

多层碳毡保温结构对直拉单晶硅炉温度场影响的数值模拟研究

杨自塑¹ 张博³ 侯养文¹ 张敏² 龙昭钦² 段平强²

1 成都工业学院 新能源工程学院

2 宜宾英发德坤科技有限公司

3 宜宾成都工业学院研究院

DOI:10.32629/etd.v7i4.20241

[摘要] 直拉单晶硅炉热场的保温性能直接影响晶体生长质量与生产能耗,传统单层碳毡保温结构难以满足大尺寸热场的高效隔热需求。本文采用数值模拟方法,建立二维轴对称多物理场耦合模型,系统研究多层碳毡保温结构的间隙宽度与层数配置对炉内温度场及隔热性能的影响规律。结果显示,间隙宽度对隔热性能存在非线性耦合效应,综合隔热效果与结构稳定性,最优间隙宽度为0.6mm。此外,碳毡层数增加使保温层内表面温度先快速升高后趋于平稳,达到一定层数时隔热性能趋近极限,继续增层对性能提升无显著贡献。优化后的多层碳毡保温结构可有效降低炉体热损失,提升生产能效。研究结果可为大尺寸直拉单晶硅炉保温系统的优化设计与节能降耗提供理论支撑与工程参考。

[关键词] 直拉法; 单晶硅炉; 保温层; 多层结构

中图分类号: TU352.59 **文献标识码:** A

Numerical Simulation Study on the Influence of Multi-Layer Carbon Felt Insulation Structure on the Temperature Field of Czochralski Monocrystalline Silicon Furnace

Zisu Yang¹ Bo Zhang³ Yangwen Hou¹ Min Zhang² Zhaoqin Long² Pingqiang Duan²

1 School of New Energy Engineering, Chengdu Technological University

2 Yibin Yingfa Dekun Technology Co., Ltd.

3 Yibin Research Institute of Chengdu Technological University

[Abstract] The thermal insulation performance of the thermal field in a Czochralski monocrystalline silicon furnace directly affects crystal growth quality and production energy consumption. The traditional single-layer carbon felt insulation structure can hardly meet the high-efficiency thermal insulation requirements of large-size thermal fields. In this paper, a numerical simulation method is adopted to establish a two-dimensional axisymmetric multi-physics coupling model, and the influence laws of gap width and layer configuration of the multi-layer carbon felt insulation structure on the temperature field and thermal insulation performance inside the furnace are systematically investigated. The results show that the gap width has a nonlinear coupling effect on thermal insulation performance. Considering both the thermal insulation effect and structural stability, the optimal gap width is 0.6 mm. In addition, as the number of carbon felt layers increases, the temperature of the inner surface of the insulation layer rises rapidly at first and then tends to be stable. The thermal insulation performance approaches its limit when a certain number of layers is reached, and further increasing the layers has no significant contribution to performance improvement. The optimized multi-layer carbon felt insulation structure can effectively reduce furnace heat loss and improve production energy efficiency. The research results can provide theoretical support and engineering reference for the optimal design, energy conservation and consumption reduction of the insulation system of large-size Czochralski monocrystalline silicon furnaces.

[Key words] Czochralski method; monocrystalline silicon furnace; thermal insulation layer; multi-layer structure

引言

直拉法作为制备半导体和光伏级单晶硅的主流技术,在全球硅材料产业中占据着不可替代的地位^[1]。随着国家能源战略向清洁能源方向转移,光伏行业迎来快速发展期,对单晶硅的质量要求和成本控制提出了更高要求。在单晶硅生产过程中,热场稳定性与温度分布均匀性是决定晶体质量和能耗效率的关键因素^[2],而保温结构作为热场设计的核心组成部分,直接影响着单晶炉内的热流分布与热损失控制。随着大直径硅片成为市场主流,大尺寸热场(如36英寸及以上热场)的应用日益广泛,使得保温层优化设计变得尤为重要^[3]。首先,大尺寸热场需要更强的保温能力以减少热量散失,降低能耗;其次,保温结构需要保证热场内部温度的均匀性,避免局部过热或过冷导致晶体缺陷。

