

# 什么是二硅化钼加热元件

中钨智造（厦门）科技有限公司  
CTIA GROUP LTD

中钨智造® | 硬科技·智未来  
全球钨钼稀土产业数字化智能化服务领航者

## 中钨智造简介

中钨智造科技有限公司（简称“中钨智造”CTIA GROUP）是中钨在线科技有限公司（简称“中钨在线”CHINATUNGSTEN ONLINE）设立的具有独立法人资格的子公司，致力于在互联网时代推动钨钼材料的智能化、集成化和柔性化设计与制造。中钨在线成立于 1997 年，以中国首个顶级钨制品网站 [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) 为起点，系国内首家专注钨、钼及稀土行业的电子商务公司。依托近三十年在钨钼领域的深厚积累，中钨智造传承母公司卓越的设计制造能力、优质服务及全球商业信誉，成为钨化学品、金属钨、硬质合金、高比重合金、钼及钼合金领域的综合应用解决方案服务商。

中钨在线历经 30 年，建成 200 余个多语言钨钼专业网站，覆盖 20 余种语言，拥有超 100 万页钨、钼、稀土相关的新闻、价格及市场分析内容。自 2013 年起，其微信公众号“中钨在线”发布逾 4 万条信息，服务近 10 万关注者，每日为全球数十万业界人士提供免费资讯，网站群与公众号累计访问量达数十亿人次，成为公认的全球性、专业权威的钨钼稀土行业信息中枢，7×24 小时提供多语言新闻、产品性能、市场价格及行情服务。

中钨智造承接中钨在线的技术与经验，聚焦客户个性化需求，运用 AI 技术与客户协同设计并生产符合特定化学成分及物理性能（如粒度、密度、硬度、强度、尺寸及公差）的钨钼制品，提供从开模、试制到精加工、包装、物流的全流程集成服务。30 年来，中钨在线已为全球超 13 万家客户提供 50 余万种钨钼制品的研发、设计与生产服务，奠定了客制化、柔性化与智能化的制造基础。中钨智造以此为依托，进一步深化工业互联网时代钨钼材料的智能制造与集成创新。

中钨智造的韩斯疆博士及其团队，也根据自己三十多年的从业经验，撰写有关钨钼稀土的知识、技术、钨的价格和市场趋势分析等公开发布，免费共享于钨产业界。韩斯疆博士自 1990 年代起投身钨钼制品电子商务、国际贸易及硬质合金、高比重合金的设计与制造，拥有逾 30 年经验，是国内外知名的钨钼制品专家。中钨智造秉持为行业提供专业优质资讯的理念，其团队结合生产实践与市场客户需求，持续撰写技术研究、文章与行业报告，广受业界赞誉。这些成果为中钨智造的技术创新、产品推广及行业交流提供坚实支撑，推动其成为全球钨钼制品制造与信息服务的引领者。



### 版权与法律责任声明

## 目录

### 第一章 引言

- 1.1 二硅化钼加热元件概述
- 1.2 二硅化钼加热元件发展史
- 1.3 二硅化钼加热元件的应用现状
- 1.4 二硅化钼加热元件的应用行业

### 第二章 二硅化钼加热元件特性及其影响因素

- 2.1 二硅化钼加热元件的物理性质
- 2.2 二硅化钼加热元件的电阻率
- 2.3 二硅化钼加热元件的高温电阻特性
- 2.4 二硅化钼加热元件的高温抗氧化性
- 2.5 二硅化钼加热元件的热导率与热扩散系数
- 2.6 二硅化钼加热元件的热震稳定性
- 2.7 二硅化钼加热元件的热冲击稳定性
- 2.8 二硅化钼加热元件的热疲劳性能
- 2.9 二硅化钼加热元件的表面状态
  - 2.9.1 常用保护层类型
  - 2.9.2 表面裂纹与涂层结合力研究
  - 2.9.3 表面  $\text{SiO}_2$  氧化膜的形成与保护
- 2.10 二硅化钼加热元件的表面问题及其解决方法
- 2.11 影响二硅化钼加热元件热力学性能的因素
  - 2.11.1 工作温度的影响
  - 2.11.2 气氛环境的影响
  - 2.11.3 加热/冷却频率的影响
  - 2.11.4 使用电压的影响
  - 2.11.5 使用电流密度的影响
  - 2.11.6 安装方式的影响
  - 2.11.7 元件质量与纯度的影响
  - 2.11.8 涂层保护处理的影响
- 2.12 中钨智造二硅化钼加热元件 MSDS

### 第三章 二硅化钼加热元件的结构与设计

- 3.1 二硅化钼加热元件的常见结构
  - 3.1.1 U 型二硅化钼加热元件
  - 3.1.2 W 型二硅化钼加热元件
  - 3.1.3 螺旋型二硅化钼加热元件
  - 3.1.4 直棒型二硅化钼加热元件
  - 3.1.5 U 型、W 型、直型结构设计比较
- 3.2 二硅化钼加热元件的尺寸设计（常见的有  $\Phi 6/12$  和  $\Phi 9/18$ ）
- 3.3 热场与冷端结构优化设计

#### 版权与法律责任声明

- 3.4 电气连接与支架系统设计
- 3.5 端头结构与连接方式
- 3.6 产品定制化设计要点

## 第四章 二硅化钼加热元件的制造工艺

- 4.1 原材料选择与配比原则
- 4.2 粉末冶金与等静压成型工艺
- 4.3 高温烧结与后处理技术
- 4.4 表面防护层技术
- 4.5 焊接与端头加工技术

## 第五章 二硅化钼加热元件的性能测试

- 5.1 电阻率与温度关系测试
- 5.2 高温使用寿命与热震性能关系测试
- 5.3 氧化环境下的稳定性测试
- 5.4 加热元件的硬度测试
- 5.5 抗氧化性与温度关系测试
- 5.6 棒体表面粗糙度与电阻率关系
- 5.7 棒体涂层均匀性对使用寿命的影响
- 5.8 使用寿命与应力耦合关系
- 5.9 开裂、弯折与端部烧蚀机理
- 5.10 微观结构分析与失效模式研究

## 第六章 二硅化钼加热元件的安装

- 6.1 安装前准备工作
- 6.2 安装步骤详解
- 6.3 安装注意事项
- 6.4 安全操作规范
- 6.5 常见故障与维护指南
  - 6.5.1 加热元件断裂的原因及其解决方法
  - 6.5.2 氧化层剥落的原因与再生处理
  - 6.5.3 加热元件日常的保养方法
  - 6.5.4 加热元件更换与回收再利用技术
- 6.6 工业炉窑中的典型安装方式

## 第七章 二硅化钼加热元件的测试标准与认证

- 7.1 加热元件性能测试方法
- 7.2 ISO、ASTM 等标准解析
- 7.3 环境适应性测试
- 7.4 失效模式与寿命预估方法
- 7.5 安全与电气规范要求



## 第八章 二硅化钼加热元件的应用

- 8.1 二硅化钼加热元件在冶金行业中的应用
  - 8.1.1 金属熔炼与热处理
  - 8.1.2 高温烧结工艺
  - 8.1.3 热处理设备
- 8.2 二硅化钼加热元件在陶瓷行业中的应用
  - 8.2.1 陶瓷烧制与釉化处理
  - 8.2.2 特种陶瓷材料制备
- 8.3 二硅化钼加热元件在光伏行业的应用
  - 8.3.1 硅片制造高温工艺
  - 8.3.2 太阳能电池生产设备
- 8.4 二硅化钼加热元件在半导体行业的应用
  - 8.4.1 晶圆退火与扩散工艺
  - 8.4.2 半导体外延生长
  - 8.4.3 高温刻蚀设备
  - 8.4.4 真空镀膜设备
- 8.5 二硅化钼加热元件在玻璃制造行业的应用
  - 8.5.1 玻璃熔融
  - 8.5.2 玻璃加工
- 8.6 二硅化钼加热元件在新能源材料制备中的应用
  - 8.6.1 锂电池材料烧结
  - 8.6.2 氢能与燃料电池
- 8.7 二硅化钼加热元件在环保与催化领域的应用
  - 8.7.1 废气处理
  - 8.7.2 催化剂再生
  - 8.7.3 固废资源化
- 8.8 二硅化钼加热元件在其他领域的应用
  - 8.8.1 航空航天材料测试
  - 8.8.2 核工业辅助设备
  - 8.8.3 高温合成化学
  - 8.8.4 二硅化钼棒变压器

## 第九章 二硅化钼加热元件与其他加热材料的比较

- 9.1 与钨加热元件的对比
- 9.2 与碳化硅元件的比较
- 9.3 加热元件成本、效率与应用适配性分析

## 第十章 二硅化钼加热元件的相关标准与规范

- 10.1 二硅化钼加热元件的中国国家标准
- 10.2 二硅化钼加热元件的国际标准
- 10.3 欧美日韩等世界各国的二硅化钼加热元件标准

附录:

专业术语表

参考文献



中钨智造硅钼棒

中钨智造科技有限公司  
二硅化钼加热元件产品介绍

## 一、二硅化钼加热元件概述

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件是一种具有优异高温性能的陶瓷电热材料，广泛应用于工业炉窑领域。该材料在高温氧化气氛中能够形成致密的二氧化硅（ $\text{SiO}_2$ ）保护层，有效防止进一步氧化，具备出色的抗氧化能力和热稳定性。其可在高温下长时间稳定工作，是多种高温热处理工艺的理想选择。

## 二、二硅化钼加热元件特性

**低膨胀系数：**与常见的陶瓷基体材料匹配较好，减少了热应力引起的开裂风险。  
**优异的抗氧化性能：**表面形成致密的  $\text{SiO}_2$  保护膜，有效防止材料氧化损耗。  
**极高的工作温度：**可持续工作温度可达  $1700^\circ\text{C}$ ，最高可使用至  $1800^\circ\text{C}$ （氧化气氛中）。  
**良好的高温电阻特性：**在高温下， $\text{MoSi}_2$  的电阻率表现相对稳定，高温段电阻率增幅缓慢。

## 三、二硅化钼加热元件规格

二硅化钼加热元件有直型棒、U 型棒、W 型棒等类型，典型规格型号参考如下：

| 型号 (d1/d2) | 热端直径 d1 | 冷端直径 d2 | 热端长度 Le     | 冷端长度 Lu    | 常见类型           |
|------------|---------|---------|-------------|------------|----------------|
| φ3/6       | 3 mm    | 6 mm    | 100–300 mm  | 150–250 mm | 直棒 / U 型       |
| φ4/9       | 4 mm    | 9 mm    | 100–500 mm  | 200–300 mm | 直棒 / U 型       |
| φ6/12      | 6 mm    | 12 mm   | 100–600 mm  | 200–350 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ9/18      | 9 mm    | 18 mm   | 150–800 mm  | 250–400 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ12/24     | 12 mm   | 24 mm   | 200–1000 mm | 300–500 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |

## 四、二硅化钼加热元件典型应用

陶瓷、粉末冶金等行业的高温烧结炉  
钢铁、有色金属热处理设备  
实验室高温电炉  
玻璃熔融与加工设备  
半导体、光伏行业的扩散、退火及氧化工艺

## 五、采购信息

邮箱: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多硅钼棒资讯，请访问中钨在线网站 ([www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn))。

更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



### 版权与法律责任声明

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

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

## 第一章 引言

### 1.1 二硅化钼加热元件概述

二硅化钼( $\text{MoSi}_2$ )是一种金属间化合物,化学分子式为  $\text{MoSi}_2$ ,具有较高的熔点(约  $2030^\circ\text{C}$ )、优异的抗高温氧化性能以及良好的导电性和导热性,因其兼具金属与陶瓷的特性而被广泛应用于高温加热领域。二硅化钼加热元件作为一种电阻发热材料,主要用于高温氧化气氛下的电加热设备,其表面在高温下会生成一层致密的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )保护膜,有效防止内部进一步氧化,从而延长使用寿命。 $\text{MoSi}_2$ 加热元件可在  $500\text{--}1850^\circ\text{C}$  的温度范围内稳定工作,适用于陶瓷烧结、玻璃熔融、金属热处理、高温烧结以及实验室高温炉等工业和科研领域。相比其他加热材料如碳化硅( $\text{SiC}$ ),二硅化钼具有更高的使用温度和更优异的高温抗氧化性能,但其低温脆性和高温蠕变性能的局限性也限制了部分结构应用。当前,二硅化钼加热元件的形状多样,包括 U 型、W 型、L 型以及定制形状,广泛满足不同工业炉的需求。

### 1.2 二硅化钼加热元件发展史

二硅化钼作为一种高温材料的研究始于 20 世纪初,但其作为加热元件的应用则起步于 20 世纪中叶。1904 年,科学家首次报道了  $\text{MoSi}_2$  的晶体结构,确认其为四方  $\alpha$  型晶体,具有较高的熔点和金属间化合物的特性。然而,由于当时制备技术和材料纯度的限制, $\text{MoSi}_2$  主要被用作实验室研究对象,而非工业材料。20 世纪 30 年代,随着高温合金和陶瓷材料研究的深入, $\text{MoSi}_2$  因其优异的高温抗氧化性和导电性开始受到关注。研究人员发现, $\text{MoSi}_2$  在高温氧化气氛下表面形成的  $\text{SiO}_2$  保护膜能够显著提高其耐久性,这为后续加热元件的开发奠定了理论基础。

1947 年,瑞典 Kanthal 公司率先制备出第一支工业化二硅化钼发热棒,标志着  $\text{MoSi}_2$  加热元件正式进入商业应用阶段。这些早期发热棒主要用于高温工业炉,最高使用温度约为  $1600^\circ\text{C}$ 。Kanthal 公司通过优化  $\text{MoSi}_2$  的烧结工艺和掺杂技术,显著提高了元件的机械强度和抗氧化性能。20 世纪 50-60 年代,随着真空烧结和等离子喷涂等先进制备技术的出现, $\text{MoSi}_2$  加热元件的生产效率和性能进一步提升。元件形状从单一的直棒发展为 U 型和 L 型,以适应不同炉型的需求。此外,研究人员通过掺杂稀土元素或其他金属(如 W、Nb),改善了  $\text{MoSi}_2$  在低温下的脆性和高温下的蠕变性能,使其应用范围进一步扩大。

进入 20 世纪 80 年代,中国开始实现二硅化钼加热元件的工业化生产,初期主要依赖进口技术,但逐渐形成了自主研发能力。这一时期, $\text{MoSi}_2$  加热元件的最高使用温度已提升至  $1800^\circ\text{C}$ ,并广泛应用于陶瓷、玻璃和耐火材料等行业。瑞典 Kanthal 公司在此期间推出了 Kanthal Super 1900 型发热元件,其最高使用温度达到  $1850^\circ\text{C}$ ,成为行业标杆。该产品的成功得益于高纯度原料的使用以及冷端与热端焊接技术的改进,使得元件在高低温循环中的稳定性显著增强。

20 世纪 90 年代至今, $\text{MoSi}_2$  加热元件的研发重点转向性能优化和应用拓展。新型制备工艺如热压烧结、反应烧结和自蔓延高温合成(SHS)显著提高了材料的致密度和力学性能。同时, $\text{MoSi}_2$  涂层技术的发展使其在航空航天领域作为高温防护涂层得到应用,例如用于燃气



涡轮机叶片和喷气发动机部件。此外，纳米级  $\text{MoSi}_2$  粉体的开发为制备高性能复合材料提供了可能，部分解决了其低温脆性的问题。全球市场方面，2016 年  $\text{MoSi}_2$  加热元件市场价值约为 1.03 亿美元，预计 2022 年达到 1.35 亿美元，复合年增长率为 4.7%，反映了其在高温工业领域的持续需求。

尽管  $\text{MoSi}_2$  加热元件在高温领域表现出色，但其发展仍面临挑战。低温脆性和高温蠕变性能的不足限制了其作为结构材料的应用，而生产成本较高也影响了在低端市场的竞争力。未来，研究方向可能集中在复合材料开发、掺杂改性和新型制备工艺上，以进一步提升性能并降低成本。

### 1.3 二硅化钼加热元件的应用现状

二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 加热元件因其优异的高温抗氧化性、最高可达  $1850^\circ\text{C}$  的使用温度以及稳定的电性能，在全球高温工业领域中具有重要地位。该元件广泛应用于工业生产、科学研究和特殊材料加工中的高温电炉。其核心优势在于能够在氧化气氛下长期稳定运行，表面生成的致密二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 保护膜有效防止内部氧化，从而显著延长使用寿命。近年来，材料科学和制造工艺的进步推动了  $\text{MoSi}_2$  加热元件的性能提升。例如，通过掺杂改性和先进烧结技术，元件的低温脆性和高温蠕变性能得到改善，使其能够适应更为苛刻的工作环境。

在全球市场中， $\text{MoSi}_2$  加热元件的需求持续增长，特别是在陶瓷、玻璃和半导体行业。瑞典 Kanthal 公司凭借其 Kanthal Super 系列产品（如 Kanthal Super 1900）在市场上占据主导地位，该系列产品以优异的高温性能和可靠性著称。中国、日本和美国的企业也在积极研发和生产  $\text{MoSi}_2$  加热元件，其中中国在成本控制和规模化生产方面具有显著优势。制造工艺方面，热压烧结、反应烧结和自蔓延高温合成 (SHS) 等技术提高了材料的致密度和力学性能，元件的形状也从单一的直棒发展为 U 型、W 型、L 型及定制形状，以满足不同炉型设计的需求。此外，纳米级  $\text{MoSi}_2$  粉体的开发为高性能复合材料和涂层开辟了新应用领域，例如在航空航天和能源行业中的高温防护涂层。

尽管  $\text{MoSi}_2$  加热元件在高温领域表现优异，但仍面临一些挑战。低温脆性限制了其在某些结构应用中的潜力，而较高的生产成本使其在低端市场中面临碳化硅 ( $\text{SiC}$ ) 等替代材料的竞争。当前的研究重点包括通过掺杂稀土元素或金属（如 W、Nb）改善力学性能，以及开发新型复合材料以提升抗热震性和耐久性。随着智能化高温炉的兴起，对  $\text{MoSi}_2$  加热元件的精准控温和长寿命要求进一步提高，推动了相关控制技术和材料优化的发展。未来，随着全球对高效节能和环保生产方式的需求增加， $\text{MoSi}_2$  加热元件有望在更多新兴领域得到应用。

### 1.4 二硅化钼加热元件的应用行业

二硅化钼加热元件因其高温稳定性、抗氧化性和优异的电性能，在多个行业中得到广泛应用。以下为主要应用领域：在陶瓷工业中， $\text{MoSi}_2$  加热元件是烧结和高温处理过程中的关键部件，用于生产结构陶瓷、功能陶瓷和耐火材料。其最高  $1850^\circ\text{C}$  的使用温度能够满足高性能陶瓷（如氧化铝、氧化锆和氮化硅）的烧结需求，确保产品质量和工艺稳定性。玻璃工业中， $\text{MoSi}_2$

加热元件被广泛应用于高温熔炉和退火炉，用于光学玻璃、平板玻璃和特种玻璃的生产。其抗氧化性和长寿命特性使其能够在高温氧化气氛下持续工作，显著提高生产效率。

金属热处理领域， $\text{MoSi}_2$ 加热元件用于高温退火、淬火和钎焊工艺，特别适用于不锈钢、钛合金和高温合金的处理。其快速升温和精确控温能力提升了产品质量和工艺效率。

半导体工业中，高温扩散炉和氧化炉常采用  $\text{MoSi}_2$ 加热元件，用于硅片热处理和薄膜沉积工艺。其高纯度和稳定性满足了半导体行业对洁净环境和精准温控的严格要求。

航空航天领域， $\text{MoSi}_2$ 不仅作为加热元件，还以涂层形式用于燃气轮机叶片和喷气发动机部件的防护涂层，其高温抗氧化性和耐腐蚀性使其在极端环境下表现出色。

科学研究领域， $\text{MoSi}_2$ 加热元件被广泛用于材料科学、物理学和化学实验室中的高温实验炉，如热重分析仪、差示扫描量热仪和高温合成设备，为新型材料研发提供支持。

耐火材料与冶金行业， $\text{MoSi}_2$ 加热元件用于耐火材料烧结和冶金过程中的高温处理，例如生产高纯度金属和合金，其高效率和长寿命降低了生产成本。

能源与环保领域， $\text{MoSi}_2$ 加热元件应用于高温焚烧炉、固体氧化物燃料电池（SOFC）测试设备以及废物热处理系统，助力实现清洁生产和能源高效利用。

$\text{MoSi}_2$ 加热元件的多行业应用得益于其材料特性和制造技术的进步。不同行业对其性能要求有所差异，例如陶瓷和玻璃行业更注重高温稳定性和寿命，而半导体行业强调高纯度和控温精度。未来，随着各行业对高温设备性能的更高要求， $\text{MoSi}_2$ 加热元件有望通过材料优化和工艺创新在更多领域实现突破。



中钨智造硅钼棒



## 第二章 二硅化钼加热元件特性及其影响因素

### 2.1 二硅化钼加热元件的物理性质

二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 是一种金属间化合物, 兼具金属和陶瓷的特性, 其物理性质决定了其作为高温加热元件的优异性能。 $\text{MoSi}_2$  的晶体结构为四方  $\alpha$  型 (C11b 型), 空间群为  $I4/mmm$ , 具有较高的对称性和稳定性。其熔点约为  $2030^\circ\text{C}$ , 使其能够在极端高温下保持结构完整性。密度为  $6.24 \text{ g/cm}^3$ , 相对较低, 有助于减轻加热元件的重量, 适合复杂形状设计。 $\text{MoSi}_2$  的热膨胀系数约为  $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (室温至  $1000^\circ\text{C}$ ), 与常见的陶瓷基体材料 (如氧化铝、氧化锆) 匹配较好, 减少了热应力引起的开裂风险。

$\text{MoSi}_2$  的导热系数在室温下约为  $45 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , 随温度升高逐渐下降, 但在高温下仍能有效传递热量, 确保加热元件的均匀升温。其硬度较高, 维氏硬度约为  $1200 \text{ HV}$ , 具有良好的抗磨损性能, 但其低温下的脆性 (断裂韧性约为  $2\text{--}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) 使其易受机械冲击损伤。 $\text{MoSi}_2$  在高温氧化气氛下的抗氧化性能尤为突出, 表面会在  $800^\circ\text{C}$  以上生成一层致密的  $\text{SiO}_2$  保护膜, 有效阻止氧气进一步扩散, 保护内部结构免受氧化侵蚀。这一特性使其能够在氧化气氛中长期工作, 最高使用温度可达  $1850^\circ\text{C}$ 。

$\text{MoSi}_2$  的物理性质受多种因素影响。原料纯度是关键, 高纯度  $\text{MoSi}_2$  能够减少杂质引起的晶界弱化, 提升力学性能和抗氧化性。制备工艺如热压烧结或反应烧结会影响材料的致密度, 致密度越高, 抗氧化性和导热性越优。掺杂改性 (如添加  $\text{Al}$ 、 $\text{W}$  或稀土元素) 可改善其低温脆性和高温蠕变性能, 但可能略微降低抗氧化性。此外, 工作环境 (如气氛类型和温度循环频率) 对物理性质的稳定性也有显著影响, 例如在还原气氛下,  $\text{SiO}_2$  保护膜可能失效, 导致材料加速劣化。

### 2.2 二硅化钼加热元件的电阻率

$\text{MoSi}_2$  加热元件的电阻率是其作为电热材料的核心性能参数, 直接影响加热效率和控温精度。 $\text{MoSi}_2$  的电阻率随温度变化呈现非线性特性。在室温下, 其电阻率约为  $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ , 随着温度升高, 电阻率逐渐增加, 至  $1000^\circ\text{C}$  左右达到约  $4.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 。这种正温度系数特性使得  $\text{MoSi}_2$  加热元件在高温下能够自动调节功率, 防止过热, 提高使用安全性。在  $1000^\circ\text{C}$  以上, 电阻率增幅趋缓, 趋于稳定, 有助于高温段的精确控温。

$\text{MoSi}_2$  电阻率的变化受材料组成、微观结构和外部环境的影响。原料纯度和杂质含量对电阻率有显著作用, 例如铁、铝等杂质会增加电阻率并降低稳定性, 而高纯度  $\text{MoSi}_2$  表现出更一致的电性能。晶粒尺寸和晶界特性也至关重要, 较小的晶粒尺寸通常伴随较高的晶界电阻, 导致电阻率略高, 但可提高力学强度。制备工艺对电阻率的影响同样显著, 热压烧结制备的  $\text{MoSi}_2$  致密度较高, 晶界缺陷较少, 电阻率较低且稳定, 而反应烧结样品可能因孔隙率较高而电阻率偏大。

掺杂改性是调节  $\text{MoSi}_2$  电阻率的重要手段。添加钨 ( $\text{W}$ ) 或铌 ( $\text{Nb}$ ) 可降低电阻率, 增强高温电导率, 但可能牺牲部分抗氧化性能。稀土元素掺杂 (如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) 则通过改善晶界结构, 稳定

电阻率随温度的变化。工作环境对电阻率的影响不可忽视，在氧化气氛下， $\text{SiO}_2$ 保护膜的形成对电阻率影响较小，但在还原或真空环境中，表面可能发生 Si 挥发，导致电阻率逐渐升高，影响长期稳定性。

$\text{MoSi}_2$ 加热元件的电阻率设计需根据具体应用优化。例如，陶瓷烧结炉要求电阻率稳定以确保均匀加热，而半导体热处理炉则需较低的电阻率以实现快速升温。实际应用中，冷端（通常掺杂导电性更高的材料）与热端的电阻率匹配设计可提高整体效率，减少能量损耗。

### 2.3 二硅化钼加热元件的高温电阻特性

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件的高温电阻特性是其作为电热材料的核心性能之一，直接影响其加热效率、控温精度和使用寿命。在高温范围内， $\text{MoSi}_2$ 的电阻率表现出相对稳定性，相比室温至  $1000^\circ\text{C}$  的快速增加，高温段电阻率增幅显著减缓。例如，在室温下， $\text{MoSi}_2$ 的电阻率约为  $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ，至  $1000^\circ\text{C}$  时增至约  $4.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ，而在  $1500^\circ\text{C}$  时约为  $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ，之后随温度进一步升高变化较小。这种正温度系数（PTC）特性使  $\text{MoSi}_2$  在高温下能够自动调节功率输出，避免过热，提高安全性，同时为陶瓷烧结、半导体热处理等需要精确控温的应用提供了稳定性能。高温电阻特性的稳定性源于  $\text{MoSi}_2$  的金属间化合物结构，其导电机理以金属键为主，即使在高温下晶格振动增强导致电子散射增加，电导率仍保持较高水平。然而，长期高温运行可能导致电阻率轻微漂移，主要由表面  $\text{SiO}_2$  保护膜的生成或微量 Si 挥发引起的成分变化，以及热应力诱发的微观结构演变（如晶粒长大或晶界弱化）所致。

影响高温电阻特性的因素包括材料纯度、掺杂改性和工作环境。高纯度  $\text{MoSi}_2$  能减少杂质（如 Fe、Al）引起的电阻不稳定性，确保电性能一致性。掺杂金属元素（如 W、Nb）可降低电阻率，增强高温电导率，但可能略微降低抗氧化性能，而稀土元素（如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）掺杂通过优化晶界结构，稳定电阻率随温度的变化。在氧化气氛下， $\text{SiO}_2$  保护膜对电阻率影响较小，但在还原或真空环境中，Si 挥发会导致电阻率逐渐升高，加速元件老化。制备工艺对电阻特性也有重要影响，热压烧结制备的  $\text{MoSi}_2$  致密度高，晶界缺陷少，电阻特性更稳定，而孔隙率较高的反应烧结样品可能因局部电流不均匀而性能下降。在实际应用中，冷端通常掺杂高导电性材料以降低电阻，优化冷端与热端的电阻匹配可提高能量效率。定期维护和避免极端温度循环有助于维持高温电阻特性的长期稳定性。

### 2.4 二硅化钼加热元件的高温抗氧化性

二硅化钼加热元件的高温抗氧化性是其氧化气氛下长期稳定工作的关键特性，使其成为高温电炉的优选材料。在  $800^\circ\text{C}$  以上， $\text{MoSi}_2$  表面会迅速生成一层致密的二氧化硅（ $\text{SiO}_2$ ）保护膜，该膜具有低氧扩散系数和良好的自修复能力，有效阻止氧气向内部渗透，保护基体免受氧化侵蚀。其氧化反应为： $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$ ，其中  $\text{MoO}_3$  在高温下挥发，剩余的  $\text{SiO}_2$  形成连续保护层。在  $1200\text{--}1850^\circ\text{C}$  范围内，这层保护膜使  $\text{MoSi}_2$  能够在氧化气氛下长期稳定运行，适用于陶瓷烧结、玻璃熔融等高温工艺。然而，在  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  的低温范围内， $\text{MoSi}_2$  易发生“瘟病”（pestring）现象，氧化生成非保护性的  $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物，导致材料粉化，尤其在频繁的温度循环中更为明显。为避免这一问题，实际应用中通常快速通过该温

度区间。 $\text{MoSi}_2$ 在还原气氛(如  $\text{H}_2$ )或真空环境中抗氧化性较差,因  $\text{SiO}_2$ 保护膜无法形成或被破坏,导致 Si 挥发和材料劣化,因此不适合此类环境。影响高温抗氧化性的因素包括材料纯度、微观结构和掺杂改性。高纯度  $\text{MoSi}_2$ 可减少杂质引起的晶界氧化,增强  $\text{SiO}_2$ 膜的致密性。致密的微观结构(如通过热压烧结获得)能减少氧气扩散路径,提高抗氧化性能。掺杂稀土元素(如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ )或氧化物可改善  $\text{SiO}_2$ 膜的附着力和自修复能力,而某些金属掺杂(如 W)可能因改变氧化动力学而降低抗氧化性。工作环境的湿度也会影响抗氧化性能,高湿环境中  $\text{SiO}_2$ 膜可能发生水化反应,降低保护效果。为提升高温抗氧化性,现代  $\text{MoSi}_2$ 加热元件常采用表面涂层技术(如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 或  $\text{ZrO}_2$ 涂层)以增强保护效果,或通过优化烧结工艺提高材料致密度。实际应用中,保持稳定的氧化气氛和避免频繁低温循环是延长抗氧化寿命的关键。

