

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 06. 013

大圆坯连铸结晶器电磁偏心搅拌的数值模拟

任兵芝¹,陈登福¹,王宏丹^{1,2},漆锐³

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400044 ;2. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院,重庆 401331 ;
3. 中冶赛迪信息技术有限公司 连铸部,重庆 400013)

摘 要 :建立了描述大圆坯连铸结晶器电磁搅拌过程电磁场的三维数学模型 ,并采用实测数据对模型的准确性进行了验证.研究了不同搅拌电流强度和频率下 ,磁感应强度与电磁力的变化规律 ,并重点分析了偏心搅拌下磁感应强度和电磁力的分布特点.结果表明 :磁感应强度和电磁力均随搅拌电流强度的增大而增强 ,随着搅拌电流频率的增大 ,磁感应强度逐渐减弱 ,而电磁力先增强后减弱 ,并在 2.5 Hz 时达到最大值 ,偏心搅拌时 ,电磁力在铸坯横截面上仍呈周向分布 ,但电磁力和磁感应强度的大小都出现了不对称分布 ,在靠外弧的一侧更大.

关 键 词 :连铸 ;电磁搅拌 ;大圆坯 ;偏心搅拌 ;电磁场

中图分类号 :TF 777 文献标志码 :A 文章编号 :1005 - 3026(2016)06 - 0820 - 05

Numerical Simulation of Electromagnetic Field in a Round Bloom Continuous Casting Mould with Eccentric Electromagnetic Stirring

REN Bing-zhi¹ ,CHEN Deng-fu¹ ,WANG Hong-dan^{1,2} ,QI Rui³

(1. College of Materials Science and Engineering ,Chongqing University ,Chongqing 400044 ,China ;2. School of Metallurgy and Material Engineering ,Chongqing University of Science and Technology ,Chongqing 401331 ,China ;3. Department of Continuous Casting ,CISDI Engineering Co. , Ltd. ,Chongqing 400013 ,China. Corresponding author :CHEN Deng-fu ,E-mail :chendfu@cqu.edu.cn)

Abstract : A three-dimensional mathematical model was developed to study the electromagnetic field in a round bloom continuous casting mould with electromagnetic stirring (M-EMS). The simulation results of electromagnetic field were validated by the measured data from the experiments. The effects of stirring current intensity and frequency on magnetic flux density and electromagnetic force were investigated , and the electromagnetic field characteristics were also discussed after applying eccentric M-EMS. The results show that both magnetic flux density and electromagnetic force increase with increasing current intensity. When the stirring current frequency increases , the magnetic flux density decreases and the electromagnetic force increases first and then decreases with the maxima at 2.5 Hz. Under the conditions of eccentric M-EMS , the electromagnetic force still appears to be circumferential distribution on the planes transverse to the strand. However , the magnitudes of both magnetic flux density and electromagnetic force show asymmetrical distribution , which are much larger at the side near the external arc of the continuous caster.

Key words : continuous casting ; electromagnetic stirring ; round bloom ; eccentric stirring ; electromagnetic field

在大圆坯连铸过程中 ,结晶器电磁搅拌是改善钢液流场的常用技术.旋转电磁搅拌通过产生非接触的电磁力来优化钢液流动 ,改善连铸过程的热量传输和质量传输 ,促进柱状晶向等轴晶的

转变,进而改善中心偏析、中心缩孔等内部缺陷^[1-2]。几十年来,国内外学者对结晶器电磁搅拌技术进行了大量研究^[3-7],对旋转磁场作用下的电磁场分布进行了数值模拟,以便优化电磁搅拌器的运行参数并获得最佳的搅拌效果。

但在实际生产中,一台电磁搅拌器需要适应多种断面规格的铸坯,而按最大断面设计的搅拌器的安装位置是固定不变的。由于不同连铸断面的外弧是固定于外弧基准线的,这就造成了较小断面铸坯的几何中心与搅拌器中心不重合的情况,即偏心搅拌。铸坯断面尺寸跨度越大,偏心的情况越严重,如图 1a 所示。偏心搅拌下的电磁场分布规律目前还未见报道,因此本文利用数值模拟研究常规电磁搅拌下电磁力与搅拌电流强度和频率的关系,并重点考察偏心搅拌下磁感应强度和电磁力的分布特点。

1 数学模型

图 1b 为结晶器电磁搅拌器的示意图,其原理与三相异步电动机类似。本文模拟的对象来自生产现场,有 3 个生产断面:φ300、φ450、φ600 mm。结晶器长度为 800 mm,铜管厚度为 37.5 mm。搅拌器铁芯高度为 300 mm,搅拌器铁芯的底部和结晶器出口在同一水平面上。搅拌电流为 100~700 A,搅拌电流频率为 1.0~8.0 Hz。图 1b 中标明了计算过程中所用到的坐标系,坐标原点位于结晶器铜管出口处的圆心。

