

定向凝固过程中固有磁场作用下的 导电硅熔体流动特性

李早阳¹, 刘文超¹, 周亮宇¹, 刘立军¹, 王跃²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 泰州英格伟精密机械有限公司, 225300, 江苏泰州)

摘要: 以定向凝固法生长硅晶体为例, 针对加热器生成固有磁场作用下导电硅熔体的流动特性开展数值模拟研究。首先计算获得了不同加热电流接入方式下熔体区域洛伦兹力的大小与方向分布, 进而研究了洛伦兹力驱动下熔体流动的结构与强度。结果表明, 导电硅熔体中加热器生成固有磁场的磁感应强度约为 10^{-3} T、感应电流密度约为 10^4 A/m²、最大洛伦兹力可达 12 N/m³, 大的洛伦兹力主要分布在熔体的上部和侧部表面附近区域, 能够驱动熔体流动呈现强烈的三维特征, 改变加热电流的接入方式能够显著影响洛伦兹力的空间分布及熔体的流动特性。相关研究有助于深入认识加热器的加热与磁场控制双重功能, 有助于实现对导电熔体流动和定向凝固过程的精确控制。

关键词: 定向凝固; 固有磁场; 熔体流动; 数值模拟

中图分类号: O781; TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202205007 **文章编号:** 0253-987X(2022)05-0064-10



OSID 码

Flow Characteristics of Conductive Silicon Melt Under Inherent Magnetic Field in Directional Solidification

LI Zaoyang¹, LIU Wenchao¹, ZHOU Liangyu¹, LIU Lijun¹, WANG Yue²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Engreat Precision Machine Co., Ltd., Taizhou, Jiangsu 225300, China)

Abstract: Numerical simulation is used to study the influence of the heater-generated inherent magnetic field on the conductive silicon melt flow in the directional solidification (DS) of multi-crystalline silicon crystals. The magnitude and direction characteristics of the Lorentz force in the melt for different heating current connection modes are calculated, and then the pattern and intensity of the melt flow driven by the Lorentz force are studied. Results show that the induction intensity of the inherent magnetic field generated by the heater is about 10^{-3} T, the induced current density is about 10^4 A/m², and the maximum Lorentz force is up to 12 N/m³. Large Lorentz force is mainly distributed in the upper and side regions of the melt and it can drive the melt flow to present strong three-dimensional characteristics. Adjusting the heating current connection mode can significantly influence the Lorentz force distribution and the melt flow. This research provides a reference for the deep understanding of the dual functions of the heater, i. e., heating and magnetic field control, and for the realization of precise control of the melt flow during DS process.

收稿日期: 2021-08-23。 作者简介: 李早阳(1984—),男,博士,副教授,博士生导师。 基金项目: 国防预研基金资助项目(6142801200108);凝固技术国家重点实验室开放课题资助项目(SKLS201905);泰州市高层次创新创业人才(团队)引进计划资助项目(202012)。

网络出版时间: 2021-12-30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20211229.1707.002.html>

Keywords: directional solidification; inherent magnetic field; melt flow; numerical simulation

定向凝固法广泛应用于晶体生长和材料冶炼过程。例如,光伏行业大规模需求的硅晶体^[1-2]、半导体行业常用的晶体材料^[3-4]、钢铁行业急需的高品质钢材^[5-6]、航空发动机的镍基高温合金部件材料^[7-8]等均可通过定向凝固法获得。从工程热物理专业角度来看,定向凝固是一个包含固体导热、熔体/气体对流、高温辐射、固液相变等多种传热流动现象强烈耦合的复杂过程^[9-11]。定向凝固过程中熔体的流动直接影响温度分布、凝固界面形状、杂质输运、甚至缺陷的形成^[12-14]。因此,有必要对该过程中熔体的流动特性开展深入研究并实行有效控制。热场设计是改善定向凝固过程中温度与热浮力分布,进而影响熔体流动的传统方式^[15-16]。然而,单一的热场设计作用有限,无法实现对熔体流动的主动与精确控制,这就需要寻找新的调控方法。

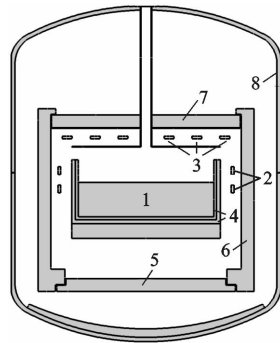
定向凝固法生长晶体或冶炼材料过程中,熔体大多具有导电性,这意味着可以采用外加磁场并通过感应生成的洛伦兹力主动控制导电熔体的流动。常用的外加磁场有静态磁场和动态磁场^[17],这些磁场由特制的装置产生,已被证明能够有效控制熔体流动并影响定向凝固过程^[18-21]。除了外加磁场,还有一类磁场是固有存在的并且对熔体流动具有潜在影响,这就是加热器生成的固有磁场,即在加热器中接入交变电流提供加热功率的同时,基于电磁感应在导电熔体中生成磁场和洛伦兹力,进而影响熔体流动。这类磁场通常不是专门设计的,但是却是固有存在的,如果能够对其进行特别设计并有效应用,将克服传统外加磁场装置庞大、制作复杂与运行成本高昂等缺点。已有工作对定向凝固过程中固有磁场作用下导电熔体流动特性的研究非常有限。

为了深入研究加热器生成固有磁场与洛伦兹力的空间分布及其对熔体流动的影响规律,本研究以定向凝固法制备大尺寸晶体硅材料为研究对象,建立凝固过程中包含导热、对流、辐射等热量传递方式的数值模型,计算分析加热器生成固有磁场作用下洛伦兹力的大小与方向,研究不同条件下洛伦兹力对导电硅熔体流动结构与强度的影响规律。

