

液态金属镓自然对流换热数值模拟

门玉宾^{1,2}, 马军军¹, 王书福¹, 彭稳根¹, 刘元春¹, 何玉荣¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 150001 哈尔滨, menyb123@yahoo.com.cn;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 110015 沈阳)

摘要: 为更好地得到液态金属的流动和传热特性, 模拟了液态金属流体镓(Ga)自然对流流动和传热过程. 采用单流体模型研究液态金属流体 Ga 的流动特性和传热机理, 考虑边界条件对自然对流的影响, 选用合适的边界条件进行了模拟. 结果表明, 该工况下的传热以导热为主, 速度矢量是顺时针旋转分布, 并与实验数据较好吻合. Gr 数对液态金属 Ga 自然对流影响的数值模拟表明, 随着 Gr 的增加, 液态金属的换热逐渐以对流换热为主.

关键词: 液态金属流体镓; 自然对流; 数值模拟; Gr 数

中图分类号: TK222

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)01-0114-05

Numerical investigation on the natural convection of liquid gallium

MEN Yu-bin^{1,2}, MA Jun-jun¹, WANG Shu-fu¹, PENG Wen-gen¹, LIU Yuan-chun¹, HE Yu-rong¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, menyb123@yahoo.com.cn;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, 110015 Shenyang, China)

Abstract: To better understand the heat-transfer character and flow of liquid gallium, a natural convection flow of liquid gallium was numerically simulated by using single phase method on the heat transfer of liquid gallium in a two dimensional enclosure. The effects of boundary condition and Grashof number on the flow and the convective heat transfer behavior are investigated. The numerical results which include temperature and velocity graph are compared with the experimental data and reasonable agreement is achieved. In a case that thermal conductivity takes a leading part, when Grashof number goes up, convection will gradually play a more important role.

Key words: liquid gallium; natural convection; numerical investigation; Grashof number

在现代科学技术领域中, 无论是动力机械、化学化工, 还是航空航天、空间技术等领域都要涉及到热量的传递问题. 而自然对流在能源、航天、材料加工等领域具有十分重要的影响, 尤其是在低普朗特数下, 由于温度的不同产生温度梯度, 容易使内部的流体形成自然对流. 研究表明, 80% 的晶体结晶都是通过固化而得到的. 由于温度梯度而

产生的力以浮升力的形式作用在流动的液态流体中, 这样流体在结晶成长的过程中由于其传热作用导致结晶分布的不一致, 产生了异构型的晶体. 这种异构性, 宏观上影响了晶体的成长质量^[1], 需要加强对这种流动传热的控制, 减少它对晶体结晶的影响. 目前, 这方面的研究还不够成熟, 如何能寻找到一种流动和传热都十分良好的换热介质, 这为流动传热领域的研究人员和材料等相关专业的工程技术人员提出了新的挑战和机遇^[2].

目前, 液态金属换热介质镓(Ga)已经成功地应用到了高性能的 CPU 芯片换热中. 在自然对流换热中, 针对液态金属流体流动和传热特性的实验研究较少, 而且实验费用昂贵. 采用数值模拟的

收稿日期: 2009-10-30.

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0159); 人事部留学人员科技活动项目择优资助; 中国博士后科学基金; 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金(N0.2008RFLG005).

作者简介: 门玉宾(1985—), 男, 硕士;

何玉荣(1976—), 女, 副教授, 博士生导师.

方法同样可以获得详尽的信息,但是具有一定的误差,需要对其模型和计算域边界条件等进行深入研究.

本文主要是运用数值模拟的方法,应用 Fluent 商业软件,采用单流体模型研究温度梯度是水平方向时的液态金属 Ga 的传热和流动过程,并与实验进行比较,讨论其形成机理和分布规律.

1 控制方程和物理模型

1.1 控制方程

在自然对流换热过程模拟中,采用单流体模型和 Boussineq 假设.

将液态金属看做一种连续性介质,其控制方程^[3]如下:

连续性方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0;$$

动量方程为

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + Pr \nabla^2 \mathbf{u} - Ra Pr \mathbf{g};$$

能量方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla^2 T.$$

式中:

$$Ra = \frac{\beta g (T_h - T_m) L^3}{\nu \kappa};$$

\mathbf{u} 是液态金属的速度矢量; β 是热扩散系数; T_h 模型左边界的温度; T_m 模型右边界的温度; L 是模型的特征长度; ν 运动黏度; κ 动力黏度.