传统单晶炉的保温层多采用单层碳毡结构,该结构虽简单易用但在大尺寸热场中表现出轴向保温不均匀、径向热损失较大等局限性。针对以上问题,研究人员近年来对多层碳毡保温结构开展了深入研究。耿博耘等(2014)在CG6000型单晶炉上的改造研究表明,多层复合保温结构能显著改善热场性能,降低加热功率^[4]。邓先亮等通过FEMAG-CZ软件对22英寸热场进行模拟优化,通过增加保温桶外侧碳毡层数成功将热场功耗降低29%^[2]。徐浩然等在传统固化碳毡保温层中引入石墨层,将加热系统热效率从53%提升至90%,总功率消耗降低38.5%^[5]。另一方面,王世援等研究了新型碳/碳复合材料在保温结构中的应用优势^[6]。

综上所述,多层保温结构通过材料创新、结构优化和布局改进,已成为提升直拉单晶硅质量、降低能耗的关键技术方向,具有重要的研究价值和应用前景。然而,现有工作对多层保温结构的系统性探索仍然较少,例如多层碳毡结构的间隙宽度与层数配置对坩埚温度场的影响尚未获得充分研究。因此,本文采用数值模拟方法系统分析多层碳毡结构对直拉单晶硅炉热场的综合影响,揭示结构设计与温度分布的内在联系,对于大尺寸热场的节能优化设计具有重要意义。

1 仿真模拟与实验方法

1.1 炉体模型的建立

本文采用二维轴对称结构对直拉单晶炉进行几何建模,如图1所示,同时基于多物理场耦合方式对单晶硅生长过程的温度分布和流体行为进行数值仿真,并提出如下假设:

- (1) 氩气被认为是弱可压缩流动的牛顿流体。
- (2) 由于不涉及对硅熔体对流的研究,硅熔体及部分孤立的氩气环境采用固体传热方程来简化模型。
- (3) 由于晶体生长过程相当缓慢,使用准稳态假设来研究特定位置的温度。
- (4) 炉子的所有辐射表面均为漫灰壁。

本文在模拟直拉单晶炉时使用瞬态模式,当单晶硅棒固液界面升温至稳态后对炉体温度场进行特征分析,仿真结果对于长期工作于恒温状态的直拉单晶炉具有重要意义。

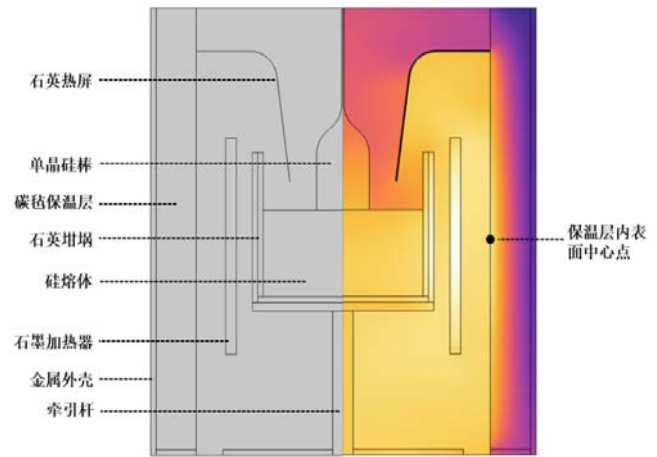


图1 直拉单晶硅炉体结构与其热场示意图

本文在模拟直拉单晶炉时使用瞬态模式,当单晶硅棒固液界面升温至稳态后对炉体温度场进行特征分析,仿真结果对于长期工作于恒温状态的直拉单晶炉具有重要意义。

1.2 物理方程及边界条件

对于氩气与晶体等固体传热过程,本文采用固体和流体传热模型对其进行数值模拟,带对流项的能量守恒方程表示为^[7]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{\text{ted}} \quad (1.1)$$

