材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251030001

单晶硅光伏电池片加热腔体温流场模拟与工艺优化

王天赐，赵宇翔，闫诗伟，张　洪，赵军华，于培师*

（江南大学 机械工程学院 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室，江苏 无锡 214122）

摘　要： 为提升单晶硅光伏电池扩散制结工艺中管式石英腔体的温度均匀性，文章基于数值模拟与实验验证相结合的方法，构建并验证了加热腔体温流场的可靠性模型。在此基础上，系统分析了腔体额定工况下的温流场分布规律。结果表明，尽管腔体内气体流场分布较为均匀，但满足工艺温度均匀性的有效空间仅占总长度的65.92%。为进一步改善温度均匀性，针对腔体进气量和辅热电阻位置两个关键因素开展优化研究。优化结果表明，合理调节进气量和辅热电阻位置均能显著改善腔体内的温度均匀性，其中最佳工况下有效工艺空间利用率较原始条件提升约20%～30%。

关键词： 单晶硅光伏电池片；磷扩散制结；温度场；流场；温度均匀性

中图分类号： TN304.1　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0350－08

Thermal-Flow-Field Simulation and Process Optimization of Heating Chambers for Monocrystalline Silicon Photovoltaic Cells

WANG Tianci, ZHAO Yuxiang, YAN Shiwei, ZHANG Hong, ZHAO Junhua, YU Peishi

(**Jiangnan Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, CHN**)

Abstract: To improve the temperature uniformity of the tubular quartz chamber used in the diffusion junction process of monocrystalline silicon photovoltaic cells, this study establishes and validates a reliable model of temperature and flow fields within the heating chamber using numerical simulation combined with experimental verification. Based on this model, the distribution characteristics of temperature and flow fields under rated operating conditions are systematically analyzed. The results show that, whereas the gas flow field inside the chamber is relatively uniform, the effective space that satisfies the process temperature-uniformity requirement constitutes only 65.92% of the total length. To further enhance temperature uniformity, optimization studies are conducted on two key factors: the gas intake volume and the position of auxiliary heating resistors. The optimization results indicate that reasonable adjustments to both factors can significantly improve the temperature uniformity inside the chamber. Under the optimal operating conditions, the utilization rate of the effective process space increases by 20%～30% compared with the original conditions.

Key words: monocrystalline silicon solar cell; phosphorus diffusion junction formation; temperature field; flow field; thermal uniformity

收稿日期：2025－10－30.

基金项目：国家自然科学基金项目（12372078，12372109）；国家重点研发计划项目（2023YFB4605101）；江苏省重点项目（省市联合）（BK20243044）.

* **通信作者：**于培师

0　引言

在“双碳”目标驱动下，以光伏发电为代表的可再生能源逐步占据全球能源结构的主导地位[1]。过去20年间，光伏发电技术取得快速发展[2-4]，其中单晶硅磷扩散制结（n型层形成）作为光伏加工的核心工序之一，其所依赖的管式石英腔体的温度场与流场分布均匀性，直接影响磷原子扩散的动力学过程以及p-n结的界面形貌、结深一致性和掺杂浓度分布，最终决定电池片的光电转换效率[5-6]。因此，深入研究扩散腔体内部温度与流体分布的均匀性，对于提升光伏电池的生产质量与性能具有重要意义。

近年来，众多学者针对单晶硅光伏电池加热工艺开展了大量研究。在温度模拟与监测方面，乔继红[7]控制半导体加热器为太阳能电池加热，通过实时监控实现对太阳能电池准确加热；刘敏等[8]分析激光波长和脉冲宽度对加热深度以及晶圆背面温度的影响。在其他腔体温度场模拟方面，徐伟等[9]模拟研究生长炉内的温度分布规律及对SiC单晶生长速率的影响；严爱军[10]对250 t转炉温度场进行数值仿真得到转炉系统的温度场；Zareba等[11]提出一种新的连续退火炉的综合数学模型，该模型能够估计发射率等参数的最优值；Mayr等[12]将推钢式天然气加热炉的钢坯视为具有高粘度的流体，其模拟结果与测量结果展现出良好的一致性；Boschert等[13]发现炉体温度场对加热炉材料的热导率有很强的依赖性。在扩散工艺与结构优化方面，谢龙等[14]利用尺寸驱动法实现目前半导体工艺加热管道系统的快速设计；Zhou[15]对多晶硅薄膜LPCVD工艺进行模拟与实验对比，通过优化工艺参数使得多晶硅薄膜的沉积速率提高了13.0%。；Lee等[16]采用体心立方晶格磁芯使得半导体加热器件冷却器温度偏差降低了83.4%；Mondal等[17]探讨了不同激光掺杂工艺对单晶硅中磷原子的深度扩散的影响。在类似扩散工艺与结构优化方面，周军勇等[18]通过模拟管式真空热处理炉隔热层放置位置、厚度、材质等对均温区范围及其平均温度的影响，并优选设计参数；梁满朝等[19]对退火炉热传递情况进行仿真分析，并对退火炉内衬进行厚度的结构优化。

