 데이터 지원을 제공하는 것을 목표로 합니다.

시험 방법에는 코팅 균일도 측정 및 고온 수명 시험이 포함됩니다. 코팅 균일도는 주사전자현미경(SEM, 정확도 ±0.1 μm)과 X선 분광기(EDS)를 사용하여 코팅 두께 분포 및 조성 균일도(SiC의 Si/C 비율 또는 Al₂O₃의 Al/O 비율)를 측정하여 분석합니다. 샘플에는 다양한 코팅 공정(예: CVD 코팅, 스프레이 코팅)을 적용한 MoSi₂ 막대가 포함되며, 시험 영역은 고온부와 저온부 전이 영역을 포함합니다. 고온 수명 시험은 온도 범위 1500~1800℃, 출력 밀도 15~20 W/cm², 작동 시간 1000~5000 시간, 그리고 "마름(blight)" 산화를 방지하기 위해 400~700℃의 급속 통과를 제공하는 산화 분위기로에서 수행됩니다. 이 시험은 질량 손실률(정밀 저울, 정확도 ±0.1 mg), SiO₂ 박막 상태(SEM 관찰), 그리고 저항률 변화(4 탐침법, 정확도 ±0.1%)를 기록합니다. 보조 시험으로는 코팅 접착력 및 열충격 저항성 시험이 포함됩니다.

MoSi₂ 부품의 경우, 균일한 코팅이 SiO₂ 피막의 안정적인 형성을 촉진하고 국부 산화 및 박리를 감소시켜 상당한 수명을 보장합니다. CVD 코팅은 높은 밀도와 접착력으로 인해 1800℃에서 더 긴 수명을 나타내므로, 고수요 분야에 적합합니다. 분무 코팅의 두께가 불균일하면(편차 >10%) 고온-저온 전이 영역에서 박리가 발생하여 SiO₂ 피막이 얇아지고 산화 열화가 가속화되어 수명이 단축될 수 있습니다. 또한, 균일한 코팅은 열 사이클에서 미세 균열 밀도를 줄이고 열충격 저항성을 향상시킵니다. 이 시험은 높은 습도 또는 환원 환경(SiO₂ 피막 손상을 유발함)을 피하기 위해 분위기 및 가열/냉각 속도 제어가 필요합니다. 이 데이터는 코팅 두께-수명 관계 분석을 통해 코팅 공정 최적화 및 유지보수 전략(예: 코팅 무결성 정기 검사)을 수립하고 고온 산화 환경에서 MoSi₂ 부품의 장기 신뢰성을 보장합니다.

5.8 서비스 수명과 응력 결합의 관계

MoSi₂ 발열체는 열 응력, 기계적 응력, 그리고 환경 응력의 결합에 의해 영향을 받는데, 특히 고온 산화 분위기와 잦은 열 사이클에서 그 영향이 큼니다. 열 응력은 급격한 가열 및 냉각으로 인한 온도 구배에서 발생하고, 기계적 응력은 설치 또는 작동 진동에서 발생하며, 환경 응력은 산화 또는 부식성 분위기와 관련이 있습니다. 응력 결합은 미세

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

균열 전파, SiO₂ 필름 박리 또는 저항률 드리프트를 유발하여 발열체의 수명을 단축시킬 수 있습니다. 수명과 응력 결합 간의 관계를 시험하는 것은 MoSi₂ 발열체의 내구성에 대한 응력의 영향을 정량화하고, 설계(예: 형상, 브래킷) 및 작동 매개변수(예: 가열 및 냉각 속도)를 최적화하는 기반을 제공하며, 세라믹 소결 및 유리 가공과 같은 고온 응용 분야에 적합합니다.

시험 방법에는 응력 시뮬레이션과 수명 시험이 포함됩니다. 응력 시뮬레이션은 유한 요소 해석(FEA)을 사용하여 고온-저온 전이 영역의 열 응력 분포(MoSi₂의 열팽창 계수 및 열전도도 기반)를 평가하고, 기계적 응력 시험(3 점 굽힘 시험, 정확도 ± 0.1 MPa)과 결합합니다. 수명 시험은 산화 분위기에서 수행되며, 온도는 1500~1800℃, 출력 밀도는 15~20 W/cm², 작동 시간은 1000~5000 시간, 열 사이클 조건은 25~1500℃입니다. 시험 샘플에는 U 자형 및 W 자형 MoSi₂ 원소($\Phi 6/12$ 또는 $\Phi 9/18$)가 포함되며, 일부 표면 코팅(예: SiC)이 적용됩니다. 이 시험은 질량 손실률(정밀 저울, 정확도 ± 0.1 mg), 균열 밀도(SEM, 배율 50~200 배), SiO₂ 피막 상태 및 저항률 변화(4 탐침법)를 기록합니다. 환경 스트레스는 미량의 부식성 가스(예: SO₂)를 도입하여 시뮬레이션하여 수명에 미치는 영향을 평가합니다.

MoSi₂ 구성 요소의 수명에 영향을 미치는 주요 요인임을 보여줍니다. 빠른 온도 상승 및 하강은 핫 엔드와 콜드 엔드 사이의 천이 영역에 응력 집중으로 이어지고 미세 균열 밀도가 증가하여 수명이 단축됩니다. W 형 구성 요소는 다중 핫 엔드 설계로 인해 응력 분포가 더 균일하며 수명이 U 형보다 우수합니다. 기계적 응력(진동 또는 부적절한 설치 등)은 균열 전파를 악화시키고 파괴 인성을 감소시키며 수명을 단축시킵니다. 표면 코팅은 응력 결합 효과를 크게 완화하고 균일한 코팅은 열 응력으로 인한 스포링을 줄이고 수명을 연장합니다. 도핑 개질(예: Y₂O₃)은 결정립계 강도를 향상시키고 응력 민감도를 감소시킵니다. 환경적 응력(예: 부식성 분위기)은 SiO₂ 필름의 열화를 가속화하며 분위기를 엄격하게 제어해야 합니다. 시험에는 고정된 열전대(정확도 $\pm 1^\circ\text{C}$)와 클램프가 필요합니다. 데이터는 고온 및 복잡한 응력 환경에서 MoSi₂ 구성 요소의 장기적 신뢰성을 보장하기 위해 응력-수명 모델(예: Weibull 분석)을 통해 설계(예: 굽힘 반경 증가) 및 운영 매개변수의 최적화를 안내합니다.

5.9 균열, 굽힘 및 끝단 절삭 메커니즘

장기간 고온 작동 시, 이규화 몰리브덴 발열체는 균열, 굽힘, 그리고 단부 절삭으로 인해 종종 고장이 발생합니다. 이러한 문제는 발열체의 성능 안정성을 저하시킬 뿐만 아니라 전체 난방 시스템의 안전한 작동 및 수명에 직접적인 영향을 미칩니다.

대부분의 균열 현상은 열응력과 관련이 있습니다. 발열체가 고온 환경에서 급격히 가열되거나 냉각될 때, 재료의 내층과 외층 사이의 온도 구배가 커져 재료 내부에 불균일한 열팽창이 발생하기 쉽고, 이로 인해 열응력이 집중될 수 있습니다. 구조 설계가 불합리하거나, 기하학적 치수가 비대칭적이거나, 부품에 미세한 결함(예: 기공 및 개재물)이 있는 경우, 열응력으로 인해 미세균열이 확장되어 결국 거시적인 균열이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

형성됩니다. 또한, 산화 과정에서 형성되는 실리콘 산화막의 두께가 불균일하면, 특히 고온 급냉 또는 정지 냉각 시 응력 차이로 인한 균열이 발생할 수 있습니다.

굽힘은 사용 중 현수 또는 지지 구조가 불안정하거나, 중력이나 외부 기계적 힘으로 인해 고온에서 재료가 소성 변형을 겪을 때 자주 발생합니다. MoSi_2 는 소성이 낮은 취성 세라믹이지만, 고온 조건(1500°C 이상)에서 구조가 어느 정도 점성 유동을 겪습니다. 특히 박형 및 긴 캔틸레버 구조는 고온에서 자체 하중의 작용으로 굽힘이 발생하기 쉽습니다. 굽힘이 발생하면 재가열 중 균열이 전파될 위험도 증가합니다.

MoSi_2 발열체의 일반적인 국부적 고장 현상으로, 주로 전극과 연결된 부분이나 고전류 밀도가 집중되는 부분에 집중됩니다. 이 부분은 과도한 접촉 저항, 아크 파괴, 열 축적 또는 국부적인 공기 순환 부족으로 인해 심각한 산화 또는 증발이 발생하는 경우가 많습니다. 고온 및 고전류 조건에서는 MoSi_2 표면에 국부적인 핫스팟이 형성되어 실리콘 휘발이 증가하고 보호막 구조가 파괴되어 삭마 피트 또는 용융 캐비티가 형성될 수 있습니다. 또한, 산화막 제거가 불충분하거나 용접 품질이 좋지 않거나 접촉 면적이 부족한 등 끝단 처리가 제대로 이루어지지 않으면 삭마 공정이 가속화됩니다.

위와 같은 고장을 지연 또는 방지하기 위해서는 구조 설계, 설치 공정, 전기 제어 및 사용 환경 등을 최적화하는 것이 필요하다. 예를 들어, 합리적인 지지 방법을 채택하여 열응력 집중을 줄이고, 가열 속도를 제어하여 열충격 위험을 줄이며, 끝단 전도성 접촉 구조를 개선하여 접촉 저항을 줄이고, 산화막의 완전성을 확보하는 것만으로도 부품의 수명을 효과적으로 연장할 수 있다.

5.10 미세조직 분석 및 파괴모드 연구

2 발열체의 파손 메커니즘을 이해하는 핵심 수단으로, 고온 환경에서 발생하는 물리적, 화학적, 기계적 변화의 근본적인 원인을 재료 수준에서 규명할 수 있습니다. 가공 전후의 발열체 단면, 표면 및 내부 구조를 미시적으로 관찰함으로써 결정립계, 상 경계 변화, 산화막 성장 거동, 그리고 잠재적인 미세균열 분포를 파악할 수 있습니다.

고온 산화 환경에서는 MoSi_2 소재 표면에 치밀한 SiO_2 보호막이 형성되고, 이 막과 기관 사이에는 명확한 계면이 형성됩니다. 장기간 사용 중 고온 진동이나 화학적 부식이 발생하면 계면 박리가 발생하거나 다공성 산화막이 형성되어 보호 성능에 영향을 미칠 수 있습니다. 또한, 미세 분석 결과 MoSi_2 에 소량의 2 차 상 입자(예: Mo_5Si_3)가 존재하는 것으로 확인되는데, 이는 다양한 산화도에서 전반적인 구조적 안정성에 일정한 영향을 미칩니다.

파손 모드 연구는 주로 균열 전파 경로, 산화막 파단 메커니즘, 원소 확산 경향, 그리고 상변화 거동에 초점을 맞춥니다. 미시적 분석은 주사전자현미경(SEM) 및 에너지 분산 분광법(EDS)과 함께 수행되는 경우가 많으며, 이를 통해 균열이 주로 결정립계의 약한 결합 영역에서 발생하거나, 산화 응력에 의해 유도된 기공 연결에 의해 거시적 손상이 발생함을 명확히 알 수 있습니다. 또한, 다양한 작동 온도 및 시간에 따라 형성되는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산화막 두께의 차이를 분석함으로써 산화 반응 속도를 유추하여 재료 열화 속도 모델을 확립할 수 있습니다.

연구에 따르면 대부분의 파손은 "산화 + 열응력 + 구조적 결함"의 복합적인 효과에 의해 발생합니다. 즉, 재료는 고온 산화 조건에서 보호막을 형성하지만, 열 사이클 중 응력 차이로 인해 보호막이 파열되어 새롭게 노출된 표면이 계속 산화되어 응력 집중 및 미세균열 확장을 초래하고, 궁극적으로 재료의 전체 구조가 파괴됩니다. 이러한 순환적이고 점진적인 누적 패턴은 전형적인 열 부식 피로 거동입니다.

파손 저항성을 향상시키기 위해 향후 연구에서는 MoSi_2 기지에 미량 첨가 원소(Al, Zr 등)를 도입하여 산화막의 안정성을 향상시키거나, 이중상 또는 경사 구조 설계를 통해 열응력을 완화할 수 있습니다. 또한, 결정립 크기 제어, 소결 공정 최적화, 밀도 증가를 통해 미세구조 균일성을 효과적으로 개선하고, 결함률을 감소시키며, 전반적인 파손 저항성을 향상시킬 수 있습니다.



CTIA GROUP LTD 실리콘 몰리브덴 막대

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

제 6 장 MoSi₂ 발열체의 설치

6.1 사전 설치 준비

MoSi₂ 발열체를 설치할 경우, 후속 작업의 원활한 작동을 보장하고 부적절한 작동으로 인한 발열체 손상이나 성능 저하를 방지하기 위해 체계적인 준비가 필요합니다. 먼저, 발열체의 사양, 전압 레벨, 전력 매개변수 및 치수가 설계 도면 및 발열 장비 사용 설명서에 따라 장비와 일치하는지 확인해야 합니다. 필요한 경우, 모델 오류로 인해 시스템 작동에 영향을 받지 않도록 물리적 비교를 수행해야 합니다.

둘째, 가열로 내부 구조, 지지 장치, 전극 고정구 및 단열재가 손상되지 않았는지, 특히 설치 장소가 깨끗하고 불순물이 없으며 단열 성능이 양호한지 확인하십시오. 고온 산화막에 습기가 침투하거나 단락이 발생하는 것을 방지하기 위해 가열로 내부는 건조하게 유지해야 합니다.

설치 과정에 사용되는 도구 및 보조 재료(세라믹 브래킷, 스테인리스 스틸 클램프, 토크 공구, 절연 개스킷, 고온 내성 전도성 재료 등)도 미리 준비해야 합니다. 작업자는 깨끗한 절연 장갑을 착용해야 하며, 산화막 형성에 영향을 미치는 오일 오염을 방지하기 위해 MoSi₂ 부품의 가열 부분을 맨손으로 만지는 것은 엄격히 금지됩니다.

또한, 설치자에게 기본 안전 교육을 제공하여 부품 운송 및 취급 시 준수해야 할 작동 절차, 주의사항 및 보호 조치를 명확히 해야 합니다. 신규 장비를 처음 사용하는 경우, 전기 제어 시스템과 노 본체의 열팽창 거동이 기대치를 충족하는지 확인하기 위해 공로 온도 상승 시험도 수행해야 합니다.

6.2 자세한 설치 단계

2 발열체 의 설치 는 실제 작동 시 양호한 전기적 접촉, 열 지지 및 산화 방지 기능을 보장하기 위해 표준 단계에 따라 엄격하게 수행되어야 합니다. 표준 설치 과정의 주요 단계는 다음과 같습니다.

첫 번째 단계는 위치 확인입니다. 장비 도면 및 부품 식별 정보에 따라 각 발열체의 설치 위치를 확인합니다. 여러 발열체를 병렬로 연결할 경우, 부하 불균형으로 인한 국부 과열을 방지하기 위해 전극 대칭 및 균형에 특히 유의해야 합니다. 두 번째 단계는 지지대를 고정하는 것입니다. MoSi₂ 발열체를 세라믹 브래킷이나 지지 구조물에 놓고, 가열부가 퍼니스 공간 중앙에 위치하며 방해받지 않도록 위치를 적절히 조정합니다. 지지 구조물은 열팽창 시 발열체의 변형에 적응하고 기계적 제약으로 인한 균열을 방지하기 위해 어느 정도 유연성을 가져야 합니다. 세 번째 단계는 전극 연결입니다. 특수 전극 고정 장치를 사용하여 전도성 끝단을 전원 코드에 단단히 연결합니다. 고정 장치는 부품 파손을 방지하기 위해 과도하게 누르지 않도록 단단히 눌러야 합니다. 연결 표면은 깨끗하게 유지해야 하며, 필요한 경우 고온 전도성 페이스트를 사용하여 접촉 저항을 개선할 수 있습니다. 설치 중에는 아크 방전을 방지하기 위해 전극과 케이블을 적절한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

절연 재료로 절연해야 합니다. 네 번째 단계는 검사 및 미세 조정입니다. 모든 부품을 연결한 후, 설치 높이, 수평 및 평행도를 확인하여 각 부품에 균등한 응력이 가해지고 적절하게 배치되었는지 확인합니다. 특히, 전류 분포가 고르지 않도록 고정 장치가 대칭적이고 균일한지 확인합니다.

5 단계, 시스템 테스트: 전원을 켜기 전에 멀티미터 또는 절연 테스터를 사용하여 저항 값이 정상 범위 내에 있는지 확인하십시오. 전원을 켜 후, 먼저 저전압으로 단시간 예열 테스트를 수행하여 비정상적인 발열, 스파크, 이상 소음 등이 발생하는지 확인하십시오. 모든 것이 정상인지 확인한 후 온도를 단계적으로 높입니다. 6 단계, 열 작동 안정성: 정식 생산 전에 부품 작동 상태의 안정성과 장비의 열 분포 균일성을 확인하기 위해 전체 가열-절연-냉각 사이클을 수행하는 것이 좋습니다. 이상 현상이 발견되면 부품의 돌이킬 수 없는 손상을 방지하기 위해 즉시 기계를 정지하고 검사를 받아야 합니다.

디실리사이드 발열체 의 초기 작동 시 고장률을 효과적으로 줄여 장기적으로 안정적인 작동을 보장하고, 사용 수명을 연장하며 고온 장비의 안전하고 효율적인 작동을 위한 좋은 기반을 마련합니다.

