

360 mm × 450 mm 方坯连铸结晶器电磁搅拌的数值模拟

陈永^{1,2} 朱苗勇¹ 任兵芝¹

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 攀枝花钢铁研究院材料所, 攀枝花 617000)

摘要 根据麦克斯韦电磁理论, 建立了 360 mm × 450 mm 方坯连铸结晶器电磁旋转搅拌的数学模型, 分析了结晶器内电磁场、电磁力的分布特征以及电流(300 ~ 700 A)、搅拌频率(2.0 ~ 3.0 Hz)对电磁场和电磁力的影响。结果表明, 旋转磁场在结晶器搅拌区域内产生电磁力, 使钢液在水平方向形成旋转流动; 磁感应强度与搅拌电流成线性关系, 在低频率搅拌条件下频率对电磁搅拌强度的影响较小。

关键词 大方坯连铸 结晶器电磁搅拌 磁场 数值模拟

Numerical Simulation for Electromagnetic Stirring of Mold for 360 mm × 450 mm Bloom Concasting

Chen Yong^{1,2}, Zhu Miaoyong¹, Ren Bingzhi¹

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004;
2 Department of Material Research, Panzhihua Iron and Steel Research Institute, Panzhihua 617000)

Abstract According to Maxwell electromagnetic field theory a mathematical model for simulating the mold electromagnetic rotary stirring for 360 mm × 450 mm bloom concasting has been established to analyze the distribution characteristics of magnetic flux density and electromagnetic stirring force, and the effect of current strength (300 ~ 700 A) and stirring frequency (2.0 ~ 3.0 Hz) on flux density and stirring force. Results show that the rotary magnetic field can generate the electromagnetic force in mold to make molten steel whirling at horizontal section; the relation between magnetic flux intensity of induction and stirring current is linearity, and with lower stirring frequency the effect of frequency on electromagnetic stirring intensity is slight.

Material Index Bloom Concasting, Mold Electromagnetic Stirring, Magnetic Field, Numerical Simulation

电磁搅拌技术因能显著改善铸坯质量, 在连铸生产中得到了广泛应用^[1-4]。通过建立的数学模型分析了攀钢 360 mm × 450 mm 方坯连铸结晶器内电磁场、电磁力的分布特征以及搅拌电流、频率等对磁感应强度和电磁力的影响。

1 结晶器电磁搅拌电磁场计算数学模型

1.1 结晶器电磁搅拌控制方程

电磁流体力学控制方程包括麦克斯韦方程组、运动流体的欧姆定律和连续方程^[5-7]。在连铸电磁搅拌过程中, 若假定: (1) 钢水是不可压缩的导电液体; (2) 钢水的密度 ρ 、运动粘性系数 ν 、电导率 σ 和磁导率 μ 等物性参数为标量常数; (3) 钢水与坯壳导磁率取真空导磁率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$), 则其控制方程可以描述为:

$$\text{安培定律: } J = \nabla \times H \quad (1)$$

$$\text{法拉第定律: } \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{磁通连续方程: } \nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\text{欧姆定律: } J = \sigma \cdot [E + (U \times B)] \quad (4)$$

$$\text{本构方程: } B = \mu \cdot H \quad (5)$$

式中: B - 磁感应强度/T; J - 感应电流密度/($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$); H - 磁场强度/($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$); E - 电场强度/($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$); $U(u, v, w)$ - 流体速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); σ - 电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$); μ - 磁导率/($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)。

由麦克斯韦方程组推导可得到磁场的计算方程:

$$\nabla \times (\nabla \times B) = -\mu\sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (6)$$

根据感应电流和磁感应强度的相互作用得到洛伦兹力:

$$F = J \times B \quad (7)$$

式中: F - 电磁力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)。

1.2 结晶器电磁搅拌电磁场计算有限元模型

选用三维实体单元, 对电磁搅拌器、铸坯采用映射网格划分法建立攀钢 360 mm × 450 mm 方坯连铸结晶器电磁搅拌电磁场有限元分析的几何模型(图 1a)。

其边界条件为: (1) $x = 0$ 和 $y = 0$ 两个平面为对称面, 在对称面上, 标量电位为 0; 矢量磁位在法线方向上的梯度为 0, 在切线方向上的分量为 0; (2)