然而，现有研究在单晶硅光伏电池加热腔体方面仍存在不足。大多数工作聚焦于温度场模拟、监测与工艺参数优化，较少有研究系统揭示腔体温度均匀性影响因素并据此进行结构优化。这导致扩散腔体内部存在大范围空间无法满足温度均匀性要求，不仅降低了石英管腔体的空间利用率，还造成了能源浪费和工艺效率下降。

针对上述问题，本文结合传热学理论与有限元分析方法，建立了单晶硅光伏电池加热腔的模型，开展稳态温度场与流场的数值模拟研究。在此基础上，系统分析了温度与流场分布特性，并提出基于流场-热场协同优化的结构改进方案。研究结果表明，所提方法能够有效改善腔体内部的温度均匀性、提升空间利用率，同时显著降低实验验证成本。本工作为单晶硅光伏电池扩散工艺的生产优化与节能降耗提供了新的理论依据和技术支持。

1　理论基础

以石英腔体为研究对象，腔体内的热量传递主要通过热传导、对流换热和辐射传热三种方式共同作用。下面将从内部热生产率、热传导、对流换热、辐射传热等方面阐述理论依据。

1.1　焦耳定律

腔体加热源为电阻丝通电产生的热量，其发热功率由焦耳定律决定：

$$P = I^2 R \tag{1}$$

其中，电阻R取决于材料的电阻率（ρ）、长度（L）和横截面积（A）：

$$R = \rho A L \tag{2}$$

1.2　传热学模型

腔体周围的电阻丝产生的热量通过热传导与热辐射传递到腔体内部的单晶硅，同时腔体外壁与周围空气进行热对流，故采用热传导、热对流与热辐射来研究腔体内部的温度场[20]。

（1）热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换，其控制方程为：

$$q'' = -k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \tag{3}$$

式中，q为热流密度（W/m^2），k为导热系数（W/m·℃），“−”表示热量流向温度降低的方向。

（2）热对流

热对流是指固体的表面与其周围接触的流体之间，由于温差的存在引起的热量的交换。对流可用牛顿冷却方程来描述：

$$q' = h(T_S - T_B) \tag{4}$$

式中，h为对流换热系数，T_S为固体表面的温度，T_B为周围流体的温度。

(3)热辐射

热辐射指物体发射电磁能，并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬-波尔兹曼方程来计算：

$$q=\varepsilon\sigma A_{12}(T_1^4-T_2^4) \tag{5}$$

式中，q为热流率；ε为辐射率(黑度)；σ为斯蒂芬-波尔兹曼常数，约为5.67×10^8 W/m^{2}K^4；A_{12}为辐射换热面积；T_1为辐射面1的绝对温度；T_2为辐射面2的绝对温度。

1.3 流体力学湍流模型

腔体内部通入的高温蒸汽化的三氯氧磷为不可压缩、黏性、湍流，其中气流多为附面层气流和管道流。标准k-ε湍流模型稳定性高，能兼顾计算效率与模拟精度，便于应用[21]。因此，本文采用标准k-ε湍流模型，其中k代表湍流脉动动能，ε代表紊流脉动动能耗散率，具体方程如下：

k方程：

$$\rho\frac{\delta k}{\delta t}+\rho u_j\frac{\delta k}{\delta x_j}=\frac{\delta}{\delta x_j}\left[\left(\eta+\frac{\eta_i}{\sigma_k}\right)\frac{\delta k}{\delta x_j}\right]+\eta_i\frac{\delta u_i}{\delta x_j}\left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j}+\frac{\delta u_j}{\delta x_i}\right)-p\varepsilon \tag{6}$$

ε方程：

$$\rho\frac{\delta\varepsilon}{\delta t}+\rho u_k\frac{\delta\varepsilon}{\delta x_k}=\frac{\delta}{\delta x_k}\left[\left(\eta+\frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\delta\varepsilon}{\delta x_k}\right]+\frac{c_1\varepsilon}{k}\eta_t\frac{\delta u_i}{\delta x_j}\left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j}+\frac{\delta u_j}{\delta x_i}\right)-c_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{7}$$

