

金属液在旋转电磁搅拌器作用下的流动分析

张 琦, 金俊泽, 王同敏, 李廷举, 郭庆涛

(大连理工大学 三束材料改性国家重点实验室 材料科学与工程学院, 大连 116023)

摘 要: 对自行研制的电磁搅拌器中金属液的电磁场和流场进行数值模拟, 并进行实验验证。结果表明: 在旋转磁场搅拌器作用下, 金属液中除存在横截面上的旋转离心流动外, 还存在着纵向的大环流, 但二者速度不同, 前者比后者高出一个数量级; 金属液表面的磁感应强度 B_0 与电流频率成反比, 与输入的电压成正比; 金属液所受电磁力的最大值与磁感应强度 B_0 的平方成正比, 与频率的 n 次方成反比, 其中 $1/2 \leq n \leq 3/2$; n 与金属液的电阻率有关, 电阻率越小则 n 越小; 对于纯铝 n 为 $1/2$, 对于纯锡和纯铅 n 为 1 ; 金属液的转速与磁感应强度 B_0 成正比, 与金属液密度的平方根成反比。

关键词: 金属液; 旋转电磁场; 流动; 数值模拟

中图分类号: TB 331

文献标识码: A

Analysis of molten metal flow in rotating magnetic field

ZHANG QI, JIN Jun-ze, WANG Tong-min, LI Ting-ju, GUO Qing-tao

(State Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams,

School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The couple field of electromagnetic force and flow was simulated for the self-developed rotating electromagnetic stirring equipment. The results show that under the stirring electromagnetic field, not only rotating flow exists in the cross section but also circulation flow exists in the vertical section of molten metal. The velocity of circulation flow is one order lesser than that of the rotating flow. The magnetic flux density of liquid metal surface (B_0) is in inverse proportion to the current frequency whereas is in direct proportion to the input volt/current. The maximum electromagnetic force is in direct proportion to the square of magnetic flux density (B_0) whereas is in inverse proportion to the n -th-power of current frequency. n is relative to the electric resistance of molten metal and varies from $1/2$ to $3/2$, which is $1/2$ for aluminum metal and 1 for tin metal and lead metal. The rotating velocity of molten metal is in direct proportion to the magnetic flux density (B_0) and is in inverse proportion to the square root of the density of molten metal.

Key words: molten metal; rotating magnetic field; flow field; mathematical simulation

在连续铸造过程中施加旋转搅拌磁场能够有效改善铸坯的凝固组织, 进而提高其力学性能。这主要是由于金属液在旋转磁场作用下产生强制流动, 促使熔体内温度场均匀化, 减小温度梯度, 同时降低金属液的冷却速率, 从而促使柱状晶向等轴晶的转变; 而且金属液中的流动能够促使熔体内夹杂物的上浮, 因而

可改善铸坯的凝固组织以及提高其力学性能^[1-5]。因此, 急需了解旋转磁场作用下金属液的流动, 但是由于金属液的不透明性, 无法直接观察到金属液的内部流动, 因此目前对金属液流动的研究主要有物理模拟和数值模拟两种方法^[6-7]。采用 PIV 等物理模拟的方法设备昂贵, 实验费用较高, 且无法直接对金属液进

基金项目: 国家重点基础研究计划资助项目(5133301ZT4); 国家自然科学基金资助项目(50274017; 50474055; 50234020); 辽宁省自然科学基金资助项目(20052176)

收稿日期: 2006-06-05; **修订日期:** 2006-10-17

通讯作者: 张 琦, 博士研究生; 电话: 0411-84706114; E-mail: zhangqidlut@126.com

行模拟。而数值模拟可以弥补这个不足。张宏丽等^[8]对行波磁场作用下的磁感应强度分布以及金属的受力和流动情况进行了数值分析。本文作者利用商业软件 ANSYS 和 Fluent 对自行研制的旋转电磁搅拌装置中金属液的受力和流动情况进行耦合模拟,不但获得金属液的内部流动情况,而且得出搅拌速度、电磁力以及金属液表面的磁感应强度与实验电参数(电流强度和频率)和金属液的物性参数(密度、粘度、电阻率)之间的关系。可为控制旋转磁场搅拌器作用下金属液的流动提供依据。

