

MoSi₂発熱体とは何ですか

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

タングステン、モリブデン、希土類元素産業におけるインテリジェント製造の世界的リーダー

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 の紹介

CHINATUNGSTEN ONLINE が設立した、独立した法人格を持つ完全子会社である CTIA GROUP LTD は、インダストリアルインターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントで統合された柔軟な設計と製造の促進に尽力しています。CHINATUNGSTEN ONLINE は、1997 年に www.chinatungsten.com（中国初のトップクラスのタングステン製品ウェブサイト）を起点に設立され、タングステン、モリブデン、希土類元素産業に特化した中国の先駆的な e コマース企業です。CTIA GROUP は、タングステンおよびモリブデン分野での約 30 年にわたる豊富な経験を活かし、親会社の優れた設計・製造能力、優れたサービス、世界的なビジネス評判を継承し、タングステン化学薬品、タングステン金属、超硬合金、高密度合金、モリブデン、モリブデン合金の分野で包括的なアプリケーションソリューションプロバイダーになりました。

CHINATUNGSTEN ONLINE は、過去 30 年間で 200 以上の多言語対応タングステン・モリブデン専門ウェブサイトを開設し、20 以上の言語に対応しています。タングステン、モリブデン、希土類元素に関するニュース、価格、市場分析など、100 万ページを超える情報を掲載しています。2013 年以来、WeChat 公式アカウント「CHINATUNGSTEN ONLINE」は 4 万件以上の情報を発信し、10 万人近くのフォロワーを抱え、世界中の数十万人の業界関係者に毎日無料情報を提供しています。ウェブサイト群と公式アカウントへの累計アクセス数は数十億回に達し、タングステン、モリブデン、希土類元素業界における世界的に権威のある情報ハブとして認知され、24 時間 365 日、多言語ニュース、製品性能、市場価格、市場動向などのサービスを提供しています。

CTIA GROUP は CHINATUNGSTEN ONLINE の技術と経験を基盤とし、顧客の個別ニーズへの対応に注力しています。AI 技術を活用し、顧客と共同で、特定の化学組成と物理的特性（粒径、密度、硬度、強度、寸法、公差など）を持つタングステン・モリブデン製品を設計・製造し、型開き、試作、仕上げ、梱包、物流まで、全工程を統合したサービスを提供しています。過去 30 年間、CHINATUNGSTEN ONLINE は、世界中の 13 万社以上の顧客に、50 万種類以上のタングステン・モリブデン製品の研究開発、設計、製造サービスを提供し、カスタマイズ可能で柔軟性が高く、インテリジェントな製造の基盤を築いてきました。CTIA GROUP はこの基盤を基に、インダストリアルインターネット時代におけるタングステン・モリブデン材料のインテリジェント製造と統合イノベーションをさらに深化させています。

ハンス博士と CTIA GROUP のチームは、30 年以上にわたる業界経験に基づき、タングステン、モリブデン、希土類に関する知識、技術、タングステン価格、市場動向分析を執筆・公開し、タングステン業界と自由に共有しています。ハンス博士は、1990 年代からタングステンおよびモリブデン製品の電子商取引および国際貿易、超硬合金および高密度合金の設計・製造において 30 年以上の経験を持ち、国内外でタングステンおよびモリブデン製品の専門家として知られています。CTIA GROUP のチームは、業界に専門的で高品質な情報を提供するという原則を堅持し、生産の実践と市場の顧客ニーズに基づいた技術研究論文、記事、業界レポートを継続的に執筆しており、業界で広く評価されています。これらの成果は、CTIA GROUP の技術革新、製品のプロモーション、業界交流に強力なサポートを提供し、同社が世界的なタングステンおよびモリブデン製品の製造と情報サービスのリーダーとなることを推進しています。



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

目次

第 1 章 序論

- 1.1 モリブデンシリサイド (MoSi_2) 発熱体の概要
- 1.2 MoSi_2 発熱体の発展史
- 1.3 MoSi_2 発熱体の応用現状
- 1.4 MoSi_2 発熱体の応用産業

第 2 章 MoSi_2 発熱体の特性と影響要因

- 2.1 MoSi_2 発熱体の物理的性質
- 2.2 MoSi_2 発熱体の抵抗率
- 2.3 MoSi_2 発熱体の耐高温特性
- 2.4 MoSi_2 発熱体の高温酸化抵抗性
- 2.5 MoSi_2 発熱体の熱伝導率と熱拡散率
- 2.6 MoSi_2 発熱体の熱衝撃安定性
- 2.7 MoSi_2 発熱体の熱疲労性能
- 2.8 MoSi_2 発熱体の表面状態
 - 2.8.1 常用保護コーティングの種類
 - 2.8.2 表面亀裂とコーティング密着性の研究
 - 2.8.3 表面 SiO_2 酸化皮膜の形成と保護
- 2.9 MoSi_2 発熱体の表面問題と解決策
- 2.10 MoSi_2 発熱体の熱力学的特性に影響を及ぼす要因
 - 2.10.1 動作温度の影響
 - 2.10.2 雰囲気の影響
 - 2.10.3 加熱 / 冷却頻度の影響
 - 2.10.4 動作電圧の影響
 - 2.10.5 電流密度の影響
 - 2.10.6 設置方法の影響
 - 2.10.7 部品品質と純度の影響
 - 2.10.8 コーティング保護処理の影響
- 2.11 CTIA GROUP LTD MoSi_2 発熱体 MSDS

第 3 章 MoSi_2 発熱体の構造と設計

- 3.1 MoSi_2 発熱体の一般的構造
 - 3.1.1 U 字形状 MoSi_2 発熱体
 - 3.1.2 W 字形状 MoSi_2 発熱体
 - 3.1.3 螺旋状 MoSi_2 発熱体
 - 3.1.4 直棒状 MoSi_2 発熱体
 - 3.1.5 U 字形状、W 字形状、直棒状の構造設計比較
- 3.2 MoSi_2 発熱体の寸法設計（代表的なものは $\Phi 6/12$ と $\Phi 9/18$ ）
- 3.3 熱場と冷端構造の最適設計
- 3.4 電気接続と支持システムの設計

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.5 端子構造と接続方法
- 3.6 製品カスタマイズ設計のポイント

第 4 章 MoSi₂発熱体の製造プロセス

- 4.1 原材料の選定と配合原則
- 4.2 粉末冶金と等方圧プレスプロセス
- 4.3 高温焼結と後処理技術
- 4.4 表面保護層技術
- 4.5 溶接と端部処理技術

第 5 章 MoSi₂発熱体の性能試験

- 5.1 抵抗率と温度の関係試験
- 5.2 高温使用寿命と熱衝撃性能の関係試験
- 5.3 酸化環境下での安定性試験
- 5.4 発熱体の硬度試験
- 5.5 耐酸化性と温度の関係試験
- 5.6 棒表面粗さと抵抗率の関係
- 5.7 棒コーティング均一性が寿命に及ぼす影響
- 5.8 寿命と応力結合の関係
- 5.9 亀裂、曲げ、端部アブレーションのメカニズム
- 5.10 微細構造分析と故障モード研究

第 6 章 MoSi₂発熱体の設置

- 6.1 設置前の準備
- 6.2 詳細な設置手順
- 6.3 設置注意事項
- 6.4 安全操作規格
- 6.5 一般的な故障とメンテナンスガイド
 - 6.5.1 発熱体破断の原因と解決策
 - 6.5.2 酸化層剥離の原因と再生処理
 - 6.5.3 発熱体の日常メンテナンス方法
 - 6.5.4 発熱体の交換とリサイクル技術
- 6.6 工業炉における典型的な設置方法

第 7 章 MoSi₂発熱体の試験基準と認証

- 7.1 発熱体性能試験方法
- 7.2 ISO、ASTM などの基準分析
- 7.3 環境適応性試験
- 7.4 故障モードと寿命予測方法
- 7.5 安全と電気規格の要件

第 8 章 MoSi₂発熱体の応用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 8.1 冶金産業における MoSi_2 発熱体の応用
 - 8.1.1 金属溶解と熱処理
 - 8.1.2 高温焼結プロセス
 - 8.1.3 熱処理設備
- 8.2 セラミック産業における MoSi_2 発熱体の応用
 - 8.2.1 セラミック焼成と釉薬処理
 - 8.2.2 特殊セラミック材料の調製
- 8.3 光電産業における MoSi_2 発熱体の応用
 - 8.3.1 シリコンウェーハ製造の高温プロセス
 - 8.3.2 太陽電池生産設備
- 8.4 半導体産業における MoSi_2 発熱体の応用
 - 8.4.1 ウェーハアニールと拡散プロセス
 - 8.4.2 半導体エピタキシャル成長
 - 8.4.3 高温エッチング設備
 - 8.4.4 真空コーティング設備
- 8.5 ガラス製造業における MoSi_2 発熱体の応用
 - 8.5.1 ガラス溶解
 - 8.5.2 ガラス加工
- 8.6 新エネルギー材料調製における MoSi_2 発熱体の応用
 - 8.6.1 リチウム電池材料の焼結
 - 8.6.2 水素エネルギーと燃料電池
- 8.7 環境保護と触媒における MoSi_2 発熱体の応用
 - 8.7.1 排ガス処理
 - 8.7.2 触媒再生
 - 8.7.3 固形廃棄物の資源化利用
- 8.8 その他分野における MoSi_2 発熱体の応用
 - 8.8.1 航空宇宙材料試験
 - 8.8.2 原子力産業補助設備
 - 8.8.3 高温合成化学
 - 8.8.4 MoSi_2 ロッドトランスフォーマー

第 9 章 MoSi_2 発熱体と他の発熱材料の比較

- 9.1 タングステン発熱体との比較
- 9.2 シリコンカーバイド部品との比較
- 9.3 発熱体のコスト、効率、応用適合性の分析

第 10 章 MoSi_2 発熱体の関連基準と仕様

- 10.1 中国の MoSi_2 発熱体国際基準
- 10.2 MoSi_2 発熱体の国際基準
- 10.3 欧米日韓などの国の MoSi_2 発熱体基準

付録

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

用語集
参考文献



中ウォルフラム製造のモリブデンシリサイド発熱体

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

第 1 章 はじめに

1.1 モリブデンシリサイド（ MoSi_2 ）発熱体の概要

ニケイ化モリブデン（ MoSi_2 ）は、化学式 MoSi_2 の金属間化合物です。融点が高く（約 2030°C ）、耐高温酸化性に優れ、電気伝導性と熱伝導性も良好です。金属とセラミックの両方の特性を備えているため、高温加熱の分野で広く使用されています。抵抗加熱材料として、ニケイ化モリブデン発熱体は主に高温酸化雰囲気下の電熱機器に使用されます。高温になると表面に緻密な二酸化ケイ素（ SiO_2 ）保護膜が生成され、内部酸化が効果的に防止され、寿命が延びます。

MoSi_2 発熱体は $500\sim 1850^\circ\text{C}$ の温度範囲で安定して動作し、セラミック焼結、ガラス熔融、金属熱処理、高温焼結、実験室の高温炉などの産業および科学研究分野に適しています。二珪化モリブデンは、炭化ケイ素（ SiC ）などの他の発熱材料と比較して、動作温度が高く、耐高温酸化性に優れていますが、低温脆性と高温クリープ特性の制限により、一部の構造用途には制限があります。現在、 MoSi_2 発熱体は、U 字型、W 字型、L 字型、カスタマイズ形状など、様々な形状があり、さまざまな工業炉のニーズに幅広く対応できます。

1.2 MoSi_2 発熱体の発展史

ニケイ化モリブデンの高温材料としての研究は 20 世紀初頭に始まりましたが、発熱体としての応用は 20 世紀半ばに始まりました。1904 年、科学者は初めて MoSi_2 の結晶構造を報告し、高融点の正方晶 α 型結晶であり、金属間化合物の特性を持つことを確認しました。しかし、当時の製造方法と材料の純度の限界により、 MoSi_2 は主に実験室の研究対象であり、工業材料として使用されていませんでした。1930 年代、高温合金とセラミック材料の徹底的な研究により、 MoSi_2 は優れた高温耐酸化性と導電性により注目を集め始めました。研究者は、高温酸化雰囲気下で MoSi_2 の表面に形成される SiO_2 保護膜が耐久性を大幅に向上させることを発見し、その後の発熱体開発の理論的基礎を築きました。

1947 年、スウェーデンのカンタル社は、モリブデンニケイ化物発熱体の最初の工業化をリードし、 MoSi_2 発熱体が正式に商業応用段階に入ったことを示しました。これらの初期の発熱体の主な用途は、最高動作温度が約 1600°C の高温工業炉でした。カンタル社は、焼結プロセスと MoSi_2 のドーピング技術を最適化することで、部品の機械的強度と耐酸化性を大幅に向上させました。1950 年代から 1960 年代にかけて、真空焼結やプラズマ噴霧などの高度な製造技術の登場により、 MoSi_2 発熱体の生産効率と性能がさらに向上しました。発熱体の形状は、さまざまな炉の種類のニーズを満たすために、単一の直線棒から U 型や L 型へと進化しました。さらに、研究者らは、希土類元素や他の金属（W、Nb など）をドーピングすることで、 MoSi_2 の低温での脆さと高温でのクリープ特性を改善し、その応用範囲をさらに拡大しました。

1980 年代、中国はニケイ化モリブデン発熱体の工業生産を実現し始めました。初期には主に輸入技術に依存していましたが、徐々に独立した研究開発能力を形成しました。この間、 MoSi_2 発熱体の最高動作温度は 1800°C に上昇し、セラミック、ガラス、耐火物などの業界で広く使用されています。この時期に、スウェーデンの Kanthal 社は、最高動作温度 1850°C の Kanthal

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Super 1900 発熱体を発売し、業界のベンチマークとなりました。この製品の成功は、高純度の原材料の使用と、コールドエンドとホットエンドの溶接技術の改善によるもので、高温と低温のサイクルにおける発熱体の安定性が大幅に向上しました。

MoSi₂発熱体の研究開発の焦点は、性能最適化と用途拡大へと移行しました。ホットプレス焼結、反応焼結、自己伝播高温合成（SHS）などの新しい製造プロセスにより、材料の密度と機械的特性が大幅に向上しました。同時に、MoSi₂コーティング技術の開発により、ガスタービンブレードやジェットエンジン部品など、航空宇宙分野の高温保護コーティングとして使用できるようになりました。さらに、ナノスケールの MoSi₂粉末の開発により、高性能複合材料の製造が可能になり、低温脆性の問題も部分的に解決されました。世界市場では、MoSi₂発熱体の市場規模は 2016 年に約 1 億 300 万米ドルでしたが、2022 年には 1 億 3500 万米ドルに達し、年平均成長率 4.7% で成長すると予想されており、高温産業分野における継続的な需要を反映しています。

MoSi₂発熱体は高温領域で優れた性能を発揮しますが、開発には依然として課題が残っています。低温脆性と不十分な高温クリープ特性が構造材料としての応用を制限し、高い製造コストも低価格市場における競争力に影響を与えています。今後は、複合材料開発、ドーピングの改良、新たな製造プロセスの開発に重点を置き、性能のさらなる向上とコスト削減を目指した研究が進むと考えられます。

1.3 MoSi₂発熱体の応用現状

二ケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、優れた高温耐酸化性、最高 1850°C の動作温度、安定した電気特性により、世界中の高温産業で重要な役割を果たしています。この素子は、工業生産、科学研究、特殊材料処理の高温電気炉で広く使用されています。その主な利点は、酸化雰囲気中で長時間安定して動作できることと、表面に生成される緻密な二酸化ケイ素（SiO₂）保護膜が内部酸化を効果的に防止し、それによって耐用年数を大幅に延ばすことです。近年、材料科学と製造プロセスの進歩により、MoSi₂発熱体の性能向上が促進されています。たとえば、ドーピングの修正と高度な焼結技術により、素子の低温脆性および高温クリープ特性が改善され、より厳しい作業環境に適応できるようになりました。

MoSi₂発熱体の需要が伸び続けており、特にセラミック、ガラス、半導体産業でその傾向が顕著です。スウェーデンの Kanthal 社は、優れた高温性能と信頼性で知られる Kanthal Super シリーズ（Kanthal Super 1900 など）で市場を席巻しています。中国、日本、米国の企業も MoSi₂発熱体の開発・生産に積極的に取り組んでおり、中でも中国はコスト管理と大規模生産において大きな優位性を持っています。製造工程では、ホットプレス焼結、反応焼結、自己伝播高温合成（SHS）などの技術により、材料の密度と機械的性質が向上し、発熱体の形状も一本の直棒から U 字型、W 字型、L 字型、そして様々な炉設計のニーズに応えるためにカスタマイズされた形状へと進化しています。さらに、ナノスケールの MoSi₂粉末の開発により、航空宇宙産業やエネルギー産業における高温保護コーティングなど、高性能複合材料やコーティングの新たな応用分野が開拓されました。MoSi₂発熱体は高温分野で優れた性能を発揮します

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が、まだいくつかの課題に直面しています。低温脆性により、特定の構造用途ではその可能性が制限される一方で、生産コストが高いため、低価格市場では炭化ケイ素（SiC）などの代替材料との競争に直面しています。現在の研究は、希土類元素または金属（W、Nb など）のドーピングによる機械的特性の改善、および耐熱衝撃性と耐久性を向上させるための新しい複合材料の開発に重点を置いています。インテリジェントな高温炉の台頭により、MoSi₂ 発熱体の正確な温度制御と長寿命に対する要件がさらに改善され、関連する制御技術と材料の最適化の開発が促進されました。今後、効率的で省エネかつ環境に優しい生産方法に対する世界的な需要が高まるにつれて、MoSi₂ 発熱体はより多くの新興分野で利用されることが期待されます。

1.4 MoSi₂発熱体の応用産業

ケイ化モリブデン発熱体は、高温安定性、耐酸化性、優れた電気特性を備えているため、多くの業界で広く使用されています。主な応用分野は次のとおりです。セラミック業界では、MoSi₂ 発熱体は、構造用セラミックス、機能性セラミックス、耐火物の製造における焼結および高温処理プロセスの重要な部品です。最高動作温度は 1850°C で、アルミナ、ジルコニア、窒化ケイ素などの高性能セラミックスの焼結要件を満たし、製品の品質とプロセスの安定性を確保します。ガラス業界では、MoSi₂ 発熱体は、光学ガラス、板ガラス、特殊ガラスの製造用の高温炉やアニール炉で広く使用されています。耐酸化性と長寿命特性により、高温酸化雰囲気下での連続動作が可能になり、生産効率が大幅に向上します。金属熱処理分野において、MoSi₂ 発熱体は高温焼鈍、焼入れ、ろう付け工程に使用され、特にステンレス鋼、チタン合金、耐熱合金の処理に用いられます。急速加熱と精密な温度制御能力により、製品品質とプロセス効率が向上します。半導体業界では、高温拡散炉や酸化炉において、シリコンウェーハの熱処理や薄膜堆積プロセスに MoSi₂ 発熱体がよく使用されています。その高い純度と安定性は、クリーンな環境と精密な温度制御に対する半導体業界の厳しい要件を満たしています。

航空宇宙分野では、MoSi₂ は発熱体としてだけでなく、ガスタービンプレードやジェットエンジン部品の保護コーティングとしても使用されています。その高温耐酸化性と耐腐食性により、過酷な環境下でも優れた性能を発揮します。科学研究の分野では、MoSi₂ 発熱体は、熱重量分析装置、示差走査熱量計、高温合成装置など、材料科学、物理学、化学研究室の高温実験炉で広く使用されており、新材料の開発をサポートしています。耐火物および冶金業界では、MoSi₂ 加熱素子は、高純度金属や合金の製造などの耐火物焼結および冶金プロセスにおける高温処理に使用され、その高い効率と長寿命により生産コストが削減されます。

エネルギーおよび環境保護の分野では、MoSi₂ 加熱素子は高温焼却炉、固体酸化物燃料電池 (SOFC) 試験装置、廃棄物熱処理システムに使用され、クリーンな生産と効率的なエネルギー利用の実現に貢献しています。MoSi₂ 発熱体は、その材料特性と製造技術の進歩の恩恵を受けています。業界によって性能要件は異なります。例えば、セラミックスやガラス業界では高温安定性と寿命が重視される一方、半導体業界では高純度と温度制御精度が重視されます。今後、様々な業界で高温装置の性能に対する要求が高まるにつれ、MoSi₂ 発熱体は材料の最適化とプロセス革新を通じて、より多くの分野でブレークスルーを達成することが期待されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

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

2. Features of MoSi₂ Heating Element

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

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

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

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

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

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

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

- High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries
- Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals
- High-temperature laboratory furnaces
- Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第 2 章 MoSi₂ 发热体的特性と影響要因

2.1 MoSi₂ 发热体の物理特性

ニケイ化モリブデン (MoSi₂) は、金属とセラミックスの特性を兼ね備えた金属間化合物です。その物理的特性により、高温発熱体としての優れた性能を発揮します。MoSi₂ の結晶構造は、高い対称性と安定性を備えた空間群 $I4/mmm$ の正方 α 型 (C11b 型) です。融点は約 2030°C で、非常に高い温度でも構造的完全性を維持できます。密度は 6.24 g/cm³ と比較的低いため、発熱体の軽量化に役立ち、複雑な形状の設計にも適しています。MoSi₂ の熱膨張係数は約 $8.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ (室温 ~ 1000°C) で、一般的なセラミックマトリックス材料 (アルミナやジルコニアなど) とよく適合し、熱応力による割れのリスクを軽減します。

MoSi₂ は室温で約 45 W/(m·K) で、温度の上昇とともに徐々に減少しますが、高温でも効果的に熱を伝導し、発熱体の均一な加熱を確保します。硬度が高く、ビッカース硬度は約 1200 HV で、耐摩耗性も良好ですが、低温では脆い (破壊靱性は約 2-3 MPa·m^{1/2}) ため、機械的衝撃による損傷を受けやすくなります。MoSi₂ の耐酸化性は、高温酸化雰囲気下で特に優れています。800°C を超えると表面に緻密な SiO₂ 保護膜が生成され、酸素のさらなる拡散を効果的に防ぎ、内部構造を酸化浸食から保護します。この特徴により、最高動作温度が 1850°C に達し、酸化雰囲気下で長時間動作することができます。

MoSi₂ は多くの要因の影響を受けますが、原料の純度が鍵となります。高純度 MoSi₂ は、不純物による粒界の弱化を低減し、機械的性質と耐酸化性を向上させることができます。ホットプレス焼結や反応焼結などの準備プロセスは、材料の密度に影響を与えます。密度が高いほど、耐酸化性と熱伝導性が向上します。ドーピング改質 (Al、W、希土類元素の添加など) は、低温脆性および高温クリープ特性を改善できますが、耐酸化性がわずかに低下する可能性があります。さらに、作業環境 (雰囲気の種類や温度サイクル頻度など) も物理的性質の安定性に大きな影響を与えます。たとえば、還元雰囲気では、SiO₂ 保護膜が破損し、材料の劣化が加速される可能性があります。

2.2 MoSi₂ 发热体の抵抗率

MoSi₂ 発熱体の抵抗率は、MoSi₂ を電熱材料として用いる際の中核的な性能パラメータであり、発熱効率や温度制御精度に直接影響します。MoSi₂ の抵抗率は温度変化に対して非線形特性を示します。室温での抵抗率は約 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ です。温度が上昇するにつれて抵抗率は徐々に増加し、1000°C 付近では約 $4.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ に達します。この正の温度係数特性により、MoSi₂ 発熱体は高温時に自動的に電力を調整し、過熱を防止し、安全性を向上させることができます。1000°C を超えると抵抗率はゆっくりと増加して安定するため、高温域での温度制御精度が向上します。

MoSi₂ は、材料の組成、微細構造、外部環境の影響を受けます。原料の純度と不純物含有量は、抵抗率に大きな影響を与えます。例えば、鉄やアルミニウムなどの不純物は抵抗率を高め、安定性を低下させますが、高純度の MoSi₂ はより安定した電気特性を示します。粒径と粒界特性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

も重要です。粒径が小さいほど、通常、粒界抵抗が高くなり、抵抗率はわずかに高くなりますが、機械的強度は向上します。製造プロセスが抵抗率に与える影響も大きく、ホットプレス焼結法で製造された MoSi_2 は密度が高く、粒界欠陥が少なく、抵抗率が低く安定していますが、反応焼結法で製造されたサンプルは、多孔度が高いため、抵抗率が高くなる可能性があります。

MoSi_2 の抵抗率を調整する上で重要な手段です。タングステン (W) やニオブ (Nb) を添加すると、抵抗率を下げて高温導電性を高めることができますが、耐酸化性が多少犠牲になる場合があります。希土類元素 (Y_2O_3 など) のドーピングは、粒界構造を改善することで、温度による抵抗率の変化を安定化させます。作業環境が抵抗率に及ぼす影響は無視できません。酸化雰囲気下では、 SiO_2 保護膜の形成は抵抗率にほとんど影響を与えませんが、還元雰囲気や真空雰囲気下では、表面で Si の揮発が起こり、抵抗率が徐々に増加して長期安定性に影響を与える可能性があります。

MoSi_2 発熱体は、特定の用途に合わせて最適化する必要があります。例えば、セラミック焼結炉では均一な加熱を確保するために安定した抵抗率が求められますが、半導体熱処理炉では急速な温度上昇のためにより低い抵抗率が求められます。実際の用途では、コールドエンド（通常はより導電性の高い材料でドープ）とホットエンドの抵抗率を一致させる設計により、全体的な効率を向上させ、エネルギー損失を削減できます。

2.3 MoSi_2 発熱体の耐高温特性

二ケイ化モリブデン (MoSi_2) 発熱体は、電熱材料の中核特性の一つであり、発熱効率、温度制御精度、耐用年数に直接影響します。高温域では、 MoSi_2 の抵抗率は比較的安定しています。室温から 1000°C までの急激な上昇に比べ、高温部での抵抗率の増加は著しく緩やかになります。例えば、室温では MoSi_2 の抵抗率は約 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ですが、 1000°C では約 $4.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ に増加しますが、 1500°C では約 $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ となり、その後温度が上昇しても変化が少なくなります。この正温度係数 (PTC) 特性により、 MoSi_2 は高温時に自動的に出力を調整し、過熱を回避し、安全性を向上させます。同時に、セラミック焼結や半導体熱処理など、精密な温度制御が求められる用途においても安定した性能を発揮します。高温耐性の安定性は、 MoSi_2 の金属間化合物構造に由来し、その導電機構は主に金属結合に基づいています。高温下でも、格子振動の増強により電子散乱が増加し、高い導電性を維持します。しかし、長期間の高温動作は抵抗率のわずかなドリフトを引き起こす可能性があります。これは主に、表面 SiO_2 保護膜の成長や微量 Si の揮発による組成変化、および熱応力による微細構造変化（粒成長や粒界弱化など）によって引き起こされます。

高温耐性特性に影響を与える要因には、材料の純度、ドーピングの変更、および作業環境が含まれます。高純度 MoSi_2 は、不純物 (Fe や Al など) によって引き起こされる抵抗の不安定性を低減し、電気的性能の一貫性を確保できます。金属元素 (W や Nb など) をドーピングすると、抵抗率が低下し、高温導電性が向上しますが、耐酸化性がわずかに低下する可能性があります。一方、希土類元素 (Y_2O_3 など) をドーピングすると、粒界構造を最適化することで温度による抵抗率の変化が安定化します。酸化雰囲気下では、 SiO_2 保護膜は抵抗率にほとんど影響を与えませんが、還元雰囲気または真空雰囲気下では、Si の揮発により抵抗率が徐々に増加

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、部品の劣化が加速されます。製造プロセスも抵抗特性に重要な影響を与えます。ホットプレス焼結法で製造された MoSi_2 は、密度が高く、粒界欠陥が少なく、抵抗特性がより安定していますが、多孔度の高い反応焼結サンプルでは、局所的な電流の不均一性により性能が低下する可能性があります。実用的には、抵抗を低減するためにコールドエンドに高導電性材料をドープするのが一般的で、コールドエンドとホットエンド間の抵抗マッチングを最適化することでエネルギー効率を向上させることができます。定期的なメンテナンスと極端な温度サイクルの回避は、高温抵抗器の特性の長期安定性を維持するのに役立ちます。

2.4 MoSi_2 発熱体の高温酸化抵抗性

化モリブデン発熱体の耐高温酸化性は、酸化雰囲気下での長期安定動作の重要な特徴であり、高温電気炉に適した材料となっています。800°Cを超えると、 MoSi_2 表面に緻密な二酸化ケイ素 (SiO_2) 保護膜が急速に形成されます。この膜は酸素の拡散係数が低く、自己修復性に優れているため、酸素が内部に浸透するのを効果的に防ぎ、基板を酸化腐食から保護します。その酸化反応は、 $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$ であり、 MoO_3 は高温で揮発し、残りの SiO_2 が連続的な保護層を形成します。1200~1850°Cの範囲では、この保護膜により MoSi_2 は酸化雰囲気下で長時間安定して動作し、セラミック焼結やガラス溶融などの高温プロセスに適しています。しかし、400~700°Cの低温域では、 MoSi_2 は「ペスト化」を起こしやすく、酸化されて MoO_3 と SiO_2 の非保護性混合物を形成し、特に頻繁な温度サイクルにおいて材料の粉砕を引き起こします。この問題を回避するため、実用化では通常、この温度域を速やかに通過させます。 MoSi_2 は、還元雰囲気 (H_2 など) や真空環境では耐酸化性が低く、 SiO_2 保護膜が形成できないか破壊されて Si が揮発し、材料が劣化するため、このような環境には適していません。高温耐酸化性に影響を与える要因には、材料の純度、微細構造、ドーピングの修正などがあります。高純度の MoSi_2 は、不純物による粒界酸化を減らし、 SiO_2 膜の密度を高めることができます。高密度の微細構造 (ホットプレスや焼結などで得られるもの) は、酸素の拡散経路を減らし、耐酸化性を向上させることができます。希土類元素 (Y_2O_3 など) や酸化物をドーピングすると、 SiO_2 膜の密着性や自己修復能力が向上しますが、一部の金属ドーピング (W など) は酸化速度を変えることで耐酸化性を低下させる可能性があります。作業環境の湿度も耐酸化性に影響を与える可能性があります。湿度の高い環境では、 SiO_2 膜が水和反応を起こし、保護効果が低下する可能性があります。高温酸化耐性を向上させるため、現代の MoSi_2 発熱体は、表面コーティング技術 (Al_2O_3 や ZrO_2 コーティングなど) を用いて保護効果を高めたり、焼結プロセスを最適化して材料密度を向上させたりすることがよくあります。実際の用途では、安定した酸化雰囲気を維持し、頻繁な低温サイクルを回避することが、抗酸化寿命を延ばす鍵となります。

2.5 MoSi_2 発熱体の熱伝導率と熱拡散率

MoSi_2 の発熱体熱伝導率と熱拡散率は、その熱伝導率の重要な指標であり、加熱速度、温度均一性、エネルギー効率に直接影響します。 MoSi_2 の熱伝導率は室温で約 45 W/(m·K) ですが、温度上昇とともに徐々に低下し、1000°Cでは約 25 W/(m·K)、さらに 1500°Cでは約 15 W/(m·K) まで低下します。高温では熱伝導率が低下しますが、 MoSi_2 は依然として効果的に熱を伝達し、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炉内の温度分布を均一に保つことができます。これは、高い熱均一性が求められるセラミック焼結やガラス熔融などの用途に適しています。

熱伝導率の変化は、主に MoSi_2 の格子振動と電子熱伝導機構によるものです。低温では電子熱伝導が支配的ですが、高温ではフォノン散乱の増加により熱伝導率が低下します。 MoSi_2 の熱拡散率（ $\alpha = k / (\rho \cdot c)$ ）、 k は熱伝導率、 ρ は密度、 c は比熱容量）も温度によって変化します。

MoSi_2 の比熱容量は約 $0.45 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ 、密度は 6.24 g/cm^3 、熱拡散係数は約 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ です。高温では、比熱容量がわずかに増加し、熱伝導率の低下により熱拡散係数が低下します。熱伝導率と熱拡散係数に影響を与える要因には、材料の純度、微細構造、ドーピングの変更などがあります。不純物（Fe や C など）はフォノン散乱を増加させて熱伝導率を低下させますが、高純度の MoSi_2 は熱伝導率が高くなります。高密度の MoSi_2 （ホットプレス焼結サンプルなど）は熱伝導率が高くなりますが、多孔度の高いサンプルは気孔からの熱散乱により熱伝導率が低くなります。

ドーピングによる改質効果は複雑です。W を添加すると熱伝導率がわずかに向上しますが、希土類酸化物ドーピングは粒界散乱により熱伝導率が低下する可能性があります。実際の用途では、熱伝導率と熱拡散率は炉の種類やプロセスに応じて最適化する必要があります。例えば、半導体熱処理炉では急速加熱を実現するために高い熱伝導率が求められますが、大型セラミック焼結炉では熱均一性に重点が置かれます。製造プロセスの最適化（密度の向上など）や部品の形状の合理的設計（ホットエンド表面積の増加など）により、熱伝導率が向上し、エネルギー損失が低減します。

ニケイ化モリブデン（ MoSi_2 ）発熱体は、急激な温度変化下での熱応力によって引き起こされる亀裂や破損に耐える能力を指し、高温サイクル環境における信頼性を評価するための重要な指標です。 MoSi_2 の熱衝撃安定性は、その低い熱膨張係数と適度な熱伝導率に密接に関係しています。これらの特性により、 MoSi_2 は急速加熱および冷却中に熱応力をより適切に分散し、温度勾配によって引き起こされる内部応力の集中を軽減できます。ただし、 MoSi_2 は低温脆性であるため、特に高温と低温のサイクルが頻繁に発生する厳しい熱衝撃条件下では、依然として微小亀裂や破損が発生する可能性があります。熱衝撃安定性の性能は、急速加熱または冷却が必要なセラミック焼結炉やガラス熔融炉などの用途における MoSi_2 発熱体の寿命と信頼性に直接影響します。熱衝撃安定性に影響を与える主な要因には、材料の純度、微細構造、および製造プロセスが含まれます。高純度 MoSi_2 は、不純物（Fe や Al など）による粒界の弱さを低減し、熱衝撃による亀裂伝播のリスクを低減します。微細構造の観点から見ると、

高密度 MoSi_2 （ホットプレス・焼結法など）は気孔や欠陥が少なく、熱応力を効果的に分散できます。一方、気孔率の高いサンプルは熱衝撃下で局所的な応力集中が生じやすく、亀裂発生につながります。ドーピングの改良も熱衝撃安定性に大きな影響を与えます。例えば、希土類酸化物（ Y_2O_3 など）や酸化アルミニウム（ Al_2O_3 ）を添加すると、粒界強度が高まり耐熱衝撃性が向上します。一方、一部の金属ドーピング（W など）は熱膨張特性の変化により、熱衝撃安定性がわずかに低下する可能性があります。動作環境における温度変化率とサイクル頻度は、重要な外的要因です。急速な熱衝撃サイクル（ 1500°C から室温への急激な低下など）は、