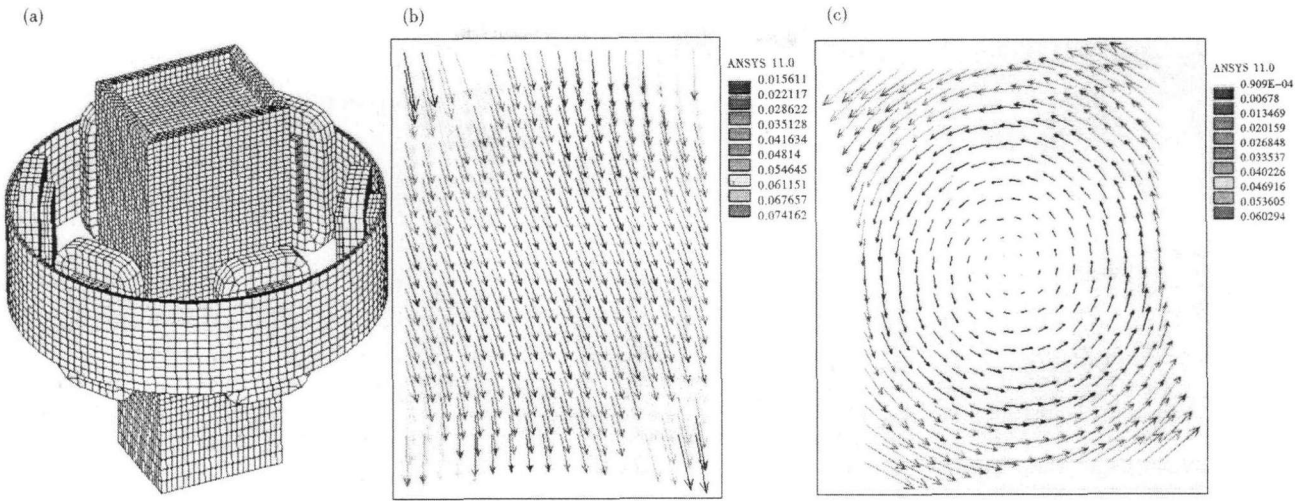


图1 (a)有限元模型的网格划分示意图;(b)钢液内磁场分布;(c)作用在钢液上的电磁力分布:电流 $I = 600$ A, 频率 $f = 2.4$ Hz
 Fig.1 (a) Schematic of calculating mesh of FEM; (b) profiles of magnetic flux density in molten steel; (c) profiles of electromagnetic force to molten steel; current $I = 600$ A, frequency $f = 2.4$ Hz

由于磁场在离开感应线圈一定距离后迅速衰减,在无穷远处为0。通常取相对感应线圈尺寸3~4倍远处为无穷远边界,在此边界上满足第1类边界条件;(3)在两种不同磁介质交界面上满足磁介质交界面条件,此条件在有限元方程中自动满足。

初值条件为:磁场为3对极旋转交变磁场,3对极之间的电磁场相位差为 $2\pi/3$ 。电磁场初值条件有电磁搅拌的输入电流、电压和电源频率,由于搅拌器外壳能起到屏蔽作用,忽略漏磁,则设定搅拌器最外层节点的磁势位为0。

电磁场计算所需的材料物性参数见表1。

2 结晶器电磁搅拌过程电磁场计算模型的应用

2.1 结晶器内电磁场和电磁力分布

钢液内磁场和作用在钢液上的电磁力分布见图1(b,c)。由图1(c)可见,电磁力总体上表现为沿切向方向上的力,作用方向与磁场的旋转方向一致,在同一截面相同径向距离处的电磁力大小相等;电磁力在结晶器内轴向向上的分布呈两端小,中间大的分布状态(图2a),切向电磁力从表面到中心衰减迅速,铸坯中心受到的电磁力较小(图2b)。

2.2 电流对电磁场的影响

表1 材料物性参数

Table 1 Physical parameters of materials

材料	相对磁导率	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
空气	1	8.855×10^{-12}
钢液	1	7.14×10^5
坯壳	1	0.8×10^7
铜(结晶器)	1	1.78×10^7
不锈钢	1	1.33×10^6
线圈铁芯	1 000	0

2.2.1 电流对电磁感应强度的影响

由图3(a,b)可见,电流对各个位置处磁场的相对强弱即磁场的分布没有明显影响,但随着电流的增大,各个位置处的磁感应强度都相应增大。从图3(c)可见,当电流由200 A增至600 A时,磁感应强度由0.015 5 T增至0.046 6 T。