1 实验

图 1 所示为自行研制的相位差为 90° 的两相电磁搅拌装置实物图,其中标有字母 A、B、C、D 的是线圈。首先根据“小线圈法”^[9]测量空载情况下搅拌装置中心横截面中各处的磁感应强度值。然后测量纯铝、纯锡和纯铅在不同输入电流强度下的转速,测量转速过程如下^[10]:用 SG2-5-12 坩埚电阻炉将金属熔化至一定温度(铝熔体为 750 ℃、锡为 280 ℃、铅为 380 ℃),倒入内径为 35 mm 的坩埚搅拌器中,使金属液面略高于搅拌器的中心。同时打开冷却水,合上电源接通磁场,调整输入电压,待搅拌状态基本稳定后,将涂有一层焊锡油的铜板沿轴向垂直插入坩埚中测得纯锡和纯铅的弯月面的形状,将锡箔沿轴向垂直插入坩埚中测得纯铝的弯月面形状。利用金属液的弯月面形状可以量得弯月面的深度,不同输入电压下金属液的转速为^[11]

$$w = \sqrt{gy} / \sqrt{2\pi l}$$

(1)

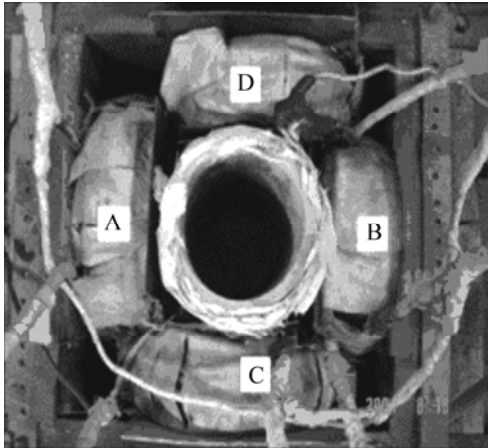


图 1 搅拌装置实物图
Fig.1 Photo of stirring equipment

式中 w 为转速, r/s; y 为弯月面的深度, m; l 为金属液的半径, m; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 。

实验测得的纯铝、纯锡和纯铅在电流频率为 50 Hz, 不同输入电压下的弯月面深度值如表 1 所示。

表 1 不同输入电压下金属液的弯月面深度
Table 1 Meniscus depth of molten metal at different input voltages

φ/V	70	80	115
y/m	0.008	0.013	0.03
φ/V	40	55	70
y/m	0.011	0.025	0.031
φ/V	20	30	40
y/m	0.013	0.027	0.037

2 数值模拟

2.1 模型的建立

计算模型如图 2 所示,包括金属液、线圈、铁芯和空气。模拟过程中用到的主要计算参数如表 2 和 3 所列。计算中做了如下假设: 1) 各物性参数如密度、粘度在搅拌期间不随温度发生变化,因此可以忽略浮力对流动的影响; 2) 金属液为不可压缩的牛顿流体; 3) 忽略金属液的流动对电磁场的影响。

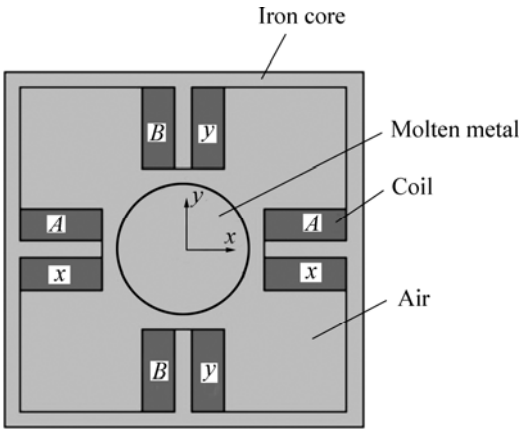


图 2 金属液受力及流动的计算模型
Fig.2 Computation model of electromagnetic force and flow of molten metal

2.2 电磁场计算的理论基础^[12-13]