1 数值计算模型

本研究采用的定向凝固炉结构如图1所示,该炉体主要由硅区域、侧部和顶部加热器、石英和石墨两层坩埚、保温层和炉壁等部件组成。定向凝固过

程中,侧部和顶部加热器按照一定的功率配置分别接入三相交变电流,加热使坩埚内部硅原料熔化;凝固结晶时打开侧部和底部保温层之间的间隙,使得热量由硅熔体底部散失,熔体内部温度整体降低,并形成上部温度高、下部温度低的分布趋势,从而由下向上定向凝固。在此过程中,加热器内部接入的交变电流将在导电硅熔体中感应产生磁场和电场,两者相互作用生成洛伦兹力并影响硅熔体流动。



1—硅熔体;2—侧部加热器;3—顶部加热器;
4—两层坩埚;5、6、7—保温层;8—炉壁。

图1 定向凝固炉结构示意图

Fig. 1 Schematic of directional solidification furnace

图2所示为硅熔体区域、侧部和顶部石墨加热器结构图以及电流接入方式示意图。硅熔体区域为立方体形状,体积为 $0.84 \times 0.84 \times 0.26 \text{ m}^3$,这意味着凝固后硅晶体的质量约为465 kg。在硅熔体区域的侧部和顶部配有两个蛇形石墨加热器,其中侧部加热器与熔体的距离为0.107 m,顶部加热器与熔体的距离为0.325 m。每个加热器连接有3个电极,如图2中标号A、B、C和a、b、c所示。三相交流电分别接入石墨加热器的3个电极产生加热功率,交流电的表达式如下

$$I_A = I_a = 1590 \sin(100\pi t) \quad (1)$$

$$I_B = I_b = 1590 \sin(100\pi t + 2\pi/3) \quad (2)$$

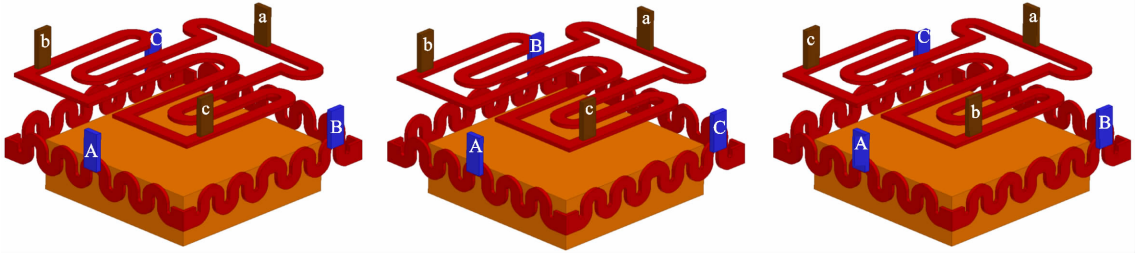
$$I_C = I_c = 1590 \sin(100\pi t + 4\pi/3) \quad (3)$$

式中: I_A 、 I_B 、 I_C 和 I_a 、 I_b 、 I_c 分别为通入侧部加热器3个电极和顶部加热器3个电极的电流。式(1)~(3)表明加热器中接入交流电的幅值为1590 A、频率为50 Hz,相邻两相之间的相位差为 120° ,上述交流电的大小、频率、相位特征与定向凝固实验过程保持一致。

在研究过程中,接入加热器电流的大小要能够提供足够的加热功率,无法随意改变,但是电流的接

入方向可以调整,如图2所示,相应的电路图如图3所示。图2(a)和图3(a)中电流接入侧部和顶部加热器的相位顺序均为逆时针增加,图2(b)和图3(b)中电流接入侧部加热器的相位顺序为顺时针增加、接入顶部加热器的相位顺序为逆时针增加,图2(c)

和图3(c)中电流接入侧部加热器的相位顺序为逆时针增加、接入顶部加热器的相位顺序为顺时针增加。上述3种情况分别被命名为:侧逆顶逆、侧顺顶逆、侧逆顶顺。后续研究中,将针对不同电流接入方式下的洛伦兹力分布和熔体流动开展对比分析。



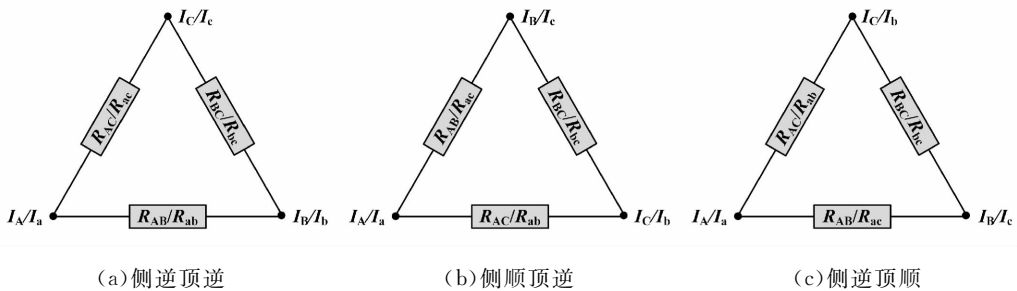
(a)侧逆顶逆

(b)侧顺顶逆

(c)侧逆顶顺

图2 硅熔体、石墨加热器及3种电流接入方式示意图

Fig. 2 Schematic of silicon melt region, graphite heater and three current connection modes



(a)侧逆顶逆

(b)侧顺顶逆

(c)侧逆顶顺

图3 3种电流接入方式下的电路图

Fig. 3 Circuit diagram for the three current connection modes

在加热器中接入上述电流进行加热的条件下,坩埚内的硅料处于全部熔化状态,此时加热器生成磁场对熔体流动的作用也最为显著。针对该状态,首先建立了定向凝固炉内部的三维传热流动数值模型,在此基础上计算出加热器生成磁场在熔体中感应出的时均洛伦兹力,进一步将该洛伦兹力纳入熔体流动的计算中。关于定向凝固炉内部建立传热流动数值模型的细节可参考文献[9]。在计算硅熔体流动时采用了 Boussinesq 假设,因此熔体流动的控制方程如下