其中,热流密度q可用傅里叶传热方程表示如下:

$$\mathbf{q} = -\kappa \nabla T \quad (1.2)$$

本文采用标准k-ε湍流模型对氩气流体的行为进行计算,该模型符合纳维-斯托克斯流体动量守恒方程^[8]:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-\rho \mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + (\rho - \rho_{\text{ref}}) \mathbf{g} \quad (1.3)$$

其中,质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.4)$$

上述湍流模型中湍流动能k的控制方程为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (1.5)$$

湍流动能耗散率ε的输运方程为:

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (1.6)$$

在直拉单晶硅过程中,辐射传热是不可忽略的换热机制。为此,本文引入基于斯蒂芬-玻尔兹曼定律的表面辐射模型,其辐射换热方程可表示为^[9]:

$$\mathbf{J} = \epsilon \mathbf{e}_b(T) + \rho_d \mathbf{G} \quad (1.7)$$

上述方程中 u 和 p 分别表示速度场和压力。 T 和 ρ 分别为温度梯度和介质密度。 k 表示湍动能, ϵ 表示其湍动能耗散率。对于热辐射, J 表示辐射亮度, 也即发射和反射的辐射通量之和。

1.3 模拟物性及工艺条件

本文所建单晶炉模型的坩埚半径为300 mm, 石墨、石英等主要材料的物性参数如表1所示。其中, 炉体保温层材料选择较为常见的碳毡, 其物性参数参考四川骏瑞碳纤维材料有限公司相关产品进行设置。

表1 单晶炉主要材料物性参数

物性	参数值
辐射系数	0.9 (石墨), 0.7 (石英), 0.6 (钢), 0.1 (碳毡)
热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	3 (石英), $k_{gas_3}(T)$ (氩气), 65 (石墨), 0.3 (碳毡), 44.5 (钢)
注: $k_{gas_3}(T)$ 表示导热系数为温度的分段多项式函数	

本文中模拟硅晶体生长的材料物性与工艺条件如表2所示, 其中, 硅棒直径和长度分别为100mm和700mm, 硅晶体生长环境为典型的高温、低速氩气流环境。

表2 硅晶体生长的材料物性与工艺条件

物性	参数值
硅的熔点/ K	1683
硅的密度/ $kg \cdot m^{-3}$	2340 (晶体), 2530 (熔体)
辐射系数	0.5 (硅晶体), 0.9 (硅熔体)
热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	43 (硅熔体), 21.5 (硅晶体)
比热容/ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	940 (硅晶体), 1000 (硅熔体)
晶体转速/ rpm	-5
坩埚转速/ rpm	5
氩气流量/ $L \cdot min^{-1}$	100
炉体压力/Pa	2500

2 实验与结果讨论

2.1 间隙宽度对温度场影响

由于碳毡柔韧性有限且表面粗糙度较高, 因此在制作多层结构时两层碳毡之间容易产生空隙。因此, 本文分析了不同间隙宽度对保温层性能的影响。在模拟过程中, 碳毡层数和厚度设置为15层和10mm且保持不变, 同时假设空隙内填充有不流动的空气。图2展示了间隙宽度从0.25mm增长至2mm时保温层内表面中心点(见图1)的温度变化情况。可以看到, 间隙宽度对保温层隔热性能具有显著影响, 并且在一定范围内间隙宽度的变化会引起保温层内表面温度上下波动。经分析可知, 当间隙宽度增大时, 由于保温层总厚度增加, 其导热阻力增大进而隔热性能提升; 但与此同时, 保温层最外层碳毡的表面积也随之增大, 从而导致其与外界空气间的对流传热阻力降低进而隔热性能下降。因此,