其中：

$$\eta_t=\frac{c_\mu\rho k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

式中，x，y，z分别为空间坐标系3个坐标轴的正方向；u为动力粘度；ρ为密度；c_μ=0.09，c_1=1.44，c_2=1.92，σ_k=1.3。

2 模拟方法与数值模型验证

2.1 模拟方法

在单晶硅光伏电池加热工艺中，准确掌握加热腔体内的温度场与流场分布十分重要。由于测温点有限，实验难以全面反映炉内温度分布，选择采用数值模拟进行研究。基于有限元方法建立简化的圆柱形加热腔模型，赋予电阻丝单位体积功率并通入气流，模拟石英管腔体的稳态温度场与流场。通过与实验测温数据对比，验证了模型的可靠性。

2.2 加热腔体结构

所研究的单晶硅光伏电池加热腔的主要结构见图1和表1。腔体尾部设有进气管，气体经匀流板进入腔体中部后均匀流过，并经尾部出气管排出。出气管旁插入一根放置六个热电偶的石英管用于温度测量。炉体外壁缠绕六组电阻丝，下方布置四组辅热电阻，外层包覆保温棉以减少热损失。

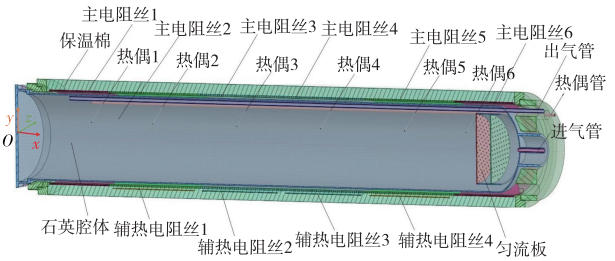


图1 单晶硅光伏电池加热腔结构原理简图

表1 单晶硅光伏电池加热腔结构参数

参数	数值
腔体长度/mm	4 230
腔体直径/mm	490
进气管直径/mm	16
进气管长度/mm	100
出气管直径/mm	18
出气管长度/mm	3 809
热电偶数目/个	6
匀流板直径/mm	410
匀流板层数/层	2
电阻丝直径/mm	7.5
主电阻组数/组	6
辅热电阻组数/组	4

2.3 腔体温度场模拟

由于加热腔体尺寸较大，为节约算力并增加模拟的准确性，通过对进出气管、匀流板等相对微小结构进行加密，最小网格单元尺寸为2 mm，最大为80 mm。划分得到边界节点数为1 303 958，内部节点数为8 892 230，单元数为2 755 563个。腔体外壁的等效对流系数为11.94 W/(m^2·K)，模拟结构材料参数如表2所示[22]。

通过在模拟模型中设置与实验相同位置测温点来检测腔内温度，以腔体盖中心为原点(图1)监测点xyz坐标为：监测点1(639，200，115.5)；监测点2(1 155，200，115.5)；监测点3(1 862，200，115.5)；监测点4(2 570，200，115.5)；监测点5(3 275，200，115.5)；监测点6(3 790，200，115.5)。

表 2　加热腔模拟材料参数

结构/材料	参数			
	ρ/(kg/m^3)	λ/[W/(m•K)]	c/[J/(kg•K)]	ε/(W•Sr/m^2)
腔体/SiO_2	2 200	2.5	705	0.95
电阻丝/0$Cr_{21}Al_6Nb$	7 100	13	540	0.18
保温棉/硅酸铝	300	0.06	1 200	0.7
匀流板/SiO_2	2 200	2.5	705	0.95