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] - \rho g \beta_T (T - T_0) + \mathbf{F}_L \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为速度; ρ 为密度; p 为压力; μ 为动力黏度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; β_T 为热膨胀系数; T 为温度; T_0 为参考温度; c_p 为比定压热容; λ 为导热系数; $\mathbf{F}_L$ 为时均洛伦兹力。

洛伦兹力 $\mathbf{F}_L$ 通过求解麦克斯韦方程组获得,

具体如下

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (9)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_L = \frac{1}{2} (\mathbf{J}_{re} \times \mathbf{B}_{re} + \mathbf{J}_{im} \times \mathbf{B}_{im}) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; $\mathbf{E}$ 为电场强度; μ_0 为真空下的磁导率; $\mathbf{J}$ 为电流密度;下标 re 和 im 分别代表实部和虚部。

基于相关模型,本文对包含导热、对流、辐射和洛伦兹力作用在内的晶体硅定向凝固过程进行了全局三维稳态数值模拟研究。在此过程中,硅熔体区域的传热流动是与整个定向凝固炉内的其他区域耦合计算的,在硅熔体边界满足温度连续和热量守恒的传热边界条件以及无滑移的速度边界条件。数值计算中采用的主要物性参数如表1所示,更详细的炉体内部各材料物性参数可参考文献[22]。

表 1 主要物性参数
Table 1 Main physical parameters

材料	参数	数值
硅熔体	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 530
	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	900
	热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	64
	动力黏度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	7×10^{-4}
	热膨胀系数/ K^{-1}	1.36×10^{-4}
	凝固点/K	1 685
	表面发射率	0.3
石墨	电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	1×10^6
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 830
	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1 800
	热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	100
	表面发射率	0.8
	电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	1×10^5

对于实际的定向凝固过程,硅熔体处于远低于大气压的负压环境(约 60 kPa)且其温度高于凝固点1 685 K。低压高温环境使得难以通过试验测量磁场的大小及熔体的流动特性,导致无法直接验证模拟结果的合理性。然而,关于磁场及洛伦兹力分布的数值计算方法和关于定向凝固炉内部传热流动的数值分析模型已在前期研究中分别进行了验

证^[23-24],这可以间接证明本研究中数值模型和模拟结果的合理性。

基于上述数值模型,着重分析了采用不同电流接入方式时,加热器生成固有磁场作用下洛伦兹力的空间分布及其对熔体流动的影响规律,相关研究预期可为精细控制定向凝固过程提供理论支撑。

2 结果与讨论

2.1 洛伦兹力的空间分布

由式(11)可知,熔体中的洛伦兹力与其内部感应生成的电流密度和磁感应强度密切相关,因此首先分析了不同电流接入方式下熔体中这两个量的空间分布特征,如图 4 和图 5 所示。由图 4 可以看出,不同电流接入方式下,大的电流密度主要分布在熔体的侧部和顶部表面附近,最大值可达 22 kA/m²。最大值位置随电流接入方式的改变而发生变化,且受侧部加热器电流接入方式影响较为显著。由图 5 可以看出,不同电流接入方式下,磁感应强度极大值区域主要分布在熔体的尖角处,最大值约为 1.8 mT。最大值位置随电流接入方式改变而发生的变化不如电流密度明显。

加热器生成的磁场通过洛伦兹力影响硅熔体流动,上述电流密度和磁感应强度的分布则决定了熔体中洛伦兹力的空间分布特性。图 6 和图 7 分别为熔体表面及其内部洛伦兹力的大小分布,具体表达

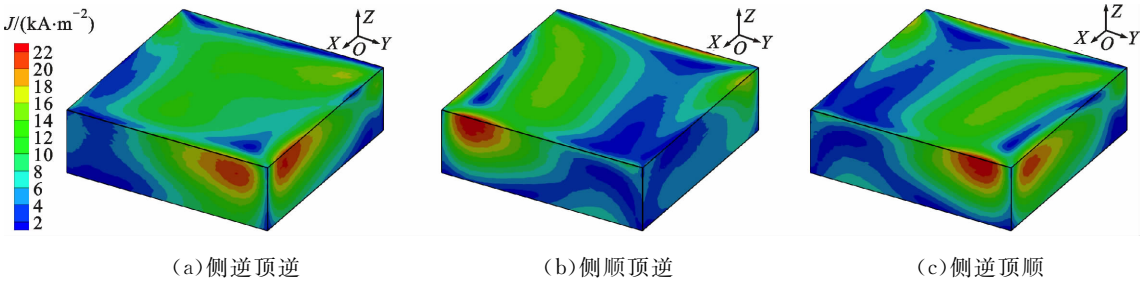


图 4 3 种电流接入方式下硅熔体中的感应电流密度分布

Fig. 4 Induced current density in the silicon melt for the three current connection modes

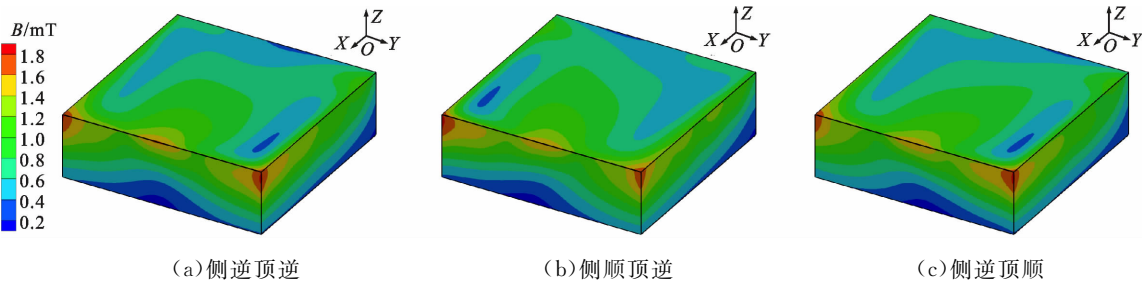


图 5 3 种电流接入方式下硅熔体中的磁感应强度分布

Fig. 5 Magnetic induction intensity in the silicon melt for the three current connection modes