## 2.5 二硅化钼加热元件的热导率与热扩散系数

二硅化钼加热元件的热导率和热扩散系数是其热传导性能的重要指标,直接影响升温速率、温度均匀性和能量效率。 $\text{MoSi}_2$ 的热导率在室温下约为  $45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,随温度升高逐渐下降,至  $1000^\circ\text{C}$ 时约为  $25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $1500^\circ\text{C}$ 时进一步降至约  $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。尽管高温下热导率降低, $\text{MoSi}_2$ 仍能有效传递热量,确保炉内温度分布均匀,适合陶瓷烧结、玻璃熔融等需要高热均匀性的应用。热导率的变化主要源于  $\text{MoSi}_2$ 的晶格振动和电子导热机制,在低温下电子导热占主导,而高温下声子散射增强导致热导率下降。 $\text{MoSi}_2$ 的热扩散系数( $\alpha = k / (\rho \cdot c)$ ),其中  $k$  为热导率,  $\rho$  为密度,  $c$  为比热容)同样随温度变化。室温下, $\text{MoSi}_2$ 的比热容约为  $0.45 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ,密度为  $6.24 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,热扩散系数约为  $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ;高温下比热容略增,热扩散系数因热导率下降而减小。影响热导率和热扩散系数的因素包括材料纯度、微观结构和掺杂改性。杂质(如 Fe、C)会增加声子散射,降低热导率,而高纯度  $\text{MoSi}_2$ 具有更高的热传导效率。致密度高的  $\text{MoSi}_2$ (如热压烧结样品)热导率较高,而孔隙率高的样品因孔隙散射热量而热导率较低。掺杂改性的影响复杂,添加 W 可略增热导率,而稀土氧化物掺杂可能因晶界散射而降低热导率。在实际应用中,热导率和热扩散系数需根据炉型和工艺优化,例如半导体热处理炉要求较高的热导率以实现快速升温,而大型陶瓷烧结炉更注重热均匀性。优化制备工艺(如提高致密度)和合理设计元件形状(如增加热端表面积)可提升热传导性能,降低能量损耗。

## 2.6 二硅化钼加热元件的热震稳定性

二硅化钼( $\text{MoSi}_2$ )加热元件的热震稳定性是指其在快速温度变化下抵抗热应力诱发的开裂或断裂的能力,是评估其在高温循环环境中的可靠性的重要指标。 $\text{MoSi}_2$ 的热震稳定性与其较低的热膨胀系数和适中的热导率密切相关。这些特性使  $\text{MoSi}_2$ 在快速升降温过程中能够较好地分散热应力,减少因温度梯度引起的内部应力集中。然而, $\text{MoSi}_2$ 的低温脆性使其在剧烈热震条件下仍可能发生微裂纹或断裂,尤其在频繁的高低温循环中。热震稳定性的表现直接影响  $\text{MoSi}_2$ 加热元件在陶瓷烧结炉、玻璃熔融炉等需要快速升温或冷却的应用中的寿命和可靠性。影响热震稳定性的主要因素包括材料纯度、微观结构和制备工艺。高纯度  $\text{MoSi}_2$ 可减少杂质(如 Fe、Al)引起的晶界弱化,从而降低热震诱发的裂纹扩展风险。微观结构方面,致密的  $\text{MoSi}_2$ (如通过热压烧结制备)具有较少的孔隙和缺陷,能够有效分散热应力,而孔隙率较高的样品在热震下易发生局部应力集中,导致开裂。掺杂改性对热震稳定性也有显著影响,例如添加稀土氧化物(如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ )或氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )可提高晶界强度,增强抗热



震性能，而某些金属掺杂（如 W）可能因改变热膨胀特性而略微降低热震稳定性。工作环境中的温度变化速率和循环频率是关键外部因素，快速的热震循环（如从 1500℃ 骤降至室温）会加剧热应力积累，缩短元件寿命。在实际应用中，优化炉内温度控制策略（如缓慢升降温）以及设计合理的元件形状（如避免尖锐棱角以减少应力集中）可显著提升热震稳定性。此外，表面涂层技术（如 SiC 或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层）可进一步提高  $\text{MoSi}_2$  的抗热震性能，延长使用寿命。

## 2.7 二硅化钼加热元件的热冲击稳定性

二硅化钼加热元件的热冲击稳定性是指其在极端温度梯度或瞬时热冲击（如直接暴露于冷空气或液体冷却）下抵抗开裂或性能劣化的能力，与热震稳定性密切相关但更强调瞬时、剧烈的温度变化。 $\text{MoSi}_2$  的热冲击稳定性得益于其较低的热膨胀系数和适中的热导率，这两者共同作用使材料能够在瞬时温度变化中较好地分散热应力。然而，由于  $\text{MoSi}_2$  的断裂韧性较低，其在剧烈的热冲击条件下可能发生微裂纹扩展甚至宏观断裂，尤其在 400–700℃ 的“瘟病”温度范围内，热冲击可能加剧氧化粉化，导致材料失效。热冲击稳定性对  $\text{MoSi}_2$  加热元件在高温炉快速启停或非均匀加热环境中的应用至关重要，例如在玻璃成型或金属热处理过程中。影响热冲击稳定性的因素包括材料组成、微观结构和外部环境。

纯度较高的  $\text{MoSi}_2$  可减少晶界杂质引起的应力集中，提高热冲击抗性。致密的微观结构（如通过热压烧结或反应烧结获得）可有效降低热冲击诱发的裂纹扩展，而孔隙率较高的样品因缺陷较多，热冲击稳定性较差。掺杂改性对热冲击稳定性有双重影响，例如添加稀土元素（如  $\text{La}_2\text{O}_3$ ）可增强晶界结合力，提高抗裂性能，而某些金属掺杂可能因热膨胀失配而降低稳定性。工作环境中的热冲击强度（如冷空气喷射或液体冷却）和循环次数会显著影响性能，剧烈的热冲击会导致表面  $\text{SiO}_2$  保护膜开裂，降低抗氧化性。在实际应用中，优化元件设计（如采用 U 型或 W 型结构以增加热应力分散）和控制热冲击条件（如避免直接暴露于冷介质）可提高热冲击稳定性。此外，表面改性技术（如涂覆高韧性陶瓷涂层）能够增强  $\text{MoSi}_2$  的抗热冲击能力，减少裂纹扩展。

## 2.8 二硅化钼加热元件的热疲劳性能

二硅化钼加热元件的热疲劳性能是指其在反复高温–低温循环下抵抗性能退化（如电阻率升高、机械强度下降或表面保护膜劣化）的能力，是评估其长期使用可靠性的关键指标。 $\text{MoSi}_2$  的热疲劳性能受其较低的热膨胀系数、适中的热导率以及高温抗氧化性的共同影响。在氧化气氛下， $\text{MoSi}_2$  表面形成的  $\text{SiO}_2$  保护膜能够在多次热循环中保持稳定，减缓材料劣化。然而，热疲劳过程中，反复的热应力和机械应力可能导致微裂纹的萌生与扩展，尤其在低温脆性显著的  $\text{MoSi}_2$  中，热疲劳可能引发元件断裂或电性能漂移。此外，在 400–700℃ 的“瘟病”温度范围内，热疲劳循环可能加剧氧化粉化，加速材料失效。热疲劳性能直接影响  $\text{MoSi}_2$  加热元件在陶瓷烧结、金属热处理等需要频繁热循环的应用中的寿命。影响热疲劳性能的因素包括材料纯度、微观结构、掺杂改性和工作环境。

高纯度  $\text{MoSi}_2$  可减少杂质引起的晶界弱化，降低热疲劳裂纹的风险。致密的微观结构（如热压烧结样品）能有效分散循环热应力，提高热疲劳寿命，而孔隙率较高的样品易因应力集中而失效。掺杂改性对热疲劳性能有重要影响，例如添加稀土氧化物（如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）或氧化铝可增



强晶界强度，抑制裂纹扩展，而某些金属掺杂可能因热膨胀失配而降低热疲劳性能。工作环境中的热循环幅度、频率和气氛类型对热疲劳性能影响显著，例如在还原或真空环境中， $\text{SiO}_2$ 保护膜失效会导致 Si 挥发，加速热疲劳劣化。在实际应用中，优化热循环参数（如降低升降温速率）、改进元件设计（如增加热端强度）以及采用表面涂层技术（如 SiC 或  $\text{ZrO}_2$  涂层）可显著提高热疲劳性能。定期检查和维修也能有效延长  $\text{MoSi}_2$  加热元件的热疲劳寿命。

## 2.9 二硅化钼加热元件的表面状态

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件的表面状态对其高温性能、使用寿命和可靠性具有重要影响。 $\text{MoSi}_2$  的表面特性主要体现在其自然形成的  $\text{SiO}_2$  氧化膜、表面微观结构以及外加保护涂层的性能上。在高温氧化气氛下， $\text{MoSi}_2$  表面会在  $800^\circ\text{C}$  以上生成一层致密的  $\text{SiO}_2$  保护膜，这层膜是其优异抗氧化性的关键，能够有效阻止氧气向内部扩散，保护基体免受氧化侵蚀。然而，表面状态不仅受氧化膜的影响，还与表面缺陷（如微裂纹、孔隙）、涂层质量以及长期使用中的表面演变密切相关。 $\text{MoSi}_2$  的表面状态直接决定了其在高温循环、热震和热疲劳条件下的稳定性，特别是在陶瓷烧结、玻璃熔融和半导体热处理等高要求应用中。

表面状态的优劣受多种因素影响，包括材料纯度、制备工艺和工作环境。高纯度  $\text{MoSi}_2$  能够减少表面杂质（如 Fe、Al）引起的晶界弱化，生成更均匀、致密的  $\text{SiO}_2$  膜。制备工艺如热压烧结或反应烧结对表面粗糙度和孔隙率有显著影响，热压烧结制备的  $\text{MoSi}_2$  表面更光滑、缺陷更少，有利于形成稳定的氧化膜，而反应烧结样品可能因表面孔隙较多而降低保护效果。工作环境中的气氛类型、湿度和温度循环频率也会影响表面状态，例如高湿环境可能导致  $\text{SiO}_2$  膜水化，降低其保护能力，而频繁的温度循环可能引发表面裂纹或涂层剥落。为优化表面状态，现代  $\text{MoSi}_2$  加热元件常通过表面改性（如涂层技术）或工艺优化（如表面抛光）来提升抗氧化性和耐久性。

表面状态的长期稳定性对  $\text{MoSi}_2$  加热元件的性能至关重要。在高温长期运行中，表面  $\text{SiO}_2$  膜可能因 Si 挥发或  $\text{MoO}_3$  挥发而变薄，特别是在还原或真空环境中，表面保护能力会显著下降。此外，表面微裂纹的萌生和扩展可能因热应力或机械应力而加剧，尤其在热震或热疲劳条件下。实际应用中，定期检查表面状态、优化升降温速率以及采用保护涂层是维持  $\text{MoSi}_2$  加热元件表面性能的有效措施。未来，随着表面工程技术的发展， $\text{MoSi}_2$  的表面状态优化将成为提升其综合性能的重要方向。

### 2.9.1 常用保护涂层类型

为进一步增强二硅化钼加热元件的抗氧化性、热震稳定性和热疲劳性能，表面涂层技术被广泛应用于  $\text{MoSi}_2$  元件。常用保护涂层类型包括氧化物涂层、碳化物涂层和复合涂层，每种涂层针对特定的性能需求和应用环境。氧化物涂层是最常见的选择，其中氧化铝（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）和氧化锆（ $\text{ZrO}_2$ ）涂层因其高熔点、化学稳定性和低氧扩散系数而受到青睐。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层通过等离子喷涂或化学气相沉积（CVD）施加，能在高温下形成致密的保护层，显著提高  $\text{MoSi}_2$  的抗氧化性和抗热震性能，尤其适用于  $1500\text{--}1800^\circ\text{C}$  的氧化气氛。 $\text{ZrO}_2$  涂层则因其优异的热障性能，常用于需要高热冲击稳定性的应用，如航空航天高温部件。碳化物涂层以碳化硅（SiC）为主，因其与  $\text{MoSi}_2$  基体的热膨胀系数匹配较好，能够减少涂层与基体间的热应力，降低剥落

风险。SiC 涂层通过等离子喷涂或反应烧结工艺施加，不仅增强了抗氧化性，还提高了表面的抗磨损性能，适用于陶瓷烧结炉等高磨损环境。复合涂层是近年来发展的重点，如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC 或  $\text{ZrO}_2$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$  复合涂层，通过结合多种材料的优势，提供更全面的保护性能。例如， $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC 复合涂层兼具  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的高抗氧化性和 SiC 的抗热震性，适用于复杂工况下的  $\text{MoSi}_2$  元件。

涂层类型的选择需根据具体应用环境优化。例如，半导体热处理炉要求涂层高纯度以避免污染，而玻璃熔融炉更注重涂层的抗热冲击性和耐腐蚀性。涂层的制备工艺对性能也有显著影响，等离子喷涂可形成厚而致密的涂层，适合工业规模应用，而 CVD 工艺能生成更均匀、附着力更高的薄涂层，适用于高精度需求。此外，涂层的厚度和均匀性需精确控制，过厚的涂层可能因热应力失配而开裂，过薄则无法提供足够保护。未来，纳米结构涂层和多层复合涂层的开发有望进一步提升  $\text{MoSi}_2$  加热元件的表面性能。

### 2.9.2 表面裂纹与涂层结合力研究

$\text{MoSi}_2$  加热元件的表面裂纹和涂层结合力是影响其表面状态和长期可靠性的关键因素。表面裂纹通常由热应力、机械应力或制造缺陷引起，尤其在热震或热疲劳条件下更为显著。 $\text{MoSi}_2$  的低温脆性（断裂韧性约为  $2\text{--}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）使其在快速温度变化或机械振动中易生成微裂纹，这些裂纹可能沿晶界扩展，最终导致元件断裂或  $\text{SiO}_2$  保护膜失效。在  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  的“瘟病”温度范围内，表面裂纹可能加剧氧化粉化，进一步恶化表面状态。涂层结合力则决定了保护涂层是否能长期附着于  $\text{MoSi}_2$  基体，防止剥落或开裂。结合力不足的涂层在高温循环中容易脱落，暴露基体于氧化或腐蚀环境，从而降低元件寿命。

表面裂纹的形成受多种因素影响。材料纯度是重要因素，高纯度  $\text{MoSi}_2$  可减少晶界杂质，降低裂纹萌生概率。微观结构对裂纹扩展有显著影响，致密的  $\text{MoSi}_2$ （如热压烧结制备）具有较少的孔隙和缺陷，能有效抑制裂纹扩展，而孔隙率较高的样品因应力集中而易开裂。掺杂改性可改善表面抗裂性能，例如添加稀土氧化物（如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）能增强晶界结合力，减少裂纹扩展，而某些金属掺杂（如 W）可能因热膨胀失配而增加裂纹风险。制备工艺和表面处理也至关重要，表面抛光可减少初始缺陷，而粗糙表面可能成为裂纹萌生点。

涂层结合力的研究主要集中在界面特性、热膨胀匹配和涂层工艺上。 $\text{MoSi}_2$  与涂层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、SiC）的热膨胀系数差异会导致界面热应力，影响结合力。例如，SiC 涂层因热膨胀系数与  $\text{MoSi}_2$  较接近，结合力通常优于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层。界面处理技术（如过渡层设计）可显著提高结合力，例如在  $\text{MoSi}_2$  基体与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层间添加 SiC 过渡层，能缓解热应力失配。涂层工艺对结合力也有重要影响，等离子喷涂形成的涂层结合力较强，但可能存在微孔隙，而 CVD 工艺生成的涂层更均匀、附着力更高。热循环和环境因素（如湿度、气氛）会进一步考验结合力，高湿环境可能导致涂层界面发生化学反应，降低附着力。研究表明，优化涂层厚度和界面设计（如梯度涂层）可显著提高结合力，减少裂纹和剥落风险。

### 2.9.3 表面 $\text{SiO}_2$ 氧化膜的形成与保护

$\text{MoSi}_2$  加热元件的表面  $\text{SiO}_2$  氧化膜是其高温抗氧化性的核心，决定了其在氧化气氛下的长期稳定性和使用寿命。在  $800^\circ\text{C}$  以上， $\text{MoSi}_2$  表面通过反应  $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$  生

成一层致密的  $\text{SiO}_2$  膜。这层膜具有低氧扩散系数和良好的自修复能力，能有效阻止氧气向基体内部渗透，保护  $\text{MoSi}_2$  免受进一步氧化侵蚀。在  $1200\text{--}1850^\circ\text{C}$  范围内， $\text{SiO}_2$  膜保持稳定，使  $\text{MoSi}_2$  加热元件能够在高温氧化气氛下长期工作，最高使用温度可达  $1850^\circ\text{C}$ ，广泛应用于陶瓷烧结、玻璃熔融等工艺。然而，在  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  的“瘟病”温度范围内， $\text{MoSi}_2$  氧化生成非保护性的  $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物，导致膜层疏松、材料粉化，严重影响表面保护性能。为避免“瘟病”，实际应用中通常快速通过该温度区间。

$\text{SiO}_2$  膜的形成和保护性能受多种因素影响。材料纯度对膜质量至关重要，高纯度  $\text{MoSi}_2$  能生成更致密、均匀的  $\text{SiO}_2$  膜，而杂质（如 Fe、Al）可能导致膜层缺陷，降低保护效果。微观结构也起重要作用，致密的  $\text{MoSi}_2$ （如热压烧结制备）表面孔隙少，有利于形成连续的  $\text{SiO}_2$  膜，而孔隙率高的样品可能形成不均匀膜层，降低抗氧化性。掺杂改性对  $\text{SiO}_2$  膜的性能有双重影响，稀土氧化物（如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）可提高膜的附着力和稳定性，而某些金属掺杂（如 W）可能因改变氧化动力学而降低膜质量。工作环境中的气氛和湿度对  $\text{SiO}_2$  膜的形成和保护作用影响显著，在高湿环境中， $\text{SiO}_2$  膜可能发生水化反应，形成疏松的硅酸结构，降低保护能力。在还原或真空环境中， $\text{SiO}_2$  膜无法形成或被破坏，导致 Si 挥发和基体劣化。

$\text{SiO}_2$  膜的长期稳定性是  $\text{MoSi}_2$  加热元件性能的关键。在高温长期运行中， $\text{SiO}_2$  膜可能因 Si 挥发或  $\text{MoO}_3$  挥发而变薄，特别是在接近  $1850^\circ\text{C}$  的极限温度下，膜层可能出现局部破损。频繁的热循环也可能导致膜层开裂或剥落，降低保护效果。为增强  $\text{SiO}_2$  膜的稳定性，现代  $\text{MoSi}_2$  元件常采用表面改性技术，如预氧化处理以形成初始致密膜层，或添加保护层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{SiC}$ ）以增强膜的抗热震性和耐久性。实际应用中，保持稳定的氧化气氛、避免高湿环境和优化热循环参数是维持  $\text{SiO}_2$  膜保护性能的有效措施。未来，研究方向可能集中在优化  $\text{SiO}_2$  膜的形成动力学和开发复合保护层，以进一步提升  $\text{MoSi}_2$  加热元件的表面性能和使用寿命。

## 2.10 二硅化钼加热元件的表面问题及其解决方法

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件的表面问题是影响其高温性能和使用寿命的重要因素，主要包括表面裂纹、“瘟病”氧化、 $\text{SiO}_2$  保护膜劣化以及涂层剥落等。这些问题在高温循环、热震或特定气氛环境中尤为显著，可能导致元件性能下降甚至失效。表面裂纹通常由热应力、机械应力或制造缺陷引起， $\text{MoSi}_2$  的低温脆性使其在快速温度变化或机械振动中易生成微裂纹，进而扩展为宏观裂纹，削弱抗氧化性和机械强度。在  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  的“瘟病”温度范围内， $\text{MoSi}_2$  表面氧化生成非保护性的  $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物，导致材料粉化，严重破坏表面状态。长期高温运行中， $\text{SiO}_2$  保护膜可能因 Si 挥发或  $\text{MoO}_3$  挥发而变薄，尤其在接近  $1850^\circ\text{C}$  的极限温度下，膜层可能出现局部破损，降低保护效果。外加保护层可能因热膨胀失配或界面结合力不足而剥落，暴露基体于氧化或腐蚀环境。

解决表面裂纹问题可通过优化制备工艺和材料改性实现。采用热压烧结工艺可提高  $\text{MoSi}_2$  的致密度，减少表面孔隙和缺陷，从而降低裂纹萌生概率。掺杂稀土氧化物（如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）或氧化铝可增强晶界强度，抑制裂纹扩展。表面抛光处理能减少初始缺陷，降低应力集中。为应对“瘟病”氧化，实际应用中通常通过快速升温通过  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  温度区间，减少非保护性氧化物的生成时间。此外，预氧化处理可在表面预先生成致密的  $\text{SiO}_2$  膜，增强抗“瘟病”能力。为维持  $\text{SiO}_2$  膜的稳定性，可通过添加稀土元素改善膜的附着力，或采用复合涂层增强抗热



震性和耐久性。针对涂层剥落问题，优化涂层工艺（如化学气相沉积或等离子喷涂）和界面设计（如添加 SiC 过渡层）可提高结合力，减少热应力失配。实际应用中，控制升降温速率、避免高湿环境和定期检查表面状态是延长 MoSi<sub>2</sub> 加热元件寿命的有效措施。

未来，表面问题的解决方向可能集中在纳米结构涂层和多层复合涂层的开发上，以进一步提高 SiO<sub>2</sub> 膜的稳定性和涂层的结合力。此外，智能化监控技术可用于实时检测表面状态，及时调整运行参数，延长元件使用寿命。这些方法的综合应用能够有效缓解 MoSi<sub>2</sub> 加热元件的表面问题，提升其在陶瓷烧结、玻璃熔融等高温应用中的可靠性。

## 2.11 影响二硅化钼加热元件热力学性能的因素

二硅化钼加热元件的热力学性能，包括热导率、热膨胀系数、比热容和热扩散系数等，直接影响其加热效率、温度均匀性和抗热震性能。这些性能受材料内在特性（如组成、微观结构）和外部环境（如工作温度、气氛）的影响。MoSi<sub>2</sub> 的热导率在室温下约为 45 W/(m·K)，高温下（1500℃）降至约 15 W/(m·K)，确保了良好的热传递能力，但随温度变化的热导率下降会影响快速升温效率。其热膨胀系数约为  $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，与陶瓷基体材料匹配较好，减少热应力，但低温脆性使其在热冲击下易开裂。比热容约为 0.45 J/(g·K)，高温下略增，影响热扩散系数。这些热力学性能共同决定了 MoSi<sub>2</sub> 在高温炉中的表现。

材料纯度是影响热力学性能的关键因素。高纯度 MoSi<sub>2</sub> 能减少杂质（如 Fe、C）引起的声子散射，提高热导率，同时降低晶界缺陷，改善热应力分布。微观结构对热力学性能影响显著，致密的 MoSi<sub>2</sub>（如热压烧结制备）具有较高的热导率和抗热震性，而孔隙率高的样品因散射热量和应力集中而性能较差。掺杂改性可优化热力学性能，例如添加 W 可略增热导率，但可能因热膨胀失配而增加热应力；稀土氧化物（如 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）掺杂能增强晶界强度，改善抗热震性。制备工艺如热压烧结或反应烧结对热力学性能也有重要影响，高致密度样品通常表现出更优的热传导和抗热应力能力。

外部环境对热力学性能的影响同样不可忽视。工作温度和气氛环境通过改变表面状态和材料内部结构，直接影响热导率、热膨胀和抗热震性。在实际应用中，优化元件设计（如增加热端表面积）和控制运行条件（如稳定温度梯度）可提升热力学性能，满足陶瓷烧结、半导体热处理等高要求应用的需求。

### 2.11.1 工作温度的影响

工作温度是影响 MoSi<sub>2</sub> 加热元件热力学性能的核心因素，直接决定其热导率、热膨胀系数和抗热震性的表现。在室温至 1000℃ 范围内，MoSi<sub>2</sub> 的热导率从约 45 W/(m·K) 降至约 25 W/(m·K)，主要因高温下声子散射增强，电子导热贡献减少。在 1000–1850℃ 的高温段，热导率进一步降至约 15 W/(m·K)，但仍能满足陶瓷烧结、玻璃熔融等应用的热传递需求。热膨胀系数在高温下略有增加，但保持在  $8-9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  范围内，与陶瓷基体匹配良好，减少热应力。然而，高温下 MoSi<sub>2</sub> 的断裂韧性较低（2–3 MPa·m<sup>1/2</sup>），在快速升降温时易因热应力产生微裂纹，影响热力学性能的稳定。高温运行还会影响 SiO<sub>2</sub> 保护膜的形成和稳定性。在 800℃ 以上，致密的 SiO<sub>2</sub> 膜有效保护基体，但在接近 1850℃ 的极限温度下，Si 挥发和 MoO<sub>3</sub>



挥发可能导致膜层变薄，降低热力学性能的长期稳定性。在 400–700℃ 的“瘟病”温度范围内，非保护性氧化物生成会导致材料粉化，进一步恶化热导率和抗热震性。为减轻工作温度的不利影响，实际应用中可通过优化升降温速率、采用预氧化处理形成初始  $\text{SiO}_2$  膜以及施加保护涂层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{SiC}$ ）来提高热力学性能的稳定性。元件设计上，采用 U 型或 W 型结构可分散热应力，改善高温下的热力学表现。

### 2.11.2 气氛环境的影响

气氛环境对  $\text{MoSi}_2$  加热元件的热力学性能有显著影响，主要通过改变表面状态和材料内部结构起作用。在氧化气氛下， $\text{MoSi}_2$  表面生成的  $\text{SiO}_2$  保护膜能够有效维持热力学性能的稳定性。 $\text{SiO}_2$  膜的低氧扩散系数确保了热导率和热膨胀系数的长期一致性，同时保护基体免受氧化侵蚀。然而，高湿度的氧化气氛可能导致  $\text{SiO}_2$  膜水化，形成疏松的硅酸结构，降低热导率和抗热震性。在还原气氛（如  $\text{H}_2$ ）或真空环境中， $\text{SiO}_2$  膜无法形成或被破坏，导致 Si 挥发和基体劣化，热导率显著下降，同时热应力增加可能引发裂纹，严重影响热力学性能。

惰性气氛（如 Ar、 $\text{N}_2$ ）对  $\text{MoSi}_2$  的热力学性能影响较小，但长期运行可能因微量氧气存在而缓慢形成  $\text{SiO}_2$  膜，略微改变热导率。气氛中的杂质（如硫化物、氯化物）可能与  $\text{MoSi}_2$  表面反应，形成非保护性化合物，降低热力学性能的稳定性。为应对气氛环境的影响，实际应用中应优先选择稳定的氧化气氛，避免高湿度或还原环境。表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）可增强抗腐蚀性，维持热力学性能。此外，定期检查气氛纯度和元件表面状态，优化运行参数（如控制气氛湿度）是确保  $\text{MoSi}_2$  加热元件热力学性能稳定的有效措施。

### 2.11.3 加热/冷却频率的影响

加热/冷却频率对二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件的热力学性能具有显著影响，特别是在需要频繁热循环的应用场景中，如陶瓷烧结炉、玻璃退火炉和金属热处理设备。 $\text{MoSi}_2$  的热力学性能，包括热导率、热膨胀系数和热扩散系数，在快速的加热/冷却循环中会受到热应力的挑战。频繁的热循环会导致热应力反复作用于  $\text{MoSi}_2$  的微观结构，尤其因其低温脆性（断裂韧性约为  $2\text{--}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ），可能引发微裂纹的萌生和扩展，降低热导率和抗热震性。此外，在 400–700℃ 的“瘟病”温度范围内，快速热循环可能加剧非保护性氧化物（ $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物）的生成，导致表面粉化，进一步恶化热力学性能。

加热/冷却频率的影响与循环的温度范围和速率密切相关。在高温（1200–1850℃）至低温（室温或 400–700℃）的大幅度循环中，热应力更为显著，可能导致  $\text{SiO}_2$  保护膜开裂或剥落，削弱抗氧化性和热传导能力。高频率循环（例如每小时多次升降温）会加速微观结构的疲劳损伤，缩短元件寿命，而低频率循环（例如每天一次）对热力学性能的影响相对较小。材料纯度和微观结构对热循环的耐受性至关重要。高纯度  $\text{MoSi}_2$  能减少杂质引起的晶界弱化，降低裂纹扩展风险。致密的微观结构（如热压烧结制备）可有效分散热应力，提高抗热疲劳性能，而孔隙率较高的样品因应力集中易发生裂纹。掺杂改性也能改善热循环性能，例如添加稀土氧化物（如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）可增强晶界强度，抑制裂纹扩展。为减轻加热/冷却频率的不利影响，实际应用中可采取多种优化措施。控制升降温速率可减少热应力积累，避免快速通过 400–700℃ 温度区间以抑制“瘟病”氧化。表面涂层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{SiC}$ ）能增强抗热震性和  $\text{SiO}_2$  膜的稳

定性，延长热循环寿命。优化元件设计（如采用 U 型或 W 型结构）可分散热应力，减少裂纹萌生。定期检查表面状态并调整热循环参数也能有效延长 MoSi<sub>2</sub> 加热元件的热力学性能稳定性，满足高频率热循环应用的需求。

#### 2.11.4 使用电压的影响

使用电压是影响 MoSi<sub>2</sub> 加热元件热力学性能和运行稳定性的关键外部因素，直接关系到其加热效率、温度分布和使用寿命。MoSi<sub>2</sub> 的电阻率具有正温度系数特性，室温下约为  $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ，1000℃ 时增至约  $4.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ，1500℃ 时约为  $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 。这种特性使 MoSi<sub>2</sub> 在不同电压下能够自适应调节功率输出，但在高电压或不稳定电压条件下，可能对热力学性能产生不利影响。高电压会导致元件快速升温，产生较大的热应力，尤其在低温脆性显著的 MoSi<sub>2</sub> 中，可能引发微裂纹，降低热导率和抗热震性。此外，高电压可能导致局部过热，加速表面 SiO<sub>2</sub> 保护膜 Si 挥发或 MoO<sub>3</sub> 挥发，使膜层变薄，削弱抗氧化性。

电压波动也是影响热力学性能的重要因素。频繁的电压波动会引起电流不稳定，导致元件内部温度分布不均，增加热应力集中，进而引发微观结构损伤或表面裂纹。长期高电压运行可能加速 MoSi<sub>2</sub> 的老化，例如电阻率漂移或晶粒长大，降低热扩散系数和热导率。材料纯度和微观结构对电压影响的耐受性有重要作用。高纯度 MoSi<sub>2</sub> 能减少杂质引起的局部电阻不均匀，降低过热风险。致密的微观结构（如热压烧结制备）可提高热应力分散能力，增强抗电压波动的性能。掺杂改性（如添加 W 或 Nb）可优化电阻率，改善电压下的电热稳定性，但需平衡抗氧化性。

为减轻使用电压的不利影响，实际应用中需优化电压控制策略。使用稳定的电源系统和电压调节器可减少波动，确保均匀加热。冷端与热端的电阻匹配设计（如冷端掺杂高导电性材料）可降低局部过热风险，提高能量效率。施加保护涂层（如 SiC 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）可增强表面抗氧化性和热应力耐受性，延长元件寿命。此外，定期监测电压输入和元件表面状态，结合适当的升温曲线设计（如缓慢升温），可有效维持 MoSi<sub>2</sub> 加热元件的热力学性能，满足陶瓷烧结、半导体热处理等高精度应用的需求。