保温层导热阻力与对流传热阻力的共同作用可能是引起上述非线性效应的主要原因。

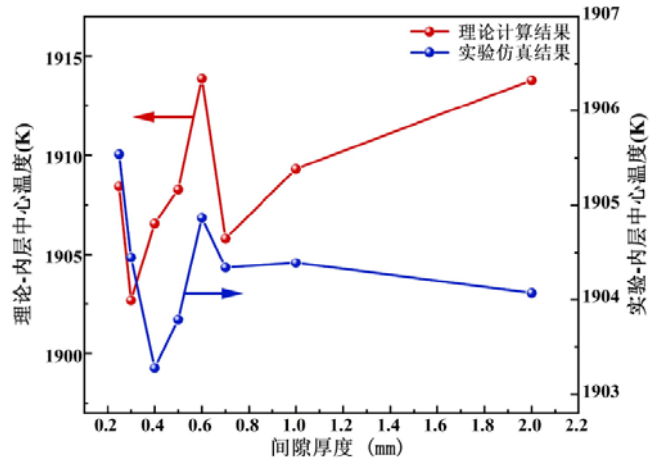


图2 保温层内表面中心点温度随间隙宽度的变化曲线

为验证上述分析, 本文对间隙宽度对多层保温结构的温度影响趋势进行了理论验证。单层保温结构(由碳毡与间隙构成)的内表面温度计算方法如下:

$$Q = \frac{\pi l(t_{fi} - t_{fo})}{\frac{1}{h_i d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o d_o}} \quad (2.1)$$

其中 l 为单层结构的长度, t_{fi}, t_{fo} 分别为内、外流体的温度, h_i, h_o 分别为内、外表面的对流换热系数, d_i, d_o 分别为内、外直径, λ 为碳毡的导热系数。基于上式建立多层保温结构的热力学模型并将计算结果与实验仿真进行对比^[10]。如图2所示, 两者展示了类似的非线性效应, 特别是在0.2mm-0.7mm的间隙范围内具有几乎一致的变化趋势。由此可见, 为了获得最佳隔热性能, 同时考虑避免厚度太低处于临界热绝缘半径或者厚度过高导致对流和辐射效应增强, 工程设计上建议选择0.6mm左右的间隙宽度设计保温层的多层结构。

2.2 层数配置对温度场影响

目前, 设计人员在确定单晶炉保温层的碳毡层数时多依赖生产经验, 无法保证达到成本效益的最优化。因此, 本文模拟了不同层数配置对碳毡多层结构隔热性能的影响, 为保温层设计提供理论依据。图3展示了单层碳毡厚度为10mm, 间隙宽度为0.6mm时, 保温层内表面中心点温度随碳毡层数的变化。如图所示, 随着碳毡层数的增加, 中心点温度呈现先快速增长后逐渐放缓的趋势。该现象表明, 在恒定热流边界的条件下, 增加碳毡层数相当于增大圆筒形保温层的导热热阻, 从而造成中心点温度上升。然而, 随着碳毡层数的不断增加, 新增热阻的贡献逐渐减小, 因此中心点温度的上升速度逐渐趋缓。当碳毡层数足够多时,

