第 33 卷第 1 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.33, No.1
2012 年 1 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Jan., 2012

氩气流量对多晶硅定向凝固炉热场的影响

李早阳[1] 刘立军[1] 马文成[1] 余庆华[1] 李 凯[2]

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院，陕西 西安 710049； 2. 中国科学院微重力重点实验室，北京 100190)

摘 要 耦合求解了多晶硅定向凝固炉内热传导、热辐射、熔体和氩气热对流等各种耦合换热，比较分析了不同氩气流量下定向凝固炉内部热场分布和硅熔体流动结构。结果表明，当氩气流量增大到一定值时，氩气流对凝固过程中硅熔体流动和热输运的影响显著增强。

关键词 氩气流；多晶硅铸锭；定向凝固；数值模拟

中图分类号: O782 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2012)01-0143-03

Effects of Argon Flow Rate on the Thermal Field in a Casting Furnace for Multi-Crystalline Silicon

LI Zao-Yang[1] LIU Li-Jun[1] MA Wen-Cheng[1] YU Qing-Hua[1] LI Kai[2]

(1. *School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*
2. *Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China*)

Abstract Thermal conduction, thermal radiation, silicon melt and argon gas convection in a casting furnace for multi-crystalline silicon ingot were solved in a coupled way. The effects of argon flow rate on the global thermal field and the silicon melt flow were investigated. The results showed that the argon flow could significantly influence the melt convection and heat transport in a casting process when the argon gas flow rate exceeds a critical value.

Key words argon flow; multi-crystalline silicon ingot; directional solidification; numerical simulation

0 引 言

在太阳能光伏产业中，铸造多晶硅以其相对低成本、高效率的优势成为目前最有竞争力的太阳电池材料。生产铸造多晶硅的主要设备为定向凝固炉。定向凝固炉是一个包含对流、传导、辐射及相变换热的高度非线性强耦合的热系统。凝固过程中保护气体 (氩气) 既能提供一定的炉腔压力，又能减缓高温炉内活性气体之间的化学反应，并带走炉腔内的化学反应杂质，同时，氩气流动还影响整个定向凝固炉内热场、坩埚内的硅熔体流动，进而影响硅熔体的凝固界面形状和铸锭内的杂质分布。因此，要有效控制多晶硅的定向凝固过程，就必须对定向凝固炉内氩气的流动结构进行分析和控制。

目前研究高温环境下晶体生长的方法主要有实验研究和数值模拟。一些学者也曾针对晶体生长过程中氩气的作用做过相关实验和模拟 [1−4]。然而，氩气流动对多晶硅定向凝固过程中热量交换、熔体流动及固液凝固界面形状影响的研究，则鲜见报道。

本文对多晶硅定向凝固炉内热传导、热对流和热辐射进行全局耦合求解。与文献 [4] 中使用的气相－液相单向耦合不同，本文在计算定向凝固炉内热场、流场时，将气体域同其他计算域的温度及速度边界条件完全双向耦合起来，揭示了不同氩气流量下，气体本身流动结构的变化及其对凝固炉内温度分布、熔体流动的影响，为有效控制多晶硅生产过程提供了理论依据，并为后续更为精确的杂质输运计算和控制奠定了基础。

1 数值计算模型

图 1 为本文研究的太阳能级多晶硅铸锭实验炉的结构简图和网格划分。炉膛内布置有三组加热器，

收稿日期: 2011-01-11; **修订日期**: 2011-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50876084)；教育部新世纪优秀人才支持计划 (No.NCET-08-0442)；中央高校基本科研业务费专项资金、中国科学院微重力重点实验室资助项目

作者简介: 李早阳 (1984−)，男，河南洛阳人，博士研究生，主要从事晶体生长过程的数值模拟研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实验中仅利用侧面两组。坩埚内径 100 mm，铸锭高度 100 mm，硅的熔点为 1685 K。计算中将整个定向凝固炉区域划分为 14 个子区域分别进行离散，如图 1 中各编号所示。其中 14 所代表的复杂形状连通域为氩气流动区域，15 为氩气流动的入口，16 为氩气流动出口。为了提高计算效率，对于几何形状规则的区域采用结构化网格进行离散，对于氩气流动域这样不规则的复杂区域采用三角形非结构化网格离散 [5]。

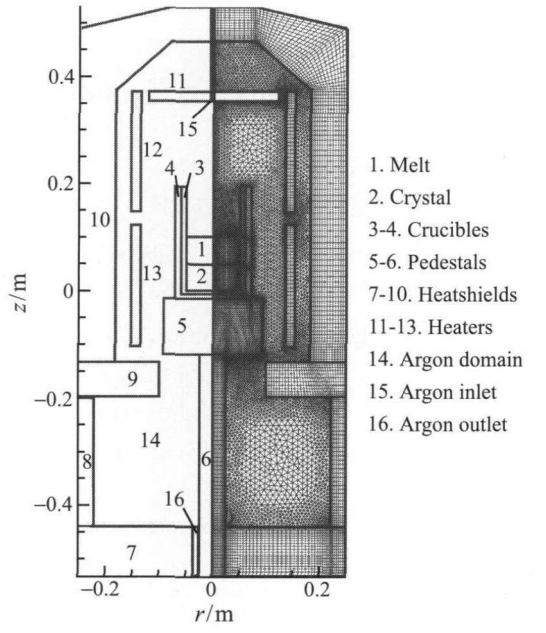

图 1 定向凝固炉结构、尺寸及网格划分

Fig. 1 Configuration, dimensions and computation grids of a directional solidification furnace