采用矢势 A 和标势 φ 来描述空间中的电磁场,存

表 2 模拟过程的主要计算参数

Table 2 Main computation parameters for numerical simulation

Number of windings	120
Voltage/V	20–115
Current frequency/Hz	1–50
Cross-sectional area of coil/m ²	0.075×0.062 5
Relative permeability of coil	1
Electrical permeability of coil/(10 ⁻⁸ Ω·m)	1.678
Relative permeability of iron	10 000
Electrical permeability of iron/(10 ⁻⁸ Ω·m)	9.71
Relative permeability of air	1

表 3 纯金属的物性参数

Table 3 Physical parameters of pure metal

Metal	Electrical permeability/ (10 ⁻⁸ Ω·m)	ρ / (kg·m ⁻³)	Relative permeability	μ / (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
Al	2.6548	2 385	1	0.001(750 °C)
Sn	11	7 000	1	0.006(280 °C)
Pb	20.684	10 678	1	0.008(380 °C)

在如下关系:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (2)$$

根据 Maxwell 方程组, 经过推导分别得到磁场偏微分方程和电场偏微分方程分别为

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\nabla^2 \phi - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; $\mathbf{E}$ 为电场强度; μ 为磁导率; ε 为介电常数。 ∇^2 为 Laplace 算子, $\nabla^2 =$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)。$$

对式(3)和(4)利用有限元法进行数值求解得到磁矢 $\mathbf{A}$ 及电势 ϕ 的分布值, 进而得到电磁场的各种物理量如磁感应强度。

电磁力的求解通过下式得到:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\mu} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} - \frac{1}{2\mu} \nabla B^2 \quad (5)$$

边界条件:

在整个区域外部施加磁力线平行边界条件: $n \times \mathbf{A} = 0$

2.3 流场计算的理论基础

将由 Maxwell 等式计算得到的洛伦磁力施加到 Navier-stoke 模型中, 计算得到金属液受电磁力后的流动情况。计算时需在金属液的四周施加无滑移边界条件^[14-16]。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) + F \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t \phi - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \phi - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (10)$$

式中 $\phi = 2\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y}\right)^2$; $\sigma_k = 1.0$;

$\sigma_\varepsilon = 1.3$; $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 。 ρ 为密度; p 为压力; g 为重力加速度; u 为速度; μ 为动力粘度; μ_e 为有效粘度; μ_t 为湍流粘度; k 为湍动能; ε 为扩散率。

2.4 结果与分析

本文利用 ANSYS 和 FLUENT 软件分别求解上述 Maxwell 等式和 Navier-stoke 方程, 得到搅拌器中的磁场分布情况以及金属液的受力和流动情况。为了验证模拟的可靠性, 将实验测量和数值模拟得到的搅拌器中心横截面上各点处的磁感应强度值进行了比较, 如图 3 所示。同时还比较了测量计算得到的金属液的转速与模拟得到的金属液的转速, 如图 4 所示。从这两个图可以看出无论是磁感应强度值还是金属液的转速, 实验和模拟结果的变化规律完全一致, 只是由于测量设备精度的局限性、自制搅拌器的不规范性以及模拟过程的简化计算导致了模拟和实验的具体结果有了一定的差别, 以致最大的误差达到了 30%, 但这并不影响模拟结果的参考意义。图 5 所示是电流频率为 50 Hz、输入电压为 20 V 时纯铝、纯锡和纯铅所受电磁力。图 6 所示为金属液的流动状态图。从图 5 中可以看出当金属液的电阻率发生变化时, 金属液所受电

磁力的方向发生了明显的改变。当电阻率减小时, 金属液所受周向力逐渐减小, 而径向力逐渐增大, 但仍以周向力为主。从图 6 中可以看出虽然 3 种金属液的受力方向不同, 但是流动模式完全一致, 主要是周向的旋转流动。此外, 本实验还模拟了沿中心轴的纵截面上金属液的流动情况, 为了简化计算过程以及模型的对称性, 只选取了纵截面的 1/2 进行模拟, 结果如图 7 所示, 其中左侧为金属液的分布图, 右侧为金属