6.3 설치 참고 사항

2 발열체 를 설치할 때는 발열체 손상, 노의 이상 작동, 또는 작동 오류로 인한 시스템 불안정을 방지하기 위해 몇 가지 주요 사항에 특히 주의해야 합니다. 무엇보다도, 발열체는 취성 세라믹 소재이므로 운반 및 설치 시 주의해서 다루어야 합니다. 중력에 의해 부딪히거나 휘어지거나 충격을 가하는 것은 엄격히 금지되어 있습니다. 특히 전극 클램프를 조일 때는 국부적인 응력 집중으로 인해 발열체에 균열이 발생하는 것을 방지하기 위해 과도한 토크를 사용하지 않아야 합니다. 둘째, 부품 표면, 특히 가열 부품은 깨끗하게 유지해야 합니다. 고온 산화 거동에 영향을 미치지 않도록 기름, 습기 또는 불순물과의 접촉은 엄격히 금지됩니다. 작업자는 전체 설치 과정에서 부품 표면이 인위적으로 오염되지 않도록 깨끗한 절연 장갑을 착용해야 합니다.

또한, 전극과 와이어 사이의 연결은 양호한 접촉과 균일한 클램핑을 보장하여 과도한 접촉 저항으로 인한 단부 용해 또는 이상 온도를 방지해야 합니다. 동시에, 부품 간 간격은 불균일한 열장 또는 전류 편차로 인한 과부하 및 일부 부품의 소손을 방지하기 위해 일정하게 유지되어야 합니다. 또한, 설치 환경의 온도, 습도 및 청결에도 특별한 주의를 기울여야 합니다. 퍼니스 내부는 먼지와 물이 없어야 합니다. 습한 환경인 경우, 고온 작동 중 수증기로 인한 고장이나 절연 손상을 방지하기 위해 완전히 건조시켜야 합니다.

6.4 안전 작동 사양

2 가열소자 시스템 의 안전하고 안정적인 작동을 보장하기 위해 작업자는 다음 안전 규정을 엄격히 준수해야 합니다. 전원을 켜기 전에 모든 배선이 올바른지, 절연 상태가 양호한지, 그리고 제어 시스템이 정상적으로 작동하는지 확인해야 합니다. 장비를 작동할 때는 절연

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

장갑, 보안경, 보호복을 착용하십시오. 고온 부품이나 전기가 흐르는 구조물을 맨손으로 만지는 것은 엄격히 금지되어 있습니다. 갑작스러운 전원 켜짐으로 인한 열 충격을 방지하기 위해 부품을 천천히 가열해야 합니다. 특히 처음 사용하거나 장기간 사용하지 않다가 다시 사용하는 경우, 부품이 열 환경에 점진적으로 적응할 수 있도록 단계적인 가열 방식을 사용해야 합니다. 작동 중에는 허가 없이 용광로 문을 열거나 부품 표면을 만지는 것은 엄격히 금지됩니다. 점검 또는 관찰은 전원을 끄고 충분히 냉각한 후에 수행해야 합니다. 이상 징후(예: 스파크, 아크, 이상 소음, 국소적인 발적 등)가 발견되면 즉시 전원을 끄고 점검하십시오. 강제 작동은 엄격히 금지됩니다. 부품이나 전극 고정구를 교체할 때는 먼저 주전원을 차단하고 잔류전압이 방출되었는지 확인하여 작업 환경이 완전히 안전한 상태인지 확인해야 합니다. 전기 배선이 느슨한지, 클램프가 노후화되었는지, 용광로에 탄소나 먼지가 쌓였는지 정기적으로 점검하는 것은 장기적으로 안전한 작동을 보장하는 데 중요한 조치입니다.

6.5 일반적인 오류 및 유지 관리 가이드

사용 중 폴리브덴 디실리사이드 발열체에는 다음과 같은 일반적인 오류가 발생할 수 있으며, 유지보수 인력은 기본적인 판단력과 처리 능력을 갖추어야 합니다.

단부 소손 : 일반적으로 전극 연결부의 국부적인 용융 또는 흑화로 나타납니다. 과도한 접촉 저항, 아크 방전 또는 느슨한 케이블 등이 원인일 수 있습니다. 클램프가 단단히 눌러 있는지, 접촉면이 깨끗한지 확인하고, 소손된 부품을 적절히 교체하십시오.

표면 균열 : 대부분 열충격이나 기계적 응력으로 인해 발생합니다. 유지 관리 권장 사항에는 가열 속도 조정, 지지 구조 최적화, 그리고 미세 균열이 있는지 부품 정기 검사 등이 포함됩니다.

불균일한 가열 : 부품 간격 불일치, 전력 분배 불균일 또는 개별 부품의 성능 저하로 인해 발생할 수 있습니다. 가열 영역을 재배치하고 각 부품 그룹의 저항값을 테스트해야 합니다.

부품 파손 : 부적절한 취급, 불균일한 설치 힘 또는 장기간 과부하로 인해 발생하는 경우가 많습니다. 작동 기록을 검토하여 외부 힘 간섭 여부를 확인하고 새 부품을 교체해야 합니다.

시동 실패 : 시스템이 정상적으로 가열되지 않는 경우, 회로 고장, 비정상적인 전력 제어 모듈 또는 부품 손상이 원인일 수 있습니다. 전원 입력, 전극 접점, 제어 출력을 하나씩 점검하십시오.

부품의 수명을 연장하려면 전극 연결 상태, 퍼니스 청결 상태, 온도 상승이 정상인지 등을 포함하여 일주일에 한 번씩 정기 검사를 실시하는 것이 좋습니다. 고빈도로 작동하는 장비의 경우, 분기마다 종합적인 유지보수를 실시하고 장기적인 추세 분석을 위해 작동 매개변수를 기록해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5.1 발열체 파손의 원인 및 해결 방법

이규화 몰리브덴 (MoSi_2) 발열체는 고온 작동 시 흔히 발생하는 고장 모드로, 장비의 작동 안정성과 생산 효율에 직접적인 영향을 미칩니다. 파손은 주로 열 응력, 기계적 응력, 재료 결함, 부적절한 작동 조건 등의 요인으로 인해 발생합니다. 금속간 화합물인 MoSi_2 는 경도는 높지만 파괴인성은 낮습니다(약 $2\sim 3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). 복잡한 응력 하에서 미세 균열이 발생하고 팽창하여 파손으로 이어지기 쉽습니다. 파손 원인을 분석하고 적절한 해결책을 찾으면 부품 수명을 크게 향상시킬 수 있으며, 이는 세라믹 소결 및 유리 용융과 같은 고온 공정에 적합합니다.

파괴 원인: 열응력 집중: 급격한 온도 상승 및 하강은 고온부와 저온부 사이의 천이 영역에서 과도한 온도 구배를 유발합니다. 열팽창 계수 차이(약 $8.1\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 는 높은 열응력을 유발하고 균열을 유발합니다. 잦은 열 사이클은 미세균열의 확산을 악화시킵니다. 기계적 응력: 부적절한 설치 또는 작동 중 진동은 기계적 응력 집중을 유발하며, 특히 U 자형 또는 W 자형 부품의 굽힘 부분에서 발생합니다. 재료 결함: 제조 공정 중 기공(밀도 $<98\%$), 결정립계 불순물(예: Fe, Al) 또는 불균일한 결정립 크기는 파괴인성을 감소시키고 균열이 결함을 따라 전파되기 쉽습니다. 부적절한 작동 조건: 과도한 전력 밀도는 국부 과열로 이어지고, $400\sim 700^\circ\text{C}$ 의 "플레이그" 온도 범위에 너무 오랫동안 머무르면 비보호 산화물(예: MoO_3) 이 생성되어 재료의 강도가 약해집니다.

해결책: 가열 및 냉각 속도 최적화: 가열 및 냉각 속도를 $5\sim 10^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 제어하고 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 를 빠르게 통과시켜 열 응력을 줄입니다. 비례 제어 전원 공급 장치(전압 $20\sim 100\text{V}$)를 사용하여 부드러운 온도 곡선을 얻고 핫엔드와 콜드엔드 사이의 전환 영역에서 응력 집중을 줄입니다. 설치 설계 개선: 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하여 MoSi_2 의 특성에 맞춰 기계적 응력을 줄입니다. 클램프는 과도하게 조이거나 진동하지 않도록 적당히 조입니다. W 형 부품은 다중 핫엔드 설계로 인해 응력 분포가 더 균일하기 때문에 대형 퍼니스에 선호됩니다. 재료 품질 개선: 열간 프레싱 소결(밀도 $\geq 98\%$) 및 도핑 개질(예: Y_2O_3 , $0.1\sim 1 \text{ wt } \%$)을 사용하여 결정립계 강도를 최적화하고 결정립 크기를 제어하며 기공과 불순물을 줄입니다. 표면 연마는 균열 시작 지점을 줄입니다. 작동 조건을 표준화하십시오. 출력 밀도를 $15\sim 20 \text{ W}/\text{cm}^2$ 로 유지하고, 산화성 분위기를 조절하며, SiO_2 박막을 손상시키는 환원성 또는 고습 환경을 피하십시오. 열전대(정확도 $\pm 1^\circ\text{C}$)와 전원 공급 시스템을 정기적으로 교정하여 국부 과열을 방지하십시오. 표면 코팅: 열충격 저항성과 강도를 향상시키고 균열 전파를 줄이기 위해 SiC 또는 Al_2O_3 코팅을 적용하십시오. CVD 코팅은 높은 접착력(스크래치 시험 임계 하중 $>3\text{kg}$)으로 인해 더욱 효과적입니다.

구현 제안 : 균열 파괴 분석은 SEM(배율 $50\sim 200$ 배)과 연계하여 균열 형태를 관찰하고, XRD 분석을 통해 상 조성을 분석하여 파괴 원인을 규명해야 합니다. 수명 예측 모델을 수립하기 위해 작동 중 열 사이클 횟수와 전력 변화를 기록해야 합니다. 설계 및 작동 매개변수를 최적화하면 파괴 위험을 $30\sim 50\%$ 줄이고 MoSi_2 부품의 수명을 5,000 시간 이상으로 연장할 수 있습니다.

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

6.5.2 산화물층 박리의 원인 및 재생처리

MoSi₂ 발열체의 SiO₂ 보호막은 산화 분위기에서 산화 방지의 핵심입니다. 보호막이 벗겨지면 기관 노출로 이어져 산화 열화를 가속화하고 수명을 크게 단축시킵니다. 산화막 벗겨짐은 주로 열 응력, 코팅 결함, 작동 환경 및 장기 노화로 인해 발생합니다. 산화막 벗겨짐 문제를 테스트하고 재생하면 부품 성능을 효과적으로 복원할 수 있으며, 반도체 제조 및 세라믹 소결과 같은 고온 산화 환경에 적합합니다.

박리 원인: 열 응력 구동: 급격한 온도 상승 및 하강 또는 잦은 열 사이클은 SiO₂ 박막과 MoSi₂ 기관 사이의 열팽창 계수 차이를 유발하여 높은 전단 응력을 발생시켜 박막층에 균열이나 박리를 유발합니다. 코팅 결함: 표면 코팅 두께 불균일 또는 접착력 부족(스크래치 시험 임계 하중 <2kg)은 국부적인 박리를 유발하여 SiO₂ 박막의 무결성을 손상시킵니다. 제조 결함(예: 기공 또는 균열)은 박리 위험을 증가시킵니다. 작동 환경의 영향: 높은 습도(습도 >70%) 또는 부식성 분위기는 SiO₂ 박막의 수화 또는 화학적 부식을 유발하여 접착력을 감소시킵니다. 400~700℃의 "플레이그" 산화는 비보호성 MoO₃를 생성하여 박막 구조를 파괴합니다. 장기 노화: MoSi₂의 사용 한계에 가까운 1800℃에서 Si가 휘발되어 SiO₂ 피막이 얇아지고, 장기 작동 후 피막층에 균열이 생기거나 벗겨집니다.

재생 처리 방법: 표면 세척: 용광로 작동을 멈춘 후 부드러운 브러시나 압축 공기를 사용하여 박리 부위의 산화물을 제거하십시오. 필요한 경우 희석된 산 용액(pH 4-5)으로 가볍게 세척하고 완전히 건조하여 부식성 물질이 잔류하지 않도록 하십시오. 고온 재생: SiO₂ 필름 재생을 촉진하기 위해 산화성 분위기에서 1500~1600℃에서 2~4 시간 동안 작동하십시오. "플레이그" 산화를 방지하기 위해 400~700℃로 빠르게 가열하십시오. 재코팅: 플라즈마 용사 또는 CVD 기술을 사용하여 심하게 박리된 부위에 SiC 또는 Al₂O₃를 재코팅하여 균일한 두께를 확보하십시오. CVD 코팅은 고밀도이므로 요구 조건이 높은 경우에 더 적합합니다. 작동 매개변수 최적화: 가열 및 냉각 속도를 5~10℃/분으로 줄이고, 전력 밀도를 15~20W/cm²로 제어하며, 국부 과열을 방지하십시오. 비례 제어 전원 공급 장치와 정밀 열전대(정확도 ±1℃)를 사용하여 안정적인 열장을 유지하십시오. 환경 관리 개선: 퍼니스 내 산화성 분위기를 유지하고 습도와 부식성 가스 함량을 엄격히 관리하십시오. 퍼니스 밀봉부를 정기적으로 점검하여 습기나 오염 물질이 유입되지 않도록 하십시오.

구현 제안: 박리 분석을 위해 SEM으로 박막 형태를 관찰하고 EDS로 화학 조성을 분석하여 박리 메커니즘을 파악해야 합니다. 재생 후 SiO₂ 박막의 회복 효과를 확인하기 위해 저항률과 질량 손실률을 정밀 저울로 측정하여 시험해야 합니다(정밀 저울, 정확도 ±0.1mg).

6.5.3 가열소자의 일일 유지관리 방법

MoSi₂ 발열체는 수명 연장, 안정적인 작동 보장, 유지보수 비용 절감의 핵심입니다. 유지보수는 SiO₂ 피막의 무결성 유지, 응력 손상 방지, 그리고 세라믹, 유리, 반도체와

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

같은 고온 응용 분야에 적합한 퍼니스 내 청정 환경 유지에 중점을 둡니다. 표준화된 유지보수 방법을 통해 균열, 산화막 박리, 저항률 드리프트와 같은 고장 위험을 줄일 수 있습니다.

유지보수 방법: 표면 상태를 정기적으로 점검하십시오. 500~1000 시간 작동 후, 로를 정지하여 MoSi_2 소자(고온부 및 저온부) 표면을 점검하고 광학 현미경을 사용하여 SiO_2 막의 무결성, 균열 또는 박리 징후를 관찰하십시오. 가볍게 솔질하여 먼지를 제거하고 비정상적인 영역을 기록하여 수명을 평가하십시오. 로 청소: 매달 또는 100 회 열 사이클마다 압축 공기 또는 부드러운 솔을 사용하여 산화물, 금속 불순물(예: Fe_2O_3) 또는 휘발성 침전물(예: 알칼리 금속 화합물)을 제거 하여 SiO_2 막의 오염이나 부식을 방지하십시오. 작동 조건 관리: 산화성 분위기를 유지하고 400~700°C로 빠르게 가열하여 "플레이그" 산화를 방지하십시오. 과열이나 저항률 드리프트를 방지하기 위해 전력 밀도와 저온부 온도를 모니터링하십시오. 전기 연결 점검: 1000 시간마다 클램프와 전원 연결을 점검하고 산화물 또는 탄화물 침전물을 제거하고 접촉이 양호한지 확인하십시오. 비례 제어 전원 공급 장치와 열전대를 교정하여(정확도 $\pm 1^\circ\text{C}$) 전압 변동이나 온도 제어 편차를 방지합니다. 브래킷 및 설치 유지 관리: 고온도 알루미나 브래킷에 균열이나 변형이 없는지 확인하고 MoSi_2 의 열 팽창과 일치시킵니다. 클램프의 조임을 조정하여 기계적 응력 집중을 방지하고 커넥터를 정기적으로 윤활합니다(고온 윤활제 사용). 작동 데이터 기록: 열 사이클 수, 온도 곡선, 전력 밀도 및 저항률 변화(4 탐침법으로 측정)를 기록하는 작업 로그를 작성합니다. 데이터 분석(예: Weibull 모델)을 통해 수명을 예측하고 노후화된 구성 요소를 미리 교체합니다. 표면 코팅 보호: SiC 또는 Al_2O_3 코팅을 사용하는 경우 코팅 무결성을 정기적으로 확인하고 필요한 경우 재코팅(CVD 또는 플라즈마 스프레이)을 적용합니다. 코팅을 손상시키는 기계적 굽힘이나 화학적 부식(예: 산성 세척제)을 피하십시오.

구현 제안: 유지보수 계획을 수립하고 운영자에게 표준화된 방식으로 이를 구현하도록 교육하십시오. SEM 과 EDS 를 사용하여 고장 샘플을 분석하고 유지보수 전략을 최적화하십시오. 로 내부 분위기와 청정도를 엄격하게 관리하고, 열장 시뮬레이션과 함께 부품 배치를 최적화하여 유지보수 비용을 20~30% 절감하고 MoSi_2 부품이 1,500°C 에서 5,000 시간 이상 안정적으로 작동할 수 있도록 하십시오. 유지보수 중에는 안전에 유의하십시오. 로를 정지한 후에는 온도가 실온으로 떨어질 때까지 기다렸다가 전원을 분리하여 감전이나 화상을 방지하십시오.