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa}, Sc = \frac{\nu}{D}.$$

其中: D 是扩散率, Sc 是施密特数, Ra 是瑞利数.

1.2 物理模型

本文主要采用的计算模型为充有液态金属流体的二维封闭方腔,其物理模型如图 1 所示. 其为边长为 3 cm 的正方形模型,4 条边都是由材料铜构成. 左、右边界都为恒壁温边界条件,左边壁温用具有自由表面换热的边界条件并带有热量损失,底部边界采用绝热换热的边界条件. 分别选取 3 条水平方向的测试线,详细的参考模型及边界

条件的设定参考文献[4-7].

由于其二维模型方腔是实际实验中抽象出来的物理模型,结合模拟的真实情况,做了具有同样边界条件的三维的物理模型(见图 2).

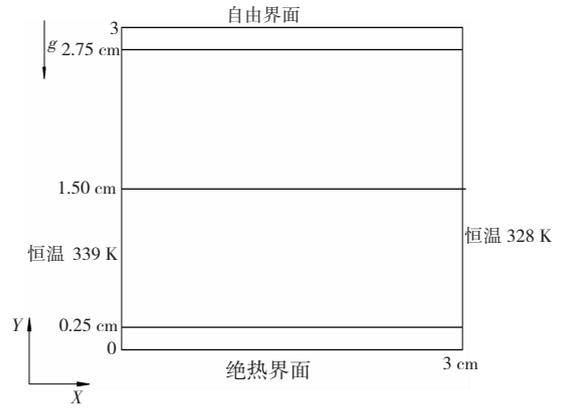


图 1 重力条件下自然对流数值模拟二维模型

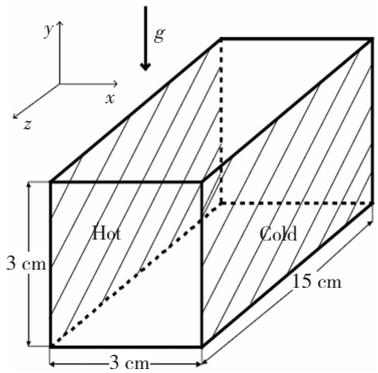


图 2 重力条件下自然对流数值模拟三维模型

1.3 数值方法

选用液态金属 Ga 作为流体,采用 Fluent 软件对上述模型进行模拟求解. 计算中采用四边形均匀网格, SIMPLE 算法处理压力和速度场的耦合,采用二阶迎风差分算法处理动量方程和能量方程, PRESTO 算法处理压力修正方程,并采用合适的亚松弛因子.

考虑到液态金属 Ga 的物性参数是随温度变化的,并且结合实际的边界条件,选用液态金属 Ga 的热物理参数,具体见表 1^[4]. 进一步模拟在不同 Gr 数下的液态金属 Ga 自然对流的流动和传热特性.

表 1 液态金属流体镓的物性参数

参数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	运动粘度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	热膨胀 系数/ K^{-1}	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
参数值	6.09×10^3	$0.4359 \exp(481/T) / 1000$ ^[9]	$-5 + 0.117$ ^[9]	29	2 227	1.0×10^{-4}	$429.9 - 0.275543T$ ^[9]

2 结果与分析

2.1 二维和三维模拟比较

对上述二维模型进行模拟,分别在 $Y=2.75\text{ cm}$, $Y=1.5\text{ cm}$, $Y=0.25\text{ cm}$ 的水平测试线上提取温度数据和速度数据与实验值进行比较.并在同样的条件下,同样的位置上用三维模型进行模拟,得到的数据与二维模型进行比较.由图 3 和 4 的比较可知,其二维和三维的温度分布图是基本一致的.图 5 中 (a) 和 (b) 分别是二维和三维模拟的速度矢量图,由图 5 可见,二维和三维模拟的速度矢量分布是基本一致的,二维模型在此计算工况中可以代替三维模型进行模拟.为了计算方便,以下用二维模型模拟代替三维模型进行模拟,并和实验值进行比较分析.