中心点温度将趋近于一个由热源功率、环境条件及材料导热性能共同决定的极限值。

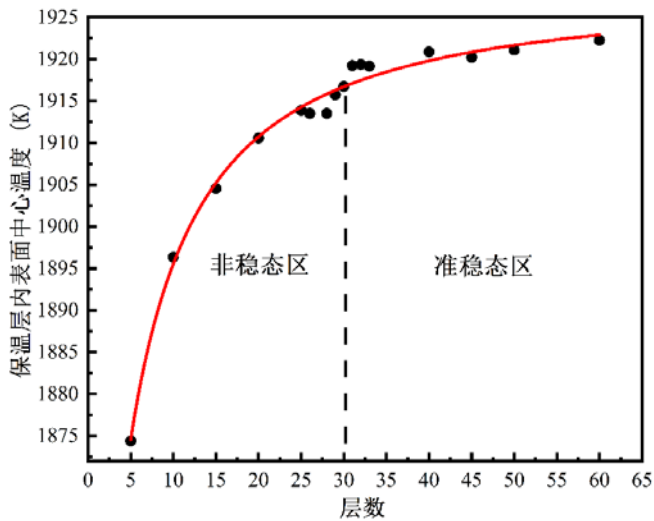


图3 保温层内表面中心点温度随碳毡层数的变化曲线

在本文实验中,当碳毡层数达到30层,内表面中心点温度开始趋于稳定,波动幅度小于 ± 1 K,可以认为继续增加碳毡层数对提升隔热性能意义不大。如果考虑设备体积和成本的增加,碳毡层数应避免进入图3中的准稳态区,而层数的最优化设计应进一步考虑隔热性能提升与设备成本增加之间的经济效益平衡。

3 结论

本文采用数值模拟系统探究了多层保温结构的间隙宽度与层数配置对单晶硅炉隔热性能及温度场分布的影响,明确了关键结构参数与热场特性的关联,为大尺寸单晶硅炉的热场优化提供了重要依据。研究结果显示,在保温层导热热阻和保温层外表面对流传热阻力的耦合作用下,间隙宽度对隔热性能呈现显著非线性影响。综合考虑隔热效果与结构稳定性,在工程上应选择0.6 mm为多层碳毡间隙的最优设计值。层数配置方面,在最优间隙下,保温层内表面温度随碳毡层数增加先快速增长后逐渐放缓,直至达到一定层数时趋于稳定,之后继续增加层数对隔热性能提升效果微弱。由此可见,保温层层数并非越多越好,而是需兼顾隔热效益与设备经济性。本文研究表明,经参数优化的

多层碳毡保温结构可有效降低炉体热损失,更适配大尺寸热场的高效保温需求,有助于降低单晶硅生产能耗。本研究成果可为单晶硅炉热场保温系统的轻量化、高效化设计提供理论支撑与工程参考,推动光伏用单晶硅制备技术向低耗高质方向发展。

【参考文献】

- [1]廖开峰,李太,张奇涛,等.单晶硅连续直拉(C CZ)制备技术研究进展[J].材料导报,1-18[2026-01-29].
- [2]邓先亮,任忠鸣,邓康,等.基于数值模拟的太阳能直拉硅单晶热场降耗研究[J].稀有金属材料与工程,2016,45(11):2907-2911.
- [3]康家铭,黄振玲,李太,等.大尺寸光伏单晶硅制备技术研究进展[J].太阳能学报,2025,46(03):310-319.
- [4]耿博耘,刘锋,韩焕鹏.单晶炉保温与热屏优化的数值模拟与改造[J].电子工业专用设备,2014,43(08):20-24.
- [5]徐浩然,赵旭,高昂,等.保温层结构对感应加热制备太阳能级多晶硅影响的数值模拟研究[J].人工晶体学报,2019,48(11):2003-2007+2031.
- [6]王世援,韩焕鹏,刘锋.碳/碳复合材料应用于直拉硅单晶生长的研究[J].电子工业专用设备,2011,40(04):29-33.
- [7]ZHANG W Y, GAO D D, WANG S, et al. Simulation of oxygen and carbon impurity transport during magnetically controlled Czochralski silicon growth[J].AIP Advances,2025,15(1):015103.
- [8]AZIZ A.The critical thickness of insulation[J].Heat Transfer Engineering,1997,18(2):61-91.
- [9]赵琪,刘奕豪,齐小方,等.垂直布里奇曼法 β -Ga₂O₃晶体生长过程中的内辐射传热研究[J].人工晶体学报,2026.
- [10]DAI W X, CHENG G G, ZHANG G L, et al. Investigation of circulation flow and slag-metal behavior in an industrial single snorkel refining furnace(SSRF): application to desulfurization[J].Metallurgical and Materials Transactions B,2020,51(1):357-370.

作者简介:

张博(1980—),男,汉族,江苏扬州人,博士研究生,教授,研究方向:光电器件与先进制造技术。