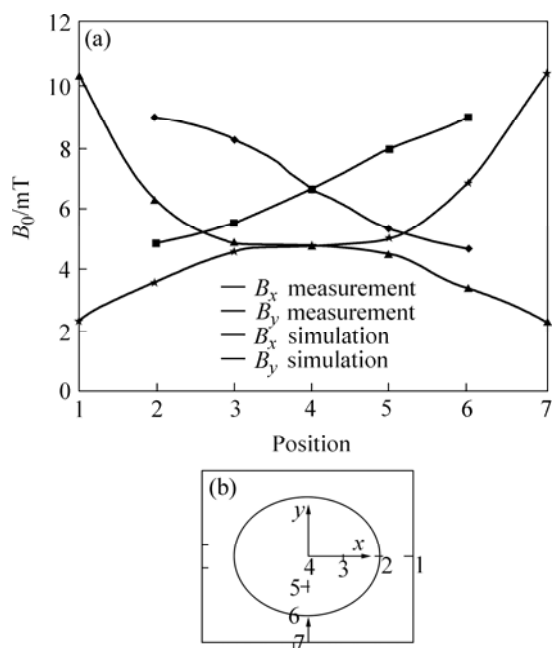


图 3 电流频率为 50 Hz, 输入电压为 20 V 时模拟和测量得到的搅拌器中心横截面各处磁感应强度值的比较

Fig.3 Comparison of magnetic flux density(a) at different positions of transverse cross section(b) by measurement and simulation at input voltage of 20 V and frequency of 50 Hz

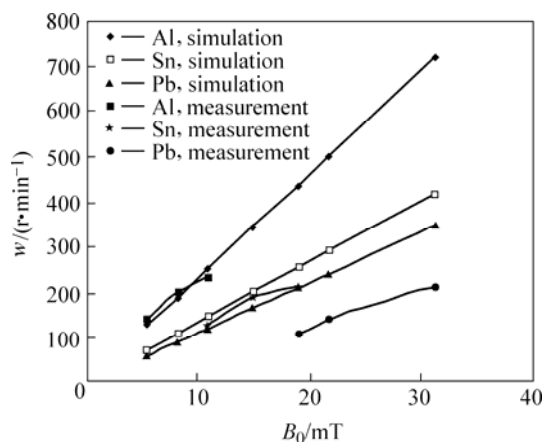


图 4 电流频率为 50 Hz 时, 不同输入电压下, 模拟与测量得到的纯铝、纯锡和纯铅转速值的比较

Fig.4 Comparison of rotating velocity of pure aluminum, pure tin and pure lead by measurement and simulation at current frequency of 50 Hz

液内流速图。可以看出在旋转离心力的作用下, 金属液中心凹陷, 使纵截面上产生一个大环流, 壁面处金属液的流速向上而中心处金属液的流速向下。和主流流动相比, 环流的速度很小, 基本上与主流相差一个数量级。

为了能够控制旋转磁场对金属液的搅拌强度, 本文还计算了金属液的表面磁感应强度与输入电流的频率和电压之间的关系、金属液所受电磁力与电流频率和表面磁感应强度之间的关系、金属液的转动速度与金属液表面磁感应强度以及金属液密度的关系, 结果如图 8~13 所示。实验结果表明: 1) 金属液表面的磁