图 2 和表 3 分别表示腔内 6 个热偶监测点的模拟仿真温度变化与最终稳态时的温度。当腔体内部温度趋于平衡时，此时腔体温度整体约为 530℃。

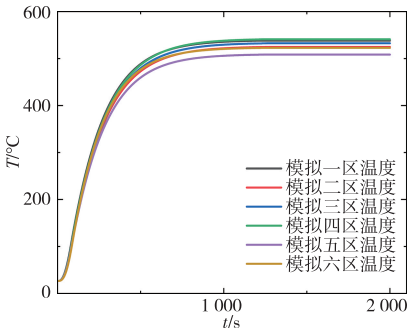


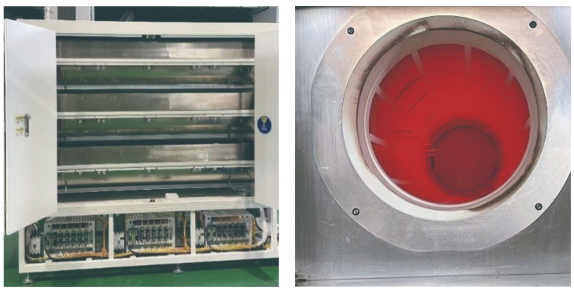
图 2　监测点温度变化曲线

表 3　模拟检测点稳态温度

参数	监测点 1	监测点 2	监测点 3	监测点 4	监测点 5	监测点 6
T/℃	538	531	532	541	508	522

2.4　腔体温度场实验

在室温 26℃下，炉内主电阻通入电流加热腔体至温度稳定，通过热电偶测量腔内对应监测点的温度。实验对象如图 3 所示。



（a）腔体设备外观　　（b）腔体内部

图 3　加热腔实际结构

各个主电阻的功率在稳态时的数值如表 4 所示，腔体内不同位置的热电偶所测量的腔内温度变化曲线如图 4 所示。

观察图 4 可以发现，实验温度在上升过程中接近于线性，当电阻丝产生的焦耳热功率保持恒定时，腔体内的空气、壁面及热偶所在位置吸收的热量随时间均匀增加。在实验热损失较小的条件下，

表 4　电阻功率具体参数

温区	稳态功率/kW	Q_b/(kW/m^3)
主电阻 1	11	1 723.798
主电阻 2	13	1 363.579
主电阻 3	12	1 348.592
主电阻 4	13	1 460.974
主电阻 5	11.5	1 206.243
主电阻 6	10	1 567.089

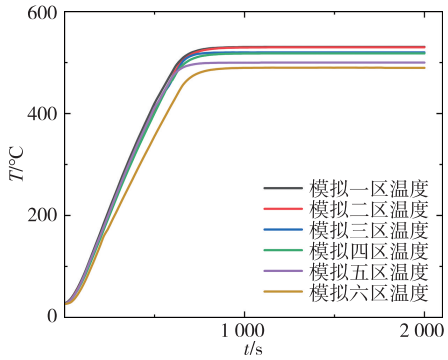


图 4　热偶监测温度变化曲线

系统的能量平衡可表示为：

$$P = mc\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} \tag{9}$$

式中，P 为电阻丝的加热功率（恒定），m 为腔体及空气等受热部分的等效质量，c 为等效比热容，T 为腔体温度，t 为时间。

积分得：

$$T(t) = T_0 + \frac{P}{mc}t \tag{10}$$

由此可见，在恒定热功率输入时，温度随时间呈接近线性上升过程。表 5 为不同位置热偶稳态时所测温度。

表 5　稳态下热偶所测温度

参数	一区	二区	三区	四区	五区	六区
T/℃	530	530	520	518	500	490

2.5　模拟与实验结果对比与分析

当腔体温度趋于稳态时，二者温度对比及误差如表 6 所示。由各监测点温度结果可知，模拟与实验腔体前端温度较高，尾部温度逐渐降低。在实验与模拟均未通入气体的情况下，由于模拟腔体尾部设置了匀流板，末端监测点（监测点 6）出现温度上升波动；而实验中未设置匀流板，尾部温度整体呈平稳下降趋势。各监测点温度误差均在允许范围内，表明所建立的数值模型能够较好反映加热腔体的实际特性，可用于后续不同工况下的模拟研究，为实际生产提供参考与指导。

表 6 实验与模拟稳态温度对比

参数	一区	二区	三区	四区	五区	六区
模拟 T/℃	538	531	532	541	522	508
实验 T/℃	530	530	520	518	500	490
误差/%	1.6	0.1	0.51	4.5	4.4	3.6

3 额定工况模拟分析与结构优化

3.1 额定工况模拟与分析

在验证数值模型后，下面对该加热腔体在标准工况下的温流场进行模拟分析。标准工况下的腔体进气量为 50 L/min，表 7 为主电阻与辅热电阻在标准工况下的功率参数。

表 7 标况下电阻稳态功率具体参数

电阻区域	W/kW	Q_b/(kW/m^3)
主电阻 1	21.6	3 384.91
主电阻 2	20	2 097.80
主电阻 3	20	2 247.65
主电阻 4	20	2 247.65
主电阻 5	20	2 097.80
主电阻 6	21.6	3 384.91
辅热电阻 1	2.41	3 347.15
辅热电阻 2	2.28	3 567.35
辅热电阻 3	2.28	3 567.35
辅热电阻 4	2.41	3 347.15