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

熱応力の蓄積を悪化させ、部品寿命を縮めます。実用化においては、炉内の温度制御戦略の最適化（例えば、温度上昇と下降を緩やかにする）と、部品形状の適切な設計（例えば、応力集中を軽減するために鋭利なエッジを避ける）により、熱衝撃安定性を大幅に向上させることができます。さらに、表面コーティング技術（SiC や Al_2O_3 コーティングなど）により、 MoSi_2 の耐熱衝撃性をさらに向上させ、耐用年数を延ばすことができます。

2.6 MoSi_2 発熱体の熱衝撃安定性

MoSi_2 発熱体の熱衝撃安定性とは、極端な温度勾配や瞬間的な熱衝撃（冷氣や液体冷却への直接曝露など）下におけるひび割れや性能低下への耐性を指します。これは熱衝撃安定性と密接に関連していますが、特に瞬間的かつ急激な温度変化に重点が置かれています。 MoSi_2 の熱衝撃安定性は、低い熱膨張係数と適度な熱伝導率に起因しており、これらが相まって瞬間的な温度変化における熱応力をより効果的に分散させます。しかし、 MoSi_2 の破壊靱性が低いため、特に 400~700°C の「ベスト」温度域では、厳しい熱衝撃条件下では微小亀裂の伝播やマクロ的な破壊が発生する可能性があり、熱衝撃によって酸化や粉化が促進され、材料の破損につながる可能性があります。熱衝撃安定性は、急速な起動・停止を伴う高温炉や、ガラス成形や金属熱処理プロセスなどの不均一な加熱環境での MoSi_2 発熱体の適用において非常に重要です。熱衝撃安定性に影響を与える要因には、材料の組成、微細構造、外部環境などがあります。

MoSi_2 は、粒界不純物による応力集中を低減し、耐熱衝撃性を向上させることができます。高密度微細構造（ホットプレスや反応焼結法など）は、熱衝撃による亀裂伝播を効果的に抑制できますが、多孔度の高い試料は欠陥が多くなり、耐熱衝撃性が低下します。ドーピングは、熱衝撃安定性に二重の効果をもたらします。例えば、希土類元素（ La_2O_3 など）の添加は粒界結合を強化し、耐亀裂性を向上させることができますが、一部の金属ドーピングは熱膨張の不一致により安定性を低下させる可能性があります。熱衝撃の強度（冷氣噴射や液体冷却など）と動作環境におけるサイクル数は、性能に大きな影響を与える可能性があります。激しい熱衝撃は、表面 SiO_2 保護膜に亀裂を引き起こし、耐酸化性が低下する可能性があります。実際の用途では、部品設計の最適化（熱応力分散を高めるために U 字型または W 字型構造を採用するなど）と熱衝撃条件の制御（冷媒体への直接曝露を避けるなど）によって、熱衝撃安定性を向上させることができます。さらに、表面改質技術（高靱性セラミックコーティングなど）により、 MoSi_2 の耐熱衝撃性を高め、亀裂の伝播を抑えることができます。

2.7 MoSi_2 発熱体の熱疲労性能

MoSi_2 発熱体の熱疲労性能とは、高温・低温サイクルの繰り返しにおける性能劣化（抵抗率の上昇、機械的強度の低下、表面保護膜の劣化など）に対する耐性を指し、長期信頼性を評価するための重要な指標です。 MoSi_2 の熱疲労性能は、低い熱膨張係数、適度な熱伝導率、そして高温耐酸化性によって左右されます。酸化雰囲気下では、 MoSi_2 表面に形成される SiO_2 保護膜が複数回の熱サイクルを経ても安定を保ち、材料の劣化を遅らせます。しかし、熱疲労プロセスにおいては、繰り返しの熱応力と機械的応力によって微小亀裂の発生と拡大が生じる可

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

能性があり、特に低温脆性が顕著な MoSi_2 においては、熱疲労によって部品の破損や電気性能のドリフトが生じる可能性があります。さらに、 $400\sim 700^\circ\text{C}$ の「ベスト」温度域では、熱疲労サイクルによって酸化粉砕が促進され、材料の破損が促進される可能性があります。熱疲労性能は、セラミック焼結や金属熱処理など、頻繁な熱サイクルを必要とする用途における MoSi_2 発熱体の寿命に直接影響します。熱疲労性能に影響を与える要因には、材料の純度、微細構造、ドーピングの調整、作業環境などがあります。

高純度 MoSi_2 は、不純物による粒界の脆弱化を軽減し、熱疲労亀裂のリスクを低減します。高密度の微細構造（ホットプレス焼結サンプルなど）は、周期的な熱応力を効果的に分散させ、熱疲労寿命を向上させますが、多孔度の高いサンプルは応力集中により破損しやすくなります。ドーピングの改変は、熱疲労性能に重要な影響を与えます。例えば、希土類酸化物（ Y_2O_3 など）やアルミナを添加すると、粒界強度が向上し、亀裂の伝播を抑制できますが、一部の金属ドーピングは熱膨張の不一致により熱疲労性能を低下させる可能性があります。作業環境における熱サイクルの振幅、周波数、および雰囲気の種類は、熱疲労性能に大きな影響を与えます。例えば、還元環境または真空環境では、 SiO_2 保護膜の破損により Si の揮発が起これ、熱疲労劣化が加速されます。実用においては、熱サイクルパラメータの最適化（加熱・冷却速度の低減など）、部品設計の改善（ホットエンドの強度向上など）、表面コーティング技術の適用（ SiC コーティングや ZrO_2 コーティングなど）により、熱疲労性能を大幅に向上させることができます。また、定期的な点検とメンテナンスを行うことで、 MoSi_2 発熱体の熱疲労寿命を効果的に延ばすことができます。

2.8 MoSi_2 発熱体の表面状態

二ケイ化モリブデン（ MoSi_2 ）発熱体は、高温性能、耐用年数および信頼性に重要な影響を及ぼします。 MoSi_2 の表面特性は、主に自然に形成される SiO_2 酸化膜、表面微細構造、および塗布された保護コーティングの性能に反映されます。高温酸化雰囲気下では、 800°C を超えると MoSi_2 の表面に緻密な SiO_2 保護膜が生成されます。この膜は優れた耐酸化性の鍵であり、酸素の内部拡散を効果的に防止し、基板を酸化腐食から保護します。ただし、表面状態は酸化膜の影響を受けるだけでなく、表面欠陥（マイクロクラック、気孔など）、コーティング品質、長期使用時の表面変化にも密接に関係しています。 MoSi_2 の表面状態は、特にセラミック焼結、ガラス溶融、半導体熱処理などの需要の高い用途において、高温サイクル、熱衝撃、熱疲労条件下での安定性を直接決定します。

表面状態の品質は、材料の純度、準備プロセス、作業環境など、多くの要因によって影響を受けます。高純度 MoSi_2 は、表面不純物（ Fe 、 Al など）による粒界の弱化を軽減し、より均一で緻密な表面を生成します。 SiO_2 膜。ホットプレス焼結や反応焼結などの製造方法は、表面粗さと多孔度に大きな影響を与えます。ホットプレス焼結で製造された MoSi_2 の表面はより滑らかで欠陥が少なく、安定した酸化膜の形成に役立ちますが、反応焼結サンプルは表面の細孔が多いため保護効果が低下する可能性があります。作業環境の雰囲気の種類、湿度、温度サイクルの頻度も表面状態に影響を与えます。たとえば、湿度の高い環境では SiO_2 膜が水和して保護能力が低下する可能性があり、頻繁な温度サイクルは表面にひび割れやコーティングの剥

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

離を引き起こす可能性があります。表面状態を最適化するために、現代の MoSi₂ 発熱体は、表面改質（コーティング技術など）やプロセス最適化（表面研磨など）によって耐酸化性と耐久性を向上させることがよくあります。

MoSi₂発熱体の性能は、表面状態の長期安定性に大きく左右されます。高温での長期運転では、特に還元環境や真空環境では、Si や MoO₃の揮発により表面 SiO₂膜が薄くなることがあり、表面保護能力が著しく低下します。また、熱応力や機械的応力、特に熱衝撃や熱疲労条件下では、表面微小亀裂の発生と伝播が悪化する可能性があります。実際の用途では、表面状態の定期的な検査、加熱・冷却速度の最適化、保護コーティングの使用は、MoSi₂発熱体の表面性能を維持するための効果的な手段です。今後、表面工学技術の発展に伴い、MoSi₂の表面状態の最適化は、総合的な性能を向上させるための重要な方向性となるでしょう。

2.8.1 一般的に使用される保護コーティングの種類

ケイ化モリブデン発熱体の耐酸化性、熱衝撃安定性、熱疲労性能をさらに向上させるために、MoSi₂ 素子では表面コーティング技術が広く使用されています。一般的な保護コーティングの種類には、酸化物コーティング、炭化物コーティング、複合コーティングなどがあり、それぞれ特定の性能要件と適用環境を対象としています。酸化物コーティングが最も一般的な選択肢であり、その中でも酸化アルミニウム (Al₂O₃) と酸化ジルコニウム (ZrO₂) コーティングは、高い融点、化学的安定性、および低い酸素拡散係数のために好まれています。Al₂O₃ コーティングは、プラズマ噴霧または化学蒸着 (CVD) によって適用され、高温で緻密な保護層を形成し、特に 1500~1800°C の酸化雰囲気に対して、MoSi₂の耐酸化性と耐熱衝撃性を大幅に向上させます。

ZrO₂コーティングは、優れた遮熱特性を有するため、高温航空宇宙部品など、高い熱衝撃安定性が求められる用途に多く使用されています。炭化物コーティングは主に炭化ケイ素 (SiC) で、その熱膨張係数は MoSi₂基材の熱膨張係数とよく一致するため、コーティングと基材間の熱応力を低減し、剥離のリスクを軽減できます。SiC コーティングは、プラズマ溶射法や反応焼結法によって塗布されます。これらのコーティングは、耐酸化性を高めるだけでなく、表面の耐摩耗性も向上させるため、セラミック焼結炉などの摩耗しやすい環境での使用に適しています。近年、Al₂O₃ - SiC や ZrO₂ - Y₂O₃複合コーティングなどの複合コーティングの開発が進められており、複数の材料の利点を組み合わせることで、より包括的な保護を提供します。例えば、Al₂O₃ - SiC 複合コーティングは、Al₂O₃の高い耐酸化性と SiC の耐熱衝撃性を兼ね備えており、複雑な動作条件下での MoSi₂部品に適しています。

コーティングの種類は、具体的な適用環境に応じて最適化する必要があります。例えば、半導体熱処理炉では汚染防止のため高純度コーティングが求められますが、ガラス溶解炉ではコーティングの耐熱衝撃性と耐腐食性がより重視されます。コーティングの準備プロセスも性能に大きな影響を与えます。プラズマ溶射は厚く緻密なコーティングを形成できるため、工業規模の用途に適しています。一方、CVD プロセスは、より均一で薄く、密着性の高いコーテ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ィングを形成できるため、高精度の要求に適しています。さらに、コーティングの厚さと均一性は精密に制御する必要があります。

コーティングが厚すぎると熱応力の不一致によりひび割れが発生する可能性があり、コーティングが薄すぎると十分な保護が得られない可能性があります。今後は、ナノ構造コーティングや多層複合コーティングの開発により、MoSi₂発熱体の表面性能がさらに向上することが期待されます。

2.8.2 表面ひび割れとコーティングの密着性に関する研究

MoSi₂発熱体の表面ひび割れとコーティングの密着性は、その表面状態と長期信頼性に影響を与える重要な要因です。表面ひび割れは通常、熱応力、機械的応力、または製造欠陥によって発生し、特に熱衝撃や熱疲労条件下で顕著になります。MoSi₂は低温脆性（破壊靱性は約 2～3MPa·m^{1/2}）であるため、急激な温度変化や機械的振動によって微小ひび割れが発生しやすくなります。これらのひび割れは粒界に沿って進展し、最終的には部品の破損や SiO₂保護膜の破損につながる可能性があります。400～700℃の「ベスト」温度域では、表面ひび割れによって酸化や粉化が促進され、表面状態がさらに悪化する可能性があります。コーティングの密着性は、保護コーティングが MoSi₂基板に長期間密着し、剥離やひび割れを防止できるかどうかを左右します。密着性が不十分なコーティングは、高温サイクル中に剥離しやすく、基板を酸化や腐食環境にさらし、部品の寿命を縮めます。表面亀裂の形成は多くの要因の影響を受けます。材料の純度は重要な要素です。高純度の MoSi₂は粒界不純物を減らし、亀裂発生の可能性を低減できます。微細構造は亀裂伝播に大きな影響を与えます。高密度の MoSi₂（ホットプレス焼結など）は気孔や欠陥が少なく、亀裂伝播を効果的に抑制できますが、気孔率の高いサンプルは応力集中により亀裂が発生しやすくなります。ドーピングの修正により、表面亀裂耐性を向上させることができます。たとえば、希土類酸化物（Y₂O₃など）を添加すると、粒界結合力が強化され、亀裂伝播が低減しますが、特定の金属ドーピング（W など）は、熱膨張の不一致により亀裂が発生するリスクを高める可能性があります。準備プロセスと表面処理も重要です。表面研磨は初期欠陥を低減できますが、粗い表面は亀裂の発生点となる可能性があります。

コーティングの密着性に関する研究は、主に界面特性、熱膨張係数のマッチング、コーティングプロセスに焦点を当てています。MoSi₂とコーティング（Al₂O₃や SiC など）の熱膨張係数の差は、界面に熱応力を引き起こし、密着性に影響を与えます。例えば、SiC コーティングは Al₂O₃コーティングよりも熱膨張係数が MoSi₂に近いので、通常は Al₂O₃コーティングよりも優れています。界面処理技術（遷移層設計など）は、密着性を大幅に向上させることができます。例えば、MoSi₂基材と Al₂O₃コーティングの間に SiC 遷移層を追加すると、熱応力の不一致を軽減できます。コーティングプロセスも密着性に重要な影響を与えます。プラズマ溶射法で形成されたコーティングは密着性が強いですが、微細孔が存在する場合があります。一方、CVD 法で生成されたコーティングはより均一で密着性も高くなります。熱サイクルや環境要因（湿度や雰囲気など）は、密着性をさらに試します。高湿度環境では、コーティング界面で化学反応が起こり、密着性が低下する可能性があります。研究により、コーティングの厚さとインタ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

一フェース設計（グラデーションコーティングなど）を最適化すると、接着性が大幅に向上し、ひび割れや剥がれのリスクが軽減されることがわかっています。

2.8.3 表面 SiO₂酸化皮膜の形成と保

MoSi₂発熱体表面の SiO₂酸化膜は、耐高温酸化性の核心であり、酸化雰囲気下での長期安定性と耐用年数を決定します。800°Cを超えると、MoSi₂表面は $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$ と反応し、緻密な SiO₂膜を生成します。この膜は酸素拡散係数が低く、自己修復性に優れているため、酸素が基板に浸透するのを効果的に防ぎ、MoSi₂をさらなる酸化侵食から保護します。1200～1850°Cの範囲では、SiO₂膜は安定した状態を保ち、MoSi₂発熱体は高温酸化雰囲気下で長時間動作します。最高動作温度は 1850°Cに達し、セラミック焼結、ガラス熔融などのプロセスに広く使用されています。しかし、400～700°Cの「ベスト」温度域では、MoSi₂が酸化され、MoO₃と SiO₂の非保護性混合物が生成され、膜層の緩みや材料の粉化を引き起こし、表面保護性能に重大な影響を与えます。「ベスト」を回避するため、実用上は通常、この温度域を速やかに通過させます。

SiO₂ 膜は多くの要因の影響を受けます。材料の純度は膜の品質に非常に重要です。高純度の MoSi₂ は、より高密度で均一な SiO₂膜を生成できますが、不純物（Fe や Al など）は膜の欠陥を引き起こし、保護効果を低下させる可能性があります。微細構造も重要な役割を果たします。高密度の MoSi₂（ホットプレス焼結など）は表面の気孔が少なく、連続した SiO₂膜の形成に役立ちますが、多孔度の高いサンプルは膜層が不均一になり、耐酸化性が低下する可能性があります。ドーピングの修正は、SiO₂ 膜の性能に二重の効果をもたらします。

希土類酸化物（Y₂O₃ など）は膜の密着性と安定性を向上させることができますが、特定の金属ドーピング（W など）は酸化速度の変化により膜の品質を低下させる可能性があります。作業環境の雰囲気と湿度は、SiO₂膜の形成と保護に大きな影響を与えます。高湿度環境では、SiO₂膜が水和反応を起こして緩いケイ酸塩構造を形成し、保護能力が低下する可能性があります。還元環境または真空環境では、SiO₂膜が形成できないか破壊され、Si の揮発と基板の劣化を引き起こします。

SiO₂ 膜は、MoSi₂ 発熱体の性能を左右する重要な要素です。高温で長期間使用すると、Si または MoO₃の揮発により SiO₂ 膜が薄くなることがあります。特に 1850°C に近い極端な温度では、膜層が部分的に損傷する可能性があります。また、頻繁な熱サイクルによって膜層にひび割れや剥離が生じ、保護効果が低下する可能性があります。

SiO₂ 膜の安定性を高めるために、現代の MoSi₂ 素子では、表面改質技術がよく使用されています。たとえば、事前酸化処理で初期の緻密な膜層を形成したり、保護コーティング（Al₂O₃ や SiC など）を追加して膜の耐熱衝撃性と耐久性を高めたりしています。実際の用途では、安定した酸化雰囲気を維持し、高湿度環境を避け、熱サイクルパラメータを最適化することが、SiO₂膜の保護性能を維持するための効果的な方法です。将来的には、SiO₂ 膜の形成速度を最適化し、複合保護層を開発して MoSi₂ 加熱素子の表面性能と耐用年数をさらに向上させることに研究の方向性が焦点となる可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.9 MoSi₂発熱体の表面問題と解決策

ニケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、高温性能と耐用年数に影響を与える重要な要因であり、主に表面クラック、“ブランク”酸化、SiO₂保護膜の劣化、コーティング剥離などが挙げられます。これらの問題は、高温サイクル、熱衝撃、または特定の雰囲気環境において特に顕著であり、部品の性能低下や故障につながる可能性があります。表面クラックは、通常、熱応力、機械的応力、または製造欠陥によって引き起こされます。MoSi₂は低温脆性であるため、急激な温度変化や機械的振動によって微小クラックが発生しやすく、これがマクロクラックへと拡大することで耐酸化性と機械的強度が低下します。400～700℃の“ブランク”温度域では、MoSi₂表面が酸化され、MoO₃とSiO₂の非保護性混合物が生成され、材料の粉碎や表面状態の深刻な損傷を引き起こします。高温環境下での長期使用では、Si または MoO₃の揮発によりSiO₂保護膜が薄くなる可能性があります。特に 1850℃付近の高温では、膜層が部分的に損傷し、保護効果が低下する可能性があります。また、熱膨張係数の不整合や界面接合不足により、塗布された保護コーティングが剥離し、基板が酸化・腐食環境にさらされる可能性があります。

表面クラックの問題は、製造プロセスと材料改質を最適化することで解決できます。ホットプレス焼結プロセスは MoSi₂の密度を向上させ、表面の気孔や欠陥を低減することで、クラック発生確率を低減します。希土類酸化物（Y₂O₃など）やアルミナをドーピングすることで、粒界強度を高め、クラックの伝播を抑制できます。表面研磨は初期欠陥を低減し、応力集中を軽減します。「ブランク」酸化に対処するため、実用化においては、通常、温度を 400～700℃の温度範囲で急速に上昇させ、非保護性酸化物の生成時間を短縮します。さらに、前酸化処理により、表面に緻密な SiO₂膜を予め生成し、「ブランク」に対する耐性を高めることができます。SiO₂膜の安定性を維持するために、希土類元素を添加して膜の密着性を向上させるか、複合コーティングを施すことで耐熱衝撃性と耐久性を向上させることができます。コーティング剥離の問題については、コーティングプロセス（化学蒸着法やプラズマ溶射法など）とインターフェース設計（SiC 遷移層の追加など）を最適化することで、接合強度を向上させ、熱応力の不一致を低減できます。実際の用途では、加熱・冷却速度の制御、高湿度環境の回避、表面状態の定期的なチェックが、MoSi₂発熱体の寿命を延ばす効果的な対策となります。

将来的には、表面問題の解決に向けて、ナノ構造コーティングや多層複合コーティングの開発に重点が置かれる可能性があり、SiO₂膜の安定性とコーティングの接着強度をさらに向上させます。さらに、インテリジェントモニタリング技術を活用することで、表面状態をリアルタイムで検知し、動作パラメータを適時に調整することで、部品の耐用年数を延ばすことができます。これらの手法を総合的に適用することで、MoSi₂発熱体の表面問題を効果的に軽減し、セラミック焼結やガラス溶融などの高温用途における信頼性を向上させることができます。

2.10 MoSi₂発熱体の熱力学的特性に影響を及ぼす要因

MoSi₂発熱体の熱力学的特性（熱伝導率、熱膨張係数、比熱容量、熱拡散率など）は、加熱効率、温度均一性、耐熱衝撃性に直接影響します。これらの特性は、材料の固有特性（組成や

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

微細構造など）と外部環境（動作温度や雰囲気など）の影響を受けます。MoSi₂の熱伝導率は室温で約 45 W/(m·K)で、高温（1500℃）では約 15 W/(m·K)まで低下し、良好な熱伝達能力を確保しますが、温度による熱伝導率の低下は急速加熱効率に影響します。MoSi₂の熱膨張係数は約 $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ で、セラミックマトリックス材料とよく適合し、熱応力を軽減しますが、低温脆性のため、熱衝撃で割れやすくなります。比熱容量は約 0.45 J/(g·K)で、高温ではわずかに増加し、熱拡散率に影響を与えます。これらの熱力学的特性が相まって、高温炉におけるMoSi₂の性能を決定します。

材料の純度は、熱力学的特性に影響を与える重要な要素です。高純度の MoSi₂ は、不純物（Fe や C など）によるフォノン散乱を低減し、熱伝導率を向上させ、粒界欠陥を低減し、熱応力の分散を改善します。微細構造は熱力学的特性に大きな影響を与えます。高密度の MoSi₂（ホットプレスおよび焼結で調製されたものなど）は熱伝導率と耐熱衝撃性が高く、多孔度の高いサンプルは散乱熱と応力集中のために性能が低下します。ドーピングの修正により、熱力学的特性を最適化できます。たとえば、W を追加すると熱伝導率がわずかに向上しますが、熱膨張の不一致により熱応力が増加する可能性があります。希土類酸化物（Y₂O₃ など）をドーピングすると、粒界強度が向上し、耐熱衝撃性が向上します。ホットプレスや反応焼結などの作成プロセスも、熱力学的特性に重要な影響を及ぼします。高密度サンプルは通常、より優れた熱伝導率と熱応力耐性を示します。

外部環境が熱力学的特性に与える影響は無視できません。動作温度と雰囲気は、材料の表面状態と内部構造を変化させ、熱伝導率、熱膨張率、耐熱衝撃性に直接影響を及ぼします。実際の用途では、部品設計の最適化（ホットエンドの表面積の拡大など）と動作条件の制御（温度勾配の安定化など）により、熱力学的性能を向上させ、セラミック焼結や半導体熱処理などの要求の厳しい用途のニーズを満たすことができます。

2.10.1 動作温度の影響

動作温度は、MoSi₂ 発熱体の熱力学特性に影響を与える中核的な要因であり、熱伝導率、熱膨張係数、耐熱衝撃性などの性能を直接決定します。室温から 1000℃ の範囲では、MoSi₂ の熱伝導率は約 45 W/(m·K) から約 25 W/(m·K) に低下しますが、これは主に高温でのフォノン散乱の増強と電子熱伝導率の寄与の減少によるものです。1000～1850℃の高温範囲では、熱伝導率はさらに約 15 W/(m·K) まで低下しますが、それでもセラミック焼結やガラス溶融などの用途の熱伝達要件を満たすことができます。熱膨張係数は高温でわずかに増加しますが、 $8 \sim 9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ の範囲にとどまり、セラミックマトリックスとよく一致し、熱応力を軽減しま

す。しかし、MoSi₂の高温破壊靱性は低く（2～3MPa·m^{1/2}）、急激な温度上昇・降下時に熱応力により微小亀裂が発生しやすく、熱力学的特性の安定性に影響を与えます。高温動作は SiO₂ 保護膜の形成と安定性にも影響を与えます。800℃を超えると緻密な SiO₂膜が基板を効果的に保護しますが、1850℃付近の極度の温度では、Si や MoO₃の揮発により膜層が薄くなる可能性があり、熱力学的特性の長期安定性が低下します。400～700℃の「ベスト」温度域では、非保護酸化物の生成により材料が粉碎され、熱伝導率と耐熱衝撃性がさらに低下します。動作温度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の悪影響を低減するために、実用分野においては、加熱・冷却速度の最適化、予備酸化処理による SiO_2 膜の形成、そして Al_2O_3 や SiC などの保護コーティングの適用などにより、熱力学的特性の安定性を向上させることができます。部品設計においては、U 型または W 型構造を採用することで熱応力を分散させ、高温における熱力学的性能を向上させることができます。

2.10.2 大気の影響

雰囲気は、主に材料の表面状態と内部構造を変化させることにより、 MoSi_2 発熱体の熱力学的特性に大きな影響を与えます。酸化雰囲気下では、 MoSi_2 の表面に生成される SiO_2 保護膜が、熱力学的特性の安定性を効果的に維持します。 SiO_2 膜の酸素拡散係数が低いため、熱伝導率と熱膨張係数の長期的な一貫性が保証され、基板を酸化腐食から保護します。しかし、湿度の高い酸化雰囲気下では、 SiO_2 膜が水和して緩いケイ酸塩構造を形成し、熱伝導率と耐熱衝撃性が低下する可能性があります。還元雰囲気 (H_2 など) や真空環境では、 SiO_2 膜が形成できないか破壊され、 Si の揮発と基板の劣化、熱伝導率の大幅な低下、熱応力の増加による亀裂の発生などが発生し、熱力学的特性に重大な影響を与えます。

Ar 、 N_2 など) は MoSi_2 の熱力学的特性にほとんど影響を与えませんが、長期間の動作により、微量の酸素の存在により SiO_2 膜がゆっくりと形成され、熱伝導率がわずかに変化することがあります。雰囲気中の不純物 (硫化物や塩化物など) は MoSi_2 の表面と反応して非保護化合物を形成し、熱力学的特性の安定性を低下させる可能性があります。雰囲気の影響に対処するために、実際の用途では高湿度や還元環境を避けるために安定した酸化雰囲気を優先する必要があります。表面コーティング (SiC や Al_2O_3 など) は耐食性を高め、熱力学的特性を維持します。さらに、雰囲気の純度と部品の表面状態を定期的に検査し、動作パラメータ (雰囲気の湿度制御など) を最適化することは、 MoSi_2 発熱体の熱力学的特性の安定性を確保するための効果的な手段です。

2.10.3 加熱/冷却周波数の影響

モリブデン (MoSi_2) 発熱体の熱力学的特性に大きな影響を与えます。特に、セラミック焼結炉、ガラス焼鈍炉、金属熱処理装置など、頻繁な熱サイクルを必要とする用途では、 MoSi_2 の熱力学的特性は大きな影響を与えます。熱伝導率、熱膨張係数、熱拡散率などの MoSi_2 の熱力学的特性は、急速加熱 / 冷却サイクル中の熱応力によって影響を受けます。頻繁な熱サイクルは、 MoSi_2 の微細構造に熱応力が繰り返し作用する原因となり、特に低温脆性 (破壊靱性は約 $2 \sim 3 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) により微小亀裂の発生と伝播を引き起こし、熱伝導率と耐熱衝撃性が低下します。さらに、 $400 \sim 700^\circ\text{C}$ の「ペスト」温度範囲では、急速な熱サイクルにより非保護酸化物 (MoO_3 と SiO_2 の混合物) の形成が悪化し、表面の粉化を招き、熱力学的特性がさらに劣化する可能性があります。

加熱/冷却頻度の影響は、サイクルの温度範囲および速度と密接に関連しています。高温 ($1200 \sim 1850^\circ\text{C}$) から低温 (室温または $400 \sim 700^\circ\text{C}$) への大規模なサイクルでは、熱応力がより顕

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

著になり、 SiO_2 保護膜に亀裂や剥離が生じ、耐酸化性と熱伝導性が低下する可能性があります。高頻度サイクル（1時間に複数回の加熱と冷却など）は、微細構造の疲労損傷を加速させ、部品の寿命を縮めますが、低頻度サイクル（1日に1回など）は熱力学的特性への影響が比較的小さいです。材料の純度と微細構造は、熱サイクル耐性に不可欠です。高純度 MoSi_2 は、不純物による粒界の弱化を軽減し、亀裂伝播のリスクを低減します。高密度微細構造（ホットプレスや焼結などで作製されたものなど）は、熱応力を効果的に分散させ、耐熱疲労性を向上させます。一方、多孔度の高いサンプルは、応力集中により亀裂が発生しやすくなります。ドーピングによる改質も熱サイクル性能の向上に有効です。例えば、希土類酸化物（ Y_2O_3 など）を添加することで、粒界強度を高め、ひび割れの伝播を抑制できます。加熱/冷却頻度の悪影響を軽減するために、実用化においては様々な最適化策を講じることができます。加熱速度と冷却速度を制御することで、熱応力の蓄積を低減し、 $400\sim 700^\circ\text{C}$ の温度範囲を急速に通過することを防ぎ、「ブランク」酸化を抑制できます。表面コーティング（ Al_2O_3 や SiC など）は、耐熱衝撃性と SiO_2 膜の安定性を向上させ、熱サイクル寿命を延ばします。部品設計の最適化（U字型またはW字型構造の採用など）により、熱応力を分散させ、ひび割れの発生を抑制することができます。表面状態を定期的にチェックし、熱サイクルパラメータを調整することで、 MoSi_2 発熱体の熱力学的特性の安定性を効果的に向上させ、高周波熱サイクル用途のニーズを満たすことができます。

2.10.4 動作電圧の影響

動作電圧は、 MoSi_2 発熱体の熱力学的性能と動作安定性に影響を与える重要な外的要因であり、発熱効率、温度分布、耐用年数に直接関係しています。 MoSi_2 の抵抗率は正の温度係数特性を持ち、室温では約 $2.0\times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ で、 1000°C では約 $4.0\times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 、 1500°C では約 $4.5\times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ に増加します。この特性により、 MoSi_2 はさまざまな電圧で適応的に出力を調整できますが、高電圧または不安定な電圧条件下では熱力学的特性に悪影響を与える可能性があります。高電圧は部品を急速に加熱して大きな熱応力を発生させます。特に MoSi_2 は低温脆性が著しく、マイクロクラックが発生し、熱伝導率と耐熱衝撃性が低下する可能性があります。また、高電圧により局所的な過熱が発生し、表面の SiO_2 保護膜の Si や MoO_3 の揮発が促進され、膜が薄くなり、耐酸化性が弱まる可能性があります。

電圧変動も熱力学的特性に影響を与える重要な要因です。頻繁な電圧変動は電流の不安定性を引き起こし、部品内部の温度分布を不均一にし、熱応力集中を増加させ、微細構造の損傷や表面亀裂を引き起こす可能性があります。長期間の高電圧動作は、抵抗率のドリフトや粒成長など、 MoSi_2 の老化を加速し、熱拡散率と熱伝導率を低下させる可能性があります。材料の純度と微細構造は、電圧の影響に対する耐性において重要な役割を果たします。高純度 MoSi_2 は、不純物による局所的な抵抗の不均一性を低減し、過熱のリスクを低減します。高密度の微細構造（ホットプレスや焼結などで製造されたものなど）は、熱応力を分散する能力を向上させ、電圧変動に対する耐性を高めることができます。ドーピングの変更（W や Nb の追加など）は、抵抗率を最適化し、電圧下での電熱安定性を向上させることができますが、耐酸化性とのバランスを取る必要があります。使用電圧の悪影響を軽減するために、実際のアプリケーションでは電圧制御戦略を最適化する必要があります。安定した電源システムと電圧レギュレータを使用することで、変動を減らし、均一な加熱を確保できます。コールドエンドとホットエ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンドの抵抗整合設計（コールドエンドに高伝導性材料をドーピングするなど）は、局所的な過熱のリスクを低減し、エネルギー効率を向上させることができます。保護コーティング（SiCやAl₂O₃など）を施すことで、表面の耐酸化性と熱応力耐性を高め、部品の寿命を延ばすことができます。さらに、電圧入力と部品の表面状態を定期的に監視し、適切な加熱曲線設計（緩速加熱など）を組み合わせることで、MoSi₂発熱体の熱力学的特性を効果的に維持し、セラミック焼結や半導体熱処理などの高精度アプリケーションのニーズを満たすことができます。

2.10.5 電流密度の影響

MoSi₂ 発熱体の熱力学的特性と長期安定性に重要な影響を及ぼし、発熱量、温度分布、材料の老化挙動を直接的に決定します。抵抗発熱体である MoSi₂の出力は電流密度の 2 乗に比例します ($P=I^2R$)。そのため、高電流密度では発熱体の温度が大幅に上昇し、熱伝導率、熱膨張、耐熱衝撃性に影響します。MoSi₂ の熱伝導率は、高温(1500°Cで約 15 W/(m·K))の方が室温(45 W/(m·K))よりも低くなります。高電流密度は局所的な過熱を引き起こし、大きな熱応力を発生する可能性があり、特に MoSi₂ は低温脆性が顕著で、表面の SiO₂ 保護膜に微小亀裂やひび割れが生じやすく、熱力学的特性が低下します。

さらに、高電流密度により、SiO₂膜中の Si または MoO₃の揮発が加速され、膜が薄くなり、特に 1850°C に近い極端な温度では耐酸化性が弱まる可能性があります。電流密度分布の均一性は、熱力学的性能にとって非常に重要です。不均一な電流密度（部品の設計欠陥や接触不良による局所的な高電流密度など）は、温度勾配の増加、熱応力および亀裂リスクの増加、熱拡散率の低下につながります。長期にわたる高電流密度動作は、MoSi₂の抵抗率ドリフトや微細構造劣化（粒成長や粒界脆弱化など）を引き起こし、熱伝導率および耐熱衝撃性にさらに影響を及ぼします。材料の純度と微細構造は、電流密度許容度に大きな影響を与えます。高純度 MoSi₂は、不純物による局所的な抵抗の不均一性を低減し、過熱のリスクを低減します。高密度の微細構造（ホットプレスや焼結準備など）は、熱応力分散能力を向上させ、電流密度衝撃に対する耐性を高めることができます。ドーピング修正（Y₂O₃ の追加など）は、粒界構造を最適化し、抵抗率を安定させ、電流密度下での熱力学的特性を向上させることができます。