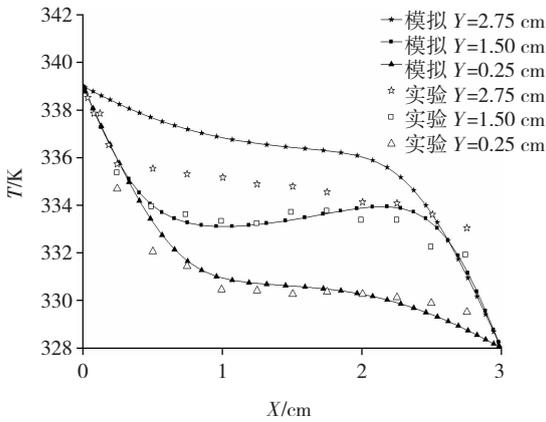


图 3 二维模型中在 Y 为 2.75、1.50、0.25 cm 线上的温度分布

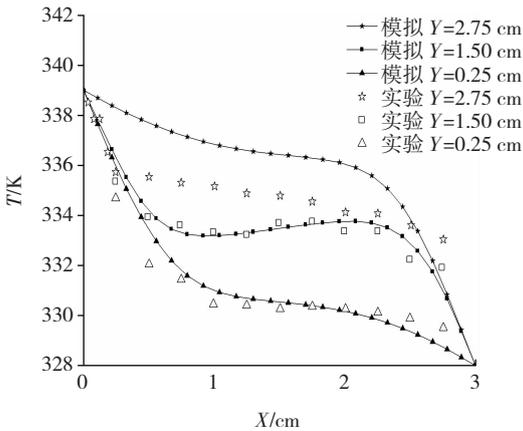
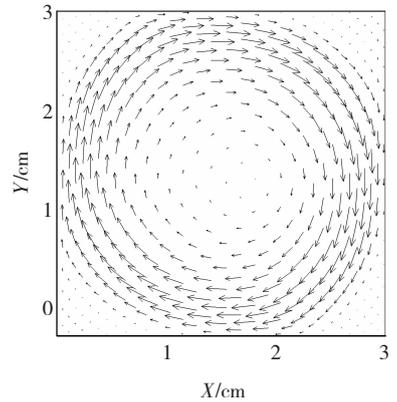


图 4 三维模型中在 Y 为 2.75、1.50、0.25 cm 线上的温度分布

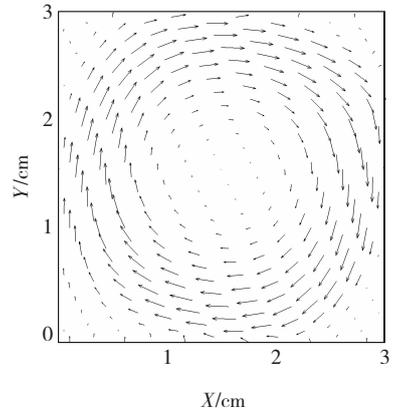
2.2 二维的模拟分析

在 3 条测试线上液态金属 Ga 沿水平方向的温度分布如图 3 所示.从图 3 中可以清楚地看到,每一条线上的温度分布并不是完全的线性分布,

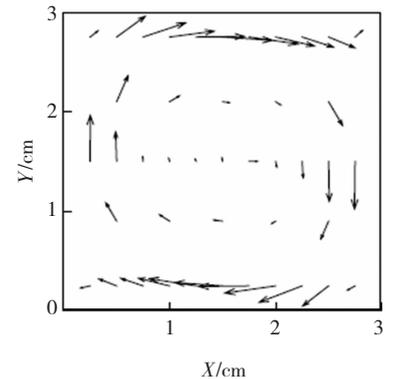
这说明在此自然对流换热过程中,导热占据了主导地位,对流换热占据次要地位.在 $Y=1.50\text{ cm}$ 和 $Y=0.25\text{ cm}$ 的温度分布中,数值模拟和实验^[4]吻合较好,但是在 $Y=2.75\text{ cm}$ 的温度分布中,数值模拟和实验则有一定的偏差,但是其总体的趋势是一样的.分析可知,因为在实验中的上表面边界是一个液态金属流体和空气相接触的自由表面,其传热系数较难确定,而在数值模拟中,由于此传热系数的不确定性,很难模拟出与实验十分接近的温度分布线,所以综合考虑此线上的温度分布是可以接受,并具有分析价值.