（1）温度场模拟与分析

通过模拟计算得出腔体横截面温度云图（图 5）与腔体中心轴线温度变化曲线（图 6）。可以看出，腔体温度右端整体低于腔体左端，整体存在一定的温度梯度，均温区较短。

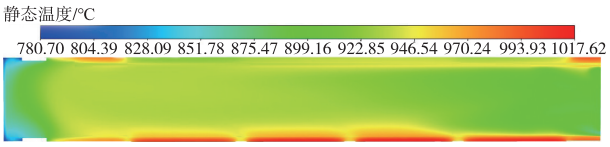


图 5 标况腔体温度云图

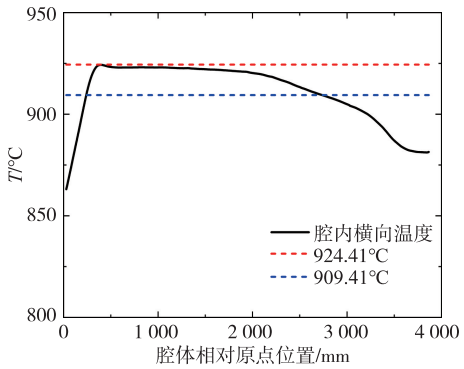


图 6 额定工况腔体中心轴线温度曲线

由于设备限制无法进行相对应的实验验证，高温下误差可能会随温度的升高有所增大，但根据模型在验证时的良好表现，误差的增大应当是渐进的。基于此，模型的预测在 950℃左右温度下仍然具有较高的可靠性。

（2）流场模拟与分析

图 7 为腔体内部流体速度云图，可以看出腔体内部整体的气体流动均匀性较好。

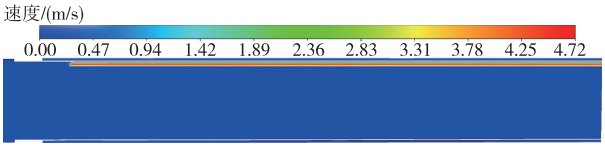


图 7 额定工况腔体流场速度云图

由腔内监测点测出腔内气体平均速度为 0.004 6 m/s。理论上，进气量为 50 L/min，腔内直径为 490 mm，由公式（11）计算得出，腔体内部理论气体流速为 0.004 42 m/s，略小于模拟气体流速，由此验证模拟腔体内部气体分布云图较为合理。

$$v=\frac{Q}{A} \tag{11}$$

式中，v 为腔内气体流速（m/s）；Q 为腔内气体流量，约为 50 L/min；A 为腔内横截面面积，约为 0.188 5 m^2。

（3）温流场分析与优化方向确定

腔体内流场分布较为均匀，但温度场均匀性仍有提升空间。单晶硅电池加热工艺对温度均匀性要求严格，本研究以温差控制在 ±7.5℃为评价标准。计算结果表明，标况下腔体均温区长度为 2 493.69 mm，占可用长度的 65.92%。气流由右向左传热导致左端温度偏高，削弱整体均匀性。通过降低进气量与右移辅热电阻，可分别抑制热量前移并增强末端补偿，从而改善温度分布。

3.2 腔体进气量对温度场的影响探究

（1）改变气体流量对均温区长度的影响

在保持其他工况不变的条件下，通过改变气体流量研究其对均温区长度的影响。模拟结果表明，随着气体流量增大，腔体端部温度升高，尾部温度下降。当流量为 19.3 L/min 时，两端温度接近；继续增大流量则温差扩大，均温区长度减小。

图 8 为进气量对均温区长度影响的点线图，可以看出当进气量为 19.3 L/min 时均温区长度最长。此时腔体内的温度曲线如图 9 所示，平均温度在 940℃左右，此时有效均温区长达 3 574 mm，空间利用率达 94.48%。