使用される電流密度の悪影響を軽減するためには、実際のアプリケーションでコンポーネントの設計と動作条件を最適化する必要があります。均一な断面設計の U 字型または W 字型のコンポーネントは、均一な電流密度分布を確保し、局所的な過熱を軽減できます。コールドエンドとホットエンド間の抵抗マッチング（コールドエンドに高伝導性材料をドーピングするなど）により、電流密度の集中を減らし、エネルギー効率を向上させることができます。

保護コーティング（Al₂O₃やSiC など）を適用すると、表面の耐酸化性と耐熱応力性が向上し、コンポーネントの寿命が延びます。電流コントローラを使用して入力電流を安定させ、過剰な電流密度を回避し、コンポーネントの表面状態と電気特性を定期的にチェックすることは、MoSi₂発熱体の熱力学的特性の安定性を維持するための効果的な手段です。これらの最適化戦略は、ガラス溶融や金属熱処理などの高出力アプリケーションのニーズを満たすことができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.10.6 設置方法の影響

H は、ニケイ化モリブデン (MoSi_2) 発熱体の熱力学的性能と耐用年数に重要な影響を及ぼし、熱応力の分布、温度均一性、機械的安定性に直接関係しています。熱伝導率、熱膨張係数、熱拡散率などの MoSi_2 の熱力学的特性は、不適切な設置方法による熱応力や機械的応力によって悪影響を受ける可能性があります。一般的な設置方法には、垂直吊り下げ、水平支持、クランプなどがあり、それぞれが熱力学的特性に異なる影響を及ぼします。垂直吊り下げは、 MoSi_2 発熱体の最も一般的な設置方法であり、U 字型または W 字型の発熱体に適しています。

機械的拘束を減らし、高温での要素の自由な熱膨張を許容することで、熱応力を軽減できます。ただし、吊り下げポイントが適切に設計されていない場合（接触点での応力集中など）、局所的な亀裂が発生し、熱伝導率と熱衝撃耐性が低下する可能性があります。水平支持設置は通常、直棒型要素に使用されますが、支持材料（高純度アルミナなど）が MoSi_2 の熱膨張係数と一致していることを確認する必要があります。一致しないと、熱膨張の不一致によって応力集中が発生し、熱拡散率に影響を与える可能性があります。クランプ固定方法は小型炉でより一般的ですが、クランプ力が大きすぎると、低温脆性により MoSi_2 に微小亀裂が発生し、熱力学的特性が弱まる可能性があります。

設置方法は、表面 SiO_2 保護膜の安定性と耐酸化性にも影響を与えます。設置応力の不均一性は、特に 400~700°C の「ペスト」温度域において、表面膜層の亀裂を引き起こす可能性があります。亀裂は非保護酸化物の形成を悪化させ、熱伝導率と耐熱衝撃性の低下を引き起こす可能性があります。さらに、設置方法は電流分布と温度均一性にも間接的な影響を与えます。例えば、接触不良は局所的な電流密度の増加につながり、過熱を引き起こし、 SiO_2 膜の劣化を加速させる可能性があります。設置方法の影響を最適化するために、実際のアプリケーションでは、高純度セラミック支持体を使用して熱膨張の不一致を低減したり、フレキシブルクランプを使用して機械的応力を低減したりするなど、炉の種類に適した設置設計を選択する必要があります。設置点と MoSi_2 コールドエンドとの良好な接触を確保することで、電流均一性を向上させ、局所的な過熱を低減することができます。取り付け箇所の摩耗や緩みを定期的に点検し、適切な加熱および冷却速度（5~10°C/分など）を組み合わせることで、 MoSi_2 加熱素子の熱力学的特性を効果的に維持し、セラミック焼結やガラス溶融などの用途での寿命を延ばすことができます。

2.10.7 部品の品質と純度の影響

MoSi_2 発熱体は、その熱力学的特性に影響を与える核心的な内因性因子であり、熱伝導率、熱膨張係数、耐熱衝撃性、および長期安定性を直接的に決定します。高純度 MoSi_2 （純度は通常 99.5% 以上）は、熱力学的特性を大幅に向上させることができます。その熱伝導率は、室温で約 45 W/(m·K)、1500°C で約 15 W/(m·K) です。その熱拡散係数は、室温で約 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、1500°C で約 $0.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ です。高純度材料は、不純物（Fe、Al、C など）によって引き起こされるフォノン散乱と粒界の弱さを低減し、それによって熱伝導率と熱応力分散能力を向上させることができます。不純物の存在は、 MoSi_2 の低温脆化段階において、局所的な抵抗の不均一性、熱応力集中の増加、耐熱衝撃性の低下、さらにはマイクロクラックの発生につ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ながる可能性があります。さらに、不純物は酸素と反応して非保護酸化物を形成し、表面 SiO_2 保護膜の密度を弱め、耐酸化性と熱力学的特性の安定性を低下させる可能性があります。特に $400\sim 700^\circ\text{C}$ の「ベスト」温度域では、不純物が材料の粉砕を悪化させる可能性があります。

MoSi_2 は、反応焼結法や自己伝播高温合成（SHS）法で製造されたサンプルと比較して、密度が高く（理論密度の 98% 以上）、気孔率が低く、熱伝導率と耐熱衝撃性に優れています。気孔率の高い部品は、気孔からの熱散乱と応力集中により熱伝導率が低く、熱サイクル中に割れが発生しやすく、熱拡散係数が低下します。

高品質の MoSi_2 部品は、均一な微細構造と適度な粒径（通常 $10\sim 50\mu\text{m}$ ）も備えている必要があります。粒子が大きすぎると粒界強度が低下し、小さすぎると粒界散乱が増加して熱伝導率が低下する可能性があります。ドーピングの調整により、品質と純度の効果をさらに最適化できます。例えば、希土類酸化物（ Y_2O_3 など）を添加することで粒界結合が強化され、耐熱衝撃性が向上します。また、高純度ドーパントを使用することで、不純物の混入を防ぐことができます。

部品の品質と純度を向上させるには、高純度の原材料（高純度 Mo 粉末や Si 粉末など）を選択し、実際の用途では製造プロセスを厳密に管理する必要があります。ホットプレス焼結やプラズマ噴霧は、密度を向上させ、気孔率と欠陥を低減します。品質管理リンク（X 線回折や走査型電子顕微鏡など）は、部品の純度と微細構造の均一性を確保できます。保護コーティング（ SiC や Al_2O_3 など）を適用することで、低純度材料の耐酸化性の欠如をさらに補うことができます。部品の表面状態と性能を定期的に検査し、安定した動作条件（高湿度や還元雰囲気回避など）と組み合わせることで、 MoSi_2 発熱体の熱力学的特性を最大限に引き出し、半導体熱処理や金属熱処理などの需要の高い用途のニーズを満たすことができます。

2.10.8 コーティング保護処理の効果

MoSi_2 発熱体の熱力学的特性に重要な影響を及ぼし、耐酸化性、耐熱衝撃性、熱伝導率の安定性を大幅に向上させることができます。一般的に使用される保護コーティングには、酸化物コーティング（ Al_2O_3 など）があります。 MoSi_2 表面には、極限条件下で SiO_2 膜の欠損を補う緻密な保護層を形成する ZrO_2 ）、炭化物コーティング（ SiC など）、複合コーティング（ Al_2O_3 - SiC など）があります。 Al_2O_3 コーティングは、高い融点（約 2050°C ）と低い酸素拡散係数（ 1500°C で約 $10^{-14}\text{cm}^2/\text{s}$ ）により、特に高温酸化雰囲気（ $1200\sim 1850^\circ\text{C}$ ）において、耐酸化性を効果的に向上させ、熱伝導率（ 1500°C で約 $15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）の安定性を維持できます。

SiC コーティングは、熱膨張係数（約 $4.5\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ ）と MoSi_2 （約 $8.1\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ ）の優れたマッチングにより、熱応力の不一致が低減され、耐熱衝撃性が向上するため、セラミック焼結炉などの高熱サイクル環境に適しています。複合コーティングは、複数の材料の利点を組み合わせたものです。例えば、 Al_2O_3 - SiC コーティングは、高い耐酸化性と耐熱衝撃性を兼ね備えており、熱力学的特性の長期安定性を大幅に向上させます。コーティングによる熱力学的特性の向上は、コーティングの密着性、厚さ、均一性と密接に関連しています。高品質のコーティング（化学蒸着法（CVD）で作製されたものなど）は、高い密着性と均一性を備え、熱応力を

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

効果的に分散し、熱拡散係数（1500℃で約 $0.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ）の安定性を維持します。コーティングが厚すぎる（100 μm 超）と、熱膨張の不整合によるクラックが発生し、熱伝導率が低下する可能性があります。一方、コーティングが薄すぎる（10 μm 未満）と、十分な保護が得られない可能性があります。コーティングプロセスも熱力学的特性に大きな影響を与えます。プラズマ溶射は厚く緻密なコーティングを形成できるため、工業規模の用途に適していますが、微細孔が生じ、熱伝導率がわずかに低下する可能性があります。CVD プロセスで生成される薄いコーティングは、より均一で熱応力が低く、高精度の要件に適しています。また、コーティングは「プラーク」酸化（400～700℃）の影響を軽減することもできます。たとえば、SiC コーティングは非保護的な MoO_3 の形成を抑制し、熱力学的特性を保護します。

コーティングの長期安定性は、作業環境の影響を受けます。高湿度環境では、 Al_2O_3 コーティングが水和反応を起こし、熱伝導率が低下する可能性があります。また、還元雰囲気や真空環境では、Si の揮発によりコーティングが劣化し、熱拡散係数に影響を与える可能性があります。コーティング保護処理の効果を最適化するには、実際の用途におけるアプリケーション要件に応じて、適切なコーティングの種類とプロセスを選択する必要があります。例えば、半導体熱処理炉には高純度 CVD コーティングが適しており、ガラス溶融炉には厚い SiC コーティングが使用できます。界面設計（SiC 遷移層の追加など）により、接着性が向上し、剥離のリスクを軽減できます。コーティングの完全性と表面状態を定期的に検査し、安定した酸化雰囲気と適切な加熱・冷却速度（5～10℃/分など）を組み合わせることで、 MoSi_2 発熱体の熱力学的特性に対するコーティングの保護効果を最大限に高め、高温用途での寿命を延ばすことができます。

2.10 CTIA GROUP LTD MoSi_2 発熱体 MSDS

CTIA GROUP LTD が製造する二ケイ化モリブデン（ MoSi_2 ）発熱体の安全な使用、保管、取り扱いに関する情報を提供します。 MoSi_2 は、優れた高温耐酸化性と導電性を備えた金属間化合物であり、高温工業炉や実験室炉（セラミック焼結、ガラス溶融、金属熱処理など）で広く使用されています。以下は、CTIA GROUP LTD MoSi_2 発熱体の MSDS の内容について、 MoSi_2 材料の特性と業界基準に基づき、物理的・化学的性質、危険性の特定、安全な操作、緊急時の措置などを含めて詳細に説明したものです。

材料の識別と構成: CTIA GROUP LTD の MoSi_2 発熱体は、主に二ケイ化モリブデン（化学式： MoSi_2 、CAS 番号：12136-78-6）で構成され、純度は通常 99.5% 以上で、性能向上のため微量添加剤（希土類酸化物や酸化アルミニウムなど）が含まれている場合があります。 MoSi_2 は、灰色の金属外観、正方晶 α 型（C11b 型）結晶構造、密度約 6.24 g/cm^3 、融点約 2030℃、導電性を備えたセラミック材料です。発熱体は通常、U 字型、W 字型、または直棒で、高温酸化雰囲気下で表面に緻密な SiO_2 保護膜が形成されます。不純物としては、Fe、Al、C などが挙げられ、生産バッチやドーピングプロセスによって異なりますが、通常 0.1% 未満です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

危険の特定: MoSi₂発熱体は、通常の高温使用においては比較的安全ですが、特定の条件下では以下のような危険性があります。物理的危険性としては、MoSi₂は室温で脆く、機械的な衝撃や不適切な取り扱いによって容易に破損し、鋭利な破片が飛び散って切り傷を引き起こす可能性があります。化学的危険性としては、MoSi₂は 400～700℃の「疫病」温度域において低温酸化反応を起こし、MoO₃と SiO₂の混合物を生成します。この混合物から微量の MoO₃蒸気（呼吸器や眼を刺激する可能性がある）が発生する可能性があります。還元雰囲気下または真空雰囲気下では、Si の揮発により材料が劣化し、シリコン蒸気が発生する可能性があるため、吸入を避ける必要があります。環境危険性としては、MoSi₂自体は環境への影響は少ないですが、廃棄された部品は汚染を避けるために有害廃棄物として処理する必要があります。

安全な操作と保護対策 CTIA GROUP LTD MoSi₂発熱体を安全にご使用いただくため、MSDS（安全データシート）には以下の操作ガイドラインが記載されています。取り扱いの際は、保護手袋（耐熱手袋など）とゴーグルを着用し、鋭利なエッジとの直接接触を避け、機械的損傷や破片による人体への傷害を防止してください。設置時には、過度の機械的ストレスによる破損を防ぐため、適切な固定方法（垂直吊り下げやフレキシブルクランプなど）を使用してください。ご使用の際は、比例制御、位相トリガ型、電流制限機能を備えた電源システムを使用し、非比例スイッチングや「突発的な」電源供給方法による部品の損傷を回避してください。保管時は、湿気や酸性雰囲気による表面腐食を防ぐため、乾燥した非腐食性ガス環境に設置してください。

保管および輸送: MoSi₂発熱体は、乾燥した清潔な環境で保管し、温度は 5～35℃、相対湿度は 70%以下に管理してください。表面腐食や SiO₂膜の劣化を防ぐため、酸性物質や高湿度環境との接触は避けてください。輸送には発泡スチロールまたは木箱を使用し、振動や衝撃による破損を防ぐため、部品を固定してください。梱包には「壊れ物」および「防湿」の表示を付し、MSDS（安全データシート）を添付してください。輸送中は、安全を確保するために、危険物輸送規制（UN3077、環境有害物質など）を遵守してください。



中ウォルフラム製造のモリブデンシリサイド発熱体

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

第 3 章 MoSi₂発熱体の構造と設計

3.1 MoSi₂発熱体の一般的構造

ニケイ化モリブデン (MoSi₂) 発熱体は、優れた耐高温酸化性、導電性、および最高動作温度により、高温工業炉や実験装置に広く使用されています。構造設計は、加熱効率、温度均一性、耐熱衝撃性、および耐用年数に直接影響します。MoSi₂発熱体の一般的な構造には、U 型、W 型、L 型、直棒型、およびカスタム形状などがありますが、中でも U 型と W 型は、効率的な熱分散と柔軟な設置方法により最も普及しています。これらの構造は通常、ホットエンド（発熱部）とコールドエンド（接続部）で構成されます。ホットエンドは高温で発熱し、コールドエンドは高伝導性材料（アルミニウムやタングステンなど）をドープすることで抵抗を低減し、電源との接続安定性を確保します。MoSi₂発熱体の構造設計では、炉のサイズ、加熱電力、熱サイクル周波数、設置方法を総合的に考慮し、セラミック焼結、ガラス溶融、金属熱処理などのさまざまな用途のニーズを満たす必要があります。

MoSi₂発熱体の性能には、構造設計の最適化が極めて重要です。均一な電流分布を確保し、局所的な過熱を回避するために、高温端と低温端の長さ、断面寸法、接続方法を正確に一致させる必要があります。高温端の直径は通常 6~12mm で、低温端の直径は高温端の 1.5~2 倍に設定することで、低温端の温度を下げ、耐用年数を延ばします。発熱体の幾何学的形状（U 型や W 型の曲げ半径など）は、熱応力の分布に影響を与えます。適切な曲げ設計は、熱衝撃割れのリスクを軽減できます。材料の純度（通常 99.5% 以上）と製造プロセス（ホットプレス、焼結など）は、構造の完全性に大きな影響を与えます。高純度で高密度の MoSi₂は、微細欠陥を低減し、耐熱疲労性を向上させます。表面処理（研磨、コーティングなど）は、耐酸化性や熱力学的特性を向上させることもできます。実際の用途では、炉内のスペース、温度分布の要件、設置上の制約に応じて構造をカスタマイズする必要があります。例えば、U 型は小型炉に適しており、W 型はより均一な加熱を提供する大型炉に適しています。

3.1.1 U 字型 MoSi₂発熱体

U 字型 MoSi₂発熱体は最も一般的な構造の 1 つであり、シンプルでコンパクトな設計と効率的な加熱性能のため、実験室用ボックス炉やセラミック焼結炉などの中小型高温炉で広く使用されています。U 字型素子の構造は、U 字型の曲げで接続された 2 つの平行なホットエンドで構成され、コールドエンドはホットエンドの上部にあり、電源に接続されています。U 字型設計の主な利点は、ホットエンドが集中した高温ゾーンを提供できることです。これは、最高温度が 1800°C に達する酸化雰囲気焼結など、局所的に高い熱密度を必要とする用途に適しています。U 字型素子のホットエンドの長さは通常 100~500 mm で、具体的な長さは炉のサイズと電力要件に応じてカスタマイズされます。ホットエンドの直径は 6~9 mm、コールドエンドの直径は 12~18 mm で、低抵抗と効率的な電流伝送を保証します。U 字型要素の熱力学的性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

能は、そのコンパクトな形状から恩恵を受けています。ホットエンド間の距離（通常 20～50 mm）は、温度均一性を最適化し、熱応力の集中を軽減します。U 字型構造の曲げ半径は正確に設計する必要があります。半径が小さすぎると応力集中を引き起こし、熱衝撃亀裂のリスクが高まり、半径が大きすぎると加熱効率が低下する可能性があります。MoSi₂の正の温度係数抵抗率（室温で約 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 、1500°Cで約 $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）により、U 字型要素は高温で自動的に電力を調整できるため、精密な温度制御アプリケーションに適しています。ただし、U 字型要素は、頻繁な熱サイクル中にホットエンドとコールドエンドの接続部に応力が蓄積されるため、マイクロクラックを生成する可能性があり、特に MoSi₂は低温脆性が顕著です（破壊靱性は約 $2 \sim 3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）。U 字型要素の耐熱衝撃性と寿命を向上させるために、ホットプレスと焼結プロセスによって材料の密度を高め、表面コーティング（SiC や Al₂O₃ など）によって耐酸化性と耐熱疲労性を高めることができます。

設置面では、U 字型素子は通常垂直に吊り下げられ、冷却端はセラミッククランプで固定され、機械的ストレスが軽減されます。設置時には、局所的な過熱を防ぐため、冷却端が電源と良好に接触していることを確認する必要があります。実際の用途では、U 字型素子は 400～700°Cの「ベスト」温度域を急速に通過しないようにする必要があります。これは、表面の粉化を引き起こす非保護酸化物（MoO₃と SiO₂の混合物）の生成を防ぐためです。U 字型素子のメンテナンスには、曲げ部や接続部の完全性の定期的な検査、および酸化雰囲気における長期安定性を確保するための SiO₂保護膜の状態のモニタリングが含まれます。

3.1.2 W 型 MoSi₂発熱体

W 型 MoSi₂発熱体は、形状が複雑で加熱面積が大きいいため、ガラス溶解炉、工業用セラミック焼結炉、金属熱処理装置など、均一な温度場が求められる大型高温炉や用途で広く使用されています。W 型発熱体の構造は、連続した W 字型の曲げ部で接続された複数の平行なホットエンドで構成され、通常 3 つ以上のホットエンドを含み、コールドエンドは両側または上部にあり、電源に接続されています。主な利点は、より広い炉面積をカバーし、より均一な温度分布を提供できることです。大型炉やマルチゾーン加熱のニーズに適しています。W 型発熱体のホットエンドの長さは通常 200～1000 mm、直径は 6～12 mm、コールドエンドの直径は 12～24 mm です。具体的なサイズは、電力需要と炉の設計に応じてカスタマイズされます。加熱電力密度は通常 $15 \sim 20 \text{ W/cm}^2$ （1700°C時）で、温度均一性を維持しながら高出力の要件を満たすことができます。

W 型素子の熱力学的性能は、マルチホットエンド設計の恩恵を受けています。複数のホットエンド間の間隔（通常 30～60 mm）は、熱放射の分布を最適化し、局所的な過熱と熱応力の集中を軽減します。W 型構造の曲げ半径は正確に制御する必要があります。半径が小さすぎると応力集中につながり、熱衝撃割れの高まり、半径が大きすぎると加熱効率が低下する可能性があります。MoSi₂の正温度係数（PTC）抵抗により、W 型素子は高温で電力を適応

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

的に調整し、正確な温度制御と安定性を確保できます。ただし、W 型素子は、特に MoSi₂の低温脆性が顕著な場合（破壊靱性は約 2~3 MPa·m^{1/2}）、頻繁な熱サイクル中に複数の曲げ部とホットエンドとコールドエンドの接続点で応力が蓄積されるため、マイクロクラックが発生する可能性があります。ホットプレス焼結プロセスは、材料の密度（理論密度の 98%以上）を高め、微細欠陥を低減し、耐熱疲労性を向上させることができます。表面コーティング（SiC や Al₂O₃など）により、耐酸化性と耐熱衝撃性をさらに向上させ、高温酸化雰囲気（最大 1800~1850°C）における部品の耐用年数を延ばすことができます。

設置に関しては、W 型コンポーネントは通常、垂直に吊り下げるか水平に支持され、冷端は高純度セラミック製のクランプまたは支持具で固定されます。これにより、機械的応力が低減され、熱膨張が許容されます。設置時には、接触抵抗による局所的な過熱を防ぐため、冷端が電源に確実に接触していることを確認する必要があります。W 型コンポーネントは形状が複雑なため、均一な電流分布を維持するために、各熱端を対称に配置するなど、より高い設置精度が求められます。実用上は、表面の粉化を引き起こす非保護酸化物（MoO₃と SiO₂の混合物）の形成を防ぐため、400~700°Cの「ベスト」温度域を急速に通過しないようにする必要があります。W 型コンポーネントのメンテナンスでは、酸化雰囲気下での長期安定性を確保するために、曲げ部、接続部、表面 SiO₂保護膜の健全性を定期的に検査する必要があります。W 型コンポーネントのメンテナンスには、過熱による接続ポイントの劣化を防ぐために、コールドエンド温度（通常は 400°C 未満に維持）を監視することも含まれます。

W 型素子の性能を最適化するには、設計時にホットエンドの数を増やすか、ホットエンドの間隔を調整することで、特定の炉タイプの温度分布要件を満たすことができます。たとえば、大型ガラス溶融炉では、マルチホットエンド W 型素子を使用して、広い領域にわたって均一な加熱を実現できます。表面研磨またはコーティングは、表面欠陥を減らし、耐熱衝撃性と耐酸化性を向上させることができます。実際のアプリケーションでは、W 型素子の設置は炉の熱流ダイナミクスを考慮する必要があり、熱集中や熱不足を避けるために素子を合理的に配置する必要があります。不純物が素子の表面を汚染するのを防ぐために炉内を定期的に清掃することも、W 型素子の寿命を延ばすための重要な対策です。W 型素子の複雑な構造は、大型工業炉での使用に大きな利点をもたらしますが、製造精度と設置技術に対する要件も高くなります。

3.1.3 スパイラル MoSi₂発熱体

スパイラル MoSi₂発熱体は、小型実験室用管状炉、熱分析装置、特定の工業炉など、高熱密度とコンパクトな加熱面積を必要とする用途に適した特殊な構造です。スパイラル素子の構造は、MoSi₂ロッドを螺旋状のホットエンドに巻いたもので、コールドエンドはスパイラルの両端に配置され、電源を接続します。主な利点は、限られたスペースで高い熱出力を提供できることです。スパイラル形状はホットエンドの表面積を増やし、放熱効率を高めるため、急速加熱と精密な温度制御が必要な用途に適しています。スパイラル素子のホットエンド径は通常 4~9 mm で、螺旋巻き数とピッチ（通常 5~20 mm）は炉のサイズと電力要件に応じて設

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

計されます。コールドエンド径は 8~18 mm で、低抵抗と効率的な電流伝送を確保しています。加熱電力密度は 20~25W/cm²（1700℃時）に達し、U 型や W 型よりも高く、高温局所加熱のシナリオに適しています。

スパイラル素子の熱力学的性能は、その高い表面積とコンパクトな設計によるものです。スパイラル構造は均一な熱放射を提供し、温度勾配を低減できるため、管状炉の円筒加熱ニーズに適しています。ただし、スパイラル形状の複雑な形状は製造の難易度を高めます。スパイラルの曲率とピッチを正確に制御する必要があります。スパイラルがきつすぎると、特に MoSi₂の低温脆性段階（破壊靱性は約 2~3MPa·m^{1/2}）で熱応力集中を引き起こし、亀裂のリスクが高まります。MoSi₂の正の温度係数抵抗により、スパイラル素子は高温で電力を適応的に調整して、温度制御精度を確保できます。耐熱衝撃性と寿命を向上させるために、ホットプレス焼結プロセスにより、材料の密度（理論密度の 98%以上に近い）を高め、微小欠陥を減らすことができます。表面コーティング（熱膨張係数がそれぞれ約 4.5×10⁻⁶°K⁻¹と約 8×10⁻⁶°K⁻¹の SiC や Al₂O₃ など）により、耐酸化性と耐熱疲労性が向上し、高温酸化雰囲気（最大 1800℃）での部品の耐用年数が延長されます。

設置に関しては、スパイラルエレメントは通常、水平または垂直に固定され、コールドエンドは高純度セラミック支持体によって固定されます。スパイラル部分が熱膨張を許容するために機械的に拘束されないようにする必要があります。設置時には、設置応力による変形や亀裂を防ぐため、スパイラル構造の均一性に特に注意する必要があります。実際の用途では、非保護酸化物（MoO₃と SiO₂の混合物）の生成と表面粉化を防ぐために、400~700℃の「ブランク」温度域を迅速に通過する必要があります。スパイラルエレメントのメンテナンスでは、スパイラルピッチ、コールドエンド接続部、および表面 SiO₂保護膜の完全性を定期的に検査し、酸化雰囲気中での安定性を確保する必要があります。スパイラルエレメントは製造コストが高く、設置精度に対する要件が厳しいため、その用途は主に高精度実験装置または特殊な工業炉に集中しています。

3.1.4 直棒型 MoSi₂発熱体

直棒型 MoSi₂発熱体は、トンネル炉、連続熱処理炉、大型工業炉など、長距離線形加熱を必要とする炉種に適したシンプルな線形構造です。直棒型発熱体の構造は、単一の直線状のホットエンドと、両端または片端に配置されたコールドエンドで構成され、電源に接続されます。主な利点は、構造が簡単で、製造コストが低く、大規模生産と設置が容易で、長距離加熱エリアをカバーするのに適していることです。直棒型発熱体のホットエンド長さは通常 300~2000 mm、直径は 6~12 mm、コールドエンド直径は 12~24 mm です。具体的なサイズは、炉の長

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

さと電力要件に応じてカスタマイズされます。加熱電力密度は通常 $15\sim 18\text{ W/cm}^2$ (1700°C) で、中低電力密度の均一加熱アプリケーションに適しています。

直棒型素子の熱力学的性能は、その線形設計によって制限されます。ホットエンドの長さ方向の温度分布は、U 型や W 型ほど均一ではない場合があります。特に長距離加熱の場合、中央部が高温で両端部が低温になる現象が発生する可能性があります。温度均一性を改善するには、ホットエンドの直径やセグメントドーピングを調整することで、抵抗分布を最適化できます。MoSi₂ の正の温度係数抵抗率（室温で約 $2.0\times 10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}$ 、 1500°C で約 $4.5\times 10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}$ ）により、直棒型素子は高温で電力を適応的に調整できますが、その線形構造により、頻繁な熱サイクル中にホットエンドの両端に応力集中が生じ、特に MoSi₂ の低温脆性が顕著な場合（破壊靱性は約 $2\text{--}3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）にマイクロクラックが発生する可能性があります。ホットプレス焼結プロセスは、材料密度を高め、微細欠陥を低減し、耐熱衝撃性と耐熱疲労性を向上させます。表面コーティング（SiC や Al₂O₃ など）により、耐酸化性と表面安定性がさらに向上し、高温酸化雰囲気（最大 1800°C ）における部品の耐用年数を延ばします。

設置においては、直棒型素子は通常、水平支持または垂直吊り下げ方式で設置され、冷端は高純度セラミッククランプで固定されます。素子のたわみや破損を防ぐため、支持点が均等に分散されていることを確認する必要があります。設置時には、接触抵抗による局所的な過熱を避けるため、冷端と電源間の接触品質に特に注意する必要があります。実用的には、非保護酸化物の生成や表面粉化を防ぐため、 $400\sim 700^\circ\text{C}$ の「ペスト」温度域を速やかに通過させる必要があります。直棒型素子のメンテナンスには、熱端表面、冷端接続部、SiO₂ 保護膜の健全性を定期的に点検し、冷端温度（通常は 400°C 未満に維持）を監視して過熱や劣化を防ぐ必要があります。直棒型素子は構造が単純なため、製造コストとメンテナンスコストは低くなりますが、温度均一性に対する要求は高く、炉の設計と併せてレイアウトを最適化する必要があります。

3.1.5 U 字型、W 字型、直線型構造設計の比較

MoSi₂ の発熱体中で最も一般的な構造は、U 字型、W 字型、直棒型の 3 種類です。それぞれに特徴があり、さまざまな炉の種類や用途に適しています。U 字型の発熱体は、コンパクトな設計と集中加熱能力で知られています。ホットエンドの長さは通常 $100\sim 500\text{ mm}$ 、直径は $6\sim 9\text{ mm}$ で、電力密度は 20 W/cm^2 (1700°C) に達します。局所的に高い熱密度が必要な小型から中型の炉（実験室用ボックス炉やセラミック焼結炉など）に適しています。構造が簡単で設置が簡単で、熱効率が高いという利点がありますが、ホットエンドの面積が小さく、ホットエンド間隔（通常 $20\sim 50\text{ mm}$ ）によって温度均一性が制限されます。頻繁な熱サイクルにより、ホットエンドとコールドエンドの接続部にマイクロクラックが発生しやすくなります。W 字型の発熱体は、マルチホットエンド設計により、より広い加熱面積を提供します。ホットエンドの長さは $200\sim 1000\text{ mm}$ 、直径は $6\sim 12\text{ mm}$ 、電力密度は $15\sim 20\text{ W/cm}^2$ です。均一な温度場が必要な大型炉（ガラス溶解炉や工業用セラミック焼結炉など）に適しています。その利点は、より均一な温度分布と熱応力に対する強い耐性ですが、製造が複雑でコストが高く、何度も曲がると熱衝撃亀裂のリスクが高まります。直棒型要素は線形構造で知られ、ホットエンドの長さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は 300～2000mm、直径は 6～12mm、電力密度は 15～18W/cm²で、長距離線形加熱のトンネル炉または連続熱処理炉に適しています。その利点は製造コストが低く設置が簡単なことですが、温度均一性が悪く、応力集中によりホットエンドの両端に亀裂が発生しやすいです。

熱力学特性の観点から見ると、3つの構造の熱伝導率（室温で約 45 W/(m·K)、1500℃で約 15 W/(m·K)）と熱膨張係数（約 $8.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ）は類似していますが、幾何学的形状が熱応力の分布に影響を与えます。U型とW型の曲げ設計は熱応力を分散させ、耐熱衝撃性は直棒型よりも優れていますが、直棒型は長距離加熱時に曲げ応力の集中点がないため、機械的安定性が高くなります。

耐酸化性に関しては、3つの構造はすべて表面の SiO₂ 保護膜（酸素拡散係数は 1500℃で約 $10^{-13} \text{cm}^2/\text{s}$ ）に依存していますが、Wタイプは表面積が大きく、SiO₂膜の形成と維持がより均一で、耐酸化性がわずかに優れています。直棒タイプは、長距離加熱中に温度が不均一になるため、局所的な SiO₂ 膜の劣化を引き起こす可能性があります。熱サイクル性能の点では、UタイプとWタイプは形状が複雑なため、頻繁な熱サイクルでマイクロクラックが発生しやすいのに対し、直棒タイプは構造が単純なため熱疲労に強いですが、温度分布を最適化する必要があります。

設置とメンテナンスの面では、U字型素子は垂直吊りに適しており、設置は簡単ですが、冷端接触に注意する必要があります。W字型素子は正確かつ対称的に設置する必要があり、メンテナンスは複雑ですが、大型炉に適しています。直棒は設置が柔軟ですが、たわみを防ぐために均等に支える必要があります。製造プロセスは、3つの構造に同様の影響を及ぼします。ホットプレスと焼結により密度（98%近く）を向上させることができ、表面コーティング（SiCやAl₂O₃など）により耐酸化性と耐熱衝撃性を高めることができます。選択する場合、U型は小型高精度炉に適しており、W型は大型均一加熱炉に適しており、直棒型は長距離線状加熱に適しています。炉の設計、電力要件、熱サイクル周波数に応じて総合的に検討する必要があります。

3.2 MoSi₂発熱体の寸法設計（代表的なものは Φ6/12 と Φ9/18）

ニケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、その性能を最適化する鍵であり、加熱効率、温度分布、耐熱衝撃性、および耐用年数に直接影響します。MoSi₂発熱体のサイズは、通常、ホットエンドとコールドエンドの直径と長さ、およびホットエンドとコールドエンドの比率によって決まります。一般的な仕様には、Φ6/12（ホットエンド直径 6 mm、コールドエンド直径 12 mm）と Φ9/18（ホットエンド直径 9 mm、コールドエンド直径 18 mm）があります。これらのサイズ設計は、高温酸化雰囲気での効率的な加熱と長期安定性を確保するために、炉のサイズ、電力要件、熱サイクル周波数、および設置方法に基づいて総合的に決定する必要があります。Φ6/12仕様は、中小型炉（実験室用ボックス炉、セラミック焼結炉など）に適しています。ホットエンドの直径が小さく、電力密度が高いため、急速加熱と集中加熱が必要な用途に適しています。Φ9/18仕様は、大型炉（ガラス溶解炉、工業用熱処理炉など）に適しています。ホットエンド径が大きく、出力密度はやや低くなります（通常 15～20W/cm²）。しかし、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