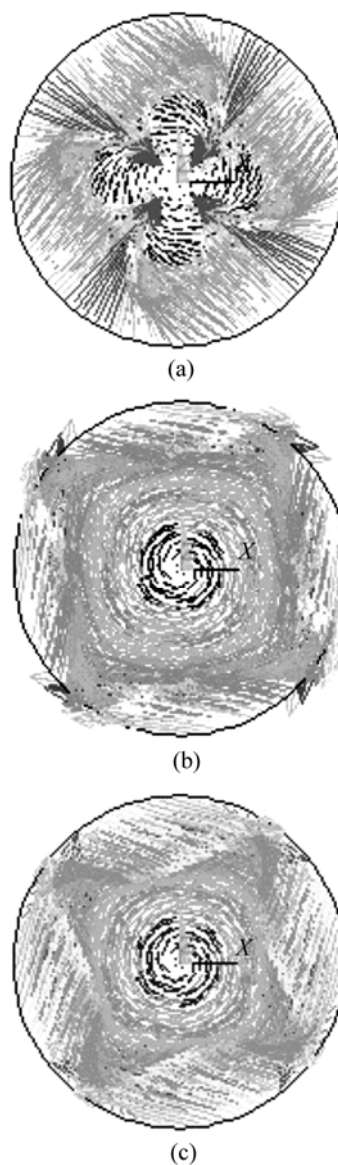


图 5 输入电流频率为 50 Hz, 电压为 20 V 时金属液所受电磁力图

Fig.5 Electromagnetic force of pure aluminum, pure tin and pure lead at input voltage of 20 V and current frequency of 50 Hz: (a) Pure Al, $F_{\max}=25\,340\text{ N/m}^3$; (b) Pure Sn, $F_{\max}=14\,098\text{ N/m}^3$; (c) Pure Pb, $F_{\max}=13\,250\text{ N/m}^3$

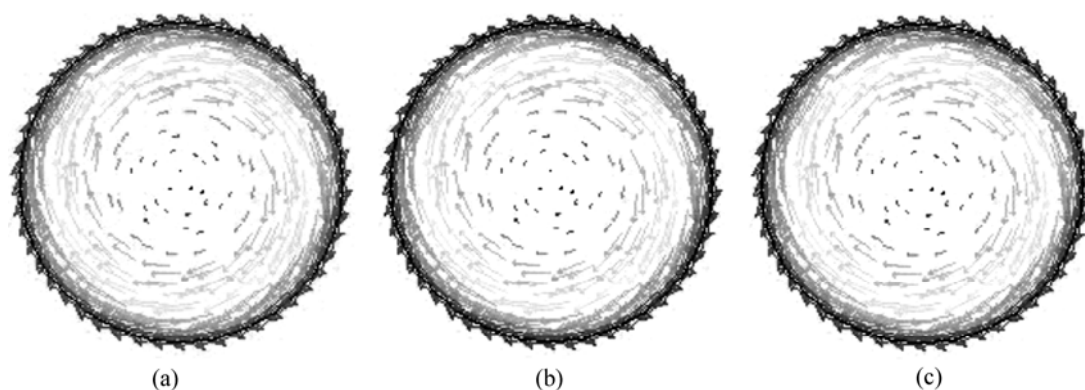


图 6 输入电流频率为 50 Hz, 电压为 20 V 伏时金属液的流动状态图

Fig.6 Flow of pure aluminum, pure tin and pure lead at input voltage of 20 V and current frequency of 50 Hz: (a) Pure Al, $v_{\max}=0.46$ m/s; (b) Pure Sn, $v_{\max}=0.27$ m/s; (c) Pure Pb, $v_{\max}=0.22$ m/s

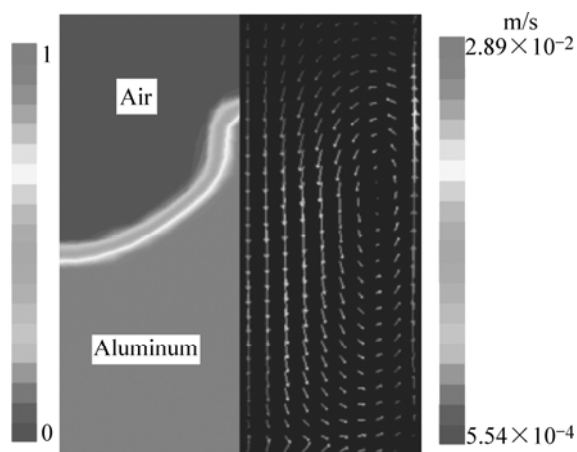


图 7 输入电流频率为 50 Hz, 电压为 20 V 时, 在纵截面上纯铝的分布图以及流速图

Fig.7 Melt profile and velocity field profile of pure aluminum in vertical section at input voltage of 20 V and current frequency of 50Hz (The left is meniscus of pure aluminum and the right is velocity vector)