为了更加准确反映凝固炉内的流动、传热现象，本文耦合求解了包括热传导、热对流、热辐射和固液相变在内的各种换热现象。计算中给定炉壁外侧温度为 300 K，加热器功率给定，固液凝固界面与 1685 K 等温线一致。关于全局热场计算的实施方案已发表在文献 [6]。

在对氩气流动进行计算时，由于氩气密度的改变是由温度的变化引起的，因此在计算氩气流动时采用了低马赫数近似 [7]。关于氩气流动的控制方程及相应的边界条件，已发表于文献 [5]。

2 结果分析与讨论

本文研究了在一定炉腔压力下 (101325 Pa) 结晶高度为 50 mm 时，氩气流量对整个定向凝固炉内热场、熔体内部流动及温度分布的影响。氩气入口速度分别设为 0.5 m/s, 1.0 m/s, 2.0 m/s 和 3.0 m/s，对应的体积流量为 0.826 L/min, 1.652 L/min, 3.303 L/min 和 4.955 L/min (101325 Pa, 300 K)。

图 2 所示为不同氩气流速下炉腔上部空间温度分布及氩气流速矢量图。图中上部及侧部分别对应图 1 中 11、12 两个加热器，1700 K 所在位置为硅熔体自由表面附近的气体区域。

从图 2(a) 中可以看出，当氩气流速很小时，气流很难到达硅熔体表面，只在炉腔上部形成一个较大的涡。此时气体流动基本不影响硅熔体对流，从硅熔体自由表面挥发出来的碳、氧等杂质也很难被及时带走。随着入口氩气流速的增加，气流能够到达硅熔体自由表面。在黏性力的作用下，气体流动将影响硅熔体对流，并且气体流速越大，影响越明显。从图 2(c)、(d) 中可以看出，当气体流速增大时，将在熔体自由表面上部形成一个小的回旋涡，影响硅熔体中杂质的挥发和输运。

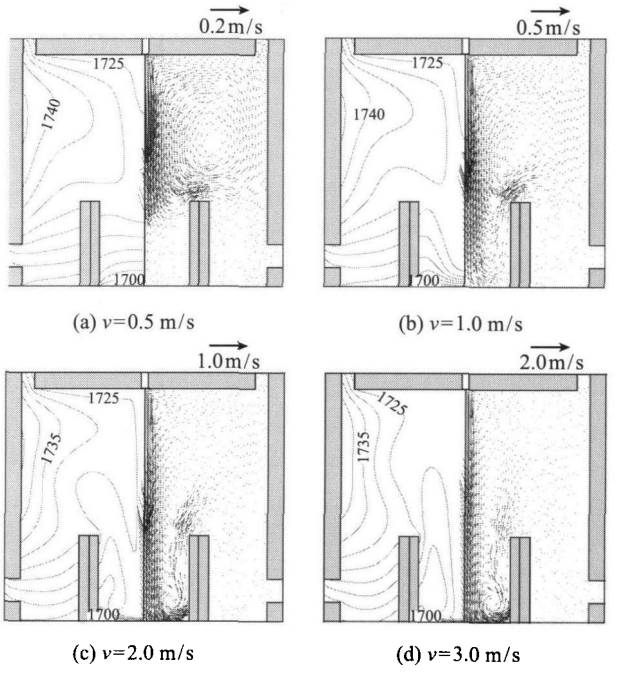

图 2 不同氩气流速下炉腔上部空间温度分布 (左侧，等温线间隔为 5 K) 及氩气速度矢量图 (右侧)

Fig. 2 Distributions of temperature (left) and gas velocity (right) in the upper furnace chamber for different argon flow rates

从图 2 中温度分布可以看出，炉腔内部温度分布随氩气流速变化明显，尤其是硅熔体自由表面上部空间。对比四幅图中 1700 K 等温线所在区域可知，随着氩气流速的增大，熔体自由表面的等温线变得密集，对应的温度梯度增大，气体与熔体的换热量增加。该换热量将会影响熔体内部温度分布及