より均一な温度分布と高い機械的強度を実現し、大面積または高負荷の加熱シナリオに適しています。

サイズ設計の核心は、ホットエンドとコールドエンドの電熱特性と機械特性のバランスをとることです。ホットエンドの直径は、抵抗と加熱電力を決定します。小さいホットエンド（6 mm など）は抵抗が高く、高電力密度の用途に適していますが、耐熱衝撃性と機械的強度が低くなります。大きいホットエンド（9 mm など）は抵抗が低く、電力密度は中程度ですが、耐熱衝撃性と寿命は優れています。コールドエンドの直径は通常、ホットエンドの直径（6/12 または 9/18 など）の 1.5～2 倍で、導電性の高い材料（アルミニウムやタングステンなど）をドーピングすることで抵抗率を低減します（室温で約 $0.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）。これにより、コールドエンドの温度が 400°C 未満に保たれ、過熱や劣化を防止します。ホットエンドの長さ（通常 100～1000 mm）は、炉の深さと加熱面積に応じてカスタマイズする必要があります。短すぎると熱が集中し、長すぎると温度ムラが発生します。冷端の長さ（通常 50～300 mm）は、電源との安定した接続を確保し、高温端から低温端への熱伝導を防ぐために、炉壁を貫通するのに十分な長さが必要です。

サイズ設計では、 MoSi_2 の熱力学特性も考慮する必要があります。その熱伝導率（室温で約 45 W/(m·K)、1500°C で約 15 W/(m·K)）と熱膨張係数（室温～1000°C で約 $8.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ）は、熱応力の分布に影響します。直径の小さいホットエンド（6 mm など）は、急速な熱サイクル中に熱応力が集中しやすく、特に MoSi_2 の低温脆性段階（破壊靱性は約 2～3 MPa·m^{1/2}）でマイクロクラックが発生します。直径の大きいホットエンド（9 mm など）は、熱応力をより適切に分散させ、耐熱衝撃性を向上させることができます。準備プロセスは寸法精度に非常に重要です。ホットプレスと焼結により、部品の密度（98%に近い）と寸法の均一性を確保し、微細欠陥を減らすことができます。表面コーティング（SiC や Al_2O_3 など）は、耐酸化性と耐熱疲労性を高め、寸法設計の信頼性を高めます。実際の用途では、炉の種類や運転条件に合わせてサイズを最適化する必要があります。例えば、Φ6/12 は高精度実験室用炉に適しており、Φ9/18 は大型工業用炉に適しています。表面の粉化を防ぐため、400～700°C の「ベスト」温度域を急速に通過しないようにする必要があります。

3.3 熱場と冷端構造の最適設計

MoSi_2 発熱体の熱場とコールドエンド構造の最適化設計は、効率的な加熱、均一な温度分布、長寿命を実現するための鍵です。熱場設計は、炉内の温度分布がプロセス要件（セラミック焼結の±5°C精度など）を満たすことを目的としており、ホットエンドのレイアウト、形状、電力密度を最適化することで実現します。 MoSi_2 の熱伝導率（1500°C で約 15 W/(m·K)）と正温度係数抵抗率（1500°C で約 $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）は非常に高く、 $\Omega \cdot \text{cm}$ では、熱場設計がホットエンドの数と間隔を正確に一致させる必要があります。たとえば、U 字型要素のホットエンド間隔（20～50 mm）は小型炉の集中加熱に適しており、W 字型要素の複数のホットエンド間隔（30～60 mm）は大型炉の均一加熱に適しています。熱場の最適化には、熱放射と対流も考慮する必要があります。ホットエンドの表面積と配置（対称配置など）は、熱分布に直接影響し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。ホットエンドの数を増やしたり、スパイラル素子を使用したりすることで、熱場の均一性を向上させることができますが、製造の複雑さが増します。電力密度設計は適度に抑える必要があります（1700℃で 15~25W/cm²）。電力密度が高すぎると、局所的な過熱が発生し、SiO₂保護膜の安定性が低下する可能性があります。

コールドエンド構造の最適化は、コールドエンド温度（通常 400℃以下）を下げ、電気接続の安定性と部品寿命を向上させることを目的としています。コールドエンドには、抵抗率（約 $0.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）を下げるために高導電性材料（アルミニウムなど）がドーピングされており、発熱を抑えています。また、直径（12~24mm）はホットエンドの 1.5~2 倍で、放熱性を高めています。コールドエンドの長さ（50~300mm）は、炉壁を通過して低温域に入り、電源に接続できる長さが必要ですが、長すぎると材料費が増加する可能性があります。コールドエンドとホットエンドの接続部は応力集中点となるため、熱応力やマイクロクラックを低減するために、段階的なドーピングや溶接技術（プラズマ溶接など）によるスムーズな移行が必要です。コールドエンドの表面には、接触導電性の向上と酸化防止のため、導電性コーティング（アルミニウムめっき層など）が施されることがよくあります。コールドエンドの設計を最適化するには、接続点の過熱や劣化を防ぐために、セラミック断熱スリーブや空気対流によってコールドエンドの温度を下げるなど、放熱環境を考慮する必要があります。

ホットエンドとコールドエンドの構造を協調的に最適化するには、炉の設計と運転条件を組み合わせる必要があります。熱場シミュレーション（有限要素解析など）は、温度分布を予測し、ホットエンドのレイアウトと電力配分を導きます。コールドエンドの放熱設計は、コールドエンド温度の安定性を確保するために、炉壁のシール材や断熱材（アルミナ繊維など）と調和させる必要があります。MoSi₂は低温脆性（破壊靱性値が約 2~3MPa·m^{1/2}）を示すため、400~700℃の「ペスト」領域における急速な熱サイクルを回避し、非保護性酸化物の形成を防ぐための最適化設計が必要です。表面コーティング（熱膨張係数が約 $4.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ の SiC など）は、ホットエンドの耐酸化性とコールドエンドの耐腐食性を向上させることができます。実際のアプリケーションでは、熱フィールドの均一性とコールドエンドの接続状態を定期的に検査し、加熱および冷却速度（5~10℃/分）を調整することで、ホットフィールドとコールドエンド構造の長期安定性を確保し、半導体熱処理やガラス溶融などの需要の高いアプリケーションに対応できます。

3.4 電気接続とサポートシステムの設計

MoSi₂発熱体の電気接続と支持システムの設計は、発熱体の安定性、加熱効率、および耐用年数に大きく影響します。電気接続システムは、局所的な過熱や電力損失を防ぐために、コールドエンドと電源間の低抵抗接触を確保する必要があります。同時に、支持システムは機械的な支持を提供し、熱膨張を許容し、熱応力と亀裂のリスクを低減する必要があります。MoSi₂のコールドエンド抵抗率（室温で約 $0.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）は、ホットエンド（ $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）よりもはるかに低く、導電性はアルミニウムめっきまたは高導電性材料（タングステンなど）のドーピングによって最適化されます。電気接続では通常、高導電性クランプ（銅やアルミニウム合金など）を使用してコールドエンドを固定します。クランプの表面は、酸化を防ぎ、接触抵抗が

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.01Ω 未満であることを保証するために、ニッケルまたは銀でメッキする必要があります。接続点には適切な締め付け力（通常 5～10 N/cm²）を加える必要があります。締め付けがきつすぎると MoSi₂ の脆性破壊（破壊靱性は約 2～3 MPa·m^{1/2}）を引き起こす可能性があります、締め付けが緩すぎるとアーク放電や過熱が発生する可能性があります。

では、電源の種類と制御システムも考慮する必要があります。MoSi₂ コンポーネントは比例制御または位相制御電源に適しており、非比例スイッチングやコンポーネントへの「突然の」電源損傷を回避するために、電流制限機能（最大電流密度≤10 A/mm²）を備える必要があります。電圧レギュレータとトランスは、入力（通常 20～100 V）を安定化し、MoSi₂ の正の温度係数抵抗率変化（1500℃で約 4.5×10⁻⁵）に一致させることができます。Ω·cm）。接続点の劣化を防ぐため、冷端接続部には放熱装置（空冷または水冷ジャケットなど）を備え、冷端温度を≤400℃に保つ必要があります。ケーブルは耐熱性（ニッケル基合金ケーブルなど）を備え、冷端サイズに適合して過度の接触抵抗を回避する必要があります。接続の信頼性を向上させるために、導電性ペーストまたはアルミ箔ガasketを使用して接触導電性を高めることができます。

支持システムの設計では、MoSi₂ 要素の機械的安定性と熱膨張の自由度を確保する必要があります。一般的な支持材料は、MoSi₂ の熱膨張係数（8.1×10⁻⁶ K⁻¹）と一致する高純度アルミナまたは酸化ジルコニウム（ZrO₂）であり、熱応力を低減します。支持形態には、クランプ、吊り下げフック、支持ビームなどがあります。垂直吊り下げは U 字型および W 字型の要素に適しており、水平支持は直線ロッド要素に適しています。支持部は、MoSi₂ が高温で膨張（1500℃で約 0.8% の線膨張）して応力集中を回避できる柔軟な構造として設計する必要があります。支持面は、MoSi₂ 表面の SiO₂ 保護膜の摩耗を防ぐために滑らかである必要があります。また、サポート システムは、炉の断熱材（アルミナ繊維など）と連携して、高温端が加熱ゾーンに露出され、低温端が低温ゾーンに位置するようにする必要があります。

電気接続部とブラケットシステムの協調設計は、動作環境と熱サイクルの頻度を考慮する必要があります。400～700℃の「ベスト」領域を急速に通過することで、非保護酸化物の形成を防ぎ、接続部とブラケット表面を保護します。クランプの接触状態、ブラケットの摩耗、コールドエンド温度を定期的に点検し、接続部の酸化物を清掃し、クランプ力を調整することで、システムの寿命を延ばすことができます。表面コーティング（SiC や Al₂O₃ など）は、コールドエンドの耐腐食性とブラケットの耐久性を向上させることができます。実際のアプリケーションでは、高温酸化雰囲気下での MoSi₂ 発熱体の安定した動作を確保するために、炉の種類（管状炉、箱型炉など）と用途（セラミック焼結、金属熱処理など）に応じて電気接続部とブラケットシステムをカスタマイズする必要があります。

3.5 端子構造と接続方法

化モリブデン（MoSi₂）発熱体の端子構造と接続方法は、その電気的性能、機械的安定性および耐用年数に重要な影響を及ぼします。端子は通常、電力システムへの接続を担う冷端部分を指します。低抵抗接触、高導電性、高温耐腐食性を確保しながら、熱膨張と機械的ストレスに耐えなければなりません。MoSi₂ 冷端の抵抗率（室温で約 0.5×10⁻⁵ Ω·cm）は、高導電性材

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

料をドーピングすることにより、ホットエンド（室温で約 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）よりも大幅に低くなっています。また、その直径は通常、ホットエンドの 1.5～2 倍（ $\Phi 6/12$ または $\Phi 9/18$ 仕様など）であり、発熱を抑えて冷端温度を 400°C 未満に保ちます。端部構造の設計では、コールドエンドとホットエンド間の遷移領域を最適化することで、応力集中を軽減し、特に MoSi_2 の低温脆性段階（破壊靱性は約 $2 \sim 3 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）におけるマイクロクラックの発生を防ぐ必要があります。一般的な端部構造には、直線、曲線、テーパ状の遷移タイプがあります。直線状のコールドエンドは、U 字型および直線状のロッドエレメントに適しています。曲線状のコールドエンド（ 90° ベンドなど）は、W 字型またはスペースが限られた炉に適しています。テーパ状の遷移タイプは、直径を緩やかに変化させることでホットエンドとコールドエンド間の接続を滑らかにし、熱応力を低減します。

接続方法には、主にクランプ接続、溶接接続、ボルト接続があります。クランプ接続は最も一般的な方法です。高導電性クランプ（銅またはアルミニウム合金、表面にニッケルまたは銀メッキなど）を使用してコールドエンドを固定します。接触抵抗は 0.01Ω 以下に制御する必要があります。クランプ力は中程度（ $5 \sim 10 \text{N}/\text{cm}^2$ ）である必要があります。締め付けがきつすぎると MoSi_2 の脆性破壊が発生する可能性があります、緩すぎるとアーク放電や局所的な過熱が発生する可能性があります。接触導電性を高めるために、コールドエンドの表面にアルミニウムコーティングまたは導電性ペーストを塗布することができます。溶接接続は、プラズマ溶接または抵抗溶接によってコールドエンドを導電性ジョイント（ニッケルベース合金など）に接続します。高精度の用途に適していますが、ホットエンドの劣化を避けるために、溶接プロセス中に温度を制御する必要があります。ボルト接続は、大型工業炉に適しています。コールドエンドは、耐高温ボルトとガスケットで固定されます。取り付けは簡単ですが、接触抵抗が若干高くなります。緩みがないか定期的に点検する必要があります。接続方法は電源システムに適合している必要があります。 MoSi_2 コンポーネントは、非比例スイッチによるコンポーネントの損傷を防ぐため、比例制御または電流制限機能（最大電流密度 $\leq 10 \text{A}/\text{mm}^2$ ）を備えた位相制御電源の使用を推奨します。

端子構造と接続方法の最適化には、熱サイクルと環境要因を考慮する必要があります。頻繁な熱サイクルは、コールドエンド接続部に熱応力の蓄積を引き起こし、マイクロクラックや接触抵抗の上昇を引き起こす可能性があります。特に $400 \sim 700^\circ\text{C}$ の「ベスト」温度域では、非保護酸化物（ MoO_3 と SiO_2 の混合物）が接続部を腐食させる可能性があります。耐久性を向上させるため、コールドエンドに SiC または Al_2O_3 保護層（熱膨張係数はそれぞれ約 $4.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ と $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ）をコーティングすることで、耐酸化性と耐腐食性を高めることができます。空冷やセラミック絶縁スリーブなどの放熱設計により、コールドエンドの温度を低く抑え、接続部の寿命を延ばすことができます。実際のアプリケーションでは、クランプまたははんだ接合部の完全性を定期的に確認し、酸化物を洗浄し、クランプ力を調整することで、端子接続の長期安定性を確保できます。端部構造と接続方法の設計は、炉の断熱材（アルミナ繊維など）やブラケットシステムと連携して、コールドエンドが低温ゾーンに配置され、セラミック焼結やガラス熔融などの高温アプリケーションの信頼性要件を満たすようにする必要があります。

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

3.6 製品カスタマイズ設計のポイント

MoSi₂発熱体のカスタマイズ設計は、構造、サイズ、材料改質、動作条件の包括的な最適化を伴う、特定の炉タイプおよびプロセス要件を満たすための鍵となります。カスタマイズ設計では、効率的な加熱、均一な温度場、長寿命を実現するために、アプリケーションシナリオ（実験室用管状炉、工業用セラミック焼結炉、ガラス溶融炉、半導体熱処理炉など）に応じて、発熱体の形状、電力密度、温度範囲、設置方法を決定する必要があります。MoSi₂の熱力学的特性と正の温度係数抵抗は、カスタマイズ設計に柔軟性を提供しますが、低温脆性のため、設計では熱応力と機械的安定性を十分に考慮する必要があります。以下は、カスタマイズ設計の重要なポイントです。

まず、構造とサイズのカスタマイズは、炉の形状と加熱要件に一致する必要があります。U字型要素（ホットエンド直径 6~9 mm、長さ 100~500 mm）は小型炉の集中加熱に適しており、

W字型要素（ホットエンド長さ 200~1000 mm）は大型炉の均一加熱に適しており、スパイラルタイプは管状炉の高熱密度要件に適しており、直棒タイプは長距離線形加熱に適しています。ホットエンドとコールドエンドの直径比（Φ6/12 または Φ9/18 など）は、電力密度に応じて最適化する必要があります。ホットエンドの長さと間隔は熱場（有限要素解析など）でシミュレートして温度均一性（±5°C）を確保する必要があります。コールドエンドの長さ（50~300 mm）は、炉壁を通過して低温ゾーンに入るのに十分な長さである必要があります。特殊な炉タイプでは、非標準の形状（L字型や多重曲げ型など）が必要になる場合があります。熱応力の集中を減らすために曲げ半径を正確に制御する必要があります（通常 10 mm 以上）。

の純度（99.5%以上）は、耐酸化性と熱伝導率に直接影響します。高純度原料は、不純物（Fe や Al など）による粒界の脆化を軽減します。ドーピング改質（Y₂O₃や Al₂O₃の添加など）は、粒界強度を高め、耐熱衝撃性を向上させるため、高頻度の熱サイクル用途に適しています。表面コーティング（SiC や Al₂O₃など）は、SiO₂保護膜の寿命を延ばし、「プラーク」酸化に対する耐性を高めます。コーティングの厚さ（10~ 50μm ）は、動作温度と雰囲気に応じて最適化する必要があります。厚すぎると剥離が発生する可能性があり、薄すぎると保護効果が不十分になります。製造プロセス（ホットプレスや焼結など）では、密度（98%近く）を確保し、微細欠陥を低減し、機械的特性と熱力学的特性を向上させる必要があります。

第三に、動作条件のカスタマイズでは、温度、雰囲気、熱サイクル頻度を考慮する必要があります。MoSi₂部品の最高動作温度は、酸化雰囲気下では 1850°Cに達しますが、SiO₂膜の破損を防ぐために、還元雰囲気または真空環境では 1500°C以下に下げる必要があります。カスタマイズ設計では、雰囲気の種類（水分含有量、不純物含有量など）を明確にする必要があります。湿度の高い環境では、SiO₂膜が水和し、熱伝導率が低下する可能性があります。熱サイクル頻度の高い用途（半導体熱処理など）では、400~700°Cを急速に通過しないように、加熱および冷却速度（5~10°C/分）を最適化する必要があります。電力制御システムは、MoSi₂の抵抗

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

特性に合わせて比例制御電源を使用し、過負荷を防ぐために電圧レギュレータ（20～100V）と電流制限機能を備える必要があります。

最後に、設置およびメンテナンスのためのカスタマイズ設計は、炉の構造と調整する必要があります。垂直吊り下げは U 字型および W 字型の要素に適しており、水平支持は直棒型に適しており、ブラケット材料（熱膨張係数が約 $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ のアルミナなど）は、熱膨張（約 0.8%、1500℃）を許容するために MoSi₂ と一致する必要があります。電気接続には、接触抵抗が 0.01Ω 未満であることを保証するために、高伝導性クランプまたは溶接継手を使用する必要があります。カスタマイズ設計では、冷端温度、SiO₂ 膜の状態と接続点の完全性の定期検査、炉の不純物（アルカリ金属酸化物など）のクリーニングなどのメンテナンスガイドラインを提供する必要があります。熱場シミュレーション、材料の最適化、動作条件のマッチングを通じて、カスタマイズ設計は特定のアプリケーションの性能要件を満たし、高温環境での MoSi₂ 発熱体の耐用年数を延ばすことができます。



中ウォルフラム製造のモリブデンシリサイド発熱体

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

第 4 章 MoSi₂発熱体の製造プロセス

4.1 原材料の選択と配合の原則

ニケイ化モリブデン (MoSi₂) 発熱体は、原材料の選択と配合から始まり、その品質は発熱体の熱力学的特性、耐酸化性、および耐用年数に直接影響します。MoSi₂は、化学式 MoSi₂の金属間化合物です。高純度のモリブデン (Mo) とシリコン (Si) の原料から合成する必要があり、通常は粉末冶金によって粉末の形で製造されます。原材料選択の中核原則は、高純度（通常 $\geq 99.5\%$ ）と低不純物含有量を確保して、粒界弱化と非保護酸化のリスクを減らすことです。モリブデン粉末は 99.9%以上の純度が必要で、主要不純物 (Fe、Al、C など) の含有量は 0.01%未満である必要があります。これは、Fe と Al が粒界腐食を引き起こし、耐熱衝撃性を低下させる可能性があるためです。また、炭素不純物は炭化物を生成し、抵抗率に影響を与える可能性があります。シリコン粉末は、SiO₂保護膜の欠陥の原因となる酸素や窒素などの非金属不純物を避けるため、高純度 (99.9%以上) である必要があります。粒度分布も重要な要素です。モリブデン粉末とシリコン粉末の粒子径は通常 1~10 μm に制御されます。粒子が大きすぎると焼結ムラが生じる可能性があり、粒子が小さすぎると製造コストが増加します。

配合原理は MoSi₂の化学量論比 (Mo:Si=1:2 のモル比) に基づいており、モリブデンとシリコンの理論的な質量比は約 2.55:1 です。完全な反応を確実にするために、実際の比率は化学量論比からわずかにずれる場合があります。例えば、高温焼結中の揮発損失を補うためにシリコン含有量を 0.5~1%増加させます。ドーピングの修正は、性能を最適化するための重要な手段です。一般的に使用されるドーパントには、希土類酸化物 (Y₂O₃ など) が含まれます。粒界強度と耐熱衝撃性を高めるために La₂O₃ を 0.1~1 重量%添加するか、SiO₂膜の安定性を向上させるためにアルミナを添加します。ドーパントは、不純物の混入を防ぐため、高純度 (99.95%以上) である必要があります。原料の酸化を防ぐため、配合工程は不活性雰囲気 (アルゴンなど) または真空環境で実施する必要があります。混合の均一性は最終的な性能に大きく影響します。混合には通常、遊星ボールミルまたは V 型ミキサーが使用され、粒子の破損や汚染を防ぐためにボールミルの粉碎時間と速度が制御されます。

原材料の選択と配合は、製造プロセスとアプリケーションの要件も考慮する必要があります。たとえば、ホットプレス焼結では、密度 (98%近く) を向上させるために、より細かい粒子 (1~5 μm) が必要ですが、自己増殖高温合成 (SHS) では、コストを削減するためにわずかに大きい粒子 (5~10 μm) を受け入れることができます。

高精度アプリケーション (半導体熱処理など) の場合、超高純度の原材料 ($\geq 99.99\%$) を選択し、配合精度 ($\pm 0.1\%$) を厳密に管理する必要があります。品質管理プロセスには、原材料が設計要件を満たしていることを確認するための化学組成分析 (ICP-MS など) と粒度分布検出 (レーザー粒度分析装置など) が含まれます。合理的な原材料の選択と配合は、その後の成形と焼結の基礎となり、高温酸化雰囲気での MoSi₂発熱体の安定性と信頼性を確保します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2 粉末冶金と等方圧プレスプロセス

MoSi₂発熱体製造の中核プロセスであり、静水圧プレスと組み合わせることで、U字型、W字型、直棒型、螺旋型構造に適した高密度・高性能の発熱体を製造できます。粉末冶金プロセスは、原料混合、成形、焼結、後処理の4つの主要ステップで構成されます。その中でも、静水圧プレスは重要な成形技術であり、発熱体の寸法精度と微細構造の均一性を確保できます。MoSi₂の熱伝導率（1500℃で約 15 W/(m·K)）、熱膨張係数（約 $8.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ）、耐酸化性は、高密度（≥98%）と低欠陥率に依存します。粉末冶金と静水圧プレスを組み合わせることで、これらの要件を効果的に満たすことができます。

原料混合: 高純度モリブデン粉末とシリコン粉末を化学量論比（Mo: Si = 1: 2）またはわずかにシリコンを多く含む比率（シリコンを 0.5~1%増加）で均一に混合する混合プロセスで、通常は遊星ボールミルまたはV型ミキサーを使用して、不活性雰囲気（アルゴンなど）または真空環境で混合します。ボールミル媒体は高純度アルミナまたはジルコニアで、ボールと材料の比率は 2: 1~5: 1 に制御され、混合時間は 4~8 時間で、粒子が汚染物質を導入することなく均一に分散されるようにします。ドーバント（Y₂O₃など）Al₂O₃は 0.1~2 重量%の割合で混合段階に加えられ、均一な分散を確保するために粒子径を制御する必要があります。混合粉末はふるいにかけて凝集粒子を除去し、乾燥して水分を除去します。

等方圧成形: 等方圧成形（冷間等方圧成形、CIP）は、MoSi₂発熱体を成形する主な技術です。混合粉末を液体媒体（水や油など）中で均一な圧力をかけることで、U字型、W字型、直棒状などの所望の形状（成形体）に成形します。等方圧成形の利点は、均一な圧力と高い成形体密度であり、これにより、後続の焼結工程における収縮の不均一性を低減できます。成形型は通常、耐圧性があり、MoSi₂粉末と化学反応を起こさない柔軟なゴムまたはポリウレタン材料で作られています。プロセスパラメータには、圧力、保持時間、粉末充填の均一性などがあり、成形体に亀裂や剥離がないことを確認する必要があります。複雑な形状（螺旋状など）の場合は、セグメント成形や予備成形技術との組み合わせが必要になる場合があります。成形体の強度を向上させるために、少量の有機バインダーを添加することができます。これは、後続の予備焼結工程で除去されます。

焼結プロセス: 焼結は粉末冶金における重要な工程であり、MoSi₂グリーン体が高密度に達し、安定した正方晶α型結晶構造を形成することを可能にする。一般的な焼結方法には、ホットプレス焼結（HP）と無加圧焼結がある。ホットプレス焼結は、高性能 MoSi₂ 発熱体により適している。ホットプレス焼結は、真空または不活性雰囲気（アルゴン）中で、温度を 1600~

1800℃に制御し、圧力を 20~40 MPa に制御し、保持時間を 1~3 時間にして行う。焼結プロセス中、モリブデンはシリコンと反応して MoSi₂ を形成し、ドーバント（Y₂O₃など）は粒界結合を促進し、多孔性を低減する。焼結温度は正確に制御する必要がある。温度が高すぎると Si が揮発し、SiO₂膜の品質が低下する可能性がある。温度が低すぎると密度が不十分になり、熱伝導率と耐熱衝撃性に影響を与える可能性があります。コスト重視の用途には 1700~

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1900°Cの無加圧焼結が適していますが、密度が低いため、マイクロクラックの発生リスクが高まる可能性があります。

後処理: 焼結 MoSi_2 部品には、表面研磨、寸法調整、保護コーティングなどの後処理が必要です。表面研磨（ダイヤモンドホイールを使用）は、表面欠陥を除去し、熱応力集中のリスクを軽減します。寸法調整は、部品が設計仕様を満たすことを保証します。保護コーティングは、耐酸化性と耐プラーク酸化性を向上させるため、プラズマ溶射または化学蒸着（CVD）によって塗布されます。品質検査には、密度試験（アルキメデス法）、微細構造分析（SEM）、抵抗率測定などが含まれており、部品の性能がセラミック焼結、ガラス溶融などのアプリケーション要件を満たしていることを確認します。

粉末冶金および静水圧プレスプロセスの最適化には、コストと性能を総合的に考慮する必要があります。ホットプレスと静水圧プレスを組み合わせることで高密度部品を製造でき、高精度用途（半導体熱処理など）に適しています。一方、無加圧焼結は低コストで、大規模な工業炉に適しています。プロセス制御においては、非保護酸化物の形成を防ぐため、400～700°Cの「ベスト」温度域を避ける必要があります。高温酸化雰囲気下における MoSi_2 発熱体の安定性と信頼性を確保するため、原材料の純度、成形体品質、焼結パラメータを定期的に検査する必要があります。

4.3 高温焼結および後処理技術

高温焼結は、二ケイ化モリブデン（ MoSi_2 ）発熱体の製造における中核プロセスです。成形されたグリーン体を高密度（理論密度の 98% 以上）、優れた機械的特性、安定した正方 α 型結晶構造を備えた部品に変換し、熱伝導率、耐酸化性、耐熱衝撃性が高温用途の要件を満たすことを目指します。焼結プロセスは通常、酸化を防ぐために真空または不活性雰囲気（アルゴンなど）で行われます。一般的な方法には、ホットプレス焼結（HP）、無加圧焼結、自己伝播高温合成（SHS）などがあります。ホットプレス焼結は、高性能 MoSi_2 部品の主流プロセスです。

温度は 1600～1800°C、圧力は 20～40MPa、保持時間は 1～3 時間です。高温処理により、モリブデンはシリコンと完全に反応して MoSi_2 を形成し、ドーパントは粒界結合を促進し、多孔性を低減します。焼結温度は精密に制御する必要があります。温度が高すぎると Si が揮発し、表面 SiO_2 保護膜の品質が低下する可能性があります。一方、温度が低すぎると密度が不十分（<95%）となり、熱伝導率と耐熱衝撃性が低下します。

MoSi_2 部品の性能最適化には、表面研磨、寸法調整、性能試験などの後処理技術が不可欠です。表面研磨では、ダイヤモンド砥石またはアルミナ研磨材を用いて、焼結中に形成された表面欠陥（微細孔や焼結塊など）を除去し、熱応力集中を低減し、耐熱衝撃性を向上させます。寸法調整では、CNC 切削などの精密加工により、U 字型、W 字型、螺旋型などの構造の精度要件を満たす部品を設計仕様に適合させます。性能試験には、密度試験（アルキメデス法、目標 98% 以上）、微細構造分析、抵抗率測定などが含まれており、部品の電気的性能と熱的性能の一貫性を確保します。前酸化処理により、表面に緻密な SiO_2 保護膜を生成し、耐酸化性と抗「ベスト」酸化能を向上させます。後処理も不活性雰囲気下で実施する必要があり、400～700°C の温

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

度範囲を避けて非保護酸化物（ MoO_3 と SiO_2 の混合物）の生成を防ぐ必要があります。高品質の後処理により、高温酸化雰囲気下における MoSi_2 部品の安定性と寿命が大幅に向上し、半導体熱処理などの高精度アプリケーションのニーズを満たすことができます。

4.4 表面保護層技術

MoSi_2 発熱体の製造において重要な部分です。保護コーティングを施すことで、耐酸化性、耐熱衝撃性、耐腐食性が向上し、高温酸化雰囲気下での発熱体の寿命が延長されます。 MoSi_2 は 800°C 以上で自然に SiO_2 保護膜を形成しますが、極端な温度や頻繁な熱サイクルでは、 Si または MoO_3 の揮発により SiO_2 膜が薄くなることがあります。特に $400\sim 700^\circ\text{C}$ の「ベスト」温度域では、粉化が発生しやすくなります。表面保護層は、 SiO_2 膜の欠点を補うために、酸化物コーティング（ Al_2O_3 など）を施します。 ZrO_2 ）、炭化物コーティング（ SiC など）または複合コーティング（ Al_2O_3 - SiC など）です。

Al_2O_3 コーティング（融点約 2050°C ）は、プラズマ噴霧法または化学蒸着法（CVD）により、厚さ $10\sim 50\mu\text{m}$ で塗布されます。耐酸化性が高く、酸素拡散係数が低いため、セラミック焼結炉に適しています。 SiC コーティングは、反応焼結法またはCVDにより、厚さ $20\sim 100\mu\text{m}$ で塗布されます。耐熱衝撃性と耐摩耗性が向上しており、ガラス溶融炉に適しています。複合コーティングは、 Al_2O_3 - SiC など、複数の材料の利点を組み合わせたものです。高い耐酸化性と耐熱衝撃性を備え、複雑な作業条件に適したコーティングです。

コーティングの塗布プロセスは性能に大きな影響を与えます。プラズマ溶射法は厚く緻密なコーティングを形成できるため、工業規模の生産に適していますが、微細孔が発生する可能性があります。熱伝導率がわずかに低下します。CVD法は、均一で薄いコーティング（ $10\sim 30\mu\text{m}$ ）を生成し、高い密着性と低熱応力を実現できるため、高精度用途に適していますが、コストが比較的高くなります。コーティングの厚さは精密に制御する必要があります。厚すぎると熱膨張の不一致により剥離が発生する可能性があります。薄すぎると保護効果が不十分になる可能性があります。界面設計（ SiC 遷移層の追加など）により、コーティングと MoSi_2 基板間の接着性を向上させ、熱応力を低減できます。また、コーティングは高湿度や腐食性雰囲気（硫黄含有ガスなど）にも耐える必要があります。

Al_2O_3 コーティングは高湿度環境で水和する可能性があるため、プロセスパラメータを最適化する必要があります。品質検査には、コーティング厚さ測定（超音波またはSEM）、密着性試験（スクラッチ法）、耐酸化試験などがあり、コーティング性能を確保します。表面保護層技術の最適化は、アプリケーション環境との組み合わせによって実現されます。半導体熱処理炉では、汚染防止のため高純度CVDコーティングが求められ、ガラス溶融炉では耐熱衝撃性を高めるため厚い SiC コーティングが好まれます。コーティングの健全性を定期的に点検し、 $400\sim 700^\circ\text{C}$ の温度域を迅速に通過させることで、「ベスト」酸化やコーティングの劣化を防ぐことができます。将来的には、ナノ構造コーティングや多層複合コーティングによって MoSi_2 部品の表面性能がさらに向上し、より厳しい高温アプリケーション要件を満たすことが期待されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.5 溶接および端部処理技術

MoSi₂発熱体製造の最終段階であり、電源へのコールドエンド接続の安定性と電熱性能を確保するとともに、機械的および熱的ストレスに耐えられるように端部構造を最適化することを目的としています。MoSi₂コールドエンドには、抵抗率を下げるために高伝導性材料（アルミニウムやタングステンなど）がドーピングされています。直径はホットエンドの 1.5～2 倍で、過熱による劣化を防ぐために小さくする必要があります。溶接技術は、コールドエンドを導電性ジョイント（ニッケル基合金や銅合金など）に接続するために使用され、低い接触抵抗（<0.01Ω）と高い機械的強度を確保します。一般的な溶接方法には、プラズマ溶接と抵抗溶接があります。プラズマ溶接は、不活性雰囲気（アルゴンなど）で行われ、温度は 1200～1400℃に制御されます。均一で高強度の溶接部を形成できるため、高精度用途（半導体熱処理など）に適しています。抵抗溶接は、高電流を用いて冷端と接合部を急速に加熱します。コストは低いものの、溶接の均一性がやや劣るため、工業炉に適しています。溶接プロセス中は、熱端の MoSi₂結晶構造の劣化や SiO₂膜の損傷を防ぐため、過度の温度上昇を避ける必要があります。

端部処理技術には、冷端面処理、寸法トリミング、導電性コーティングの塗布が含まれます。冷端面は機械的に研磨され、酸化層や欠陥が除去され、クランプや溶接部との接触品質が向上します。寸法トリミングでは、CNC 加工またはダイヤモンドカットを使用して、冷端の直径と長さが設計公差を満たし、U 字型、W 字型、または直棒部品に適していることを確認します。導電性コーティング（アルミニウム層など、厚さ 5～20μm）は、電気めっきまたは溶射によって塗布され、冷端の導電性を高め、接触抵抗を低減し、酸化腐食を防止します。端部処理では、熱応力分布を平滑化し、マイクロクラックのリスクを低減するために、円錐遷移または勾配ドーピング技術を使用して、ホットエンドとコールドエンド間の遷移領域を最適化する必要もあります（MoSi₂ 破壊靱性は約 2～3MPa·m^{1/2}）。処理プロセスは、400～700℃の「ベスト」温度範囲を回避し、非保護酸化物の形成を防ぐために、不活性雰囲気中で実行する必要があります。

