

380 mm × 280 mm 大方坯连铸结晶器电磁搅拌的数值模拟

李 熠 倪红卫 张 华 罗荣华

(武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘 要 利用有限元分析软件,建立了380 mm × 280 mm大方坯结晶器电磁搅拌的三维数学模型,系统研究了电磁搅拌工艺参数(电流250~500 A,频率1.5~3.0 Hz,结晶器铜板厚度34~40 mm)对结晶器内电磁场的分布影响。结果表明,结晶器内磁感应强度沿铸流轴向呈“两端小、中间大”分布;电流从350 A增大到500 A,搅拌器中心的磁感应强度呈线性递增;频率由1.5 Hz增大到3.0 Hz,搅拌器中心磁感应强度仅减小0.0015 T;随着结晶器铜板厚度的增大,铸坯宽面、窄面和角部的磁感应强度都减小。在实际连铸U71Mn重轨钢中,电流应该维持在400 A以上。

关键词 380 mm × 280 mm 铸坯 结晶器 电磁搅拌 数值模拟

Numerical Simulation of Mold Electromagnetic Stirring for 380 mm × 280 mm Bloom Casting

Li Yi, Ni Hongwei, Zhang Hua and Luo Ronghua

(Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Unitization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract A three-dimensional math model of electromagnetic stirring of mold for 380 mm × 280 mm bloom casting is established by using finite element analytic software and the effect of electromagnetic stirring parameters (current intensity 200~500 A, frequency 1.5~3.0 Hz, thickness of mold copper plate 34~40 mm) on distribution of magnetic field in mold is systematically studied. Results show that the max magnetic induction intensity is at center of axis direction of strand and the lower values of magnetic induction intensity are at top and bottom of mold; with increasing current intensity from 350 A to 500 A, the magnetic induction intensity at center of stirrer increases linearly; with increasing current frequency from 1.5 Hz to 3.0 Hz, the magnetic induction intensity at center of strand decreases only by 0.0015 T; and with increasing thickness of mold copper plate, the magnetic induction intensity at wide surface, narrow surface and corner of the strand all decreases. In actual casting heavy rail steel U71Mn process, current intensity should be more than 400 A.

Material Index 380 mm × 280 mm Casting Bloom, Mold, Electromagnetic Stirring, Numerical Simulation

近些年,对于结晶器电磁搅拌的研究越来越受到冶金技术人员的重视和关注^[1~7],本文以国内钢厂大方坯结晶器电磁搅拌为研究对象,利用商业软件建立了大方坯结晶器电磁搅拌器的有限元分析模型,系统研究了不同电磁搅拌参数(电流大小和频率)、铜板厚度对于结晶器电磁场分布的影响。

1 结晶器电磁搅拌装置及网格化

钢厂5机5流大方坯连铸机主要生产U71Mn、U75V等重轨钢,其中间包容量35 t,结晶器尺寸(mm)380 × 280 × 800,结晶器铜板厚度36 mm,其结晶器电磁搅拌器为两极12线圈的电磁搅拌器,搅拌器外径1 260 mm,内径790 mm,电流250~500 A,频率1.5~3.0 Hz。电磁搅拌器及结晶器的几何结构及网格划分数学模型如图1所示,整个模型除外围空气采用4面体网格,其它均采用6面体网格,为了

显示内部结构,外围空气未画出。

2 电磁场的模型与求解

基本假设:

- (1) 电磁搅拌器采用低频电流,忽略位移电流的产生;
- (2) 忽略钢液流动对电磁场的影响;
- (3) 铁芯及磁轭认为其相对磁导率为各向同性,且为常量;
- (4) 认为整个结晶器内为不可压缩的液态导电钢液,密度 ρ 、运动粘性系数 ν 、电导率 σ 和磁

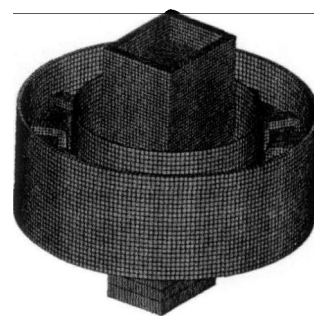


图1 结晶器电磁搅拌器结构及网格示意图

Fig. 1 Schematics of mold electromagnetic stirrer structure and grid division

导率 μ 等物性参数为常量。

结晶器电磁搅拌的控制方程主要包括麦克斯韦方程组、运动流体欧姆定律和连续方程^[8,9]。针对钢水连铸电磁搅拌过程,数值模拟控制方程为:

