

文章编号: CN31-1363(2000)02-0361-04

氧化物溶液表面张力对流速度场研究

金蔚青¹, 蒋元方², 梁歆桢¹,

葛长根², 杨家骏², 潘志雷¹, 刘照华¹

(1. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050; 2. 华东师范大学物理系, 上海 200050)

摘 要: 利用示踪粒子获得直径为 2mm 的环状铂金坩埚内 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{KNbO}_3$ 熔体近坩埚区域的表面张力对流速度场, 并从理论上推导出表面张力对流速度场解析表达式, 推导结果与实测结果一致.

关键词: 氧化物熔体; 表面张力对流; 速度场

中国分类号: O781 **文献标识码:** A

1 引言

表面张力对流是具有自由表面的熔体或溶液, 由于温度或浓度梯度引起的表面张力梯度而引发的一种对流形式. 在空间微重力环境下, 由于重力对流的消失使得表面张力对流上升为影响晶体生长过程的主要的对流形式, 因此, 深入地研究引起表面张力对流的原因和其对流形式对于在空间生长出高质量的晶体有着十分重要的意义. 目前对于表面张力对流的研究主要还是局限于模拟液体的阶段, 而对于实际熔体的观察和研究还很少, 对于氧化物的研究则更是如此. 金蔚青等利用休仑微分干涉显微镜观察了地面^[1]和空间^[2]的氧化物熔体的表面张力对流的形式.

本文利用 Na_2CO_3 作为示踪粒子测量了环形坩埚中 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{KNbO}_3$ 熔体近坩埚区域的速度场, 并从理论上推导出该区域的表面张力速度场, 两者符合较好.

2 实验

将 20wt% 的 KNbO_3 、80wt% 的 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 混合物加热到 750°C 并保温, 然后将加入少量直径约为 $20\mu\text{m}$ 的 Na_2CO_3 作示踪粒子观察熔体中的表面张力对流形态, 并且测量距炉圈内侧约 0.05mm 处熔体对流的速度场, 测量区域如图 1 中阴影部分中的 AB 段所示. C 点为温度最低处, A 点为温度最高点, B、D 的温度介于 A、C 之间, 具体分布示于图 2^[3]. 所选取的测量实验中所使用的坩埚是一由直径为 0.2mm 的铂丝制成的 2mm 外径的圆环, 有

收稿日期: 1999-11-17

基金项目: 国家科技部攀登计划资助项目 (攀 95- 预 -34-4), 国家自然科学基金重点资助项目 (59832080)

作者简介: 金蔚青, 男, 1941 年生, 博士, 研究员

关坩埚的详细情况参见文献 [4], 测量的方法是利用“高温熔体晶体生长实施观察装置” [4] 将发生在炉圈中的现象通过 CCD 摄像头, 传到录像和电视机上, 然后通过电视图像来测量示踪粒子的运动速度.

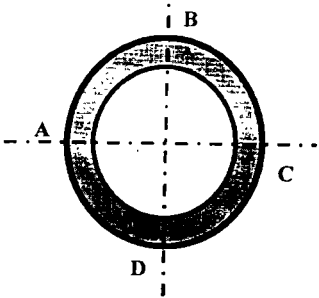


图 1 炉圈示意图和所测速度场的区域
Fig. 1 Schematic diagram of the loop-like crucible and the measuring region of the velocity field

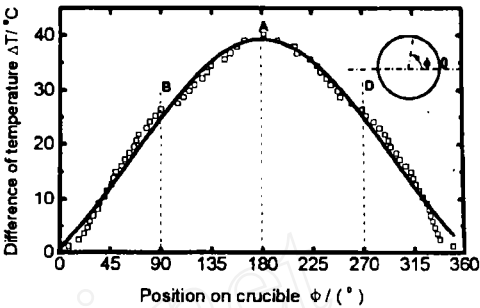


图 2 炉圈上温度分布图
Fig. 2 Temperature distribution of the loop-like crucible

3 结果与讨论

表 1 熔体中的表面张力对流速度场的实验测量值

Table 1 Experimental data for thermocapillary convection velocity field in melt

Angle/(°)	179.2	178.2	177.7	176.5	174.8	173.4	171.1	169.8	168.1
Line velocity/ 10^{-2}cms^{-1}	19.2	11.0	15.0	15.1	34.9	21.5	34.0	22.4	21.9
Angle/(°)	167.2	164.6	163.0	159.9	159.0	154.8	148.9	144.2	139.3
Line velocity/ 10^{-2}cms^{-1}	18.7	32.0	56.2	34.9	26.6	35.4	45.7	45.4	40.4
Angle/(°)	134.6	131.4	127.8	125.0	122.1	117.3	113.9	111.4	108.5
Line velocity/ 10^{-2}cms^{-1}	37.7	24.2	24.4	20.0	23.7	23.3	32.6	20.9	22.8
Angle/(°)	105.4	102.2	100.3	98.5	97.2	95.8	94.9	94.2	93.8
Line velocity/ 10^{-2}cms^{-1}	25.6	30.5	19.2	15.5	11.6	11.1	6.4	4.1	2.2

熔体温度为 750°C 时, 观察示踪粒子的运动, 发现在距坩埚内侧约 0.1mm 的熔体中, 示踪粒子从 A 点向 B(或 D) 点, 然后向 C 点作圆周运动. 因为 A 点的温度高于 B(或 D) 点的温度, 熔体中温度高处的表面张力小于温度低处的表面张力, 因此在 A 点和 B(或 D) 点之间就存在表面张力梯度引起的表面张力对流, 从而推动示踪粒子从 A 点向 B(或 D) 点运动, 在本实验中选择了从 A 点向 B 点运动的粒子, 测量了其在距炉圈内侧为 0.1mm 的圆弧上的线速度, 测量的结果见表 1. 其中 A 点所对应的角度为 180° .