溶接と端部処理の最適化には、動作条件と設置方法を考慮する必要があります。頻繁な熱サイクルは溶接部または端部に応力集中を引き起こす可能性があり、溶接部の完全性と冷端温度を定期的にチェックする必要があります。耐腐食性と耐熱衝撃性を高めるために、冷端に保護コーティング（SiC または Al₂O₃、厚さ 10～50μm）を施すことができます。品質検査には、溶接強度試験（引張試験またはせん断試験）、接触抵抗測定、微細構造分析（SEM）が含まれ、端部の性能を確保します。実際の用途では、溶接と端部処理は、電気接続システム（銅クランプなど）やブラケット設計（アルミナサポート）と連携して、高温酸化雰囲気下での MoSi₂発熱体の長期安定性を確保し、セラミック焼結、ガラス溶融などの用途要件を満たす必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第 5 章 MoSi₂発熱体の性能試験

5.1 抵抗率と温度の関係試験

ニケイ化モリブデン (MoSi₂) 発熱体の重要な電熱性能パラメータであり、発熱効率、出力、温度制御精度に直接影響します。MoSi₂は正温度係数 (PTC) の抵抗率特性を持ち、温度上昇とともに抵抗率が上昇するため、高温で電力を適応的に調整でき、セラミック焼結やガラス熔融 (最高 1800~1850°C) などの高温用途に適しています。抵抗率と温度の関係をテストする目的は、異なる温度での MoSi₂の抵抗特性を定量化し、その電熱安定性を検証し、部品設計と動作パラメータの最適化のためのデータを提供することです。このテストは通常、データの信頼性を確保するために、高精度抵抗テスター (4 プローブ法など) と温度制御炉を使用して、実験室または工業炉で実行されます。試験方法は、MoSi₂発熱体 (U 型、W 型、共通規格 Φ6/12 または Φ9/18 など) を制御酸化雰囲気炉に入れ、徐々に温度を上げながら、室温 (25°C) から 1800°C までの範囲で抵抗率を測定することを含む。試験装置には、高精度直流電源 (定電流または定電圧モード、電流密度 ≤10A/mm²)、デジタルマルチメーター (精度 ±0.1%)、熱電対 (K 型または S 型、精度 ±1°C) が含まれる。試験中は、抵抗率に影響を与える非保護酸化物 (MoO₃ と SiO₂ の混合物) の生成を避けるため、400~700°C の「ベスト」温度範囲を素早く通過する必要があります。抵抗率 (ρ) は、 $\rho = R \cdot A / L$ の式で計算されます。ここで、 R は測定抵抗、 A はホットエンドの断面積、 L はホットエンドの長さです。試験環境は酸化雰囲気を維持し、湿度は 30%未満に保たれ、表面 SiO₂保護膜の安定性が確保されます。

MoSi₂ は室温で約 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ であり、温度の上昇とともに大幅に増加し、1000°C $\Omega \cdot \text{cm}$ で約 4.0×10^{-5} 、1500°C $\Omega \cdot \text{cm}$ で約 4.5×10^{-5} 、1800°C $\Omega \cdot \text{cm}$ で最大 4.8×10^{-5} となります。この正の温度係数特性により、MoSi₂ 素子は高温でも安定した出力を発揮しますが、過熱を避けるために冷端 (アルミニウムまたはタングステンでドーピングされ、抵抗率は約 $0.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) を低く保つ必要があることも意味します。試験結果によると、温度による抵抗率の変化は材料の純度と微細構造に影響されます。高純度 MoSi₂の抵抗率曲線はより安定しており、高密度部品の抵抗率変動は小さい。ドーピングによる改質により、抵抗率をさらに安定化させ、粒界散乱を低減することができる。試験では、熱サイクルが抵抗率に及ぼす影響も記録する必要があります。複数回の熱サイクルを経ると、抵抗率がわずかに増加する可能性があるため、長期安定性を評価する必要があります。試験における注意事項としては、機器の精度校正、安定したコールドエンド接続の確保 (接触抵抗 <0.01 Ω)、還元雰囲気または高湿度雰囲気の回避 (湿度 >70% では SiO₂ 膜の水和を引き起こす可能性があります) などが挙げられます。試験データは、抵抗率-温度曲線 (二次多項式など) をフィッティングすることで分析され、部品設計と電力制御システムを最適化します。実際のアプリケーションでは、抵抗率試験結果に基づいて MoSi₂ 部品の動作パラメータを決定し、高温酸化雰囲気における電熱性能と温度制御精度を確保します。

5.2 高温耐用年数と熱衝撃性能の関係に関する試験

高温耐用年数と熱衝撃性能は、MoSi₂発熱体の重要な性能指標であり、高温酸化雰囲気 (1800~1850°C) における信頼性と耐久性を左右します。高温耐用年数とは、発熱体が目標温度にお

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

いて、著しい性能低下（抵抗率のドリフト、マイクロクラックの伝播、 SiO_2 膜の破損など）を生じることなく連続的に動作できる時間を指します。一方、熱衝撃性能とは、急激な温度変化（熱サイクルや急冷・急速加熱など）におけるクラック発生に対する抵抗力を指します。

MoSi_2 は低温脆性と「ブランク」酸化により、熱サイクルによる損傷を受けやすい性質があります。高温耐用年数と熱衝撃性能の関係を試験することで、実際の使用条件（セラミック焼結、金属熱処理など）における発熱体の耐久性を評価し、材料と設計の最適化のための基礎を提供します。試験方法には、長期高温動作試験と熱衝撃サイクル試験があります。長期高温動作試験は、酸化雰囲気炉内で実施されます。 MoSi_2 素子（U型またはW型、 $\Phi 6/12$ または $\Phi 9/18$ など）を目標温度に置き、電力密度を $15\sim 20\text{W}/\text{cm}^2$ に制御し、 $1000\sim 5000$ 時間連続運転して、抵抗率の変化、表面 SiO_2 膜の状態、微細構造の変化を記録します。試験設備には、高温炉（精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ ）、抵抗試験機（4探針法、精度 $\pm 0.1\%$ ）、顕微鏡（SEM、クラックと膜層の分析）が含まれます。熱衝撃サイクル試験は、急速な加熱と冷却をシミュレートします。典型的な条件は、 $25\sim 1500^\circ\text{C}$ サイクル、加熱および冷却速度 $10\sim 20^\circ\text{C}/\text{分}$ 、 $100\sim 1000$ 回のサイクル、および「ペスト」酸化を回避するために $400\sim 700^\circ\text{C}$ を急速に通過することです。試験後、クラック数（光学顕微鏡、倍率 $50\sim 200$ 倍）、 SiO_2 膜厚および機械的強度変化（3点曲げ試験、破壊強度約 $200\sim 300\text{MPa}$ ）を評価した。

MoSi_2 部品の耐用年数は、 1500°C で 5000 時間以上、 1800°C で約 $1000\sim 2000$ 時間に達することがあります。耐用年数は SiO_2 膜の安定性によって左右されます。高温では、Siの揮発と MoO_3 の揮発により膜層が薄くなり（ $< 5\mu\text{m}$ ）、耐酸化性が低下し、抵抗率が $10\sim 20\%$ 増加して、性能が低下する可能性があります。高純度 MoSi_2 （ $\geq 99.5\%$ ）とホットプレス焼結部品（密度 $\geq 98\%$ ）は、不純物（Fe、Alなど）と気孔によって粒界の弱化と亀裂の発生が減少するため、耐用年数が長くなります。ドーピング修正（ Y_2O_3 、 $0.1\sim 1\text{wt}\%$ ）により、粒界強度が向上し、耐用年数が $10\sim 20\%$ 延長されます。耐熱衝撃性の観点から見ると、熱サイクル後のマイクロクラックは主にホットエンドとコールドエンドの接合部に発生します。W型部品はマルチホットエンド設計のためU型部品よりも耐熱衝撃性に優れており、直棒部品は直線構造のため耐クラック性に優れています。表面コーティングにより耐熱衝撃性が大幅に向上し、クラックの伝播（クラック密度を $30\sim 50\%$ 低減）と SiO_2 膜の剥離を低減できます。試験時の注意事項としては、酸化雰囲気の維持、高湿度（湿度 70% 超）および還元環境（ SiO_2 膜の破損の原因となる）の回避、熱電対および抵抗テスターの定期的な校正などが挙げられます。試験データは、寿命予測モデル（アレニウスモデルなど）や亀裂統計解析を通じて、 MoSi_2 部品の材料最適化（ドーピングなど）や構造設計（曲げ半径の最適化など）に役立ちます。実際の用途では、試験結果を用いてメンテナンス計画（亀裂や膜層の定期検査など）や動作パラメータを策定し、高温炉における MoSi_2 発熱体の長期的な信頼性と熱衝撃安定性を確保します。

5.3 酸化環境における安定性試験

酸化環境における安定性試験は、高温酸化雰囲気（ $1800\sim 1850^\circ\text{C}$ ）におけるニケイ化モリブデン（ MoSi_2 ）発熱体の長期性能を評価する鍵であり、表面の SiO_2 保護膜の形成と保持、抗酸化特性、微細構造の安定性に重点が置かれています。 MoSi_2 は、表面に緻密な SiO_2 保護膜を形成することで酸化雰囲気下で優れた耐酸化性を発揮しますが、高温下でのSiまたは MoO_3 の揮

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

発により、特に 400～700℃の「ブランク」温度域で膜層が薄くなることがあります。この温度域では非保護酸化が起こりやすく、 MoO_3 と SiO_2 の混合物が生成され、材料の粉碎につながります。安定性テストは、酸化環境における MoSi_2 素子の寿命、抵抗率の変化、表面状態を定量化し、セラミック焼結やガラス溶融などの高温用途に信頼性の高いデータを提供するように設計されています。

試験方法には、長期酸化暴露試験と周期酸化試験が含まれます。長期酸化暴露試験では、 MoSi_2 素子（U 型、W 型、 $\Phi 6/12$ 、 $\Phi 9/18$ など）を高温酸化雰囲気炉に入れ、温度を 1500～1800℃に制御し、電力密度を 15～20W/cm²に設定し、1000～5000 時間連続運転します。試験設備には、高温炉、抵抗試験装置（四探針法、精度±0.1%）、走査型電子顕微鏡（SEM）、X 線回折装置（XRD）などが含まれており、 SiO_2 膜厚（目標 10～20μm）、表面形態、相組成を分析します。サイクリック酸化試験は、実際の使用条件における熱サイクルをシミュレートする試験であり、25～1500℃または 25～1800℃の条件、加熱・冷却速度 5～10℃/分、サイクル回数 100～1000 回、そして「ブランク」酸化を回避するために 400～700℃を急速に通過させる。試験後、抵抗率の変化、 SiO_2 膜の完全性、クラック数、質量減少を評価した。

試験結果によると、 MoSi_2 部品は 1500℃の酸化雰囲気下で高い安定性を示し、寿命は 5000 時間以上、 SiO_2 膜は緻密な状態（厚さ 10～15μm）を維持し、抵抗率の増加は 10%未満です。高純度 MoSi_2 とホットプレス焼結部品（密度 98%以上）は、安定性が向上し、膜欠陥が少なく、質量損失率は 0.5mg/cm²/1000h 未満です。ドーピング改質（ Y_2O_3 、0.1～1wt %）は、 SiO_2 膜の密着性を高め、剥離を低減します。サイクリック酸化試験では、熱衝撃亀裂は主にホットエンドとコールドエンドの接続部に発生し、W 型部品はマルチホットエンド設計のため U 型よりわずかに優れていることが示されています。表面コーティング（ SiC や Al_2O_3 など、厚さ 10～50μm）は、安定性を大幅に向上させ、質量損失を 30～50%低減します。 SiO_2 膜の水和や腐食を防ぐため、試験は高湿度（湿度 70%超）や硫黄含有雰囲気を避ける必要があります。

5.4 発熱体の硬度試験

MoSi_2 発熱体の機械的特性を評価する重要な手段であり、摩耗、機械的ストレス、熱衝撃による亀裂成長に対する耐性を直接反映します。金属間化合物である MoSi_2 は高い硬度を有しますが、低温脆性のため、機械的衝撃や熱サイクル中に微小亀裂が発生しやすくなります。硬度試験は、 MoSi_2 部品の表面硬度と微細構造強度を定量化するように設計されており、製造プロセス（ホットプレス焼結など）やドーピング修正の最適化、そしてセラミック焼結や金属熱処理などの用途における機械的安定性要件を満たすための基礎を提供します。

試験方法はピッカース硬度試験を採用しています。ピッカース硬度計を使用して MoSi_2 素子（ホットエンドとコールドエンド）の表面に圧痕をつけ、圧痕の対角線の長さを測定し（精度 ±0.1μm）、硬度値を算出します。試験は室温で実施し、サンプル表面は酸化物層や不純物の影響を避けるために清潔でなければなりません。高温硬度試験では、高温硬度計を使用して実際の動作条件をシミュレートします。酸化を防止するため、不活性雰囲気（アルゴンなど）で実施する必要があります。硬度の均一性を評価するために、試験点はホットエンド、コールド

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

エンド、ホットエンド-コールドエンド遷移領域をカバーし、各領域で少なくとも 5 点とし、平均値を取得します（偏差<5%）。補助試験には、微細構造分析および亀裂伝播評価が含まれます。

MoSi₂ 部品の常温ビッカース硬度は 8-10 GPa ですが、高温での粒界滑りおよび軟化効果により、1500°C では約 4-6 GPa まで低下します。高純度 MoSi₂ およびホットプレス焼結部品（密度 ≥98%）は、気孔率が低い（<2%）ことと粒界欠陥が少ないことから、硬度が高くなります（10 GPa 近く）。ドーピング修正（Y₂O₃ または Al₂O₃、0.1-2 wt %）により、希土類酸化物が粒界の結合力を強化するため、硬度を 5-10% 増加させることができます。コールドエンドの硬度は、ホットエンドの硬度（約 7-9 GPa）よりわずかに低くなります。これは、アルミニウムまたはタングステンをドーピングすると結晶の強度が低下するためです。熱サイクル後、マイクロクラックの蓄積により硬度が 5~15% 低下する可能性があります。表面コーティングは表面耐摩耗性を大幅に向上させますが、コーティングの剥離により基材が露出する可能性があります。この試験では、マトリックス効果を回避するために、制御された押し込み深さ（サンプル厚さの 10%未満）が必要です。試験結果は、設置、運用、メンテナンス中の部品の機械的耐久性を評価するために使用されます。

5.5 耐酸化性と温度の関係に関する試験

耐酸化性と温度の関係試験は、MoSi₂発熱体の性能試験の中核を成す試験であり、異なる温度における酸化挙動、SiO₂保護膜の形成と安定性、材料の質量損失と抵抗率の変化を評価し、高温用途（ガラス溶融や半導体熱処理など）に信頼性の高いデータを提供することを目的としています。MoSi₂の耐酸化性は表面 SiO₂保護膜に依存しており、800°C以上では緻密な膜層を形成しますが、400 ~700°Cの「ベスト」温度域では非保護酸化物が発生しやすく、粉化を引き起こします。また、1850°C付近では Si の揮発により膜層が薄くなる可能性があります。この試験は、温度による耐酸化性の変化を定量化し、動作温度とメンテナンス戦略を最適化することを目的としています。

試験方法には、定温酸化試験と変温酸化試験があります。定温酸化試験では、MoSi₂素子（U型、W型、Φ6/12、Φ9/18 など）を酸化雰囲気炉に入れ、温度範囲 400~1800°C、運転時間 100 ~1000 時間、電力密度 15~20W/cm²で試験します。試験設備には、高温炉（精度±5°C）、精密天秤（精度±0.1mg）、質量減少率（mg/cm²/h）、SiO₂膜厚、相組成を測定するための SEM および XRD が含まれます。変温酸化試験は、25~1500°Cまたは 25~1800°C、加熱および冷却速度 5~10°C/分、50~500 サイクル、および 400~700°Cの急速通過の条件で熱サイクルをシミュレートします。試験後、抵抗率の変化（4プローブ法、精度±0.1%）、膜の完全性（SEM）、および亀裂密度（光学顕微鏡、倍率 50~200 倍）を評価しました。

試験結果によると、MoSi₂は 800~1500°Cで耐酸化性が最も優れ、SiO₂膜の厚さは安定しており、質量損失率は 0.2mg/cm²/1000h 未満、抵抗率の増加率は 10%未満です。400~700°Cでは、非保護酸化により質量損失率が 1~2mg/cm²/100h と高くなり、抵抗率が 20~30%増加するため、この範囲を迅速に通過する必要があります。1800°Cでは、Si の揮発が激しくなり、SiO₂

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

膜が薄くなり、質量損失率が $0.5 \sim 1 \text{mg/cm}^2/1000\text{h}$ に増加し、寿命が $1000 \sim 2000$ 時間に短縮されます。高純度 MoSi_2 とホットプレス焼結部品（密度 $\geq 98\%$ ）は、耐酸化性がより強く、膜欠陥が少なくなります。ドーピング改質により膜の密着性が向上し、質量損失率が $20 \sim 30\%$ 低減します。表面コーティングにより耐酸化性が大幅に向上し、特に 1800°C では質量損失率が $40 \sim 60\%$ 低減します。データの信頼性を確保するため、試験は高湿度や還元雰囲気を避ける必要があります。試験結果は、酸化反応速度論解析（放物線モデルなど）に基づき、動作温度（推奨 $1500 \sim 1700^\circ\text{C}$ ）やメンテナンス計画（膜層の定期点検など）の最適化に活用されます。

5.6 ロッド表面粗さと抵抗率の関係

ケイ化モリブデン（ MoSi_2 ）発熱体の電熱性能に影響を与える重要な要素であり、抵抗率と電流分布の均一性に直接関係しています。 MoSi_2 部品の表面粗さは、主に製造プロセス（ホットプレス、静水圧プレスなど）とその後の加工（研磨、サンドブラストなど）によって決まります。粗さの大きい表面は、局所的な電流集中、熱応力の不均一、 SiO_2 保護膜の形成の不均一性を引き起こし、抵抗率の安定性に影響を与える可能性があります。

表面粗さと抵抗率の関係をテストすることで、表面形態が電熱性能に与える影響を定量化し、製造プロセスと部品設計の最適化の基礎を提供することができます。特に、セラミック焼結やガラス溶融などの高精度温度制御シナリオに適しています。この試験方法では、表面粗さ計（プロファイロメーターや原子間力顕微鏡など、精度 $\pm 0.01 \mu\text{m}$ ）を用いて MoSi_2 ロッドの表面粗さパラメータ（ R_a 、 R_z など）を測定します。試験領域は高温端と低温端をカバーし、サンプル表面は不純物の干渉を避けるため清浄である必要があります。抵抗率試験は、4プローブ法（精度 $\pm 0.1\%$ ）を用い、室温から 1800°C の範囲で、異なる粗さのサンプルを組み合わせて測定します。試験環境は酸化性雰囲気であり、 $400 \sim 700^\circ\text{C}$ の「ベスト」温度域を速やかに通過させることで、非保護酸化物の形成を防ぎます。抵抗率（ ρ ）は、 $\rho = R \cdot A / L$ という式で計算されます。ここで、 R は測定抵抗、 A は断面積、 L は試験長さです。試験では、表面粗さが SiO_2 膜の形成に及ぼす影響（SEM 観察、倍率 $50 \sim 200$ 倍）と電流分布の均一性（赤外線温度計、精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ）を記録する必要があります。

MoSi_2 ロッドの抵抗率はより安定しており、変動範囲も小さくなります。これは、滑らかな表面によって局所的な電流集中と熱応力の蓄積が減少するためです。粗さの大きい表面では、表面欠陥によって粒界散乱が増大し、電流経路が不均一になるため、局所的に抵抗率が増加することがあります。研磨された MoSi_2 素子は、高温でも SiO_2 膜（厚さ $10 \sim 15 \mu\text{m}$ ）が均一で、抵抗率の変動が少ないため、高精度の用途に適しています。

サンドブラスト加工された表面や粗い表面は、熱サイクル中にマイクロクラックが発生しやすく、抵抗率の変動が大きくなり、長期安定性に影響します。このテストでは、機器精度の校正、コールドエンド接続と雰囲気条件の管理、 SiO_2 膜の水和を引き起こす高湿度（湿度 $> 70\%$ ）の回避が必要です。データは粗さ-抵抗率曲線をフィッティングすることで分析され、表面処理プロセス（化学研磨やプラズマ噴霧など）を最適化するために使用され、 MoSi_2 素子の電熱性能と温度制御精度が向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.7 ロッドコーティングの均一性が耐用年数に与える影響

MoSi₂発熱体（SiC、Al₂O₃、厚さ10～50μmなど）の表面コーティングは、耐熱衝撃性と耐腐食性を向上させる鍵となります。コーティングの均一性は、SiO₂保護膜の安定性、酸化速度、および素子の耐用年数に直接影響します。コーティングが不均一だと、局所的な耐酸化性が不十分になったり、熱応力が集中したり、剥離したりする可能性があります。また、高温酸化環境（セラミック焼結、半導体製造など）では、素子の動作時間が短くなります。コーティングの均一性が耐用年数に及ぼす影響をテストすることで、コーティング品質が部品の耐久性に及ぼす影響を評価し、コーティングプロセス（化学蒸着法やプラズマ噴霧法など）の最適化に役立つデータを提供することを目的としています。

試験方法には、コーティングの均一性検査と高温寿命試験が含まれます。コーティングの均一性は、走査型電子顕微鏡（SEM、精度±0.1μm）とX線分光計（EDS）を用いて分析し、コーティングの厚さ分布と組成の均一性（SiCのSi/C比、またはAl₂O₃のAl/O比）を測定します。サンプルには、CVDコーティング、スプレーコーティングなどの異なるコーティングプロセスを施したMoSi₂ロッドが含まれ、試験エリアはホットエンドとコールドエンドの遷移領域をカバーします。高温寿命試験は、温度範囲1500～1800℃、電力密度15～20W/cm²、運転時間1000～5000時間の酸化雰囲気炉で実施され、400～700℃の急速加熱により「blight」酸化を回避します。試験では、質量減少率（精密天秤、精度±0.1mg）、SiO₂膜の状態（SEM観察）、抵抗率の変化（四探針法、精度±0.1%）を記録します。補助試験として、コーティング密着性試験や耐熱衝撃性試験なども実施します。

高いコーティング均一性（厚さ偏差<5%）を有するMoSi₂部品の寿命は大幅に延長されます。これは、均一なコーティングがSiO₂膜の安定した形成を促進し、局所的な酸化と剥離を低減するためです。CVDコーティングは、高密度で密着性に優れているため、1800℃での寿命が長く、要求の厳しい用途に適しています。スプレーコーティングの厚さが不均一（偏差>10%）の場合、高温域と低温域の遷移領域で剥離が発生し、SiO₂膜が薄くなり、酸化劣化が促進され、寿命が短くなる可能性があります。また、均一なコーティングは、熱サイクルにおけるマイクロクラックの密度を低減し、耐熱衝撃性を向上させます。この試験では、雰囲気と加熱・冷却速度を制御し、高湿度や還元環境（SiO₂膜の破損につながる）を回避する必要があります。これらのデータは、コーティング厚さと寿命の関係を分析することで、コーティングプロセスの最適化とメンテナンス戦略（コーティングの完全性の定期検査など）に役立ち、高温酸化環境におけるMoSi₂部品の長期信頼性を確保します。

5.8 寿命と応力結合の関係

MoSi₂発熱体は、特に高温酸化雰囲気および頻繁な熱サイクルにおいて、熱応力、機械的応力、および環境応力の複合的な影響を受けます。熱応力は急速な加熱と冷却による温度勾配に起因し、機械的応力は設置または操作時の振動に起因し、環境応力は酸化性または腐食性雰囲気に関連しています。応力の複合的な影響により、微小亀裂の伝播、SiO₂膜の剥離、または抵抗率のドリフトが発生し、発熱体の寿命が短くなる可能性があります。寿命と応力の複合的な

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

影響を試験することにより、応力が MoSi₂ 発熱体の耐久性に与える影響を定量化し、設計（形状、ブラケットなど）および動作パラメータ（加熱および冷却速度など）を最適化するための基礎を提供し、セラミック焼結やガラス加工などの高温用途に適しています。

試験方法には、応力シミュレーションと寿命試験が含まれます。応力シミュレーションでは、有限要素解析（FEA）を使用して、高温・低温遷移帯の熱応力分布（MoSi₂ の熱膨張係数と熱伝導率に基づく）を評価し、機械的応力試験（3 点曲げ試験、精度 ±0.1 MPa）と組み合わせます。寿命試験は、酸化雰囲気炉内で実施され、温度 1500～1800℃、電力密度 15～20 W/cm²、運転時間 1000～5000 時間、熱サイクル条件 25～1500℃ で実施されます。試験サンプルには、U 字型および W 字型の MoSi₂ 素子（Φ6/12 または Φ9/18）が含まれ、いくつかの表面コーティング（SiC など）が施されています。試験では、質量減少率（精密天秤、精度 ±0.1mg）、クラック密度（SEM、倍率 50～200 倍）、SiO₂ 膜の状態、抵抗率の変化（四探針法）を記録します。また、微量腐食性ガス（SO₂ など）を導入することで環境ストレスを模擬し、寿命への影響を評価します。

MoSi₂ 部品の寿命に影響を与える主な要因です。急激な温度上昇と下降は、ホットエンドとコールドエンドの間の遷移領域に応力集中をもたらし、マイクロクラックの密度を高め、寿命を縮めます。W 型部品は、マルチホットエンド設計により応力分布が均一になり、U 型よりも寿命が長くなります。機械的応力（振動や不適切な設置など）は、亀裂の伝播を悪化させ、破壊靱性が低下し、寿命が短くなります。表面コーティングは応力カップリング効果を大幅に緩和し、均一なコーティングは熱応力による剥離を減らし、寿命を延ばします。ドーピング改質（Y₂O₃ など）は粒界強度を向上させ、応力感受性を低減します。環境応力（腐食性雰囲気など）は SiO₂ 膜の劣化を促進するため、雰囲気を厳密に管理する必要があります。試験には、校正済みの熱電対（精度 ±1℃）とクランプが必要です。データは、応力寿命モデル（ワイブル解析など）を通じて設計（曲げ半径の増加など）と動作パラメータの最適化を導き、高温および複雑な応力環境における MoSi₂ コンポーネントの長期信頼性を確保します。

5.9 ひび割れ、曲げ、端部アブレーションのメカニズム

ニケイ化モリブデン発熱体は、長期間の高温運転中に、ひび割れ、曲がり、端部摩耗などにより故障することがよくあります。これらの問題は、発熱体の性能安定性を低下させるだけでなく、加熱システム全体の安全な運転と耐用年数に直接影響を及ぼします。

割れ現象の多くは熱応力に関連しています。発熱体が高温環境で急激に加熱または冷却されると、材料の内層と外層の温度勾配が大きく、材料内部の熱膨張が不均一になりやすく、熱応力が集中しやすくなります。構造設計が不合理であったり、幾何学的寸法が非対称であったり、部品に微細な欠陥（気孔や介在物など）があったりすると、熱応力によって微小亀裂が拡大し、最終的にはマクロな亀裂が発生します。また、酸化プロセス中に形成されるシリコン酸化膜の厚さが不均一な場合、特に高温急冷時やシャットダウン冷却時に、応力差によって亀裂が発生することもあります。曲がりとは、サスペンションや支持構造が使用中に不安定な場合、または材料が重力や外部の機械的力によって高温で塑性変形を起こした場合によく発生します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MoSi₂は脆く塑性が低いセラミックですが、高温条件（1500℃以上）ではある程度の粘性流動を起こします。特に薄肉構造や長い片持ち梁構造は、高温下での自重作用により曲がりやすくなります。一度曲がりが生じると、再加熱時に亀裂が伝播するリスクも高まります。

MoSi₂発熱体の一般的な局所的な故障現象であり、主に電極接続部や高電流密度が集中する箇所に集中しています。この部位は、過度の接触抵抗、アーク破壊、熱蓄積、局所的な空気循環不足などにより、深刻な酸化や蒸発が発生することがよくあります。高温・高電流条件下では、MoSi₂表面に局所的なホットスポットが発生し、シリコンの揮発が増加し、保護膜構造が破壊され、アブレーションピットや熔融空洞が形成されます。さらに、端部処理が不十分な場合、例えば酸化膜の除去不足、溶接品質不良、接触面積不足などにより、アブレーションプロセスも加速されます。

上記の故障を遅らせたり回避したりするには、構造設計、設置プロセス、電気制御、使用環境などを最適化する必要があります。たとえば、合理的な支持方法を採用して熱応力の集中を減らし、加熱速度を制御して熱衝撃のリスクを減らし、端部の導電性接触構造を改善して接触抵抗を減らし、酸化膜の完全性を確保することで、部品の耐用年数を効果的に延ばすことができます。

5.10 微細構造解析と破壊モード解析

2 発熱体の故障メカニズムを理解するための中核的な手段であり、高温環境下における物理的、化学的、機械的変化の本質的な原因を材料本体レベルから明らかにすることができます。作業前後の発熱体の断面、表面、内部構造を顕微鏡で観察することで、結晶粒構造、相境界の変化、酸化膜の成長挙動、潜在的な微小亀裂の分布を特定することができます。

高温酸化環境下では、MoSi₂材料の表面に緻密な SiO₂ 保護膜が形成され、膜と基材の間には明確な界面が形成されます。しかし、長期使用中に高温振動や化学腐食が発生すると、界面剥離や多孔質酸化物層の形成を引き起こし、保護性能に影響を与える可能性があります。さらに、顕微鏡分析により、MoSi₂中に Mo₅Si₃などの微量の第二相粒子が存在することが明らかになることが多く、これらも異なる酸化度における全体的な構造安定性に一定の影響を与えます。

故障モード研究は、主に亀裂伝播経路、酸化皮膜破壊メカニズム、元素拡散傾向、相変化挙動に焦点を当てています。ミクロ分析は、走査型電子顕微鏡（SEM）やエネルギー分散型分光法（EDS）と組み合わせて行われることが多く、亀裂の発生源が主に粒界の弱結合領域であること、あるいはマクロ的な損傷が酸化応力によって誘起された細孔の連結によって引き起こされていることを明確に示します。さらに、異なる動作温度と動作時間で形成される酸化皮膜の厚さの違いを分析することで、酸化反応速度論を推測し、材料劣化速度モデルを構築することができます。

研究によると、ほとんどの故障は主に「酸化＋熱応力＋構造欠陥」の複合効果によって引き起こされます。つまり、材料は高温酸化下で保護膜を形成しますが、熱サイクル中の応力差によ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

って膜が破裂し、新たに露出した表面が酸化を継続することで応力集中と微小亀裂の拡大が起り、最終的には材料全体の構造が破壊されます。この周期的かつ段階的な蓄積パターンは、典型的な熱腐食疲労挙動です。

耐故障性を向上させるために、今後の研究では、 MoSi_2 マトリックスに微量添加元素（Al、Zr など）を導入して酸化膜の安定性を向上させるか、二相構造や傾斜構造設計を用いて熱応力を緩和することが考えられます。さらに、粒径を制御し、焼結プロセスを最適化し、密度を高めることで、微細構造の均一性を効果的に向上させ、欠陥率を低減し、全体的な耐故障性を向上させることができます。



中ウォルフラム製造のモリブデンサイド発熱体

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

第 6 章 MoSi₂発熱体の設置

6.1 インストール前の準備

MoSi₂発熱体を設置する際には、その後の操作がスムーズに行われるよう、また不適切な操作による発熱体の損傷や性能低下を防ぐために、体系的な準備が必要です。まず、発熱体の仕様、電圧レベル、電力パラメータ、寸法が、加熱装置の設計図および取扱説明書に従って、装置に適合していることを確認する必要があります。必要に応じて、モデル誤差によるシステムの動作への影響を防ぐため、物理的な比較を実施する必要があります。

第二に、加熱炉のキャビティ構造、支持装置、電極固定具、断熱材に損傷がないか確認し、特に設置場所が清潔で不純物がなく、良好な断熱性能を備えているかを確認します。炉内は湿気による高温酸化膜の劣化や短絡を防ぐため、乾燥した状態に保つ必要があります。

設置作業で使用する工具および補助材料も事前に準備する必要があります。セラミックブラケット、ステンレス製クランプ、トルクツール、絶縁ガasket、耐高温導電性材料などが含まれます。作業者は清潔な絶縁手袋を着用し、[MoSi₂](#)部品の加熱部に素手で触れることは固く禁じられています。油汚染による酸化膜の形成への影響を防ぐためです。

さらに、設置者には基本的な安全教育を実施し、部品の輸送および取り扱い時に遵守すべき操作手順、注意事項、および保護対策を明確にする必要があります。新規機器を初めて使用する場合は、空炉温度上昇試験を実施し、電気制御システムと炉体の熱膨張挙動が期待どおりであるかどうかを確認する必要があります。

6.2 詳細なインストール手順

MoSi₂発熱体の設置は、実際の運転時に良好な電氣的接触、熱的支持、および酸化防止性能を確保するために、標準手順に厳密に従って行う必要があります。標準化された設置プロセスの主な手順は次のとおりです。

最初のステップは位置決めの確認です。設備図面と部品識別に基づいて、各発熱体の設置位置を確認します。複数の発熱体を並列接続する場合は、電極の対称性とバランスに特に注意し、不均一な負荷による局所的な過熱を回避します。2 番目のステップは支持部の固定です。MoSi₂発熱体をセラミックブラケットまたは支持構造に配置し、加熱部が炉内空間の中心に位置し、遮蔽されないよう適切に位置を調整します。支持構造は、熱膨張時の発熱体の変形に適応し、機械的拘束による亀裂を防ぐために、ある程度の柔軟性を持つ必要があります。3 番目のステップは電極接続です。専用の電極固定具を使用して、導電端を電源リード線にしっかりと接続します。固定具は押し付けますが、部品の破損を防ぐため、押し付けすぎないようにしてください。接続面は清潔に保ち、必要に応じて高温導電性ペーストを使用して接触抵抗を改善することもできます。設置時には、アーク放電を防止するため、電極とケーブルを適切な絶縁材で絶縁する必要があります。4 番目のステップは検査と微調整です。すべての部品を接続した後、設置高さ、水平度、平行度を確認し、各部品に均等な応力がかかり、適切に配置されてい

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ることを確認します。特に、固定具が対称で均一であるかどうかを確認し、電流の不均一な分布を防ぎます。

ステップ 5、システムテスト：電源を入れる前に、マルチメーターまたは絶縁抵抗計を使用して、抵抗値が正常範囲内にあるかどうかを確認します。電源投入後、まず低電圧で短時間予熱テストを行い、異常な加熱、火花、異音などがいないかどうかを観察します。すべてが正常であることを確認した後、温度を段階的に上げます。ステップ 6、熱動作安定性：正式に生産する前に、完全な加熱-絶縁-冷却サイクルを実施して、コンポーネントの動作状態の安定性と機器の熱分布の均一性を検証することをお勧めします。異常現象が見つかった場合は、コンポーネントの不可逆的な損傷を回避するために、機械を直ちに停止して検査する必要があります。