#### 2.11.5 使用电流密度的影响

使用电流密度对 MoSi<sub>2</sub> 加热元件的热力学性能和长期稳定性具有重要影响，直接决定其加热功率、温度分布和材料老化行为。MoSi<sub>2</sub> 作为电阻发热材料，其功率输出与电流密度的平方成正比（ $P = I^2 R$ ），因此高电流密度会显著提高元件温度，影响热导率、热膨胀和抗热震性。MoSi<sub>2</sub> 的热导率在高温下（1500℃ 时约 15 W/(m·K)）低于室温（45 W/(m·K)），高电流密度可能导致局部过热，产生较大的热应力，尤其在低温脆性显著的 MoSi<sub>2</sub> 中，易引发微裂纹或表面 SiO<sub>2</sub> 保护膜开裂，降低热力学性能。此外，高电流密度可能加速 SiO<sub>2</sub> 膜的 Si 挥发或 MoO<sub>3</sub> 挥发，使膜层变薄，削弱抗氧化性，特别是在接近 1850℃ 的极限温度下。

电流密度的分布均匀性对热力学性能至关重要。不均匀的电流密度（如因元件设计缺陷或接触不良引起的局部高电流密度）会导致温度梯度增大，增加热应力和裂纹风险，降低热扩散系数。长期高电流密度运行可能导致 MoSi<sub>2</sub> 的电阻率漂移或微观结构劣化（如晶粒长大或晶

界弱化），进一步影响热导率和抗热震性。材料纯度和微观结构对电流密度的耐受性有显著影响。高纯度  $\text{MoSi}_2$  能减少杂质引起的局部电阻不均匀，降低过热风险。致密的微观结构（如热压烧结制备）可提高热应力分散能力，增强抗电流密度冲击的性能。掺杂改性（如添加  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）可优化晶界结构，稳定电阻率，改善电流密度下的热力学性能。

为减轻使用电流密度的不利影响，实际应用中需优化元件设计和运行条件。采用均匀截面设计的 U 型或 W 型元件可确保电流密度分布均匀，减少局部过热。冷端与热端的电阻匹配（如冷端掺杂高导电性材料）可降低电流密度集中，提高能量效率。施加保护涂层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{SiC}$ ）可增强表面抗氧化性和抗热应力能力，延长元件寿命。使用电流控制器稳定输入电流、避免过高电流密度，以及定期检查元件表面状态和电性能，是维持  $\text{MoSi}_2$  加热元件热力学性能稳定的有效措施。这些优化策略能够满足玻璃熔融、金属热处理等高功率应用的需求。

### 2.11.6 安装方式的影响

安装方式对二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件的热力学性能和使用寿命具有重要影响，直接关系到热应力分布、温度均匀性和机械稳定性。 $\text{MoSi}_2$  的热力学性能，包括热导率、热膨胀系数和热扩散系数，在不恰当的安装方式下可能受到热应力或机械应力的不利影响。常见的安装方式包括垂直悬挂、水平支撑和夹持固定，每种方式对热力学性能的影响不同。垂直悬挂是  $\text{MoSi}_2$  加热元件最常见的安装方式，适用于 U 型或 W 型元件，能够减少机械约束，允许元件在高温下的自由热膨胀，从而降低热应力。然而，若悬挂点设计不当（如接触点应力集中），可能导致局部裂纹，降低热导率和抗热震性。水平支撑安装通常用于直棒型元件，但需确保支撑材料（如高纯氧化铝）与  $\text{MoSi}_2$  的热膨胀系数匹配，否则可能因热膨胀失配引发应力集中，影响热扩散系数。夹持固定方式在小型炉中较为常见，但夹持力过大可能导致  $\text{MoSi}_2$  因低温脆性而产生微裂纹，削弱热力学性能。

安装方式还影响表面  $\text{SiO}_2$  保护膜的稳定性和抗氧化性。不均匀的安装应力可能导致表面膜层开裂，特别是在 400–700℃ 的“瘟病”温度范围内，裂纹可能加剧非保护性氧化物的生成，降低热导率和抗热震性。此外，安装方式对电流分布和温度均匀性有间接影响，例如接触不良可能导致局部电流密度升高，引起过热，加速  $\text{SiO}_2$  膜劣化。为优化安装方式的影响，实际应用中需选择与炉型匹配的安装设计，例如使用高纯陶瓷支撑件以减少热膨胀失配，采用柔性夹持以降低机械应力。确保安装点与  $\text{MoSi}_2$  冷端的良好接触可提高电流均匀性，减少局部过热。定期检查安装点的磨损和松动，结合合理的升降温速率（如 5–10℃/min），可有效维持  $\text{MoSi}_2$  加热元件的热力学性能，延长其在陶瓷烧结、玻璃熔融等应用中的寿命。

### 2.11.7 元件质量与纯度的影响

$\text{MoSi}_2$  加热元件的质量和纯度是影响其热力学性能的核心内在因素，直接决定其热导率、热膨胀系数、抗热震性和长期稳定性。高纯度  $\text{MoSi}_2$ （纯度通常  $\geq 99.5\%$ ）能够显著提升热力学性能，其热导率在室温下约为 45 W/(m·K)，1500℃ 时约 15 W/(m·K)，热扩散系数在室温下约  $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ，1500℃ 时约  $0.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。高纯度材料能减少杂质（如 Fe、Al、C）引起的声子散射和晶界弱化，从而提高热导率和热应力分散能力。杂质的存在会导致局部电阻不均匀，增加热应力集中，降低抗热震性，甚至引发微裂纹，特别是在  $\text{MoSi}_2$  的低温



脆性阶段。此外，杂质可能与氧气反应生成非保护性氧化物，削弱表面  $\text{SiO}_2$  保护膜致密性，降低抗氧化性和热力学性能稳定性，尤其在 400–700℃ 的“瘟病”温度范围内，杂质会加剧材料粉化。

元件质量与制备工艺密切相关。热压烧结制备的  $\text{MoSi}_2$  具有高致密度（接近理论密度的 98% 以上），孔隙率低，热导率和抗热震性优于反应烧结或自蔓延高温合成（SHS）制备的样品。孔隙率高的元件因孔隙散射热量和应力集中，热导率较低，且易在热循环中产生裂纹，降低热扩散系数。高质量的  $\text{MoSi}_2$  元件还需具备均匀的微观结构，晶粒尺寸适中（通常 10–50  $\mu\text{m}$ ），过大的晶粒可能导致晶界强度下降，过小的晶粒则可能增加晶界散射，降低热导率。掺杂改性可进一步优化质量和纯度的影响，例如添加稀土氧化物（如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）能增强晶界结合力，提高抗热震性，而高纯度掺杂剂可避免引入额外杂质。

为提升元件质量和纯度的影响，实际应用中需选用高纯度原料（如高纯 Mo 和 Si 粉）并严格控制制备工艺。热压烧结或等离子喷涂可提高致密度，减少孔隙和缺陷。质量控制环节（如 X 射线衍射和扫描电镜检测）能确保元件纯度和微观结构的均匀性。施加保护涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）可进一步弥补低纯度材料在抗氧化性上的不足。定期检查元件表面状态和性能，结合稳定的运行条件（如避免高湿或还原气氛），可最大化  $\text{MoSi}_2$  加热元件的热力学性能，满足半导体热处理、金属热处理等高要求应用的需求。

## 2.11.8 涂层保护处理的影响

涂层保护处理对  $\text{MoSi}_2$  加热元件的热力学性能具有重要影响，能够显著增强其抗氧化性、抗热震性和热导率的稳定性。常用的保护涂层包括氧化物涂层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ ）、碳化物涂层（如  $\text{SiC}$ ）和复合涂层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiC}$ ），通过形成致密的保护层，弥补  $\text{MoSi}_2$  表面  $\text{SiO}_2$  膜在极端条件下的不足。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层因其高熔点（约 2050℃）和低氧扩散系数（1500℃ 时约  $10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ ），能有效提高抗氧化性，维持热导率（1500℃ 时约 15  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）的稳定性，尤其在高温氧化气氛（1200–1850℃）下。 $\text{SiC}$  涂层因热膨胀系数（约  $4.5\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）与  $\text{MoSi}_2$ （约  $8.1\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）匹配较好，减少热应力失配，提高抗热震性，适合陶瓷烧结炉等高温热循环环境。复合涂层结合多种材料的优势，例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiC}$  涂层兼具高抗氧化性和抗热震性，显著提升热力学性能的长期稳定性。

涂层对热力学性能的改善与其结合力、厚度和均匀性密切相关。高质量涂层（如通过化学气相沉积（CVD）制备）具有高附着力和均匀性，能有效分散热应力，维持热扩散系数（1500℃ 时约  $0.8\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ）的稳定性。过厚的涂层（ $>100 \mu\text{m}$ ）可能因热膨胀失配引发开裂，降低热导率，而过薄的涂层（ $<10 \mu\text{m}$ ）则可能无法提供足够保护。涂层工艺对热力学性能也有显著影响，等离子喷涂可形成厚而致密的涂层，适合工业规模应用，但可能存在微孔隙，略微降低热导率；CVD 工艺生成的薄涂层更均匀，热应力小，适合高精度需求。涂层还可减轻“瘟病”氧化（400–700℃）的影响，例如  $\text{SiC}$  涂层能抑制非保护性  $\text{MoO}_3$  生成，保护热力学性能。

涂层的长期稳定性受工作环境影响。在高湿环境中， $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层可能发生水化反应，降低热导率；在还原或真空环境中，涂层可能因 Si 挥发而劣化，影响热扩散系数。为优化涂层保

护处理的影响，实际应用中需根据应用需求选择合适的涂层类型和工艺，例如半导体热处理炉优先选择高纯度 CVD 涂层，玻璃熔融炉则可采用厚实的 SiC 涂层。界面设计（如添加 SiC 过渡层）可提高结合力，减少剥落风险。定期检查涂层完整性和表面状态，结合稳定的氧化气氛和适当的升降温速率（如 5-10℃/min），可最大化涂层对 MoSi<sub>2</sub> 加热元件热力学性能的保护作用，延长其在高温应用中的寿命。

## 2.12 中钨智造二硅化钼加热元件 MSDS

材料安全数据表 (MSDS, Material Safety Data Sheet) 为中钨智造生产的二硅化钼 (MoSi<sub>2</sub>) 加热元件提供了安全使用、储存和处理的相关信息。MoSi<sub>2</sub> 是一种金属间化合物，具有优异的高温抗氧化性和导电性，广泛用于高温工业和实验室炉（如陶瓷烧结、玻璃熔融和金属热处理）。以下根据 MoSi<sub>2</sub> 材料的特性和行业标准，详细阐述中钨智造 MoSi<sub>2</sub> 加热元件的 MSDS 内容，包括其物理化学特性、危害识别、安全操作和应急措施。

**物质识别与组成：**中钨智造的 MoSi<sub>2</sub> 加热元件主要由二硅化钼（化学式：MoSi<sub>2</sub>，CAS 号：12136-78-6）组成，纯度通常 ≥99.5%，可能含有微量添加剂（如稀土氧化物或氧化铝）以增强性能。MoSi<sub>2</sub> 是一种灰色金属外观的陶瓷材料，晶体结构为四方 α 型 (C11b 型)，密度约为 6.24 g/cm<sup>3</sup>，熔点约为 2030℃，具有导电性。加热元件通常呈 U 型、W 型或直棒型，表面在高温氧化气氛下形成致密的 SiO<sub>2</sub> 保护膜。可能存在的杂质包括 Fe、Al、C 等，含量通常低于 0.1%，具体取决于生产批次和掺杂工艺。

**危害识别：**MoSi<sub>2</sub> 加热元件在正常高温使用下较为安全，但在特定条件下可能存在以下危害。物理危害方面，MoSi<sub>2</sub> 在室温下具有脆性，易因机械冲击或不当搬运而断裂，产生尖锐碎片，可能导致割伤。化学危害方面，MoSi<sub>2</sub> 在 400-700℃ 的“瘟病”温度范围内会发生低温氧化，生成 MoO<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 混合物，可能释放微量 MoO<sub>3</sub> 蒸汽（会刺激呼吸道和眼睛）。在还原或真空环境中，Si 挥发可能导致材料劣化，释放硅蒸汽，需避免吸入。环境危害方面，MoSi<sub>2</sub> 本身对环境影响较小，但废弃元件需按危险废物处理，避免污染。

**安全操作与防护措施：**为确保安全使用中钨智造 MoSi<sub>2</sub> 加热元件，MSDS 提供以下操作指南。搬运时需佩戴防护手套（如耐高温手套）和护目镜，避免直接接触尖锐边缘，防止机械损伤或碎片伤人。安装时应采用适当的固定方式（如垂直悬挂或柔性夹持），避免过大的机械应力导致断裂。使用时需确保电源系统为比例控制、相位触发型，并具有电流限制功能，避免非比例开关或“突发”供电方式损坏元件。储存时应放置在干燥、无腐蚀性气体环境中，避免潮湿或酸性气氛导致表面腐蚀。

**储存与运输：**MoSi<sub>2</sub> 加热元件需储存在干燥、清洁的环境中，温度控制在 5-35℃，相对湿度低于 70%，避免接触酸性物质或高湿度环境，以防止表面腐蚀或 SiO<sub>2</sub> 膜劣化。运输时需使用泡沫或木箱包装，固定元件以防振动或冲击导致断裂。包装应标明“易碎”“防潮”标识，并附带 MSDS 文件以供参考。运输过程中需遵守危险品运输法规（如 UN3077, 环境有害物质），确保安全抵达。

中钨智造科技有限公司  
二硅化钼加热元件产品介绍

一、二硅化钼加热元件概述

二硅化钼（MoSi<sub>2</sub>）加热元件是一种具有优异高温性能的陶瓷电热材料，广泛应用于工业炉窑领域。该材料在高温氧化气氛中能够形成致密的二氧化硅（SiO<sub>2</sub>）保护层，有效防止进一步氧化，具备出色的抗氧化能力和热稳定性。其可在高温下长时间稳定工作，是多种高温热处理工艺的理想选择。

二、二硅化钼加热元件特性

- 低膨胀系数：**与常见的陶瓷基体材料匹配较好，减少了热应力引起的开裂风险。
- 优异的抗氧化性能：**表面形成致密的 SiO<sub>2</sub> 保护膜，有效防止材料氧化损耗。
- 极高的工作温度：**可持续工作温度可达 1700° C，最高可使用至 1800° C（氧化气氛中）。
- 良好的高温电阻特性：**在高温下，MoSi<sub>2</sub> 的电阻率表现相对稳定，高温段电阻率增幅缓慢。

三、二硅化钼加热元件规格

二硅化钼加热元件有直型棒、U 型棒、W 型棒等类型，典型规格型号参考如下：

| 型号 (d1/d2) | 热端直径 d1 | 冷端直径 d2 | 热端长度 Le     | 冷端长度 Lu    | 常见类型           |
|------------|---------|---------|-------------|------------|----------------|
| φ3/6       | 3 mm    | 6 mm    | 100–300 mm  | 150–250 mm | 直棒 / U 型       |
| φ4/9       | 4 mm    | 9 mm    | 100–500 mm  | 200–300 mm | 直棒 / U 型       |
| φ6/12      | 6 mm    | 12 mm   | 100–600 mm  | 200–350 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ9/18      | 9 mm    | 18 mm   | 150–800 mm  | 250–400 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ12/24     | 12 mm   | 24 mm   | 200–1000 mm | 300–500 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |

四、二硅化钼加热元件典型应用

- 陶瓷、粉末冶金等行业的高温烧结炉
- 钢铁、有色金属热处理设备
- 实验室高温电炉
- 玻璃熔融与加工设备
- 半导体、光伏行业的扩散、退火及氧化工艺

五、采购信息

- 邮箱：[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- 电话：+86 592 5129595; 592 5129696
- 更多硅钼棒资讯，请访问中钨在线网站（[www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)）。
- 更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。





### 第三章 二硅化钼加热元件的结构与设计

#### 3.1 二硅化钼加热元件的常见结构

二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 加热元件因其优异的高温抗氧化性、导电性和最高使用温度而广泛应用于高温工业炉和实验室设备。其结构设计直接影响加热效率、温度均匀性、抗热震性和使用寿命。 $\text{MoSi}_2$ 加热元件的常见结构包括 U 型、W 型、L 型、直棒型以及定制形状，其中 U 型和 W 型因其高效的热分布和灵活的安装方式最为普及。这些结构通常由热端（发热部）和冷端（连接部）组成，热端在高温下产生热量，冷端则通过掺杂高导电性材料（如铝或钨）降低电阻，确保与电源连接的稳定性。 $\text{MoSi}_2$ 元件的结构设计需综合考虑炉型尺寸、加热功率、热循环频率和安装方式，以满足陶瓷烧结、玻璃熔融、金属热处理等不同应用的需求。

结构设计的优化对  $\text{MoSi}_2$ 加热元件的性能至关重要。热端和冷端的长度、截面尺寸以及连接方式需精确匹配，以确保电流分布均匀，避免局部过热。热端的直径通常为 6–12 mm，冷端直径为热端的 1.5–2 倍，以降低冷端温度，延长使用寿命。元件的几何形状（如 U 型或 W 型的弯曲半径）影响热应力分布，合理的弯曲设计可减少热震裂纹风险。材料纯度（通常  $\geq 99.5\%$ ）和制备工艺（如热压烧结）对结构完整性有显著影响，高纯度、致密的  $\text{MoSi}_2$ 能减少微观缺陷，提高抗热疲劳性。表面处理（如抛光或涂层）也可增强抗氧化性和热力学性能。实际应用中，结构选择需根据炉内空间、温度分布要求和安装约束进行定制，例如 U 型适合小型炉，W 型适合大型炉以提供更均匀的加热。

##### 3.1.1 U 型二硅化钼加热元件

U 型二硅化钼加热元件是最常见的结构之一，因其简单、紧凑的设计和高效的加热性能广泛应用于小型至中型高温炉，如实验室箱式炉和陶瓷烧结炉。U 型元件的结构由两个平行热端通过一个 U 形弯曲连接组成，冷端位于热端顶部，与电源连接。U 型设计的主要优势在于其热端能够提供集中的高温区，适合需要局部高热密度的应用，例如最高温度达  $1800^\circ\text{C}$  的氧化气氛烧结。U 型元件的热端长度通常为 100–500 mm，具体长度根据炉膛尺寸和功率需求定制，热端直径为 6–9 mm，冷端直径为 12–18 mm，以确保低电阻和高效电流传输。

U 型元件的热力学性能得益于其紧凑的几何形状，热端之间的距离（通常 20–50 mm）可优化温度均匀性，减少热应力集中。U 型结构的弯曲半径需精确设计，过小的半径可能导致应力集中，增加热震裂纹风险，而过大的半径可能降低加热效率。 $\text{MoSi}_2$ 的正温度系数电阻率（室温下约  $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ， $1500^\circ\text{C}$  时约  $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）使 U 型元件在高温下能自动调节功率，适合精确控温应用。然而，U 型元件在频繁热循环中可能因热端与冷端连接处的应力积累而产生微裂纹，尤其在低温脆性显著的  $\text{MoSi}_2$ 中（断裂韧性约为  $2\text{--}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）。为提高 U 型元件的抗热震性和寿命，热压烧结工艺可提高材料致密度，表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）可增强抗氧化性和抗热疲劳性。

安装方面，U 型元件通常采用垂直悬挂方式，通过陶瓷夹持器固定冷端，减少机械应力。安装时需确保冷端与电源接触良好，避免局部过热。实际应用中，U 型元件需避免快速通过  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  的“瘟病”温度范围，以防止非保护性氧化物（ $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物）生成导致表面粉

化。U 型元件的维护包括定期检查弯曲处和连接点的完整性，以及监控  $\text{SiO}_2$  保护膜的状态，确保其在氧化气氛下的长期稳定性。

### 3.1.2 W 型二硅化钼加热元件

W 型二硅化钼加热元件因其复杂的几何形状和更大的加热面积，广泛应用于大型高温炉或需要均匀温度场的场景，如玻璃熔融炉、工业陶瓷烧结炉和金属热处理设备。W 型元件的结构由多个平行热端通过连续的 W 形弯曲连接组成，通常包含三个或更多热端，冷端位于两侧或顶部，与电源连接。其主要优势在于能够覆盖更大的炉膛面积，提供更均匀的温度分布，适合大型炉型或多区域加热需求。W 型元件的热端长度通常为 200–1000 mm，直径为 6–12 mm，冷端直径为 12–24 mm，具体尺寸根据功率需求和炉膛设计定制。加热功率密度通常为 15–20  $\text{W}/\text{cm}^2$ （1700℃时），能够满足高功率输出的要求，同时保持温度均匀性。

W 型元件的热力学性能得益于其多热端设计，多个热端之间的间距（通常 30–60 mm）可优化热辐射分布，减少局部过热和热应力集中。W 型结构的弯曲半径需精确控制，过小的半径可能导致应力集中，增加热震裂纹风险，而过大的半径可能降低加热效率。 $\text{MoSi}_2$  的正 temperature coefficient (PTC) 电阻率使 W 型元件在高温下能够自适应调节功率，确保精确控温和稳定性。然而，W 型元件在频繁热循环中可能因多个弯曲处和热端–冷端连接点的应力积累而产生微裂纹，尤其在  $\text{MoSi}_2$  的低温脆性显著（断裂韧性约为  $2\text{--}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）时更为明显。热压烧结工艺可提高材料的致密度（接近理论密度的 98% 以上），减少微观缺陷，增强抗热疲劳性。表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）可进一步提高抗氧化性和抗热震性能，延长元件在高温氧化气氛（最高 1800–1850℃）下的使用寿命。

安装方面，W 型元件通常采用垂直悬挂或水平支撑方式，通过高纯陶瓷夹持器或支撑件固定冷端，以减少机械应力并允许热膨胀。安装时需确保冷端与电源接触良好，避免接触电阻引起的局部过热。W 型元件的复杂形状要求更高的安装精度，例如确保各热端对称布置以维持均匀电流分布。实际应用中，需避免快速通过 400–700℃ 的“瘟疫”温度范围，以防止非保护性氧化物（ $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物）的生成导致表面粉化。维护 W 型元件需定期检查弯曲处、连接点和表面  $\text{SiO}_2$  保护膜的完整性，确保其在氧化气氛下的长期稳定性。W 型元件的维护还包括监测冷端温度（通常保持在 400℃ 以下），以防止过热导致连接点劣化。

为优化 W 型元件的性能，设计时可通过增加热端数量或调整热端间距来满足特定炉型的温度分布需求。例如，在大型玻璃熔融炉中，可采用多热端 W 型元件以实现宽区域均匀加热。表面抛光或涂层处理可减少表面缺陷，提高抗热震性和抗氧化性。实际应用中，W 型元件的安装应考虑炉膛的热流动态，合理布置元件以避免热量集中或不足。定期清洁炉膛内部，防止杂质污染元件表面，也是延长 W 型元件寿命的重要措施。W 型元件的复杂结构使其在大型工业炉中的应用具有显著优势，但对制造精度和安装工艺的要求也更高。

### 3.1.3 螺旋型二硅化钼加热元件

螺旋型二硅化钼加热元件是一种特殊结构，适用于需要高热密度和紧凑加热区域的应用，如小型实验室管式炉、热分析设备或特定工业炉。螺旋型元件的结构由  $\text{MoSi}_2$  棒材缠绕成螺旋

状热端组成，冷端位于螺旋两端，用于连接电源。其主要优势在于能够在有限空间内提供高热功率，螺旋形状增加了热端表面积，增强热辐射效率，适合需要快速升温 and 精确控温的应用。螺旋型元件的热端直径通常为 4-9 mm，螺旋圈数和节距（通常 5-20 mm）根据炉膛尺寸和功率需求设计，冷端直径为 8-18 mm，以确保低电阻和高效电流传输。加热功率密度可达 20-25 W/cm<sup>2</sup>（1700℃时），高于 U 型和 W 型，适用于高温局部加热场景。

螺旋型元件的热力学性能得益于其高表面积和紧凑设计，螺旋结构能够提供均匀的热辐射，减少温度梯度，适合管式炉内圆柱形加热需求。然而，螺旋形状的复杂几何增加了制造难度，螺旋曲率和节距需精确控制，过紧的螺旋可能导致热应力集中，增加裂纹风险，尤其在 MoSi<sub>2</sub> 的低温脆性阶段（断裂韧性约为 2-3 MPa·m<sup>1/2</sup>）。MoSi<sub>2</sub> 的正温度系数电阻率使螺旋型元件在高温下能够自适应调节功率，确保控温精度。为提高抗热震性和寿命，热压烧结工艺可提高材料致密度（接近理论密度的 98% 以上），减少微观缺陷。表面涂层（如 SiC 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，热膨胀系数分别约为 4.5×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> 和 8×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>）可增强抗氧化性和抗热疲劳性，延长元件在高温氧化气氛（最高 1800℃）下的使用寿命。

安装方面，螺旋型元件通常采用水平或垂直固定方式，通过高纯陶瓷支撑件固定冷端，需确保螺旋部分不受机械约束以允许热膨胀。安装时需特别注意螺旋结构的均匀性，避免因安装应力导致变形或裂纹。实际应用中，需快速通过 400-700℃ 的“瘟病”温度范围，以防止非保护性氧化物（MoO<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 混合物）生成导致表面粉化。维护螺旋型元件需定期检查螺旋节距、冷端连接点和表面 SiO<sub>2</sub> 保护膜完整性，确保其在氧化气氛下的稳定性。由于螺旋型元件制造成本较高且对安装精度要求严格，其应用多集中于高精度实验室设备或特殊工业炉。

### 3.1.4 直棒型二硅化钼加热元件

直棒型二硅化钼加热元件是一种简单、线性的结构，适用于需要长距离线性加热的炉型，如隧道炉、连续热处理炉或某些大型工业炉。直棒型元件的结构由单一的直线热端组成，冷端位于两端或一端与电源连接。其主要优势在于结构简单、制造成本较低，且易于大规模生产和安装，适合覆盖长距离加热区域。直棒型元件的热端长度通常为 300-2000 mm，直径为 6-12 mm，冷端直径为 12-24 mm，具体尺寸根据炉膛长度和功率需求定制。加热功率密度通常为 15-18 W/cm<sup>2</sup>（1700℃时），适合中低功率密度的均匀加热应用。

直棒型元件的热力学性能受其线性设计的限制，热端沿长度方向的温度分布可能不如 U 型或 W 型均匀，尤其在长距离加热时可能出现中间高温、两端低温的现象。为改善温度均匀性，可通过调整热端直径或分段掺杂优化电阻分布。MoSi<sub>2</sub> 的正温度系数电阻率（室温下约 2.0×10<sup>-5</sup> Ω·cm，1500℃时约 4.5×10<sup>-5</sup> Ω·cm）使直棒型元件在高温下能够自适应调节功率，但其线性结构在频繁热循环中可能因热端两端的应力集中而产生微裂纹，尤其在 MoSi<sub>2</sub> 的低温脆性显著（断裂韧性约为 2-3 MPa·m<sup>1/2</sup>）时。热压烧结工艺可提高材料致密度，减少微观缺陷，增强抗热震性和抗热疲劳性。表面涂层（如 SiC 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）可进一步提高抗氧化性和表面稳定性，延长元件在高温氧化气氛（最高 1800℃）下的使用寿命。

安装方面，直棒型元件通常采用水平支撑或垂直悬挂方式，通过高纯陶瓷夹持器固定冷端，需确保支撑点均匀分布以避免元件下垂或断裂。安装时需特别注意冷端与电源的接触质量，



避免接触电阻导致局部过热。实际应用中，需快速通过 400–700℃ 的“瘟病”温度范围，以防止非保护性氧化物生成导致表面粉化。维护直棒型元件需定期检查热端表面、冷端连接点和 SiO<sub>2</sub> 保护膜完整性，监测冷端温度（通常保持在 400℃ 以下）以防止过热劣化。由于直棒型元件的简单结构，其制造和维护成本较低，但对温度均匀性的要求较高，需结合炉膛设计优化布局。

### 3.1.5 U 型、W 型、直型结构设计比较

U 型、W 型和直棒型二硅化钼加热元件是 MoSi<sub>2</sub> 加热元件中最常见的结构，各具特点，适用于不同的炉型和应用场景。U 型元件以其紧凑设计和集中加热能力著称，热端长度通常为 100–500 mm，直径 6–9 mm，功率密度可达 20 W/cm<sup>2</sup>（1700℃ 时），适合小型至中型炉（如实验室箱式炉、陶瓷烧结炉）需要局部高热密度的应用。其优点是结构简单、安装方便、热效率高，但热端覆盖面积较小，温度均匀性受限于热端间距（通常 20–50 mm），在频繁热循环中热端与冷端连接处易产生微裂纹。W 型元件以多热端设计提供更大的加热面积，热端长度为 200–1000 mm，直径 6–12 mm，功率密度为 15–20 W/cm<sup>2</sup>，适合大型炉（如玻璃熔融炉、工业陶瓷烧结炉）需要均匀温度场的场景。其优点是温度分布更均匀、抗热应力能力强，但制造复杂、成本较高，且多个弯曲处增加了热震裂纹风险。直棒型元件以线性结构见长，热端长度可达 300–2000 mm，直径 6–12 mm，功率密度为 15–18 W/cm<sup>2</sup>，适合长距离线性加热的隧道炉或连续热处理炉。其优点是制造成本低、安装简单，但温度均匀性较差，热端两端易因应力集中产生裂纹。

从热力学性能看，三种结构的热导率（室温下约 45 W/(m·K)，1500℃ 时约 15 W/(m·K)）和热膨胀系数（约  $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）相似，但几何形状影响热应力分布。U 型和 W 型的弯曲设计能分散热应力，抗热震性优于直棒型，但直棒型在长距离加热中因缺乏弯曲应力集中点，机械稳定性较高。抗氧化性方面，三种结构均依赖表面 SiO<sub>2</sub> 保护膜（1500℃ 时氧扩散系数约  $10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ ），但 W 型因表面积较大，SiO<sub>2</sub> 膜的形成和维护更均匀，抗氧化性略优。直棒型在长距离加热中可能因温度不均导致局部 SiO<sub>2</sub> 膜劣化。热循环性能方面，U 型和 W 型因复杂几何在频繁热循环中易产生微裂纹，而直棒型因结构简单更耐热疲劳，但需优化温度分布。

安装和维护方面，U 型元件适合垂直悬挂，安装简单但需注意冷端接触；W 型元件需精确对称安装，维护复杂但适合大型炉；直棒型安装灵活但需均匀支撑以防下垂。制造工艺对三种结构的影响相似，热压烧结可提高致密度（接近 98%），表面涂层（如 SiC 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）可增强抗氧化性和抗热震性。选择时，U 型适合小型高精度炉，W 型适合大型均匀加热炉，直棒型适合长距离线性加热，需根据炉膛设计、功率需求和热循环频率综合考虑。