6.5.4 발열체 교체 및 재활용 기술

발열체 교체는 MoSi_2 가열 시스템의 안정적인 작동을 보장하는 핵심 요소입니다. 사용 시간이 증가함에 따라 발열체는 열 피로, 산화 손상 또는 기계적 손상과 같은 요인으로 인해 성능이 저하되거나 파손될 수 있습니다. 장비 고장 및 생산 중단을 방지하기 위해 발열체는 적시에 교체해야 합니다. 교체 과정에서는 안전과 설치 품질을 보장하기 위해 운영 절차를 엄격히 준수해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

교체하기 전에 먼저 퍼니스 전원 공급 장치를 분리하고 부품이 안전한 온도로 식을 때까지 기다려 열 응력으로 인한 화상 및 2 차 손상을 방지하십시오. 분해 중에는 강한 잡아당김이나 충격을 피하고, 주변 구조물의 손상을 방지하기 위해 부품과 전극 고정구를 조심스럽게 분리하십시오. 분해된 기존 부품은 재활용 및 재사용을 위해 분류하여 보관해야 합니다.

발열체 적용에 매우 중요합니다. 이규화 폴리브덴 소재 자체는 높은 가치를 지닙니다. 재활용은 비용 절감뿐만 아니라 친환경적인 환경 보호라는 개념에도 부합합니다. 일반적인 재활용 공정에는 기존 부품 수거, 기계적 파쇄, 화학적 처리, 그리고 재료 정제가 포함됩니다. 산화물층과 불순물을 제거함으로써 고순도 폴리브덴과 실리콘 원소를 추출하여 새로운 발열체 또는 기타 폴리브덴 기반 소재를 재제조합니다.

또한, 일부 약간 산화되고 손상되지 않은 부품은 표면 세척 및 산화막 재생 후에도 계속 사용할 수 있어 수명이 연장됩니다. 첨단 재활용 기술에는 진공 환원, 열간 등압 성형 및 기타 공정이 포함되어 재료 특성 복원을 극대화합니다. 기업은 안전하고 효율적인 재활용 프로세스를 보장하기 위해 전문 장비와 기술자를 갖춘 완벽한 재활용 시스템을 구축해야 합니다.

6.6 산업용로의 일반적인 설치 방법

2 가열 소자를 설치하는 방법은 다양합니다. 일반적으로 퍼니스 구조, 공정 요건 및 소자 사양에 따라 설계되며, 균일한 가열, 높은 효율 및 간편한 유지 보수를 목표로 합니다. 다음은 몇 가지 일반적인 설치 방법입니다.

현수 설치 : 이 설치 방식은 대기 보호로 및 진공로에서 흔히 사용됩니다. 발열체를 노의 상단 또는 양쪽에 매달고 단열 브래킷을 사용하여 고정함으로써 발열체가 자유롭게 팽창하고 노벽 이나 다른 발열체와의 접촉을 방지합니다. 이 방식은 발열체 교체 및 유지보수가 편리하며, 신속한 발열체 교체가 필요한 작업 환경에 적합합니다.

매립형 설치 : 발열체를 용광로 내화물 또는 세라믹 브래킷에 직접 매립하여 안정적인 지지 구조를 형성합니다. 이 방법은 안정적이고 기계적 충격에 덜 민감하며, 고온에서 연속 작동하는 산업용 용광로에 적합합니다. 단점은 교체가 더 복잡하고 내화물의 일부를 분해해야 한다는 것입니다.

브래킷 고정 설치 : 특수 금속 또는 세라믹 브래킷을 사용하여 가열 소자를 바닥, 측면 또는 상단 등 가열로 내 다양한 위치에 고정합니다. 브래킷 설계는 열팽창 및 단열 성능을 고려하여 소자에 균등한 응력이 가해지도록 해야 합니다. 이 방법은 대형 산업용 가열로에 적합하며, 정밀한 배치를 구현하고 열장 분포를 최적화할 수 있습니다.

평탄 설치 : 부품을 가열판이나 플랫폼과 같은 가열 영역에 평평하게 놓는 방식으로, 평로 및 어닐링로에서 일반적으로 사용됩니다. 평탄 설치의 열을 균일하게 분배할 수 있지만, 부품이 휘어지거나 변형되지 않도록 평평하고 지지되어야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

코일 설치 : 가열 소자는 나선형 또는 코일 형태로 배열되어 원통형 또는 수직형 가마에 적합합니다. 이 방식은 공간을 절약하고 가열 면적을 늘리며 출력 밀도 조절을 용이하게 합니다.

실제 적용에서는 복잡한 공정의 요구를 충족하기 위해 여러 가지 설치 방법이 결합되는 경우가 많습니다. 설계 시에는 부품의 열팽창 특성, 전기 절연 요구 사항, 설치 및 제거 용이성, 그리고 분위기 유형 및 온도 구배와 같은 환경 요인을 충분히 고려해야 합니다. 또한, 설치 과정에서 발열체가 전원에 단단히 연결되고 절연이 잘 되어 누전 및 국부 과열을 방지해야 합니다. 정기적으로 설치 상태를 점검하고 브래킷과 클램프를 적절한 시기에 조정하여 용광로 내 열장이 균일하고 안정적으로 유지되도록 함으로써 발열체의 가열 효율과 수명을 향상시키십시오.



CTIA GROUP LTD 몰리브덴 규산염 막대

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

제 7 장 MoSi₂ 발열체의 시험 표준 및 인증

7.1 발열체 성능 시험 방법

MoSi₂ 발열체는 전기적 특성, 기계적 특성, 열적 특성, 내구성 등 여러 핵심 지표를 측정하여 품질과 신뢰성을 보장하는 데 중요한 역할을 합니다. 전기적 성능 시험은 주로 발열체의 저항값과 온도 계수를 측정하는 것을 포함합니다. 정밀 저항 측정기를 사용하여 다양한 온도 환경에서 발열체의 저항 변화를 시험하여 전기적 성능의 안정성과 일관성을 평가합니다. 저항의 균일성과 선형적 변화는 발열체의 설계 및 사용에 매우 중요합니다.

기계적 성질 시험에는 주로 경도 시험과 굽힘 시험이 포함됩니다. 경도 시험은 일반적으로 비커스 경도계나 로크웰 경도계를 사용하여 가열 및 냉각 조건에서 부품의 경도 변화를 측정하며, 이는 재료의 기계적 강도와 내마모성을 반영합니다. 굽힘 시험은 특정 기계적 응력을 가하여 부품의 탄성 변형 능력과 파괴점을 관찰하여 기계적 손상에 대한 저항성을 평가합니다.

열 성능 시험에는 열팽창 계수 측정과 열 안정성 시험이 포함됩니다. 열팽창 계수 시험은 열팽창 계측기를 사용하여 가열 과정에서 부품의 길이 변화를 측정하여 설계 과정에서 열 응력으로 인한 손상을 방지하기 위해 충분한 열팽창 공간을 확보하는지 확인합니다. 열 안정성 시험은 고온 연속 가열 실험을 통해 부품의 저항, 형태 및 구조 변화를 관찰하여 고온 환경에서의 장기 안정성을 평가합니다.

또한, 내산화성 시험은 MoSi₂ 발열체의 사용 수명을 평가하는 중요한 지표입니다. 모의 산화 환경에서 장시간 가열 실험을 수행하여 산화막의 형성, 두께 및 박리를 검출하여 발열체의 내산화성을 평가합니다. 파손 모드 분석은 파괴 분석과 미세 구조 시험을 결합하여 발열체의 잠재적인 약점과 파손 메커니즘을 파악하는 데 도움을 줍니다.

이러한 시험 방법은 서로 보완적이며 몰리브덴 디실리사이드 발열체의 성능 수준을 종합적으로 반영하여 생산 및 적용에 대한 과학적 근거와 기술적 보장을 제공합니다.

7.2 ISO, ASTM 및 기타 표준 분석

국제표준화기구(ISO)와 미국재료시험학회(ASTM)는 MoSi₂ 발열체의 품질과 성능을 보장하는 데 중요한 역할을 하는 제품 품질, 시험 방법, 안전 규정과 같은 측면을 다루는 발열체 및 관련 소재에 대한 여러 표준을 개발했습니다.

ISO 표준 측면에서 MoSi₂ 발열체 관련 주요 표준에는 재료 성분 분석, 치수 공차, 기계적 특성 시험 및 환경 적응성 시험이 포함됩니다. 예를 들어, ISO 9001 품질 경영 시스템 표준은 생산 공정 중 체계적이고 지속적인 품질 관리 개선을 보장합니다. ISO 22007 시리즈는 재료의 열팽창 시험 방법을 다루며, 설계 및 사용에 대한 기준을 제공합니다. 전자 세라믹 및 고온 내열 재료에 대한 ISO 표준은 전기적 및 열적 특성 평가를 다룹니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM 표준은 오랜 역사를 가지고 있으며 재료 시험 분야에서 널리 사용되고 있습니다. ASTM E1131 표준은 MoSi_2 구성 요소의 열 안정성 및 상 변화 거동을 결정하는 데 적합한 재료의 열 분석을 위한 일반적인 절차를 지정합니다. ASTM E384 표준은 미소 경도 시험 방법을 다루며 경도 평가에 널리 사용됩니다. ASTM E1820 은 구성 요소의 파괴 거동을 분석하는 데 도움이 되는 파괴 인성 시험에 대한 지침을 제공합니다. 또한 전기 성능 시험의 정확성을 보장하기 위해 금속 재료의 저항률 측정을 위한 ASTM B193 과 같은 표준도 있습니다. 또한 ISO 와 ASTM 은 모두 고온 전기 가열 장비의 설계 및 작동 안전을 다루는 전기 안전 표준 IEC 60519 시리즈와 같이 산업용 용광로용 가열 요소에 대한 안전 사양 및 성능 요구 사항에 대한 해당 지침을 가지고 있습니다. 이러한 표준은 제조업체가 국제 시장의 요구 사항을 충족하는 MoSi_2 가열 요소를 설계하는 데 매우 중요한 지침입니다.

실제 적용 분야에서 기업들은 종종 ISO 와 ASTM 표준을 결합하여 내부 테스트 프로세스를 개발하여 제품이 국제 표준과 고객별 요구 사항을 모두 충족하는지 확인합니다. 테스트 장비의 교정 및 작업자 자격 인증 또한 일반적으로 관련 표준에 따라 수행되어 테스트 결과의 신뢰성과 신뢰성을 향상시킵니다.

7.3 환경적응성 시험

이규화 몰리브덴 발열체가 다양한 작업 환경에서 안정적으로 작동할 수 있는지 평가하는 핵심 요소입니다. 이 시험은 주로 온도, 습도, 분위기 조성, 기계적 진동 등 다양한 조건에서 발열체의 성능을 시뮬레이션합니다. 먼저, 고온 사이클 시험은 발열체의 열팽창 및 수축으로 인한 열응력이 반복적인 가열 및 냉각을 통해 재료 구조 및 성능에 미치는 영향을 감지하고 열 피로 저항성을 검증합니다. 습열 환경 시험은 고습 조건에서의 사용을 시뮬레이션하고, 발열체 표면의 산화층의 안정성과 전기적 특성에 미치는 영향을 관찰하며, 발열체가 습한 환경에서 절연 파괴나 부식이 발생하지 않는지 확인합니다. 또한, 분위기 적응성 시험은 산화성, 환원성 또는 불활성 분위기에서 발열체의 거동을 시뮬레이션하는 데 중점을 둡니다. 로 내 분위기 조성을 제어하여 다양한 분위기에서 발열체의 산화 속도와 산화 방지 성능을 검사하여 복잡한 작업 조건에서도 양호한 수명을 유지하는지 확인합니다. 기계적 진동 및 충격 시험은 운송 및 작동 중 진동으로 인한 기계적 손상을 요소와 장착 구조가 견딜 수 있는지 검증합니다.

환경 적응성 시험은 실제 적용에서 발열체의 신뢰성을 충분히 반영하고, 재료 선택, 설계 및 유지관리에 대한 과학적 근거를 제공하며, 환경적 요인으로 인한 고장 위험을 줄일 수 있습니다.

7.4 고장 모드 및 수명 예측 방법

2 발열체 의 손상 메커니즘을 이해하고 수명을 연장하는 데 필요한 기초입니다. 일반적인 파손 모드에는 열 피로 균열, 산화막 박리, 기계적 응력에 의한 파괴, 그리고 국소적 삭마가 있습니다. 파손된 부품의 거시적 관찰 및 미세 구조 분석을 통해 균열의 시작

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

위치와 확장 경로를 파악하고, 조립질, 기공 증가, 비정상적인 산화막 두께와 같은 파손 전 재료 변화를 평가할 수 있습니다.

수명 예측은 일반적으로 가속 수명 시험과 이론 모델을 결합합니다. 가속 시험은 작동 온도 증가, 열 사이클 횟수 증가 또는 기계적 부하 증가를 통해 부품이 장기간 사용하는 동안 발생할 수 있는 손상 과정을 빠르게 재현하고 고장 데이터를 수집합니다. 이러한 데이터를 파괴 역학, 열역학 및 재료 과학의 관련 이론과 결합하여 정상 작동 조건에서 발열체의 수명을 예측하는 수학적 모델을 구축합니다. 일반적으로 사용되는 모델로는 아레니우스 열 활성화 모델과 코핀-맨슨 피로 모델이 있습니다. 또한, 와이블 분포와 같은 고장 데이터를 기반으로 한 통계 분석은 제품의 신뢰성 및 수명 분포 특성을 평가하는 데 도움이 됩니다. 수명 예측을 통해 제조업체는 부품 설계 및 재료 선택을 최적화하는 동시에 사용자에게 고장률과 운영 비용을 줄이기 위한 합리적인 유지보수 및 교체 주기 권장 사항을 제공할 수 있습니다.

7.5 안전 및 전기 코드 요구 사항

MoSi₂ 발열체의 시험 표준 및 인증안전하고 안정적인 작동을 보장하는 기반입니다 . 발열체의 작동 온도는 매우 높고 고전류 스위칭이 수반됩니다. 감전, 단락, 화재 등의 사고를 방지하기 위해 관련 전기 안전 기준을 엄격히 준수해야 합니다. 일반적으로 발열체의 절연 저항은 규정값에 도달해야 하며, 절연 노화로 인한 누설을 방지하기 위해 사용 중 절연 상태를 정기적으로 검사해야 합니다.

전기 연결부는 양호한 접촉, 충분한 기계적 강도 및 내열성을 보장하기 위해 국가 또는 국제 표준을 충족하는 단자, 절연 재료 및 연결 공정을 사용해야 합니다. 접지 시스템은 감전 위험을 효과적으로 줄일 수 있도록 합리적으로 설계되어야 합니다. 전원 공급 시스템에는 과부하 보호, 누전 보호 및 단락 보호 장치를 장착하여 비정상 상황에서 적시에 전원을 차단하여 인명과 장비의 안전을 보장해야 합니다. 또한, 설치 및 유지보수 담당자는 안전 작동 절차를 준수하고 필요한 보호 장비를 갖추어야 합니다. 고온 작업 공간에는 우발적인 접촉 및 화상을 방지하기 위해 경고 표지판과 격리 시설을 설치해야 합니다. CE 인증 및 UL 인증과 같은 관련 장비 및 부품의 안전 인증 또한 시장 진출 및 안전 확보에 도움이 됩니다.



CTIA GROUP LTD 몰리브덴 규산염 막대

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

제 8 장 MoSi₂ 발열체의 응용

8.1 제철冶金 산업에서의 MoSi₂ 발열체 응용

몰리브덴 이규화물 (MoSi₂) 발열체는 우수한 고온 성능, 우수한 산화 저항성 및 안정적인 전열 특성으로 인해 야금 산업의 금속 제련, 열처리 및 고온 소결 공정에서 널리 사용됩니다. MoSi₂ 의 열전도도, 열팽창 계수 및 양의 온도 계수 저항률은 효율적이고 균일한 가열을 제공하여 고온, 정밀한 온도 제어 및 긴 수명에 대한 야금 산업의 요구를 충족합니다. MoSi₂ 요소는 산화 분위기 에서 표면에 형성된 SiO₂ 보호막을 통해 탁월한 산화 저항성을 달성하여 야금로의 장기 작동에 적합합니다. 일반적인 MoSi₂ 요소 구조(예: U 형, W 형, Φ6/12 또는 Φ9/18) 는 노 유형 및 공정 요구 사항에 따라 맞춤 제작이 가능하며 금속 제련로, 열처리로 및 소결로에서 널리 사용됩니다. MoSi₂ 구성 요소 의 적용 최적화는 400~700℃의 "페스트" 온도 범위를 피하고, 비보호 산화물(MoO₃ 와 SiO₂ 의 혼합물)의 생성을 줄이기 위해 온도를 빠르게 높이거나 낮추고, 표면 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)을 결합하여 열 충격 저항성과 수명을 개선해야 합니다.

MoSi₂ 발열체 의 장점은 높은 전력 밀도, 안정적인 온도 제어, 긴 수명을 포함합니다. 설계 유연성 덕분에 박스형로, 터널형로, 진공로 등 다양한 유형의 가열로에 적용 가능하여 다양한 금속 재료의 가공 요구를 충족합니다. MoSi₂ 의 열팽창 특성에 맞춰 설치하고 기계적 응력을 줄이기 위해서는 고순도 알루미늄 브래킷이 필요합니다. 전기 연결에는 작동 안정성을 보장하기 위해 저저항 클램프와 비례 제어 전원 공급 장치를 사용해야 합니다. MoSi₂ 발열체 를 적용하려면 SiO₂ 피막 손상을 유발하는 환원 또는 고습 환경을 방지하기 위한 분위기 제어도 고려해야 합니다 .