式为

$$|\mathbf{F}_L| = \sqrt{|\mathbf{F}_X|^2 + |\mathbf{F}_Y|^2 + |\mathbf{F}_Z|^2} \quad (12)$$

式中： $\mathbf{F}_X$ 、 $\mathbf{F}_Y$ 、 $\mathbf{F}_Z$ 分别为洛伦兹力在 X、Y、Z 方向的分量。可以看出，改变电流接入方向时洛伦兹力的大小分布比较一致，大的洛伦兹力主要位于熔体区域的侧部及顶部，这一特征与加热器相对熔体的位置有关，即加热器位于熔体的侧部和顶部、远离熔体的中心和底部。对于不同的电流接入方式，力的极大值位置略有不同。不同条件下最大洛伦兹力可达 12 N/m³，定向凝固法生长硅晶体过程中热浮力的量级约为 1 N/m³，因此预期洛伦兹力能够完全抑制热浮力引发的自然对流并强制驱动熔体流动。上述表述中力的单位 N/m³ 表示单位体积熔体所受的力，该单位通过动量方程的量纲分析也可得到。

洛伦兹力的大小决定了其能否影响熔体流动，

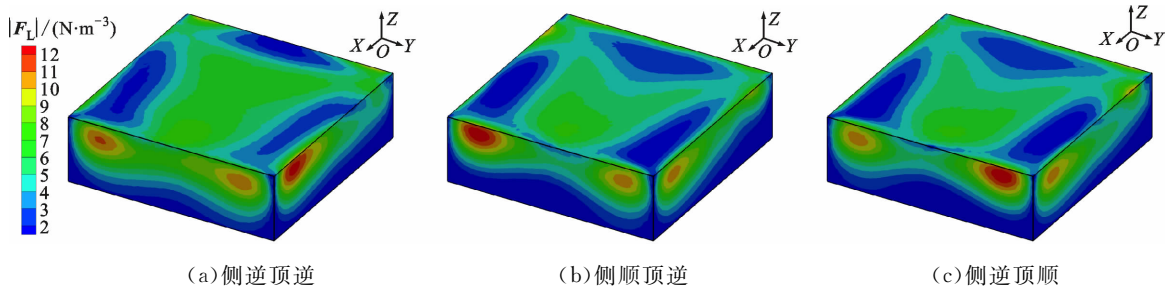


图 6 3 种电流接入方式下硅熔体表面附近洛伦兹力的大小分布

Fig. 6 Magnitudes of Lorentz force near the silicon melt surfaces for the three current connection modes

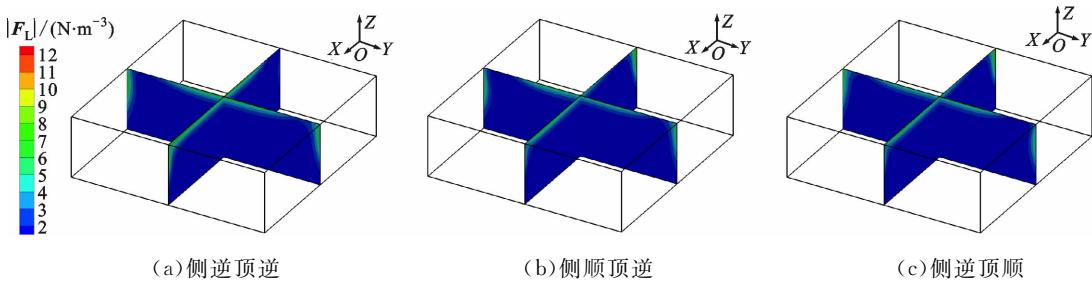


图 7 3 种电流接入方式下硅熔体内部洛伦兹力的大小分布

Fig. 7 Magnitudes of Lorentz force in the silicon melt for the three current connection modes

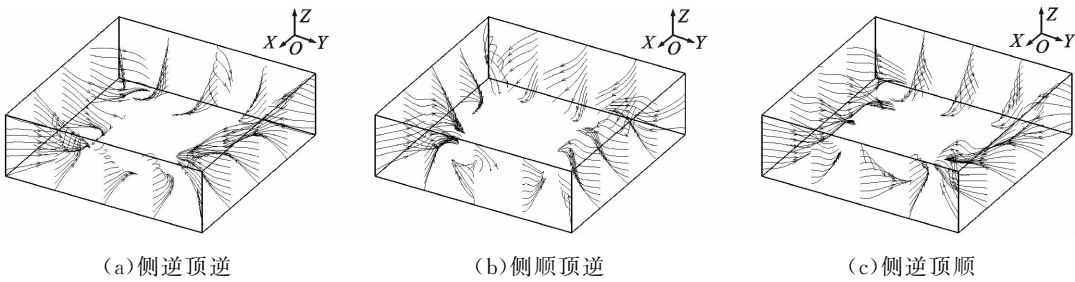


图 8 3 种电流接入方式下硅熔体中洛伦兹力的方向分布

Fig. 8 Directions of Lorentz force in the silicon melt for the three current connection modes

而力的方向则决定了如何影响熔体流动。图 8 给出了 3 种电流接入方式下熔体中洛伦兹力的流线图，其中流线均由熔体侧壁面发出，该流线图由力的 3 个空间分量制成。可以发现，不同电流接入方式下，从熔体侧面发出的洛伦兹力流线均向下、向内指向熔体中心，并沿 Z 轴偏转。