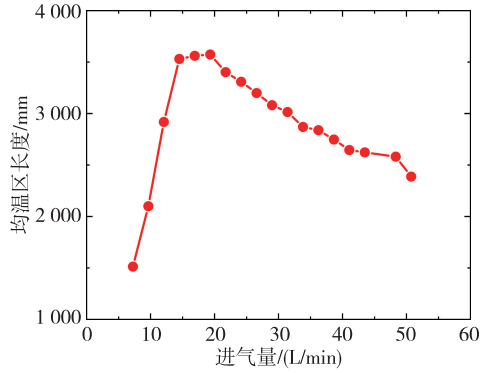


图 8　进气量对均温区长度的影响

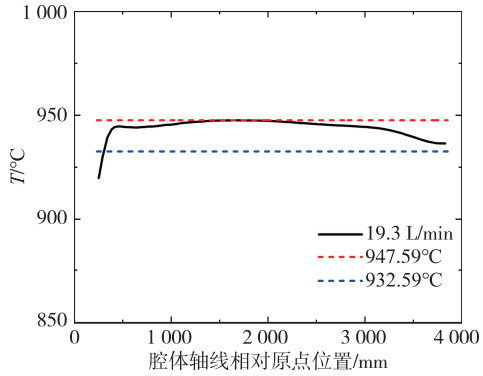


图 9　进气量为 19.3 L/min 时的温度曲线

此时腔体内部流场分布如图 10 所示，可以看出在进气量降低的情况下，腔体内部的流场分布总体较为均匀。

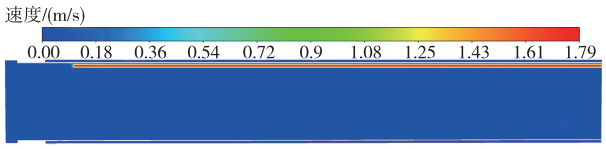


图 10　进气量为 19.3 L/min 时的流场云图

（2）优化结果对比

通过标况与探究较佳的进气量腔体内温度曲线对比（图 11）和温度云图对比（图 12）可以看出，优化进气量后腔体整体的温度分布较均匀。

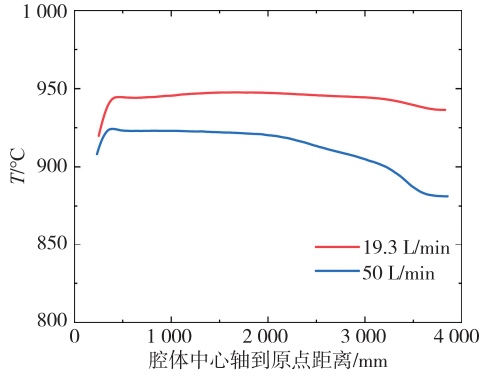
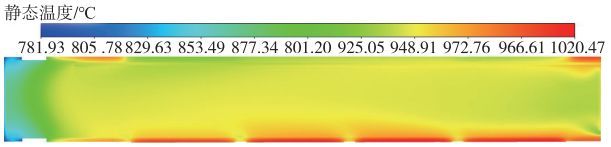
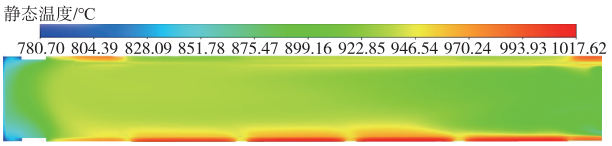


图 11　不同工况下腔体内温度分布



（a）19.3 L/min 进气量下的温度云图



（b）50 L/min 进气量下的温度云图

图 12　优化进气量与标桩工况下的温度云图对比

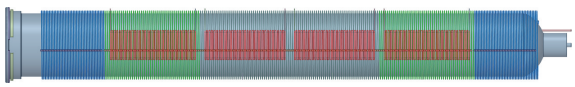
该模拟研究显著降低了实验成本，并为实际生产中气体流量的优化提供参考，使腔体空间利用率由 65.92% 提升至 94.48%，在节能的同时提高了材料加工效率。

3.3　辅热电阻位置对温流场的影响

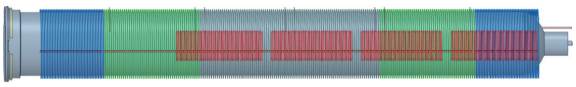
在标准工况下尾端温度整体低于前端，故拟通过将辅热电阻向腔体尾部移动，以增强尾部的热量补偿，提升腔体整体的温度均匀性。

（1）改变辅热电阻位置对均温区长度的影响

通过整体将辅热电阻水平向腔体尾部移动（图 13），探究此方向上的不同位置的辅热电阻对腔体内部温度场的影响，并尝试找到较佳的辅热电阻位置，从而优化腔体内部的温度均匀性，提高腔体加热空间的利用率。



（a）辅热电阻移动前相对石英腔体的位置



（b）辅热电阻移动后相对石英腔体的位置

图 13　辅热电阻移动位置前后对比

图 14 为辅热电阻在逐步向腔体尾部平移过程中，不同位置所测得的有效加热空间长度。在此过程中，有效温区存在一定的波动，但整体呈现增加的趋势并在相对移动 380 mm 处达到峰值，此时有效温区长度为 3 231 mm，随后有效温区长度有所下降，并在 3 050 mm 左右趋于稳定。