(a) 二维模拟结果



(b) 三维模拟结果



(c) 实验结果^[5]

图 5 模型内部区域中的速度矢量分布

此外,由图 3 还可以注意到在水平方向上,左右边界面的周围温度梯度较大,而在区域的中心处梯度较小,尤其是在 $Y=1.5\text{ cm}$ 的测试线中,中间的温度基本没有变化,结合图 5^[4] 可以清楚地说明,这是由于两边界有温度梯度而产生了浮升力,使流体在区域中产生了旋转,在区域的中心处其混合最好,导致温度变化较小。

图 5 给出了自然对流换热速度矢量图的数值模拟和实验的对比,通过比较可以清楚地看到,模拟结果较好地吻合了实验测量结果. 其总体的趋势是在区域内顺时针旋转. 结合图 6、7 和图 8^[4] 可以清楚地看到速度的大小. 由图 6~8 可见数值模拟和实验数据吻合良好. 观察得到在 $Y=1.50\text{ cm}$ 与 $Y=2.75\text{ cm}$, $Y=0.25\text{ cm}$ 两处的速度分布趋势是不一样的. 分析可知,在贴近边界处时其速度必然接近于零,而在边界接近 4 个顶角处表现更为明显,所以在 $Y=2.75\text{ cm}$ 和 $Y=0.25\text{ cm}$ 处及 $X=0\text{ cm}$ 和 $X=3\text{ cm}$ 处的速度都很小. 而由于重力和浮升力的综合作用使得区域中的流体以旋转的形式流动,这样必然是在区域中心处的速度较小,周围的速度逐渐增大. 由图 7 可见,虽然在紧贴边界处的速度很小,但是其有一个剧增的过程,然后在区域的中间处速度又变得较小。

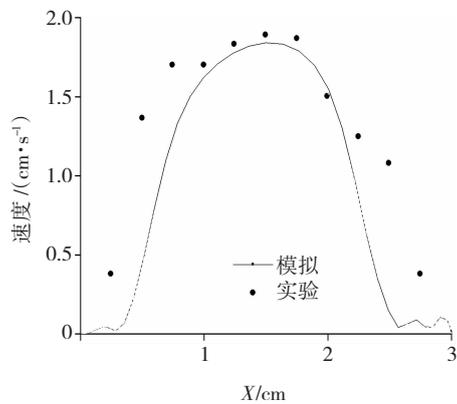


图 6 $Y=2.75\text{ cm}$ 线上的速度分布曲线

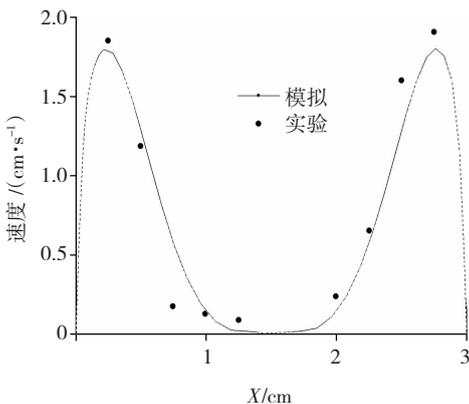


图 7 $Y=1.50\text{ cm}$ 线上的速度分布曲线

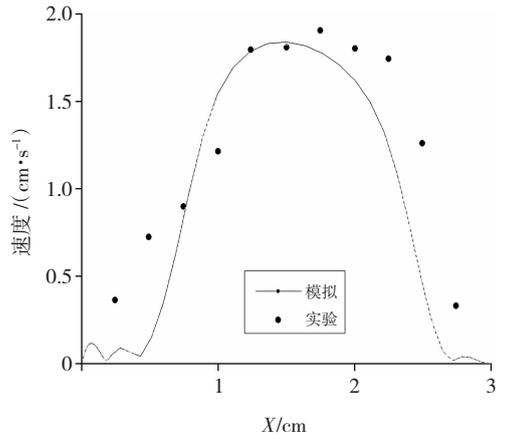


图 8 $Y=0.25\text{ cm}$ 线上速度分布曲线

2.3 不同 Gr 数的模拟分析

由图 9 可知,当液态金属 Ga 自然对流达到稳态时,其流场中出现了一个漩涡,并且随着 Gr 数的增加,其漩涡的大小也是增加的. 说明随着 Gr 数的增加,液态金属流动也越来越剧烈,其传热和