2.2.2 电流对电磁力的影响

由图4(a,b)可见,电流越大,磁感应强度越大,

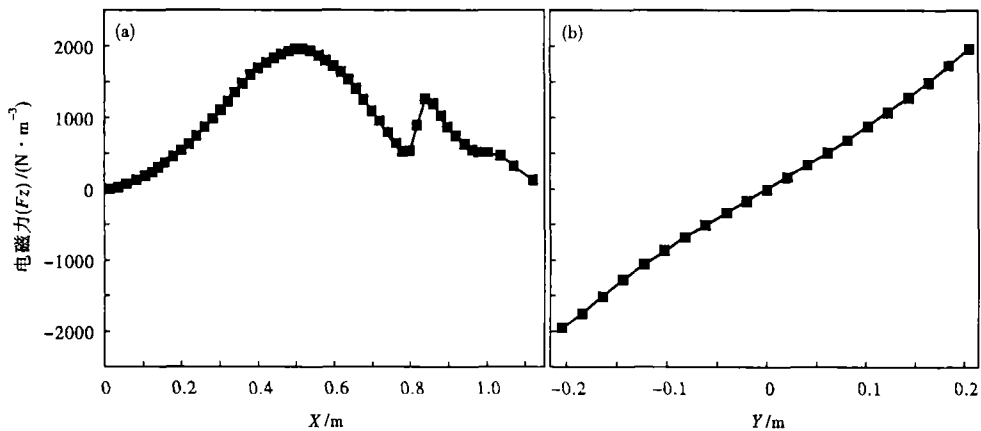


图2 沿结晶器轴向(a)和径向方向(b)的电磁力分布

Fig.2 Distribution of electromagnetic force along height (a) and radius (b) of mold

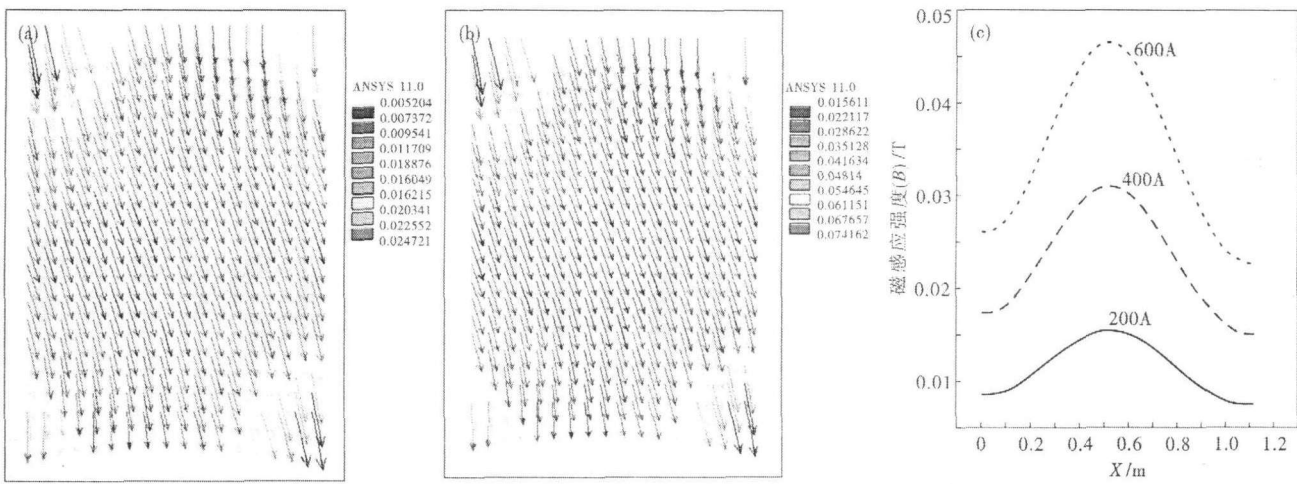


图 3 有钢液时电流对磁感应强度的影响:(a)200 A,2.4 Hz,(b)600 A,2.4 Hz;(c)电流与铸坯中心磁感应强度的关系
 Fig.3 Effect of current strength on magnetic flux density with molten steel: (a) 200A, 2.4 Hz, (b) 600A, 2.4 Hz; (c) Relation between current strength and magnetic flux density at center of bloom