法拉第电磁感应定律:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

安培环路定律: $\nabla \times H = J$ (2)

高斯定律: $\nabla \times B = 0$ (3)

本构方程: $B = \mu H$ (4)

欧姆方程: $J = \sigma [E + u \times B]$ (5)

式中: $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$; E - 电场强度/($V \cdot m^{-1}$); B - 磁通密度/T; H - 磁场强度/($A \cdot m^{-1}$); J - 电流密度/($A \cdot m^{-2}$); σ - 电导率/($S \cdot m^{-1}$); μ - 磁导率/($H \cdot m^{-1}$); u - 流体的运动速度矢量/($m \cdot s^{-1}$)。

由麦克斯韦方程组得到磁场的计算方程:

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

数值模拟的边界条件:

(1) 离开铁芯和线圈一定距离后,磁场会迅速衰减为 0,因此取相对磁体尺寸 3 ~ 5 倍空间为无穷远边界,在此边界上施加磁力线平行边界条件;(2) 磁力线垂直边界条件是自然边界条件,无需单独施加。

初值条件:电磁搅拌器采用三相正弦交流电,相位差 120°,在相对的两个线圈截面上施加相同相位的电流密度。数值模拟的电流变化范围为 350 ~ 500 A,频率 1.5 ~ 3.0 Hz 变化。

电磁场数值模拟的物性参数如表 1 所示,钢液以 U71Mn 重轨钢为研究对象。

3 电磁场模拟结果及讨论

3.1 结晶器电磁场与电磁力的分布特点

由图 2 可见,在一个周期内,电磁搅拌器中心横截面的磁场随着时间的推移呈顺时针旋转,一个周期后磁场刚好回到最初的位置,整个周期内磁场大小基本不变,结晶器内磁场分布均匀。因此,对于结晶器电磁搅拌可选取一个周期某一个时刻的电磁场研究即可,以下均以 $t = 0$ 时刻的电磁场为研究对象。

表 1 材料物理性能
Table 1 Physical property of materials

材料	相对磁导率/($H \cdot m^{-1}$)	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
钢液	1	7.14×10^5
结晶器(铜)	1	1.78×10^7
线圈	1	-
铁芯	1 000	-
空气	1	8.86×10^{-12}

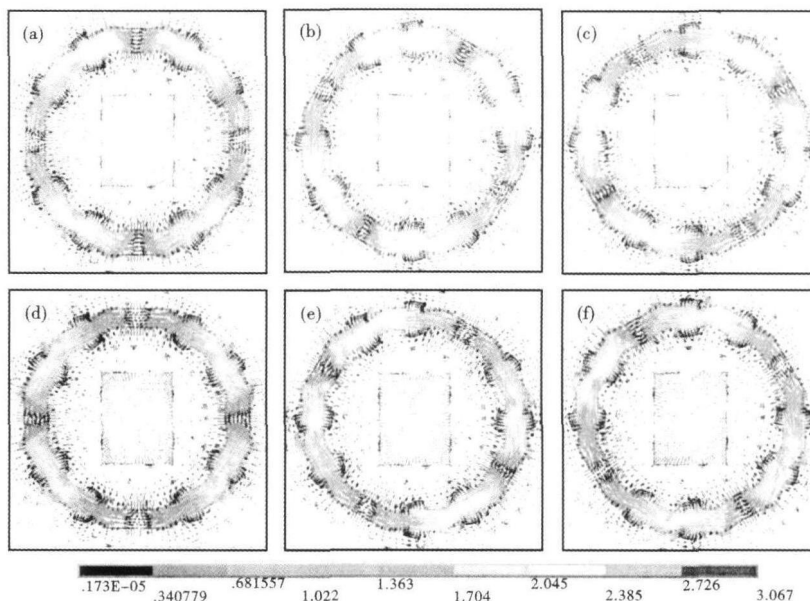


图 2 电磁搅拌器磁感应强度在一个周期内的分布: $t=0$ (a); 1/6 T (b); 2/6 T (c); 3/6 T (d); 4/6 T (e); 5/6 T (f)
Fig. 2 Distribution of magnetic induction intensity of electromagnetic stirrer in a cycle: $t=0$ (a); 1/6 T (b); 2/6 T (c); 3/6 T (d); 4/6 T (e); 5/6 T (f)