ニケイ化モリブデン発熱体の初期動作時の故障率を効果的に低減し、長期にわたる安定した動作を確保して耐用年数を延ばし、高温装置の安全で効率的な動作のための良好な基盤を築くことができます。

6.3 インストールに関する注意事項

MoSi₂発熱体の設置にあたっては、操作ミスによる発熱体の損傷、炉の異常、システムの動作不安定化を防ぐため、いくつかの重要な点に特に注意する必要があります。まず、発熱体は脆いセラミック材料であるため、輸送および設置時には慎重に取り扱う必要があります。叩いたり、曲げたり、重力による衝撃を与えたりすることは厳禁です。特に、電極クランプを締め付ける際は、局所的な応力集中による発熱体の亀裂を防ぐため、過度のトルクをかけないでください。

第二に、部品の表面、特に加熱部は清潔に保つ必要があります。高温酸化挙動への影響を避けるため、グリース、水分、不純物との接触は厳禁です。設置作業全体を通して、部品の表面が人為的に汚染されないように、作業者は清潔な絶縁手袋を着用する必要があります。

さらに、電極とワイヤの接続においては、良好な接触と均一なクランプを確保し、過剰な接触抵抗による端部アブレーションや異常な温度上昇を防ぐ必要があります。同時に、部品間の間隔を一定に保ち、熱場の不均一性や電流の偏りによる過負荷や部品の焼損を防ぐ必要があります。さらに、設置環境の温度、湿度、清潔さにも特に注意する必要があります。炉内は埃や水分のない状態に保ってください。湿度の高い環境の場合は、高温運転中に水蒸気による故障や絶縁損傷を防ぐため、十分に乾燥させる必要があります。

6.4 安全操作仕様

MoSi₂加熱要素システムの安全で安定した動作を確保するために、オペレーターは次の安全規則を厳守する必要があります。電源を入れる前に、すべての配線が正しいこと、絶縁状態が良好であること、制御システムが正常に機能していることを確認してください。機器を操作する際は、絶縁手袋、保護眼鏡、保護服を着用してください。高温部や通電構造物に素手で触れることは固く禁じられています。急激な電源投入による熱衝撃を避けるため、部品はゆっくりと加熱する必要があります。特に初めて使用するときや長期間使用しなかった後に再起動

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

するときは、段階的に加熱することで、部品が徐々に温度環境に順応するようにする必要があります。運転中は、許可なく炉の扉を開けたり、部品の表面に触れたりしないでください。

点検・観察は、電源を切って十分に冷却してから行ってください。異常（火花、アーク、異音、局所的な発赤など）が見つかった場合は、直ちに電源を切って点検してください。無理な操作は厳禁です。部品や電極器具を交換する場合は、まず主電源を切り、残留電圧が放出されていることを確認し、動作環境が完全に安全な状態であることを確認してください。電気配線が緩んでいないか、クランプが老朽化していないか、炉内に炭素やほこりが蓄積していないかを定期的にチェックすることは、長期にわたる安全な運転を確保するための重要な対策です。

6.5 一般的な障害とメンテナンスガイド

使用中、モリブデンジシサイド発熱体では次のような典型的な障害が発生する可能性があります。保守担当者は基本的な判断力と処理能力を備えている必要があります。

端部焼損: 通常、電極接続部の局所的な溶融または黒化として現れます。原因としては、過度の接触抵抗、アーク放電、ケーブルの緩みなどが考えられます。クランプがしっかりと押し込まれているか、接触面が清潔であるかを確認し、焼損した部品は適切に交換してください。**表面ひび割れ:** 主に熱衝撃または機械的ストレスによって引き起こされます。メンテナンスの推奨事項としては、加熱速度の調整、支持構造の最適化、部品の微小ひび割れの定期検査などが挙げられます。

加熱ムラ: 部品間隔の不均一性、電力配分の不均一性、または個々の部品の性能低下が原因である可能性があります。加熱ゾーンを再配置し、各部品グループの抵抗値をテストする必要があります。**部品の破損:** 不適切な取り扱い、不均一な取り付け力、または長期間の過負荷が原因であることが多いです。操作記録を確認し、外力による干渉がないか確認し、新しい部品に交換する必要があります。**起動失敗:** システムが正常に加熱できない場合は、回路の故障、電源制御モジュールの異常、または部品の損傷が原因である可能性があります。電源入力、電極接触、制御出力を一つずつ確認してください。

部品の耐用年数を延ばすため、電極の接続がしっかりしているか、炉が清潔であるか、温度上昇が正常であるかなど、週1回の定期点検を実施することをお勧めします。高頻度運転の設備については、四半期ごとに包括的なメンテナンスを実施し、運転パラメータを記録して長期的な傾向分析を行う必要があります。

6.5.1 加熱要素の破損の原因と解決策

二ケイ化モリブデン (MoSi_2) 発熱体は、高温運転における一般的な故障モードであり、設備の運転安定性と生産効率に直接影響を及ぼします。破損は主に熱応力、機械的応力、材料欠陥、不適切な運転条件などの要因によって引き起こされます。金属間化合物である MoSi_2 は、硬度は高いものの破壊靱性が低い（約 $2\sim 3\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）ため、複雑な応力を受けると微小亀裂が発生しやすく、拡大して破損につながります。破損の原因を分析し、適切な対策を講じることで、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

部品の寿命を大幅に向上させることができ、セラミック焼結やガラス溶融などの高温プロセスに適しています。

破損の原因:熱応力集中: 急激な温度上昇と温度下降により、高温端と低温端の間の遷移領域に過度の温度勾配が生じます。熱膨張係数の差 (約 $8.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) によって高い熱応力が生じ、亀裂が発生します。頻繁な熱サイクルによってマイクロクラックの伝播が悪化します。機械的応力: 不適切な設置や動作中の振動によって、特に U 字型または W 字型のコンポーネントの曲げ部分で機械的応力が集中します。材料の欠陥: 多孔性 (密度 $< 98\%$)、粒界不純物 (Fe、Al など)、または製造プロセス中の不均一な粒径によって破壊靱性が低下し、欠陥に沿って亀裂が伝播しやすくなります。不適切な動作条件: 電力密度が高すぎると局所的な過熱が発生し、 $400 \sim 700^\circ\text{C}$ の「ベスト」温度範囲に長時間留まると、保護効果のない酸化物 (MoO_3 など) が生成され、材料の強度が弱まります。

解決策: 加熱および冷却速度を最適化します。加熱および冷却速度を $5 \sim 10^\circ\text{C}/\text{分}$ に制御し、

$400 \sim 700^\circ\text{C}$ をすばやく通過させ、熱応力を低減します。比例制御電源 (電圧 $20 \sim 100 \text{ V}$) を使用して、滑らかな温度曲線を実現し、ホットエンドとコールドエンド間の遷移領域での応力集中を軽減します。設置設計の改善: MoSi_2 の特性に合わせて高純度アルミナブラケットを使用して機械的応力を軽減します。クランプは適度に締め付けて、締めすぎや振動を回避します。W 型コンポーネントは、マルチホットエンド設計により応力分布がより均一になるため、大型炉に適しています。材料品質の向上: ホットプレス焼結 (密度 $\geq 98\%$) とドーピング修正 (Y_2O_3 、 $0.1 \sim 1$ 重量%) を使用して、粒界強度を最適化し、粒径を制御し、気孔と不純物を低減します。表面研磨により、亀裂の発生点が減少します。動作条件を標準化します。電力密度を $15 \sim 20 \text{ W}/\text{cm}^2$ に維持し、酸化雰囲気気を制御し、 SiO_2 膜にダメージを与える還元環境や高湿度環境を避けます。熱電対 (精度 $\pm 1^\circ\text{C}$) と電源システムを定期的に校正し、局所的な過熱を防止します。表面コーティング: SiC または Al_2O_3 コーティングを施すことで、耐熱衝撃性と強度を向上させ、ひび割れの進行を抑制します。CVD コーティングは密着性が高く (スクラッチ試験の臨界荷重が 3 kg 超)、より効果的です。

実施上の提案: 破壊解析は、SEM (倍率 $50 \sim 200$ 倍) による亀裂形態の観察と X 線回折 (XRD) による相組成分析と組み合わせることで、破壊原因を特定する必要があります。運転中の熱サイクル数と電力変化を記録し、寿命予測モデルを構築します。設計と運転パラメータを最適化することで、破壊リスクを $30 \sim 50\%$ 低減し、 MoSi_2 部品の寿命を $5,000$ 時間以上に延ばすことができます。

6.5.2 酸化皮膜剥離の原因と再生処理

MoSi_2 発熱体の SiO_2 保護膜は、酸化雰囲気下における酸化防止の鍵となります。剥離は基板の露出を招き、酸化劣化を加速させ、寿命を著しく短縮します。酸化膜の剥離は主に熱応力、コ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ーティング欠陥、動作環境、および長期経年劣化によって引き起こされます。酸化膜の剥離問題を試験・再生することで、部品の性能を効果的に回復させることができ、半導体製造やセラミック焼結などの高温酸化環境に適しています。

剥離の原因: 熱応力駆動: 急激な温度上昇・下降や頻繁な熱サイクルにより、 SiO_2 膜と MoSi_2 基板の熱膨張係数の差により高いせん断応力が生じ、膜層に亀裂や剥離が生じます。コーティング欠陥: 表面コーティングの厚さが不均一であったり、密着力が不十分（スクラッチ試験の臨界荷重 $< 2 \text{ kg}$ ）であったりすると、局所的な剥離が発生し、 SiO_2 膜の完全性が損なわれます。製造上の欠陥（気孔や亀裂など）も剥離のリスクを高めます。動作環境の影響: 高湿度（湿度 $> 70\%$ ）や腐食性雰囲気では、 SiO_2 膜が水和または化学腐食し、密着性が低下します。400～700℃の「プラーク」酸化により、保護効果のない MoO_3 が生成され、膜構造が破壊されます。長期劣化: MoSi_2 の使用限界に近い 1800℃では、 Si が揮発して SiO_2 膜が薄くなり、長期運転後に膜層にひび割れや剥離が発生します。

再生処理方法: 表面洗浄: 炉を停止した後、柔らかいブラシまたは圧縮空気を用いて剥離部の遊離酸化物を除去します。必要に応じて、希酸性溶液（pH 4～5）で軽く洗浄し、腐食性物質の残留を防ぐため、十分に乾燥させます。高温再生: SiO_2 膜の再生を促進するため、酸化雰囲気中で 1500～1600℃で 2～4 時間加熱します。「ベスト」酸化を防ぐため、400～700℃まで急速に加熱します。再コーティング: 剥離がひどい部分には、プラズマ溶射または CVD 技術を用いて SiC または Al_2O_3 を再コーティングし、均一な厚さを確保します。CVD コーティングは高密度であるため、需要の高い用途に適しています。運転パラメータの最適化: 加熱・冷却速度を 5～10℃/分に下げ、出力密度を 15～20W/cm²に制御し、局所的な過熱を防ぎます。比例制御電源と高精度熱電対（精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ）を使用し、安定した熱場を維持します。環境制御の改善: 炉内を酸化雰囲気中に保ち、湿度と腐食性ガス含有量を厳密に管理します。炉のシール部を定期的に点検し、湿気や汚染物質の侵入を防ぎます。

実施上の提案: 剥離解析では、SEM による膜形態観察と EDS による化学組成分析を行い、剥離メカニズムを特定する必要があります。再生後、 SiO_2 膜の回復効果を確認するために、抵抗率と質量減少率を試験する必要があります（精密天秤、精度 $\pm 0.1\text{mg}$ ）。

6.5.3 発熱体の日常メンテナンス方法

MoSi_2 発熱体は、耐用年数の延長、安定した運転の確保、メンテナンスコストの削減の鍵となります。メンテナンスは、 SiO_2 膜の完全性を維持し、応力による損傷を防ぎ、炉内のクリーンな環境を維持することに重点を置きます。これは、セラミック、ガラス、半導体などの高温用途に適しています。標準化されたメンテナンス方法により、破損、酸化皮膜の剥離、抵抗率のドリフトなどの故障リスクを軽減できます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

メンテナンス方法: 表面状態の定期点検: 500~1000 時間運転ごとに炉を停止し、MoSi₂素子（ホットエンドおよびコールドエンド）の表面を点検し、光学顕微鏡を使用して SiO₂膜の健全性、ひび割れ、剥離の兆候を観察します。軽くブラシで埃を取り除き、異常箇所を記録して寿命を評価します。炉の清掃: 毎月または 100 回の熱サイクルごとに炉を清掃し、圧縮空気または柔らかいブラシを使用して酸化物、金属不純物（Fe₂O₃など）、または揮発性堆積物（アルカリ金属化合物など）を除去し、SiO₂膜の汚染や腐食を防ぎます。運転条件の管理: 酸化雰囲気を維持し、400~700°Cを素早く通過させることで「ベスト」酸化を防ぎます。過熱や抵抗率のドリフトを防ぐため、電力密度とコールドエンド温度を監視します。電気接続の確認: 1000 時間ごとにクランプと電源接続を確認し、酸化物または炭化物の堆積物を除去して、良好な接触を確保します。比例制御電源と熱電対（精度±1°C）を校正して、電圧変動や温度制御の偏差を回避します。ブラケットと設置のメンテナンス: 高純度アルミナブラケットをチェックして、亀裂や変形がないことを確認し、MoSi₂の熱膨張と一致していることを確認します。クランプの締め付けを調整して機械的応力の集中を防ぎ、コネクタを定期的に潤滑します（高温潤滑剤を使用）。操作データの記録: 操作ログを確立して、熱サイクル数、温度曲線、電力密度、抵抗率の変化（4プローブ法で測定）を記録します。データ分析（ワイブルモデルなど）によって寿命を予測し、老朽化した部品を事前に交換します。表面コーティングの保護: SiC または Al₂O₃コーティングを使用している場合は、コーティングの完全性を定期的に確認し、必要に応じて再コーティング（CVD またはプラズマスプレー）を適用します。コーティングを損傷する機械的な傷や化学的な腐食（酸性洗剤など）を避けてください。

実施上の提案: 保守計画を策定し、オペレーターに標準化された方法で実施するようトレーニングを実施します。SEM と EDS を用いて不良サンプルを分析し、保守戦略を最適化します。炉内の雰囲気と清浄度を厳密に管理し、熱場シミュレーションと組み合わせて部品配置を最適化することで、保守コストを 20~30%削減し、MoSi₂部品が 1,500°Cで 5,000 時間以上安定して動作することを保証します。保守中は安全に注意してください。炉を停止した後は、温度が室温まで下がるまで待ってから電源を切り、感電や火傷を防ぎます。

6.5.4 発熱体の交換とリサイクル技術

発熱体の交換は、MoSi₂加熱システムの安定運転を確保するための重要な要素です。使用時間が長くなるにつれて、熱疲労、酸化損傷、機械的損傷などの要因により、発熱体は劣化し、場合によっては破損することもあります。設備の故障や生産中断を防ぐため、発熱体は適時に交換する必要があります。交換作業中は、安全性と設置品質を確保するために、操作手順を厳守する必要があります。

交換前に、まず炉の電源を切り、部品が安全な温度まで冷却するのを待ってください。熱応力による火傷や二次損傷を防ぐためです。分解中は強い引っ張りや衝突を避け、部品と電極固定具を慎重に分離することで、周囲の構造への損傷を防止します。分解した古い部品は、分類して保管し、その後のリサイクルと再利用に備えましょう。

モリブデン発熱体の応用において、リサイクルと再利用技術は極めて重要です。二珪化モリブデン材料自体の価値は高く、リサイクルはコスト削減につながるだけでなく、グリーン環境保

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

護の概念にも合致しています。一般的なリサイクルプロセスには、古い部品の回収、機械粉碎、化学処理、材料精製が含まれます。酸化物層と不純物を除去することで、高純度のモリブデンとシリコン元素が抽出され、新しい発熱体やその他のモリブデン系材料の再生に使用されます。

さらに、わずかに酸化されたが損傷のない部品は、表面洗浄と酸化皮膜の再生により引き続き使用できるため、寿命を延ばすことができます。高度なリサイクル技術には、真空還元、熱間等方圧成形（HIP）などのプロセスも含まれており、材料特性の回復を最大限に高めます。企業は、安全で効率的なリサイクルプロセスを確保するために、専門設備と技術者を備えた包括的なリサイクルシステムを構築する必要があります。

6.6 工業炉における一般的な設置方法

MoSi₂発熱体を工業炉に設置する方法は様々です。通常、炉の構造、プロセス要件、発熱体の仕様に応じて設計され、均一な加熱、高い効率、メンテナンスの容易さを実現します。以下に、代表的な設置方法をいくつかご紹介します。

吊り下げ設置: このタイプの設置方法は、雰囲気保護炉や真空炉で一般的です。発熱体は炉の上部または両側に吊り下げられ、断熱ブラケットを用いて固定されます。これにより、発熱体が自由に膨張し、炉壁や他の部品との接触を回避できます。この方法は、発熱体の交換やメンテナンスが容易で、迅速な発熱体交換が求められる作業環境に適しています。

埋め込み設置: 加熱体を炉の耐火物またはセラミックブラケットに直接埋め込み、安定した支持構造を形成します。この方法は安定性が高く、機械的衝撃の影響を受けにくいいため、高温で連続運転する工業炉に適しています。欠点は、交換が複雑で、耐火物の一部を分解する必要があります。

ブラケット固定設置: 特殊な金属またはセラミック製のブラケットを用いて、加熱体を炉内の様々な位置（例えば、底部、側壁、上部など）に固定します。ブラケットの設計では、熱膨張と断熱性能を考慮し、加熱体への均一な応力を確保する必要があります。この方法は大型の工業炉に適しており、正確なレイアウトと最適な熱分布を実現できます。

平置き設置: 平炉や焼鈍炉で一般的に使用される加熱プレートやプラットフォームなどの加熱エリアに部品を平らに置きます。平置き設置は均一な熱分布を実現しますが、部品が曲がりたり変形したりしないように、部品を十分に平坦にし、しっかりと支える必要があります。

コイル設置: 発熱体は螺旋状またはコイル状に配置され、円筒形または垂直形の窯に適しています。この方法は、スペースを節約し、加熱面積を拡大し、電力密度の調整を容易にします。

実際のアプリケーションでは、複雑なプロセスのニーズを満たすために、複数の設置方法を組み合わせることがよくあります。設計では、部品の熱膨張特性、電気絶縁要件、設置・取り外

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

しの容易さ、雰囲気の種類や温度勾配などの環境要因を十分に考慮する必要があります。さらに、設置作業中は、発熱体が電源にしっかりと接続され、絶縁が適切に行われていることを確認し、漏電や局所的な過熱を防止してください。定期的に設置状態を確認し、ブラケットやクランプを適時に調整することで、炉内の熱場が均一かつ安定していることが保証され、加熱効率と発熱体の寿命が向上します。



中ウォルフラム製造のモリブデンサイド発熱体

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

第 7 章 MoSi₂発熱体の試験基準と認証

7.1 発熱体の性能試験方法

MoSi₂発熱体は、その品質と信頼性を確保する上で重要な役割を果たし、電気特性、機械特性、熱特性、耐久性など、複数の主要指標の測定を網羅しています。まず、電気性能試験では、主に発熱体の抵抗値と温度係数を測定します。精密抵抗測定器を用いて、様々な温度環境下における発熱体の抵抗変化を試験し、電気性能の安定性と一貫性を評価します。抵抗値の均一性と直線的な変化は、発熱体の設計と使用において極めて重要です。

機械的特性試験には、主に硬度試験と曲げ試験が含まれます。硬度試験では通常、ビッカース硬度計またはロックウェル硬度計を用いて、加熱・冷却条件下での部品の硬度変化を測定し、材料の機械的強度と耐摩耗性を反映します。曲げ試験では、一定の機械的応力をかけて部品の弾性変形能力と破断点を観察し、機械的損傷に対する耐性を評価します。

熱性能試験には、熱膨張係数の測定と熱安定性試験が含まれます。熱膨張係数試験では、熱膨張計を用いて加熱プロセス中の部品の長さの変化を測定し、設計時に十分な熱膨張スペースが確保されていることを確認し、熱応力による損傷を回避します。熱安定性試験では、高温連続加熱実験を用いて部品の抵抗、形態、構造変化を観察し、高温環境における長期安定性を評価します。

さらに、耐酸化性試験は MoSi₂発熱体の耐用年数を評価する上で重要な指標です。模擬酸化環境下での長期加熱実験により、酸化膜の形成、厚さ、剥離を検出し、発熱体の耐酸化性を評価します。故障モード解析は、破壊解析と微細構造試験を組み合わせることで、発熱体の潜在的な弱点や故障メカニズムを特定するのに役立ちます。

これらの試験方法は相互に補完し、ニケイ化モリブデン発熱体の性能レベルを総合的に反映し、生産と応用に科学的根拠と技術的保証を提供します。

7.2 ISO、ASTM およびその他の規格の分析

国際標準化機構 (ISO) と米国材料試験協会 (ASTM) は、MoSi₂ 加熱素子の品質と性能を保証する上で重要な役割を果たす、製品品質、試験方法、安全規制などの側面を網羅した、加熱素子と関連材料に関する多数の規格を開発しました。

MoSi₂発熱体に関連する主な規格には、材料組成分析、寸法公差、機械的特性試験、環境適応性試験などがあります。例えば、ISO 9001 品質マネジメントシステム規格は、製造工程における品質管理の体系的かつ継続的な改善を保証します。ISO 22007 シリーズは、材料の熱膨張試験方法を規定しており、設計と使用の参考資料となります。電子セラミックスおよび耐熱材料に関する ISO 規格は、電気的特性と熱的特性の評価をカバーしています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM 規格は長い歴史があり、材料試験の分野で広く使用されています。ASTM E1131 規格は、MoSi₂コンポーネントの熱安定性と相変化挙動の決定に適した材料の熱分析の一般的な手順を規定しています。ASTM E384 規格は、微小硬度試験方法をカバーしており、硬度評価に広く使用されています。ASTM E1820 は、コンポーネントの破壊挙動の分析に役立つ破壊靱性試験のガイダンスを提供します。金属材料の抵抗率測定に関する ASTM B193 などの規格もあり、電気的性能試験の精度を確保しています。さらに、ISO と ASTM はどちらも、高温電気加熱装置の設計と操作の安全性をカバーする電気安全規格 IEC 60519 シリーズなど、工業炉の発熱体の安全仕様と性能要件に関する対応するガイドラインを持っています。これらの規格は、メーカーが国際市場の要件を満たす MoSi₂発熱体を設計する上で重要な指針となります。

実際のアプリケーションでは、企業は ISO 規格と ASTM 規格を組み合わせ、社内試験プロセスを開発し、製品が国際規格と顧客固有のニーズの両方を満たしていることを確認することがよくあります。試験装置の校正やオペレータの資格認定も、通常、関連規格に従って実施され、試験結果の信頼性と権威性を高めています。

7.3 環境適応性試験

環境適応性試験は、二珪化モリブデン発熱体が様々な動作環境で安定して動作できるかどうかを評価する上で重要な試験です。この試験では、主に温度、湿度、雰囲気組成、機械的振動などの異なる条件下での発熱体の性能をシミュレートします。まず、高温サイクル試験では、発熱体の熱膨張・収縮によって生じる熱応力が、加熱と冷却の繰り返しによって材料構造と性能に及ぼす影響を検出し、耐熱疲労性を検証します。湿熱環境試験では、高湿度条件下での使用をシミュレートし、発熱体表面の酸化皮膜の安定性と電気特性への影響を観察し、高湿度環境下における発熱体の絶縁不良や腐食の発生を検証します。さらに、雰囲気適応性試験では、酸化雰囲気、還元雰囲気、不活性雰囲気における発熱体の挙動をシミュレートすることに重点を置きます。炉内の雰囲気組成を制御することで、様々な雰囲気下における発熱体の酸化速度と耐酸化性能を検査し、複雑な動作条件下でも良好な耐用年数を維持できるようにします。機械的振動および衝撃テストでは、要素とその取り付け構造が輸送中および動作中の振動によって引き起こされる機械的損傷に耐えられるかどうかを検証します。

環境適応性テストは、実際のアプリケーションにおける発熱体の信頼性を完全に反映し、材料の選択、設計、メンテナンスに科学的根拠を提供し、環境要因による故障のリスクを軽減します。

7.4 故障モードと寿命予測方法

MoSi₂発熱体の損傷メカニズムを理解し、その寿命を延ばすための基礎となります。一般的な故障モードには、熱疲労割れ、酸化皮膜剥離、機械的応力による破壊、局所的なアブレーションなどがあります。故障した部品のマクロ観察とミクロ組織分析により、亀裂の発生位置と拡大経路を明らかにし、粗大粒化、気孔の増加、異常な酸化皮膜の厚さなど、故障前の材料変化を評価することができます。寿命予測では通常、加速寿命試験と理論モデルを組み合わせ、使

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

用します。加速試験では、動作温度の上昇、熱サイクル数の増加、機械的負荷の増加などにより、長期使用中に部品が遭遇する可能性のある損傷プロセスを迅速に再現し、故障データを収集します。これらのデータと破壊力学、熱力学、材料科学の関連理論を組み合わせることで、通常の動作条件下での発熱体の耐用年数を予測する数学モデルが確立されます。一般的に使用されるモデルには、アルレニウスの熱活性化モデルやコフィン・マンソン疲労モデルなどがあります。さらに、ワイブル分布などの故障データに基づく統計分析は、製品の信頼性と寿命分布特性を評価するのに役立ちます。寿命予測を通じて、メーカーは部品の設計と材料選択を最適化できると同時に、ユーザーに適切なメンテナンスと交換サイクルの推奨事項を提供して、故障率と運用コストを削減できます。

7.5 安全および電気コード要件

MoSi₂発熱体とそのシステムの安全かつ安定した動作を保証するための基盤です。発熱体の動作温度は非常に高く、大電流のスイッチングを伴います。感電、短絡、火災などの事故を防ぐため、関連する電気安全規格を厳守する必要があります。一般的に、発熱体の絶縁抵抗は規定値に達する必要があり、使用中は絶縁状態の定期的な検査を実施することで、絶縁の劣化による漏電を防止します。

電気接続部には、良好な接触と十分な機械的強度および耐熱性を確保するために、国家規格または国際規格に適合した端子、絶縁材料および接続プロセスを使用する必要があります。接地システムは、感電のリスクを効果的に低減するために合理的に設計する必要があります。電源システムには、過負荷保護、漏電保護、および短絡保護装置が装備され、異常な状況下では適時に電源を遮断し、人員と設備の安全を確保する必要があります。さらに、設置および保守担当者は、安全操作手順を遵守し、必要な保護具を装備する必要があります。高温作業エリアには、偶発的な接触や火傷を防止するために、警告標識と遮断設備を設置する必要があります。関連機器およびコンポーネントの CE 認証や UL 認証などの安全認証も、市場参入と安全性の保証をサポートします。



中ウォルフラム製造のモリブデンシサイド発熱体

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第 8 章 MoSi₂発熱体の応用

8.1 冶金産業における MoSi₂発熱体の応用

ニケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、優れた高温性能、良好な耐酸化性、安定した電熱特性のため、冶金業界の金属製錬、熱処理、高温焼結プロセスに広く使用されています。MoSi₂の熱伝導率、熱膨張係数、正温度係数抵抗率により、効率的で均一な加熱が可能になり、冶金業界の高温、精密温度制御、長寿命のニーズを満たしています。MoSi₂素子は、酸化雰囲気中で表面に形成される SiO₂保護膜により優れた耐酸化性を実現し、冶金炉の長期運転に適しています。一般的な MoSi₂素子構造（U 型、W 型、Φ6/12、Φ9/18 など）は、炉の種類やプロセス要件に応じてカスタマイズでき、金属製錬炉、熱処理炉、焼結炉で広く使用されています。

MoSi₂ 部品の応用を最適化するには、400～700℃の「疫病」温度範囲を避け、温度を急速に上昇および下降させて非保護酸化物（MoO₃と SiO₂の混合物）の生成を減らし、表面コーティング（SiC または Al₂O₃など）を組み合わせることで耐熱衝撃性と寿命を向上させる必要があります。

冶金業界において、MoSi₂発熱体は高出力密度、安定した温度制御、長寿命といった利点を有しています。設計の柔軟性により、箱型炉、トンネル炉、真空炉など、様々な炉種に対応し、様々な金属材料の加工ニーズに対応します。設置には、MoSi₂の熱膨張特性に適合し、機械的ストレスを軽減するために、高純度アルミナ製のブラケットが必要です。電気接続には、動作安定性を確保するために、低抵抗クランプと比例制御電源を使用する必要があります。MoSi₂発熱体を使用する場合は、SiO₂膜の破損を引き起こす還元や高湿度環境を回避するために、雰囲気制御にも配慮する必要があります。

8.1.1 金属の製錬と熱処理

MoSi₂発熱体は、主に高温製錬炉、焼鈍炉、焼入れ炉に集中しており、アルミニウム、銅、鋼、チタン合金などの金属材料の加工に使用されます。金属の製錬では、炉の温度を 1000～1600℃に精密に制御する必要があります。MoSi₂素子の正温度係数抵抗により、電力を適応的に調整し、安定した高温環境を提供できます。U 型および W 型の MoSi₂素子は、中小型の製錬炉でよく使用され、ホットエンドの長さは 100～500mm、電力密度は 15～20W / cm²です。アルミニウムの場合は 660℃、銅の場合は 1085℃などの融点に素早く到達し、均一な温度場を維持できます。焼鈍や焼入れなどの熱処理プロセスにおいて、MoSi₂素子は 1200～1500℃で安定した加熱を提供し、金属結晶粒の微細化と性能の最適化を実現します。例えば、鋼の焼鈍では 1200～1300℃での保持が必要ですが、MoSi₂素子の熱伝導性と耐熱衝撃性は、急速加熱と熱サイクルをサポートします。金属精錬および熱処理における MoSi₂エレメントは、高い耐酸化性と長寿命を特徴としています。酸化雰囲気下において、SiO₂保護膜は材料の劣化を効果的に防止し、1500℃における質量減少率は 0.2mg/cm²/1000h 未満です。表面コーティングにより、耐熱衝撃性と耐腐食性をさらに向上させることができ、微量硫黄または炭素を含む冶金雰囲気にも適しています。設置時には、U 型エレメントは垂直に吊り下げられ、W 型エレメントは大型炉の均一加熱に適しており、冷端はアルミニウムコーティングによって強化されています。運転中は、「ブランク」酸化を防止するため、400～700℃を急激に通過しないようにす

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

る必要があり、加熱・冷却速度は 5～10℃/分に制御されます。メンテナンスには、SiO₂膜の完全性と冷端の接続状態の定期的な点検、および炉内の不純物(酸化鉄など)の洗浄が含まれ、汚染を防ぎます。MoSi₂素子の限界は、SiO₂膜の破損を防ぐために、還元雰囲気または真空雰囲気下では動作温度を低くする必要があります。実用化においては、部品配置の最適化と熱場シミュレーションを組み合わせることで、金属精錬および熱処理の効率と品質を大幅に向上させることができます。

8.1.2 高温焼結プロセス

高温焼結プロセスにおける MoSi₂発熱体は、主に金属粉末冶金、セラミック複合材料、特殊合金の焼結に使用され、高性能鋼、チタン基合金、超硬合金の製造に広く使用されています。焼結プロセスでは、材料の緻密化と粒成長を促進するために、1300～1800℃の精密な温度制御が必要です。MoSi₂素子は高い出力密度と安定した温度制御を備えているため、理想的な選択肢です。W 型および直棒 MoSi₂素子は、均一な熱場を提供するために大型焼結炉でよく使用され、大型ワークピースに適しています。スパイラル素子（ホットエンド直径 4～9 mm）は、高精度焼結のニーズを満たす小型チューブ炉に適しています。MoSi₂の熱伝導率と正の温度係数抵抗は、焼結中の均一な熱分布を保証し、ワークピースの変形や亀裂を低減します。

高温焼結において、MoSi₂素子の耐酸化性は重要な利点です。SiO₂保護膜は 1500～1800℃（厚さ 10～15μm）で安定しており、質量損失率は 0.5mg/cm²/1000h 未満で、長期動作をサポートします。ドーピング改質（Y₂O₃など、0.1～1wt %）により粒界強度が向上し、表面コーティング（Al₂O₃など、厚さ 10～50μm）により耐熱衝撃性と耐腐食性が向上し、微量の揮発性不純物を含む焼結雰囲気に適しています。W 型素子は設置時に水平または垂直に吊り下げられ、高純度アルミナブラケットが熱応力を軽減します。電気接続には銅クランプを使用し、安定性を確保するために比例制御電源を使用しています。操作中は、非保護酸化物の形成を避けるために、温度を 400～700℃ に素早く通過させる必要があります。熱応力を減らすために加熱および冷却速度を 5～10℃/分にする必要があります（MoSi₂の破壊靱性は約 2～3 MPa·m^{1/2}）。高温焼結における MoSi₂部品は、雰囲気の影響を受けやすく、メンテナンスも重要です。硫黄や炭素を含む焼結雰囲気は SiO₂膜を腐食させる可能性があるため、酸素分圧と湿度を厳密に管理する必要があります。部品表面（膜層の SEM 観察）と冷端温度の定期的な検査、および炉内不純物（金属酸化物など）の洗浄は、耐用年数を延ばすのに役立ちます。熱場最適化（有限要素シミュレーションなど）は、温度均一性を確保し、焼結ワークピースの欠陥を低減します。MoSi₂部品は高性能であるため、航空宇宙部品、切削工具、耐摩耗材料などの高温焼結プロセスで広く使用され、製品品質と生産効率を向上させています。

8.1.3 熱処理装置

MoSi₂発熱体は、冶金業界の熱処理設備に広く使用されており、焼鈍炉、焼入れ炉、焼ならし炉、焼戻し炉など、金属材料の機械的性質、耐食性、加工性を向上させます。熱処理設備では、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

金属結晶構造の最適化と応力緩和を確保するために、温度の精密制御と均一な熱場が必要です。MoSi₂発熱体は正の温度係数抵抗率を有しており、1200～1500℃の範囲で安定した加熱が可能です。鋼、アルミニウム合金、銅合金、チタン合金などの材料の加工に適しています。U字型のMoSi₂発熱体は、ホットエンド長さが100～500mmの小型熱処理炉に適しており、集中加熱が可能です。少量生産に適しています。W字型および直棒型の発熱体は、ホットエンド長さが200～1000mmの大型連続熱処理炉に適しており、広い加熱面積をカバーし、温度均一性を確保できます。