图 8(a)所示为侧部和顶部加热器电流接入方向均为相位顺序逆时针增加时熔体中的洛伦兹力方向分布，可以看出，力的流线由壁面发出后整体沿其前进方向向左偏转，即绕 Z 轴顺时针偏转，熔体下部局部区域洛伦兹力绕 Z 轴逆时针偏转。图 8(b)所示为侧部加热器的电流接入方向与图 8(a)相反，即相位顺序为顺时针增加，而顶部相位顺序仍为逆时针增加时洛伦兹力的方向分布，可以发现力的偏转方向与图 8(a)中呈现相反趋势，即力的流线由壁

面发出后整体沿其前进方向向右偏转,即绕 Z 轴逆时针偏转。图 8(c) 所示为侧部加热器的电流接入方向与图 8(a) 中相同,即相位顺序为逆时针增加,而顶部相位顺序改变为顺时针增加时洛伦兹力的方向分布,可以发现熔体中的洛伦兹力流线由壁面发出后整体沿 Z 轴顺时针偏转,与图 8(a) 比较类似。上述分析表明,对于如图 2 所示拥有侧部和顶部两个加热器的定向凝固过程,熔体中感应生成的洛伦兹力的主体方向与侧部加热器接入电流相位顺序增加的方向相反,而顶部加热器电流的接入方向与洛伦兹力的偏转方向相关性较弱。

2.2 熔体的流动特性

上述不同电流接入条件下洛伦兹力的空间分布将显著影响定向凝固过程中的熔体流动。图 9 所示为侧部和顶部加热器电流接入方向均为相位顺序逆时针增加时硅熔体的流动状态。其中图 9(a) 所示为熔体区域的三维流线分布图,可以发现在加热器生成磁场及洛伦兹力作用下,熔体区域产生明显的旋转流动,并且失去了中心对称性。在已有研究中不考虑洛伦兹力仅考虑热浮力影响时,由于加热条件对称而出现的流动对称特性在此处则没有出

现^[25],这也意味着定向凝固过程中温度分布等诸多参数将呈现更加复杂的三维特征。

从图 9(a) 中流线的方向可以发现,在图 8(a) 所示洛伦兹力的影响下,整个熔体区域中部主体绕 Z 轴顺时针方向旋转流动,侧部边缘熔体则逆时针旋转流动。为了更加清晰地获得加热器生成磁场作用下熔体的流动状态,分别选取了熔体区域顶部、中部和底部 3 个水平截面进行速度矢量分析,如图 9(b)、9(c)、9(d) 所示。整个熔体区域高 0.26 m,3 个截面高度分别为 $Z=0.26\text{ m}$ 、 $Z=0.13\text{ m}$ 、 $Z=0.01\text{ m}$ 。可以发现,在洛伦兹力作用下,熔体顶部呈现顺时针流动状态,如图 9(b) 所示,在该平面内流动呈现不对称特征,被限制为沿对角线向右倾斜的椭圆形环流。在熔体区域的中部,如图 9(c) 所示,中心附近的流动仍然呈现顺时针旋转状态,而在边缘处则呈现局部逆时针旋转。在熔体底部,如图 9(d) 所示,熔体流动整体呈现逆时针旋转状态。上述熔体不同部位的流动特征正是由于加热器生成磁场下洛伦兹力的空间分布引起的。进一步对比 3 幅速度矢量图的标尺可以发现,熔体流动的强度由顶部向底部逐渐减弱,前者约为后者的 5 倍。

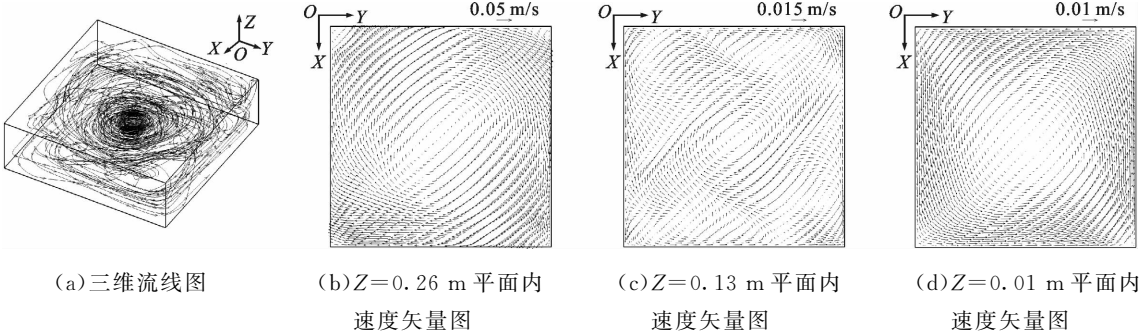


图 9 侧部和顶部加热器电流接入方向均为相位顺序逆时针增加时硅熔体的流动状态
Fig. 9 Silicon melt flow for case of side-counterclockwise and top-counterclockwise

图 10 给出了侧部加热器电流接入方向为相位顺序顺时针增加、顶部为逆时针增加时硅熔体的流动状态。由图 10(a) 中流线分布可以发现,熔体整体绕 Z 轴逆时针旋转,与图 9(a) 中熔体主体流动方向相反。由图 10(b) 中熔体顶部截面的速度矢量图可以看出,当侧部加热器 3 个电极电流接入相位顺序顺时针增加时,此处的熔体绕 Z 轴逆时针旋转,并且被限制为沿对角线向左倾斜的椭圆形环流。在熔体区域中部,如图 10(c) 所示,左侧流动呈现逆时针旋转,右侧流动则呈现顺时针旋转趋势。在熔体的底部,如图 10(d) 所示,流动呈现出明显的逆时针旋转状态。由图 6 可知,不同电流连接方式下洛伦