## 3.2 二硅化钼加热元件的尺寸设计

二硅化钼（MoSi<sub>2</sub>）加热元件的尺寸设计是其性能优化的关键，直接影响加热效率、温度分布、抗热震性和使用寿命。MoSi<sub>2</sub> 加热元件的尺寸通常由热端和冷端的直径、长度以及热端与冷端的比例决定，常见规格包括 Φ6/12（热端直径 6 mm，冷端直径 12 mm）和 Φ9/18（热端直径 9 mm，冷端直径 18 mm）。这些尺寸设计需根据炉膛尺寸、功率需求、热循环频率和安装方式综合确定，以确保在高温氧化气氛下实现高效加热和长期稳定性。Φ6/12 规格适

用于中小型炉（如实验室箱式炉、陶瓷烧结炉），其热端直径较小，功率密度较高，适合需要快速升温 and 集中加热的应用。 $\Phi 9/18$  规格适用于大型炉（如玻璃熔融炉、工业热处理炉），热端直径较大，功率密度稍低（通常  $15\text{--}20\text{ W/cm}^2$ ），但能提供更均匀的温度分布和更高的机械强度，适合大面积或高负载加热场景。

尺寸设计的核心目标是平衡热端与冷端的电热性能和机械性能。热端直径决定电阻和发热功率，较小的热端（如  $6\text{ mm}$ ）电阻较高，适合高功率密度应用，但抗热震性和机械强度较低；较大的热端（如  $9\text{ mm}$ ）电阻较低，功率密度适中，但抗热震性和寿命更优。冷端直径通常为热端的  $1.5\text{--}2$  倍（如  $6/12$  或  $9/18$ ），通过掺杂高导电性材料（如铝或钨）降低电阻率（约  $0.5 \times 10^{-5}\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ ，室温下），确保冷端温度保持在  $400^\circ\text{C}$  以下，防止过热劣化。热端长度（通常  $100\text{--}1000\text{ mm}$ ）需根据炉膛深度和加热区域定制，过短可能导致热量集中，过长可能引起温度不均。冷端长度（通常  $50\text{--}300\text{ mm}$ ）需足够长以穿过炉壁，确保与电源连接稳定，同时避免热端热量传导至冷端。

尺寸设计还需考虑  $\text{MoSi}_2$  的热力学性能，其热导率（室温下约  $45\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ， $1500^\circ\text{C}$  时约  $15\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ）和热膨胀系数（约  $8.1 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ，室温至  $1000^\circ\text{C}$ ）影响热应力分布。较小直径的热端（如  $6\text{ mm}$ ）在快速热循环中易产生热应力集中，导致微裂纹，尤其在  $\text{MoSi}_2$  的低温脆性阶段（断裂韧性约为  $2\text{--}3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）。较大直径的热端（如  $9\text{ mm}$ ）能更好分散热应力，提高抗热震性。制备工艺对尺寸精度至关重要，热压烧结可确保元件致密度（接近  $98\%$ ）和尺寸均匀性，减少微观缺陷。表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）可增强抗氧化性和抗热疲劳性，延长尺寸设计的可靠性。实际应用中，尺寸选择需结合炉型和运行条件优化，例如  $\Phi 6/12$  适合高精度实验室炉， $\Phi 9/18$  适合工业大炉，需避免快速通过  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  的“瘟病”温度范围以防止表面粉化。

### 3.3 热场与冷端结构优化设计

$\text{MoSi}_2$  加热元件的热场与冷端结构优化设计是实现高效加热、均匀温度分布和长寿命的关键。热场设计旨在确保炉膛内的温度分布满足工艺要求（如陶瓷烧结的  $\pm 5^\circ\text{C}$  精度），通过优化热端布局、形状和功率密度实现。 $\text{MoSi}_2$  的热导率（ $1500^\circ\text{C}$  时约  $15\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ）和正温度系数电阻率（ $1500^\circ\text{C}$  时约  $4.5 \times 10^{-5}\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ ）使热场设计需精确匹配热端数量和间距。例如，U 型元件的热端间距（ $20\text{--}50\text{ mm}$ ）适合小型炉集中加热，W 型元件的多热端间距（ $30\text{--}60\text{ mm}$ ）适合大型炉均匀加热。热场优化还需考虑热辐射和对流，热端表面积和排列方式（如对称布局）直接影响热量分布。增加热端数量或采用螺旋型元件可提高热场均匀性，但会增加制造复杂性。功率密度设计需适中（ $15\text{--}25\text{ W/cm}^2$ ， $1700^\circ\text{C}$  时），过高可能导致局部过热，降低  $\text{SiO}_2$  保护膜稳定性。

冷端结构优化旨在降低冷端温度（通常  $\leq 400^\circ\text{C}$ ），提高电气连接稳定性和元件寿命。冷端通过掺杂高导电性材料（如铝）降低电阻率（约  $0.5 \times 10^{-5}\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ ），减少发热量，其直径（ $12\text{--}24\text{ mm}$ ）为热端的  $1.5\text{--}2$  倍以增强散热。冷端长度（ $50\text{--}300\text{ mm}$ ）需足够长以穿过炉壁，进入低温区与电源连接，但过长可能增加材料成本。冷端与热端的连接处是应力集中点，需采用渐变掺杂或焊接技术（如等离子焊接）平滑过渡，减少热应力和微裂纹风险。冷端表面常涂

覆导电涂层（如铝化层）以提高接触导电性，防止氧化。优化冷端设计还需考虑散热环境，例如通过陶瓷隔热套或空气对流降低冷端温度，避免过热导致连接点劣化。

热场与冷端结构的协同优化需结合炉膛设计和运行条件。热场模拟（如有限元分析）可预测温度分布，指导热端布局和功率分配。冷端散热设计需与炉壁密封和隔热材料（如氧化铝纤维）匹配，确保冷端温度稳定。 $\text{MoSi}_2$ 的低温脆性（断裂韧性约  $2-3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）要求优化设计避免快速热循环通过  $400-700^\circ\text{C}$  的“瘟疫”范围，防止非保护性氧化物生成。表面涂层（如  $\text{SiC}$ ，热膨胀系数约  $4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）可增强热端抗氧化性和冷端耐腐蚀性。实际应用中，定期检查热场均匀性和冷端连接状态，调整升降温速率（ $5-10^\circ\text{C}/\text{min}$ ），可确保热场与冷端结构的长期稳定性，满足半导体热处理、玻璃熔融等高要求应用。

### 3.4 电气连接与支架系统设计

$\text{MoSi}_2$ 加热元件的电气连接与支架系统设计对其运行稳定性、加热效率和使用寿命至关重要。电气连接系统需确保冷端与电源之间的低电阻接触，防止局部过热和电能损失，同时支架系统需提供机械支撑，允许热膨胀，减少热应力和裂纹风险。 $\text{MoSi}_2$ 的冷端电阻率（约  $0.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ，室温下）远低于热端（ $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ），通过铝化处理或掺杂高导电性材料（如钨）优化导电性。电气连接通常采用高导电性夹持器（如铜或铝合金）固定冷端，夹持器表面需镀镍或银以防止氧化，确保接触电阻低于  $0.01 \Omega$ 。连接点需施加适当夹紧力（通常  $5-10 \text{ N}/\text{cm}^2$ ），过紧可能导致  $\text{MoSi}_2$ 脆性断裂（断裂韧性约  $2-3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ），过松则可能引起电弧或过热。

电气连接设计还需考虑电源类型和控制系统。 $\text{MoSi}_2$ 元件适合比例控制或相位触发型电源，需配备电流限制功能（最大电流密度  $\leq 10 \text{ A}/\text{mm}^2$ ），避免非比例开关或“突发”供电损坏元件。电压调节器和变压器可稳定输入（通常  $20-100 \text{ V}$ ），匹配  $\text{MoSi}_2$ 的正温度系数电阻率变化（ $1500^\circ\text{C}$ 时约  $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）。冷端连接处需配备散热装置（如风冷或水冷套），保持冷端温度  $\leq 400^\circ\text{C}$ ，防止连接点劣化。电缆选择需耐高温（如镍基合金电缆），并与冷端尺寸匹配，避免接触电阻过高。为提高连接可靠性，可采用导电膏或铝箔垫片增强接触导电性。

支架系统设计需确保  $\text{MoSi}_2$ 元件的机械稳定性和热膨胀自由度。常见支架材料为高纯氧化铝或氧化锆（ $\text{ZrO}_2$ ），与  $\text{MoSi}_2$ 的热膨胀系数（ $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）匹配，减少热应力。支架形式包括夹持器、悬挂钩和支撑梁，垂直悬挂适合 U 型和 W 型元件，水平支撑适合直棒型元件。支架需设计为柔性结构，允许  $\text{MoSi}_2$ 在高温下膨胀（约  $0.8\%$ 线性膨胀， $1500^\circ\text{C}$ 时），避免应力集中。支架表面需光滑，防止磨损  $\text{MoSi}_2$ 表面  $\text{SiO}_2$ 保护膜。支架系统还需与炉膛隔热材料（如氧化铝纤维）协调，确保热端暴露在加热区，冷端位于低温区。

电气连接与支架系统的协同设计需考虑运行环境和热循环频率。快速通过  $400-700^\circ\text{C}$  的“瘟疫”范围可防止非保护性氧化物生成，保护连接点和支架表面。定期检查夹持器接触状态、支架磨损和冷端温度，清洁连接点氧化物，调整夹紧力，可延长系统寿命。表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）可增强冷端抗腐蚀性和支架耐久性。实际应用中，电气连接与支架系统需根据炉型（如管式炉、箱式炉）和应用（如陶瓷烧结、金属热处理）定制，确保  $\text{MoSi}_2$ 加热元件在高温氧化气氛下的稳定运行。



### 3.5 端头结构与连接方式

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件的端头结构与连接方式对其电气性能、机械稳定性和使用寿命具有关键影响。端头通常指冷端部分，负责与电源系统连接，需确保低电阻接触、高导电性和耐高温腐蚀性，同时承受热膨胀和机械应力。 $\text{MoSi}_2$ 冷端的电阻率（室温下约  $0.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）通过掺杂高导电性材料显著低于热端（室温下约  $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ），其直径通常为热端的 1.5-2 倍（如  $\Phi 6/12$  或  $\Phi 9/18$  规格），以降低发热量，保持冷端温度低于  $400^\circ\text{C}$ 。端头结构设计需优化冷端与热端的过渡区，减少应力集中，防止微裂纹萌生，尤其在  $\text{MoSi}_2$  的低温脆性阶段（断裂韧性约为  $2-3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）。常见的端头结构包括直型、弯曲型和锥形过渡型，直型冷端适用于 U 型和直棒型元件，弯曲型冷端（如  $90^\circ$  弯折）适用于 W 型或空间受限的炉型，锥形过渡型通过渐变直径平滑热端与冷端的连接，降低热应力。

连接方式主要包括夹持连接、焊接连接和螺栓连接。夹持连接是最常见的方式，使用高导电性夹持器（如铜或铝合金，表面镀镍或银）固定冷端，接触电阻需控制在  $0.01 \Omega$  以下。夹持力需适中（ $5-10 \text{ N/cm}^2$ ），过紧可能导致  $\text{MoSi}_2$  脆性断裂，过松可能引起电弧或局部过热。为增强接触导电性，可在冷端表面施加铝化涂层或使用导电膏。焊接连接通过等离子焊接或电阻焊接将冷端与导电接头（如镍基合金）连接，适合高精度应用，但焊接过程需控制温度，避免热端劣化。螺栓连接适用于大型工业炉，使用耐高温螺栓和垫片固定冷端，安装方便但接触电阻略高，需定期检查松动。连接方式需与电源系统匹配， $\text{MoSi}_2$  元件推荐使用比例控制或相位触发型电源，配备电流限制功能（最大电流密度  $\leq 10 \text{ A/mm}^2$ ），避免非比例开关损坏元件。

端头结构与连接方式的优化需考虑热循环和环境因素。频繁热循环可能导致冷端连接处热应力积累，引发微裂纹或接触电阻升高，尤其在  $400-700^\circ\text{C}$  的“瘟病”温度范围内，非保护性氧化物（ $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物）可能腐蚀连接点。为提高耐久性，冷端可涂覆  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层（热膨胀系数分别约为  $4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  和  $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ），增强抗氧化性和耐腐蚀性。散热设计（如风冷或陶瓷隔热套）可保持冷端低温，延长连接点寿命。实际应用中，定期检查夹持器或焊接点的完整性，清洁氧化物，调整夹紧力，可确保端头连接的长期稳定性。端头结构与连接方式的设计还需与炉膛隔热材料（如氧化铝纤维）和支架系统协调，确保冷端位于低温区，满足陶瓷烧结、玻璃熔融等高温应用的可靠性要求。

### 3.6 产品定制化设计要点

$\text{MoSi}_2$  加热元件的定制化设计是满足特定炉型和工艺需求的关键，涉及结构、尺寸、材料改性和运行条件的综合优化。定制化设计需根据应用场景（如实验室管式炉、工业陶瓷烧结炉、玻璃熔融炉或半导体热处理炉）确定元件的形状、功率密度、温度范围和安装方式，以实现高效加热、均匀温度场和长寿命。 $\text{MoSi}_2$  的热力学性能及其正温度系数电阻率为定制化设计提供了灵活性，但其低温脆性要求设计中充分考虑热应力和机械稳定性。以下为定制化设计的几个关键点。

首先，结构与尺寸的定制化需匹配炉膛几何和加热需求。U 型元件（热端直径 6-9 mm，长度 100-500 mm）适合小型炉集中加热，W 型元件（热端长度 200-1000 mm）适合大型炉均匀加

热，螺旋型适合管式炉高热密度需求，直棒型适合长距离线性加热。热端与冷端的直径比例（如  $\Phi 6/12$  或  $\Phi 9/18$ ）需根据功率密度优化，热端长度和间距需通过热场模拟（如有限元分析）确保温度均匀性（ $\pm 5^\circ\text{C}$ ）。冷端长度（50–300 mm）需足够穿过炉壁，进入低温区。特殊炉型可能需要非标形状（如 L 型或多弯曲线型），需精确控制弯曲半径（通常  $\geq 10\text{ mm}$ ）以减少热应力集中。

其次，材料改性和表面处理是定制化设计的重要环节。 $\text{MoSi}_2$  的纯度（ $\geq 99.5\%$ ）直接影响抗氧化性和热导率，高纯度原料可减少杂质（如 Fe、Al）引起的晶界弱化。掺杂改性（如添加  $\text{Y}_2\text{O}_3$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）可增强晶界强度，提高抗热震性，适合频繁热循环应用。表面涂层（如 SiC 或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）可延长  $\text{SiO}_2$  保护膜的使用寿命，增强抗“癌病”氧化能力。涂层厚度（10–50  $\mu\text{m}$ ）需根据运行温度和气氛优化，过厚可能导致剥落，过薄则保护不足。制备工艺（如热压烧结）需确保致密度（接近 98%），减少微观缺陷，提高机械和热力学性能。

第三，运行条件的定制化需考虑温度、气氛和热循环频率。 $\text{MoSi}_2$  元件在氧化气氛下最高使用温度可达  $1850^\circ\text{C}$ ，但在还原或真空环境中需降至  $1500^\circ\text{C}$  以下，以防止  $\text{SiO}_2$  膜失效。定制化设计需明确气氛类型（如含湿量、杂质含量），高湿环境可能导致  $\text{SiO}_2$  膜水化，降低热导率。热循环频率高的应用（如半导体热处理）需优化升降温速率（ $5\text{--}10^\circ\text{C}/\text{min}$ ），避免快速通过  $400\text{--}700^\circ\text{C}$ 。功率控制系统需匹配  $\text{MoSi}_2$  的电阻特性，采用比例控制电源，配备电压调节器（20–100 V）和电流限制功能，防止过载。

最后，安装与维护的定制化设计需与炉膛结构协调。垂直悬挂适合 U 型和 W 型元件，水平支撑适合直棒型，支架材料（如氧化铝，热膨胀系数约  $8 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ）需与  $\text{MoSi}_2$  匹配，允许热膨胀（约 0.8%， $1500^\circ\text{C}$ ）。电气连接需采用高导电性夹持器或焊接接头，确保接触电阻低于  $0.01\ \Omega$ 。定制化设计应提供维护指南，包括定期检查冷端温度、 $\text{SiO}_2$  膜状态和连接点完整性，清洁炉膛杂质（如碱金属氧化物）。通过热场模拟、材料优化和运行条件匹配，定制化设计可满足特定应用的性能要求，延长  $\text{MoSi}_2$  加热元件在高温环境中的使用寿命。



中钨智造硅化钼棒

## 第四章 二硅化钼加热元件的制造工艺

### 4.1 原材料选择与配比原则

二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 加热元件的制造始于原材料的选择与配比, 其质量直接影响元件的热力学性能、抗氧化性和使用寿命。 $\text{MoSi}_2$  是一种金属间化合物, 化学式为  $\text{MoSi}_2$ , 需由高纯度钼 (Mo) 和硅 (Si) 原料合成, 通常以粉末形式通过粉末冶金工艺制备。原材料选择的核心原则是确保高纯度 (通常  $\geq 99.5\%$ ) 和低杂质含量, 以减少晶界弱化和非保护性氧化风险。钼粉要求纯度  $\geq 99.9\%$ , 主要杂质 (如 Fe、Al、C) 含量应低于  $0.01\%$ , 因 Fe 和 Al 可能引发晶界腐蚀, 降低抗热震性; 碳杂质可能生成碳化物, 影响电阻率。硅粉同样需高纯度 ( $\geq 99.9\%$ ), 避免氧、氮等非金属杂质导致  $\text{SiO}_2$  保护膜缺陷。粒度分布是另一关键因素, 钼粉和硅粉的粒径通常控制在  $1-10\ \mu\text{m}$ , 过大的颗粒可能导致烧结不均匀, 过小则增加制备成本。

配比原则以  $\text{MoSi}_2$  的化学计量比 (Mo:Si=1:2 摩尔比) 为基础, 理论上钼与硅的质量比约为 2.55:1。为确保反应完全, 实际配比可能略微偏离化学计量比, 例如硅含量增加 0.5-1% 以补偿高温烧结中的挥发损失。掺杂改性是优化性能的重要手段, 常用掺杂剂包括稀土氧化物 (如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$ , 添加量 0.1-1 wt%) 以增强晶界强度和抗热震性, 或氧化铝以提高  $\text{SiO}_2$  膜稳定性。掺杂剂需高纯度 ( $\geq 99.95\%$ ), 避免引入额外杂质。配比过程需在惰性气氛 (如氩气) 或真空环境中进行, 防止原料氧化。混合均匀性对最终性能至关重要, 通常采用行星球磨或 V 型混料机进行混合, 控制球磨时间和转速以避免颗粒破碎或污染。

原材料选择与配比还需考虑制备工艺和应用需求。例如, 热压烧结要求更细小的颗粒 ( $1-5\ \mu\text{m}$ ) 以提高致密度 (接近 98%), 而自蔓延高温合成 (SHS) 可接受稍大颗粒 ( $5-10\ \mu\text{m}$ ) 以降低成本。针对高精度应用 (如半导体热处理), 需选用超高纯度原料 ( $\geq 99.99\%$ ) 并严格控制配比精度 ( $\pm 0.1\%$ )。质量控制环节包括化学成分分析 (如 ICP-MS) 和粒度分布检测 (如激光粒度仪), 确保原料符合设计要求。合理的原材料选择与配比为后续成型和烧结奠定基础, 确保  $\text{MoSi}_2$  加热元件在高温氧化气氛下的稳定性和可靠性。

### 4.2 粉末冶金与等静压成型工艺

粉末冶金是制造  $\text{MoSi}_2$  加热元件的核心工艺, 结合等静压成型能够生产高致密度、性能优异的元件, 适用于 U 型、W 型、直棒型和螺旋型等结构。粉末冶金工艺包括原料混合、成型、烧结和后处理四个主要步骤, 其中等静压成型是关键成型技术, 可确保元件尺寸精度和微观结构均匀性。 $\text{MoSi}_2$  的热导率 ( $1500^\circ\text{C}$  时约  $15\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )、热膨胀系数 (约  $8.1\times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$ ) 和抗氧化性依赖于高致密度 ( $\geq 98\%$ ) 和低缺陷率, 粉末冶金与等静压成型的结合能够有效满足这些要求。

**原料混合:** 混合过程将高纯度钼粉和硅粉按化学计量比 (Mo:Si=1:2) 或略微富硅配比 (硅增加 0.5-1%) 进行均匀混合, 通常在惰性气氛 (如氩气) 或真空环境中使用行星球磨机或 V 型混料机。球磨介质为高纯氧化铝或氧化锆, 球料比控制在 2:1 至 5:1, 混合时间 4-8 小时, 以确保颗粒均匀分散而不引入污染。掺杂剂 (如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 添加量 0.1-2 wt%) 在混合阶



段加入，需控制其粒径以保证均匀分布。混合后的粉末通过筛分去除团聚颗粒，并进行干燥以去除水分。

**等静压成型：**等静压成型（冷等静压，CIP）是  $\text{MoSi}_2$  加热元件成型的主要技术，通过在液体介质（如水或油）中施加均匀压力将混合粉末压制所需形状（如 U 型、W 型或直棒型坯体）。等静压成型的优势在于压力均匀，坯体致密度高，可减少后续烧结中的收缩不均。成型模具通常为柔性橡胶或聚氨酯材料，耐压并与  $\text{MoSi}_2$  粉末无化学反应。工艺参数包括压力、保压时间和粉末装填均匀性，需确保坯体无裂纹或分层。复杂形状（如螺旋型）可能需分段成型或结合预成型技术。为提高坯体强度，可添加少量有机粘结剂，在后续预烧结中去除。

**烧结工艺：**烧结是粉末冶金的关键步骤，使  $\text{MoSi}_2$  坯体达到高致密度并形成稳定的四方  $\alpha$  型晶体结构。常见烧结方法包括热压烧结（HP）和无压烧结，热压烧结更适合高性能  $\text{MoSi}_2$  加热元件。热压烧结在真空或惰性气氛（氩气）中进行，温度控制在  $1600\text{--}1800^\circ\text{C}$ ，压力  $20\text{--}40\text{ MPa}$ ，保温时间  $1\text{--}3$  小时。烧结过程中，钼与硅反应生成  $\text{MoSi}_2$ ，同时掺杂剂（如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）促进晶界结合，减少孔隙。烧结温度需精确控制，过高可能导致 Si 挥发，降低  $\text{SiO}_2$  膜质量；过低则致密度不足，影响热导率和抗热震性。无压烧结适用于成本敏感的应用，温度  $1700\text{--}1900^\circ\text{C}$ ，但致密度较低，可能增加微裂纹风险。

**后处理：**烧结后的  $\text{MoSi}_2$  元件需进行后处理，包括表面抛光、尺寸修整和保护涂层施加。表面抛光（使用金刚石砂轮）可去除表面缺陷，降低热应力集中风险。尺寸修整确保元件符合设计规格。保护涂层通过等离子喷涂或化学气相沉积（CVD）施加，增强抗氧化性和抗“瘟病”氧化能力。质量检测环节包括致密度测试（阿基米德法）、显微结构分析（SEM）和电阻率测量，确保元件性能满足陶瓷烧结、玻璃熔融等应用需求。

粉末冶金与等静压成型工艺的优化需综合考虑成本和性能。热压烧结结合等静压成型可生产高致密度元件，适合高精度应用（如半导体热处理）；无压烧结成本较低，适合大规模工业炉。工艺控制需避免  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  的“瘟病”温度范围，防止非保护性氧化物生成。定期检测原料纯度、坯体质量和烧结参数，确保  $\text{MoSi}_2$  加热元件在高温氧化气氛下的稳定性和可靠性。

#### 4.3 高温烧结与后处理技术

高温烧结是二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件制造中的核心工艺，旨在将成型坯体转化为高致密度（ $\geq 98\%$  理论密度）、机械性能优异且具有稳定四方  $\alpha$  型晶体结构的元件，确保其热导率、抗氧化性和抗热震性满足高温应用需求。烧结工艺通常在真空或惰性气氛（如氩气）中进行，以防止氧化，常见方法包括热压烧结（HP）、无压烧结和自蔓延高温合成（SHS）。热压烧结是高性能  $\text{MoSi}_2$  元件的主流工艺，温度控制在  $1600\text{--}1800^\circ\text{C}$ ，压力  $20\text{--}40\text{ MPa}$ ，保温时间  $1\text{--}3$  小时。高温使钼与硅充分反应生成  $\text{MoSi}_2$ ，同时掺杂剂促进晶界结合，减少孔隙率。烧结温度需精确控制，过高可能导致 Si 挥发，削弱表面  $\text{SiO}_2$  保护膜质量；过低则致密度不足（ $< 95\%$ ），降低热导率和抗热震性。

后处理技术对  $\text{MoSi}_2$  元件的性能优化至关重要，包括表面抛光、尺寸修整和性能检测。表面抛光使用金刚石砂轮或氧化铝磨料，旨在去除烧结过程中形成的表面缺陷（如微孔、烧结瘤），

降低热应力集中，增强抗热震性。尺寸修整通过精密机械加工（如 CNC 切割）确保元件符合设计规格，以满足 U 型、W 型或螺旋型等结构的精度要求。性能检测包括致密度测试（阿基米德法，目标 $\geq 98\%$ ）、显微结构分析和电阻率测量，确保元件电热性能一致性。预氧化处理可在表面生成致密  $\text{SiO}_2$  保护膜，增强抗氧化性和抗“瘟病”氧化能力。后处理还需在惰性气氛中进行，避免 400–700℃ 温度区间，防止非保护性氧化物（ $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物）生成。高质量的后处理可显著提升  $\text{MoSi}_2$  元件在高温氧化气氛下的稳定性和寿命，满足半导体热处理等高精度应用需求。

#### 4.4 表面防护层技术

表面防护层技术是  $\text{MoSi}_2$  加热元件制造的重要环节，通过施加保护涂层增强抗氧化性、抗热震性和耐腐蚀性，延长元件在高温氧化气氛下的使用寿命。 $\text{MoSi}_2$  在 800℃ 以上自然形成  $\text{SiO}_2$  保护膜，但在极限温度或频繁热循环中， $\text{SiO}_2$  膜可能因 Si 挥发或  $\text{MoO}_3$  挥发而变薄，特别是在 400–700℃ 的“瘟病”温度范围内易发生粉化。表面防护层通过施加氧化物涂层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ ）、碳化物涂层（如 SiC）或复合涂层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC）弥补  $\text{SiO}_2$  膜的不足。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层（熔点约 2050℃）通过等离子喷涂或化学气相沉积（CVD）施加，厚度 10–50  $\mu\text{m}$ ，具有高抗氧化性和低氧扩散系数，适合陶瓷烧结炉。SiC 涂层通过反应烧结或 CVD 施加，厚度 20–100  $\mu\text{m}$ ，增强抗热震性和抗磨损性，适合玻璃熔融炉。复合涂层结合多种材料优势，如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC 涂层兼具高抗氧化性和抗热震性，适合复杂工况。

涂层施工工艺对性能影响显著。等离子喷涂可形成厚而致密的涂层，适合工业规模生产，但可能存在微孔隙，略降低热导率。CVD 工艺生成均匀、附着力高的薄涂层（10–30  $\mu\text{m}$ ），热应力小，适合高精度应用，但成本较高。涂层厚度需精确控制，过厚可能因热膨胀失配引发剥落，过薄则保护不足。界面设计（如添加 SiC 过渡层）可提高涂层与  $\text{MoSi}_2$  基体的结合力，减少热应力。涂层还需耐受高湿或腐蚀性气氛（如含硫气体）， $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层在高湿环境中可能水化，需优化工艺参数。质量检测包括涂层厚度测量（超声波或 SEM）、附着力测试（划痕法）和抗氧化性测试，确保涂层性能。

表面防护层技术的优化需结合应用环境。半导体热处理炉要求高纯度 CVD 涂层以避免污染，玻璃熔融炉优先选择厚实的 SiC 涂层以增强抗热冲击性。定期检查涂层完整性，快速通过 400–700℃ 温度区间，可防止“瘟病”氧化和涂层劣化。未来，纳米结构涂层和多层复合涂层有望进一步提升  $\text{MoSi}_2$  元件的表面性能，满足更苛刻的高温应用需求。

#### 4.5 焊接与端头加工技术

焊接与端头加工技术是  $\text{MoSi}_2$  加热元件制造的最后阶段，旨在确保冷端与电源连接的稳定性和电热性能，同时优化端头结构以承受机械和热应力。 $\text{MoSi}_2$  冷端通过掺杂高导电性材料（如铝或钨）降低电阻率，直径为热端的 1.5–2 倍，需保持低温以防止过热劣化。焊接技术用于连接冷端与导电接头（如镍基合金或铜合金），确保低接触电阻（ $< 0.01 \Omega$ ）和高机械强度。常见焊接方法包括等离子焊接和电阻焊接。等离子焊接在惰性气氛（如氩气）中进行，温度控制在 1200–1400℃，可形成均匀、高强度的焊缝，适合高精度应用（如半导体热处理）。电

阻焊接通过高电流快速加热冷端与接头，成本较低但焊缝均匀性稍逊，适合工业炉。焊接过程中需避免过高温度，防止热端  $\text{MoSi}_2$  晶体结构劣化或  $\text{SiO}_2$  膜受损。

端头加工技术包括冷端表面处理、尺寸修整和导电涂层施加。冷端表面通过机械抛光去除氧化层和缺陷，提高与夹持器或焊缝的接触质量。尺寸修整使用 CNC 加工或金刚石切割，确保冷端直径和长度符合设计公差，适合 U 型、W 型或直棒型元件。导电涂层（如铝化层，厚度  $5\text{--}20\ \mu\text{m}$ ）通过电镀或热喷涂施加，增强冷端导电性，降低接触电阻，防止氧化腐蚀。端头加工还需优化热端与冷端的过渡区，采用锥形过渡或渐变掺杂技术，平滑热应力分布，减少微裂纹风险（ $\text{MoSi}_2$  断裂韧性约  $2\text{--}3\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）。加工过程需在惰性气氛中进行，避免  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  的“瘟病”温度范围，防止非保护性氧化物生成。

焊接与端头加工的优化需考虑运行条件和安装方式。频繁热循环可能导致焊缝或端头应力集中，需定期检查焊缝完整性和冷端温度。保护涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，厚度  $10\text{--}50\ \mu\text{m}$ ）可施加于冷端，增强抗腐蚀性和抗热震性。质量检测包括焊缝强度测试（拉伸或剪切试验）、接触电阻测量和显微结构分析（SEM），确保端头性能。实际应用中，焊接与端头加工需与电气连接系统（如铜夹持器）和支架设计（氧化铝支撑）协调，确保  $\text{MoSi}_2$  加热元件在高温氧化气氛下的长期稳定性，满足陶瓷烧结、玻璃熔融等应用需求。