熱処理装置におけるMoSi₂素子は、高い耐酸化性と頻繁な熱サイクルへの対応能力に優れています。酸化雰囲気下において、SiO₂保護膜は素子の長期安定性を確保し、熱処理工程における長期保温や急速な温度上昇・下降に適しています。表面コーティング（SiCやAl₂O₃など）は耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、複雑な冶金雰囲気にも適しています。設置時には、素子は高純度アルミナ製ブラケットで固定し、垂直吊り下げまたは水平支持により機械的ストレスを軽減します。電気接続には低抵抗クランプを使用し、比例制御電源により正確な温度制御を実現します。運転中は、「ブランク」酸化を防ぐために400～700℃を急速に通過させる必要があり、温度上昇・下降速度は5～10℃/分に制御されます。

メンテナンスには、SiO₂膜の定期点検、コールドエンド接続、炉内清掃などがあり、不純物汚染を防止します。MoSi₂元素の制限は、還元雰囲気下では使用温度を低くする必要があり、炉内の雰囲気を厳密に制御する必要があります。熱処理設備は、熱場の最適化と定期的なメンテナンスによって高い効率と製品品質を確保しており、自動車、航空宇宙、機械製造分野で広く使用されています。

8.2 セラミック産業における MoSi₂発熱体の応用

MoSi₂発熱体は、セラミック業界でセラミック焼成、釉薬処理、特殊セラミック材料の製造に広く使用されています。高い動作温度、耐酸化性、電熱安定性により、高温・高精度温度制御のセラミックプロセスのニーズを満たしています。MoSi₂素子は、表面SiO₂保護膜により酸化雰囲気中での安定性を維持し、セラミック焼成炉、釉薬焼成炉、特殊セラミック焼結炉に適しています。U字型、W字型、スパイラル型のMoSi₂素子は、炉の種類に合わせてカスタマイズされています。U字型は小型ボックス炉に適しており、W字型は大型トンネル炉に適しており、スパイラル型は管状炉での高精度焼結に適しています。設置には高純度アルミナブラケットを使用し、電気接続には低抵抗クランプを使用し、比例制御電源で精密な温度制御を実現します。操作は「ペスト」酸化を防ぐために400～700℃を急速に通過させる必要があり、加熱・冷却速度は5～10℃/分です。また、表面コーティングにより耐熱衝撃性と寿命が向上します。MoSi₂元素をセラミック業界に応用することで、焼成品質と生産効率が大幅に向上し、伝統的なセラミックスと先進的なセラミックスのニーズを満たすことができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.1 陶磁器の焼成と施釉

MoSi₂発熱体は、箱型炉、シャトル炉、トンネル炉などでセラミック焼成および施釉処理に使用され、日用陶磁器、建築用陶磁器、美術用陶磁器の製造に用いられています。セラミック焼成には、1000～1400℃での成形体の焼結と釉薬の溶融が必要です。MoSi₂素子の正温度係数抵抗は、安定した高温環境を提供し、セラミック成形体の緻密化と釉薬の光沢を確保します。U字型 MoSi₂素子は小型炉に適しており、W字型素子は大型連続焼成炉に適しており、均一な熱場を提供することでセラミックの割れや変形を軽減します。施釉処理では、釉薬の溶融と結晶化を制御するために、精密な温度制御が必要です。MoSi₂素子の熱伝導性は、急速加熱と断熱をサポートします。SiO₂保護膜は酸化雰囲気下でも安定しており、表面コーティングは耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、揮発性釉薬を含む焼成雰囲気に適しています。設置と運転には雰囲気と加熱・冷却速度の制御が必要であり、メンテナンスには部品表面の定期点検と炉の清掃が含まれます。MoSi₂部品は、セラミック焼成および釉薬塗布工程の効率と製品品質を向上させるため、セラミック製造において広く使用されています。

8.2.2 特殊セラミック材料の製造

MoSi₂発熱体は、特殊セラミック材料の製造における焼結炉やホットプレス炉に用いられます。アルミナ、ジルコニア、窒化ケイ素、炭化ケイ素などの先進セラミックスの製造に用いられ、航空宇宙、エレクトロニクス、医療分野で広く利用されています。特殊セラミックの焼結は、高密度かつ優れた性能を得るために、1400～1800℃の温度範囲で行う必要があります。MoSi₂発熱体は、高い出力密度と精密な温度制御能力を備えており、これらの要件を満たしています。W型およびスパイラル型の MoSi₂発熱体は、大型および小型の焼結炉に適しており、均一な熱場を提供し、材料欠陥を低減します。SiO₂保護膜と表面コーティングにより、高温酸化雰囲気下でも発熱体の安定性が確保されます。また、ドーピング処理により耐熱衝撃性が向上し、頻繁な熱サイクルにも適しています。設置には高純度アルミナブラケットを使用し、電気接続部は低抵抗接触を確保し、雰囲気と加熱・冷却速度を制御することで「ブランク」酸化を回避します。メンテナンスには、長期的な信頼性を確保するためのコンポーネントと炉の状態の定期的な検査が含まれます。

8.3 太陽光発電産業における MoSi₂発熱体の応用

ニケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、高温性能、耐酸化性、電熱安定性のため、太陽光発電産業のシリコンウェーハ製造や太陽電池製造装置に広く使用されています。MoSi₂素子は、精密な温度制御と均一な熱場を提供でき、太陽光発電プロセスの高温およびクリーン環境要件を満たします。酸化雰囲気中で表面に形成される SiO₂保護膜により耐酸化性を実現し、長期運転に適しています。U字型、W字型、直棒型の MoSi₂素子は、炉の種類に応じてカスタマイズされます。U字型は小型炉に適しており、W字型と直棒型は大型連続装置に適しています。設置には熱膨張特性に合わせて高純度アルミナブラケットを使用し、電気接続には低抵抗クランプを使用し、安定性を確保するために比例制御電源を使用しています。非保護酸化

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

物の形成を避けるために、動作は「ペスト」温度範囲を素早く通過する必要がある、表面コーティング（ SiC や Al_2O_3 など）は耐熱衝撃性と寿命を向上させます。

8.3.1 シリコンウェーハ製造における高温プロセス

MoSi₂発熱体は、シリコンウェーハ製造における高温プロセス、例えば単結晶シリコン引き上げ、多結晶シリコンインゴット casting、シリコンウェーハアニールなどに用いられます。これらのプロセスでは、シリコン原料の溶融、結晶成長の制御、結晶欠陥の除去などのために高温環境が必要です。MoSi₂発熱体は正の温度係数抵抗を有し、安定した加熱能力を提供します。直棒型および W 型 MoSi₂発熱体は、大型単結晶炉やインゴット炉に適しており、広い加熱面積をカバーして熱場の均一性を確保します。U 型発熱体は、局所的な高温要件を満たす小型アニール炉に適しています。SiO₂保護膜は酸化雰囲気下でも安定しており、表面コーティングは耐熱衝撃性と耐腐食性を向上させるため、シリコンウェーハ製造のクリーン環境に適しています。設置時には、発熱体は高純度アルミナブラケットで固定され、電気接続部は低抵抗接触を確保します。運転時には、酸化損傷を回避するために雰囲気と加熱・冷却速度を制御する必要があります。メンテナンスには発熱体表面と炉の清浄度の定期的な点検が含まれます。MoSi₂ 元素はシリコンウェーハ製造の結晶品質と生産効率を向上させるため、太陽光発電産業チェーンの上流で広く使用されています。

8.3.2 太陽電池製造装置

MoSi₂発熱体は、太陽電池製造装置の拡散炉、焼結炉、アニール炉で結晶シリコンおよび薄膜太陽電池の製造に使用されます。拡散プロセスでは、リンまたはホウ素をドーピングして PN 接合を形成するために高温が必要であり、焼結プロセスでは金属電極とシリコンウェーハを結合し、アニールプロセスではセルの性能を最適化します。MoSi₂素子は、これらのプロセスの要件を満たすために、正確な温度制御と均一な熱場を提供します。U 字型および螺旋型の MoSi₂素子は小型の拡散炉およびアニール炉に適しており、W 字型の素子は大型焼結炉に適しており、大面積加熱の安定性を確保します。SiO₂保護膜と表面コーティングは、酸化雰囲気での素子の長期動作をサポートし、耐熱衝撃性は頻繁な熱サイクルに適応します。設置には高純度アルミナブラケットを使用し、電気接続には比例制御電源を使用して正確な温度制御を実現します。作業は「ペスト」温度域を迅速に通過する必要がある、メンテナンスには SiO₂膜の点検と炉の清掃が含まれ、汚染を防ぎます。MoSi₂元素は太陽電池の製造効率とセル性能を向上させるため、太陽光発電分野で広く使用されています。

8.4 半導体産業における MoSi₂発熱体の応用

二ケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、その高温性能、耐酸化性、電熱安定性により、半導体産業におけるウェーハアニール、拡散プロセス、エピタキシャル成長などの高温プロセスに広く使用されています。MoSi₂素子は、精密な温度制御と均一な熱場を提供でき、半導体製造におけるクリーン環境と高精度温度制御のニーズを満たしています。酸化雰囲気中で表面に形成される SiO₂保護膜により優れた耐酸化性があり、長時間運転に適しています。U 字型、W

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

字型、スパイラル型の MoSi_2 素子は、炉の種類に合わせてカスタマイズされています。U 字型とスパイラル型は小型の高精度炉に適しており、W 字型は大型の連続装置に適しています。設置には高純度アルミナブラケットを使用し、 MoSi_2 の熱膨張特性に合わせて機械的ストレスを軽減しています。電気接続には低抵抗クランプを使用し、安定性を確保するために比例制御電源を使用しています。非保護酸化物の形成を避けるため、運転は「ベスト」温度域を速やかに通過する必要があります。表面コーティング（ SiC や Al_2O_3 など）は耐熱衝撃性と耐用年数をさらに向上させます。 SiO_2 膜の完全性と冷端接続の状態を定期的に点検し、炉内を清掃して不純物による汚染を防ぎ、半導体産業における部品の信頼性と効率を確保します。

8.4.1 ウェーハのアニールと拡散プロセス

MoSi_2 発熱体は、シリコンウェーハなどの半導体材料を処理するウェーハアニールおよび拡散プロセスの急速熱アニール（RTA）炉、拡散炉、酸化炉に使用されます。ウェーハアニールでは、格子欠陥の修復、ドーパントの活性化、または材料特性の向上のために高温が必要です。拡散プロセスでは、高温ドーピング（リンやホウ素など）により PN 接合を形成します。 MoSi_2 素子の正温度係数抵抗は、安定した加熱能力を提供し、正確な温度制御を保証します。U 字型および螺旋型の MoSi_2 素子は、小型のアニール炉および拡散炉に適しており、高精度の小ロット生産に適しており、W 字型の素子は、均一な熱場を提供して複数のウェーハを処理する大型拡散炉に適しています。 SiO_2 保護膜は酸化雰囲気中で安定しており、表面コーティングは耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、クリーンな半導体プロセス環境に適しています。設置時には、素子は高純度アルミナブラケットで固定され、電気接続により低抵抗接触が確保されます。操作には、酸化による損傷を防ぐため、雰囲気と加熱・冷却速度の制御が必要です。メンテナンスには、素子表面の定期的な検査と炉の清浄度維持が含まれ、不純物（金属イオンなど）によるウェーハ汚染を防ぎます。 MoSi_2 成分は、ウェーハのアニールおよび拡散プロセスの効率と品質を向上させるため、集積回路およびパワーデバイスの製造に広く使用されています。

8.4.2 半導体エピタキシャル成長

MoSi_2 発熱体は、化学気相成長（CVD）炉や分子線エピタキシー（MBE）装置において、半導体エピタキシャル成長において、シリコン、ゲルマニウム、化合物半導体（GaAs、 SiC など）などの高品質単結晶膜を成長させるために使用されます。エピタキシャル成長では、膜の結晶品質と均一性を確保するために、高温での熱場の精密な制御が必要です。 MoSi_2 素子は、高出力密度と安定した温度制御能力を備えており、これらの要件を満たしています。スパイラル MoSi_2 素子は小型 CVD 炉に適しており、集中加熱により高精度成長をサポートします。W 型およびストレートロッド型素子は、大型エピタキシャル炉に適しており、大面積ウェーハの熱場均一性を確保します。 SiO_2 保護膜と表面コーティングにより、酸化雰囲気や微量酸素環境での長期動作がサポートされ、耐熱衝撃性は頻繁な熱サイクルに適応します。設置には高純度アルミナブラケットを使用し、電気接続には比例制御電源を使用することで、高精度な温度制御を実現します。運転には「ベスト」温度域を急速に通過する必要があり、メンテナンスには SiO_2 膜のチェックと炉の洗浄による汚染防止が含まれます。 MoSi_2 成分はエピタキシャル成長膜の品質と生産効率を向上させるため、半導体デバイス製造において広く使用されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.3 高温エッチング装置

MoSi₂発熱体は、半導体ウェーハのパターニング用高温エッチング装置のプラズマエッチング炉および熱エッチング炉に使用されています。高温エッチングプロセスでは、エッチング速度と選択性を最適化し、マイクロナノスケール構造の精度を確保するために、精密な温度制御が必要です。MoSi₂発熱体は、正温度係数の抵抗率と均一な熱場により、これらの要件を満たしています。U字型およびスパイラル型のMoSi₂発熱体は、集中加熱により高精度プロセスをサポートする小型エッチング炉に適しており、W字型の発熱体は、複数のウェーハの温度均一性を確保する大型装置に適しています。SiO₂保護膜は酸化雰囲気下でも安定しており、表面コーティング（SiC や Al₂O₃ など）は耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、エッチング中に存在する可能性のある腐食性ガス（塩素やフッ化物など）に適応します。設置時には、高純度アルミナブラケットで固定し、電気接続には低抵抗クランプを使用することで安定性を確保しています。操作においては、酸化による損傷を防ぐため、雰囲気と加熱・冷却速度の制御が不可欠です。

メンテナンスには、不純物によるウェーハ汚染を防ぐため、素子表面の定期的な点検と炉内の清浄度の維持が含まれます。MoSi₂成分は、高温エッチング装置の加工精度と効率を向上させるため、半導体製造における微細構造加工に広く利用されています。

8.4.4 真空コーティング装置

MoSi₂加熱素子は、物理蒸着（PVD）および化学蒸着（CVD）システムの真空コーティング装置において、半導体デバイスの電極または絶縁層用の TiN 、 Al₂O₃ などの金属、酸化物、または窒化物膜を堆積するために使用されます。真空コーティングでは、前駆体材料を蒸発または分解するために高温が必要です。

MoSi₂素子は、高い出力密度と精密な温度制御能力により、膜の均一性と品質を確保します。U字型および螺旋型のMoSi₂素子は、小型真空コーティング炉に適しており、局所的に高温を発生することで高精度な成膜をサポートします。W字型および直線型の素子は、大型設備に適しており、大面積基板の熱場の均一性を確保します。酸化雰囲気または微量酸素環境下において、SiO₂保護膜と表面コーティングは素子の長期動作をサポートし、耐熱衝撃性は急激な温度上昇および下降にも適応します。

設備には高純度アルミナブラケットを採用し、電気接続には比例制御電源を採用することで安定した温度制御を実現しています。酸化による損傷を防ぐため、運転中は「ベスト」温度域を速やかに通過する必要があります。メンテナンスには、SiO₂膜の検査と炉内の汚染防止のための清掃が含まれます。MoSi₂成分は、真空コーティング装置の膜品質と生産効率を向上させるため、半導体デバイスの膜製造に広く使用されています。

8.5 ガラス製造業界における MoSi₂発熱体の応用

ニケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、優れた高温性能、耐酸化性、電熱安定性のため、ガラス製造業界におけるガラス溶融およびガラス加工に広く使用されています。MoSi₂素子は、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

精密な温度制御と均一な熱場を提供し、高温、長期運転、クリーン環境といったガラス製造の要件を満たしています。優れた耐酸化性は、酸化雰囲気下で表面に形成される SiO_2 保護膜によって実現され、ガラス炉の過酷な作業条件に適しています。W 型、U 型、直棒型の MoSi_2 素子は、炉の種類に合わせてカスタマイズされています。W 型は均一な加熱を提供する大型溶解炉に適しており、U 型と直棒型は中小型処理炉に適しています。設置には高純度アルミナブラケットを使用し、 MoSi_2 の熱膨張特性に合わせて機械的ストレスを軽減しています。電気接続には低抵抗クランプを使用し、安定性を確保するために比例制御電源を使用しています。非保護酸化物の形成を避けるため、運転は「ペスト」温度域を速やかに通過する必要があります。また、表面コーティング（ SiC や Al_2O_3 など）は、耐熱衝撃性と耐用年数をさらに向上させます。 SiO_2 膜の完全性と冷端接続部の状態を定期的に点検し、炉内を清掃して不純物による汚染を防ぎ、ガラス製造における部品の信頼性と効率を確保します。

8.5.1 ガラスの溶解

MoSi_2 発熱体は、板ガラス、光学ガラス、特殊ガラスの製造におけるガラス溶融工程において、大型溶融炉および小型実験炉で使用されます。ガラス溶融には、原料（珪砂、ソーダ灰など）を均一な溶融ガラスにするために高温が必要です。 MoSi_2 発熱体は正の温度係数抵抗を有しており、安定した高温環境を提供することで、溶融品質と均一性を確保します。

W 型 MoSi_2 素子は、大型連続溶解炉に適しており、広い加熱面積をカバーし、均一な熱場を提供することで、ガラスの気泡や筋を低減します。U 型素子は小型溶解炉に適しており、特殊ガラスの小ロット生産に適しています。 SiO_2 保護膜は酸化雰囲気下で安定しており、表面コーティングは耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、ガラス溶融物中に存在する可能性のある揮発性成分（ホウ酸塩など）に適応します。設置時には、素子は高純度アルミナブラケットで固定され、電気接続により低抵抗接触が確保されます。操作には、酸化損傷を回避するために、制御された雰囲気と加熱・冷却速度が必要です。

の不純物（アルカリ金属酸化物など）の混入を防ぐため、エレメント表面と炉の清浄度の定期点検が含まれます。 MoSi_2 成分はガラス溶融の効率と製品品質を向上させるため、建築用、自動車用、光学用ガラス製造において広く使用されています。

8.5.2 ガラス加工

MoSi_2 発熱体は、ガラス加工技術において、ガラス製品の成形、焼鈍、表面処理に用いられる焼鈍炉、成形炉、熱間曲げ炉に使用されています。ガラス加工では、内部応力の除去、成形、ガラス性能の向上のために、精密な温度制御が求められます。 MoSi_2 発熱体は、高い出力密度と安定した温度制御能力を備えており、これらの要件を満たしています。U 字型および直棒型の MoSi_2 発熱体は、中小規模の焼鈍炉や熱間曲げ炉に適しており、集中加熱により複雑な形状のガラスの加工をサポートします。W 字型の発熱体は、大型成形炉に適しており、大面積のガラス板の温度均一性を確保します。 SiO_2 保護膜と表面コーティングにより、酸化雰囲気下での素子の長期動作がサポートされ、耐熱衝撃性は頻繁な熱サイクルにも適応します。設置には

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高純度アルミナブラケットを使用し、電気接続には比例制御電源を使用することで、精密な温度制御を実現します。動作は「ベスト」温度域を迅速に通過する必要があり、メンテナンスには SiO_2 膜の点検と炉の清掃が含まれ、汚染を防ぎます。MoSi₂ 素子はガラス加工の精度と効率を向上させ、ガラス容器、ディスプレイ用ガラス、建築用ガラスの製造に広く使用されています。

8.6 発熱体の新エネルギー材料製造への応用

二ケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、優れた高温性能、耐酸化性、電熱安定性により、新エネルギー材料の製造において重要な役割を果たしています。リチウム電池材料の焼結、水素エネルギー、燃料電池関連プロセスなど、需要の高い分野で広く使用されています。MoSi₂ 素子は、酸化雰囲気下で表面に形成される SiO_2 保護膜により優れた耐酸化性を実現し、高温での長時間動作に適しています。同時に、正の温度係数抵抗特性により、精密な温度制御と均一な熱場分布が保証されます。これらの特性により、新エネルギー材料の製造におけるクリーン環境、高精度温度制御、耐熱サイクル性の要件を満たすことができます。MoSi₂ 素子には、U 型、W 型、スパイラル型、ストレートロッド型など、さまざまな構造があり、さまざまな設備要件に合わせてカスタマイズできます。U 型とスパイラル型は小型の高精度焼結炉に適しており、W 型とストレートロッド型は大型の連続生産設備に適しています。設置時には高純度アルミナブラケットを使用し、MoSi₂ の熱膨張特性に適合させ、機械的応力と熱応力集中を低減します。電気接続には低抵抗クランプを使用し、比例制御電源により安定した動作を実現します。動作中は、非保護酸化物の形成を防ぐため、「病变」温度域を速やかに通過する必要があります。表面コーティング（ SiC や Al_2O_3 など）は、耐熱衝撃性と耐腐食性をさらに向上させ、部品寿命を延ばします。定期的なメンテナンスには、 SiO_2 膜の完全性、冷端接続状態、炉の清浄度を点検し、不純物汚染がないことを確認し、新エネルギー材料の製造における厳しい要件を満たしていることを保証します。MoSi₂ 素子は、熱場設計と動作パラメータを最適化することで、新エネルギー材料の性能向上と生産効率を確実なものにします。

8.6.1 リチウム電池材料の焼結

MoSi₂ 発熱体は、リチウム電池材料の焼結工程における正極、負極、固体電解質材料の製造に広く利用されており、コバルト酸リチウム、ニッケルコバルトマンガン三元系材料、リン酸鉄リチウム、グラファイト負極、固体酸化物電解質などの主要材料の製造に用いられています。リチウム電池材料の焼結は、結晶成長を促進し、材料密度と電気化学特性を向上させるために高温で行う必要があります。MoSi₂ 発熱体は、高出力密度と精密な温度制御能力を備えており、これらの厳しい要件を満たすことができます。U 字型および螺旋型の MoSi₂ 発熱体は、小型の実験室用焼結炉に適しており、新しい電池材料の開発や少量生産に適しており、集中加熱により高精度なプロセスを保証します。W 字型および直棒型の発熱体は、大規模な工業用焼結炉に適しており、広い加熱面積をカバーし、均一な熱場を提供することで大規模生産をサポートします。 SiO_2 保護膜は酸化雰囲気下でも安定しており、焼結プロセスにおける部品の耐酸化性を確保します。表面コーティング（ SiC や Al_2O_3 など）は耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、焼結プロセス中に存在する可能性のある揮発性ガスや微量腐食性雰囲気（リチウム化合物を含む揮発性物質など）に適応します。設置時には、部品は高純度アルミナ製ブラケットで固定し、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

垂直に吊り下げるか水平に支持することで機械的ストレスを軽減します。電気接続には低抵抗クランプを使用し、比例制御電源によって精密な温度制御を実現します。炉内の雰囲気気を厳密に制御することで、還元雰囲気や高湿度環境による SiO₂膜の破損を防ぎ、「ベスト」温度域を速やかに通過させ、非保護性酸化物の形成を防ぎます。メンテナンスには、部品の表面状態、冷端接続部、炉の清浄度の定期点検、および材料の純度に影響を与える可能性のある不純物（アルカリ金属酸化物など）の除去が含まれます。MoSi₂部品は、熱場設計と動作パラメータを最適化することで、焼結プロセス中にリチウム電池材料が優れた結晶構造と電気化学特性を獲得することを保証し、電池の容量、サイクル寿命、安全性を大幅に向上させます。電気自動車、エネルギー貯蔵システム、民生用電子機器に広く使用されています。

8.6.2 水素エネルギーと燃料電池

MoSi₂発熱体は、主に固体酸化燃料電池（SOFC）材料の焼結、水素製造反応器および電解装置の高温部品の製造プロセスに使用され、電解質、アノード、カソード材料、および高温触媒キャリアの製造に使用されます。水素エネルギーおよび燃料電池材料の製造には、材料の微細構造と性能を最適化するために、高温での焼結または熱処理が必要です。MoSi₂素子の安定した高温性能と均一な熱場分布は、これらのプロセス要件を満たすことができます。スパイラル型およびU字型のMoSi₂素子は、小型実験炉に適しており、新しい燃料電池材料または触媒の開発に適しており、高精度の焼結または熱処理プロセスをサポートするために局所的な高温を提供します。W型およびストレートロッド素子は、SOFC部品または水素製造装置部品の大規模生産用の大型工業炉に適しており、熱場の均一性を確保して材料の欠陥を減らします。

SiO₂保護膜は酸化雰囲気下において信頼性の高い酸化防止機能を提供し、表面コーティング（Al₂O₃やSiCなど）は耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、燃料電池材料の焼結に関与する可能性のある複雑な雰囲気（水蒸気や微量還元ガスなど）にも適応します。水素製造反応器や電解装置部品の製造において、MoSi₂元素は高温触媒担体の焼結または熱処理をサポートし、触媒の高い活性と安定性を確保します。設置時には、元素は高純度アルミナ製ブラケットで固定され、電気接続には低抵抗クランプが用いられます。比例制御電源を用いることで、SOFC材料の厳しい温度曲線要件を満たす精密な温度制御を実現します。運転においては、炉内雰囲気気を制御することで、高還元環境によるSiO₂膜の損傷を防ぎ、「ベスト」温度域を速やかに通過させて酸化損傷を防止する必要があります。メンテナンスには、SiO₂膜、コールドエンド接続部、炉の清浄度の定期点検が含まれ、材料性能に影響を与える不純物汚染がないことを確認します。MoSi₂コンポーネントは、熱場とプロセスパラメータを最適化することで、燃料電池材料の電気化学的性能と水素製造装置の効率を向上させます。クリーンエネルギー発電、産業用水素製造、エネルギー変換に広く利用されており、水素エネルギー技術の商業化に重要なサポートを提供しています。

8.7 環境保護および触媒における MoSi₂発熱体の応用

ケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、優れた高温性能、耐酸化性、電熱安定性により、環境保護および触媒分野での廃ガス処理、触媒再生、固形廃棄物資源回収に広く使用されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MoSi₂素子は、酸化雰囲気下で表面に形成される SiO₂保護膜により優れた耐酸化性を実現し、高温での長時間動作に適しています。正温度係数抵抗特性により、精密な温度制御と均一な熱場分布が保証され、環境保護および触媒プロセスの高温、クリーン環境、耐腐食性の要件を満たしています。U字型、W字型、スパイラル型、ストレートロッド型の MoSi₂素子は、機器の要件に応じてカスタマイズされます。U字型およびスパイラル型は小型の高精度リアクターに適しており、W字型およびストレートロッド型は大型の連続処理装置に適しています。設置には高純度アルミナブラケットが使用され、MoSi₂の熱膨張特性に合わせて機械的および熱的応力が低減されます。電気接続には低抵抗クランプを使用し、比例制御電源により安定した動作を実現しています。非保護酸化物の形成を防ぐため、動作は「病変」温度域を迅速に通過する必要があります。表面コーティング（SiC や Al₂O₃ など）は、耐熱衝撃性と耐腐食性をさらに向上させ、部品の寿命を延ばします。定期的なメンテナンスには、SiO₂膜の完全性、冷端接続状態、炉の清浄度の点検が含まれ、不純物汚染がなく、環境保護および触媒分野の高い基準を満たしていることを確認します。MoSi₂素子は、熱場設計と動作パラメータを最適化することで、排ガス処理、触媒再生、固形廃棄物資源利用の効率と信頼性を支えます。

8.7.1 廃ガス処理

MoSi₂発熱体は、高温焼却炉、触媒酸化炉、熱分解炉などの廃ガス処理工程で使用され、産業廃ガス、揮発性有機化合物（VOC）、有害ガス（NO_x、SO_x など）を処理します。廃ガス処理では、有害成分を分解したり、触媒反応を促進したりするために高温が必要です。MoSi₂素子の高出力密度と精密な温度制御機能により、反応器が必要な温度に達し、均一な熱場を維持し、廃ガスの効率的な分解と変換が促進されます。W型および直棒 MoSi₂素子は、広い加熱面積をカバーし、連続的な廃ガス処理をサポートする、大型の廃ガス処理炉に適しており、U型およびスパイラル素子は小型または実験室炉に適しており、高精度の実験や小規模処理に適しています。SiO₂保護膜は酸化雰囲気下でも安定しており、表面コーティングにより耐熱衝撃性と耐腐食性が向上し、排ガス中に存在する可能性のある腐食性ガス（塩化物や硫化物など）に適応します。設置時には、高純度アルミナ製ブラケットで固定し、電気接続には低抵抗クランプを使用し、比例制御電源と組み合わせることで精密な温度制御を実現します。運転時には、炉内の雰囲気気を制御し、高還元雰囲気による SiO₂膜の損傷を防ぎ、「病変」温度域を速やかに通過させることで酸化損傷を防ぎます。メンテナンスには、部品の表面状態と炉内の清浄度の定期点検、処理効果に影響を与える可能性のある不純物の除去が含まれます。MoSi₂部品は、排ガス処理における分解効率と排出基準適合率を向上させるため、化学、電力、環境保護などの分野で広く利用されています。

8.7.2 触媒の再生

MoSi₂ 発熱体は、石油化学における接触分解触媒、環境保護分野の選択接触還元（SCR）触媒、工業用触媒（貴金属触媒など）などの触媒の活性を回復させるための触媒再生工程における高温再生炉や熱処理炉に使用されています。

触媒は長期使用後、表面に炭素質物質、硫化物、その他の被毒物質が堆積し、不活性化します。再生プロセスでは、触媒の微細構造と活性部位を保護しながら、高温でこれらの堆積物を燃焼

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

除去し、触媒性能を回復させる必要があります。MoSi₂素子の高い出力密度と精密な温度制御能力は、安定した高温環境を提供し、再生プロセスの効率と触媒性能の回復を保証します。

U字型および螺旋型の MoSi₂素子は小型再生炉に適しており、実験室または小規模再生プロセスに適しており、集中加熱を提供して高精度の温度制御をサポートし、厳しい温度曲線に対する特定の触媒のニーズを満たします。W字型および直線ロッド型の MoSi₂素子は、広い加熱面積をカバーし、均一な熱場を提供してバッチ触媒処理をサポートし、再生効果の一貫性を確保できる大型工業用再生炉に適しており、SiO₂保護膜は酸化雰囲気中で安定しており、表面コーティング（SiC または Al₂O₃ など）は耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、再生プロセス中に存在する可能性のある腐食性ガス（硫黄含有雰囲気や塩素含有雰囲気など）や頻繁な熱サイクルに適応します。

設置時には、高純度アルミナ製ブラケットで固定し、垂直または水平に支持することで機械的ストレスを軽減します。電気接続には低抵抗クランプを使用し、比例制御電源を用いて精密な温度制御を実現します。操作には、炉内雰囲気を厳密に制御し、高還元環境による SiO₂膜の破壊を防ぎ、「ベスト」温度域を速やかに通過させることで非保護酸化物の形成を防ぎます。メンテナンスには、素子の表面状態、冷端接続部、炉内清浄度の定期点検、触媒の純度に影響を与える可能性のある不純物（金属酸化物など）の除去が含まれます。MoSi₂素子は、熱場とプロセスパラメータを最適化することで、触媒再生における高い効率と活性回復効果を確保し、触媒の寿命を延ばします。石油化学、環境保護、産業触媒の分野で広く使用されています。

8.7.3 固形廃棄物資源の利用

MoSi₂ 発熱体は、固形廃棄物リサイクルプロセスにおける高温熱分解炉、焼却炉、焼結炉に使用され、産業固形廃棄物、都市ゴミ、有害廃棄物を処理し、有価物（金属、セラミック、ガラスなど）を回収します。固形廃棄物のリサイクルでは、有機物を分解し、有害物質を揮発させ、固形廃棄物成分を焼結して再利用可能な材料を形成するために高温が必要です。MoSi₂ 発熱体は、安定した高温性能と均一な熱場分布を備えており、これらのプロセス要件を満たすことができます。W型および直棒型 MoSi₂ 発熱体は、広い加熱面積をカバーし、固形廃棄物の連続処理をサポートし、熱分解または焼結プロセスの効率と一貫性を確保するために、大型の熱分解炉または焼却炉に適しており、高精度プロセスまたは研究開発に適しており、集中加熱を提供して反応条件を最適化します。SiO₂保護膜は、酸化雰囲気下において信頼性の高い酸化防止機能を提供し、表面コーティングは耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、固形廃棄物処理に伴う複雑な雰囲気（塩素、硫黄、重金属揮発性物質など）にも適応します。設置時には、部品は高純度アルミナブラケットで固定され、電気接続には低抵抗クランプが採用されています。比例制御電源を用いることで、固形廃棄物資源利用における特定の温度曲線に対する制御要件を満たす精密な温度制御を実現しています。運転においては、炉内の雰囲気を制御し、高還元雰囲気による SiO₂膜の損傷を防ぎ、「ベスト」温度域を速やかに通過させることで酸化損傷を防止する必要があります。メンテナンスには、SiO₂膜、冷端接続部、炉内清浄度の定期点検、資源利用製品の品質に影響を与える可能性のある不純物の除去が含まれます。MoSi₂ コンポーネントは、信頼性の高い高温環境を提供することで、固形廃棄物の効率的な分解、材料回収、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

および資源利用をサポートし、環境保護、循環型経済、および資源リサイクル業界で広く使用されています。

8.8 MoSi₂発熱体の他の分野への応用

ニケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、その優れた高温性能、耐酸化性、電熱安定性により、航空宇宙産業や原子力産業などのハイテク分野で独自の応用価値を示しています。MoSi₂素子は、酸化雰囲気中で表面に形成される SiO₂保護膜により優れた耐酸化性を実現し、長期の高温動作に適しています。正温度係数抵抗特性により、正確な温度制御と均一な熱場分布が保証され、高温、クリーン環境、耐熱サイクル性など、複雑な作業条件の要件を満たしています。U字型、W字型、スパイラル型、ストレートロッド型の MoSi₂素子は、機器の要件に応じてカスタマイズされます。U字型とスパイラル型は小型の高精度炉に適しており、W字型とストレートロッド型は大型テストや補助機器に適しています。

MoSi₂の熱膨張特性に適合し、機械的および熱的ストレスを低減するため、高純度アルミナブラケットを用いて設置しています。電気接続には低抵抗クランプを使用し、比例制御電源により安定した動作を実現しています。非保護酸化物の形成を防ぐため、動作は「病変」温度域を迅速に通過する必要があります。表面コーティング（SiC や Al₂O₃ など）は、耐熱衝撃性と耐腐食性をさらに向上させ、部品の寿命を延ばします。定期的なメンテナンスには、SiO₂膜の完全性、冷端接続状態、炉の清浄度の点検が含まれ、航空宇宙産業および原子力産業の厳しい要件を満たすために不純物汚染がないことを確認します。MoSi₂素子は、熱場設計と動作パラメータを最適化することで、ハイテクノロジー分野における材料試験および機器動作を信頼性の高い形でサポートします。