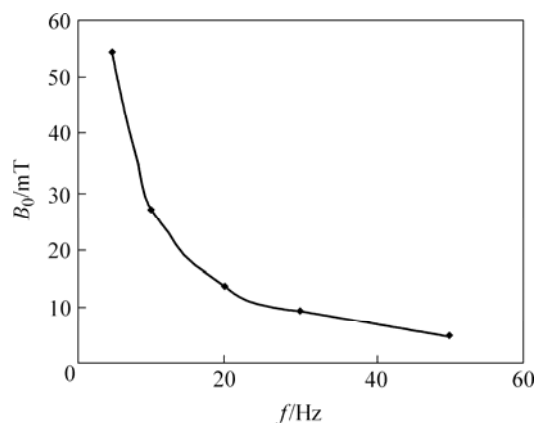


图 8 输入电压为 20 V 时金属液表面磁感应强度与电源频率之间的关系

Fig.8 Relationship between surface magnetic flow density and frequency at input voltage of 20 V

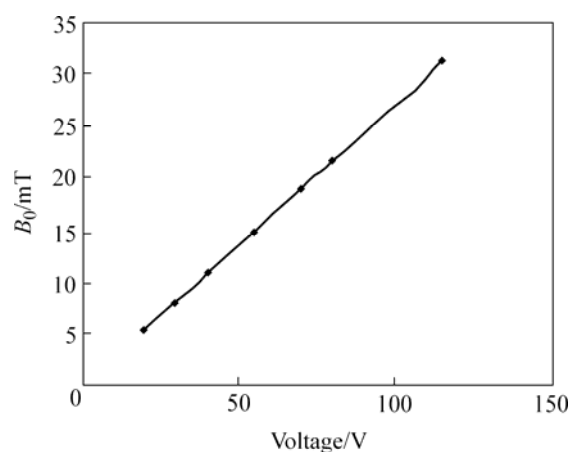


图 9 频率为 50 Hz 时输入电压与磁感应强度之间的关系

Fig.9 Relationship between input voltage and magnetic flow density at current frequency of 50 Hz

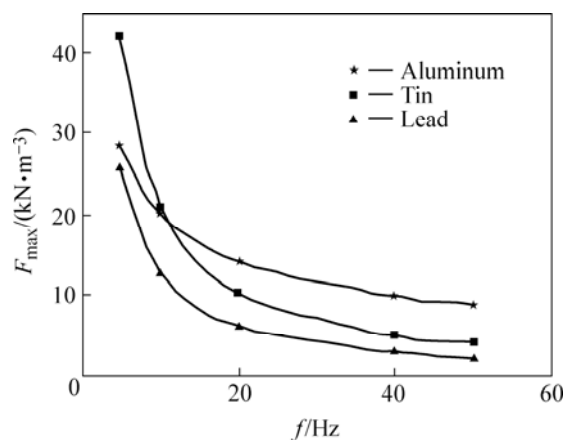


图 10 输入电压 20 V 时纯铝、纯锡和纯铅所受电磁力密度最大值与电流频率之间的关系

Fig.10 Relationship between maximum electromagnetic force and current frequency of pure aluminum, tin and lead at input voltage of 20 V

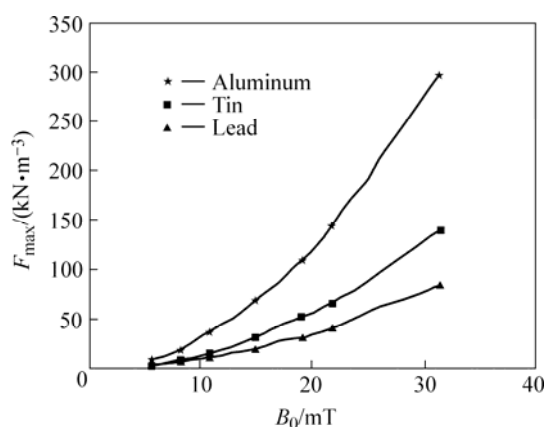


图 11 电源频率 50 Hz 时纯铝、纯锡和纯铅所受电磁力密度最大值与金属液表面磁感应强度之间的关系

Fig.11 Relationship between maximum electro-magnetic force and magnetic flux density of pure aluminum, tin and lead at current frequency of 50 Hz