图 15 为腔体内部延水平方向移动 380 mm 的温度曲线，整体温度变化幅度较小，满足温度均匀性的空间较长，达到 3 231 mm。

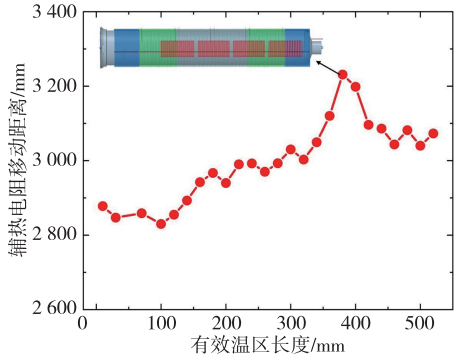


图 14 辅热电阻位置对有效温区的影响

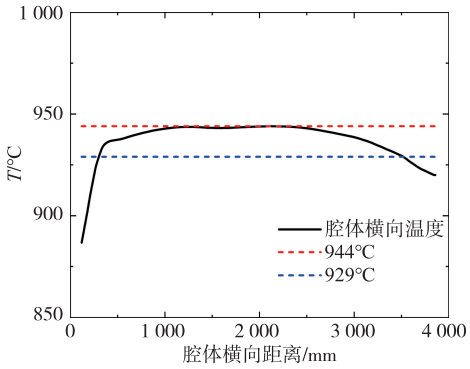


图 15 辅热电阻相对移动 380 mm 时腔体内部温度曲线

(2)优化结果对比

图 16 和图 17 分别为辅热电阻优化温度曲线与标准工况下的温度曲线与温度云图对比。优化后的腔体内部温度曲线相对未优化的温度曲线变化幅度减小,温度分布更均匀。

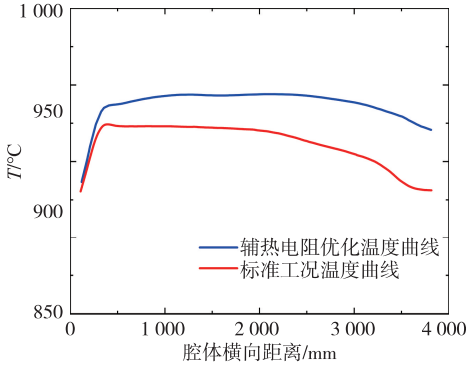
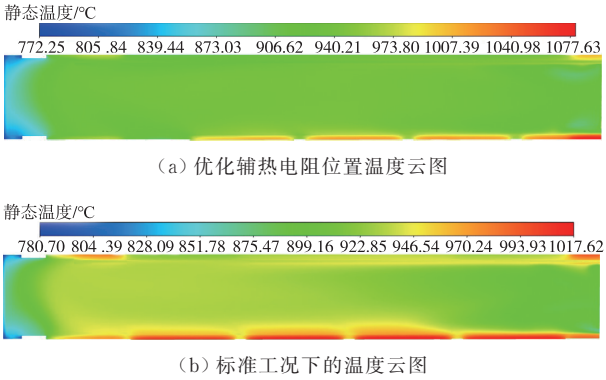


图 16 辅热电阻优化温度曲线与标准工况下的温度曲线对比

结果表明,辅热电阻移动后,腔体有效温区长度增至 3 231 mm,横向利用率由 65.92% 提升至 85.41%。这说明调整辅热电阻位置可显著改善温度均匀性并提高空间利用率,该数值模拟方法有效降低了实验成本,为加热腔结构优化提供了理论依据。



(a) 优化辅热电阻位置温度云图

(b) 标准工况下的温度云图

图 17 辅热电阻优化温度曲线与标准工况下的温度云图对比

4 结论

本文采用有限元方法建立单晶硅光伏电池加热腔体的数值模型,并结合实验验证模型的可靠性。在此基础上,对腔体额定工况下的温度场与流场分布进行系统分析,并提出通过优化进气量与调整辅热电阻位置来改善温度均匀性的方案。主要结论如下:

(1)通过建立加热腔体简化模型并与实验结果对比,最大误差为 6.7%,验证了所建数值模型可用于石英管加热腔体的温度场与流场模拟。

(2)在额定工况下,腔体内部流场分布较为均匀,但温度均匀性不足,其横向空间利用率仅为 65.92%。据此提出进气量优化与辅热电阻位置调整两种改进方案。

(3)在不改变腔体结构的前提下,优化进气量可显著改善温度均匀性。当进气量为 19.3 L/min 时,满足工艺要求的有效空间长度增加至 3 574 mm,空间利用率提升至 94.48%,相较标准工况提高 28.56%。

(4)在进气量不变的条件下,辅热电阻整体向腔体尾部移动 380 mm,可使有效温区长度增加至 3 231 mm,对应横向利用率为 85.41%,较标准工况提升 19.49%。

参考文献:

[1] 高 翔. 光伏电站用储能电池的发展现状及应用前景综述[J]. 太阳能, 2022(9): 15-21.
Gao Xiang. Overview of development status and application prospect of energy storage batteries for pv power station[J]. Solar Energy, 2022(9): 15-21.

[2] Helveston J P, He G, Davidson M R. Quantifying the cost savings of global solar photovoltaic supply chains[J]. Nature,

2022, 612(7938): 83-87.

[3] Jiang T, Yin P, Jin Q. Performances of typical photovoltaic module production from the perspective of life cycle sustainability assessment[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024, 64: 103703.