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

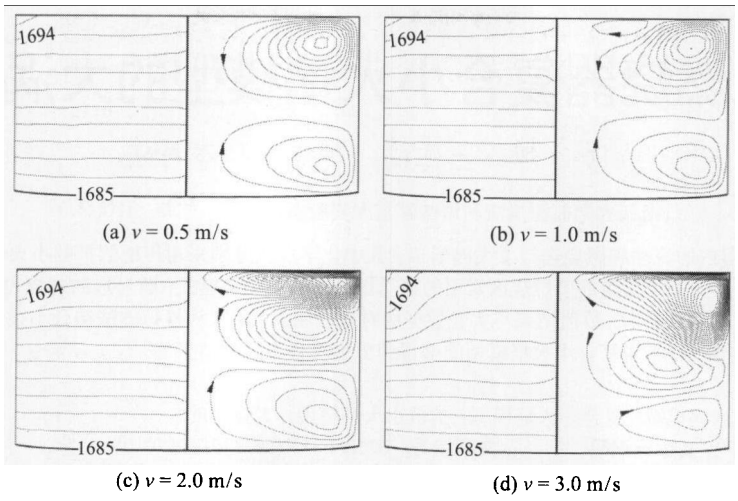

图 3 不同氩气流速下熔体温度 (左侧, 等值线间隔为 1 K) 与流线 (右侧) 分布

Fig. 3 Distributions of temperature (left) and stream lines (right) in the melt for different argon flow rates

流动结构。同时可以发现，加热器附近氩气流动区域温度梯度相对较小，与辐射换热相比，加热器壁面附近由于气体流动而带走的热量所占比例相对较小。同时根据全局模拟结果可知，除了受氩气直接冲击的硅熔体自由表面外，其他固体表面由于氩气流动而产生的热量交换与辐射换热相比份额很小。

图 3 所示为不同氩气流速下，结晶高度为 50 mm 时硅熔体内部的温度与流线分布。其中图下侧 1685 K 等温线所在位置即为固液凝固界面。

从图 3(a) 中可以看出，当氩气流速很小时，由于气流很难到达硅熔体自由表面，对熔体流动影响很小，此时熔体内部流动结构与没有气体作用时基本一致。随着气流速度的增加，气体到达硅熔体表面，在气体黏性力的作用下，熔体内部流动结构发生明显变化。从图 3(b) 中可以看出，当气体速度增加到 1.0 m/s 时，熔体表面靠近中心轴部位熔体的流动方向发生改变。当气体流速超过 2.0 m/s 时，整个熔体表面速度方向均为径向朝外，熔体内部流动结构发生本质变化，由图 3(a) 中的两个涡旋转化为上、中、下三个涡旋。同时，伴随着熔体流动结构的变化，熔体内部温度分布也随之发生变化。对比不同氩气流量下的结果发现，随着气体入口速度的增大，熔体中心轴向温度梯度减小。硅熔体内流动结构及温度分布的变化将会进一步影响固液凝固界面形状和熔体内部的杂质输运，最终影响铸锭品质。

3 结　论

本文对太阳能级多晶硅定向凝固系统进行了数值建模，耦合求解了炉内热传导、热对流、热辐射和固液相变等各种换热现象，分析了不同氩气流速下炉腔内温度、速度分布，揭示了气体作用下硅熔体的流动规律。模拟结果表明，当氩气流量增大到某一临界值时，氩气流量将显著影响炉腔内部温度分布，改变炉腔内气体流动结构及气液界面的热量交换，从而显著影响硅熔体内部的流动结构和温度分布，最终影响铸锭品质。

参 考 文 献

[1] Machida N, Suzuki Y, Abe K, et al. The Effects of Argon Flow Rate and Furnace Pressure on Oxygen Concentration in Czochralski-Grown Silicon Crystals [J]. Journal of Crystal Growth, 1998, 186: 362–368

[2] REN Bingyan, ZHAO Long, ZHAO Xiuling, et al. Effects of Argon Gas Flow Rate and Guide Shell on Oxygen Concentration in Czochralski Silicon Growth [J]. Rare Metals, 2006, 25(1): 7–10

[3] Kalaev V V, Evstratov I, Makarov Yu. Gas Flow Effect on Global Heat Transport and Melt Convection in Czochralski Silicon Growth [J]. Journal of Crystal Growth, 2003, 249: 87–99

[4] GAO Bing, Nakano S, Kakimoto K. Global Simulation of Coupled Carbon and Oxygen Transport in a Unidirectional Solidification Furnace for Solar Cells [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 157(2): H153–H159

[5] LI Zaoyang, LIU Lijun, Kakimoto K. Development and Application of a Structured/Unstructured Combined Mesh Scheme for Global Modelling of a Directional Solidification Process of Silicon [J]. ECS Transactions, 2010, 27(1): 1047–1052

[6] LIU Lijun, Kakimoto K. Partly Three-Dimensional Global Modeling of a Silicon Czochralski Furnace. I. Principles, Formulation and Implementation of the Model [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 4481–4491

[7] Becker R, Braack M. Solution of a Stationary Benchmark Problem for Natural Convection with Large Temperature Difference [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2002, 41: 428–439

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net