兹力的大小相差不大,因此从图 10 中速度矢量标尺可以看出,改变电流接入方向时熔体流动强度变化不明显。

图 11 给出了侧部加热器电流接入方向为相位顺序逆时针增加、顶部为顺时针增加时硅熔体的流动状态。由图 11(a) 中流线分布可以发现,熔体流动整体仍沿 Z 轴呈现顺时针旋转状态,和图 9(a) 有相似之处,但是相比图 9(a) 和图 10(a) 中的两种情况,流动路径相对混乱。由图 11(b) 熔体顶部截面的速度矢量图可以发现,此处的主体流动绕 Z 轴顺时针旋转,并且被限制为沿对角线向右倾斜的椭圆形环流,但是和图 9(b) 中的流动结构又不完全一样。

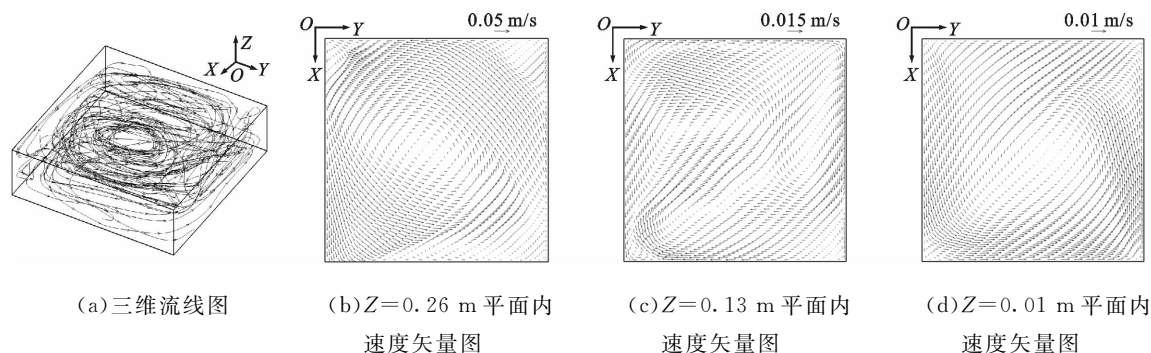


图 10 侧部和顶部加热器电流接入方向分别为相位顺序顺时针增加和逆时针增加时硅熔体的流动状态

Fig. 10 Silicon melt flow for case of side-clockwise and top-counterclockwise

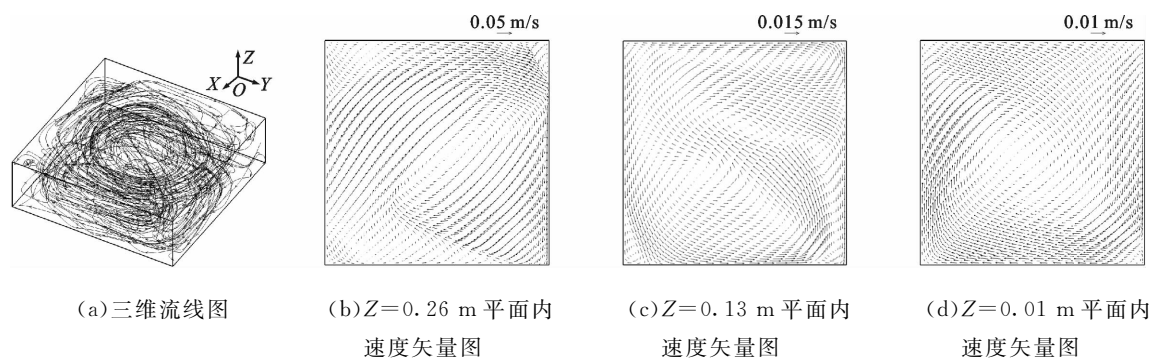


图 11 侧部和顶部加热器电流接入方向分别为相位顺序逆时针增加和顺时针增加时硅熔体的流动状态

Fig. 11 Silicon melt flow for case of side-counterclockwise and top-clockwise

在熔体区域中部,如图 11(c)所示,左下部和右上角流动逆时针旋转,其他部位流动则呈现顺时针旋转状态。在熔体区域底部,如图 11(d)所示,流动表现出明显的顺时针旋转状态。从 3 个截面速度矢量的标尺来看,依然是上中部流动相对强烈。

加热器生成磁场作用下,熔体流动的改变将直接影响温度分布,图 12 和图 13 所示分别为 3 种电流接入方式下硅熔体表面及其内部的温度分布。从图 12 中熔体侧面和图 13 可以发现,熔体顶部等温线平直性较差,这意味着此处的温度分布受流动影响比较显著,这是因为该区域的流动比较剧烈。从图 12 和图 13 中温度的数值可以发现,在熔体上表面附近区域,温度整体呈现中间低、四周高的分布趋势,高温区位于 4 个顶角附近。由于流动的不对称性导致温度分布呈现显著的三维特征,这将使得定向凝固后期凝固界面无法整体向上推进,而会出现中心部分先凝固、某一个边角最后凝固且杂质在此富集的现象。在不考虑加热器生成磁场作用下洛伦兹力的影响时,由于加热结构的对称性,使得熔体流动及温度分布均呈现对称特征^[25],这也表明了洛伦兹力导致的流动能够显著影响温度分布。

2.3 关于固有磁场作用的讨论

定向凝固过程中,加热器通入交变电流提供加热功率的同时,在导电熔体中产生磁场,这种磁场是固有存在的,但是以往的研究忽视了其对熔体流动和材料制备的潜在影响。对于本文中所研究的拥有侧部和顶部两个加热器的定向凝固过程,当加热器中通入常用的工频三相交流电时,熔体在磁场驱动下做周向旋转,呈现强烈的三维特征,失去了理想状态下仅有热浮力作用时的对称性。这可以解释许多定向凝固过程中热场结构对称而晶体生长不对称的现象。同时,当加热器中电流接入方向不一致时,会显著影响熔体的流动状态。本文中熔体的主体旋转方向与侧部加热器中接入电流相位顺序增加的方向相反,受顶部加热器电流接入方向影响不显著。不同的流动状态显著影响熔体中尤其是顶部区域的温度分布,并影响熔体在坩埚侧壁面的冲刷,这将影响材料的制备以及杂质在坩埚侧壁的溶解和在结晶界面前沿的分凝。实际的定向凝固过程中,可设计加热器接入电流的方向、甚至加热器的形状,产生特定的磁场及洛伦兹力空间分布,以实现对于熔体流动的精确控制,为材料制备提供良好的条件。例如,可以