4 理论分析

根据表面张力与熔体对流速度的关系^[5]：

$$\nu = C \left(\frac{\partial \sigma_T}{\partial T} \right) \Delta T / \nu \quad (1)$$

式中 C 为与坩埚尺寸有关的参数, σ_T 为表面张力系数, T 为温度, ΔT 为温度差, ν 为粘度系数. 设熔体中的粘度系数为:

$$\nu = ae^{-\frac{b}{RT}} \quad (2)$$

式中 R 为普适气体常数, a 、 b 是与 T 无关的常数.

按照热力学公式^[6]:

$$u = \sigma_T - T \frac{\partial \sigma_T}{\partial T} \quad (3)$$

上式 u 为熔体的内能, 移项后, 考虑 $u = \int C_v dT$ (4)

有 $\frac{d\sigma}{dT} = \frac{1}{T} (\sigma_T - \int C_v dT) \Delta T e^{-\frac{b}{RT}}$ (5)

式中 C_v 为等容比热

(5) 式代入 (1), 并考虑 (2) 式, 可得:

$$\nu = C \left[\frac{\sigma_T}{T} - C_v \right] \Delta T e^{-\frac{b}{RT}} \quad (6)$$

式中待定参数 C 已吸收了 (2) 式中常数 a , 按照我们所使用熔体的性质 $\sigma_T \sim 4$, $C_v = 0.33$, 用两个试验点确定了待定参数 $C = 120$, $b/R = 10$ 则由 (6) 式表达的表面张力差异产生的速度与温度差的关系, 由于我们只需要计算距坩埚内侧 0.1mm 处熔体的表面张力对流速度, 因此可以近似地认为熔体中各点的温度和其所仅靠的坩埚处的温度一样, 这样就可以根据图 2 中实测到的炉圈上各点的温度与邻近点的温度差得出熔体中的表面张力对流的速度值, 具体见表 2.

在图 3 中将理论计算结果与实验测量值比较, 实心的方块散点表示实验测出的数据, 空心的圆圈和实线连接表示理论推导的数据, 发现两者符合得较好, 说明熔体中示踪粒子的运动主要是由于表面张力作用的结果给出.

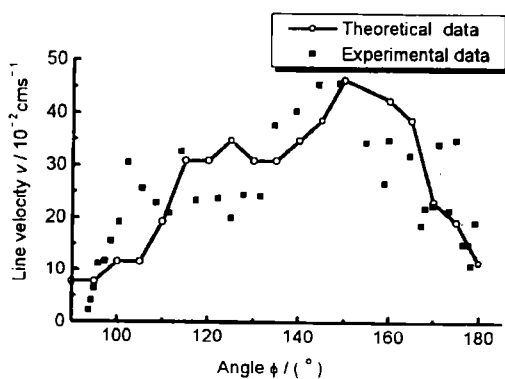


图 3 熔体中表面张力对流速度场的实验测量值与理论计算值比较

Fig. 3 Comparison between experimental data and theoretical calculation of thermocapillary convection in $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{KNbO}_3$ melt

表 2 熔体中表面张力对流速度场的理论计算结果

Table 2 Theoretical calculation results for thermocapillary convection velocity field in melt

Angle/(°)	90	95	100	105	110	115
Line velocity/ 10^{-2}cms^{-1}	7.72	7.72	11.58	11.58	19.30	30.88
Angle/(°)	120	125	130	135	140	145
Line velocity/ 10^{-2}cms^{-1}	30.88	34.74	30.88	30.88	34.74	38.61
Angle/(°)	150	160	165	170	175	180
Line velocity/ 10^{-2}cms^{-1}	46.33	42.47	38.61	23.17	19.31	11.58

5 结论

实验获得环铂金坩埚中 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7+\text{KNbO}_3$ 熔体中近坩埚区域的表面张力对流的速度场；从理论上推导出该区域表面张力对流速度场的解析表达式；两者符合较好，说明在该区域的对流形式为表面张力对流。

参考文献：

[1] Jin Weiqing, Pan Zhilei, Chen Ning, *et al. Space Forum*, 1999, 4 (4): 321-330.
[2] Jin Weiqing, Liu Zhao-hua, Pan Zhilei. *J.Jpn.Soc.Microgravity Appl.*, 1998, 15: Supplement II , 566-570.
[3] Liang Xinan, Jin Weiqing, Pan Zhilei, *et al. IUMRS-ICAM99*, Beijing, 1999. 529.
[4] Jin Weiqing, Chen Jinyuan, Li Wensheng, *et al. Ferroelectrics*, 1993, 142: 13-18.
[5] Scheel H J, Schulz-Dubois E O. In: *Convective transport and instability*, Jürgen, Zierep, ed. Herbert Oerteljr, Karlsruhe: Branun, 1982. 491-513.
[6] 马本堃, 高尚惠, 孙煜. 热力学与统计物理. 北京: 人民教育出版社, 1980. 77.

Experimental Measurement and Theoretical Analysis of Oxide Melt Thermocapillary Convection Velocity Field

JIN Wei-Qing¹, JIANG Yuan-Fang², LIANG Xin-An¹, GE Chang-Gen²,
YANG Jia-Jun², PAN Zhi-Lei¹, LIU Zhao-Hua¹

(1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China; 2. Physics department, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Na_2CO_3 particles were utilized to trace the thermocapillary convection of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7+\text{KNbO}_3$ melt in a loop-like crucible. The thermocapillary convection velocity field beside the crucible inner edge was experimentally measured. From thermodynamic equation this velocity field was also obtained theoretically and it confirmed with the experimental data exactly.

Key words oxide melt; thermocapillary convection; velocity field