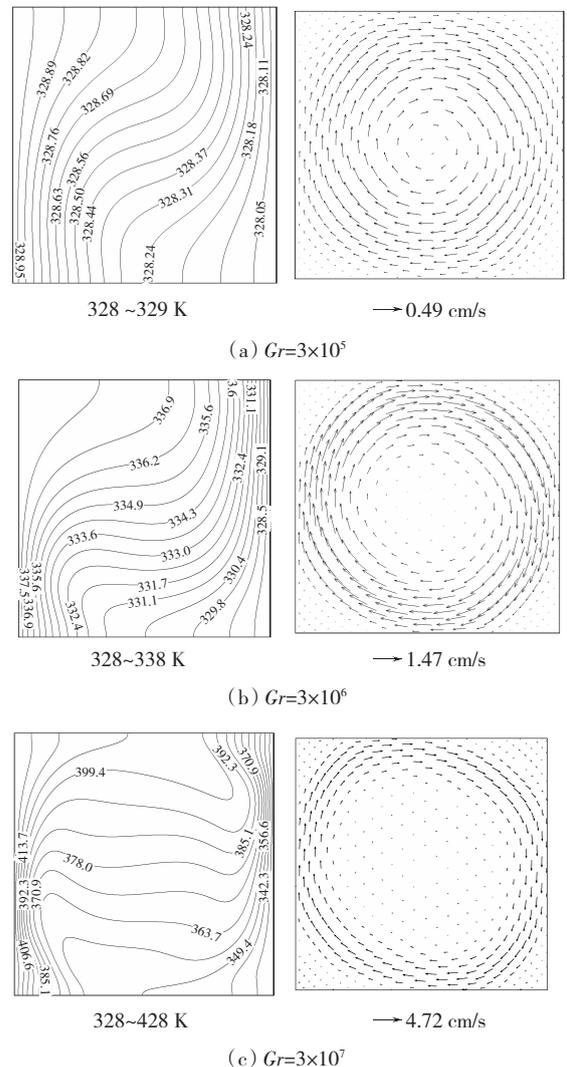


图 9 不同 Gr 数下的温度分布等值线和流场速度矢量分布图

流动的效果必然更加明显. 同样可以看到, 随着 Gr 数的增加, 其温度分布的等值线也发生了较大的变化, 由等值线基本是竖直分布到基本是水平布置, 从分布的变化可以得到, 随着 Gr 数的增加, 其传热特点也由液体间的导热传热转变成对流换热为主. 以上观察到的现象与一些文献^[8-10]中的报道是基本一致的.

3 结 论

1) 本文应用单流体模型数值模拟了在自然对流的条件下液态金属 Ga 的对流及换热情况, 并绘制了速度和温度分布图. 通过模拟得到这种流体在自然对流条件下的特点, 并分析了其产生的原因. 与实验结果进行了比较, 其模拟结果都与实验较好地吻合.

2) 实验和模拟结果表明, 在自然对流换热的条件下, 由于两边的温度不同, 区域内的液态金属在浮升力和重力的联合作用下, 形成了以顺时针方向旋转的速度流场, 并且产生了具有一定规律的速度大小分布.

3) 随着 Gr 数的增加, 自然对流也由以导热为主转变成以对流换热为主的换热特点. 但是, 由于在模拟的边界条件处进行了一定的简化假设, 得到的结果在某些方面可能会与实验结果存在一定误差, 还有待于进一步的研究.

参考文献:

[1] LANGLOIS W E. Buoyancy-driven flows in crystal-growth melts [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1985, 17: 119 - 125.
 [2] 张华俊, 陈浩, 王俊, 等. 冷、热端温度对半导体热电

堆发电性能影响的初步研究[J]. *太阳能学报*, 2001, 22(2): 148 - 152.

- [3] CHANDRASEKHAR S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability [D]. New York: [s. n.], 1981.
 [4] XU B, LI B Q. Hot-film measurement of temperature gradient induced natural convection in liquid gallium [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, 29(6): 697 - 704.
 [5] PAN Bo, SHANG D Y, LI B Q, *et al.* Magnetic filed effects on g -jitter induced flow and solute transport [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(1): 125 - 144.
 [6] ALEXANDER J I D, AMIROUDINE S, OUAZZANI J, *et al.* Analysis of the flow gravity toleration of Bridgman-Stockbarger crystal growth II: transient and periodic accelerations [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1991, 113: 21 - 38.
 [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 178 - 190.
 [8] BRAUNSFURTH M G, SKELDON A C, JUEL A, *et al.* Free convection in liquid gallium [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, 342: 295 - 314.
 [9] BARKOS G, MITSOULIS E, ASSIMACOPOULOS D. Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall functions [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1994, 18(7): 695 - 719.
 [10] MARKATOS N C, PERICLEOUS K A. Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1984, 27(5): 775 - 792.

(编辑 杨波)