[4] Liu L, Liu W, Yao J, et al. Life cycle energy, economic, and environmental analysis for the direct-expansion photovoltaic-thermal heat pump system in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 139730.

[5] 吴鑫亮, 李　鸿. 太阳能电池生产项目节能研究[J]. 价值工程, 2024, 43(8): 49-52.
Wu Xinliang, Li Hong. Energy saving research on solar cell production projects[J]. Value Engineering, 2024, 43(8): 49-52.

[6] Malhotra C P, Mahajan R L, Sampath W S, et al. Control of temperature uniformity during the manufacture of stable thin-film photovoltaic devices[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(17-18): 2840-2850.

[7] 乔继红. 用于太阳能电池检测的加热系统设计[J]. 制造业自动化, 2013, 35(23): 147-149, 156.
Qiao Jihong. A heating unit designed for solar cell detection system[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(23): 147-149, 156.

[8] 刘　敏, 郑　柳, 何　志, 等. 激光退火硅晶圆温度场分布的数值模拟研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(4): 515-521.
Liu Min, Zheng Liu, He Zhi, et al. Numerical simulation of temperature field distribution induced by laser annealing in silicon wafer[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(4): 515-521.

[9] 徐　伟, 刘雪绞. SiC单晶生长炉温度场有限元分析及模拟[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2008, 22(11): 42-46.
Xu Wei, Liu Xuejiao. Finite element analysis and simulation study on temperature field of silicon carbide single crystal growth furnace [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2008, 22(11): 42-46.

[10] 严爱军. 基于ANSYS的250t转炉温度场有限元仿真分析[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(3): 255-258.
Yan Aijun. ANSYS-based FE simulation analysis of the temperature field of a 250 t converter[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2010, 33(3): 255-258.

[11] Zareba S, Wolff A, Jelali M. Mathematical modelling and parameter identification of a stainless steel annealing furnace [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2016, 60: 15-39.

[12] Mayr B, Prieler R, Demuth M, et al. CFD analysis of a pusher type reheating furnace and the billet heating characteristic[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 986-994.

[13] Boschert S, Dold P, Benz K W. Modelling of the temperature distribution in a three-zone resistance furnace: influence of furnace configuration and ampoule position[J]. Journal of Crystal Growth, 1998, 187(1): 140-149.

[14] 谢　龙, 胡　凯, 周　清, 等. 半导体工艺加热管道系统高效设计与装配研究[J]. 机械工程师, 2023(5): 146-149.
Xie Long, Hu Kai, Zhou Qing, et al. Study on efficient design and assembly for pipeline system of semiconductor technology[J]. Mechanical Engineer, 2023(5): 146-149.

[15] Zhou J, Lv B, Liang H, et al. Simulation and optimization of polysilicon thin film deposition in a 3000 mm tubular LPCVD reactor[J]. Solar Energy, 2023, 253: 462-471.

[16] Lee S Y, Kim K W, Kim D H, et al. Optimization study on the uniform temperature of an additively manufactured cooler for a semiconductor heating device[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 120178.

[17] Mondal S, Solanki C S. Deep diffusion of phosphorus in silicon using microsecond-pulsed laser doping[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, 59: 10-17.

[18] 周军勇, 俞能君, 金向阳, 等. 基于ANSYS的真空热处理炉的温度场分析[J]. 热加工工艺, 2024, 53(8): 31-37.
Zhou Junyong, Yu Nengjun, Jin Xiangyang, et al. Analysis on temperature field in vacuum heat treatment furnace based on ANSYS[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(8): 31-37.

[19] 梁满朝, 伍玉霞. 基于ANSYS Workbench退火机退火炉的结构优化[J]. 大众科技, 2014, 16(12): 61-64.
Liang Manchao, Wu Yuxia. Structure optimization of annealingfurnace based on ANSYS workbench[J]. Dazhong Keji, 2014, 16(12): 61-64.

[20] 张兴中. 传热学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 179.
Zhang Xingzhong. Heat Transmission Science[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 179.

[21] 张攀,李红艳,张国栋. 流体力学基础(第2版)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2022:203
Zhang Pan, Li Hongyan, Zhang Guodong. Fundamentals of Fluid Mechanics (2nd Edition)[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2022: 203.

[22] 杜燕军. 直拉硅单晶生长过程温度场建模与数值分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
Du Yanjun. Modeling and numerical analysis of temperature field in the growth process of czochralski silicon[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

作者简介：

王天赐(2000—),男,安徽省阜阳市人,硕士研究生,主要研究方向:流体有限元分析;

于培师(1982—),男,山东省济南市人,教授、博士生导师,主要研究方向:机电一体化装备与智能传感3D打印。