从图 3(a)中可以看出,结晶器内横截面的磁感应强度角部最大,中心最小,电磁场在横截面分布均匀,相同径向距离的磁感应强度大小相同。图 3(b)可知,电磁力在横截面呈旋转对称分布,角部电磁力最大,中心最小,正是由于钢液内电磁力的这一分布

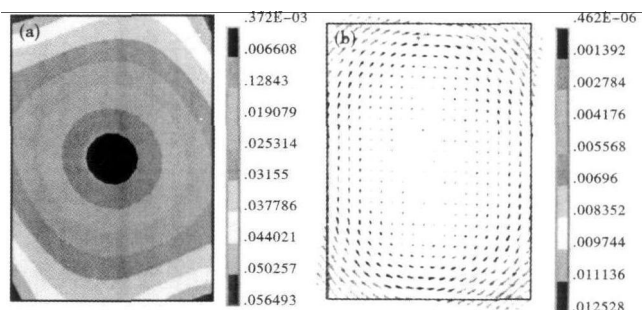


图 3 结晶器横截面的磁感应强度(a)和电磁力(b)的分布, 400 A, 2 Hz
Fig. 3 Distribution of magnetic induction intensity (a) and electromagnetic force (b) at cross section of mold, 400 A, 2 Hz

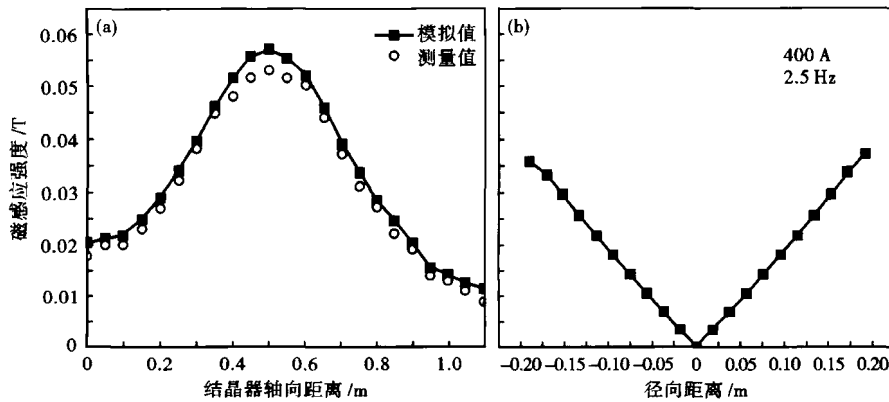


图 4 磁感应强度沿结晶器轴向 (a) 和径向 (b) 的分布
Fig. 4 Distribution of magnetic induction intensity along axis (a) and radius (b) of mold

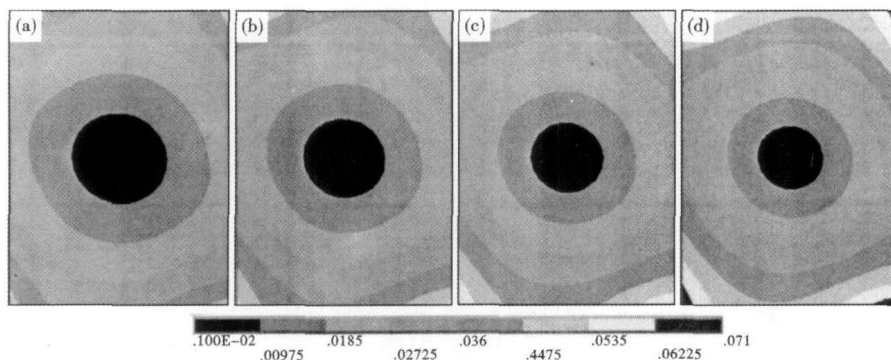


图 5 电流对结晶器横截面磁感应强度分布的影响: (a) 350 A; (b) 400 A; (c) 450 A; (d) 500 A
Fig. 5 Effect of current intensity on distribution of magnetic induction intensity at cross section of mold: (a) 350 A; (b) 400 A; (c) 450 A; (d) 500 A