8.8.1 航空宇宙材料試験

MoSi₂発熱体は、航空宇宙材料試験における高温試験炉、熱サイクル試験炉、環境シミュレーション装置で使用され、耐熱合金、セラミックマトリックス複合材、炭素繊維複合材などの主要な航空宇宙材料の性能を試験します。航空宇宙材料は、エンジン、タービンブレード、または宇宙船の熱保護システムにおける信頼性を検証するために、極度の高温条件下で機械的、熱的、化学的性能試験を受ける必要があります。

MoSi₂素子は、高出力密度と精密な温度制御機能を備えており、これらの過酷な環境をシミュレートできます。U字型および螺旋型の MoSi₂素子は、集中加熱により高精度試験をサポートし、小型サンプルの熱暴露や熱サイクル実験に適しています。W字型および直線型のロッド素子は、広い加熱領域をカバーし、均一な熱場を提供して大型構造部品を試験できる大型試験炉に適しています。SiO₂保護膜は酸化雰囲気でも安定しており、表面コーティングは耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、試験に関与する可能性のある酸化雰囲気や微量腐食雰囲気に適応します。設置時には、高純度アルミナブラケットで素子を固定し、低抵抗クランプを電気接続に使用し、比例制御電源と組み合わせることで、精密な温度曲線制御を実現します。操作には、還元環境による SiO₂膜の損傷を防ぎ、「病変」温度域を素早く通過させて酸化損傷を防ぐために、炉内雰囲気を厳密に制御する必要があります。メンテナンスには、部品の表面状態、冷端

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

接続、炉の清浄度の定期的な検査が含まれ、不純物が試験結果に影響を与えないことを確認します。MoSi₂部品は、安定した高温環境と信頼性の高い熱サイクル性能を提供することで、航空宇宙材料の高精度試験をサポートし、材料開発と認証のための重要なデータを提供します。

8.8.2 原子力産業補助機器

MoSi₂発熱体は、原子力産業の補助設備である高温焼結炉、熱処理炉、実験炉などで、核燃料要素、原子炉材料の製造、関連する高温セラミックスや合金の試験・加工に用いられます。原子力産業は、機器の温度制御、清浄度、長期安定性に対して極めて高い要求を持っています。MoSi₂素子の安定した高温性能と均一な熱場分布は、これらの要求を満たすことができます。U 字型や螺旋型の MoSi₂素子は小型実験炉に適しており、核燃料粒子や小型原子炉材料の焼結・熱処理に適しており、高精度の温度制御によって材料性能を確保します。W 字型や直線型の棒状素子は、核燃料棒焼結炉や原子炉部品の熱処理炉などの大型補助設備に適しており、大面積の均一加熱を実現し、大量生産をサポートします。

SiO₂保護膜と表面コーティングにより、部品は酸化雰囲気または軽度の腐食性環境下でも長期間動作し、耐熱衝撃性は頻繁な熱サイクルにも適応します。設置には高純度アルミナブラケットを使用し、電気接続には比例制御電源を採用することで、精密な温度制御を実現し、原子力産業の厳格なプロセスパラメータ要件を満たしています。運転においては、炉内雰囲気を制御し、高還元雰囲気による SiO₂膜の損傷を防ぎ、「ベスト」温度域を速やかに通過させることで酸化損傷を防止します。メンテナンスには、SiO₂膜、冷端接続部、炉内清浄度の定期点検が含まれ、原子力材料の品質に影響を与える不純物汚染がないことを確認します。MoSi₂元素は、信頼性の高い高温環境を提供することで、原子力産業における主要材料の製造と性能検証を支援し、原子力技術の安全性と効率性にとって重要な保証を提供します。

8.8.3 高温合成化学

MoSi₂ 発熱体は、高温合成化学における反応器や実験炉で使用され、高温セラミック、金属間化合物、機能性材料、高性能化学物質を合成します。高温合成化学では、生成物の純度、結晶構造、化学特性を確保するために、厳密に制御された温度条件下で反応を行う必要があります。MoSi₂ 素子の高い出力密度と精密な温度制御機能により、安定した反応環境を提供できます。U 字型およびスパイラル型の MoSi₂ 素子は小型実験炉に適しており、実験室規模の化学合成や新素材の研究開発に適しており、高精度の温度制御のための集中加熱を提供します。W 字型およびストレートロッド型素子は大型反応器に適しており、工業規模の化学物質または材料生産をサポートし、熱場の均一性を確保して反応の不均一性を低減します。

SiO₂保護膜は酸化雰囲気下でも安定しており、表面コーティング（SiC や Al₂O₃ など）は耐熱衝撃性と耐腐食性を高め、合成プロセス中に存在する可能性のある腐食性ガスや揮発性生成物に適応します。設置時には、部品は高純度アルミナ製ブラケットで固定され、電気接続には低抵抗クランプが使用され、比例制御電源によって正確な温度曲線制御が実現されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

操作においては、炉内の雰囲気制御し、高還元雰囲気による SiO_2 膜の破壊を防ぎ、「ブランク」温度域を速やかに通過させて酸化損傷を防ぐ必要があります。メンテナンスには、部品の表面状態、冷端接続、炉の清浄度の定期点検が含まれ、合成製品の品質に影響を与える不純物汚染がないことを確認します。 MoSi_2 部品は、信頼性の高い高温環境を提供することで、高温合成化学における効率的な反応と製品品質をサポートし、先端材料および化学産業で広く使用されています。

8.8.4 MoSi_2 ロッド変圧器

MoSi_2 発熱体は、変圧器関連用途において、変圧器材料試験、絶縁材料熱処理、製造工程における高温プロセスなどの高温加熱源として使用されています。変圧器製造には、珪素鋼板、絶縁セラミックス、その他の耐高温材料の高温処理が含まれます。 MoSi_2 発熱体は、安定した高温性能と均一な熱場分布を備えており、これらのプロセス要件を満たすことができます。U 字型および螺旋型の MoSi_2 発熱体は、小型熱処理炉に適しており、変圧器部品の局所加熱や実験室試験に適しており、高精度の温度制御により材料特性を最適化します。W 字型および直棒型の発熱体は、珪素鋼板の焼鈍処理や絶縁材料の焼結などの大型工業炉に適しており、大量生産をサポートし、熱場の均一性を確保します。 SiO_2 保護膜は、酸化雰囲気下でも信頼性の高い酸化防止機能を提供し、表面コーティングは耐熱衝撃性と耐腐食性を向上させ、変圧器製造に伴う微量腐食雰囲気にも適応します。設備には高純度アルミナブラケットを採用し、電気接続には比例制御電源を採用することで、精密な温度制御を実現し、プロセスパラメータの安定性を確保しています。酸化による損傷を防ぐため、運転中は「病気」温度域を速やかに通過する必要があります。メンテナンスには、 SiO_2 膜、冷端接続部、炉の清浄度の定期検査が含まれ、不純物が材料の品質に影響を与えないようにします。 MoSi_2 コンポーネントは信頼性の高い高温環境を提供し、変圧器製造における主要材料の熱処理と性能最適化をサポートし、変圧器の効率と信頼性を向上させ、電力機器製造分野で広く使用されています。



中ウォルフラム製造のモリブデンシサイド発熱体

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

第 9 章 MoSi₂発熱体と他の発熱材料の比較

ニケイ化モリブデン (MoSi₂) 発熱体は、その優れた高温性能、耐酸化性、電熱安定性のため、高温加熱に広く使用されています。タングステンや炭化ケイ素 (SiC) などの他の一般的な発熱体と比較して、MoSi₂素子は耐酸化性、動作温度範囲、プロセス適応性において独自の利点がありますが、一定の制限もあります。この章では、MoSi₂の性能をタングステン発熱体および炭化ケイ素発熱体と比較し、コスト、効率、およびアプリケーション適応性の違いを分析し、さまざまな作業条件下で適切な発熱体を選択するためのガイダンスを提供します。MoSi₂素子は、熱膨張特性に合わせて高純度アルミナブラケットを取り付ける必要があります。電気接続には低抵抗クランプを使用し、比例制御電源を使用して安定性を確保する必要があります。非保護性酸化物の形成を避けるため、運転中は「ベスト」温度域を速やかに通過する必要があります。また、表面コーティング (SiC や Al₂O₃ など) は、耐熱衝撃性と耐腐食性を向上させることができます。定期的なメンテナンスには、SiO₂膜の完全性と冷端接続部の状態を点検し、不純物による汚染がないことを確認することが含まれます。

9.1 タングステン発熱体との比較

MoSi₂発熱体とタングステン発熱体は、それぞれ高温用途での利点がありますが、適用可能なシナリオと性能特性には大きな違いがあります。MoSi₂素子は、酸化雰囲気下で表面に形成される SiO₂保護膜により優れた耐酸化性を実現し、長時間動作に適しています。最高動作温度は 1850°C に達し、セラミック焼結、ガラス溶融、半導体製造などの酸化環境下でのプロセスに広く使用されています。MoSi₂の正温度係数抵抗特性により、電力を適応的に調整し、安定した温度制御が可能で、高精度な温度制御が必要な用途に適しています。適度な熱膨張係数、優れた耐熱衝撃性を備え、頻繁な熱サイクルに耐えることができ、U 字型、W 字型、またはスパイラル構造設計に適しています。MoSi₂素子の製造プロセス (粉末冶金、静水圧プレスなど) により、複雑な炉の要件に合わせて形状を柔軟にカスタマイズできます。しかし、MoSi₂ は 400 ~ 700°C の「ベスト」温度範囲で非保護酸化物を生成する傾向があり、材料の劣化を避けるために急速な温度上昇と下降が必要であり、SiO₂フィルムを保護するために還元環境または真空環境で動作温度を下げる必要があります。

対照的に、タングステン発熱体は、その極めて高い融点と優れた機械的強度で知られており、超高温用途 (真空または不活性雰囲気での金属熱処理など) に適しています。タングステン素子は酸化雰囲気下では酸化されやすいため、真空または不活性ガス保護下で動作させる必要があります。酸化環境での使用が制限されます。タングステンは抵抗率が低く、温度による変化が少ないため、高出力が必要なシナリオに適していますが、温度制御精度は MoSi₂ よりも低いいため、より複雑な電力制御システムが必要になります。タングステン素子は熱膨張係数が低く、耐熱衝撃性が低いです。頻繁な熱サイクルは脆性破壊につながる可能性があり、動的熱負荷下での用途が制限されます。タングステン素子は製造および加工コストが高く、形状をカスタマイズするのが困難です。ほとんどがワイヤまたはロッド構造であるため、複雑なタイプの炉の設計柔軟性が制限されます。さらに、タングステンは密度が高いため、要素の重量が重くなり、設置およびサポート構造の設計が複雑になります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MoSi₂とタングステンを比較すると、MoSi₂は酸化雰囲気下における耐酸化性と温度制御精度に優れており、セラミックス、ガラス、半導体などの産業に適しています。一方、タングステンは真空または不活性雰囲気下での超高温用途（高温合金溶解など）に適しています。プロセス環境、温度要件、熱サイクル頻度に基づいて選択する必要があります。MoSi₂は酸化雰囲気下でも長期安定性と柔軟性に優れているため、ほとんどの高温炉においてより有利です。

9.2 シリコンカーバイド部品との比較

MoSi₂ 発熱体と炭化ケイ素（SiC）発熱体は、どちらも高温加熱の分野では一般的な選択肢ですが、性能と適用シナリオには明らかな違いがあります。MoSi₂ 素子は、表面のSiO₂ 保護膜により酸化雰囲気中で優れた耐酸化性を示し、最高動作温度は 1850°C に達し、セラミック焼結、ガラス溶融、半導体エピタキシャル成長などの高精度高温プロセスに適しています。その正温度係数抵抗特性は、適応型電力調整をサポートし、正確な温度制御を提供し、安定した熱場を必要とする用途に適しています。MoSi₂ は適度な熱膨張係数、優れた耐熱衝撃性を備え、頻繁な熱サイクルに耐えることができます。U 字型、W 字型、スパイラル構造は、さまざまな炉の設計に適しています。MoSi₂ 素子の製造プロセスは柔軟性が高く、粉末冶金と静水圧プレスにより複雑な形状を製造して、カスタマイズされたニーズを満たすことができます。しかし、MoSi₂ は「ペスト」温度範囲では非保護的酸化を起こしやすいため、急速な温度上昇と下降が必要となり、SiO₂ 膜を保護するために還元環境または真空環境で動作温度を下げる必要があります。

SiC 発熱体は、高硬度、耐摩耗性、化学的安定性で知られており、工業炉や中高温プロセスで広く使用されています。SiC 素子は酸化雰囲気中でSiO₂ 保護膜を形成し、優れた耐酸化性を備えていますが、最高動作温度は通常 MoSi₂ よりも低く、1300~1600°Cのプロセスに適しています。SiC の抵抗率は温度によってより複雑に変化し、負の温度係数特性（高温で抵抗が減少）を示します。これは出力が不安定になる可能性があり、温度均一性を維持するために精密な制御システムが必要です。SiC 素子は MoSi₂ よりも熱膨張係数が低く、熱衝撃に対する耐性がわずかに劣ります。特に大型素子では、頻繁な熱サイクルによりマイクロクラックが発生する可能性があります。SiC 素子の製造プロセス（反応焼結や再結晶など）により、形状の複雑さが制限され、通常は棒状または管状であり、カスタマイズの柔軟性は MoSi₂ よりも低くなります。さらに、SiC 要素は硫黄やハロゲンを含む腐食性雰囲気中では局部腐食を起こす可能性があり、追加の表面保護対策が必要になります。

MoSi₂と SiC を比較すると、MoSi₂は高温域での用途や精密な温度制御に優れており、半導体や特殊セラミック製造などのハイテク産業に適しています。一方、SiC は金属熱処理や従来のセラミック焼結など、中高温域でコスト重視の産業用途に適しています。選択にあたっては、プロセス温度、雰囲気条件、熱サイクル要件を考慮する必要があります。

9.3 加熱要素のコスト、効率、および用途適合性の分析

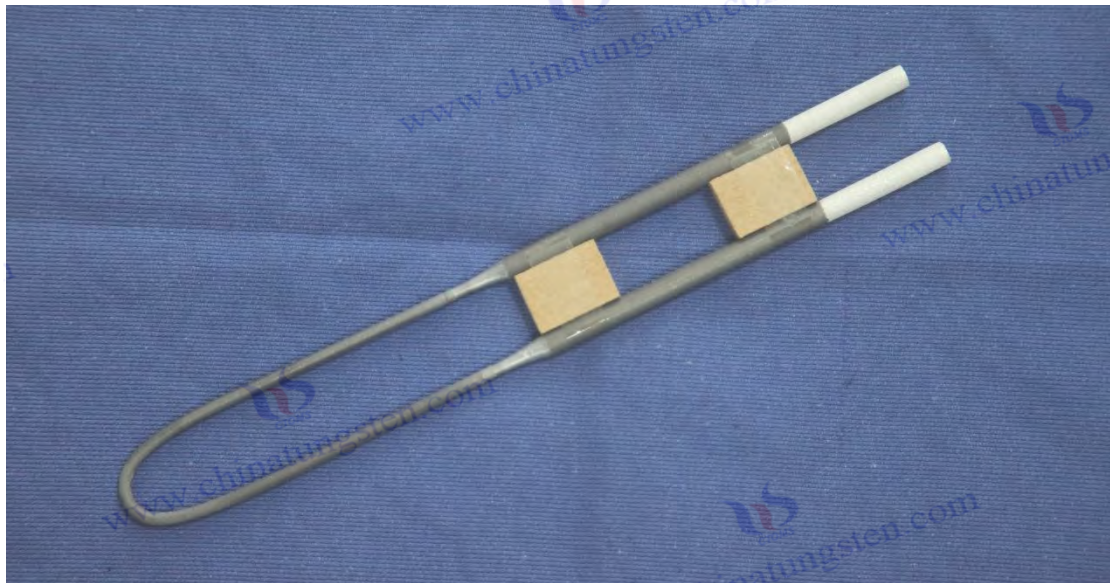
MoSi₂、タングステン、SiC 発熱体のコスト、効率、用途適合性の違いは、各業界における選択に直接影響します。MoSi₂発熱体の製造コストは中程度で、粉末冶金および静水圧プレスプ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プロセスが成熟しているため、U字型、W字型、螺旋型などの複雑な形状の製造が可能で、多様な炉型のニーズに対応できます。MoSi₂は高い運転効率を持ち、正の温度係数抵抗特性により、適応型電力制御をサポートし、エネルギーの無駄を削減します。セラミック焼結、ガラス加工、半導体製造など、精密な温度制御と長時間運転を必要とする用途に適しています。MoSi₂は酸化雰囲気下で優れた耐酸化性を示し、メンテナンスコストも低いですが、酸化損傷を回避するために「ペスト」温度域を速やかに通過する必要があるため、表面コーティングにより寿命をさらに延ばすことができます。MoSi₂元素は幅広い用途への適応性を持ち、酸化雰囲気での高温処理に適していますが、還元雰囲気または真空雰囲気では温度を下げる必要があるため、一部の超高温金属処理での使用は制限されます。

タングステン発熱体は、高融点材料であるため加工が難しく、製造コストが比較的高く、ほとんどが線材や棒材であるため、複雑な形状をカスタマイズするにはコストがかかります。タングステンは真空または不活性雰囲気での動作効率が高く、超高温用途（高温合金溶解など）に適していますが、酸化雰囲気では非常に酸化されやすいため、追加の雰囲気制御システムが必要になり、運転コストとメンテナンスコストが増加します。タングステン素子は耐熱衝撃性が低く、頻繁な熱サイクルによって破損する可能性があります。メンテナンスコストは高くなります。航空宇宙材料試験など、高温・真空環境に対する要求が極めて高い場面に適していますが、雰囲気の制約により適用範囲が狭くなります。

SiC 発熱体は製造コストが比較的低く、反応焼結プロセスも比較的簡単なため、棒状または管状の発熱体の大量生産に適しています。SiC は中高温域での動作効率が高いものの、負の温度係数を持つため、出力が不安定になる可能性があり、温度均一性を維持するために複雑な制御システムが必要となり、運用コストが増加します。SiC 発熱体は酸化性雰囲気下では優れた耐酸化性を示しますが、腐食性雰囲気下では局所的な劣化が生じる可能性があり、メンテナンスコストも中程度です。



中ウォルフラム製造のモリブデンシサイド発熱体

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

MoSi₂ Heating Element Introduction

1. Overview of MoSi₂ Heating Element

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

2. Features of MoSi₂ Heating Element

- Low thermal expansion coefficient:** Well-matched with common ceramic substrates, minimizing the risk of cracking caused by thermal stress.
- Excellent oxidation resistance:** Forms a dense SiO₂ protective film on the surface, effectively preventing material degradation from oxidation.
- Extremely high working temperature:** Capable of continuous operation up to 1700°C, and a maximum usage temperature of 1800°C in oxidizing atmospheres.
- Good high-temperature electrical resistance characteristics:** MoSi₂ exhibits relatively stable resistivity at high temperatures, with only a gradual increase in resistivity at elevated temperatures.

3. Specifications of MoSi₂ Heating Element

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

4. Typical Applications of MoSi₂ Heating Element

- High-temperature sintering furnaces in the ceramics and powder metallurgy industries
- Heat treatment equipment for steel and non-ferrous metals
- High-temperature laboratory furnaces
- Diffusion, annealing, and oxidation processes in the semiconductor and photovoltaic industries

5. Purchasing Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第 10 章 MoSi₂発熱体の関連基準と仕様

ニケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体は、製品の品質、性能の安定性、およびプロセスの安全性を確保するために、厳格な基準と仕様に従う必要があります。世界的には、中国の国家規格、国際規格、および欧米、日本、韓国の関連規格が、MoSi₂発熱体の製造と使用に関する技術ガイダンスを提供しています。これらの規格は、材料の化学組成、物理的特性、製造プロセス、試験方法、および適用仕様をカバーしています。本章では、MoSi₂発熱体に関する中国の国家規格、国際規格、および欧米、日本、韓国の関連規格を詳細に紹介し、製造業者、技術者、およびユーザーに参考資料を提供することを目的としています。MoSi₂発熱体の標準化は、製品品質の統一、互換性の向上、および世界的な貿易と技術協力の促進に役立ちます。

10.1 MoSi₂発熱体の中国規格

MoSi₂発熱体の製造、性能試験、応用に関する多数の規格を策定しており、主に国家非鉄金属標準化技術委員会（TC243）などの機関が管理しています。これらの規格は、高温酸化環境におけるMoSi₂発熱体の性能安定性と安全性を確保し、セラミック焼結、ガラス溶融、半導体製造などの産業に適しています。関連規格には、材料の化学分析、物理的特性試験、工業用電熱設備の技術要求などが含まれます。たとえば、MoSi₂発熱体の化学組成規格では、モリブデンやシリコンなど主要元素の含有量要件と不純物制御を規定し、耐酸化性と電熱安定性を確保しています。物理的性能規格には、抵抗率、熱膨張係数、耐熱衝撃性、機械的強度の試験方法が含まれており、高温および頻繁な熱サイクル下での発熱体の信頼性を確保しています。さらに、工業用電熱設備の規格では、MoSi₂素子の設置、操作、メンテナンスに関する要求事項が提示されています。例えば、熱膨張特性に適合した高純度アルミナ製ブラケットの使用、非保護酸化物の形成を回避するために「ベスト」温度域を速やかに通過すること、SiO₂保護膜の健全性を定期的に検査することなどが挙げられます。これらの規格は、国家市場監督管理総局と国家標準化管理局によって発行されています。一部の規格では、中国の産業ニーズに適応し、国際規格との整合性を保つために、ISO 関連規格など、同等ではない国際規格を参照または採用しています。

10.2 MoSi₂発熱体の国際基準

国際標準化機構（ISO）と国際電気標準会議（IEC）は、MoSi₂発熱体に関する国際規格を策定しており、主に高温材料、産業用電気加熱装置、性能試験方法に重点を置いています。これらの規格は、MoSi₂発熱体の世界的な生産と応用のための統一的な技術的枠組みを提供し、材料特性、製造プロセス、試験仕様を網羅しています。例えば、ISO 規格には、耐酸化性、熱伝導率、抵抗率試験など、高温セラミックまたは金属間化合物の性能試験方法が含まれており、酸化雰囲気におけるMoSi₂発熱体の長期安定性を確保しています。IEC 規格は、産業用電気加熱装置の技術要件に焦点を当て、MoSi₂発熱体の電気接続、温度制御精度、低抵抗クランプの使用や比例制御電源の構成など、MoSi₂発熱体の安全要件を規定しています。また、国際規格には、高温環境における部品の耐熱衝撃性および耐腐食性に関する試験方法も含まれており、メーカーが表面コーティング（SiC や Al₂O₃ など）を最適化して耐用年数を延ばすための指針となっています。さらに、ISO および IEC 規格は、特定の雰囲気（酸化性雰囲気や微量酸素雰囲気）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

気など）における部品の動作仕様を重視しており、「ペスト」酸化を回避するために低温域を迅速に通過することが求められています。これらの規格は、 MoSi_2 部品の国際市場における互換性と技術協力を促進し、セラミックス、半導体、新エネルギー材料の製造分野で広く利用されています。

10.3 欧米日韓などの国の MoSi_2 発熱体基準

欧州、米国、日本、韓国などにおける MoSi_2 発熱体の規格は、各国の標準化機関によって策定されており、現地の産業ニーズと国際規格を組み合わせ、材料特性、製造プロセス、用途仕様などを網羅しています。欧州では、欧州標準化委員会（CEN）やその他の機関（ドイツ規格協会 DIN、英国規格協会 BSI など）が、 MoSi_2 発熱体の化学組成、抵抗率、熱膨張係数、耐酸化性試験方法など、高温電熱体に関する規格を策定しています。

これらの規格は、酸化雰囲気下における部品の長期安定性を重視し、表面 SiO_2 保護膜の形成条件と耐腐食性要件を規定しており、セラミック焼結やガラス加工などの産業に適用可能です。DIN 規格は、高純度アルミナブラケットの使用や電気接続部の低抵抗設計など、 MoSi_2 素子の設置仕様をさらに細かく規定する場合があります。米国規格協会（ANSI）が策定した規格は、産業用電気加熱装置の性能と安全性に焦点を当てており、 MoSi_2 素子の温度制御精度と熱サイクル性能試験を通じて、半導体および航空宇宙材料試験における信頼性を確保しています。

日本と韓国は、日本工業規格（JIS）と韓国技術標準院（KATS）を通じて MoSi_2 部品の関連仕様を策定し、高温セラミックスや半導体製造への応用に重点を置き、「ペスト」酸化を回避するための急激な温度上昇と温度下降など、酸化性および弱腐食性雰囲気における部品の動作条件を規定しています。これらの規格は通常、ISO および IEC の枠組みを参照していますが、日本の精密製造のニーズなど、地域の産業特性に合わせて調整されており、高精度な温度制御と部品の長寿命設計を重視しています。欧州、米国、日本、韓国の規格は、統一された試験方法と品質要件を通じて、世界市場での MoSi_2 部品の応用と取引を促進しています。



中ウォルフラム製造のモリブデンシリサイド発熱体

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発熱体の用語集

ケイ化モリブデン（MoSi₂）発熱体分野における一般的な専門用語とその定義をまとめたものです。製造業者、エンジニア、そしてユーザーにとって明確な技術資料となるよう設計されています。これらの用語は、材料特性、製造プロセス、性能試験、用途シナリオといった側面を網羅しており、MoSi₂発熱体の特性と使用仕様を理解するのに役立ちます。

用語	意味
ニケイ化モリブデン (MoSi ₂)	モリブデンとシリコンからなる金属間化合物で、高融点、高耐酸化性、優れた電熱特性を持ち、高温発熱体によく使用されます。
SiO ₂ 保護フィルム	MoSi ₂ を酸化雰囲気中で処理することで、材料のさらなる酸化を防ぎ、高温安定性を高めます。
ベスト酸化	MoSi ₂ は 400 ～ 700° C の温度範囲で非保護酸化物を形成し、材料の粉碎と劣化を引き起こします。
正温度係数抵抗率 (PTC)	温度とともに抵抗率が増加する MoSi ₂ は、適応型電力調整をサポートし、精密な温度制御アプリケーションに適しています。
ホットエンド	MoSi ₂ 発熱体は通常より薄く、主な熱を発生させる役割を果たします。一般的な仕様は Φ6mm または Φ9mm です。
冷接点	MoSi ₂ 加熱素子は通常、より厚く（Φ12mm または Φ18mm など）、抵抗率を下げるために導電性材料がドープされています。
U 字型要素	MoSi ₂ 加熱素子の構造は U 字型で、小型炉やセントラルヒーティングに適しており、取り付けや交換が簡単です。
W 型コンポーネント	MoSi ₂ 加熱素子、W 字型、大型炉に適しており、均一な熱場と優れた耐熱衝撃性を提供します。
スパイラル要素	MoSi ₂ 加熱素子は、集中した熱場と正確な温度制御を備え、管状炉や高精度加熱に適しています。
ストレートロッド要素	MoSi ₂ 加熱素子は広い面積を均一に加熱するのに適しており、連続工業炉でよく使用されます。
熱膨張係数	MoSi ₂ 材料の温度は約 $8.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ で、部品とブラケットのマッチング設計に影響します。
耐熱衝撃性	MoSi ₂ 部品が急激な温度変化に耐え、ひび割れを起こさないことは、その破壊靱性と熱膨張特性に関係しています。
破壊靱性	MoSi ₂ 材料の亀裂伝播に対する耐性は一般的に低く、微小亀裂のリスクを減らすためにプロセスを最適化する必要があります。
熱伝導率	MoSi ₂ 材料は、熱場の均一性と加熱効率に影響を与えます。
電力密度	単位面積あたりの加熱電力は MoSi ₂ 要素の加熱能力を反映しており、炉の種類とプロセスに応じて調整する必要があります。
ホットプレス (HP)	高温高压成形により密度と機械的特性を向上させる MoSi ₂ 部品製造プロセス。
加圧焼結	低い低コストの MoSi ₂ コンポーネント製造プロセス。要求がそれほど厳しくない用途に適しています。

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

自己増殖型高温合成（SHS）	MoSi ₂ は低コストですが均一性が悪いです。
等方圧加圧	MoSi ₂ ブランクは、複雑な形状の部品の製造に適しています。
表面コーティング	MoSi ₂ 表面に塗布された保護層（ SiC 、 Al ₂ O ₃ など）は、耐熱衝撃性と耐腐食性を高めるために使用されます。
プラズマ溶射	高温プラズマ噴霧により表面コーティングを施し、工業用途に適した高密度コーティングを形成する技術。
化学蒸着法（CVD）	MoSi ₂ 部品向けに薄く均一で密着性の高いコーティングを施す技術。
抵抗率試験	MoSi ₂ コンポーネントの抵抗率を測定するには、通常、4 プローブ法を使用して電熱性能を評価します。
抗酸化物質テスト	SiO ₂ 膜厚と質量損失を測定し、高温酸化雰囲気下での MoSi ₂ 成分の安定性を評価します。
熱衝撃性能試験	MoSi ₂ コンポーネントの亀裂耐性をテストし、微小亀裂と機械的強度の変化を評価します。
ビッカース硬度試験	ビッカース硬度計を用いた MoSi ₂ の硬度分布は、耐摩耗性と機械的特性を反映しています。
酸化雰囲気	MoSi ₂ 部品の主な適用条件。
還元雰囲気	水素や一酸化炭素などの還元性ガスを含む環境では、 SiO ₂ 膜の破損を避けるために MoSi ₂ の動作温度を下げる必要があります。
比例制御電源	MoSi ₂ コンポーネントの電力を正確に制御し、正の温度係数特性により安定した温度制御を実現する電源システム。
低抵抗グリッパー	MoSi ₂ 冷接点を電源に接続し、接触抵抗が低く、電気的安定性を確保します。
高純度アルミナブラケット	MoSi ₂ コンポーネントをサポートするために使用され、熱膨張係数を一致させて熱応力を低減します。
熱場の均一性	炉内の温度分布の均一性は、 MoSi ₂ コンポーネントのレイアウトと熱伝導率によって影響を受けるため、最適化された設計が必要です。
ドーピングの修正	MoSi ₂ に少量の元素（Y ₂ O ₃ 、 Al ₂ O ₃ など）を添加して、粒界強度や耐酸化性を向上させること。
粉末冶金	粉末プレスと焼結による MoSi ₂ 部品。複雑な形状の製造に適しています。
品質損失率	MoSi ₂ 成分は抗酸化性能を反映します。
粒度	MoSi ₂ 微細構造の結晶粒径は、機械的強度と耐熱衝撃性に影響します。

例：この用語集は、

MoSi₂発熱体の製造、試験、および応用の実践に基づいており、関連文献および技術データを参照しています。用語の定義は簡潔かつ正確で、セラミック、ガラス、半導体、新エネルギー、環境保護の分野に適用可能です。ユーザーは、具体的なプロセス要件に応じて用語をさらに補足または調整することができます。

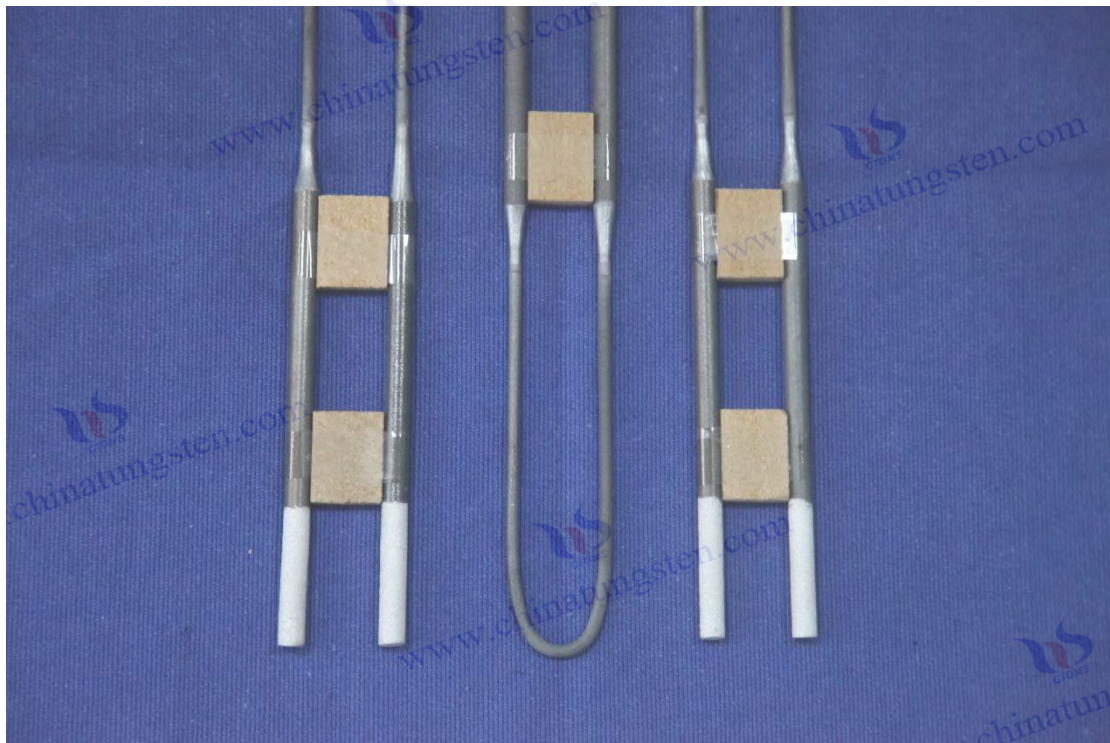
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

英語文学

- [1] 高温用途向け MoSi₂ベース材料の進歩. Materials Science and Engineering: A, 2010.
- [2] MoSi₂加熱素子の電気的および熱的特性. Ceramics International、2005 年。
- [3] ニケイ化モリブデン。アメリカンエレメンツ。
- [4] ニケイ化モリブデン発熱体。スタンフォード先端材料研究所。
- [5] ニケイ化モリブデン発熱体のユーザー ガイド。
- [6] MoSi₂ベース材料とその特性。Journal of Materials Science、1999 年。
- [7] MoSi₂加熱素子。Kanthal® 。
- [8] MoSi₂ベース材料の酸化挙動。アメリカセラミックス協会誌、2001 年。
- [9] MoSi₂加熱素子用表面コーティング。表面・コーティング技術、2008 年。
- [10] MoSi₂ベース発熱体の熱衝撃および疲労挙動。Journal of Materials Research、2003 年。



中ウォルフラム製造のモリブデンシリサイド発熱体

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