8.1.1 금속 제련 및 열처리

MoSi₂ 발열체는 주로 고온 제련로, 어닐링로, 담금질로에 집중되어 있으며, 알루미늄, 구리, 강철, 티타늄 합금과 같은 금속 재료를 처리하는 데 사용됩니다. 금속 제련은 로 온도를 1000~1600℃로 정밀하게 제어해야 합니다. MoSi₂ 발열체는 양의 온도 계수 저항률을 가지고 있어 전력을 적응적으로 조절하고 안정적인 고온 환경을 제공할 수 있습니다. U 형 및 W 형 MoSi₂ 발열체는 소형 및 중형 제련로에 일반적으로 사용되며, 핫엔드 길이는 100~500mm 이고 전력 밀도는 15~20W/cm²입니다. 이러한 발열체는 용융점(예: 알루미늄 660℃, 구리 1085℃)에 빠르게 도달하고 균일한 온도 영역을 유지할 수 있습니다. 어닐링 및 담금질과 같은 열처리 공정에서 MoSi₂ 원소는 1200~1500℃에서 안정적인 가열을 제공하여 금속 결정립 미세화 및 성능 최적화를 보장합니다. 예를 들어, 강의 어닐링은 1200~1300℃에서 유지되어야 하며, MoSi₂ 성분 의 열전도도와 열충격 저항성은 빠른 가열 및 열 사이클링을 지원합니다.

금속 제련 및 열처리에 사용되는 MoSi₂ 원소는 높은 산화 저항성과 긴 수명을 제공합니다. 산화성 분위기에서 SiO₂ 보호막은 재료 열화를 효과적으로 방지하며, 1500℃에서 질량 손실률은 0.2 mg/cm²/1000h 미만입니다. 표면 코팅은 열충격 저항성과 내식성을 더욱 향상시키고, 미량의 황이나 탄소가 포함된 야금 분위기에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

설치 시 U 형 요소는 수직으로 설치되고, W 형 요소는 대형 로의 균일한 가열에 적합하며, 냉각부는 알루미늄 코팅으로 강화됩니다. 작동 중에는 "플러그" 산화를 방지하기 위해 400~700℃를 빠르게 통과하지 않도록 해야 하며, 가열 및 냉각 속도는 분당 5~10℃로 제어합니다. 유지보수에는 SiO₂ 피막의 무결성 과 냉각부의 연결 상태를 정기적으로 점검하고, 오염을 방지하기 위해 로 내 불순물(예: 산화철)을 청소하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 원소 의 한계는 SiO₂ 박막 의 손상을 방지하기 위해 환원 또는 진공 환경에서 작동 온도를 낮춰야 한다는 것입니다 . 실제 적용에서는 부품 레이아웃 최적화와 열장 시뮬레이션을 병행하면 금속 체련 및 열처리의 효율성과 품질을 크게 향상시킬 수 있습니다.

8.1.2 고온소결 공정

고온 소결 공정에서 MoSi₂ 발열체는 주로 금속 분말 야금, 세라믹 복합재 및 특수 합금의 소결에 사용되며, 고성능 강, 티타늄 기반 합금 및 초경합금 생산에 널리 사용됩니다. 소결 공정은 재료의 치밀화 및 입자 성장을 촉진하기 위해 1300~1800℃의 정밀한 온도 제어가 필요합니다. MoSi₂ 발열체는 높은 전력 밀도와 안정적인 온도 제어를 제공 하여 이상적인 선택입니다. W 형 및 직선 막대형 MoSi₂ 발열체는 균일한 열장을 제공하기 위해 대형 소결로에서 자주 사용되며 대형 가공물에 적합합니다. 나선형 발열체(고온부 직경 4~9mm)는 소형 관로에서 고정밀 소결 요구 사항을 충족하는 데 적합합니다. MoSi₂ 의 열전도도와 양의 온도 계수 저항률은 소결 중 균일한 열 분포를 보장하고 가공물 변형 및 균열을 줄입니다.

고온 소결에서 MoSi₂ 원소의 산화 저항성은 주요 장점입니다. SiO₂ 보호막 은 1500~1800℃(두께 10~15μm)에서 안정적으로 유지되며 질량 손실률은 <0.5mg/cm²/1000h 로 장기 작동을 지원합니다. 도핑 개질(예: Y₂O₃ , 0.1~1 중량%)은 결정립계 강도를 향상시키고 표면 코팅(예: Al₂O₃ , 두께 10~50μm) 은 열충격 저항성과 내식성을 개선하여 미량의 휘발성 불순물이 포함된 소결 분위기에 적합합니다. 설치 시 W 형 소자는 수평 으로 지지되거나 수직으로 매달리고 고순도 알루미나 브래킷은 열 응력을 줄입니다. 전기적 연결에는 구리 클램프가 사용되고 비례 제어 전원 공급 장치가 안정성을 보장하기 위해 사용됩니다. 운전 중에는 비보호 산화물의 형성을 피하기 위해 온도를 400~700℃로 빠르게 통과시켜야 하며, 열응력을 줄이기 위해 가열 및 냉각 속도는 5~10℃/분이어야 합니다(MoSi₂ 파괴인성은 약 2~3MPa·m^{1/2}입니다).

MoSi₂ 부품은 분위기 민감도 및 유지보수 요건을 충족해야 합니다. 황이나 탄소가 포함된 소결 분위기는 SiO₂ 피막을 부식 시킬 수 있으므로 산소 분압과 습도를 엄격하게 관리해야 합니다. 부품 표면(피막층 의 SEM 관찰)과 저온부 온도를 정기적으로 검사하고, 금속 산화물과 같은 노 내 불순물을 제거하면 수명을 연장할 수 있습니다. 열장 최적화(유한 요소 시뮬레이션 등)를 통해 온도 균일성을 확보하고 소결된 가공물의 결함을 줄일 수 있습니다. MoSi₂ 부품은 뛰어난 성능 덕분에 고온 소결 공정에서 항공우주 부품, 절삭 공구 및 내마모성 소재 생산에 널리 사용되어 제품 품질과 생산 효율을 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1.3 열처리 장비

MoSi₂ 발열체는 야금 산업의 열처리 장비에 널리 사용되며, 어닐링로, 담금질로, 노멀라이징로, 템퍼링로 등 금속 재료의 기계적 특성, 내식성 및 가공 특성을 향상시킵니다. 열처리 장비는 금속 결정립 구조 최적화 및 응력 완화를 위해 정밀한 온도 제어와 균일한 열장을 필요로 합니다. MoSi₂ 발열체는 양의 온도 계수 저항률을 가지고 있어 1200~1500℃ 범위에서 안정적인 가열을 제공하여 강철, 알루미늄 합금, 구리 합금, 티타늄 합금 등의 소재 가공에 적합합니다. U 자형 MoSi₂ 발열체는 핫엔드 길이가 100~500mm 인 소형 열처리로에 적합하며, 중앙 집중식 가열을 제공하고 소량 생산에 적합합니다. W 자형 및 직선 막대형 발열체는 핫엔드 길이가 200~1000mm 인 대형 연속 열처리로에 적합하며, 넓은 가열 면적을 커버하고 온도 균일성을 보장합니다.

열처리 장비에 사용되는 MoSi₂ 원소는 높은 산화 저항성과 잦은 열 사이클을 견딜 수 있는 능력에 기인합니다. 산화성 분위기에서 SiO₂ 보호막은 원소의 장기적인 안정성을 보장하여 장기간 열 보존 및 열처리 공정의 급격한 온도 상승 및 하강에 적합합니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)은 열충격 저항성과 내식성을 향상시키며 복잡한 야금 환경에 적합합니다. 설치 시, 원소는 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되며, 수직 지지 또는 수평 지지는 기계적 응력을 감소시킵니다. 전기 연결에는 저저항 클램프를 사용하고, 비례 제어 전원 공급 장치는 정밀한 온도 제어를 보장합니다. 작동 중에는 "플러그" 산화를 방지하기 위해 400~700℃를 빠르게 통과시켜야 하며, 온도 상승 및 하강 속도는 분당 5~10℃로 제어됩니다. 유지보수에는 SiO₂ 막, 콜드 엔드 연결부, 불순물 오염 방지를 위한 퍼니스 청소를 정기적으로 점검하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 원소의 한계는 환원 분위기에서 사용 온도를 낮춰야 하고, 노 내 분위기를 엄격하게 관리해야 한다는 점입니다. 열장 최적화와 정기적인 유지보수를 통해 자동차, 항공우주 및 기계 제조 분야에서 널리 사용되는 열처리 장비의 높은 효율과 제품 품질을 보장합니다.

8.2 세라믹 산업에서의 MoSi₂ 발열체 응용

MoSi₂ 발열체는 세라믹 산업에서 세라믹 소성, 유약 처리 및 특수 세라믹 재료 제조에 널리 사용됩니다. 높은 작동 온도, 내산화성 및 전열 안정성은 고온 및 정밀 온도 제어가 필요한 세라믹 공정의 요구를 충족합니다. MoSi₂ 발열체는 표면 SiO₂ 보호막을 통해 산화 분위기에서 안정성을 유지하며, 세라믹 소성로, 유약 소성로 및 특수 세라믹 소결로에 적합합니다.

U 형, W 형 및 나선형 MoSi₂ 발열체는 노 유형에 따라 맞춤 제작됩니다. U 형은 소형 박스형 노에, W 형은 대형 터널형 노에, 나선형은 관형 노에서의 고정밀 소결에 적합합니다. 설치에는 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하고, 전기 연결에는 저저항 클램프를 사용하며, 비례 제어 전원 공급 장치를 통해 정밀한 온도 제어가 가능합니다. 이 작업은 "플레이그" 산화를 방지하기 위해 400~700℃의 빠른 온도 변화를 필요로 하며, 승온 및 냉각 속도는 분당 5~10℃입니다. 또한, 표면 코팅은 내열충격성과 수명을 향상시킵니다. 세라믹 산업에 MoSi₂ 원소를 적용하면 소성 품질과 생산 효율이 크게 향상되어 기존 세라믹과 첨단 세라믹의 요구를 모두 충족할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.1 세라믹 소성 및 유약

MoSi₂ 발열체는 박스형 가마, 셔틀 가마, 터널 가마에서 세라믹 소성 및 유약 처리에 사용되며, 일상용 세라믹, 건축용 세라믹, 예술용 세라믹 생산에 사용됩니다. 세라믹 소성에는 1000~1400℃에서 그린 바디 소결 및 유약 용융이 필요합니다. MoSi₂ 발열체의 정온도계수 저항률은 안정적인 고온 환경을 제공하여 세라믹 그린 바디의 치밀화와 유약의 광택을 보장합니다. U 자형 MoSi₂ 발열체는 소형 가마에 적합하고, W 자형 발열체는 대형 연속 소성 가마에 적합하며, 균일한 열장을 제공하여 세라믹 균열 및 변형을 줄입니다. 유약 처리에는 유약 용융 및 결정화를 제어하기 위한 정밀한 온도 제어가 필요합니다. MoSi₂ 발열체의 열전도도는 빠른 가열 및 단열을 지원합니다. SiO₂ 보호막은 산화성 분위기에서 안정성을 유지하며, 표면 코팅은 열충격 저항성과 내식성을 향상시켜 휘발성 유약이 포함된 분위기에서 소성하는 데 적합합니다. 설치 및 운영 시에는 분위기, 가열 및 냉각 속도 제어가 필요하며, 유지보수에는 부품 표면 정기 검사 및 용광로 청소가 포함됩니다. MoSi₂ 부품은 세라믹 소성 및 유약 처리 공정의 효율성과 제품 품질을 향상시키며 세라믹 생산에 널리 사용됩니다.

8.2.2 특수 세라믹 재료의 제조

MoSi₂ 발열체는 소결로 및 열간 압착 로에서 특수 세라믹 소재 제조에 사용됩니다. 알루미나, 지르코니아, 질화규소, 탄화규소와 같은 고급 세라믹 생산에 사용되며 항공우주, 전자, 의료 분야에서 널리 사용됩니다. 고밀도 및 우수한 성능을 달성하기 위해서는 특수 세라믹 소결이 1400~1800℃에서 수행되어야 합니다. MoSi₂ 발열체의 높은 전력 밀도와 정밀한 온도 제어 능력은 이러한 요건을 충족합니다. W 형 및 나선형 MoSi₂ 발열체는 대형 및 소형 소결로에 적합하며, 균일한 열장을 제공하고 재료 결함을 줄입니다. SiO₂ 보호막과 표면 코팅은 고온 산화 분위기에서 발열체의 안정성을 보장하며, 도핑 개질은 열충격 저항성을 향상시켜 잦은 열 사이클에도 적합합니다. 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하여 설치하고, 전기적 연결을 통해 저저항 접촉을 보장하며, 분위기 및 가열/냉각 속도를 제어하여 "플라그" 산화를 방지합니다. 유지관리에에는 장기적인 신뢰성을 보장하기 위해 구성품과 용광로 상태를 정기적으로 검사하는 것이 포함됩니다.

8.3 태양광 산업에서의 MoSi₂ 발열체 응용

폴리브텐 디실리사이드 (MoSi₂) 발열체는 고온 성능, 내산화성, 전열 안정성으로 인해 실리콘 웨이퍼 제조 및 태양 전지 생산 장비용 태양광 산업에서 널리 사용됩니다. MoSi₂ 발열체는 정밀한 온도 제어와 균일한 열장을 제공하여 태양광 공정의 고온 및 청정 환경 요건을 충족합니다. 산화성 분위기 에서 표면에 형성된 SiO₂ 보호막을 통해 내산화성을 달성하여 장기 작동에 적합합니다. U 자형, W 자형, 직선 막대형 MoSi₂ 발열체는 노(爐) 유형에 따라 맞춤 제작됩니다. U 자형은 소형 노에 적합하고, W 자형과 직선 막대형은 대형 연속 장비에 적합합니다. 열팽창 특성에 맞게 설치하기 위해 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하고, 전기 연결에는 저저항 클램프를 사용하며, 안정성을 보장하기 위해 비례 제어 전원 공급 장치를 사용합니다. 비보호 산화물의 형성을 피하기 위해 작업은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

"전염병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 하며, 표면 코팅(SiC 또는 Al_2O_3 등)은 열 충격 저항성과 수명을 개선합니다.

8.3.1 실리콘 웨이퍼 제조를 위한 고온 공정

MoSi₂ 발열체는 단결정 실리콘 인상, 다결정 실리콘 잉곳 주조, 실리콘 웨이퍼 어닐링 등 실리콘 웨이퍼 제조의 고온 공정에 사용됩니다. 이러한 공정은 실리콘 원료를 용융하고, 결정 성장을 제어하고, 결정 결함을 제거하기 위해 고온 환경이 필요합니다. MoSi₂ 발열체의 정온도계수(PTC) 저항률은 안정적인 가열 성능을 제공합니다. 직선형 막대형 및 W 형 MoSi₂ 발열체는 넓은 가열 영역을 커버하여 열장 균일성을 보장하는 대형 단결정으로 및 잉곳로에 적합합니다. U 형 발열체는 국소적인 고온 요구 사항을 충족하는 소형 어닐링로에 적합합니다. SiO₂ 보호막은 산화 분위기에서 안정성을 유지하며, 표면 코팅은 내열충격성과 내식성을 향상시켜 실리콘 웨이퍼 제조의 청정 환경에 적합합니다. 설치 시 발열체는 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되며, 전기 연결은 저저항 접촉을 보장합니다. 작동 시에는 산화 손상을 방지하기 위해 분위기 및 가열/냉각 속도를 제어해야 하며, 유지보수에는 발열체 표면 및 로 청결 상태의 정기적인 검사가 포함됩니다. MoSi₂ 원소는 실리콘 웨이퍼 제조의 결정 품질과 생산 효율성을 개선하며 태양광 산업 체인의 상류에서 널리 사용됩니다.

8.3.2 태양전지 생산 장비

MoSi₂ 발열체는 결정질 실리콘 및 박막 태양 전지를 제조하기 위해 태양 전지 생산 장비의 확산로, 소결로, 어닐링로에 사용됩니다. 확산 공정은 인이나 붕소를 도핑하여 PN 접합을 형성하기 위해 고온이 필요하고, 소결 공정은 금속 전극과 실리콘 웨이퍼를 결합하며, 어닐링 공정은 전지 성능을 최적화합니다. MoSi₂ 발열체는 이러한 공정의 요구 사항을 충족하기 위해 정밀한 온도 제어와 균일한 열장을 제공합니다. U 자형 및 나선형 MoSi₂ 발열체는 소형 확산로 및 어닐링로에 적합하며, W 자형 발열체는 대형 소결로에 적합하여 대면적 가열의 안정성을 보장합니다. SiO₂ 보호막과 표면 코팅은 산화 분위기에서 발열체의 장기 작동을 지원하며, 열충격 저항성은 잦은 열 사이클에도 잘 견딥니다. 설치에는 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하고, 전기 연결에는 비례 제어 전원 공급 장치를 사용하여 정밀한 온도 제어를 구현합니다. 이 작업은 "전염병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 하며, 유지 관리에는 SiO₂ 필름 점검 및 오염 방지를 위한 퍼니스 청소가 포함됩니다. MoSi₂ 원소는 태양 전지 생산 효율과 성능을 향상시키며 태양광 발전 분야에서 널리 사용됩니다.