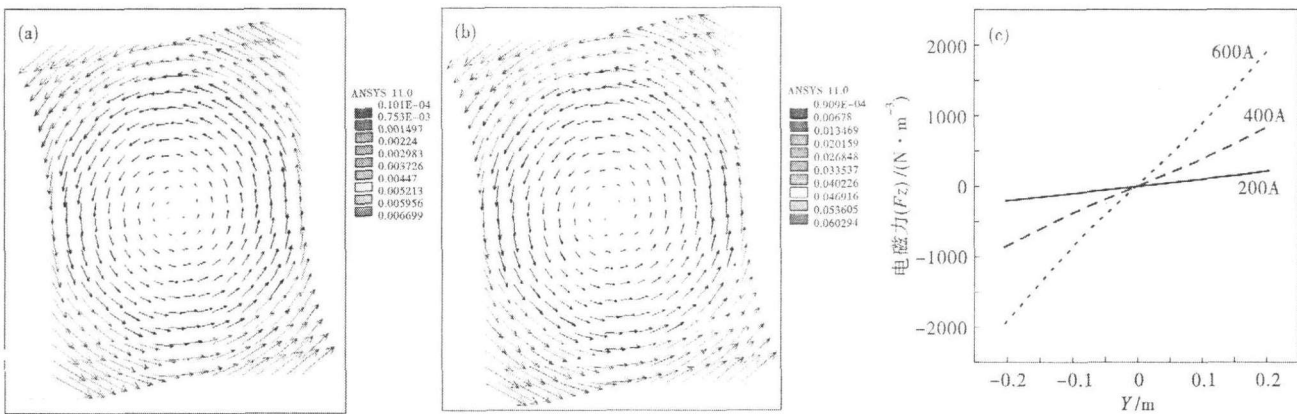


图 4 电流对电磁力的影响:(a)250 A,2.4 Hz,(b)400 A,2.4 Hz;(c)电流与铸坯中心截面切向电磁力的关系
 Fig.4 Effect of current strength on electromagnetic force: (a) 250A, 2.4 Hz, (b) 400A, 2.4 Hz; (c) Relation between current strength and tangential electromagnetic force at center section of bloom

产生的感应电流越大,电磁力也越大。另外由于钢液的集肤效应,离铸坯中心越近,磁场越弱,感应电流越小,电磁力也越小。从图 4(c)可以看出,电磁力随电流的增大而增大。

3 结论

(1)连铸方坯旋转电磁搅拌器中的磁场是交变磁场,在横截面上电磁搅拌器中心的磁感应强度最小;在轴向方向上,磁感应强度成两端小,中间大的正态分布。

(2)电磁搅拌器中心磁感应强度随电流增大呈线性递增变化,作用于钢液的电磁力随电流的增大而增大。

(3)旋转电磁搅拌器在铸坯内产生的电磁力总体效果是对钢液产生一个旋转力矩,使钢液绕注流断面中心做水平旋转运动。

参考文献

- 1 李开焜,杨焕祥. 电磁搅拌工艺参数的研究与应用. 炼钢,1994(3):47
- 2 杨吉春,王磊,蔡开科,等. 用 M-IEMS 改善重轨钢大方坯中心碳偏析和组织. 包头钢铁学院学报,2001(2):125
- 3 麻永林,王宝峰,李保卫,等. 结晶器/足辊区电磁搅拌的数值分析. 钢铁,2004,39(增刊):533
- 4 Trophime C, Masse P, Etay J. A Numerical Code for the Strong Coupling in Magnetohydrodynamic Application to EM Stirrer. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3):1006
- 5 毛斌,王世郁. 钢水连铸电磁搅拌的磁流体力学基础. 钢铁研究,1998(1):11
- 6 Dubke M, Spitzer K H, Schwerdtfeger K. Spatial Distribution of Magnetic Field of Linear Inductors Used for Electromagnetic Stirring in Continuous Casting. Ironmaking and Steelmaking, 1991, 18(5):347
- 7 Chung S I, Yoon J K. Numerical Analysis of Effect of Electromagnetic Stirring on Solidification Phenomena in Continuous Casting. Ironmaking and Steelmaking, 1996, 23(5):425

陈永(1969-),男,博士生,教授级高工,1990年东北大学毕业,连铸工艺及铸坯质量控制技术研究。

收稿日期:2008-03-05