中钨智造硅化钼棒



中钨智造科技有限公司  
二硅化钼加热元件产品介绍

一、二硅化钼加热元件概述

二硅化钼（MoSi<sub>2</sub>）加热元件是一种具有优异高温性能的陶瓷电热材料，广泛应用于工业炉窑领域。该材料在高温氧化气氛中能够形成致密的二氧化硅（SiO<sub>2</sub>）保护层，有效防止进一步氧化，具备出色的抗氧化能力和热稳定性。其可在高温下长时间稳定工作，是多种高温热处理工艺的理想选择。

二、二硅化钼加热元件特性

- 低膨胀系数：**与常见的陶瓷基体材料匹配较好，减少了热应力引起的开裂风险。
- 优异的抗氧化性能：**表面形成致密的 SiO<sub>2</sub> 保护膜，有效防止材料氧化损耗。
- 极高的工作温度：**可持续工作温度可达 1700° C，最高可使用至 1800° C（氧化气氛中）。
- 良好的高温电阻特性：**在高温下，MoSi<sub>2</sub> 的电阻率表现相对稳定，高温段电阻率增幅缓慢。

三、二硅化钼加热元件规格

二硅化钼加热元件有直型棒、U 型棒、W 型棒等类型，典型规格型号参考如下：

| 型号 (d1/d2) | 热端直径 d1 | 冷端直径 d2 | 热端长度 Le     | 冷端长度 Lu    | 常见类型           |
|------------|---------|---------|-------------|------------|----------------|
| φ3/6       | 3 mm    | 6 mm    | 100–300 mm  | 150–250 mm | 直棒 / U 型       |
| φ4/9       | 4 mm    | 9 mm    | 100–500 mm  | 200–300 mm | 直棒 / U 型       |
| φ6/12      | 6 mm    | 12 mm   | 100–600 mm  | 200–350 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ9/18      | 9 mm    | 18 mm   | 150–800 mm  | 250–400 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ12/24     | 12 mm   | 24 mm   | 200–1000 mm | 300–500 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |

四、二硅化钼加热元件典型应用

- 陶瓷、粉末冶金等行业的高温烧结炉
- 钢铁、有色金属热处理设备
- 实验室高温电炉
- 玻璃熔融与加工设备
- 半导体、光伏行业的扩散、退火及氧化工艺

五、采购信息

- 邮箱：[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- 电话：+86 592 5129595; 592 5129696
- 更多硅钼棒资讯，请访问中钨在线网站（[www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)）。
- 更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



## 第五章 二硅化钼加热元件的性能测试

### 5.1 电阻率与温度关系测试

电阻率是二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件的关键电热性能参数，直接影响其加热效率、功率输出和温度控制精度。 $\text{MoSi}_2$ 具有正温度系数（PTC）电阻率特性，电阻率随温度升高而增加，这使其能够在高温下自适应调节功率，适合陶瓷烧结、玻璃熔融等高温应用（最高 1800–1850°C）。电阻率与温度关系的测试旨在量化  $\text{MoSi}_2$  在不同温度下的电阻特性，验证其电热稳定性并为元件设计和运行参数优化提供数据。测试通常在实验室或工业炉中进行，使用高精度电阻测试仪（如四探针法）和控温炉，确保数据可靠性。

测试方法包括将  $\text{MoSi}_2$  加热元件（如 U 型、W 型，常见规格  $\Phi 6/12$  或  $\Phi 9/18$ ）置于可控氧化气氛炉中，逐步升温，在室温（25°C）至 1800°C 范围内测量电阻率。测试设备包括高精度直流电源（恒流或恒压模式，电流密度  $\leq 10 \text{ A/mm}^2$ ）、数字万用表（精度  $\pm 0.1\%$ ）和热电偶（K 型或 S 型，精度  $\pm 1^\circ\text{C}$ ）。测试时需快速通过 400–700°C 的“瘟病”温度范围，以避免非保护性氧化物（ $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物）生成影响电阻率。电阻率（ $\rho$ ）通过公式  $\rho = R \cdot A/L$  计算，其中 R 为测得电阻，A 为热端截面积，L 为热端长度。测试环境保持氧化气氛，湿度低于 30%，以确保表面  $\text{SiO}_2$  保护膜稳定。

$\text{MoSi}_2$  的电阻率在室温下约为  $2.0 \times 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ，随温度升高显著增加，在 1000°C 约为  $4.0 \times 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ，1500°C 时约为  $4.5 \times 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ，1800°C 时可达  $4.8 \times 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ 。这种正温度系数特性使  $\text{MoSi}_2$  元件在高温下功率输出稳定，但也意味着冷端（掺杂铝或钨，电阻率约  $0.5 \times 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ）需保持低温以避免过热。测试结果显示，电阻率随温度的变化受材料纯度和微观结构影响，高纯度  $\text{MoSi}_2$  电阻率曲线更稳定，致密度高的元件电阻率波动小。掺杂改性可进一步稳定电阻率，减少晶界散射。测试还需记录热循环对电阻率的影响，多次热循环后，电阻率可能略增，需评估长期稳定性。

测试注意事项包括校准设备精度、确保冷端连接稳定（接触电阻  $< 0.01 \text{ } \Omega$ ）和避免还原或高湿气氛（湿度  $> 70\%$  可能导致  $\text{SiO}_2$  膜水化）。测试数据通过拟合电阻率-温度曲线（如二次多项式）分析，用于优化元件设计和电源控制系统。实际应用中，电阻率测试结果指导  $\text{MoSi}_2$  元件的运行参数，确保在高温氧化气氛下的电热性能和控温精度。

### 5.2 高温使用寿命与热震性能关系测试

高温使用寿命和热震性能是  $\text{MoSi}_2$  加热元件的关键性能指标，决定其在高温氧化气氛（最高 1800–1850°C）下的可靠性和耐久性。高温使用寿命指元件在目标温度下持续运行而不发生显著性能劣化（如电阻率漂移、微裂纹扩展或  $\text{SiO}_2$  膜失效）的时间，热震性能指元件在快速温度变化（如热循环或急冷急热）下的抗裂能力。 $\text{MoSi}_2$  的低温脆性和“瘟病”氧化使其在热循环中易受损，测试高温使用寿命与热震性能的关系旨在评估元件在实际工况（如陶瓷烧结、金属热处理）的耐久性，为优化材料和设计提供依据。测试方法包括长期高温运行测试和热震循环测试。长期高温运行测试在氧化气氛炉中进行，将  $\text{MoSi}_2$  元件（如 U 型或 W 型， $\Phi 6/12$  或  $\Phi 9/18$ ）置于目标温度，功率密度控制在  $15\text{--}20 \text{ W/cm}^2$ ，持续运行 1000–5000 小

时，记录电阻率变化、表面 SiO<sub>2</sub>膜状态和微观结构演变。测试设备包括高温炉（精度±5℃）、电阻测试仪（四探针法，精度±0.1%）和显微镜（SEM，分析裂纹和膜层）。热震循环测试模拟快速升降温，典型条件为 25–1500℃ 循环，升降温速率 10–20℃/min，循环次数 100–1000 次，快速通过 400–700℃ 以避免“瘟病”氧化。测试后评估裂纹数量（光学显微镜，放大倍数 50–200×）、SiO<sub>2</sub>膜厚度和机械强度变化（三点弯曲试验，断裂强度约 200–300 MPa）。

测试结果显示，MoSi<sub>2</sub>元件在 1500℃ 下的使用寿命可达 5000 小时以上，1800℃ 时约为 1000–2000 小时，寿命受 SiO<sub>2</sub>膜稳定性影响。在高温下，Si 挥发和 MoO<sub>3</sub>挥发可能导致膜层变薄（<5 μm），降低抗氧化性，电阻率增加 10–20% 后可能引发性能劣化。高纯度 MoSi<sub>2</sub>（≥99.5%）和热压烧结元件（致密度≥98%）寿命更长，因杂质（如 Fe、Al）和孔隙减少了晶界弱化和裂纹萌生。掺杂改性（如 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，0.1–1 wt%）可增强晶界强度，延长寿命 10–20%。热震性能方面，热循环后微裂纹主要出现在热端–冷端连接处，W 型元件因多热端设计抗热震性优于 U 型，直棒型因线性结构抗裂性较好。表面涂层可显著提高热震性能，减少裂纹扩展（裂纹密度降低 30–50%）和 SiO<sub>2</sub>膜剥落。

测试注意事项包括保持氧化气氛、避免高湿（湿度>70%）和还原环境（导致 SiO<sub>2</sub>膜失效），以及定期校准热电偶和电阻测试仪。测试数据通过寿命预测模型（如 Arrhenius 模型）和裂纹统计分析，指导 MoSi<sub>2</sub>元件的材料优化（如掺杂）和结构设计（如优化弯曲半径）。实际应用中，测试结果用于制定维护计划（如定期检查裂纹和膜层）和运行参数，确保 MoSi<sub>2</sub>加热元件在高温炉中的长期可靠性和热震稳定性。

### 5.3 氧化环境下的稳定性测试

氧化环境下的稳定性测试是评估二硅化钼（MoSi<sub>2</sub>）加热元件在高温氧化气氛（最高 1800–1850℃）下长期性能的关键，重点考察其表面 SiO<sub>2</sub>保护膜的形成与保持能力、抗氧化性能以及微观结构的稳定性。MoSi<sub>2</sub>在氧化气氛中通过表面生成致密的 SiO<sub>2</sub>保护膜实现优异的抗氧化性，但高温下 Si 挥发或 MoO<sub>3</sub>挥发可能导致膜层变薄，尤其在 400–700℃ 的“瘟病”温度范围内易发生非保护性氧化，生成 MoO<sub>3</sub>和 SiO<sub>2</sub>混合物，导致材料粉化。稳定性测试旨在量化 MoSi<sub>2</sub>元件在氧化环境中的寿命、电阻率变化和表面状态，为陶瓷烧结、玻璃熔融等高温应用提供可靠数据。

测试方法包括长期氧化暴露测试和循环氧化测试。长期氧化暴露测试将 MoSi<sub>2</sub>元件（如 U 型、W 型，Φ6/12 或 Φ9/18）置于高温氧化气氛炉，温度控制在 1500–1800℃，功率密度 15–20 W/cm<sup>2</sup>，持续运行 1000–5000 小时。测试设备包括高温炉、电阻测试仪（四探针法，精度±0.1%）、扫描电子显微镜（SEM）和 X 射线衍射仪（XRD），用于分析 SiO<sub>2</sub>膜厚度（目标 10–20 μm）、表面形貌和相组成。循环氧化测试模拟实际工况中的热循环，条件为 25–1500℃ 或 25–1800℃，升降温速率 5–10℃/min，循环次数 100–1000 次，快速通过 400–700℃ 以避免“瘟病”氧化。测试后评估电阻率变化、SiO<sub>2</sub>膜完整性、裂纹数量和质量损失。

测试结果表明，MoSi<sub>2</sub>元件在 1500℃ 氧化气氛下的稳定性较高，寿命可达 5000 小时以上，SiO<sub>2</sub>膜保持致密（厚度 10–15 μm），电阻率增幅<10%。高纯度 MoSi<sub>2</sub>和热压烧结元件（致密度≥98%）稳定性更优，膜层缺陷少，质量损失率<0.5 mg/cm<sup>2</sup>/1000h。掺杂改性（如 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，



0.1-1 wt%) 可增强  $\text{SiO}_2$  膜附着力, 减少剥落。循环氧化测试显示, 热震裂纹主要出现在热端-冷端连接处, W 型元件因多热端设计稳定性略优于 U 型。表面涂层 (如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 厚度 10-50  $\mu\text{m}$ ) 可显著提高稳定性, 质量损失率降低 30-50%。测试需避免高湿 (湿度 > 70%) 或含硫气氛, 防止  $\text{SiO}_2$  膜水化或腐蚀。

#### 5.4 加热元件的硬度测试

硬度测试是评估  $\text{MoSi}_2$  加热元件机械性能的重要手段, 直接反映其抗磨损性、抗机械应力和抗热震裂纹扩展能力。 $\text{MoSi}_2$  作为金属间化合物, 具有较高的硬度, 但其低温脆性使其在机械冲击或热循环中易产生微裂纹。硬度测试旨在量化  $\text{MoSi}_2$  元件的表面硬度和微观结构强度, 为优化制造工艺 (如热压烧结) 和掺杂改性提供依据, 满足陶瓷烧结、金属热处理等应用的机械稳定性要求。

测试方法采用维氏硬度测试 (Vickers Hardness Test), 使用维氏硬度计在  $\text{MoSi}_2$  元件表面 (热端和冷端) 施加压痕, 测量压痕对角线长度 (精度  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ) 计算硬度值。测试在室温下进行, 样品表面需清洁, 避免氧化层或杂质影响。高温硬度测试使用高温硬度计, 模拟实际运行条件, 需在惰性气氛 (如氩气) 中进行以防止氧化。为评估硬度均匀性, 测试点覆盖热端、冷端和热端-冷端过渡区, 每个区域至少 5 个点, 取平均值 (偏差 < 5%)。辅助测试包括显微结构分析和裂纹扩展评估。

测试结果显示,  $\text{MoSi}_2$  元件的室温维氏硬度为 8-10 GPa, 1500°C 时降至约 4-6 GPa, 因高温下晶界滑移和软化效应。高纯度  $\text{MoSi}_2$  和热压烧结元件 (致密度  $\geq 98\%$ ) 硬度更高 (接近 10 GPa), 因孔隙率低 (< 2%), 晶界缺陷少。掺杂改性 (如  $\text{Y}_2\text{O}_3$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0.1-2 wt%) 可提高硬度 5-10%, 因稀土氧化物增强晶界结合力。冷端硬度略低于热端 (约 7-9 GPa), 因掺杂铝或钨降低晶体强度。热循环后硬度可能下降 5-15%, 因微裂纹积累。表面涂层可显著提高表面抗磨损性, 但涂层剥落可能暴露基体。测试需控制压痕深度 (< 10% 样品厚度) 以避免基体效应, 结果用于评估元件在安装、运行和维护中的机械耐久性。

#### 5.5 抗氧化性与温度关系测试

抗氧化性与温度关系测试是  $\text{MoSi}_2$  加热元件性能测试的核心, 旨在评估其在不同温度下的氧化行为、 $\text{SiO}_2$  保护膜的形成与稳定性, 以及材料质量损失和电阻率变化, 为高温应用 (如玻璃熔融、半导体热处理) 提供可靠数据。 $\text{MoSi}_2$  的抗氧化性依赖于表面  $\text{SiO}_2$  保护膜, 在 800°C 以上形成致密膜层, 但在 400-700°C 的 “瘟病” 温度范围内易生成非保护性氧化物, 导致粉化; 在接近 1850°C 时, Si 挥发可能导致膜层变薄。测试旨在量化抗氧化性能随温度的变化规律, 优化运行温度和维护策略。

测试方法包括恒温氧化测试和变温氧化测试。恒温氧化测试将  $\text{MoSi}_2$  元件 (如 U 型、W 型,  $\Phi 6/12$  或  $\Phi 9/18$ ) 置于氧化气氛炉, 温度范围 400-1800°C, 运行时间 100-1000 小时, 功率密度 15-20 W/cm<sup>2</sup>。测试设备包括高温炉 (精度  $\pm 5^\circ\text{C}$ )、精密天平 (精度  $\pm 0.1 \text{ mg}$ )、SEM 和 XRD, 用于测量质量损失率 (mg/cm<sup>2</sup>/h)、 $\text{SiO}_2$  膜厚度和相组成。变温氧化测试模拟热循环, 条件为 25-1500°C 或 25-1800°C, 升降温速率 5-10°C/min, 循环次数 50-500 次, 快速通过

400–700℃。测试后评估电阻率变化（四探针法，精度±0.1%）、膜层完整性（SEM）和裂纹密度（光学显微镜，放大倍数 50–200×）。

测试结果表明，MoSi<sub>2</sub>在 800–1500℃抗氧化性最佳，SiO<sub>2</sub>膜厚度稳定，质量损失率<0.2 mg/cm<sup>2</sup>/1000h，电阻率增幅<10%。在 400–700℃，非保护性氧化导致质量损失率高达 1–2 mg/cm<sup>2</sup>/100h，电阻率增加 20–30%，需快速通过此区间。在 1800℃，Si 挥发加剧，SiO<sub>2</sub>膜变薄，质量损失率增至 0.5–1 mg/cm<sup>2</sup>/1000h，寿命缩短至 1000–2000 小时。高纯度 MoSi<sub>2</sub>和热压烧结元件（致密度≥98%）抗氧化性更强，膜层缺陷少。掺杂改性增强膜层附着力，质量损失率降低 20–30%。表面涂层显著提高抗氧化性，尤其在 1800℃，质量损失率降低 40–60%。测试需避免高湿或还原气氛，确保数据可靠性。结果通过氧化动力学分析（如抛物线模型）指导运行温度优化（推荐 1500–1700℃）和维护计划（如定期检查膜层）。

## 5.6 棒体表面粗糙度与电阻率关系

表面粗糙度是影响二硅化钼（MoSi<sub>2</sub>）加热元件电热性能的重要因素，直接关系到其电阻率和电流分布的均匀性。MoSi<sub>2</sub>元件的表面粗糙度主要由制造工艺（如热压烧结、等静压成型）和后续加工（如抛光、喷砂）决定，粗糙度高的表面可能导致局部电流集中、热应力不均和 SiO<sub>2</sub>保护膜形成的不均匀，从而影响电阻率稳定性。测试表面粗糙度与电阻率关系旨在量化表面形貌对电热性能的影响，为优化制造工艺和元件设计提供依据，特别适用于陶瓷烧结、玻璃熔融等高精度控温场景。

测试方法采用表面粗糙度仪（如轮廓仪或原子力显微镜，精度±0.01 μm）测量 MoSi<sub>2</sub>棒体表面粗糙度参数（如 Ra、Rz），测试区域覆盖热端和冷端，样品表面需清洁以避免杂质干扰。电阻率测试使用四探针法（精度±0.1%），在室温至 1800℃范围内测量，结合不同粗糙度样品。测试环境为氧化气氛，快速通过 400–700℃“瘟病”温度范围以避免非保护性氧化物生成。电阻率（ρ）通过公式  $\rho = R \cdot A/L$  计算，其中 R 为测得电阻，A 为截面积，L 为测试长度。测试需记录表面粗糙度对 SiO<sub>2</sub>膜形成的影响（SEM 观察，放大倍数 50–200×）和电流分布均匀性（红外测温仪，精度±1℃）。

测试结果表明，表面粗糙度较低的 MoSi<sub>2</sub>棒体电阻率更稳定，波动范围小，因平滑表面减少了局部电流集中和热应力累积。高粗糙度表面可能导致电阻率局部升高，因表面缺陷增加晶界散射和电流路径不均。抛光处理的 MoSi<sub>2</sub>元件在高温下 SiO<sub>2</sub>膜更均匀（厚度 10–15 μm），电阻率变化较小，适合高精度应用。喷砂或粗糙表面在热循环中易产生微裂纹，增加电阻率波动，影响长期稳定性。测试需校准设备精度，控制冷端连接和气氛条件，避免高湿（湿度>70%）导致 SiO<sub>2</sub>膜水化。数据通过拟合粗糙度-电阻率曲线分析，用于优化表面处理工艺（如化学抛光或等离子喷涂），提高 MoSi<sub>2</sub>元件的电热性能和控温精度。

## 5.7 棒体涂层均匀性对使用寿命的影响

MoSi<sub>2</sub>加热元件的表面涂层（如 SiC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，厚度 10–50 μm）是提高抗热震性和抗腐蚀性的关键，涂层均匀性直接影响 SiO<sub>2</sub>保护膜的稳定性、氧化速率和元件使用寿命。涂层不均匀可能导致局部抗氧化性不足、热应力集中或剥落，缩短元件在高温氧化环境（如陶瓷烧结、

半导体制造）下的运行时间。测试涂层均匀性对使用寿命的影响旨在评估涂层质量对元件耐久性的作用，为优化涂层工艺（如化学气相沉积、等离子喷涂）提供数据支持。

测试方法包括涂层均匀性检测 and 高温寿命测试。涂层均匀性通过扫描电子显微镜（SEM，精度  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ）和 X 射线光谱仪（EDS）分析，测量涂层厚度分布和成分均匀性（SiC 中 Si/C 比或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中 Al/O 比）。样品包括不同涂层工艺的  $\text{MoSi}_2$  棒体（如 CVD 涂层、喷涂涂层），测试区域覆盖热端和冷端过渡区。高温寿命测试在氧化气氛炉中进行，温度范围  $1500\text{--}1800^\circ\text{C}$ ，功率密度  $15\text{--}20 \text{ W/cm}^2$ ，运行时间  $1000\text{--}5000$  小时，快速通过  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  以避免“瘟病”氧化。测试记录质量损失率（精密天平，精度  $\pm 0.1 \text{ mg}$ ）、 $\text{SiO}_2$  膜状态（SEM 观察）和电阻率变化（四探针法，精度  $\pm 0.1\%$ ）。辅助测试包括涂层附着力和热震性能。

测试结果显示，涂层均匀性高的  $\text{MoSi}_2$  元件（厚度偏差  $< 5\%$ ）使用寿命显著延长，因均匀涂层促进了  $\text{SiO}_2$  膜的稳定形成，减少局部氧化和剥落。CVD 涂层因高致密度和附着力在  $1800^\circ\text{C}$  下表现出更长寿命，适合高要求应用。喷涂涂层若厚度不均（偏差  $> 10\%$ ），可能在热端-冷端过渡区发生剥落，导致  $\text{SiO}_2$  膜变薄，加速氧化劣化，寿命缩短。均匀涂层还降低热循环中的微裂纹密度，提高抗热震性。测试需控制气氛和升降温速率，避免高湿或还原环境（导致  $\text{SiO}_2$  膜失效）。数据通过涂层厚度-寿命关系分析，指导涂层工艺优化和维护策略（如定期检查涂层完整性），确保  $\text{MoSi}_2$  元件在高温氧化环境下的长期可靠性。

## 5.8 使用寿命与应力耦合关系

$\text{MoSi}_2$  加热元件的使用寿命受热应力、机械应力和环境应力的耦合作用影响，尤其在高温氧化气氛和频繁热循环中表现明显。热应力源于快速升降温导致的温度梯度，机械应力来自安装固定或运行振动，环境应力与氧化或腐蚀性气氛相关。应力耦合可能引发微裂纹扩展、 $\text{SiO}_2$  膜剥落或电阻率漂移，从而缩短元件寿命。测试使用寿命与应力耦合关系旨在量化应力对  $\text{MoSi}_2$  元件耐久性的影响，为优化设计（如形状、支架）和运行参数（如升降温速率）提供依据，适用于陶瓷烧结、玻璃加工等高温应用。

测试方法包括应力模拟和寿命测试。应力模拟采用有限元分析（FEA）评估热端-冷端过渡区的热应力分布（基于  $\text{MoSi}_2$  热膨胀系数和热导率），结合机械应力测试（三点弯曲试验，精度  $\pm 0.1 \text{ MPa}$ ）。寿命测试在氧化气氛炉中进行，温度  $1500\text{--}1800^\circ\text{C}$ ，功率密度  $15\text{--}20 \text{ W/cm}^2$ ，运行  $1000\text{--}5000$  小时，热循环条件为  $25\text{--}1500^\circ\text{C}$ 。测试样品包括 U 型、W 型  $\text{MoSi}_2$  元件（ $\Phi 6/12$  或  $\Phi 9/18$ ），部分施加表面涂层（如 SiC）。测试记录质量损失率（精密天平，精度  $\pm 0.1 \text{ mg}$ ）、裂纹密度（SEM，放大倍数  $50\text{--}200\times$ ）、 $\text{SiO}_2$  膜状态和电阻率变化（四探针法）。环境应力通过引入微量腐蚀性气体（如  $\text{SO}_2$ ）模拟，评估对寿命的影响。

测试结果表明，热应力是影响  $\text{MoSi}_2$  元件寿命的主要因素，快速升降温导致热端-冷端过渡区应力集中，增加微裂纹密度，缩短寿命。W 型元件因多热端设计分布应力较均匀，寿命优于 U 型。机械应力（如振动或安装不当）加剧裂纹扩展，降低断裂韧性，寿命减少。表面涂层显著缓解应力耦合效应，均匀涂层减少热应力引起的剥落，延长寿命。掺杂改性（如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ）提高晶界强度，降低应力敏感性。环境应力（如腐蚀性气氛）加速  $\text{SiO}_2$  膜劣化，需严格控制气氛。测试需校准热电偶（精度  $\pm 1^\circ\text{C}$ ）和夹持器，数据通过应力-寿命模型（如 Weibull 分



析）指导优化设计（如增大弯曲半径）和运行参数，确保  $\text{MoSi}_2$  元件在高温复杂应力环境下的长期可靠性。

### 5.9 开裂、弯折与端部烧蚀机理

二硅化钼加热元件在长期高温运行过程中，常出现开裂、弯折与端部烧蚀等失效现象，这些问题不仅会降低其性能稳定性，还会直接影响整套加热系统的安全运行与使用寿命。

开裂现象多数与热应力有关。当加热元件在高温环境下快速升温或冷却时，因材料内外层温度梯度较大，容易在材料内部产生不均匀的热膨胀，进而引发热应力集中。如果结构设计不合理、几何尺寸不对称或元件存在微观缺陷（如孔隙、夹杂），热应力将导致微裂纹扩展，最终形成宏观裂缝。此外，氧化过程中形成的硅氧化膜若厚度不均，也可能因应力差异诱发开裂，尤其在高温骤冷或停机冷却时更为明显。

弯折则多发生在使用过程中的悬挂、支撑结构不稳，或因重力、外部机械力作用导致材料在高温下发生塑性变形。虽然  $\text{MoSi}_2$  本身为脆性陶瓷，塑性较小，但在高温条件下（超过  $1500^\circ\text{C}$ ）其结构会发生一定程度的粘性流动，特别是薄截面、长悬臂结构在高温自重作用下易弯曲。一旦弯折形成，再次加热过程中裂纹扩展的风险也随之增加。

端部烧蚀是二硅化钼加热元件常见的局部失效现象，主要集中于与电极连接或高电流密度集中的区域。该部位常因接触电阻过高、电弧击穿、热积聚或局部空气循环不足而出现严重氧化或蒸发现象。在高温高电流条件下， $\text{MoSi}_2$  表面可能形成局部过热点，导致硅挥发加剧、保护膜结构破坏，从而形成烧蚀坑或蚀蚀空洞。此外，若端部未正确处理，如氧化膜去除不充分、焊接质量不佳或接触面积不足，也会加速烧蚀过程。

为延缓或避免上述失效，需从结构设计、安装工艺、电气控制和使用环境等方面加以优化。例如，采用合理支撑方式减小热应力集中，控制升温速率降低热冲击风险，改善端部导电接触结构减少接触电阻，同时保证氧化膜的完整性，均可有效延长元件使用寿命。

### 5.10 微观结构分析与失效模式研究

微观结构分析是理解二硅化钼加热元件失效机理的核心手段，能从材料本体层面揭示其在高温环境中发生物理、化学及力学变化的本质原因。通过对工作前后元件的横截面、表层和内部组织进行微观观察，可识别晶粒结构、相界变化、氧化膜生长行为及潜在的微裂纹分布。

$\text{MoSi}_2$  材料在高温氧化环境下，表层会形成一层致密的  $\text{SiO}_2$  保护膜，该膜与基体之间存在清晰界面。若在长期使用过程中发生高温振荡或化学腐蚀，可能导致界面剥离或形成多孔氧化层，影响保护性能。此外，显微分析常揭示  $\text{MoSi}_2$  中存在少量第二相颗粒，如  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  等，它们在不同氧化程度下对整体结构稳定性也有一定影响。

失效模式研究主要围绕裂纹扩展路径、氧化层破裂机制、元素扩散趋势和相变行为等方面展开。显微分析常配合扫描电子显微镜（SEM）与能谱分析（EDS）进行，能够清晰显示出裂纹

多起源于晶界弱结合区域，或因氧化应力诱导的孔洞连接而产生宏观损伤。此外，通过分析不同使用温度、时间下形成的氧化膜厚度差异，可以推断出氧化动力学规律，从而建立材料劣化速率模型。

研究表明，大多数失效以“氧化+热应力+结构缺陷”的综合作用为主，即材料在高温氧化作用下形成保护膜，然而热循环过程中由于应力差异诱发膜层破裂，使得新的裸露表面继续氧化，产生应力集中和微裂纹扩展，最终导致材料整体结构破坏。这种循环逐步积累的模式，是典型的热腐蚀疲劳行为。

为了提高抗失效能力，未来研究可在  $\text{MoSi}_2$  基体中引入微量添加元素（如 Al、Zr 等），以提高氧化膜稳定性，或者采用双相或梯度结构设计来缓解热应力。此外，通过控制晶粒大小、优化烧结工艺和提高致密度，也能有效改善微观结构均匀性，降低缺陷率，进而提升整体抗失效能力。



中钨智造硅化钼棒

## 第六章 二硅化钼加热元件的安装

### 6.1 安装前准备工作

在安装二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件之前，需进行系统性的准备工作，以确保后续操作的顺利进行并避免因操作不当导致元件损坏或性能下降。首先，应根据加热设备的设计图纸与使用说明，核实加热元件的规格型号、电压等级、功率参数及外形尺寸是否与设备匹配。必要时应进行实物比对，防止因型号误差而影响系统运行。

其次，检查加热炉腔体结构、支撑装置、电极夹具与绝缘材料是否完好无损，尤其要确认安装位置是否清洁、无杂质堆积，并具备良好的绝缘性能。炉内必须保持干燥，避免水分对高温氧化膜形成干扰或引发短路。

在安装过程中所用的工具与辅助材料也应提前准备，包括陶瓷托架、不锈钢夹具、扭矩工具、绝缘垫片及耐高温导电材料等。操作人员需佩戴干净的绝缘手套，严禁徒手接触  $\text{MoSi}_2$  元件的发热部位，以避免油污污染影响氧化膜形成。

此外，还应对安装人员进行基本的安全培训，明确操作流程、注意事项以及元件在运输和搬运过程中所需遵守的防护措施。对于初次使用的新设备，还应执行空炉升温试验，验证电气控制系统和炉体热膨胀行为是否符合预期。