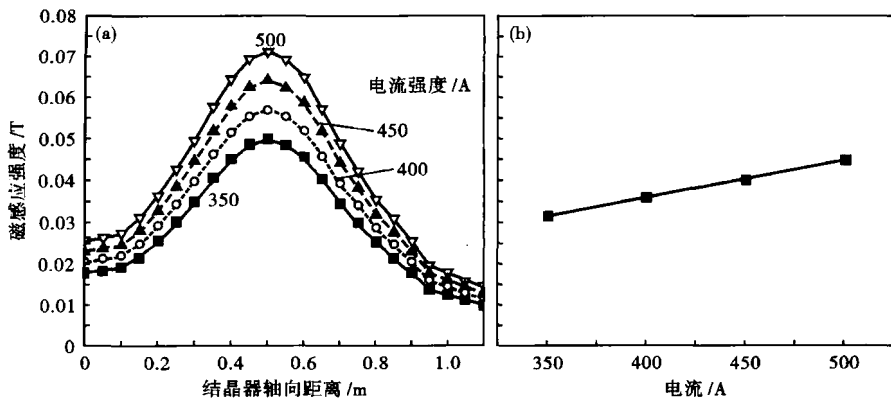


图 6 电流对结晶器轴向磁感应强度分布 (a) 和结晶器窄面中心磁感应强度分布 (b) 的影响
Fig. 6 Effect of current intensity on distribution of magnetic induction intensity along axis of mold (a) and on distribution of magnetic induction intensity at center of narrow surface of mold (b)

特点,在钢液内产生一旋转力矩,从而驱使钢液在横截面做近似水平圆周旋转流动。

由图 4(a) 可知,模拟值和测量值分布规律基本

一致,结晶器轴向磁场的分布都是呈“两端小,中间大”的规律,最大磁感应强度出现在距结晶器顶端 $Z = 500 \text{ mm}$ 处,即结晶器电磁搅拌器的中心位置。数值模拟值偏大的原因是忽略了实际中存在的一定的漏磁现象,但相比测量值误差均在 8% 以内,数值模拟的结果可以直观反映现场电磁场的分布特点。由图 4 (b) 可知,结晶器内的磁感应强度沿轴心呈对称分布,相同径向距离的磁感应强度大小相同;磁感应强度由铸坯的边缘沿径向方向逐渐衰减,中心磁感应强度几乎为 0。

3.2 电流对电磁场的影响

由图 5 可知,随着电流的增大,中心横截面各处的磁感应强度都相应增大。

由图 6(a) 可知,电流分别为 350、400、450、500 A, 搅拌器中心位置的磁感应强度分别对应为 0.050 1、0.057 2、0.064 4、0.071 6 T。一般来说,为了获得良好的冶金效果,中高碳钢连铸时,中心磁感应强度 B_0 大致在 0.045 ~ 0.06 T,对含碳量较高的钢种倾向于取上限,对于含碳量较低的钢种,倾向于取下限^[10]。在 U71Mn 重轨钢连铸生产中,电流大小应该维持在 400 A 以上。

由图 6(b) 可知,电流由 350 A 增大到 500 A, 搅拌器中心的磁场呈线性递增,电流每增大 50 A, 中心的磁感应强度增大 0.004 5 T。

3.3 电流不同频率对电磁场的影响

由图 7 可知,随着电流频率由 1.5 Hz 增大到 3.0 Hz, 结晶器轴向的磁感应强度和中心横截面的

磁感应强度都减小。主要是因为具有高导电性的结晶器铜板对穿过钢液内的磁场进行了屏蔽作用,并且随着电流频率的增大,这种屏蔽现象越明显。在轴向方向上,当频率由 1.5 Hz 增大到 3.0 Hz,磁感应强度的最大值由 0.058 2 T 减小到 0.056 7 T,仅减小 0.001 5 T,沿结晶器两端的磁感应强度几乎无变化。

3.4 不同结晶器铜板厚度对电磁场的影响

由图 8 可知,随着铜板厚度的增大,各处的磁感应强度都相

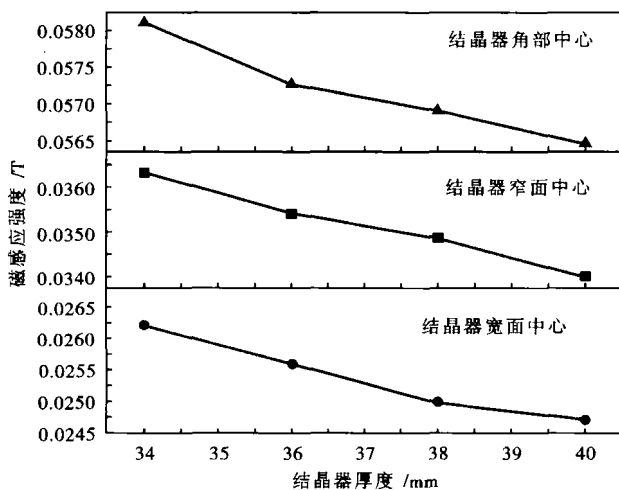


图 8 结晶器铜板厚度对磁感应强度的影响:结晶器角部中心(上),窄面中心(中),宽面中心(下)