将加热器设计成若干组平行的且围绕硅熔体四周的线圈形状,在其中接入不同相位顺序的电流,可以产

生不同方向的行波磁场,从而实现对熔体流动的主动控制^[23]。

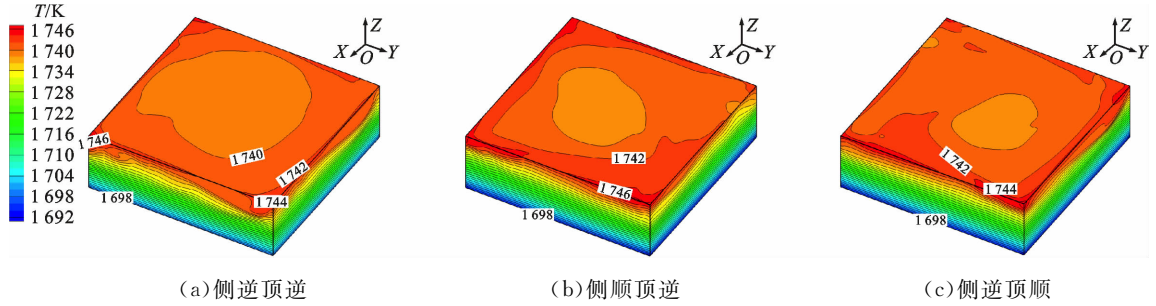


图 12 3 种电流接入方式下硅熔体表面的温度分布

Fig. 12 Distributions of temperature in silicon melt surfaces for the three current connection modes

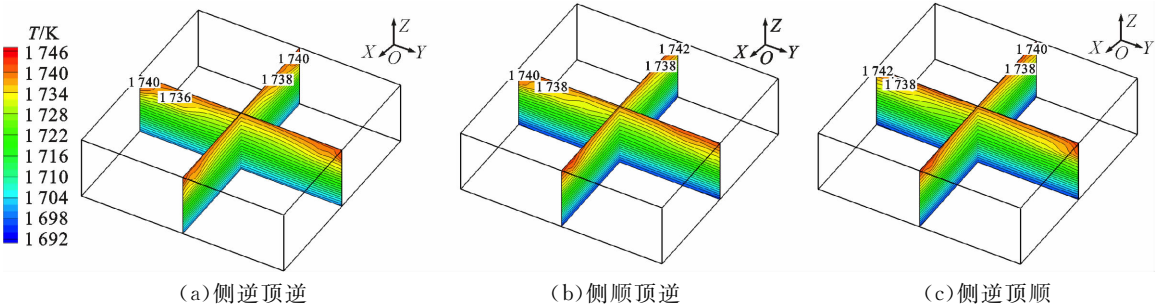


图 13 3 种电流接入方式下硅熔体内部的温度分布

Fig. 13 Distributions of temperature in silicon melt for the three current connection modes

3 结 论

本文以定向凝固法生长多晶硅为例,对加热器生成固有磁场作用下导电熔体的流动特性开展了三维数值模拟研究,对比分析了不同电流接入方式下熔体中感应生成的洛伦兹力大小与方向,揭示了其对熔体流动和温度分布的影响规律。研究结果表明,对于本文所研究的拥有侧部和顶部两个加热器的定向凝固过程,感应生成的洛伦兹力主要分布在熔体的上部和侧部表面区域,力大小足以驱动熔体流动。在洛伦兹力作用下,熔体发生旋转流动、呈现强烈的三维特征,流动强度显著增强。改变加热器的电流接入方向能够影响熔体的旋转方向,本研究中的熔体主体旋转方向与侧部加热器接入电流相位顺序增加的方向相反,流动的改变使得温度分布也发生变化,影响定向凝固过程。上述研究有助于深入认识定向凝固过程中加热器生成固有磁场的作用机理,同时也为精细设计该类型磁场、进而主动精确控制熔体流动提供了参考依据。

参考文献:

[1] 明亮,黄美玲,段金刚,等. 硅铸锭中的晶粒生长和

位错分布研究 [J]. 太阳能学报, 2020, 42(6): 109-114.
MING Liang, HUANG Meiling, DUAN Jingang, et al. Study on grain growth and dislocation distribution during silicon ingot casting process [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2020, 42(6): 109-114.
[2] 韩博,李进,安百俊,等. 定向凝固法生长多晶硅中位错密度降低的研究进展 [J]. 半导体技术, 2021, 46(12): 946-955.
HAN Bo, LI Jin, AN Baijun, et al. Research progress of dislocation density reduction in multicrystalline silicon grown by directional solidification method [J]. Semiconductor Technology, 2021, 46(12): 946-955.
[3] 金敏,徐家跃,范世骥,等. 坩埚下降法生长红外砷化镓晶体的研究 [J]. 应用技术学报, 2017, 17(1): 10-17.
JIN Min, XU Jiayue, FAN Shiji, et al. Growth of infrared GaAs crystal by vertical Bridgman method [J]. Journal of Technology, 2017, 17(1): 10-17.
[4] 徐家跃,申慧,金敏,等. 坩埚下降法在新材料探索及晶体生长中的应用 [J]. 人工晶体学报, 2019, 48(6): 975-984.
XU Jiayue, SHEN Hui, JIN Min, et al. Recent progress on Bridgman growth of some functional crystals