### 6.2 安装步骤详解

二硅化钼加热元件的安装应严格按照规范步骤进行，以确保其在实际运行中具有良好的电气接触、热力支撑与氧化保护能力。以下是标准化安装流程的各个关键步骤：

第一步，定位确认：依据设备图纸和元件标识，确认每根加热元件的安装位置。特别注意多根元件并联时的电极对称性与均衡性，避免负载不均导致局部过热。第二步，固定支撑：将  $\text{MoSi}_2$  加热元件置于陶瓷托架或支撑结构上，并适当调整其位置，确保发热部位与炉膛空间居中、无遮挡。支撑结构应具备一定柔性，以适应元件热膨胀时的形变，避免机械约束造成开裂。

第三步，电极连接：使用专用电极夹具将导电端牢固连接至电源引线，夹具必须压紧但不得过度施力，以防元件断裂。连接面应保持清洁，必要时可使用高温导电膏改善接触电阻。安装过程中，电极与电缆之间应通过适当绝缘材料进行隔离，防止电弧放电。第四步，检查与微调：完成所有元件连接后，检查其安装高度、水平度与平行度，确保各元件受力均匀、布置合理。特别应检查夹具是否对称均匀，以防电流分布不均。

第五步，系统测试：接通电源前，应使用万用表或绝缘测试仪检测电阻值是否在正常范围。接通电源后，先以低电压短时通电进行预热试验，观察是否有异常发热、火花、异响等现象，确认一切正常后再进行逐级升温。第六步，热运行稳定：在正式投产前建议进行一次完整的



升温—保温—冷却循环，用于验证元件工作状态的稳定性及设备的热分布均匀性。发现异常现象时应立即停机检查，避免对元件造成不可逆损伤。

通过规范的安装步骤，可有效降低二硅化钼加热元件在早期运行中的失效率，确保其长期稳定工作、延长使用寿命，并为高温设备的安全高效运行奠定良好基础。

### 6.3 安装注意事项

在二硅化钼加热元件安装过程中，应特别注意一系列关键细节，以避免因操作失误而导致元件损坏、炉体异常或系统运行不稳定。首先，加热元件为脆性陶瓷材料，在搬运和安装中应轻拿轻放，严禁受到碰撞、弯折或重力冲击。尤其在拧紧电极夹具时，不得使用过大扭矩，以防局部应力集中造成元件裂纹。

其次，必须保持元件表面洁净，尤其是发热部位，严禁接触油脂、水分或杂质，以免影响其高温氧化行为。操作人员需佩戴干净的绝缘手套，确保在整个安装过程中不会人为污染元件表面。

再者，电极与导线的连接应确保接触良好、夹持均匀，避免因接触电阻过大而导致端部烧蚀或温度异常。同时，元件之间的间距应保持一致，避免因热场不均或电流偏差造成部分元件过载烧毁。

此外，应特别注意安装环境的温湿度与洁净度，炉膛内部应无尘无水，若为潮湿环境，需进行充分干燥处理，避免高温运行时因水汽引发击穿或绝缘损坏。

### 6.4 安全操作规范

为确保二硅化钼加热元件系统运行安全、稳定，操作人员必须严格遵守以下安全规范：

在通电前，必须确认所有接线正确无误，绝缘状态良好，控制系统功能正常。操作设备时需穿戴绝缘手套、护目镜及防护服，严禁裸手触碰高温部件或带电结构。

元件升温过程中应遵循缓慢升温原则，避免骤然通电导致热冲击。尤其在首次使用或长期停用后重新启动时，应采用阶梯式升温方式让元件逐步适应热环境。

运行过程中严禁擅自打开炉门或触摸元件表面，需在断电并充分冷却后进行检修或观察。若发现异常（如火花、电弧、异响、局部发红等），应立即停电检查，严禁强行运行。

在更换元件或电极夹具时，应先切断主电源并确认残留电压释放，确保操作环境处于完全安全状态。

定期检查电气接线是否松动，夹具是否老化，炉膛是否积碳或积尘，是保障长期安全运行的重要措施。

## 6.5 常见故障与维护指南

在使用过程中，二硅化钼加热元件可能出现以下几类典型故障，维护人员应具备基本判断与处理能力：

**端部烧蚀：**通常表现为电极连接处局部熔蚀或发黑。可能原因包括接触电阻过高、电弧放电或电缆松动。应检查夹具是否压紧，接触面是否干净，并适当更换烧损部件。

**表面裂纹：**多数因热冲击或机械应力造成。维护建议包括调整升温速度、优化支撑结构并定期检查元件是否存在微裂。

**发热不均：**可能由元件间距不一致、电源分布不均或个别元件性能退化引起。应重新布置加热区并检测每组元件的电阻值。

**元件断裂：**常由搬运不当、安装用力不均或长时间过载引起。应审查操作记录，排查外力干扰并更换新元件。

**启动失败：**如系统无法正常升温，可能为电路故障、电源控制模块异常或元件损坏。应逐一检查电源输入、电极接触和控制输出。

为延长元件使用寿命，建议每周例行巡检一次，内容包括电极连接是否牢固、炉膛内部是否干净、升温是否正常。对于高频率运行的设备，应每季度进行全面维护，并记录运行参数用于长期趋势分析。

### 6.5.1 加热元件断裂的原因及其解决方法

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件的断裂是高温运行中的常见失效模式，直接影响设备运行稳定性和生产效率。断裂主要由热应力、机械应力、材料缺陷和运行条件不当等因素引起。 $\text{MoSi}_2$ 作为金属间化合物，具有高硬度但断裂韧性较低（约  $2\text{--}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ），在复杂应力下易产生微裂纹并扩展，导致断裂。分析断裂原因并采取针对性解决方法可显著提高元件寿命，适用于陶瓷烧结、玻璃熔融等高温工艺。

**断裂原因：**热应力集中：快速升降温导致热端-冷端过渡区温度梯度过大，热膨胀系数（约  $8.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）差异引发高热应力，诱发裂纹。频繁热循环加剧微裂纹扩展。机械应力：安装不当或运行中振动导致机械应力集中，尤其在U型或W型元件的弯曲处。材料缺陷：制造过程中的孔隙（致密度 $<98\%$ ）、晶界杂质（如Fe、Al）或晶粒尺寸不均降低断裂韧性，裂纹易沿缺陷扩展。运行条件不当：功率密度过高导致局部过热， $400\text{--}700^\circ\text{C}$ “瘟病”温度范围停留过久生成非保护性氧化物（如 $\text{MoO}_3$ ），削弱材料强度。

**解决方法：**优化升降温速率：控制升降温速率在  $5\text{--}10^\circ\text{C}/\text{min}$ ，快速通过  $400\text{--}700^\circ\text{C}$ ，减少热应力。采用比例控制电源（电压  $20\text{--}100 \text{ V}$ ）实现平滑温度曲线，降低热端-冷端过渡区应力集中。改进安装设计：使用高纯氧化铝支架匹配 $\text{MoSi}_2$ 特性，减少机械应力。夹持器松紧适

度，避免过紧或振动。W 型元件因多热端设计应力分布更均匀，优先用于大型炉。提高材料质量：采用热压烧结（致密度 $\geq 98\%$ ）和掺杂改性（如  $Y_2O_3$ ，0.1-1 wt%）优化晶界强度，控制晶粒尺寸，减少孔隙和杂质。表面抛光降低裂纹萌生点。规范运行条件：保持功率密度 15-20 W/cm<sup>2</sup>，控制氧化气氛，避免还原或高湿环境破坏  $SiO_2$  膜。定期校准热电偶（精度 $\pm 1^\circ C$ ）和电源系统，防止局部过热。表面涂层：施加  $SiC$  或  $Al_2O_3$  涂层提高抗热震性和强度，减少裂纹扩展。CVD 涂层因附着力高（划痕试验临界载荷 $>3$  kg）效果更佳。

**实施建议：**断裂失效分析需结合 SEM（放大倍数 50-200 $\times$ ）观察裂纹形貌和 XRD 分析相组成，确定断裂起因。运行中记录热循环次数和功率变化，建立寿命预测模型。优化设计和运行参数可将断裂风险降低 30-50%，延长  $MoSi_2$  元件寿命至 5000 小时以上。

### 6.5.2 氧化层剥落的原因与再生处理

$MoSi_2$  加热元件的  $SiO_2$  保护膜是其在氧化气氛下抗氧化的关键，剥落会导致基体暴露，加速氧化劣化，显著缩短使用寿命。氧化层剥落主要由热应力、涂层缺陷、运行环境和长期老化引起。测试和再生处理氧化层剥落问题可有效恢复元件性能，适用于半导体制造、陶瓷烧结等高温氧化环境。

**剥落原因：**热应力驱动：快速升降温或频繁热循环导致  $SiO_2$  膜与  $MoSi_2$  基体热膨胀系数差异产生高剪切应力，引发膜层开裂或剥落。涂层缺陷：表面涂层厚度不均或附着力不足（划痕试验临界载荷 $<2$  kg）导致局部剥落，破坏  $SiO_2$  膜完整性。制造缺陷（如孔隙或裂纹）加剧剥落风险。运行环境影响：高湿（湿度 $>70\%$ ）或腐蚀性气氛导致  $SiO_2$  膜水化或化学侵蚀，降低附着力。400-700 $^\circ C$  “瘟病”氧化生成非保护性  $MoO_3$ ，破坏膜层结构。长期老化：在 1800 $^\circ C$  接近  $MoSi_2$  使用极限时，Si 挥发导致  $SiO_2$  膜变薄，长期运行后膜层龟裂或剥落。

**再生处理方法：**清洁表面：停炉后使用软刷或压缩空气清除剥落区域的松散氧化物，必要时用稀酸溶液（pH 4-5）轻洗并彻底干燥，避免残留腐蚀性物质。高温再生：在氧化气氛下运行 1500-1600 $^\circ C$ ，持续 2-4 小时，促进  $SiO_2$  膜重新生成。快速通过 400-700 $^\circ C$ ，避免“瘟病”氧化。补涂涂层：对剥落严重区域采用等离子喷涂或 CVD 技术补涂  $SiC$  或  $Al_2O_3$ ，确保厚度均匀。CVD 涂层因致密度更高适合高要求场景。优化运行参数：降低升降温速率至 5-10 $^\circ C/min$ ，控制功率密度 15-20 W/cm<sup>2</sup>，避免局部过热。使用比例控制电源和精确热电偶（精度 $\pm 1^\circ C$ ）维持稳定热场。改进环境控制：保持炉内氧化气氛，严格控制湿度和腐蚀性气体含量。定期检查炉膛密封性，防止湿气或污染物进入。

**实施建议：**剥落分析需通过 SEM 观察膜层形貌和 EDS 分析化学组成，确定剥落机制。再生处理后测试电阻率和质量损失率（精密天平，精度 $\pm 0.1$  mg），验证  $SiO_2$  膜恢复效果。

### 6.5.3 加热元件日常的保养方法

$MoSi_2$  加热元件的日常保养是延长使用寿命、确保运行稳定性和降低维护成本的关键。保养重点包括保持  $SiO_2$  膜完整性、防止应力损伤和维持炉内洁净环境，适用于陶瓷、玻璃、半导体等高温应用。规范的保养方法可减少断裂、氧化层剥落和电阻率漂移等失效风险。



**保养方法：**定期检查表面状态：每 500-1000 小时运行后停炉检查 MoSi<sub>2</sub>元件表面（热端和冷端），使用光学显微镜观察 SiO<sub>2</sub>膜完整性、裂纹或剥落迹象。轻刷清除松散灰尘，记录异常区域以评估寿命。清洁炉膛：每月或每 100 次热循环后清理炉膛，使用压缩空气或软刷去除氧化物、金属杂质（如 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）或挥发性沉积物（如碱金属化合物），防止污染 SiO<sub>2</sub>膜或引发腐蚀。控制运行条件：保持氧化气氛，快速通过 400-700℃，避免“瘟病”氧化。监控功率密度和冷端温度，防止过热或电阻率漂移。检查电气连接：每 1000 小时检查夹持器和电源连接，清除氧化物或碳化物沉积，确保接触良好。校准比例控制电源和热电偶（精度±1℃），避免电压波动或控温偏差。维护支架和安装：检查高纯氧化铝支架，确保无裂纹或变形，保持与 MoSi<sub>2</sub>热膨胀匹配。调整夹持器松紧，防止机械应力集中，定期润滑连接件（使用高温润滑剂）。记录运行数据：建立运行日志，记录热循环次数、温度曲线、功率密度和电阻率变化（四探针法测量）。通过数据分析预测寿命（如 Weibull 模型），提前更换老化元件。表面涂层保护：若使用 SiC 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层，定期检查涂层完整性，必要时补涂（CVD 或等离子喷涂）。避免机械刮擦或化学腐蚀（如酸性清洁剂）损伤涂层。

**实施建议：**制定保养计划，培训操作人员规范执行。使用 SEM 和 EDS 分析失效样品，优化保养策略。严格控制炉内气氛和洁净度，结合热场模拟优化元件布局，可将维护成本降低 20-30%，确保 MoSi<sub>2</sub>元件在 1500℃下稳定运行 5000 小时以上。保养需注意安全，停炉后待温度降至室温，断开电源，避免触电或烫伤。

#### 6.5.4 加热元件更换与回收再利用技术

加热元件的更换是保障二硅化钼加热系统稳定运行的关键环节。随着使用时间的增长，元件会因热疲劳、氧化损伤或机械破坏等因素导致性能衰减甚至断裂，必须及时更换以防止设备故障和生产中断。更换过程中，应严格按照操作规程执行，确保安全与安装质量。

更换前，首先需断开炉体电源，待元件冷却至安全温度，避免烫伤和热应力引发二次损伤。拆卸时避免强力拉扯和碰撞，轻柔分离元件与电极夹具，防止对周边结构造成损坏。拆卸下来的旧元件应进行分类保存，以便后续回收和再利用。

回收再利用技术在二硅化钼加热元件的应用中具有重要意义。二硅化钼材料本身价值较高，回收不仅节约成本，还符合绿色环保理念。常见的回收流程包括旧元件的收集、机械破碎、化学处理和材料提纯。通过去除氧化层和杂质，提取高纯度的钼和硅元素，用于重新制备新的加热元件或其他钼基材料。

此外，部分轻度氧化和未损坏的元件，在经过表面清理和氧化层再生处理后，仍可继续使用，延长其寿命。先进的回收技术还包括真空还原、热等静压成型等工艺，以最大限度恢复材料性能。企业应建立完善的回收体系，配备专门设备和技术人员，确保回收过程安全高效。

#### 6.6 工业炉窑中的典型安装方式

二硅化钼加热元件在工业炉窑中的安装方式多样，通常根据炉型结构、工艺要求和元件规格进行设计，力求实现加热均匀、高效及便于维护的目标。以下为几种典型安装方式：

##### 版权与法律责任声明

**悬挂式安装：**此类安装常见于气氛保护炉和真空炉中。加热元件悬挂在炉膛顶部或两侧，借助绝缘支架固定，确保元件自由膨胀，避免与炉壁或其他元件接触。该方式便于元件更换和维护，适用于需要快速更换元件的工况。

**嵌入式安装：**将加热元件直接嵌入炉体耐火材料或陶瓷支架中，形成稳定的支撑结构。这种方式安装稳固，受机械冲击小，适合高温连续运行的工业炉。缺点是更换较为复杂，需要拆卸部分耐火材料。

**支架固定式安装：**利用专用的金属或陶瓷支架将加热元件固定于炉膛内不同位置，如底部、侧壁或顶端。支架设计需兼顾热膨胀和绝缘性能，确保元件受力均匀。该方式适合较大型工业炉，能够实现精确布局，优化热场分布。

**平铺式安装：**将元件平铺于加热区域，如加热板面或平台上，常用于平板炉和退火炉。平铺安装可以提供均匀的热分布，但要求元件有良好的平整度和支撑，以防弯曲变形。

**盘绕式安装：**将加热元件以螺旋或盘绕形式布置，适用于圆筒形或立式炉窑。这种方式可以节省空间，增加加热面积，同时便于调整功率密度。

在实际应用中，常常结合多种安装方式，满足复杂工艺的需求。设计时需充分考虑元件的热膨胀特性、电气绝缘要求、安装和拆卸的便捷性，以及环境因素如气氛类型和温度梯度。此外，安装过程中应确保加热元件与电源连接牢固，绝缘良好，避免漏电和局部过热。定期对安装状态进行检查，及时调整支架和夹具，保证炉内热场均匀稳定，从而提升加热效率和元件使用寿命。



中钨智造硅化钨棒

中钨智造科技有限公司  
二硅化钼加热元件产品介绍

一、二硅化钼加热元件概述

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件是一种具有优异高温性能的陶瓷电热材料，广泛应用于工业炉窑领域。该材料在高温氧化气氛中能够形成致密的二氧化硅（ $\text{SiO}_2$ ）保护层，有效防止进一步氧化，具备出色的抗氧化能力和热稳定性。其可在高温下长时间稳定工作，是多种高温热处理工艺的理想选择。

二、二硅化钼加热元件特性

**低膨胀系数：**与常见的陶瓷基体材料匹配较好，减少了热应力引起的开裂风险。  
**优异的抗氧化性能：**表面形成致密的  $\text{SiO}_2$  保护膜，有效防止材料氧化损耗。  
**极高的工作温度：**可持续工作温度可达  $1700^\circ\text{C}$ ，最高可使用至  $1800^\circ\text{C}$ （氧化气氛中）。  
**良好的高温电阻特性：**在高温下， $\text{MoSi}_2$  的电阻率表现相对稳定，高温段电阻率增幅缓慢。

三、二硅化钼加热元件规格

二硅化钼加热元件有直型棒、U 型棒、W 型棒等类型，典型规格型号参考如下：

| 型号 (d1/d2) | 热端直径 d1 | 冷端直径 d2 | 热端长度 Le     | 冷端长度 Lu    | 常见类型           |
|------------|---------|---------|-------------|------------|----------------|
| φ3/6       | 3 mm    | 6 mm    | 100–300 mm  | 150–250 mm | 直棒 / U 型       |
| φ4/9       | 4 mm    | 9 mm    | 100–500 mm  | 200–300 mm | 直棒 / U 型       |
| φ6/12      | 6 mm    | 12 mm   | 100–600 mm  | 200–350 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ9/18      | 9 mm    | 18 mm   | 150–800 mm  | 250–400 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ12/24     | 12 mm   | 24 mm   | 200–1000 mm | 300–500 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |

四、二硅化钼加热元件典型应用

陶瓷、粉末冶金等行业的高温烧结炉  
钢铁、有色金属热处理设备  
实验室高温电炉  
玻璃熔融与加工设备  
半导体、光伏行业的扩散、退火及氧化工艺

五、采购信息

邮箱：[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129595; 592 5129696

更多硅钼棒资讯，请访问中钨在线网站（[www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)）。

更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与法律责任声明

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

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



## 第七章 二硅化钼加热元件的测试标准与认证

### 7.1 加热元件性能测试方法

二硅化钼加热元件的性能测试是确保其质量和可靠性的重要环节，涵盖了多个关键指标的测定，包括电性能、机械性能、热性能以及耐久性等方面。首先，电性能测试主要涉及元件的电阻值及其温度系数的测定。通过精密电阻测量仪器，在不同温度环境下测试元件的电阻变化，评估其电性能的稳定性和一致性。电阻的均匀性和线性变化对于加热元件的设计和使用至关重要。

机械性能测试主要包括硬度测试和弯曲试验。硬度测试通常采用维氏或洛氏硬度计，测量元件在加热和冷却条件下的硬度变化，反映其材料的机械强度和耐磨性。弯曲试验通过施加一定的机械应力，观察元件的弹性变形能力和断裂点，评估其抵抗机械损伤的能力。

热性能测试包括热膨胀系数的测定和热稳定性测试。热膨胀系数的测试采用热膨胀仪，测量元件在升温过程中长度的变化，确保设计时预留足够的热膨胀空间，避免热应力引发破损。热稳定性测试则通过高温持续加热实验，观察元件的电阻、形态和结构变化，评估其在高温环境下的长期稳定性。

此外，抗氧化性测试是评价二硅化钼加热元件使用寿命的重要指标。通过在模拟氧化环境中进行长时间加热实验，检测氧化膜的形成、厚度和剥落情况，确定元件的抗氧化能力。失效模式分析则结合断裂分析和微观结构检测，帮助找出加热元件潜在的弱点和失效机理。

这些测试方法相辅相成，全面反映二硅化钼加热元件的性能水平，为生产和应用提供科学依据和技术保障。

### 7.2 ISO、ASTM 等标准解析

国际标准化组织（ISO）和美国材料与试验协会（ASTM）制定了多项针对加热元件及相关材料的标准，涵盖产品质量、测试方法、安全规范等方面，对保障二硅化钼加热元件的质量和性能起到关键作用。

ISO 标准方面，涉及二硅化钼加热元件的主要标准包括材料成分分析、尺寸公差、机械性能测试和环境适应性测试等。例如，ISO 9001 质量管理体系标准确保生产过程中质量控制的系统性和持续改进。ISO 22007 系列涉及材料的热膨胀测试方法，为设计和使用提供参考。针对电子陶瓷和耐高温材料的 ISO 标准则涵盖电性能和热性能的评估。

ASTM 标准在材料测试领域历史悠久且应用广泛。ASTM E1131 标准规定了材料热分析的通用程序，适用于测定二硅化钼元件的热稳定性和相变行为。ASTM E384 标准涉及微硬度测试方法，广泛应用于硬度评估。ASTM E1820 则为断裂韧性测试提供指导，帮助分析元件的断裂行为。还有 ASTM B193 等针对金属材料电阻率测量的标准，保证电性能测试的准确性。此外，针对工业炉窑用加热元件的安全规范和性能要求，ISO 和 ASTM 均有相应的指南，如电

气安全标准 IEC 60519 系列，涵盖高温电加热设备的设计和运行安全。这些标准对于制造商设计符合国际市场要求的二硅化钼加热元件具有重要指导意义。

在实际应用中，企业常结合 ISO 和 ASTM 标准，制定内部检测流程，确保产品既满足国际标准又符合客户特定需求。对检测设备的校准和操作人员的资质认证，也通常参照相关标准执行，以提升检测结果的可靠性和权威性。

### 7.3 环境适应性测试

环境适应性测试是评估二硅化钼加热元件在各种工作环境中能否稳定运行的关键环节。此类测试主要模拟加热元件在不同温度、湿度、气氛成分以及机械振动等条件下的性能表现。首先，高温循环测试通过反复升温 and 降温，检测元件因热胀冷缩产生的热应力对材料结构和性能的影响，验证其抗热疲劳能力。湿热环境测试则模拟高湿度条件下的使用情况，观察元件表面氧化层的稳定性以及电性能是否受到影响，确保加热元件在潮湿环境中不会出现绝缘失效或腐蚀加剧。此外，气氛适应性测试着重模拟加热元件在氧化性、还原性或惰性气氛中的行为。通过控制炉内气氛成分，考察加热元件在不同气氛下的氧化速度和抗氧化性能，确保其在复杂工况中保持良好的使用寿命。机械振动和冲击测试则检验元件及其安装结构在运输和运行过程中是否能够抵抗振动导致的机械损伤。

环境适应性测试能够全方位反映加热元件在实际应用中的可靠性，为选材、设计及维护提供科学依据，降低因环境因素引发的故障风险。

### 7.4 失效模式与寿命预估方法

失效模式分析是理解二硅化钼加热元件损坏机制、延长使用寿命的基础。常见失效模式包括热疲劳开裂、氧化层剥落、机械应力导致的断裂及局部烧蚀等。通过对失效元件的宏观观察与微观结构分析，可以揭示裂纹产生的起始位置和扩展路径，评估失效前的材料变化，如晶粒粗大、孔隙增多和氧化层厚度异常等。

寿命预估通常采用加速寿命试验结合理论模型。加速试验通过提升工作温度、增加热循环次数或加大机械载荷，快速复制元件长期使用中可能遭遇的损伤过程，收集失效数据。利用这些数据，结合断裂力学、热力学及材料科学的相关理论，建立数学模型预测加热元件在正常工况下的使用寿命。常用模型包括 Arrhenius 热激活模型、Coffin-Manson 疲劳模型等。此外，基于失效数据的统计分析，如威布尔分布 (Weibull distribution)，有助于评估产品的可靠性和寿命分布特性。通过寿命预估，生产厂家可优化元件设计和材料选择，同时为用户提供合理的维护和更换周期建议，降低故障率和运营成本。

### 7.5 安全与电气规范要求

安全和电气规范是确保二硅化钼加热元件及其系统安全稳定运行的基础。加热元件工作时温度极高，且涉及高电流通断，必须严格遵守相关电气安全标准以防触电、短路和火灾等事故。

一般要求加热元件的绝缘电阻达到规定值，并在使用过程中定期检测其绝缘状况，防止绝缘老化导致漏电。

电气连接部分应采用符合国家或国际标准的端子、绝缘材料及连接工艺，确保接触良好且具备足够的机械强度和耐热性能。接地系统设计合理，有效降低触电风险。对电源系统应配置过载保护、漏电保护和短路保护装置，以便在异常情况下及时切断电源，保障人员和设备安全。此外，安装和维护人员需遵守安全操作规程，配备必要的防护设备。高温作业区域应设立警示标志和隔离设施，防止误触及烫伤。相关设备和元件的安全认证，如 CE 认证、UL 认证等，也为市场准入和安全保障提供支持。



中钨智造硅化钼棒



## 第八章 二硅化钼加热元件的应用

### 8.1 二硅化钼加热元件在冶金行业中的应用

二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 加热元件因其优异的高温性能、良好的抗氧化性和稳定的电热特性，在冶金行业中广泛应用于金属熔炼、热处理和高温烧结工艺。 $\text{MoSi}_2$  的热导率、热膨胀系数和正温度系数电阻率使其能够提供高效、均匀的加热，满足冶金行业对高温、精密控温和长寿命的需求。 $\text{MoSi}_2$  元件在氧化气氛下通过表面形成的  $\text{SiO}_2$  保护膜实现优异的抗氧化性，适合冶金炉长时间运行。常见的  $\text{MoSi}_2$  元件结构（如 U 型、W 型、 $\Phi 6/12$  或  $\Phi 9/18$ ）可根据炉型和工艺需求定制，广泛用于金属熔炼炉、热处理炉和烧结炉。 $\text{MoSi}_2$  元件的应用优化需避免 400–700℃ 的“瘟病”温度范围，快速升降温以减少非保护性氧化物 ( $\text{MoO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  混合物) 生成，同时结合表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）提升抗热震性和寿命。

在冶金行业中， $\text{MoSi}_2$  加热元件的优势包括高功率密度、稳定的温度控制和较长的使用寿命。其设计灵活性支持多种炉型，如箱式炉、隧道炉和真空炉，满足不同金属材料的加工需求。安装时需采用高纯氧化铝支架以匹配  $\text{MoSi}_2$  的热膨胀特性，减少机械应力。电气连接需使用低电阻夹持器并配备比例控制电源，确保运行稳定性。 $\text{MoSi}_2$  元件的应用还需考虑气氛控制，避免还原或高湿环境导致  $\text{SiO}_2$  膜失效。

#### 8.1.1 金属熔炼与热处理

$\text{MoSi}_2$  加热元件在金属熔炼与热处理中的应用主要集中于高温熔炼炉、退火炉和淬火炉，用于加工铝、铜、钢、钛合金等金属材料。金属熔炼要求炉膛温度精确控制在 1000–1600℃， $\text{MoSi}_2$  元件的正温度系数电阻率使其能够自适应调节功率，提供稳定的高温环境。U 型和 W 型  $\text{MoSi}_2$  元件常用于中小型熔炼炉，热端长度 100–500 mm，功率密度 15–20 W/cm<sup>2</sup>，能够快速达到熔点（如铝 660℃、铜 1085℃）并维持均匀温度场。在热处理工艺中，如退火和淬火， $\text{MoSi}_2$  元件提供 1200–1500℃ 的稳定加热，确保金属晶粒细化和性能优化。例如，钢的退火处理需在 1200–1300℃ 下保温， $\text{MoSi}_2$  元件的热导率和抗热震性支持快速升温 and 热循环。

$\text{MoSi}_2$  元件在金属熔炼与热处理中的优势包括高抗氧化性和长寿命。在氧化气氛下， $\text{SiO}_2$  保护膜有效防止材料劣化，1500℃ 下质量损失率 < 0.2 mg/cm<sup>2</sup> / 1000h。表面涂层可进一步提高抗热震性和抗腐蚀性，适合含微量硫或碳的冶金气氛。安装时，U 型元件采用垂直悬挂，W 型元件适合大型炉均匀加热，冷端通过铝化涂层增强导电性。运行中需避免快速通过 400–700℃ 以防止“瘟病”氧化，升降温速率控制在 5–10℃/min。维护包括定期检查  $\text{SiO}_2$  膜完整性和冷端连接状态，清洁炉膛杂质（如氧化铁）以避免污染。 $\text{MoSi}_2$  元件的局限性在于还原或真空环境下需降低使用温度，以防止  $\text{SiO}_2$  膜失效。实际应用中，结合热场模拟优化元件布局，可显著提高金属熔炼和热处理的效率和质量。

#### 8.1.2 高温烧结工艺

$\text{MoSi}_2$  加热元件在高温烧结工艺中的应用主要涉及金属粉末冶金、陶瓷复合材料和特种合金的烧结，常见于生产高性能钢、钛基合金和硬质合金。烧结工艺要求温度精确控制在 1300–

1800℃，以促进材料致密化和晶粒生长，MoSi<sub>2</sub>元件的高功率密度和稳定的温度控制使其成为理想选择。W型和直棒型 MoSi<sub>2</sub>元件常用于大型烧结炉，提供均匀的热场，适合大尺寸工件。螺旋型元件（热端直径 4-9 mm）适用于小型管式炉，满足高精度烧结需求。MoSi<sub>2</sub>的热导率和正温度系数电阻率确保烧结过程中的热量分布均匀，减少工件变形和裂纹。

在高温烧结中，MoSi<sub>2</sub>元件的抗氧化性是关键优势。SiO<sub>2</sub>保护膜在 1500-1800℃下保持稳定（厚度 10-15 μm），质量损失率<0.5 mg/cm<sup>2</sup>/1000h，支持长时间运行。掺杂改性（如 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，0.1-1 wt%）增强晶界强度，表面涂层（如 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，厚度 10-50 μm）提高抗热震性和抗腐蚀性，适合含微量挥发性杂质的烧结气氛。安装时，W型元件采用水平支撑或垂直悬挂，高纯氧化铝支架减少热应力。电气连接使用铜夹持器，配合比例控制电源确保稳定性。运行中需快速通过 400-700℃，避免非保护性氧化物生成，升降温速率 5-10℃/min 以降低热应力（MoSi<sub>2</sub>断裂韧性约 2-3 MPa·m<sup>1/2</sup>）。