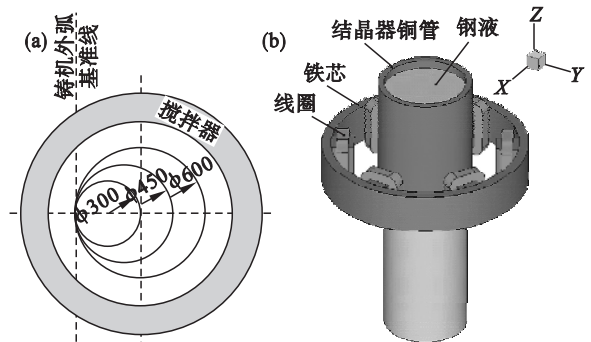


图 1 偏心搅拌与结晶器电磁搅拌器示意图
Fig. 1 Schematic illustrations of eccentric stirring and mold rotary electromagnetic stirrer
(a)—偏心搅拌;(b)—结晶器电磁搅拌器。

1.1 基本假设

鉴于结晶器电磁搅拌过程的复杂性,为了使问题便于处理而又不失其意义,作如下假设和简化:

1) 在电磁搅拌过程中,磁雷诺数较小,忽略钢液流动对电磁场的影响^[7-9]。

2) 结晶器电磁搅拌使用的频率一般在 1~10 Hz,属于磁准静态场,忽略位移电流^[9]。

3) 搅拌器的外壳、冷却水套、结晶器保护渣以及水口等均被简化为空气区。

4) 忽略结晶器和铸坯的弧形弯曲。

5) 用一绝缘层模拟铸坯和结晶器之间的保护渣层,使感应电流被封闭在铸坯内。

1.2 控制方程与边界条件

低频时,时变电磁场可以简化为磁准静态场^[9]:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{J}, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (4)$$

式中 \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{J} 为电流密度; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; \mathbf{E} 为电场强度; σ 为电导率; t 为时间。

各单元处电磁力密度采用下式计算^[9]:

$$\mathbf{F}_{\text{time}} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (5)$$

电磁搅拌采用正弦电流,产生谐性电磁场。电磁力密度以及磁感应强度均随时间变化^[7],为考察其分布特征,在后处理中计算电磁力密度的时均值^[9]:

$$\mathbf{F}_{\text{ave}} = (\mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_{90})/2. \quad (6)$$

由于磁感应强度的时间平均值为 0,故考察其模的时均值:

$$B_{\text{mag}} = f \int_{t_0}^{t_0+1/f} |\mathbf{B}| dt. \quad (7)$$

在本文中,采用瞬态计算研究 B_{mag} ,而其他均采用谐性计算。用圆柱形空气区包围电磁搅拌器模型,用于计算其中的电磁场。对空气圆柱的所有外表面采用平行边界条件。

1.3 材料物性参数

计算过程中,认为钢液、结晶器铜管和铁芯均为各向同性材料,相对磁导率为常数。相关物性参数如下:钢液、铜管和空气的相对磁导率均为 1.0,铁芯的相对磁导率为 1 000;铜管和钢液的电导率分别为 3.18×10^7 和 7.14×10^5 S/m。

2 模型准确性的验证

图 2 为磁感应强度模拟结果与实测值的比较,两者在不同搅拌条件下的变化趋势一致。尽管模拟结果和实测值有一些偏差,但偏差在可接受的范围内。值得注意的是在图 2a 中,磁感应强度在铸坯高度方向上的最大值不是出现在搅拌器中

心位置,而是出现在结晶器出口处($Z=0$),这主要是由于结晶器铜板的屏蔽作用改变了磁场的分

布.图 2b 显示了磁感应强度沿径向的分布,磁感应强度在铸坯边缘处最大,向铸坯中心逐渐减小.