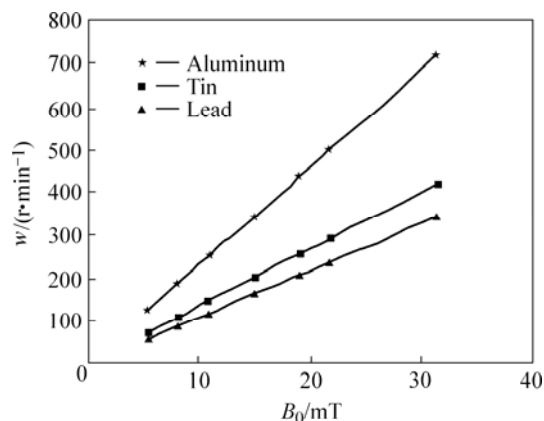


图 12 电流频率 50 Hz 时纯铝、纯锡和纯铅的转速与金属液表面磁感应强度之间的关系

Fig.12 Relationship between rotating velocity and magnetic flux density of pure aluminum, tin and lead at current frequency of 50 Hz

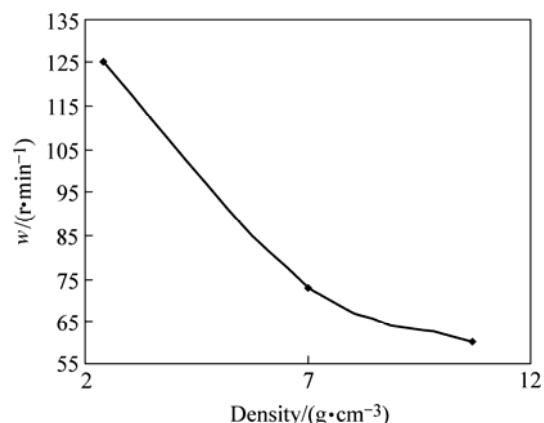


图 13 输入电压 20 V、电流频率 50 Hz 时金属液的密度与转速之间的关系

Fig.13 Relationship between rotating velocity and the various material density at input voltage of 20 V and current frequency of 50 Hz

感应强度 B_0 与电流频率成反比, 与输入的电压成正比; 2) 金属液所受电磁力的最大值与磁感应强度 B_0 的平方成正比, 与频率的 n 次方成反比, 其中 $1/2 \leq n \leq 3/2$ 。 n 值与金属液的电阻率有关, 电阻率越小则 n 越小。对于纯铝 n 为 $1/2$, 对于纯锡和纯铅 n 为 1 ; 3) 金属液的转速与磁感应强度 B_0 成正比, 与金属液密度的平方根成反比。因此, 对于某一金属, 如果想提高其在旋转搅拌器作用下的流动强度, 可以通过降低电流频率和提高电流强度来实现。

3 结论

1) 在旋转磁场搅拌器作用下, 金属液中除了存在横截面上的旋转离心流动外, 还存在着纵向的二次大环流, 但二者在数值上存在很大的差异, 后者与前者相差一个数量级。

2) 金属液表面的磁感应强度 B_0 与电流频率成反比, 与输入的电压成正比; 金属液所受电磁力的最大值与磁感应强度 B_0 的平方成正比, 与频率的 n 次方成反比, 其中 $1/2 \leq n \leq 3/2$ 。 n 与金属液的电阻率有关, 电阻率越小则 n 越小。对于纯铝 n 为 $1/2$, 对于纯锡和纯铅 n 为 1 ; 金属液的转速与磁感应强度 B_0 成正比, 与金属液密度的平方根成反比。

3) 不同的金属液由于其电阻率的差异会导致受力状况不同, 随着电阻率的减小, 金属液所受电磁力的周向分量减小, 径向分量增加。

REFERENCES

- [1] 马国军, 茅洪祥, 陈崇峰. 连铸结晶器电磁搅拌对夹杂物的影响[J]. 云南冶金, 2004, 29(2): 50-53.
MA Guo-jun, MAO Hong-xiang, CHEN Chong-feng. Effect of electromagnetic stirring in continuous casting mold on inclusion[J]. Yunnan Metallurgy, 2004, 29(2): 50-53.
- [2] Griffiths W D, McCartney D G. The Effect of electromagnetic stirring on macrostructure and macrosegregation in the aluminum alloy 7150[J]. Mater Sci Eng A, 1997, A222: 140-148.
- [3] Vives C. Crystallization of aluminum alloys in the presence of vertical electromagnetic force fields[J]. Journal of Crystal Growth, 1997, 173: 541-549.
- [4] 朱明原, 许珞萍, 邵光杰. EMS-DC 法制备的半固态 ZL101A 铝合金的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(suppl 1): 150-154.
ZHU Ming-yuan, XU Luo-ping, SHAO Guang-jie. Microstructure and mechanical properties of semi-solid ZL101A