Fig. 8 Effect of thickness of mold copper plate on magnetic induction intensity; center of corner (upper), center of narrow surface (middle), center of wide surface (lower) of mold

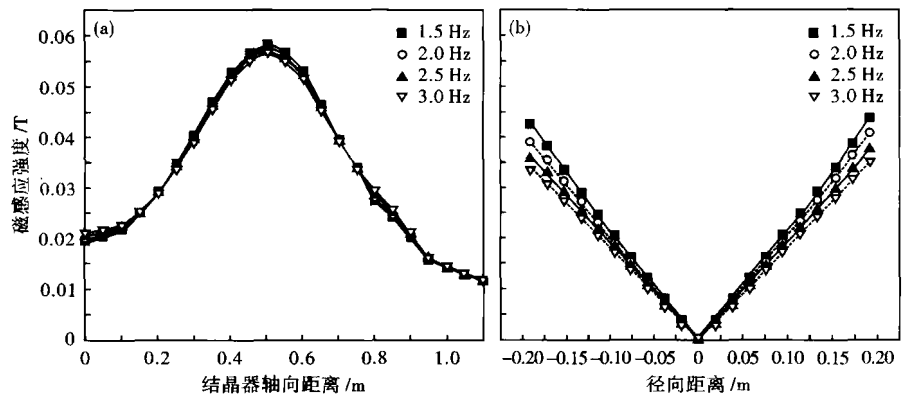


图 7 电流频率对结晶器轴向磁感应强度分布(a)和结晶器横截面磁感应强度分布(b)的影响,400 A

Fig. 7 Effect of frequency on distribution of magnetic induction intensity along axis of mold (a) and distribution of magnetic induction intensity at cross section of mold (b), 400 A

应减小,厚度每增加 2 mm,各处的磁感应强度减小值都在 0.001 T 以内。

4 结论及分析

(1) 结晶器轴向磁感应强度呈“两端小,中间大”的分布;磁感应强度在结晶器的横截面沿中心呈对称分布,两端最大,中心最小。

(2) 随着电流的增大,结晶器内各处的磁感应强度都相应增大;搅拌器中心的磁感应强度随着电流的增大呈线性递增。

(3) 随着电流频率的增大,结晶器内的磁感应强度减小,相比改变电流大小,改变频率对结晶器内的磁感应强度影响较小。

(4) 随着结晶器铜板厚度的增大,铜板对磁场的屏蔽增强,结晶器各处的磁感应强度都相应减小,但各处的磁感应强度减小值均在 0.001 T 以内。

(5) 在低频率条件下,U71Mn 重轨钢连铸时,电流应该维持在 400 A 以上。

参考文献

- 张宏丽,贾光霖,王恩刚,等. 电磁搅拌改善铸坯内部质量的实验研究. 东北大学学报,2001,22(3):315
- Liu X D, Yang X D, Zhu M Y. Finite Element Analysis of 3-D Electromagnetic Field in Bloom Continuous Casting Mold. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 14(3): 6
- 陈永,朱苗勇,蔡可森,等. 280 mm × 380 mm 方坯连铸结晶器电磁搅拌数值模拟. 钢铁钒钛, 2008, 29(2): 44
- 李建超,崔健忠,王宝峰,等. 小方坯连铸结晶器电磁搅拌的数值模拟. 炼钢, 2007, 23(1): 35
- Natarajan T T, Nagy Ei-Kaddah. Finite Element Analysis of Electromagnetic and Fluid Flow Phenomena in Rotary Electromagnetic Stirring of Steel. Applied Mathematical Modeling, 2004, 28: 47
- 王东,胡坤太,仇圣桃,等. 方坯连铸结晶器电磁搅拌磁场的数值模拟. 钢铁研究学报, 2006, 18(4): 10
- 于洋,李宝宽. 钢连铸电磁搅拌工艺中电磁力的计算. 金属学报, 2006, 42(5): 540
- 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, 1988, 2(1): 11
- 豪斯 HA. 电磁场与磁能. 汪家麟译. 北京: 高等教育出版社, 1992
- 毛斌. 连铸电磁冶金技术-第三讲: 方坯连铸电磁搅拌技术的若干问题. 连铸, 1999(5): 36

李 熠(1985-), 男, 硕士研究生, 冶金过程模拟和仿真研究。

收稿日期:2011-10-11