MoSi<sub>2</sub>元件在高温烧结中的挑战包括对气氛敏感性和维护需求。含硫或碳的烧结气氛可能腐蚀 SiO<sub>2</sub>膜，需严格控制氧气分压和湿度。定期检查元件表面（SEM 观察膜层）和冷端温度，清洁炉膛杂质（如金属氧化物），可延长寿命。热场优化（如有限元模拟）确保温度均匀性，减少烧结工件的缺陷。MoSi<sub>2</sub>元件的高性能使其在高温烧结工艺中广泛应用于生产航空航天部件、切削工具和耐磨材料，提升产品质量和生产效率。

### 8.1.3 热处理设备

MoSi<sub>2</sub>加热元件在冶金行业的热处理设备中应用广泛，涵盖退火炉、淬火炉、正火炉和回火炉，用于改善金属材料的力学性能、耐腐蚀性和加工性能。热处理设备要求精确控制温度和均匀的热场，以确保金属晶粒结构的优化和应力消除。MoSi<sub>2</sub>元件的正温度系数电阻率使其能够在 1200-1500℃范围内提供稳定的加热，适合处理钢、铝合金、铜合金和钛合金等材料。U型 MoSi<sub>2</sub>元件适用于小型热处理炉，热端长度 100-500 mm，提供集中加热，适合小批量生产。W型和直棒型元件适用于大型连续式热处理炉，热端长度 200-1000 mm，能够覆盖大面积加热区域，确保温度均匀性。

MoSi<sub>2</sub>元件在热处理设备中的优势在于其高抗氧化性和支持频繁热循环的能力。在氧化气氛下，SiO<sub>2</sub>保护膜确保元件长期稳定性，适合热处理工艺中的长时间保温和快速升降温。表面涂层（如 SiC 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）增强抗热震性和抗腐蚀性，适合复杂冶金气氛。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，垂直悬挂或水平支撑减少机械应力。电气连接采用低电阻夹持器，配合比例控制电源确保精确控温。运行中需快速通过 400-700℃以避免“瘟病”氧化，升降温速率控制在 5-10℃/min。维护包括定期检查 SiO<sub>2</sub>膜、冷端连接和炉膛清洁，防止杂质污染。MoSi<sub>2</sub>元件的局限性在于还原气氛下需降低使用温度，需严格控制炉内气氛。热场优化和定期维护确保热处理设备的高效率和产品质量，广泛应用于汽车、航空航天和机械制造领域。

## 8.2 二硅化钼加热元件在陶瓷行业中的应用

MoSi<sub>2</sub>加热元件在陶瓷行业中广泛应用于陶瓷烧制、釉化处理和特种陶瓷材料制备，其高使用温度、抗氧化性和电热稳定性满足陶瓷工艺对高温和精确控温的需求。MoSi<sub>2</sub>元件通过表

面  $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛中保持稳定性, 适合陶瓷烧制炉、釉烧炉和特种陶瓷烧结炉。U 型、W 型和螺旋型  $\text{MoSi}_2$  元件根据炉型定制, U 型适合小型箱式炉, W 型适合大型隧道炉, 螺旋型适合管式炉高精度烧结。安装采用高纯氧化铝支架, 电气连接使用低电阻夹持器, 配合比例控制电源实现精确控温。运行需快速通过  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  以避免“瘟病”氧化, 升降温速率  $5\text{--}10^\circ\text{C}/\text{min}$ , 表面涂层提升抗热震性和寿命。 $\text{MoSi}_2$  元件在陶瓷行业中的应用显著提高烧制质量和生产效率, 满足传统陶瓷和先进陶瓷的需求。

### 8.2.1 陶瓷烧制与釉化处理

$\text{MoSi}_2$  加热元件在陶瓷烧制与釉化处理中应用于箱式炉、梭式炉和隧道炉, 用于生产日用陶瓷、建筑陶瓷和艺术陶瓷。陶瓷烧制需在  $1000\text{--}1400^\circ\text{C}$  下进行坯体烧结和釉料熔融,  $\text{MoSi}_2$  元件的正温度系数电阻率提供稳定的高温环境, 确保陶瓷坯体致密化和釉面光泽。U 型  $\text{MoSi}_2$  元件适合小型炉, W 型元件适合大型连续烧制炉, 提供均匀热场, 减少陶瓷开裂和变形。釉化处理要求精确控温以控制釉料熔融和结晶,  $\text{MoSi}_2$  元件的热导率支持快速升温 and 保温。 $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下保持稳定, 表面涂层增强抗热震性和抗腐蚀性, 适合含挥发性釉料的烧制气氛。安装和运行需控制气氛和升降温速率, 维护包括定期检查元件表面和炉膛清洁。 $\text{MoSi}_2$  元件提高陶瓷烧制和釉化处理的效率和产品质量, 广泛应用于陶瓷生产。

### 8.2.2 特种陶瓷材料制备

$\text{MoSi}_2$  加热元件在特种陶瓷材料制备中应用于烧结炉和热压炉, 用于生产氧化铝、氧化锆、氮化硅和碳化硅等先进陶瓷, 广泛用于航空航天、电子和医疗领域。特种陶瓷烧结需在  $1400\text{--}1800^\circ\text{C}$  下进行以实现高致密度和优异性能,  $\text{MoSi}_2$  元件的高功率密度和精确控温能力满足这些要求。W 型和螺旋型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于大型和小型烧结炉, 提供均匀热场, 减少材料缺陷。 $\text{SiO}_2$  保护膜和表面涂层确保元件在高温氧化气氛下的稳定性, 掺杂改性增强抗热震性, 适合频繁热循环。安装采用高纯氧化铝支架, 电气连接确保低电阻接触, 运行控制气氛和升降温速率以避免“瘟病”氧化。维护包括定期检查元件和炉膛状态, 确保长期可靠性。

## 8.3 二硅化钼加热元件在光伏行业的应用

二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 加热元件因其高温性能、抗氧化性和电热稳定性, 在光伏行业中广泛应用于硅片制造和太阳能电池生产设备。 $\text{MoSi}_2$  元件能够提供精确控温和均匀热场, 满足光伏工艺对高温和洁净环境的需求。其在氧化气氛下通过表面形成的  $\text{SiO}_2$  保护膜实现抗氧化性, 适合长时间运行。U 型、W 型和直棒型  $\text{MoSi}_2$  元件根据炉型定制, U 型适合小型炉, W 型和直棒型适合大型连续式设备。安装采用高纯氧化铝支架以匹配热膨胀特性, 电气连接使用低电阻夹持器, 配合比例控制电源确保稳定性。运行需快速通过“瘟病”温度范围以避免非保护性氧化物生成, 表面涂层 (如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 提升抗热震性和寿命。

### 8.3.1 硅片制造高温工艺

$\text{MoSi}_2$  加热元件在硅片制造高温工艺中应用于单晶硅拉制、多晶硅铸锭和硅片退火等工序。这些工艺需高温环境以熔化硅原料、控制晶体生长或消除晶体缺陷,  $\text{MoSi}_2$  元件的正温度系



数电阻率提供稳定的加热能力。直棒型和 W 型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于大型单晶炉和铸锭炉，覆盖宽广加热区域，确保热场均匀性。U 型元件适用于小型退火炉，满足局部高温需求。 $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下保持稳定，表面涂层增强抗热震性和抗腐蚀性，适合硅片制造的洁净环境。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，电气连接确保低电阻接触。运行需控制气氛和升降温速率以避免氧化损伤，维护包括定期检查元件表面和炉膛洁净度。 $\text{MoSi}_2$  元件提高硅片制造的晶体质量和生产效率，广泛应用于光伏产业链上游。

### 8.3.2 太阳能电池生产设备

$\text{MoSi}_2$  加热元件在太阳能电池生产设备中应用于扩散炉、烧结炉和退火炉，用于制造晶硅和薄膜太阳能电池。扩散工艺需高温以掺杂磷或硼形成 PN 结，烧结工艺将金属电极与硅片结合，退火工艺优化电池性能， $\text{MoSi}_2$  元件提供精确控温和均匀热场，满足这些工序的要求。U 型和螺旋型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于小型扩散炉和退火炉，W 型元件适用于大型烧结炉，确保大面积加热的稳定性。 $\text{SiO}_2$  保护膜和表面涂层支持元件在氧化气氛下的长期运行，抗热震性适应频繁热循环。安装采用高纯氧化铝支架，电气连接使用比例控制电源以实现精确控温。运行需快速通过“瘟病”温度范围，维护包括检查  $\text{SiO}_2$  膜和清洁炉膛以避免污染。 $\text{MoSi}_2$  元件提升太阳能电池生产的效率和电池性能，广泛应用于光伏发电领域。

## 8.4 二硅化钼加热元件在半导体行业的应用

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件因其高温性能、抗氧化性和电热稳定性，在半导体行业中广泛应用于晶圆退火、扩散工艺和外延生长等高温工序。 $\text{MoSi}_2$  元件能够提供精确的温度控制和均匀的热场，满足半导体制造对洁净环境和高精度控温的需求。其在氧化气氛下通过表面形成的  $\text{SiO}_2$  保护膜实现优异的抗氧化性，适合长时间运行。U 型、W 型和螺旋型  $\text{MoSi}_2$  元件根据炉型定制，U 型和螺旋型适合小型高精度炉，W 型适合大型连续式设备。安装采用高纯氧化铝支架以匹配  $\text{MoSi}_2$  的热膨胀特性，减少机械应力。电气连接使用低电阻夹持器，配合比例控制电源确保稳定性。运行需快速通过“瘟病”温度范围以避免非保护性氧化物生成，表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）进一步提升抗热震性和使用寿命。定期检查  $\text{SiO}_2$  膜完整性和冷端连接状态，清洁炉膛以避免杂质污染，确保元件在半导体行业中的可靠性和高效性。

### 8.4.1 晶圆退火与扩散工艺

$\text{MoSi}_2$  加热元件在晶圆退火与扩散工艺中应用于快速热退火（RTA）炉、扩散炉和氧化炉，用于处理硅晶圆和其他半导体材料。晶圆退火需高温以修复晶格缺陷、激活掺杂剂或改善材料性能，扩散工艺则通过高温掺杂（如磷、硼）形成 PN 结， $\text{MoSi}_2$  元件的正温度系数电阻率提供稳定的加热能力，确保精确控温。U 型和螺旋型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于小型退火和扩散炉，适合高精度小批量生产，W 型元件适用于大型扩散炉，提供均匀热场以处理多片晶圆。 $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下保持稳定，表面涂层增强抗热震性和抗腐蚀性，适合洁净的半导体工艺环境。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，电气连接确保低电阻接触，运行需控制气氛和升降温速率以避免氧化损伤。维护包括定期检查元件表面和炉膛洁净度，防止杂质（如金属离子）污染晶圆。 $\text{MoSi}_2$  元件提高晶圆退火与扩散工艺的效率和质量，广泛应用于集成电路和功率器件制造。

#### 8.4.2 半导体外延生长

MoSi<sub>2</sub>加热元件在半导体外延生长中应用于化学气相沉积（CVD）炉和分子束外延（MBE）设备，用于生长高质量单晶薄膜，如硅、锗和化合物半导体（如 GaAs、SiC）。外延生长需在高温下精确控制热场以确保薄膜的晶体质量和均匀性，MoSi<sub>2</sub>元件的高功率密度和稳定控温能力满足这些要求。螺旋型 MoSi<sub>2</sub>元件适用于小型 CVD 炉，提供集中加热以支持高精度生长，W 型和直棒型元件适用于大型外延炉，确保大面积晶圆的热场均匀性。SiO<sub>2</sub>保护膜和表面涂层支持元件在氧化气氛或微量氧环境中长期运行，抗热震性适应频繁热循环。安装采用高纯氧化铝支架，电气连接使用比例控制电源以实现精确控温。运行需快速通过“瘟病”温度范围，维护包括检查 SiO<sub>2</sub>膜和清洁炉膛以避免污染。MoSi<sub>2</sub>元件提升外延生长的薄膜质量和生产效率，广泛应用于半导体器件制造。

#### 8.4.3 高温刻蚀设备

MoSi<sub>2</sub>加热元件在高温刻蚀设备中应用于等离子刻蚀炉和热刻蚀炉，用于半导体晶圆的图案化加工。高温刻蚀工艺需精确控制温度以优化刻蚀速率和选择性，确保微纳米级结构的精度，MoSi<sub>2</sub>元件的正温度系数电阻率和均匀热场满足这些要求。U 型和螺旋型 MoSi<sub>2</sub>元件适用于小型刻蚀炉，提供集中加热以支持高精度工艺，W 型元件适用于大型设备，确保多片晶圆的温度一致性。SiO<sub>2</sub>保护膜在氧化气氛下保持稳定，表面涂层（如 SiC 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）增强抗热震性和抗腐蚀性，适应刻蚀过程中可能存在的腐蚀性气体（如氯气或氟化物）。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，电气连接采用低电阻夹持器以确保稳定性。运行需控制气氛和升降温速率以避免氧化损伤，维护包括定期检查元件表面和炉膛洁净度，防止杂质污染晶圆。MoSi<sub>2</sub>元件提高高温刻蚀设备的加工精度和效率，广泛应用于半导体制造的微结构加工。

#### 8.4.4 真空镀膜设备

MoSi<sub>2</sub>加热元件在真空镀膜设备中应用于物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）系统，用于沉积金属、氧化物或氮化物薄膜，如 TiN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，用于半导体器件的电极或绝缘层。真空镀膜需高温以蒸发或分解前驱体材料，MoSi<sub>2</sub>元件的高功率密度和精确控温能力确保薄膜的均匀性和质量。U 型和螺旋型 MoSi<sub>2</sub>元件适用于小型真空镀膜炉，提供局部高温以支持高精度沉积，W 型和直棒型元件适用于大型设备，确保大面积基板的热场均匀性。在氧化气氛或微量氧环境中，SiO<sub>2</sub>保护膜和表面涂层支持元件长期运行，抗热震性适应快速升降温。安装采用高纯氧化铝支架，电气连接使用比例控制电源以实现稳定控温。运行需快速通过“瘟病”温度范围以避免氧化损伤，维护包括检查 SiO<sub>2</sub>膜和清洁炉膛以防止污染。MoSi<sub>2</sub>元件提升真空镀膜设备的薄膜质量和生产效率，广泛应用于半导体器件的薄膜制备。

### 8.5 二硅化钼加热元件在玻璃制造行业的应用

二硅化钼（MoSi<sub>2</sub>）加热元件因其优异的高温性能、抗氧化性和电热稳定性，在玻璃制造行业中广泛应用于玻璃熔融和玻璃加工工艺。MoSi<sub>2</sub>元件能够提供精确的温度控制和均匀的热场，满足玻璃制造对高温、长时间运行和洁净环境的需求。其在氧化气氛下通过表面形成的 SiO<sub>2</sub>保护膜实现卓越的抗氧化性，适合玻璃炉的苛刻工况。W 型、U 型和直棒型 MoSi<sub>2</sub>元件根

据炉型定制，W 型适合大型熔融炉提供均匀加热，U 型和直棒型适合中小型加工炉。安装采用高纯氧化铝支架以匹配  $\text{MoSi}_2$  的热膨胀特性，减少机械应力。电气连接使用低电阻夹持器，配合比例控制电源确保稳定性。运行需快速通过“瘟病”温度范围以避免非保护性氧化物生成，表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）进一步提升抗热震性和使用寿命。定期检查  $\text{SiO}_2$  膜完整性和冷端连接状态，清洁炉膛以避免杂质污染，确保元件在玻璃制造中的可靠性和高效性。

#### 8.5.1 玻璃熔融

$\text{MoSi}_2$  加热元件在玻璃熔融工艺中应用于大型熔融炉和小型实验炉，用于生产平板玻璃、光学玻璃和特种玻璃。玻璃熔融需高温以将原料（如硅砂、苏打灰）熔化为均匀的液态玻璃， $\text{MoSi}_2$  元件的正温度系数电阻率提供稳定的高温环境，确保熔融质量和一致性。W 型  $\text{MoSi}_2$  元件适合大型连续式熔融炉，覆盖宽广加热区域，提供均匀热场以减少玻璃中的气泡和条纹。U 型元件适用于小型熔融炉，适合特种玻璃的小批量生产。 $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下保持稳定，表面涂层增强抗热震性和抗腐蚀性，适应玻璃熔融中可能存在的挥发性成分（如硼酸盐）。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，电气连接确保低电阻接触，运行需控制气氛和升降温速率以避免氧化损伤。维护包括定期检查元件表面和炉膛洁净度，防止杂质（如碱金属氧化物）污染玻璃熔体。 $\text{MoSi}_2$  元件提高玻璃熔融的效率和产品质量，广泛应用于建筑、汽车和光学玻璃制造。

#### 8.5.2 玻璃加工

$\text{MoSi}_2$  加热元件在玻璃加工工艺中应用于退火炉、成型炉和热弯炉，用于玻璃制品的成型、退火和表面处理。玻璃加工需精确控制温度以消除内应力、塑形或增强玻璃性能， $\text{MoSi}_2$  元件的高功率密度和稳定控温能力满足这些要求。U 型和直棒型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于中小型退火和热弯炉，提供集中加热以支持复杂形状玻璃的加工，W 型元件适用于大型成型炉，确保大面积玻璃板的温度均匀性。 $\text{SiO}_2$  保护膜和表面涂层支持元件在氧化气氛下长期运行，抗热震性适应频繁热循环。安装采用高纯氧化铝支架，电气连接使用比例控制电源以实现精确控温。运行需快速通过“瘟病”温度范围，维护包括检查  $\text{SiO}_2$  膜和清洁炉膛以避免污染。 $\text{MoSi}_2$  元件提升玻璃加工的精度和效率，广泛应用于生产玻璃容器、显示器玻璃和建筑用玻璃。

### 8.6 二硅化钼加热元件在新能源材料制备中的应用

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件因其卓越的高温性能、抗氧化性和电热稳定性，在新能源材料制备领域发挥重要作用，广泛应用于锂电池材料烧结、氢能及燃料电池相关工艺等高要求场景。 $\text{MoSi}_2$  元件能够在氧化气氛下通过表面形成的  $\text{SiO}_2$  保护膜实现优异的抗氧化性，适合长时间高温运行，同时其正温度系数电阻率特性确保精确的温度控制和均匀的热场分布。这些特性使其能够满足新能源材料制备中对洁净环境、高精度控温和抗热循环性能的需求。 $\text{MoSi}_2$  元件的结构多样，如 U 型、W 型、螺旋型和直棒型，可根据不同设备需求定制，U 型和螺旋型适合小型高精度烧结炉，W 型和直棒型适合大型连续式生产设备。安装时采用高纯氧化铝支架以匹配  $\text{MoSi}_2$  的热膨胀特性，减少机械应力和热应力集中。电气连接使用低电阻夹持器，配合比例控制电源实现稳定运行。运行过程中需快速通过“瘟病”温度范围以避免非保护性氧化物生成，表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）进一步增强抗热震性和耐腐蚀性，延长元件寿命。



定期维护包括检查  $\text{SiO}_2$  膜完整性、冷端连接状态和炉膛洁净度，确保无杂质污染，满足新能源材料制备的严格要求。 $\text{MoSi}_2$  元件通过优化热场设计和运行参数，为新能源材料的性能提升和生产效率提供了可靠支持。

### 8.6.1 锂电池材料烧结

$\text{MoSi}_2$  加热元件在锂电池材料烧结工艺中广泛应用于正极、负极和固态电解质材料的制备，用于生产如钴酸锂、镍钴锰三元材料、磷酸铁锂、石墨负极及固态氧化物电解质等关键材料。锂电池材料烧结需在高温下进行以促进晶体生长、提高材料致密度和电化学性能， $\text{MoSi}_2$  元件的高功率密度和精确控温能力能够满足这些苛刻要求。U 型和螺旋型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于小型实验室烧结炉，适合开发新型电池材料或小批量生产，提供集中加热以确保工艺的高精度。W 型和直棒型元件适用于大型工业烧结炉，能够覆盖宽广加热区域，提供均匀热场以支持大规模生产。 $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下保持稳定，确保元件在烧结过程中的抗氧化性，表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）增强抗热震性和抗腐蚀性，适应烧结过程中可能存在的挥发性气体或微量腐蚀性气氛（如含锂化合物挥发物）。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，垂直悬挂或水平支撑以减少机械应力，电气连接采用低电阻夹持器，配合比例控制电源实现精确的温度调控。运行需严格控制炉内气氛，避免还原或高湿环境导致  $\text{SiO}_2$  膜失效，并快速通过“瘟病”温度范围以防止非保护性氧化物生成。维护包括定期检查元件表面状态、冷端连接和炉膛洁净度，清除可能影响材料纯度的杂质（如碱金属氧化物）。 $\text{MoSi}_2$  元件通过优化热场设计和运行参数，确保锂电池材料在烧结过程中获得优异的晶体结构和电化学性能，显著提升电池的容量、循环寿命和安全性，广泛应用于电动汽车、储能系统和消费电子领域。

### 8.6.2 氢能与燃料电池

$\text{MoSi}_2$  加热元件在氢能与燃料电池领域主要应用于固体氧化物燃料电池（SOFC）材料烧结、制氢反应器和电解槽高温部件的制备工艺，用于生产电解质、阳极、阴极材料以及高温催化剂载体。氢能和燃料电池材料制备需在高温下进行烧结或热处理以优化材料微观结构和性能， $\text{MoSi}_2$  元件的稳定高温性能和均匀热场分布能够满足这些工艺需求。螺旋型和 U 型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于小型实验炉，适合研发新型燃料电池材料或催化剂，提供局部高温以支持高精度烧结或热处理工艺。W 型和直棒型元件适用于大型工业炉，用于大规模生产 SOFC 组件或制氢设备部件，确保热场均匀性以减少材料缺陷。

$\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下提供可靠的抗氧化保护，表面涂层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{SiC}$ ）增强抗热震性和耐腐蚀性，适应燃料电池材料烧结中可能涉及的复杂气氛（如含水蒸气或微量还原性气体）。在制氢反应器或电解槽部件制备中， $\text{MoSi}_2$  元件支持高温催化剂载体的烧结或热处理，确保催化剂的高活性和稳定性。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，电气连接采用低电阻夹持器，配合比例控制电源实现精确控温，满足 SOFC 材料对严格温度曲线的要求。运行需控制炉内气氛，避免高还原性环境破坏  $\text{SiO}_2$  膜，并快速通过“瘟病”温度范围以防止氧化损伤。维护包括定期检查  $\text{SiO}_2$  膜、冷端连接和炉膛洁净度，确保无杂质污染影响材料性能。 $\text{MoSi}_2$  元件通过优化热场和工艺参数，提升燃料电池材料的电化学性能和制氢设备的效率，广泛应用于清洁能源发电、工业制氢和能源转换领域，为氢能技术的商业化发展提供重要支持。

## 8.7 二硅化钼加热元件在环保与催化领域的应用

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件凭借其优异的高温性能、抗氧化性和电热稳定性，在环保与催化领域中广泛应用于废气处理、催化剂再生和固废资源化等工艺。 $\text{MoSi}_2$ 元件能够在氧化气氛下通过表面形成的  $\text{SiO}_2$  保护膜实现卓越的抗氧化性，适合长时间高温运行，其正温度系数电阻率特性确保精确的温度控制和均匀的热场分布，满足环保与催化工艺对高温、洁净环境和抗腐蚀性的需求。U 型、W 型、螺旋型和直棒型  $\text{MoSi}_2$  元件根据设备需求定制，U 型和螺旋型适合小型高精度反应炉，W 型和直棒型适合大型连续式处理设备。安装采用高纯氧化铝支架以匹配  $\text{MoSi}_2$  的热膨胀特性，减少机械和热应力。电气连接使用低电阻夹持器，配合比例控制电源实现稳定运行。运行需快速通过“瘟病”温度范围以避免非保护性氧化物生成，表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）进一步增强抗热震性和耐腐蚀性，延长元件寿命。定期维护包括检查  $\text{SiO}_2$  膜完整性、冷端连接状态和炉膛洁净度，确保无杂质污染，满足环保与催化领域的高标准要求。 $\text{MoSi}_2$  元件通过优化热场设计和运行参数，为废气处理、催化剂再生和固废资源化的效率和可靠性提供关键支持。

### 8.7.1 废气处理

$\text{MoSi}_2$  加热元件在废气处理工艺中应用于高温焚烧炉、催化氧化炉和热解炉，用于处理工业废气、有机挥发物（VOCs）和有害气体（如  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ ）。废气处理需高温以分解有害成分或促进催化反应， $\text{MoSi}_2$  元件的高功率密度和精确控温能力确保反应炉达到所需温度并维持均匀热场，促进废气的高效分解和转化。W 型和直棒型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于大型废气处理炉，覆盖宽广加热区域，支持连续式废气处理，U 型和螺旋型元件适用于小型或实验室炉，适合高精度实验或小规模处理。 $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下保持稳定，表面涂层增强抗热震性和抗腐蚀性，适应废气中可能存在的腐蚀性气体（如氯化物或硫化物）。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，电气连接采用低电阻夹持器，配合比例控制电源实现精确控温。运行需控制炉内气氛，避免高还原性环境破坏  $\text{SiO}_2$  膜，并快速通过“瘟病”温度范围以防止氧化损伤。维护包括定期检查元件表面状态和炉膛洁净度，清除可能影响处理效果的杂质。 $\text{MoSi}_2$  元件提高废气处理的分解效率和排放达标率，广泛应用于化工、电力和环保行业。

### 8.7.2 催化剂再生

$\text{MoSi}_2$  加热元件在催化剂再生工艺中应用于高温再生炉和热处理炉，用于恢复催化剂的活性，例如石油化工中的催化裂化催化剂、环保领域中的选择性催化还原（SCR）催化剂以及工业催化剂（如贵金属催化剂）。催化剂在长期使用后会因表面沉积碳质物、硫化物或其他毒化物质而失活，再生工艺需要在高温下烧除这些沉积物，同时保护催化剂的微观结构和活性位点，以恢复其催化性能。 $\text{MoSi}_2$  元件的高功率 density 和精确控温能力能够提供稳定的高温环境，确保再生过程的高效性和催化剂性能的恢复。U 型和螺旋型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于小型再生炉，适合实验室或小规模再生工艺，提供集中加热以支持高精度温度控制，满足特定催化剂对严格温度曲线的需求。W 型和直棒型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于大型工业再生炉，能够覆盖宽广加热区域，提供均匀热场以支持批量催化剂处理，确保再生效果的一致性。 $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下保持稳定，表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）增强抗热震性和抗腐蚀性，适应再生过程中可能存在的腐蚀性气体（如含硫或含氯气氛）或频繁热循环。安装时，元件通过高纯氧化

铝支架固定，垂直悬挂或水平支撑以减少机械应力，电气连接采用低电阻夹持器，配合比例控制电源实现精确的温度调控。运行需严格控制炉内气氛，避免高还原性环境破坏  $\text{SiO}_2$  膜，并快速通过“瘟病”温度范围以防止非保护性氧化物生成。维护包括定期检查元件表面状态、冷端连接和炉膛洁净度，清除可能影响催化剂纯度的杂质（如金属氧化物）。 $\text{MoSi}_2$  元件通过优化热场和工艺参数，确保催化剂再生的高效性和活性恢复效果，延长催化剂使用寿命，广泛应用于石油化工、环保和工业催化领域。

### 8.7.3 固废资源化

$\text{MoSi}_2$  加热元件在固废资源化工艺中应用于高温热解炉、焚烧炉和烧结炉，用于处理工业固废、城市垃圾、危险废物以及回收有价值材料（如金属、陶瓷或玻璃）。固废资源化需高温以分解有机物、挥发有害物质或烧结固废成分以形成可再利用的材料， $\text{MoSi}_2$  元件的稳定高温性能和均匀热场分布能够满足这些工艺需求。W 型和直棒型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于大型热解或焚烧炉，覆盖宽广加热区域，支持连续式固废处理，确保热解或烧结过程的效率和一致性。U 型和螺旋型  $\text{MoSi}_2$  元件适用于小型实验炉或特定固废的资源化处理，适合高精度工艺或研发用途，提供集中加热以优化反应条件。 $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下提供可靠的抗氧化保护，表面涂层增强抗热震性和抗腐蚀性，适应固废处理中可能涉及的复杂气氛（如含氯、硫或重金属挥发物）。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，电气连接采用低电阻夹持器，配合比例控制电源实现精确控温，满足固废资源化对特定温度曲线的控制要求。运行需控制炉内气氛，避免高还原性环境破坏  $\text{SiO}_2$  膜，并快速通过“瘟病”温度范围以防止氧化损伤。维护包括定期检查  $\text{SiO}_2$  膜、冷端连接和炉膛洁净度，清除可能影响资源化产物质量的杂质。 $\text{MoSi}_2$  元件通过提供可靠的高温环境，支持固废的高效分解、材料回收和资源化利用，广泛应用于环保、循环经济和资源再生产业。

## 8.8 二硅化钼加热元件在其他领域的应用

二硅化钼（ $\text{MoSi}_2$ ）加热元件因其卓越的高温性能、抗氧化性和电热稳定性，在航空航天、核工业等高技术领域展现出独特的应用价值。 $\text{MoSi}_2$  元件能够在氧化气氛下通过表面形成的  $\text{SiO}_2$  保护膜实现优异的抗氧化性，适合长时间高温运行，其正温度系数电阻率特性确保精确的温度控制和均匀的热场分布，满足复杂工况对高温、洁净环境和抗热循环性能的需求。U 型、W 型、螺旋型和直棒型  $\text{MoSi}_2$  元件根据设备需求定制，U 型和螺旋型适合小型高精度炉，W 型和直棒型适合大型测试或辅助设备。安装采用高纯氧化铝支架以匹配  $\text{MoSi}_2$  的热膨胀特性，减少机械和热应力。电气连接使用低电阻夹 hold 器，配合比例控制电源实现稳定运行。运行需快速通过“瘟病”温度范围以避免非保护性氧化物生成，表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）进一步增强抗热震性和耐腐蚀性，延长元件寿命。定期维护包括检查  $\text{SiO}_2$  膜完整性、冷端连接状态和炉膛洁净度，确保无杂质污染，满足航空航天和核工业的严苛要求。 $\text{MoSi}_2$  元件通过优化热场设计和运行参数，为高技术领域的材料测试和设备运行提供可靠支持。

### 8.8.1 航空航天材料测试

$\text{MoSi}_2$  加热元件在航空航天材料测试中应用于高温试验炉、热循环测试炉和环境模拟设备，用于测试高温合金、陶瓷基复合材料、碳纤维复合材料等航空航天关键材料的性能。航空航