8.4 반도체 산업에서의 MoSi₂ 발열체 응용

이규화 몰리브덴 (MoSi₂) 발열체는 고온 성능, 내산화성, 전열 안정성 덕분에 반도체 산업에서 웨이퍼 어닐링, 확산 공정, 에피택셜 성장과 같은 고온 공정에 널리 사용됩니다. MoSi₂ 발열체는 정밀한 온도 제어와 균일한 열장을 제공하여 반도체 제조 공정의 청정 환경 및 고정밀 온도 제어 요구를 충족합니다. 산화 분위기에서 표면에 SiO₂ 보호막을 형성하여 우수한 내산화성을 가지므로 장기 작동에 적합합니다. U 형, W 형, 나선형

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MoSi₂ 발열체는 노(furnace) 유형에 따라 맞춤 제작됩니다. U 형 및 나선형은 소형 고정밀 노에 적합하며, W 형은 대형 연속 장비에 적합합니다. 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하여 MoSi₂의 열팽창 특성에 맞춰 설치 하고 기계적 응력을 줄입니다. 전기 연결에는 저저항 클램프를 사용하고, 비례 제어 전원 공급 장치를 사용하여 안정성을 보장합니다. 비보호 산화물 형성을 방지하기 위해 "전열병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 하며, 표면 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)은 열충격 저항성과 사용 수명을 더욱 향상시킵니다. SiO₂ 피막의 무결성과 콜드 엔드 연결 상태를 정기적으로 점검하고, 불순물 오염을 방지하기 위해 퍼니스를 청소하며, 반도체 산업에서 부품의 신뢰성과 효율을 보장하십시오.

8.4.1 웨이퍼 어닐링 및 확산 공정

MoSi₂ 발열체는 웨이퍼 어닐링 및 확산 공정에서 급속 열처리(RTA)로, 확산로, 산화로에 사용되어 실리콘 웨이퍼 및 기타 반도체 재료를 처리합니다. 웨이퍼 어닐링은 격자 결함을 복구하고, 도펀트를 활성화하고, 재료 특성을 개선하기 위해 고온이 필요합니다. 확산 공정은 고온 도핑(인 및 붕소 등)을 통해 PN 접합을 형성합니다. MoSi₂ 발열체의 정온도계수(PTC) 저항률은 안정적인 가열 성능을 제공하고 정밀한 온도 제어를 보장합니다. U 자형 및 나선형 MoSi₂ 발열체는 소형 어닐링 및 확산로에 적합하며, 고정밀 소량 생산에 적합하고, W 자형 발열체는 대형 확산로에 적합하여 여러 웨이퍼를 처리하는 데 균일한 열장을 제공합니다. SiO₂ 보호막은 산화 분위기에서 안정성을 유지하며, 표면 코팅은 내열충격성과 내식성을 향상시켜 청정 반도체 공정 환경에 적합합니다. 설치 과정에서 소자는 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되며, 전기 연결은 저저항 접촉을 보장합니다. 이 작업에는 산화 손상을 방지하기 위해 제어된 분위기와 가열 및 냉각 속도가 필요합니다. 유지보수에는 불순물(예: 금속 이온)이 웨이퍼를 오염시키지 않도록 소자 표면과 퍼니스를 정기적으로 검사하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 성분은 웨이퍼 어닐링 및 확산 공정의 효율성과 품질을 향상시키며, 집적 회로 및 전력 소자 제조에 널리 사용됩니다.

8.4.2 반도체 에피택셀 성장

MoSi₂ 발열체는 반도체 에피택셀 성장에서 화학 기상 증착(CVD)로 및 분자선 에피택시(MBE) 장비에 사용되어 실리콘, 게르마늄 및 화합물 반도체(예: GaAs, SiC)와 같은 고품질 단결정 박막을 성장시킵니다. 에피택셀 성장은 박막의 결정 품질과 균일성을 보장하기 위해 고온에서 열장을 정밀하게 제어해야 합니다. MoSi₂ 발열체의 높은 전력 밀도와 안정적인 온도 제어 능력은 이러한 요건을 충족합니다. 나선형 MoSi₂ 발열체는 소형 CVD 로에 적합하며, 고정밀 성장을 지원하는 중앙 집중식 가열을 제공합니다. W 형 및 직선 막대형 발열체는 대형 에피택셀로에 적합하여 대면적 웨이퍼의 열장 균일성을 보장합니다. SiO₂ 보호막과 표면 코팅은 산화성 분위기 또는 미량 산소 환경에서 장기간 작동할 수 있도록 소자를 지지하며, 열충격 저항성은 잦은 열 사이클에 적합합니다. 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하여 설치하고, 비례 제어 전원 공급 장치를 사용하여 전기 연결을 통해 정밀한 온도 제어를 구현합니다. 작동에는 "플래그" 온도 범위를 빠르게 통과해야 하며, 유지보수에는 SiO₂ 박막 점검 및 오염 방지를 위한 퍼니스

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

청소가 포함됩니다. MoSi₂ 성분은 에피택셜 성장 박막의 품질과 생산 효율을 향상시키며 반도체 소자 제조에 널리 사용됩니다.

8.4.3 고온 에칭 장비

MoSi₂ 발열체는 반도체 웨이퍼 패터닝을 위한 고온 에칭 장비의 플라즈마 에칭로와 열 에칭로에 사용됩니다. 고온 에칭 공정은 에칭 속도와 선택도를 최적화하고 마이크로-나노 스케일 구조의 정확도를 보장하기 위해 정밀한 온도 제어가 필요합니다. MoSi₂ 발열체의 양의 온도 계수(PTC) 저항률과 균일한 열장은 이러한 요건을 충족합니다. U 자형 및 나선형 MoSi₂ 발열체는 소형 에칭로에 적합하여 고정밀 공정을 지원하는 중앙 집중식 가열을 제공하며, W 자형 발열체는 대형 장비에 적합하여 여러 웨이퍼의 온도 일관성을 보장합니다. SiO₂ 보호막은 산화 분위기에서 안정성을 유지하며, 표면 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)은 에칭 중 존재할 수 있는 부식성 가스(예: 염소 또는 불소)에 대한 내열충격성과 내식성을 향상시킵니다. 설치 시 발열체는 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되며, 전기 연결에는 저저항 클램프를 사용하여 안정성을 보장합니다. 작동 시에는 산화 손상을 방지하기 위해 분위기, 가열 및 냉각 속도 제어가 필요합니다. 유지보수에는 웨이퍼 오염을 방지하기 위해 부품 표면의 정기적인 검사와 퍼니스의 청결 유지가 포함됩니다. MoSi₂ 성분은 고온 에칭 장비의 가공 정확도와 효율을 향상시키며, 반도체 제조 공정의 미세 구조 가공에 널리 사용됩니다.

8.4.4 진공 코팅 장비

MoSi₂ 발열체는 물리 기상 증착(PVD) 및 화학 기상 증착(CVD) 시스템의 진공 코팅 장비에서 반도체 소자의 전극 또는 절연층에 사용될 TiN, Al₂O₃ 와 같은 금속, 산화물 또는 질화물 박막을 증착하는 데 사용됩니다. 진공 코팅은 전구체 물질을 증발시키거나 분해하기 위해 고온이 필요합니다. MoSi₂ 소자의 높은 전력 밀도와 정밀한 온도 제어 기능은 박막의 균일성과 품질을 보장합니다. U 자형 및 나선형 MoSi₂ 소자는 소형 진공 코팅로에 적합하여 국부적인 고온을 제공하여 고정밀 증착을 지원합니다. W 자형 및 직선형 막대형 소자는 대형 장비에 적합하여 대면적 기관의 열장 균일성을 보장합니다. 산화성 분위기 또는 미량 산소 환경에서 SiO₂ 보호막과 표면 코팅은 소자의 장기 작동을 지원하며, 열충격 저항성은 급격한 온도 상승 및 하강에 적합합니다. 설비는 고순도 알루미늄 브래킷을 채택하고, 전기 연결은 안정적인 온도 제어를 위해 비례 제어 전원 공급 장치를 사용합니다. 산화 손상을 방지하기 위해 작동은 "전염병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 유지보수에는 SiO₂ 필름 점검 및 오염 방지를 위한 퍼니스 청소가 포함됩니다. MoSi₂ 성분은 진공 코팅 장비의 필름 품질과 생산 효율을 향상시키며, 반도체 소자의 필름 제조에 널리 사용됩니다.

8.5 유리 제조 산업에서의 MoSi₂ 발열체 응용

이규화 몰리브덴 (MoSi₂) 발열체는 뛰어난 고온 성능, 내산화성, 전열 안정성으로 유리 제조 산업의 유리 용융 및 유리 가공에 널리 사용됩니다. MoSi₂ 발열체는 정밀한 온도 제어와 균일한 열장을 제공하여 고온, 장기 작동 및 청정 환경이라는 유리 제조 요건을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

충족합니다. 산화 분위기에서 표면에 형성된 SiO_2 보호막을 통해 뛰어난 내산화성을 구현하며, 이는 유리로의 가혹한 작업 조건에 적합합니다. W 형, U 형, 직선형 MoSi_2 발열체는 로의 종류에 따라 맞춤 제작됩니다. W 형은 균일한 가열을 제공하는 대형 용융로에 적합하며, U 형과 직선형은 중소형 가공로에 적합합니다. 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하여 MoSi_2 의 열팽창 특성에 맞춰 설치 하고 기계적 응력을 줄입니다. 전기 연결에는 저저항 클램프를 사용하고, 안정성을 보장하기 위해 비례 제어 전원 공급 장치를 사용합니다. 비보호 산화물 형성을 방지하기 위해 작동 중 "전염병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 하며, 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 열충격 저항성과 사용 수명을 더욱 향상시킵니다. SiO_2 피막 의 무결성 과 콜드 엔드 연결 상태를 정기적으로 점검하고, 불순물 오염을 방지하기 위해 퍼니스를 청소하며, 유리 제조 시 부품의 신뢰성과 효율성을 보장하십시오.

8.5.1 유리 용융

MoSi_2 발열체는 판유리, 광학 유리 및 특수 유리 생산을 위한 유리 용융 공정에서 대형 용융로 및 소형 실험로에 사용됩니다. 유리 용융은 원료(규사, 소다회 등)를 균일한 액상 유리로 용융하기 위해 고온이 필요합니다. MoSi_2 발열체의 정온도계수(PTC) 저항률은 용융 품질과 균일성을 보장하는 안정적인 고온 환경을 제공합니다.

W 형 MoSi_2 소자는 넓은 가열 면적을 커버하고 균일한 열장을 제공하여 유리 내 기포와 줄무늬 발생을 줄여 대형 연속 용해로에 적합합니다. U 형 소자는 소형 용해로에 적합하며, 특수 유리의 소량 생산에도 적합합니다. SiO_2 보호막은 산화 분위기에서 안정성을 유지하며, 표면 코팅은 유리 용융물에 존재할 수 있는 휘발성 성분(예: 붕산염)에 대한 내열충격성과 내식성을 향상시킵니다. 설치 시 소자는 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되며, 전기 연결은 저저항 접촉을 보장합니다. 산화 손상을 방지하기 위해 분위기 및 가열/냉각 속도를 제어해야 합니다.

유지보수에는 불순물(알칼리 금속 산화물 등)이 유리 용융물을 오염시키지 않도록 요소 표면 및 용광로 청결 상태를 정기적으로 검사하는 것이 포함됩니다. MoSi_2 성분은 유리 용융 효율과 제품 품질을 향상시키며 건축, 자동차 및 광학 유리 제조에 널리 사용됩니다.

8.5.2 유리 가공

MoSi_2 발열체는 유리 가공 기술에서 어닐링로, 성형로, 열간 굽힘로에서 유리 제품의 성형, 어닐링 및 표면 처리를 위해 사용됩니다. 유리 가공에는 내부 응력 제거, 형상 개선 또는 유리 성능 향상을 위한 정밀한 온도 제어가 필요합니다. MoSi_2 발열체의 높은 전력 밀도와 안정적인 온도 제어 능력은 이러한 요건을 충족합니다. U 자형 및 직선형 막대형 MoSi_2 발열체는 중소형 어닐링 및 열간 굽힘로에 적합하며, 복잡한 형상의 유리 가공을 지원하는 중앙 집중식 가열을 제공합니다. W 자형 발열체는 대형 성형로에 적합하여 대면적 유리판의 온도 균일성을 보장합니다. SiO_2 보호막과 표면 코팅은 산화성 분위기에서 소자의 장기 작동을 지원하며, 열충격 저항성은 잦은 열 사이클에도 적합합니다. 설치에는 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하고, 전기 연결에는 비례 제어

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전원을 사용하여 정밀한 온도 제어를 구현합니다. 작동은 "악화" 온도 범위를 빠르게 통과해야 하며, 유지보수에는 SiO_2 막 점검 및 오염 방지를 위한 용광로 청소가 포함됩니다. MoSi_2 소자는 유리 가공의 정확도와 효율성을 향상시키며, 유리 용기, 디스플레이 유리, 건축용 유리 생산에 널리 사용됩니다.

8.6 신에너지 재료 제조에서의 MoSi_2 발열체 응용

몰리브덴 디실리사이드 (MoSi_2) 발열체는 우수한 고온 성능, 내산화성 및 전열 안정성으로 인해 신에너지 소재 제조에 중요한 역할을 합니다. 리튬 배터리 소재 소결, 수소 에너지 및 연료 전지 관련 공정과 같이 수요가 높은 시나리오에서 널리 사용됩니다. MoSi_2 소자는 산화 분위기에서 표면에 형성된 SiO_2 보호막을 통해 우수한 내산화성을 달성할 수 있으며, 이는 장기 고온 작동에 적합합니다. 동시에, 양의 온도 계수 저항 특성은 정밀한 온도 제어와 균일한 열장 분포를 보장합니다. 이러한 특성 덕분에 신에너지 소재 제조에서 청정 환경, 고정밀 온도 제어 및 열 사이클 저항성이라는 요구 사항을 충족할 수 있습니다. MoSi_2 소자는 U 형, W 형, 나선형 및 직선 막대형과 같은 다양한 구조를 가지고 있으며, 다양한 장비 요구 사항에 따라 맞춤 제작할 수 있습니다. U 형 및 나선형은 소형 고정밀 소결로에 적합하며, W 형 및 직선봉형은 대형 연속 생산 장비에 적합합니다. 설치 시 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하여 MoSi_2 의 열팽창 특성에 맞추고 기계적 응력 및 열응력 집중을 줄입니다. 전기 연결에는 저저항 클램프를 사용하며, 비례 제어 전원 공급을 통해 안정적인 작동을 보장합니다. 작동 중에는 비보호 산화물 형성을 방지하기 위해 "질병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 내열충격성과 내식성을 더욱 향상시키고 부품 수명을 연장합니다. 정기적인 유지보수에는 SiO_2 피막의 무결성, 콜드 엔드 연결 상태, 그리고 소결로의 청결 상태를 점검하여 불순물 오염이 없는지 확인하고 신에너지 재료 제조에 대한 엄격한 요건을 충족하는 것이 포함됩니다. MoSi_2 원소는 열장 설계 및 작동 매개변수를 최적화하여 신에너지 재료의 성능 향상 및 생산 효율을 안정적으로 지원합니다.

8.6.1 리튬 배터리 재료의 소결

MoSi_2 발열체는 리튬 전지 재료의 소결 공정에서 양극, 음극 및 고체 전해질 재료 제조에 널리 사용되며, 리튬 코발트 산화물, 니켈 코발트 망간 3 원계 재료, 리튬 철 인산염, 흑연 음극 및 고체 산화물 전해질과 같은 핵심 소재 생산에 사용됩니다. 리튬 전지 재료의 소결은 결정 성장을 촉진하고 재료 밀도 및 전기화학적 특성을 향상시키기 위해 고온에서 수행되어야 합니다. MoSi_2 발열체의 높은 전력 밀도와 정밀한 온도 제어 기능은 이러한 까다로운 요구 사항을 충족할 수 있습니다. U 자형 및 나선형 MoSi_2 발열체는 소형 실험실 소결로, 새로운 전지 재료 개발 또는 소량 생산에 적합하며, 중앙 집중식 가열을 제공하여 공정의 높은 정밀도를 보장합니다. W 자형 및 직선 막대형 발열체는 넓은 가열 영역을 커버하고 균일한 열장을 제공하여 대량 생산을 지원하는 대형 산업용 소결로에 적합합니다. SiO_2 보호막은 산화 분위기에서 안정성을 유지하여 소결 공정 중 부품의 내산화성을 보장합니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 내열충격성과 내식성을 향상시키고, 소결 공정 중 발생할 수 있는 휘발성 가스 또는 미량 부식성 분위기(예: 리튬 화합물을 함유한 휘발성 물질)에 적응합니다. 설치 과정에서

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부품은 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되고, 기계적 응력을 줄이기 위해 수직 또는 수평으로 지지됩니다. 전기 연결에는 저저항 클램프를 사용하고, 비례 제어 전원 공급 장치를 사용하여 정밀한 온도 제어를 구현합니다. 이 작업은 환원성 또는 고습 환경으로 인한 SiO_2 피막 손상을 방지하기 위해 로 내 분위기를 엄격하게 제어해야 하며, 비보호성 산화물 형성을 방지하기 위해 "플래그" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 유지보수에는 부품 표면 상태, 콜드 엔드 연결부, 로 청결 상태의 정기적인 점검과 재료 순도에 영향을 미칠 수 있는 불순물(예: 알칼리 금속 산화물) 제거가 포함됩니다. MoSi_2 구성 요소는 열장 설계 및 작동 매개변수를 최적화하여 리튬 배터리 소재가 소결 과정에서 우수한 결정 구조와 전기화학적 특성을 갖도록 하여 배터리의 용량, 사이클 수명 및 안전성을 크게 향상시킵니다. 이 소재는 전기 자동차, 에너지 저장 시스템 및 가전제품에 널리 사용됩니다.