- alloy prepared by EMS-DC method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(suppl 1): 150-154.
- [5] 齐雅丽, 贾光霖, 赵玉华. 电磁搅拌对铸锭凝固组织的影响[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2004, 21(2): 17-18.
- QI Ya-li, JIA Guang-lin, ZHAO Yu-hua. Effect of electromagnetic stirring on solidification structure of casting[J]. Journal of shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2004, 21(2): 17-18.
- [6] 王学东, 张伟强, 时海芳. 旋转磁场电磁搅拌数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(5): 543-545.
- WANG Xue-dong, ZHANG Wei-qiang, SHI Hai-fang. Numerical simulation of rotating magnetic field EMS[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2000, 19(5): 543-545.
- [7] 黄军涛, 赫冀成. 方坯连铸二冷区电磁旋转搅拌数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2001, 13(5): 19-23.
- HUANG Jun-tao, HE Ji-cheng. Numerical simulation of second cooling segment electromagnetic stirring in billet continuous casting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2001, 13(5): 19-23.
- [8] 张宏丽, 王恩刚, 贾光霖, 赫冀成. 影响线性电磁搅拌流场分布的电参数分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(8): 773-775.
- ZHANG Hong-li, WANG En-gang, JIA Guang-lin, HE Ji-cheng. Influence of current parameters in the stirrer on the flow field during linear electromagnetic stirring[J]. Journal of North-eastern University (Natural Science), 2002, 23(8): 773-775.
- [9] 张兴国, 金俊泽, 曹志强. 电磁铸造中磁场分布[J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(2): 179-183.
- ZHANG Xing-guo, JIN Jun-ze, CAO Zhi-qiang. Magnetic field distribution in electromagnetic casting[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996, 36(2): 179-183.
- [10] 林东. 电磁搅拌对分离共晶的作用[D]. 大连: 大连理工大学, 1996: 16.
- LIN Dong. Study of Separated Eutectic Phenomenon under the Electromagnetic Stirring[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1996.
- [11] 金俊泽, 任忠鸣, 郭可切. 熔体流动对定向凝固铝合金的溶质分布及组织的影响[J]. 大连工学院学报, 1985, 24(4): 108-113.
- JIN Jun-ze, REN Zhong-ming, GUO Ke-ren. The influence of melt flowage on the distribution and composition of solute of solidified aluminum alloy[J]. Journal of Dalian Institute of Technology, 1985, 24(4): 108-113.
- [12] Spitzer K H. Application of rotating magnetic fields in czochralski crystal growth[J]. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 1999: 39-58.
- [13] 冯慈璋. 电磁场[M]. 北京: 人民教育出版社, 1985.
- FENG Ci-zhang. Electromagnetic Field[M]. Beijing: People Education Publishing Company, 1985: 279.
- [14] 马信山, 张齐也, 王平. 电磁场的理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- MA Xin-shan, ZHANG Qi-ye, WANG Ping. The Theory Foundation of Electromagnetic Field[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-9.
- WANG Fu-jun. Computational Fluid Dynamics Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 7-9.
- [16] 周伟, 韩海鹰, 贾斌, 张胤, 麻永林, 贺友多. 小方坯连铸结晶器电磁搅拌磁场和流场的模拟仿真[J]. 包头钢铁学院学报, 1999, 18(2): 139-142.
- ZHOU Wei, HAN Hai-ying, JIA Bin, ZHANG Yin, MA Yong-lin, HE You-duo. Simulation on magnetic fields and fluid fields of M-EMS in billet continuous casting[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 1999, 18(2): 139-142.

(编辑 龙怀中)