天材料需在极端高温条件下接受力学、热学和化学性能测试，以验证其在发动机、涡轮叶片或航天器热防护系统中的可靠性，MoSi<sub>2</sub>元件的高功率密度和精确控温能力能够模拟这些苛刻环境。U型和螺旋型 MoSi<sub>2</sub>元件适用于小型试验炉，提供集中加热以支持高精度测试，适合小尺寸样品的热暴露或热循环实验。W型和直棒型元件适用于大型测试炉，能够覆盖宽广加热区域，提供均匀热场以测试大型结构件。SiO<sub>2</sub>保护膜在氧化气氛下保持稳定，表面涂层增强抗热震性和抗腐蚀性，适应测试中可能涉及的氧化或微量腐蚀性气氛。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，电气连接采用低电阻夹持器，配合比例控制电源实现精确的温度曲线控制。运行需严格控制炉内气氛，避免还原环境破坏 SiO<sub>2</sub>膜，并快速通过“瘟病”温度范围以防止氧化损伤。维护包括定期检查元件表面状态、冷端连接和炉膛洁净度，确保无杂质影响测试结果。MoSi<sub>2</sub>元件通过提供稳定的高温环境和可靠的热循环性能，支持航空航天材料的高精度测试，为材料开发和认证提供关键数据。

### 8.8.2 核工业辅助设备

MoSi<sub>2</sub>加热元件在核工业辅助设备中应用于高温烧结炉、热处理炉和实验反应器，用于制备核燃料元件、反应堆材料以及相关高温陶瓷或合金的测试与加工。核工业对设备的温度控制、洁净度和长期稳定性要求极高，MoSi<sub>2</sub>元件的稳定高温性能和均匀热场分布能够满足这些需求。U型和螺旋型 MoSi<sub>2</sub>元件适用于小型实验炉，适合核燃料颗粒或小型反应堆材料的烧结与热处理，提供高精度控温以确保材料性能。W型和直棒型元件适用于大型辅助设备，如核燃料棒烧结炉或反应堆部件热处理炉，提供大面积均匀加热以支持批量生产。

SiO<sub>2</sub>保护膜和表面涂层确保元件在氧化气氛或微量腐蚀性环境中长期运行，抗热震性适应频繁热循环。安装采用高纯氧化铝支架，电气连接使用比例控制电源以实现精确控温，满足核工业对严格工艺参数的要求。运行需控制炉内气氛，避免高还原性环境破坏 SiO<sub>2</sub>膜，并快速通过“瘟病”温度范围以防止氧化损伤。维护包括定期检查 SiO<sub>2</sub>膜、冷端连接和炉膛洁净度，确保无杂质污染影响核材料质量。MoSi<sub>2</sub>元件通过提供可靠的高温环境，支持核工业中关键材料的制备和性能验证，为核能技术的安全性和效率提供重要保障。

### 8.8.3 高温合成化学

MoSi<sub>2</sub>加热元件在高温合成化学中应用于反应炉和实验炉，用于合成高温陶瓷、金属间化合物、功能材料和高性能化学品。高温合成化学需在严格控制的温度条件下进行反应，以确保产物的纯度、晶体结构和化学性能，MoSi<sub>2</sub>元件的高功率密度和精确控温能力能够提供稳定的反应环境。U型和螺旋型 MoSi<sub>2</sub>元件适用于小型实验炉，适合实验室规模的化学合成或新材料研发，提供集中加热以实现高精度温度控制。W型和直棒型元件适用于大型反应炉，支持工业规模的化学品或材料生产，确保热场均匀性以减少反应不均。

SiO<sub>2</sub>保护膜在氧化气氛下保持稳定，表面涂层（如 SiC 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）增强抗热震性和抗腐蚀性，适应合成过程中可能存在的腐蚀性气体或挥发性产物。安装时，元件通过高纯氧化铝支架固定，电气连接采用低电阻夹持器，配合比例控制电源实现精确的温度曲线控制。运行需控制炉内气氛，避免高还原性环境破坏 SiO<sub>2</sub>膜，并快速通过“瘟病”温度范围以防止氧化损伤。维护包括定期检查元件表面状态、冷端连接和炉膛洁净度，确保无杂质污染影响合成产物的

质量。MoSi<sub>2</sub>元件通过提供可靠的高温环境，支持高温合成化学的高效反应和产品质量，广泛应用于先进材料和化工领域。

#### 8.8.4 二硅化钼棒变压器

MoSi<sub>2</sub>加热元件在变压器相关应用中作为高温加热源，用于变压器材料测试、绝缘材料热处理和制造过程中的高温工艺。变压器制造涉及高温处理硅钢片、绝缘陶瓷或其他耐高温材料，MoSi<sub>2</sub>元件的稳定高温性能和均匀热场分布能够满足这些工艺需求。U型和螺旋型 MoSi<sub>2</sub>元件适用于小型热处理炉，适合变压器部件的局部加热或实验室测试，提供高精度控温以优化材料性能。W型和直棒型元件适用于大型工业炉，用于硅钢片退火或绝缘材料烧结，支持批量生产并确保热场均匀性。SiO<sub>2</sub>保护膜在氧化气氛下提供可靠的抗氧化保护，表面涂层增强抗热震性和耐腐蚀性，适应变压器制造中可能涉及的微量腐蚀性气氛。安装采用高纯氧化铝支架，电气连接使用比例控制电源以实现精确控温，确保工艺参数的稳定性。运行需快速通过“瘟病”温度范围以避免氧化损伤，维护包括定期检查 SiO<sub>2</sub>膜、冷端连接和炉膛洁净度，确保无杂质影响材料质量。MoSi<sub>2</sub>元件通过提供可靠的高温环境，支持变压器制造中关键材料的热处理和性能优化，提升变压器的效率和可靠性，广泛应用于电力设备制造领域。



中钨智造硅化钼棒

中钨智造科技有限公司  
二硅化钼加热元件产品介绍

一、二硅化钼加热元件概述

二硅化钼（MoSi<sub>2</sub>）加热元件是一种具有优异高温性能的陶瓷电热材料，广泛应用于工业炉窑领域。该材料在高温氧化气氛中能够形成致密的二氧化硅（SiO<sub>2</sub>）保护层，有效防止进一步氧化，具备出色的抗氧化能力和热稳定性。其可在高温下长时间稳定工作，是多种高温热处理工艺的理想选择。

二、二硅化钼加热元件特性

- 低膨胀系数：**与常见的陶瓷基体材料匹配较好，减少了热应力引起的开裂风险。
- 优异的抗氧化性能：**表面形成致密的 SiO<sub>2</sub> 保护膜，有效防止材料氧化损耗。
- 极高的工作温度：**可持续工作温度可达 1700° C，最高可使用至 1800° C（氧化气氛中）。
- 良好的高温电阻特性：**在高温下，MoSi<sub>2</sub> 的电阻率表现相对稳定，高温段电阻率增幅缓慢。

三、二硅化钼加热元件规格

二硅化钼加热元件有直型棒、U 型棒、W 型棒等类型，典型规格型号参考如下：

| 型号 (d1/d2) | 热端直径 d1 | 冷端直径 d2 | 热端长度 Le     | 冷端长度 Lu    | 常见类型           |
|------------|---------|---------|-------------|------------|----------------|
| φ3/6       | 3 mm    | 6 mm    | 100–300 mm  | 150–250 mm | 直棒 / U 型       |
| φ4/9       | 4 mm    | 9 mm    | 100–500 mm  | 200–300 mm | 直棒 / U 型       |
| φ6/12      | 6 mm    | 12 mm   | 100–600 mm  | 200–350 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ9/18      | 9 mm    | 18 mm   | 150–800 mm  | 250–400 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |
| φ12/24     | 12 mm   | 24 mm   | 200–1000 mm | 300–500 mm | 直棒 / U 型 / W 型 |

四、二硅化钼加热元件典型应用

- 陶瓷、粉末冶金等行业的高温烧结炉
- 钢铁、有色金属热处理设备
- 实验室高温电炉
- 玻璃熔融与加工设备
- 半导体、光伏行业的扩散、退火及氧化工艺

五、采购信息

- 邮箱: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- 电话: +86 592 5129595; 592 5129696
- 更多硅钼棒资讯，请访问中钨在线网站 ([www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn))。
- 更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。





## 第九章 二硅化钼加热元件与其他加热材料的比较

二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 加热元件因其优异的高温性能、抗氧化性和电热稳定性，在高温加热领域具有广泛应用。与其他常见加热材料如钨和碳化硅 ( $\text{SiC}$ ) 相比， $\text{MoSi}_2$  元件在抗氧化性、使用温度范围和工艺适配性方面具有独特优势，但也存在一定的局限性。本章通过对比  $\text{MoSi}_2$  与钨加热元件和碳化硅元件的性能，分析其在成本、效率和应用适配性方面的差异，为不同工况下选择合适的加热材料提供指导。 $\text{MoSi}_2$  元件的安装需采用高纯氧化铝支架以匹配热膨胀特性，电气连接使用低电阻夹持器，配合比例控制电源确保稳定性。运行需快速通过“瘟病”温度范围以避免非保护性氧化物生成，表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）可增强抗热震性和耐腐蚀性。定期维护包括检查  $\text{SiO}_2$  膜完整性和冷端连接状态，确保无杂质污染。

### 9.1 与钨加热元件的对比

$\text{MoSi}_2$  加热元件与钨加热元件在高温应用中各有优势，但适用场景和性能特性存在显著差异。 $\text{MoSi}_2$  元件能够在氧化气氛下通过表面形成的  $\text{SiO}_2$  保护膜实现优异的抗氧化性，适合长时间运行，最高使用温度可达  $1850^\circ\text{C}$ ，广泛应用于陶瓷烧结、玻璃熔融和半导体制造等氧化环境下的工艺。 $\text{MoSi}_2$  的正温度系数电阻率特性使其能够自适应调节功率，提供稳定的温度控制，适合需要高精度控温的应用。其热膨胀系数适中，抗热震性较好，能够承受频繁热循环，适合 U 型、W 型或螺旋型结构设计。 $\text{MoSi}_2$  元件的制造工艺（如粉末冶金和等静压成型）允许灵活定制形状，满足复杂炉型需求。然而， $\text{MoSi}_2$  在  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  的“瘟病”温度范围内易生成非保护性氧化物，需快速升降温以避免材料劣化，且在还原或真空环境下需降低使用温度以保护  $\text{SiO}_2$  膜。

相比之下，钨加热元件以其极高的熔点和优异的机械强度著称，适合超高温应用（如真空或惰性气氛下的金属热处理）。钨元件在氧化气氛下极易氧化，需在真空或惰性气体保护下运行，限制了其在氧化环境中的使用。钨的电阻率较低且随温度变化较小，适合需要高功率输出的场景，但控温精度低于  $\text{MoSi}_2$ ，需更复杂的电源控制系统。钨元件的热膨胀系数较低，抗热震性较差，频繁热循环可能导致脆性断裂，限制了其在动态热负载下的应用。钨元件的制造和加工成本较高，形状定制难度较大，多为线材或棒状结构，限制了复杂炉型的设计灵活性。此外，钨的密度较高，导致元件重量较大，安装和支撑结构设计更复杂。

$\text{MoSi}_2$  与钨的对比显示， $\text{MoSi}_2$  在氧化气氛下的抗氧化性和控温精度更优，适合陶瓷、玻璃和半导体等行业，而钨更适合真空或惰性气氛下的超高温应用（如高温合金熔炼）。选择时需根据工艺环境、温度要求和热循环频率综合考虑， $\text{MoSi}_2$  在氧化环境中的长期稳定性和灵活性使其在多数高温炉中更具优势。

### 9.2 与碳化硅元件的比较

$\text{MoSi}_2$  加热元件与碳化硅 ( $\text{SiC}$ ) 加热元件在高温加热领域均为常见选择，但在性能和应用场景上存在明显差异。 $\text{MoSi}_2$  元件通过表面  $\text{SiO}_2$  保护膜在氧化气氛下展现出优异的抗氧化性，最高使用温度可达  $1850^\circ\text{C}$ ，适合陶瓷烧结、玻璃熔融和半导体外延生长等高精度高温工艺。其正温度系数电阻率特性支持自适应功率调节，提供精确的温度控制，适合需要稳定热场的

应用。 $\text{MoSi}_2$ 的热膨胀系数适中，抗热震性较好，能够承受频繁热循环，U型、W型和螺旋型结构适应多种炉型设计。 $\text{MoSi}_2$ 元件的制造工艺灵活，可通过粉末冶金和等静压成型生产复杂形状，满足定制需求。然而， $\text{MoSi}_2$ 在“瘟病”温度范围易发生非保护性氧化，需快速升降温，且在还原或真空环境下需降低使用温度以保护 $\text{SiO}_2$ 膜。

SiC加热元件以其高硬度、耐磨性和化学稳定性著称，广泛应用于工业炉和中高温工艺。SiC元件在氧化气氛下也能形成 $\text{SiO}_2$ 保护膜，抗氧化性良好，但其最高使用温度通常低于 $\text{MoSi}_2$ ，适用于1300-1600℃的工艺。SiC的电阻率随温度变化较复杂，呈负温度系数特性（高温下电阻降低），可能导致功率输出不稳定，需配备精密的控制系统以维持温度均匀性。SiC元件的热膨胀系数较低，抗热震性略逊于 $\text{MoSi}_2$ ，频繁热循环可能引发微裂纹，尤其在大型元件中更为明显。SiC元件的制造工艺（如反应烧结或重结晶）限制了形状的复杂性，通常以棒状或管状为主，定制灵活性低于 $\text{MoSi}_2$ 。此外，SiC元件在含硫或含卤素的腐蚀性气氛中可能发生局部腐蚀，需额外的表面保护措施。

$\text{MoSi}_2$ 与SiC的对比表明， $\text{MoSi}_2$ 在更高温度范围和精密控温场景中具有优势，适合高技术行业如半导体和特种陶瓷制造，而SiC更适合中高温、成本敏感的工业应用，如金属热处理和常规陶瓷烧结。选择时需考虑工艺温度、气氛条件和热循环要求。

### 9.3 加热元件成本、效率与应用适配性分析

$\text{MoSi}_2$ 、钨和SiC加热元件的成本、效率和应用适配性差异直接影响其在不同行业的选择。 $\text{MoSi}_2$ 元件的制造成本适中，粉末冶金和等静压成型工艺成熟，允许生产复杂形状（如U型、W型、螺旋型），满足多样化炉型需求。 $\text{MoSi}_2$ 的运行效率较高，其正温度系数电阻率特性支持自适应功率调节，减少能源浪费，适合需要精确控温和长时间运行的场景，如陶瓷烧结、玻璃加工和半导体制造。 $\text{MoSi}_2$ 在氧化气氛下的抗氧化性优异，维护成本较低，但需快速通过“瘟病”温度范围以避免氧化损伤，表面涂层可进一步延长寿命。 $\text{MoSi}_2$ 元件的应用适配性广泛，适合氧化气氛下的高温工艺，但在还原或真空环境下需降低温度，限制了其在某些超高温金属处理中的使用。

钨加热元件的制造成本较高，因其高熔点材料加工难度大，且多为线材或棒状，定制复杂形状成本高昂。钨的运行效率在真空或惰性气氛下较高，适合超高温应用（如高温合金熔炼），但其在氧化气氛下极易氧化，需额外的气氛控制系统，增加了运行和维护成本。钨元件的抗热震性较差，频繁热循环可能导致断裂，维护成本较高，适合航空航天材料测试等对高温和真空环境要求极高的场景，但应用范围因气氛限制较窄。

SiC加热元件的制造成本相对较低，反应烧结工艺较为简单，适合大规模生产棒状或管状元件。SiC的运行效率在中高温范围内较高，但负温度系数电阻率特性可能导致功率不稳定，需复杂的控制系统以维持温度均匀性，增加运行成本。SiC元件在氧化气氛下抗氧化性良好，但在腐蚀性气氛中可能发生局部劣化，维护成本适中。SiC元件适用于成本敏感的中高温工艺，如金属热处理和常规陶瓷烧结，但其最高使用温度和形状定制灵活性低于 $\text{MoSi}_2$ ，限制了在高精度高温工艺中的应用。

#### 版权与法律责任声明

## 第十章 二硅化钼加热元件的相关标准与规范

二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 加热元件作为一种高性能高温加热材料，其生产、测试和应用需遵循严格的标准与规范，以确保产品质量、性能稳定性和工艺安全性。全球范围内，中国国家标准、国际标准以及欧美日韩等国的相关标准为  $\text{MoSi}_2$  加热元件的制造和使用提供了技术指导。这些标准涵盖了材料的化学成分、物理性能、制造工艺、测试方法和应用规范等方面。本章详细介绍  $\text{MoSi}_2$  加热元件的中国国家标准、国际标准以及欧美日韩等国的相关标准，旨在为生产商、工程师和用户提供参考依据。 $\text{MoSi}_2$  元件的标准化有助于统一产品质量、提高互换性并促进全球贸易与技术合作。

### 10.1 二硅化钼加热元件的中国国家标准

中国国家标准 (GB/T) 对  $\text{MoSi}_2$  加热元件的生产、性能测试和应用制定了多项规范，主要由全国有色金属标准化技术委员会 (TC243) 等机构归口管理。这些标准确保  $\text{MoSi}_2$  元件在高温氧化环境下的性能稳定性和安全性，适用于陶瓷烧结、玻璃熔融、半导体制造等行业。相关标准包括材料化学分析、物理性能测试和工业电热设备的技术要求。例如， $\text{MoSi}_2$  元件的化学成分标准规定了钼、硅等主要元素的含量要求及杂质控制，以保证抗氧化性和电热稳定性。物理性能标准涉及电阻率、热膨胀系数、抗热震性和机械强度的测试方法，确保元件在高温和频繁热循环下的可靠性。此外，针对工业电热设备的标准对  $\text{MoSi}_2$  元件的安装、运行和维护提出要求，如使用高纯氧化铝支架匹配热膨胀特性、快速通过“瘟病”温度范围以避免非保护性氧化物生成，以及定期检查  $\text{SiO}_2$  保护膜完整性。这些标准由国家市场监督管理总局和国家标准化委员会发布，部分标准参考或非等效采用国际标准（如 ISO 相关规范），以适应中国工业需求并与国际接轨。

### 10.2 二硅化钼加热元件的国际标准

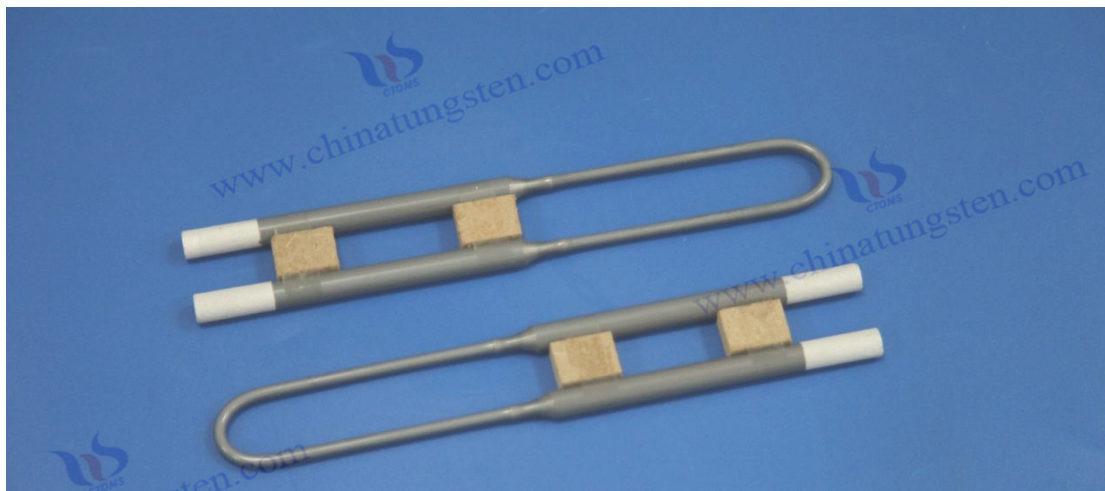
国际标准化组织 (ISO) 和国际电工委员会 (IEC) 制定了与  $\text{MoSi}_2$  加热元件相关的国际标准，主要集中在高温材料、工业电热设备和性能测试方法上。这些标准为  $\text{MoSi}_2$  元件的全球生产和应用提供了统一的技术框架，涵盖材料特性、制造工艺和测试规范。例如，ISO 标准可能涉及高温陶瓷或金属间化合物的性能测试方法，包括抗氧化性、热导率和电阻率测试，确保  $\text{MoSi}_2$  元件在氧化气氛下的长期稳定性。IEC 标准则侧重于工业电热设备的技术要求，规定了  $\text{MoSi}_2$  元件的电气连接、控温精度和安全性要求，如低电阻夹持器的使用和比例控制电源的配置。国际标准还包括高温环境下元件抗热震性和耐腐蚀性的测试方法，指导制造商优化表面涂层（如  $\text{SiC}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）以延长使用寿命。此外，ISO 和 IEC 标准强调元件在特定气氛（如氧化或微量氧环境）下的运行规范，要求快速通过低温度范围以避免“瘟病”氧化。这些标准促进了  $\text{MoSi}_2$  元件在全球市场的互换性和技术合作，广泛应用于陶瓷、半导体和新能源材料制备领域。

### 10.3 欧美日韩等世界各国的二硅化钼加热元件标准

欧美日韩等国的  $\text{MoSi}_2$  加热元件标准由各国标准化机构制定，结合本地工业需求和国际标准，涵盖材料性能、制造工艺和应用规范。在欧洲，欧洲标准化委员会 (CEN) 和其他机构（如



德国标准化学会 DIN、英国标准协会 BSI）制定了与高温电热元件相关的标准，涉及  $\text{MoSi}_2$  元件的化学组成、电阻率、热膨胀系数和抗氧化性测试方法。这些标准强调元件在氧化气氛下的长期稳定性，规定了表面  $\text{SiO}_2$  保护膜的形成条件和耐腐蚀性要求，适用于陶瓷烧结和玻璃加工等行业。DIN 标准可能进一步细化  $\text{MoSi}_2$  元件的安装规范，如高纯氧化铝支架的使用和电气连接的低电阻设计。美国国家标准学会（ANSI）制定的标准侧重于工业电热设备的性能和安全，涉及  $\text{MoSi}_2$  元件的控温精度和热循环性能测试，确保其在半导体和航空航天材料测试中的可靠性。日本和韩国通过日本工业标准（JIS）和韩国技术标准署（KATS）制定了  $\text{MoSi}_2$  元件的相关规范，重点关注高温陶瓷和半导体制造中的应用，规定了元件在氧化和微量腐蚀性气氛下的运行条件，如快速升降温以避免“瘟病”氧化。这些标准通常参考 ISO 和 IEC 框架，但根据本地工业特点（如日本的精密制造需求）进行调整，强调元件的高精度控温和长寿命设计。欧美日韩标准通过统一的测试方法和质量要求，促进了  $\text{MoSi}_2$  元件在全球市场的应用和贸易。



中钨智造硅化钼棒

附录：二硅化钼加热元件专业术语表

以下为二硅化钼（MoSi<sub>2</sub>）加热元件相关领域的常用专业术语及其定义，旨在为制造商、工程师和用户提供清晰的技术参考。这些术语涵盖材料特性、制造工艺、性能测试和应用场景等方面，帮助理解 MoSi<sub>2</sub>加热元件的特性和使用规范。

| 术语                       | 定义                                                                                                |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 二硅化钼（MoSi <sub>2</sub> ） | 一种金属间化合物，由钼和硅组成，具有高熔点、高抗氧化性和优异的电热性能，常用于高温加热元件。                                                    |
| SiO <sub>2</sub> 保护膜     | MoSi <sub>2</sub> 表面在氧化气氛下生成的一层致密二氧化硅膜，用于防止材料进一步氧化，增强高温稳定性。                                       |
| 瘟病氧化                     | MoSi <sub>2</sub> 在 400–700℃ 温度范围内形成的非保护性氧化物（如 MoO <sub>3</sub> 和 SiO <sub>2</sub> 混合物），导致材料粉化劣化。 |
| 正温度系数电阻率（PTC）            | MoSi <sub>2</sub> 电阻率随温度升高而增加的特性，支持自适应功率调节，适合精确控温应用。                                              |
| 热端                       | MoSi <sub>2</sub> 加热元件的高温工作部分，通常较细，负责产生主要热量，常见规格如 Φ6mm 或 Φ9mm。                                    |
| 冷端                       | MoSi <sub>2</sub> 加热元件的低温连接部分，通常较粗（如 Φ12mm 或 Φ18mm），掺杂导电材料以降低电阻率。                                 |
| U 型元件                    | MoSi <sub>2</sub> 加热元件的一种结构，呈 U 形，适合小型炉或集中加热，易于安装和替换。                                             |
| W 型元件                    | MoSi <sub>2</sub> 加热元件的一种结构，呈 W 形，适合大型炉，提供均匀热场，抗热震性较好。                                            |
| 螺旋型元件                    | MoSi <sub>2</sub> 加热元件的螺旋状结构，适合管式炉或高精度加热，热场集中且控温精确。                                               |
| 直棒型元件                    | MoSi <sub>2</sub> 加热元件的直线棒状结构，适合大面积均匀加热，常用于连续式工业炉。                                                |
| 热膨胀系数                    | MoSi <sub>2</sub> 材料随温度变化的尺寸膨胀率，约为 8.1×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ，影响元件与支架的匹配设计。            |
| 抗热震性                     | MoSi <sub>2</sub> 元件承受快速温度变化而不开裂的能力，与其断裂韧性和热膨胀特性相关。                                               |
| 断裂韧性                     | MoSi <sub>2</sub> 材料抵抗裂纹扩展的能力，通常较低，需优化工艺以减少微裂纹风险。                                                 |
| 热导率                      | MoSi <sub>2</sub> 材料传导热量的能力，影响热场均匀性和加热效率。                                                         |
| 功率密度                     | 单位面积上的加热功率，反映 MoSi <sub>2</sub> 元件的加热能力，需根据炉型和工艺匹配。                                               |
| 热压烧结（HP）                 | 一种 MoSi <sub>2</sub> 元件制造工艺，通过高温和压力成型，提高致密度和机械性能。                                                 |
| 无压烧结                     | 成本较低的 MoSi <sub>2</sub> 元件制造工艺，致密度略低，适合低要求应用。                                                     |
| 自蔓延高温合成（SHS）             | 通过点燃 Mo-Si 混合粉引发放热反应制备 MoSi <sub>2</sub> 的工艺，成本低但均匀性较差。                                           |

|             |                                                                                                               |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 等静压成型       | 使用均匀压力成型 MoSi <sub>2</sub> 坯体的工艺，适合生产复杂形状元件。                                                                  |
| 表面涂层        | 施加于 MoSi <sub>2</sub> 表面的保护层（如 SiC、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ），用于增强抗热震性和耐腐蚀性。                            |
| 等离子喷涂       | 一种施加表面涂层的技术，通过高温等离子体喷射形成致密涂层，适合工业应用。                                                                          |
| 化学气相沉积(CVD) | 一种生成均匀薄涂层的技术，涂层附着力高，适合高精度 MoSi <sub>2</sub> 元件。                                                               |
| 电阻率测试       | 测量 MoSi <sub>2</sub> 元件电阻率的方法，通常采用四探针法，评估电热性能。                                                                |
| 抗氧化性测试      | 评估 MoSi <sub>2</sub> 元件在高温氧化气氛下稳定性的测试，测量 SiO <sub>2</sub> 膜厚度和质量损失。                                           |
| 热震性能测试      | 模拟快速升降温测试 MoSi <sub>2</sub> 元件抗裂能力的实验，评估微裂纹和机械强度变化。                                                           |
| 维氏硬度测试      | 使用维氏硬度计测量 MoSi <sub>2</sub> 表面硬度的方法，反映抗磨损性和机械性能。                                                              |
| 氧化气氛        | 含氧气（氧分压≥0.2 atm）的运行环境，MoSi <sub>2</sub> 元件的主要应用条件。                                                            |
| 还原气氛        | 含氢气或一氧化碳等还原性气体的环境，MoSi <sub>2</sub> 需降低使用温度以避免 SiO <sub>2</sub> 膜失效。                                          |
| 比例控制电源      | 一种精确调节 MoSi <sub>2</sub> 元件功率的电源系统，配合其正温度系数特性实现稳定控温。                                                          |
| 低电阻夹持器      | 用于 MoSi <sub>2</sub> 冷端与电源连接的夹具，接触电阻低，确保电气稳定性。                                                                |
| 高纯氧化铝支架     | 用于支撑 MoSi <sub>2</sub> 元件的支架材料，热膨胀系数匹配，减少热应力。                                                                 |
| 热场均匀性       | 炉内温度分布的均匀程度，受 MoSi <sub>2</sub> 元件布局 and 热导率影响，需优化设计。                                                         |
| 掺杂改性        | 在 MoSi <sub>2</sub> 中添加少量元素（如 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ）以改善晶界强度或抗氧化性的工艺。 |
| 粉末冶金        | 通过粉末压制和烧结制备 MoSi <sub>2</sub> 元件的工艺，适合复杂形状生产。                                                                 |
| 质量损失率       | MoSi <sub>2</sub> 元件在高温氧化下单位面积的质量损失，反映抗氧化性能。                                                                  |
| 晶粒尺寸        | MoSi <sub>2</sub> 显微结构中的晶体颗粒大小，影响机械强度和抗热震性。                                                                   |

说明：

本术语表基于 MoSi<sub>2</sub>加热元件的制造、测试和应用实践，参考了相关文献和技术资料。术语定义力求简明准确，适用于陶瓷、玻璃、半导体、新能源和环保等领域。用户可根据具体工艺需求进一步补充或调整术语内容。



## 中文文献

- [1] 二硅化钼电热元件产品说明. 众豪商贸, 2023.
- [2] 常被用于电热元件中的结构陶瓷材料——二硅化钼. 知乎, 2020.
- [3] 高温电热元件材料的研究进展. 材料导报, 2018.
- [4] 二硅化钼喷涂粉末的制备及其涂层组织结构. Sunspraying, 2012.
- [5] 硅钼棒是什么?它有什么具体用处? 郑州泰晟高温科技有限公司.
- [6] 金属间化合物二硅化钼的性能及应用. 科研之友.
- [7] 二硅化钼应用. 中钨在线.

## 英文文献

- [1] Advances in MoSi<sub>2</sub>-based materials for high-temperature applications. Materials Science and Engineering: A, 2010.
- [2] Electrical and thermal properties of MoSi<sub>2</sub> heating elements. Ceramics International, 2005.
- [3] Molybdenum Disilicide. American Elements.
- [4] Molybdenum Disilicide Heating Elements. Stanford Advanced Materials.
- [5] Molybdenum Disilicide Heating Elements Users Guide.
- [6] MoSi<sub>2</sub>-based materials and their properties. Journal of Materials Science, 1999.
- [7] MoSi<sub>2</sub> heating elements. Kanthal®.
- [8] Oxidation behavior of MoSi<sub>2</sub>-based materials. Journal of the American Ceramic Society, 2001.
- [9] Surface coatings for MoSi<sub>2</sub> heating elements. Surface and Coatings Technology, 2008.
- [10] Thermal shock and fatigue behavior of MoSi<sub>2</sub>-based heating elements. Journal of Materials Research, 2003.