8.6.2 수소 에너지와 연료 전지

MoSi_2 발열체는 주로 고체 산화물 연료 전지(SOFC) 재료의 소결, 수소 생산 반응기의 제조 공정 및 전해조 의 고온 구성 요소에 사용되며 전해질, 애노드, 캐소드 재료 및 고온 촉매 담체를 생산하는 데 사용됩니다. 수소 에너지 및 연료 전지 재료의 제조에는 재료의 미세 구조와 성능을 최적화하기 위해 고온에서 소결 또는 열처리가 필요합니다. MoSi_2 요소 의 안정적인 고온 성능과 균일한 열장 분포는 이러한 공정 요구 사항을 충족할 수 있습니다. 나선형 및 U 자형 MoSi_2 요소 는 소형 실험로에 적합하고 새로운 연료 전지 재료 또는 촉매 개발에 적합하며 고정밀 소결 또는 열처리 공정을 지원하기 위해 국부적인 고온을 제공합니다. W 형 및 직선 막대 요소는 SOFC 구성 요소 또는 수소 생산 장비 구성 요소의 대량 생산을 위한 대형 산업용로에 적합하여 열장 균일성을 보장하여 재료 결함을 줄입니다.

SiO_2 보호막은 산화성 분위기에서 안정적인 산화 방지 기능을 제공하며, 표면 코팅(예: Al_2O_3 또는 SiC)은 내열충격성과 내식성을 향상 시키고, 연료 전지 재료의 소결에 관여할 수 있는 복잡한 분위기(예: 수증기 또는 미량 환원 가스)에 적응합니다. 수소 생산 반응기 또는 전해조 구성 요소 를 준비할 때, MoSi_2 요소는 고온 촉매 담체의 소결 또는 열처리를 지원하여 촉매의 높은 활성과 안정성을 보장합니다.

설치 과정에서 요소는 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되고, 전기 연결에는 저저항 클램프가 사용됩니다. 비례 제어 전원 공급 장치는 엄격한 온도 곡선을 요구하는 SOFC 재료의 정밀한 온도 제어를 구현합니다. 작동 시에는 고환원 환경이 SiO_2 막을 손상시키지 않도록 로 내 분위기를 제어하고, 산화 손상을 방지하기 위해 "플러그" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 유지보수에는 SiO_2 멤브레인, 콜드 엔드 연결부 및 퍼니스 청결 상태를 정기적으로 점검하여 재료 성능에 영향을 미치는 불순물 오염이 없는지 확인하는 것이 포함됩니다. MoSi_2 성분 은 열장 및 공정 매개변수를 최적화하여 연료 전지 재료의 전기화학적 성능과 수소 생산 장비의 효율을 향상시킵니다. 이 성분들은 청정 에너지 발전, 산업용 수소 생산 및 에너지 변환에 널리 사용되어 수소 에너지 기술의 상업적 발전에 중요한 기반을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.7 환경 보호 및 촉매 분야에서의 MoSi₂ 발열체 응용

이규화 몰리브덴 (MoSi₂) 발열체는 우수한 고온 성능, 내산화성, 전열 안정성으로 인해 환경 보호 및 촉매 분야에서 폐가스 처리, 촉매 재생 및 고형 폐기물 자원 회수에 널리 사용됩니다. MoSi₂ 발열체는 산화 분위기 에서 표면에 형성된 SiO₂ 보호막을 통해 우수한 내산화성을 달성하며 , 장기간 고온 작동에 적합합니다. 정온도계수(PTC) 저항 특성은 정밀한 온도 제어와 균일한 열장 분포를 보장하여 고온, 청정 환경, 내식성 등 환경 보호 및 촉매 공정의 요구 사항을 충족합니다. U 자형, W 자형, 나선형 및 직선 막대형 MoSi₂ 발열체는 장비 요구 사항에 따라 맞춤 제작됩니다. U 자형 및 나선형은 소형 고정밀 반응기에 적합하며, W 자형 및 직선 막대형은 대형 연속 처리 장비에 적합합니다. 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하여 MoSi₂ 의 열팽창 특성에 맞춰 설치하고 기계적 및 열적 응력을 줄입니다. 저저항 클램프는 전기 연결에 사용되며, 비례 제어 전원 공급 장치를 통해 안정적인 작동이 보장됩니다. 비보호성 산화물 형성을 방지하기 위해 작동은 "질병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)은 열충격 저항성과 내식성을 더욱 향상시키고 부품 수명을 연장합니다. 정기적인 유지보수에는 SiO₂ 피막 의 무결성 , 콜드 엔드 연결 상태 및 퍼니스 청결 상태를 점검하여 불순물 오염이 없는지 확인하고 환경 보호 및 촉매 분야의 높은 기준을 충족하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 소자는 열장 설계 및 작동 매개변수를 최적화하여 배기가스 처리, 촉매 재생 및 고형 폐기물 자원 활용의 효율성과 신뢰성을 높이는 데 핵심적인 역할을 합니다.

8.7.1 폐가스 처리

MoSi₂ 발열체는 고온 소각로, 촉매 산화로, 열분해로에서 산업 폐가스, 휘발성 유기 화합물(VOC) 및 유해 가스(NO_x, SO_x 등)를 처리하는 폐가스 처리 공정에 사용됩니다. 폐가스 처리에는 유해 성분을 분해하거나 촉매 반응을 촉진하기 위해 고온이 필요합니다. MoSi₂ 발열체의 높은 전력 밀도와 정밀한 온도 제어 기능은 반응기가 필요한 온도에 도달하고 균일한 열장을 유지하여 폐가스의 효율적인 분해 및 전환을 촉진합니다. W 형 및 직선 막 대형 MoSi₂ 발열체는 넓은 가열 영역을 포괄하고 연속적인 폐가스 처리를 지원하는 대형 폐가스 처리로에 적합합니다. U 형 및 나선형 발열체는 소형 또는 실험실용 가열로에 적합하며 고정밀 실험이나 소규모 처리에 적합합니다.

SiO₂ 보호막은 산화 분위기에서 안정적이며, 표면 코팅은 열충격 저항성과 내식성을 향상시켜 폐가스에 존재할 수 있는 부식성 가스(염화물 또는 황화물 등)에 적응합니다. 설치 과정에서 소자는 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되고, 전기 연결은 저저항 클램프를 사용하며, 이 클램프는 비례 제어 전원 공급 장치와 연결되어 정밀한 온도 제어를 구현합니다. 이 작업은 고환원 환경이 SiO₂ 피막을 손상시키지 않도록 노 내 분위기를 제어하고 , 산화 손상을 방지하기 위해 "질병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 유지보수에는 부품 표면 상태 및 노 내 청결 상태를 정기적으로 점검하고, 처리 효과에 영향을 줄 수 있는 불순물을 제거하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 성분은 폐가스 처리의 분해 효율과 배출 규제를 향상시키며, 화학, 전력 및 환경 보호 산업에서 널리 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.7.2 촉매 재생

MoSi₂ 발열체는 촉매 재생 공정에서 고온 재생로 및 열처리로에 사용되어 촉매의 활성을 회복시키는데, 석유화학 분야의 촉매 분해 촉매, 환경보호 분야의 선택적 촉매 환원(SCR) 촉매, 산업용 촉매(귀금속 촉매 등)에 사용됩니다.

장기간 사용 후, 촉매 표면에 탄소질 물질, 황화물 또는 기타 유해 물질이 침착되어 촉매가 비활성화됩니다. 재생 공정은 촉매의 미세 구조와 활성점을 보호하면서 고온에서 이러한 침착물을 연소시켜 촉매 성능을 회복해야 합니다. MoSi₂ 원소의 높은 전력 밀도와 정밀한 온도 제어 능력은 안정적인 고온 환경을 제공하여 재생 공정의 효율과 촉매 성능 회복을 보장합니다.

U 자형 및 나선형 MoSi₂ 소자는 소형 재생로, 실험실 또는 소규모 재생 공정에 적합하며, 고정밀 온도 제어를 지원하는 중앙 가열을 제공하고 엄격한 온도 곡선에 대한 특정 촉매의 요구를 충족합니다. W 자형 및 직선 막대형 MoSi₂ 소자는 넓은 가열 영역을 포괄하고, 일괄 촉매 처리를 지원하는 균일한 열장을 제공하며, 재생 효과의 일관성을 보장하는 대형 산업용 재생로에 적합합니다. SiO₂ 보호막은 산화성 분위기에서 안정성을 유지하며, 표면 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)은 내열충격성과 내식성을 향상시키고, 재생 공정 중 발생할 수 있는 부식성 가스(예: 황 함유 또는 염소 함유 분위기) 또는 빈번한 열 사이클에 적응합니다.

설치 시, 소자는 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되고, 기계적 응력을 줄이기 위해 수직 또는 수평으로 지지됩니다. 전기 연결은 저저항 클램프를 사용하며, 비례 제어 전원 공급 장치를 사용하여 정밀한 온도 제어를 구현합니다. 작동 시에는 고온 환원 환경이 SiO₂ 피막을 파괴하는 것을 방지하기 위해 노 분위기를 엄격하게 제어해야 하며, 비보호 산화물 형성을 방지하기 위해 "플러그" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 유지보수에는 소자 표면 상태, 콜드 엔드 연결부 및 노 청결 상태를 정기적으로 점검하고, 촉매 순도에 영향을 미칠 수 있는 불순물(예: 금속 산화물)을 제거하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 소자는 열장 및 공정 매개변수를 최적화하여 촉매 재생의 높은 효율과 활성 회복 효과를 보장하고 촉매의 수명을 연장합니다. 이 소자는 석유화학, 환경 보호 및 산업 촉매 분야에서 널리 사용됩니다.

8.7.3 고품 폐기물 자원 활용

MoSi₂ 발열체는 고품 폐기물 재활용 공정에서 고온 열분해로, 소각로 및 소결로에 사용되어 산업 고품 폐기물, 도시 쓰레기, 유해 폐기물을 처리하고 금속, 세라믹, 유리 등 귀중한 재료를 회수합니다. 고품 폐기물 재활용은 유기물을 분해하고 유해 물질을 휘발시키거나 고품 폐기물 성분을 소결하여 재사용 가능한 재료로 만들기 위해 고온이 필요합니다. MoSi₂ 발열체의 안정적인 고온 성능과 균일한 열장 분포는 이러한 공정 요건을 충족합니다. W 형 및 직선 막대형 MoSi₂ 발열체는 넓은 가열 영역을 포괄하는 대형 열분해로 또는 소각로에 적합하며, 연속적인 고품 폐기물 처리를 지원하고 열분해 또는 소결 공정의 효율성과 일관성을 보장합니다. U 형 및 나선형 MoSi₂ 발열체는 소형

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

실험로 또는 특정 고형 폐기물의 자원 처리에 적합하며, 고정밀 공정 또는 R&D 목적에 적합하고 반응 조건을 최적화하기 위한 중앙 집중식 가열을 제공합니다. SiO_2 보호막은 산화성 분위기에서 안정적인 산화 방지 기능을 제공하며, 표면 코팅은 열충격 저항성과 내식성을 향상시켜 고형 폐기물 처리 시 발생할 수 있는 복잡한 분위기(예: 염소, 황 또는 중금속 휘발성 물질)에 적합합니다. 설치 시 부품은 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되고, 전기 연결에는 저저항 클램프가 사용됩니다. 비례 제어 전원 공급 장치는 특정 온도 곡선에 대한 고형 폐기물 자원 활용 제어 요건을 충족하는 정밀한 온도 제어를 위해 사용됩니다. 이 작업은 고환원 환경이 SiO_2 막을 손상시키지 않도록 노 내 분위기를 제어하고, 산화 손상을 방지하기 위해 "폐기물" 온도 범위를 신속하게 통과해야 합니다. 유지보수에는 SiO_2 막, 콜드 엔드 연결부 및 노 청결 상태의 정기적인 검사, 그리고 자원 기반 제품의 품질에 영향을 미칠 수 있는 불순물 제거가 포함 됩니다. MoSi_2 구성 요소는 안정적인 고온 환경을 제공하여 고형 폐기물의 효율적인 분해, 재료 회수 및 자원 활용을 지원하며 환경 보호, 순환 경제 및 자원 재활용 산업에서 널리 사용됩니다.

8.8 기타 분야에서의 MoSi_2 발열체 응용

이규화 몰리브덴 (MoSi_2) 발열체는 뛰어난 고온 성능, 내산화성, 전열 안정성으로 항공우주 및 원자력 산업과 같은 첨단 기술 분야에서 독보적인 적용 가치를 보여 왔습니다. MoSi_2 발열체는 산화 분위기에서 표면에 형성된 SiO_2 보호막을 통해 탁월한 내산화성을 달성할 수 있으며, 이는 장기간 고온 작동에 적합합니다. 정온도계수(PTC) 저항 특성은 정밀한 온도 제어와 균일한 열장 분포를 보장하여 고온, 청정 환경 및 열 사이클 저항과 같은 복잡한 작동 조건의 요구 사항을 충족합니다. U자형, W자형, 나선형 및 직선 막대형 MoSi_2 발열체는 장비 요구 사항에 따라 맞춤 제작됩니다. U자형 및 나선형은 소형 고정밀로에 적합하며, W자형 및 직선 막대형은 대형 시험 또는 보조 장비에 적합합니다.

MoSi_2 의 열팽창 특성에 맞춰 설치하고 기계적 및 열적 응력을 줄이는 데 사용됩니다. 저저항 클램프는 전기 연결에 사용되며, 비례 제어 전원 공급 장치를 통해 안정적인 작동을 보장합니다. 작동은 비보호 산화물 형성을 방지하기 위해 "질병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 표면 코팅(예: SiC 또는 Al_2O_3)은 열충격 저항성과 내식성을 더욱 향상시키고 부품 수명을 연장합니다. 정기적인 유지보수에는 SiO_2 피막의 무결성, 콜드 엔드 연결 상태 및 퍼니스 청결 상태를 점검하여 항공우주 및 원자력 산업의 엄격한 요구 사항을 충족하는 불순물 오염이 없는지 확인하는 것이 포함됩니다. MoSi_2 소자는 열장 설계 및 작동 매개변수를 최적화하여 첨단 기술 분야의 재료 시험 및 장비 작동에 안정적인 지원을 제공합니다.

8.8.1 항공우주 재료 시험

MoSi_2 발열체는 항공우주 재료 시험의 고온 시험로, 열 사이클 시험로 및 환경 시뮬레이션 장비에 사용되어 고온 합금, 세라믹 매트릭스 복합재, 탄소 섬유 복합재와 같은 주요 항공우주 재료의 성능을 시험합니다. 항공우주 재료는 엔진, 터빈 블레이드

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또는 우주선 열 보호 시스템에서의 신뢰성을 검증하기 위해 극한의 고온 조건에서 기계적, 열적, 화학적 성능 시험을 거쳐야 합니다.

MoSi₂ 소자의 높은 전력 밀도와 정밀한 온도 제어 기능은 이러한 혹독한 환경을 시뮬레이션할 수 있습니다. U 자형 및 나선형 MoSi₂ 소자는 소형 시험로에 적합하며, 중앙 집중식 가열을 제공하여 고정밀 시험을 지원하고, 소형 시료의 열 노출 또는 열 사이클 실험에 적합합니다. W 자형 및 직선 막대형 소자는 대형 시험로에 적합하며, 넓은 가열 영역을 포괄하고 대형 구조 부품 시험을 위한 균일한 열장을 제공합니다. SiO₂ 보호막은 산화 분위기에서 안정성을 유지하며, 표면 코팅은 열충격 저항성과 내식성을 향상시켜 시험에 포함될 수 있는 산화성 또는 미량 부식성 분위기에도 적합합니다.

설치 과정에서 소자는 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되고, 전기 연결은 저저항 클램프를 사용하며, 이 클램프는 비례 제어 전원 공급 장치와 연결되어 정밀한 온도 곡선 제어를 구현합니다. 이 작업은 환원 환경이 SiO₂ 박막을 손상시키지 않도록 노 내 분위기를 엄격하게 제어하고, 산화 손상을 방지하기 위해 "질병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 유지보수에는 부품 표면 상태, 저온 연결부 및 노 내 청결 상태를 정기적으로 검사하여 불순물이 시험 결과에 영향을 미치지 않도록 하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 부품은 안정적인 고온 환경과 신뢰할 수 있는 열 사이클 성능을 제공하여 항공우주 재료의 고정밀 시험을 지원하며, 재료 개발 및 인증에 중요한 데이터를 제공합니다.

8.8.2 원자력 산업 보조 장비

MoSi₂ 발열체는 원자력 산업 보조 장비의 고온 소결로, 열처리로, 실험용 원자로에서 핵연료, 원자로 재료의 제조, 관련 고온 세라믹 또는 합금의 시험 및 가공에 사용됩니다. 원자력 산업은 장비의 온도 제어, 청정도 및 장기 안정성에 대한 요구 사항이 매우 높습니다. MoSi₂ 발열체의 안정적인 고온 성능과 균일한 열장 분포는 이러한 요구 사항을 충족할 수 있습니다. U 자형 및 나선형 MoSi₂ 발열체는 소형 실험로, 핵연료 입자 또는 소형 원자로 재료의 소결 및 열처리에 적합하며, 재료 성능을 보장하기 위한 고정밀 온도 제어를 제공합니다. W 자형 및 직선형 막대형 발열체는 핵연료봉 소결로 또는 원자로 부품 열처리와 같은 대형 보조 장비에 적합하며, 대량 생산을 지원하는 대면적 균일 가열을 제공합니다.