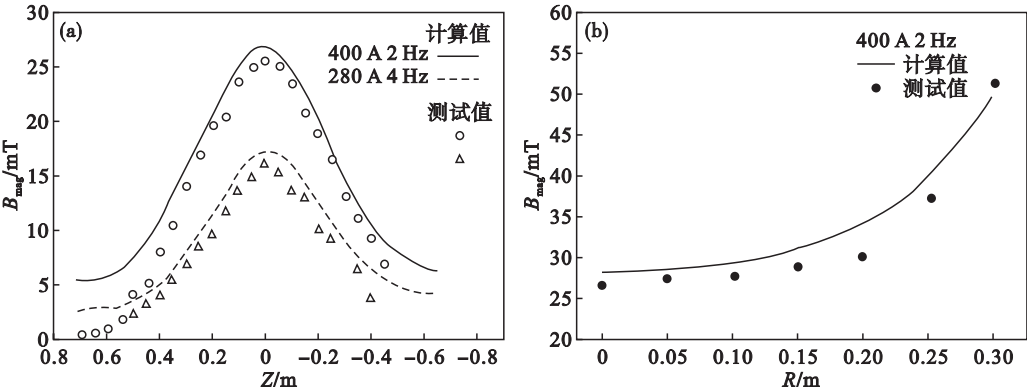


图 2 磁感应强度模拟结果与实测数据的对比($\Phi 600\text{ mm}$)
Fig. 2 Comparison of the simulated magnetic flux density with measured data ($\Phi 600\text{ mm}$)
(a)—高度方向 ; (b)—径向.

3 结果与讨论

图 3 是时均电磁力的分布图.电磁力呈周向分布,在铸坯边缘最大,向中心不断衰减(图 3a);而在铸坯高度方向上的分布与磁感应强度类似,最大值出现在结晶器出口处(图 3b).

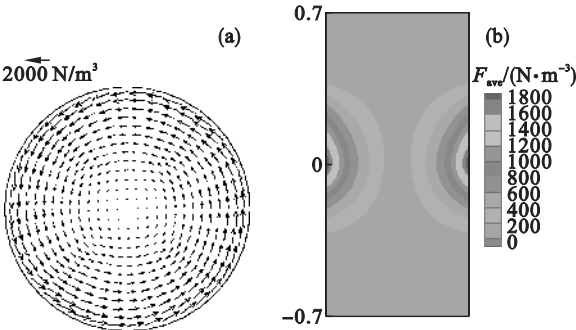


图 3 电磁力在铸坯中的分布($\Phi 600\text{ mm}$)
Fig. 3 Distribution of electromagnetic force density ($\Phi 600\text{ mm}$)
(a)— $Z=0$ plane ; (b)— $Y=0$ plane.

图 4 是磁感应强度和电磁力随搅拌电流的变化关系,磁感应强度随电流的增大基本呈线性增强,而电磁力与电流近似呈抛物线关系.

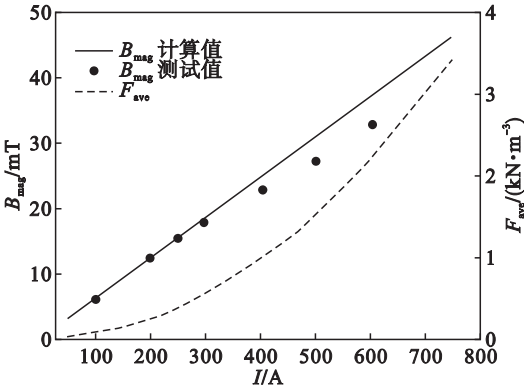


图 4 搅拌电流对磁感应强度和电磁力的影响($\Phi 600\text{ mm}$)
Fig. 4 Effect of stirring current on magnetic flux density and the electromagnetic force ($\Phi 600\text{ mm}$)

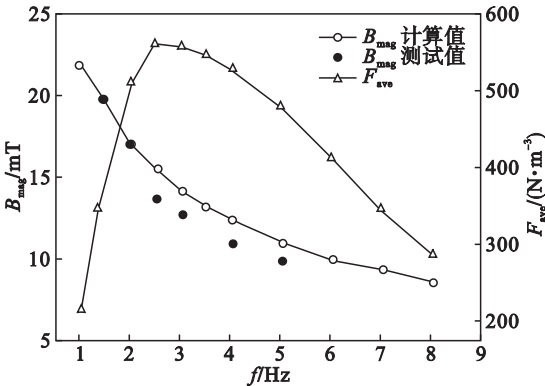


图 5 搅拌电流频率对磁感应强度和电磁力的影响($\Phi 600\text{ mm}$)
Fig. 5 Effect of stirring current frequency on magnetic flux density and the electromagnetic force ($\Phi 600\text{ mm}$)

图 6 为不同直径大圆坯内的磁感应强度分布云图.可以看出,当圆坯直径为 600 mm 时,铸坯

位于搅拌器中心,铸坯内的磁感应强度形成绕中心的环形对称分布.但是,当圆坯半径为 450 和

300 mm 时,铸坯中心与搅拌器中心偏离,此时磁感应强度的分布不再对称,而是在靠近外弧的一侧磁感应强度更大,这导致了电磁力的分布也不再对称,形成偏心搅拌,见图 7。在图 7 中,偏心搅