- [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2019, 48(6): 975-984.
- [5] 侯渊, 任忠鸣, 王江, 等. 纵向静磁场对定向凝固 GCr15 轴承钢柱状晶向等轴晶转变的影响 [J]. *金属学报*, 2018, 54(5): 801-808.
- HOU Yuan, REN Zhongming, WANG Jiang, et al. Effect of longitudinal static magnetic field on the columnar to equiaxed transition in directionally solidified GCr15 bearing steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(5): 801-808.
- [6] 李婉琴, 夏智斌, 齐文涛, 等. 定向凝固法控制 M2 高速钢中共晶碳化物形貌演变行为 [J]. *上海金属*, 2020, 42(1): 77-83.
- LI Wanqin, XIA Zhibin, QI Wentao, et al. Controlling of morphology evolution of eutectic carbide in M2 high speed steel by directional solidification [J]. *Shanghai Metals*, 2020, 42(1): 77-83.
- [7] 夏鹤翔, 杨聪, 许庆彦. 镍基单晶高温合金定向凝固微观组织模拟及试验验证 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 44(11): 1334-1338.
- XIA Huxiang, YANG Cong, XU Qingyan. Microstructure simulation and experimental validation of Ni-based superalloy during directional solidification [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2021, 44(11): 1334-1338.
- [8] 赵勇, 苏海军, 张军, 等. 磁场作用下镍基高温合金定向凝固的研究进展 [J]. *机械工程材料*, 2021, 45(5): 1-8.
- ZHAO Yong, SU Haijun, ZHANG Jun, et al. Recent progress on directional solidification of nickel-based superalloys with magnetic field [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(5): 1-8.
- [9] LI Zaoyang, LIU Lijun, MA Wencheng, et al. Effect of argon flow on heat transfer in a directional solidification process for silicon solar cells [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 318(1): 298-303.
- [10] 李恒, 白博峰, 苏燕兵, 等. 用 $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 溶液共晶凝固实验模拟 Bridgman 法晶体生长过程 [J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(11): 1298-1302.
- LI Heng, BAI Bofeng, SU Yanbing, et al. Experimental investigation of $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ eutectic solution solidification for simulating crystal growth with Bridgman method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(11): 1298-1302.
- [11] 苏文佳, 牛文清, 齐小方, 等. 定向凝固法多晶硅杂质控制数值模拟概述 [J]. *材料导报*, 2018, 32(11): 1795-1805.
- SU Wenjia, NIU Wenqing, QI Xiaofang, et al. A review of numerical simulation for impurity control in the directional solidification process of multicrystalline silicon [J]. *Materials Reports*, 2018, 32(11): 1795-1805.
- [12] BUCHOVSKA I, DROPKA N, KAYSER S, et al. The influence of travelling magnetic field on phosphorus distribution in n-type multi-crystalline silicon [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2019, 507: 299-306.
- [13] CHEN Zhao, WEN Xiaoli, CHEN Changle. Fluid flow and microstructure formation in a rotating magnetic field during the directional solidification process [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 491: 395-401.
- [14] 多文超, 杨玺, 何云飞, 等. 多晶硅真空定向凝固过程 Marangoni 对流对铸锭质量的影响研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(6): 515-523.
- DUO Wenchao, YANG Xi, HE Yunfei, et al. Effect of Marangoni convection on ingot quality during vacuum directional solidification of polycrystalline silicon [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(6): 515-523.
- [15] RAO Senlin, HE Liang, ZHANG Fayun, et al. Numerical and experimental investigation of sectional heater for improving multi-crystalline silicon ingot quality for solar cells [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, 537: 125606.
- [16] POPESCU A, VIZMAN D. Numerical study of melt convection and interface shape in a pilot furnace for unidirectional solidification of multicrystalline silicon [J]. *Crystal Growth & Design*, 2011, 12(1): 320-325.
- [17] FRANK-ROTSCH C, DROPKA N, KIEBLING F M, et al. Semiconductor crystal growth under the influence of magnetic fields [J]. *Crystal Research and Technology*, 2020, 55(2): 1900115.
- [18] 刘承林, 苏海军, 张军, 等. 静磁场对定向凝固镍基高温合金组织影响的研究进展 [J]. *材料工程*, 2019, 47(9): 13-20.
- LIU Chengling, SU Haijun, ZHANG Jun, et al. Research progress in effect of static magnetic field on microstructure of directionally solidified Ni-based superalloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(9): 13-20.
- [19] RUDOLPH P. Travelling magnetic fields applied to bulk crystal growth from the melt: the step from basic research to industrial scale [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2008, 310(7/8/9): 1298-1306.
- [20] LI Pengting, REN Shiqiang, JIANG Dachuan, et al.

Effect of alternating magnetic field on the removal of metal impurities in silicon ingot by directional solidification [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, 437: 14-19.

[21] DROPKA N, FRANK-ROTSCH C, RUDOLPH P. Numerical study on stirring of large silicon melts by Carousel magnetic fields [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2012, 354: 1-8.

[22] LI Zaoyang, LIU Lijun, ZHANG Yunfeng, et al. Influence of crucible thermal conductivity on crystal growth in an industrial directional solidification process for silicon ingots [J]. *International Journal of Photoenergy*, 2016, 2016: S8032709.

[23] SHAO Yue, LI Zaoyang, YU Qinghua, et al. Control of melt flow and oxygen distribution using traveling magnetic field during directional solidification of silicon ingots [J]. *Silicon*, 2020, 12(1): 1-10.

[24] LI Zaoyang, LIU Lijun, LIU Xin, et al. Heat transfer in an industrial directional solidification furnace with multi-heaters for silicon ingots [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2014, 385: 9-15.

[25] LI Zaoyang, QI Xiaofang, LIU Lijun, et al. Numerical study of melt flow under the influence of heater-generating magnetic field during directional solidification of silicon ingots [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2018, 484: 78-85.

(编辑 武红江 亢列梅)