SiO₂ 보호막과 표면 코팅은 부품이 산화성 분위기 또는 약한 부식성 환경에서 장시간 작동할 수 있도록 보장하며, 열충격 저항성은 잦은 열 사이클에도 적응할 수 있습니다. 설치에는 고순도 알루미늄 브래킷을 사용하고, 전기 연결에는 비례 제어 전원을 사용하여 정밀한 온도 제어를 구현하여 원자력 산업의 엄격한 공정 매개변수 요건을 충족합니다. 이 작동에는 고환원 환경이 SiO₂ 막을 손상시키지 않도록 노 내 분위기를 제어하고, 산화 손상을 방지하기 위해 "유해" 온도 범위를 신속하게 통과해야 합니다. 유지보수에는 SiO₂ 막, 저온 연결부, 노 내 청결 상태를 정기적으로 검사하여 핵 재료의 품질에 영향을 미치는 불순물 오염이 없는지 확인하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 원소는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

신뢰할 수 있는 고온 환경을 제공하여 원자력 산업의 핵심 재료의 준비 및 성능 검증을 지원하며, 원자력 에너지 기술의 안전성과 효율성을 보장합니다.

8.8.3 고온 합성 화학

MoSi₂ 발열체는 고온 세라믹, 금속간 화합물, 기능성 재료 및 고성능 화학물질 합성을 위한 고온 합성 화학 반응기 및 실험로에 사용됩니다. 고온 합성 화학은 생성물의 순도, 결정 구조 및 화학적 특성을 보장하기 위해 엄격하게 제어된 온도 조건에서 반응이 수행되어야 합니다. MoSi₂ 발열체의 높은 전력 밀도와 정밀한 온도 제어 기능은 안정적인 반응 환경을 제공합니다. U 자형 및 나선형 MoSi₂ 발열체는 소형 실험로에 적합하며, 실험실 규모의 화학 합성 또는 신소재 연구 개발에 적합하고, 고정밀 온도 제어를 위한 중앙 집중식 가열을 제공합니다. W 자형 및 직선 막대형 발열체는 대형 반응기에 적합하며, 산업 규모의 화학 또는 재료 생산을 지원하고, 불균일한 반응을 줄이기 위해 열장 균일성을 보장합니다.

SiO₂ 보호막은 산화성 분위기에서 안정성을 유지하며, 표면 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)은 내열충격성과 내식성을 향상시키고 합성 공정 중 발생할 수 있는 부식성 가스나 휘발성 물질에 대한 적응성을 높입니다. 설치 과정에서 부품은 고순도 알루미늄 브래킷으로 고정되고, 전기 연결에는 저저항 클램프가 사용되며, 정밀한 온도 곡선 제어를 위해 비례 제어 전원 공급 장치가 사용됩니다. 이 공정은 고환원 환경이 SiO₂ 막을 파괴하는 것을 방지하기 위해 노 내 분위기를 제어하고, 산화 손상을 방지하기 위해 "플러그" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 유지보수에는 부품 표면 상태, 콜드 엔드 연결부, 노 청결 상태를 정기적으로 검사하여 합성된 제품의 품질에 영향을 미치는 불순물 오염이 없는지 확인하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 부품은 신뢰할 수 있는 고온 환경을 제공하여 고온 합성 화학에서 효율적인 반응과 제품 품질을 지원하며, 첨단 소재 및 화학 산업에서 널리 사용됩니다.

8.8.4 MoSi₂ 막대 변압기

MoSi₂ 발열체는 변압기 재료 시험, 절연 재료 열처리 및 제조 중 고온 공정을 위한 변압기 관련 응용 분야에서 고온 가열원으로 사용됩니다. 변압기 제조에는 규소강판, 절연 세라믹 또는 기타 고온 내성 재료의 고온 처리가 포함됩니다. MoSi₂ 발열체의 안정적인 고온 성능과 균일한 열장 분포는 이러한 공정 요건을 충족할 수 있습니다. U 자형 및 나선형 MoSi₂ 발열체는 소형 열처리로, 변압기 부품의 국부 가열 또는 실험실 시험에 적합하며, 재료 특성을 최적화하는 고정밀 온도 제어 기능을 제공합니다. W 자형 및 직선 막대형 발열체는 규소강판의 어닐링 또는 절연 재료의 소결을 위한 대형 산업용로에 적합하여 대량 생산을 지원하고 열장 균일성을 보장합니다. SiO₂ 보호막은 산화성 분위기에서 안정적인 산화 방지 기능을 제공하며, 표면 코팅은 열충격 저항성과 내식성을 향상시켜 변압기 제조 과정에서 발생할 수 있는 미량 부식성 분위기에 적응합니다. 설치에는 고순도 알루미늄 브래킷이 사용되었으며, 전기 연결에는 비례 제어 전원 공급 장치가 사용되어 정밀한 온도 제어와 공정 변수의 안정성을 보장합니다. 산화 손상을 방지하기 위해 작동은 "질병" 온도 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 유지보수에는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SiO₂ 피막, 냉단 연결부 및 노(furnace) 청결 상태를 정기적으로 검사하여 불순물이 재료 품질에 영향을 미치지 않도록 하는 것이 포함됩니다. MoSi₂ 구성 요소는 안정적인 고온 환경을 제공하고, 변압기 제조에 사용되는 핵심 소재의 열처리 및 성능 최적화를 지원하며, 변압기의 효율과 신뢰성을 향상시키고, 전력 장비 제조 분야에서 널리 사용됩니다.



CTIA GROUP LTD 몰리브덴 규산염 막대

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

제 9 장 MoSi₂ 발열체와 다른 발열 재료의 비교

몰리브덴 이규화물 (MoSi₂) 발열체는 우수한 고온 성능, 내산화성 및 전열 안정성으로 인해 고온 가열에 널리 사용됩니다. 텅스텐 및 탄화규소(SiC)와 같은 다른 일반적인 발열 재료와 비교하여 MoSi₂ 발열체는 내산화성, 작동 온도 범위 및 공정 적응성 측면에서 고유한 장점을 가지고 있지만 특정 한계도 있습니다. 이 장에서는 MoSi₂ 와 텅스텐 발열체 및 탄화규소 발열체의 성능을 비교하고, 비용, 효율 및 적용 적응성의 차이점을 분석하며, 다양한 작동 조건에서 적합한 발열체를 선택하기 위한 지침을 제공합니다. MoSi₂ 발열체는 열팽창 특성에 맞게 고순도 알루미나 브래킷과 함께 설치해야 하며, 전기 연결에는 저저항 클램프를 사용해야 하며, 안정성을 보장하기 위해 비례 제어 전원 공급 장치를 사용해야 합니다. 비보호성 산화물 형성을 방지하기 위해 작동 시 "플레이그" 온도 범위를 빠르게 통과해야 하며, 표면 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)은 열충격 저항성과 내식성을 향상시킬 수 있습니다. 정기적인 유지보수에는 SiO₂ 피막의 무결성과 저온 연결부 상태를 점검하여 불순물 오염이 없는지 확인하는 것이 포함됩니다.

9.1 텅스텐 가열소자와의 비교

MoSi₂ 발열체와 텅스텐 발열체는 고온 응용 분야에서 각각 고유한 장점을 가지고 있지만, 적용 시나리오와 성능 특성에는 상당한 차이가 있습니다. MoSi₂ 발열체는 산화 분위기에서 표면에 형성된 SiO₂ 보호막을 통해 우수한 내산화성을 달성할 수 있으며, 이는 장기 작동에 적합합니다. 최대 작동 온도는 1850°C에 달할 수 있으며 세라믹 소결, 유리 용융 및 반도체 제조와 같은 산화 환경에서의 공정에 널리 사용됩니다. MoSi₂의 양의 온도 계수 저항 특성은 전력을 적응적으로 조정하고 안정적인 온도 제어를 제공할 수 있게 하여 고정밀 온도 제어가 필요한 응용 분야에 적합합니다. 적당한 열팽창 계수와 우수한 열충격 저항성을 가지며 잦은 열 사이클을 견딜 수 있고 U 자형, W 자형 또는 나선형 구조 설계에 적합합니다. MoSi₂ 발열체의 제조 공정(분말 야금 및 등방성 성형 등)은 복잡한 노 요구 사항을 충족하도록 형상을 유연하게 맞춤 제작할 수 있습니다. 그러나 MoSi₂는 400~700°C의 "플레이그" 온도 범위에서 비보호 산화물을 생성하는 경향이 있으며, 재료 분해를 피하기 위해 급격한 온도 상승 및 하강이 필요하며, SiO₂ 필름을 보호하기 위해 환원 또는 진공 환경에서 작동 온도를 낮출 필요가 있습니다.

반면, 텅스텐 발열체는 매우 높은 용점과 우수한 기계적 강도로 알려져 있어 초고온 응용 분야(진공 또는 불활성 분위기에서의 금속 열처리 등)에 적합합니다. 텅스텐 발열체는 산화성 분위기에서 산화에 매우 취약하여 진공 또는 불활성 가스 보호 환경에서 작동해야 하므로 산화성 환경에서의 사용이 제한됩니다. 텅스텐은 저항률이 낮고 온도 변화에 따른 변화가 적어 고출력이 필요한 시나리오에 적합하지만, 온도 제어 정확도가 MoSi₂보다 낮아 더 복잡한 전력 제어 시스템이 필요합니다. 텅스텐 발열체는 열팽창 계수가 낮고 열충격 저항성이 낮습니다. 잦은 열 사이클은 취성 파괴로 이어질 수 있어 동적 열 부하 하에서의 적용이 제한됩니다. 텅스텐 발열체는 제조 및 가공 비용이 높고 형상을 맞춤 제작하기 어렵습니다. 대부분 와이어 또는 막대 구조로 되어 있어 복잡한 노 유형의 설계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

유연성이 제한됩니다. 또한 텅스텐은 밀도가 높아 원소 무게가 더 무겁고 설치 및 지지 구조 설계가 더 복잡합니다.

MoSi₂ 와 텅스텐을 비교해 보면, MoSi₂ 는 산화 분위기에서 내산화성과 온도 제어 정확도가 더 우수하여 세라믹, 유리, 반도체 등의 산업에 적합한 반면, 텅스텐은 진공 또는 불활성 분위기에서 초고온 응용 분야(고온 합금 용해 등)에 더 적합합니다. 텅스텐 소재 선택은 공정 환경, 온도 요구 사항, 그리고 열 사이클 빈도를 고려하여 결정해야 합니다. 산화 분위기에서 MoSi₂ 는 장기적인 안정성과 유연성을 갖추고 있어 대부분의 고온로에서 더욱 유리합니다.

9.2 탄화규소 구성 요소와의 비교

MoSi₂ 발열체와 탄화규소(SiC) 발열체는 고온 가열 분야에서 널리 사용되지만, 성능과 적용 분야에는 분명한 차이가 있습니다. MoSi₂ 발열체는 표면 SiO₂ 보호막을 통해 산화 분위기에서 우수한 내산화성을 보이며, 최대 작동 온도는 1850°C 에 도달할 수 있어 세라믹 소결, 유리 용융, 반도체 에피택셜 성장과 같은 고정밀 고온 공정에 적합합니다. 양의 온도 계수 저항 특성은 적응형 전력 조절을 지원하고 정밀한 온도 제어를 제공하며 안정적인 열장이 필요한 응용 분야에 적합합니다. MoSi₂ 는 적당한 열팽창 계수와 우수한 열충격 저항성을 가지고 있으며, 잦은 열 사이클을 견딜 수 있습니다. U 자형, W 자형 및 나선형 구조는 다양한 퍼니스 설계에 적합합니다. MoSi₂ 발열체의 제조 공정은 유연하며, 분말 야금 및 등방성 프레싱을 통해 복잡한 형상을 생산하여 맞춤형 요구를 충족할 수 있습니다. 그러나 MoSi₂ 는 "플레이그" 온도 범위에서 비보호 산화가 발생하기 쉽고, 급격한 온도 상승 및 하강이 필요하며, SiO₂ 필름을 보호하기 위해 환원 또는 진공 환경에서 작동 온도를 낮춰야 합니다.

SiC 발열체는 높은 경도, 내마모성 및 화학적 안정성으로 알려져 있으며 산업용 용광로와 중온 및 고온 공정에서 널리 사용됩니다. SiC 요소는 산화성 분위기에서 SiO₂ 보호막을 형성할 수도 있으며 산화 저항성이 좋지만 최대 작동 온도는 일반적으로 MoSi₂ 보다 낮으며 1300~1600°C 의 공정에 적합합니다. SiC 의 저항률은 온도에 따라 더 복잡하게 변하여 음의 온도 계수 특성(고온에서 저항이 감소)을 보이며 이로 인해 전력 출력이 불안정해질 수 있으며 온도 균일성을 유지하기 위해 정밀한 제어 시스템이 필요합니다. SiC 요소는 열팽창 계수가 낮고 MoSi₂ 보다 열충격에 대한 저항성이 약간 낮습니다. 빈번한 열 사이클은 특히 대형 요소에서 미세 균열을 일으킬 수 있습니다. SiC 요소의 제조 공정(반응 소결 또는 재결정과 같은)은 일반적으로 막대 모양이나 관 모양인 모양의 복잡성을 제한하고 사용자 정의 유연성은 MoSi₂ 보다 낮습니다. 또한 SiC 원소는 유황이나 할로젠을 함유한 부식성 분위기에서 국부 부식을 겪을 수 있으므로 추가적인 표면 보호 조치가 필요합니다.

MoSi₂ 와 SiC 의 비교는 MoSi₂ 가 고온 범위와 정밀한 온도 제어 시나리오에서 장점을 가지며 반도체 및 특수 세라믹 제조와 같은 첨단 산업에 적합한 반면, SiC 는 금속 열처리 및 일반 세라믹 소결과 같이 중온 및 고온의 비용에 민감한 산업 분야에 더

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적합하다는 것을 보여줍니다. 선택 시에는 공정 온도, 분위기 조건 및 열 사이클 요구 사항을 고려해야 합니다.

9.3 발열체 비용, 효율 및 적용 적합성 분석

MoSi₂, 텅스텐, SiC 발열체의 비용, 효율 및 적용 적합성의 차이는 다양한 산업 분야에서의 선택에 직접적인 영향을 미칩니다. MoSi₂ 발열체의 제조 비용은 적정하며, 분말 야금 및 등압 성형 공정이 성숙되어 U 자형, W 자형, 나선형 등 복잡한 형상의 제품 생산이 가능해져 다양한 노(furnace) 유형의 요구를 충족할 수 있습니다. MoSi₂는 높은 작동 효율을 가지고 있으며, 양의 온도 계수 저항률 특성은 적응형 전력 조절을 지원하고 에너지 낭비를 줄이며, 세라믹 소결, 유리 가공, 반도체 제조와 같이 정밀한 온도 제어 및 장기 작동이 필요한 환경에 적합합니다. MoSi₂는 산화 분위기에서 뛰어난 내산화성과 낮은 유지 보수 비용을 제공하지만, 산화 손상을 방지하기 위해 "플래그(plague)" 온도 범위를 빠르게 통과해야 하며, 표면 코팅을 통해 수명을 더욱 연장할 수 있습니다. MoSi₂ 원소는 광범위한 적용 가능성을 갖고 있으며 산화 분위기에서 고온 공정에 적합하지만, 환원 또는 진공 환경에서는 온도를 낮춰야 하므로 일부 초고온 금속 처리에는 사용이 제한됩니다.

텅스텐 발열체는 고융점 소재로 가공이 어려워 제조 비용이 상대적으로 높으며, 대부분 와이어나 봉 형태이기 때문에 복잡한 형상을 맞춤 제작하는 데 비용이 많이 듭니다. 텅스텐은 진공 또는 불활성 분위기에서 작동 효율이 높아 초고온 응용 분야(고온 합금 용해 등)에 적합하지만, 산화성 분위기에서는 산화되기 쉬워 추가적인 분위기 제어 시스템이 필요하여 작동 및 유지 보수 비용이 증가합니다. 텅스텐 소자는 열충격 저항성이 낮고 잦은 열 사이클은 파손을 유발할 수 있습니다. 유지 보수 비용도 높습니다. 항공우주 재료 시험과 같이 고온 및 진공 환경에 대한 요구 사항이 매우 높은 분야에 적합하지만, 대기 환경 제약으로 인해 적용 범위가 제한적입니다.

SiC 발열체는 제조 비용이 비교적 낮고 반응 소결 공정이 비교적 간단하여 막대형 또는 관형 발열체의 대량 생산에 적합합니다. SiC는 중온 및 고온 영역에서 작동 효율이 높지만, 부온도계수(NTC) 저항률 특성으로 인해 전력 불안정성이 발생할 수 있으며, 온도 균일성을 유지하기 위한 복잡한 제어 시스템이 필요하여 운영 비용이 증가할 수 있습니다. SiC 발열체는 산화성 분위기에서 우수한 내산화성을 보이지만, 부식성 분위기에서는 국부적인 열화가 발생할 수 있으며 유지 보수 비용이 적당합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 10 장 MoSi₂ 발열체의 관련 표준 및 사양

이규화물리브덴 (MoSi₂) 발열체는 제품 품질, 성능 안정성 및 공정 안전을 보장하기 위해 엄격한 표준과 규격을 따라야 합니다. 전 세계적으로 중국의 국가 표준, 국제 표준 및 유럽, 미국, 일본, 한국의 관련 표준은 MoSi₂ 발열체의 제조 및 사용에 대한 기술 지침을 제공합니다. 이러한 표준은 재료의 화학적 조성, 물리적 특성, 제조 공정, 시험 방법 및 적용 사양을 다룹니다. 이 장에서는 제조업체, 엔지니어 및 사용자에게 참고 자료를 제공하기 위해 MoSi₂ 발열체에 대한 중국 국가 표준, 국제 표준 및 유럽, 미국, 일본, 한국의 관련 표준을 자세히 소개합니다. MoSi₂ 발열체 의 표준화는 제품 품질을 통일하고 호환성을 향상시키며 글로벌 무역 및 기술 협력을 촉진하는 데 도움이 됩니다.

10.1 MoSi₂ 가열 소자 에 대한 중국 국가 표준

MoSi₂ 발열체 의 생산, 성능 시험 및 적용에 대한 여러 규격을 제정했으며 , 이는 주로 비철금속 표준화를 위한 국가 기술 위원회(TC243) 및 기타 기관에서 관리합니다. 이러한 표준은 고온 산화 환경에서 MoSi₂ 원소의 성능 안정성과 안전성을 보장하며 세라믹 소결, 유리 용해 및 반도체 제조와 같은 산업에 적합합니다. 관련 표준에는 재료 화학 분석, 물리적 특성 시험 및 산업용 전기 가열 장비에 대한 기술 요구 사항이 포함됩니다. 예를 들어, MoSi₂ 원소의 화학 조성 표준은 산화 저항 및 전열 안정성을 보장하기 위해 물리브덴 및 실리콘과 같은 주요 원소의 함량 요구 사항과 불순물 관리를 지정합니다. 물리적 성능 표준에는 고온 및 빈번한 열 사이클에서 소자의 신뢰성을 보장하기 위한 저항률, 열팽창 계수, 열충격 저항 및 기계적 강도에 대한 시험 방법이 포함됩니다. 또한, 산업용 전기 가열 장비 표준은 MoSi₂ 원소의 설치, 작동 및 유지보수에 대한 요건을 제시합니다. 여기에는 열팽창 특성에 맞는 고순도 알루미늄 브래킷 사용, 비보호 산화물 형성 방지를 위한 "페스트" 온도 범위 신속 통과, SiO₂ 보호막 의 무결성 정기 점검 등이 포함됩니다. 이러한 표준은 국가시장감독관리총국과 국가표준화총국에서 발표합니다. 일부 표준은 중국의 산업 수요에 부응하고 국제 표준을 준수하기 위해 ISO 관련 규격과 같은 비등가 국제 표준을 참조하거나 채택합니다.

10.2 MoSi₂ 발열체의 국제 표준

국제 표준화 기구(ISO)와 국제 전기 기술 위원회(IEC)는 고온 재료, 산업용 전기 가열 장비 및 성능 시험 방법에 주로 초점을 맞춘 MoSi₂ 발열체와 관련된 국제 표준을 개발했습니다. 이러한 표준은 재료 특성, 제조 공정 및 시험 사양을 포함하여 MoSi₂ 요소의 글로벌 생산 및 적용을 위한 통합된 기술 프레임워크를 제공합니다. 예를 들어, ISO 표준에는 산화성 분위기에서 MoSi₂ 요소 의 장기 안정성을 보장하기 위해 산화 저항, 열 전도도 및 저항률 시험을 포함하여 고온 세라믹 또는 금속간 화합물에 대한 성능 시험 방법이 포함될 수 있습니다 . IEC 표준은 산업용 전기 가열 장비에 대한 기술적 요구 사항에 초점을 맞춰 저저항 클램프 사용 및 비례 제어 전원 공급 장치 구성과 같은 MoSi₂ 요소의 전기적 연결, 온도 제어 정확도 및 안전 요구 사항을 지정합니다. 국제 표준에는 고온 환경에서 부품의 내열충격성 및 내식성 시험 방법도 포함되어 있어 제조업체가 표면 코팅(예: SiC 또는 Al₂O₃)을 최적화하여 서비스 수명을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

연장하도록 지원합니다. 또한, ISO 및 IEC 표준은 특정 분위기(예: 산화성 또는 미량 산소 환경)에서 부품의 작동 사양을 강조하며, "플레이그" 산화를 방지하기 위해 저온 범위를 빠르게 통과해야 합니다. 이러한 표준은 세계 시장에서 MoSi₂ 부품의 호환성과 기술 협력을 촉진하며, 세라믹, 반도체 및 신에너지 재료 제조 분야에서 널리 사용되고 있습니다.

10.3 유럽, 미국, 일본, 한국 및 기타 국가의 MoSi₂ 발열체 표준

MoSi₂ 발열체 표준은 각국의 표준화 기관에서 현지 산업 요구와 국제 표준을 결합하여 제정하며, 재료 특성, 제조 공정 및 응용 사양을 포괄합니다. 유럽에서는 유럽표준화위원회(CEN)와 기타 기관(예: 독일표준협회(DIN), 영국표준협회(BSI))에서 MoSi₂ 발열체의 화학 조성, 저항률, 열팽창 계수 및 내산화성 시험 방법을 포함하는 고온 전기 발열체 관련 표준을 제정했습니다. 이 표준은 산화 분위기에서 부품의 장기 안정성을 강조하고, 표면 SiO₂ 보호막의 형성 조건 및 내식성 요건을 명시하며, 세라믹 소결 및 유리 가공과 같은 산업에 적용 가능합니다. DIN 표준은 고순도 알루미늄 브래킷 사용 및 전기 연결부의 저저항 설계와 같이 MoSi₂ 소자의 설치 사양을 더욱 세부화할 수 있습니다. 미국 국립표준협회(ANSI)에서 제정한 표준은 산업용 전기 가열 장비의 성능과 안전성에 중점을 두고 있으며, MoSi₂ 소자의 온도 제어 정확도 및 열 사이클 성능 시험을 통해 반도체 및 항공우주 재료 시험에서 신뢰성을 보장합니다. 일본과 한국은 일본공업규격(JIS)과 한국기술표준원(KATS)을 통해 MoSi₂ 부품 관련 규격을 개발했습니다. 고온 세라믹 및 반도체 제조 분야의 응용 분야에 중점을 두고, 산화성 및 약부식성 분위기에서 부품의 작동 조건(예: "폐그" 산화 방지를 위한 급격한 온도 상승 및 하강)을 명시합니다. 이러한 표준은 일반적으로 ISO 및 IEC 프레임워크를 참조하지만, 일본의 정밀 제조 요구와 같은 지역 산업 특성에 맞춰 조정되며, 고정밀 온도 제어 및 장수명 부품 설계를 강조합니다. 유럽, 미국, 일본 및 한국 표준은 통일된 시험 방법 및 품질 요건을 통해 세계 시장에서 MoSi₂ 부품의 적용 및 거래를 촉진합니다.



CTIA GROUP LTD 실리콘 몰리브덴 막대

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

MoSi₂ 가열 소자 용어집

이규화 몰리브덴 (MoSi₂) 발열체 분야의 일반적인 전문 용어와 정의를 정리한 본 자료는 제조업체, 엔지니어 및 사용자에게 명확한 기술 참고 자료를 제공하기 위해 마련되었습니다. 본 자료는 재료 특성, 제조 공정, 성능 테스트 및 적용 시나리오와 같은 다양한 측면을 포괄하며, MoSi₂ 발열체 의 특성과 사용 사양을 이해하는 데 도움을 줍니다 .

용어	정의
이규화 몰리브덴 (MoSi ₂)	높은 녹는점, 높은 산화 저항성, 우수한 전열 특성을 지닌 몰리브덴과 실리콘으로 구성된 금속간 화합물로, 고온 발열체에 자주 사용됩니다.
SiO ₂ 보호 필름	MoSi ₂ 를 산화 분위기에서 처리하여 재료의 추가 산화를 방지하고 고온 안정성을 향상시킵니다.
전염병 산화	MoSi ₂ 는 400~700° C 의 온도 범위에서 비보호적 산화물(예: MoO ₃ 와 SiO ₂ 의 혼합물)을 형성하여 재료가 분쇄되고 열화됩니다.
양의 온도 계수 저항률(PTC)	MoSi ₂ 저항률은 적응형 전력 조절을 지원하며 정밀한 온도 제어 애플리케이션에 적합합니다.
핫엔드	MoSi ₂ 발열체 는 일반적으로 더 얇으며 주열을 생성합니다. 일반적인 규격은 Φ6mm 또는 Φ9mm 입니다.
콜드 정션	MoSi ₂ 발열체 는 일반적으로 두껍고(예: Φ12mm 또는 Φ18mm) 전도성 물질로 도핑되어 저항률을 낮춥니다.
U자형 요소	MoSi ₂ 가열 요소 구조 로, 소형로나 중앙 난방에 적합하며 설치와 교체가 쉽습니다.
W형 구성 요소	MoSi ₂ 가열 소자는 W 형으로 대형 용광로에 적합하며, 균일한 열장과 우수한 열충격 저항성을 제공합니다.
나선형 요소	MoSi ₂ 가열소자는 집중 열장과 정밀한 온도 제어가 가능한 관로 또는 고정밀 가열에 적합합니다.
직선 막대 요소	MoSi ₂ 가열소자 는 넓은 면적을 균일하게 가열하는 데 적합하며 연속식 산업용로에서 자주 사용됩니다.
열팽창 계수	MoSi ₂ 소재의 온도는 약 $8.1 \times 10^{-6} K^{-1}$ 이며, 이는 부품과 브라켓 의 매칭 설계에 영향을 미칩니다 .
열충격 저항성	MoSi ₂ 구성 요소는 파괴 인성 및 열 팽창 특성과 관련이 있습니다.
파괴인성	MoSi ₂ 소재는 균열 확산을 저항하는 능력이 일반적으로 낮으며, 미세균열 위험을 줄이기 위해 공정을 최적화해야 합니다.
열전도도	MoSi ₂ 소재는 열을 전도하는 특성으로 인해 열장의 균일성과 가열 효율에 영향을 미칩니다.

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

전력 밀도	단위 면적당 가열 전력은 MoSi ₂ 원소의 가열 용량을 반영하며, 용광로 유형 및 공정에 따라 일치해야 합니다.
열간 압착(HP)	고온 및 고압 성형을 사용하여 밀도와 기계적 특성을 개선하는 MoSi ₂ 구성 요소 제조 공정입니다.
무압력 소결	저렴한 MoSi ₂ 구성 요소 제조 공정으로, 요구 사항이 낮은 응용 분야에 적합합니다.
자기 전파 고온 합성(SHS)	MoSi ₂ 는 Mo-Si 혼합분말에 열을 가해 발열반응을 유도하는 방법으로 비용이 저렴하지만 균일성이 좋지 않다.
등방성 프레스	MoSi ₂ 블랭크는 복잡한 모양의 부품을 생산하는 데 적합합니다.
표면 코팅	MoSi ₂ 표면 에 보호층(SiC , Al ₂ O ₃ 등) 을 도포하여 열충격 저항성과 내식성을 강화합니다.
플라즈마 분무	고온 플라즈마 분무를 통해 표면 코팅을 적용하여 산업용으로 적합한 고밀도 코팅을 형성하는 기술입니다.
화학 기상 증착(CVD)	고정밀 MoSi ₂ 구성 요소에 대한 높은 접착력을 가진 얇고 균일한 코팅을 생산하는 기술입니다.
저항률 시험	MoSi ₂ 성분 의 저항률을 측정하기 위해 일반적으로 4 탐침법을 사용하여 전열 성능을 평가합니다.
항산화 테스트	고온 산화 분위기에서 MoSi ₂ 성분 의 안정성을 평가하고 , SiO ₂ 필름 두께와 질량 손실을 측정합니다.
열충격 성능 시험	MoSi ₂ 구성 요소 의 균열 저항성을 시험하기 위해 급격한 온도 상승과 하강을 시뮬레이션하고 미세균열과 기계적 강도의 변화를 평가합니다.
비커스 경도 시험	MoSi ₂ 의 비커스 경도 시험기를 이용한 측정은 내마모성과 기계적 성질을 반영합니다.
산화 분위기	MoSi ₂ 성분 의 주요 적용 조건인 산소가 포함된 작동 환경(산소 분압 ≥ 0.2 atm)입니다.
환원 분위기	가 포함된 환경에서는 SiO ₂ 필름의 파손을 방지하기 위해 MoSi ₂ 의 작동 온도를 낮춰야 합니다 .
비례 제어 전원 공급 장치	양의 온도 계수 특성으로 안정적인 온도 제어를 실현하고 MoSi ₂ 부품 의 전력을 정확하게 조절하는 전원 공급 시스템입니다 .
저항이 적은 그리퍼	MoSi ₂ 냉접합을 전원에 연결하여 접촉 저항을 낮추고 전기적 안정성을 보장합니다.
고순도 알루미늄 브라켓	MoSi ₂ 구성요소를 지지하는 데 사용되며 , 열 팽창 계수를 맞춰 열 응력을 줄입니다.
열장 균일성	MoSi ₂ 구성 요소 의 배치 및 열전도도에 영향을 받으며 최적화된 설계가 필요합니다.
도핑 수정	MoSi ₂ 에 소량 의 원소(Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ 등) 를 첨가하여 결정립계 강도나 산화 저항성을 향상시키는 방법.

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

분말 야금	분말 압착 및 소결을 통해 MoSi_2 구성요소를 생산하며 , 복잡한 형상 생산에 적합합니다.
품질 손실률	MoSi_2 성분은 항산화 성능을 나타냅니다.
입자 크기	MoSi_2 미세구조 의 결정립 크기는 기계적 강도와 열충격 저항성에 영향을 미칩니다.

예시: 이 용어집은

MoSi_2 발열체 의 제조, 시험 및 적용 사례를 기반으로 하며 , 관련 문헌 및 기술 자료를 참조합니다. 용어 정의는 간결하고 정확하며 세라믹, 유리, 반도체, 신에너지 및 환경 보호 분야에 적용 가능합니다. 사용자는 특정 공정 요건에 따라 용어를 추가 보완하거나 조정할 수 있습니다.



CTIA GROUP LTD 실리콘 몰리브덴 로드

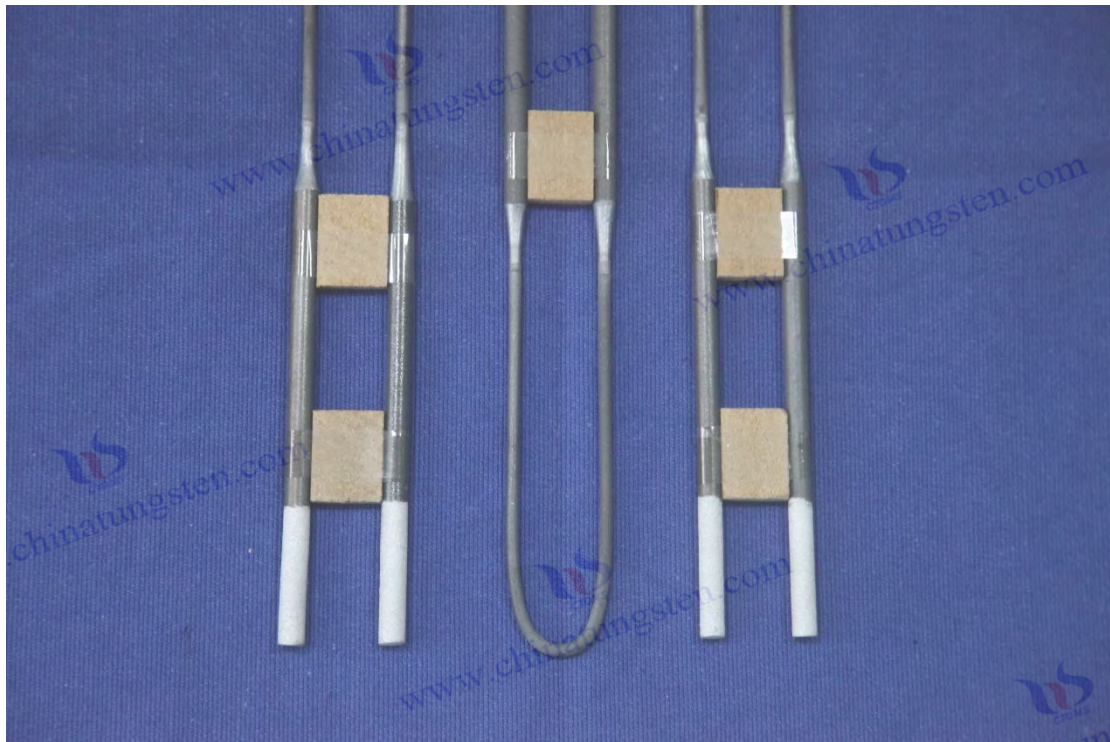
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

영문학

- [1] 고온 응용 분야를 위한 MoSi_2 기반 소재 의 발전 . 재료과학 및 공학: A, 2010.
- [2] MoSi_2 발열체 의 전기적 및 열적 특성 . Ceramics International, 2005.
- [3] 몰리브덴 디실리사이드 . American Elements.
- [4] 몰리브덴 디실리사이드 발열체. 스탠포드 어드밴스드 머티리얼즈.
- [5] 몰리브덴 디실리사이드 발열체 사용자 가이드.
- [6] MoSi_2 기반 소재 및 그 특성. 재료과학 저널, 1999.
- [7] MoSi_2 발열체. 칸탈 ®.
- [8] MoSi_2 기반 재료 의 산화 거동 . 미국 세라믹 학회지, 2001.
- [9] MoSi_2 발열체 용 표면 코팅 . 표면 및 코팅 기술, 2008.
- [10] MoSi_2 기반 발열체 의 열충격 및 피로 거동 . 재료연구저널, 2003.



CTIA GROUP LTD 실리콘 몰리브덴 로드

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