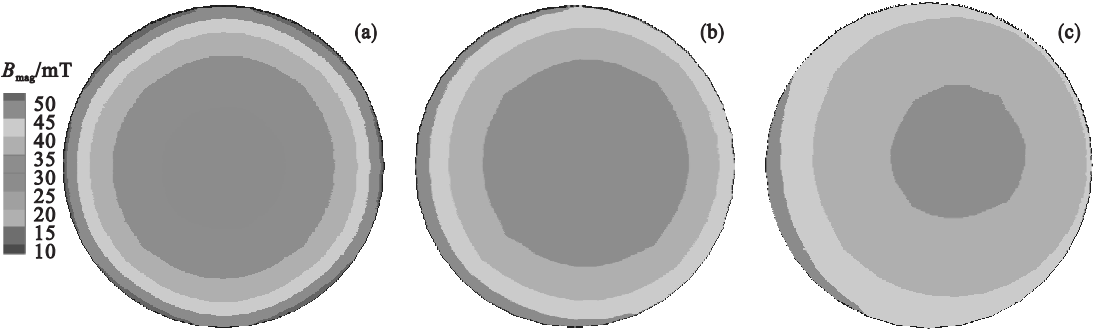


图 6 不同直径大圆坯内的磁感应强度分布
Fig. 6 Distribution of magnetic flux density on the $Z=0$ plane of casting section
(a)— $\phi 600$ mm ; (b)— $\phi 450$ mm ; (c)— $\phi 300$ mm.

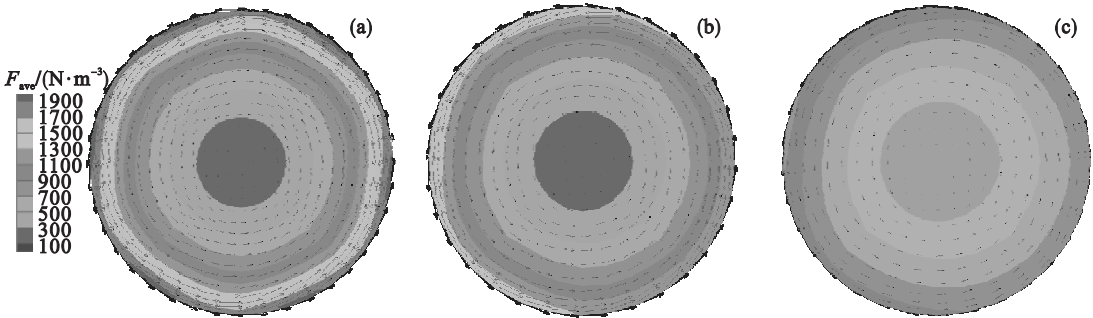


图 7 不同直径大圆坯内的电磁力分布
Fig. 7 Vector and contour distribution of electromagnetic force density on the $Z=0$ plane of casting section
(a)— $\phi 600$ mm ; (b)— $\phi 450$ mm ; (c)— $\phi 300$ mm.

拌时,电磁力仍呈周向分布,但是靠近外弧的一侧电磁力更大.电磁力大小的这种不对称分布将引起旋转流动的不对称,同时对内外弧凝固前沿的冲刷不一致,可能导致凝固坯壳生长不均匀,易造成漏钢,并且导致凝固组织的不对称^[10].所以在连铸生产中应控制偏心搅拌的程度,使用同一搅拌器时,应尽量减小浇铸断面尺寸的跨度范围.

4 结 论

本研究建立了描述大圆坯结晶器电磁搅拌的电磁场数学模型,并用实测数据验证了模型的准确性.得出结论如下:

- 1) 磁感应强度和电磁力均随搅拌电流强度的增大而增强.
- 2) 随着搅拌电流频率的增大,磁感应强度逐渐减弱,而电磁力则先增强后减弱,并在 2.5 Hz 时达到最大值.
- 3) 偏心搅拌时,电磁力在铸坯横截面上仍呈周向分布,但磁感应强度和电磁力都出现不对称分布,靠近外弧的一侧更大.

参考文献:

[1] Cramb A W. The making ,shaping and treating of steel[M]. Warrendale :Association for Iron Steel Technology 2003.

[2] Barna M ,Javurek M ,Reiter J ,et al. Simulation of mould level velocities during continuous casting of round bloom strands with mould-electromagnetic stirring[J]. *Journal of Iron and Steel Research* 2012 ,19(sup 1) 884 – 887.

[3] 于洋 ,李宝宽. 钢连铸电磁搅拌工艺中电磁力的计算[J]. *金属学报* 2006 ,42(5) 540 – 544.

(Yu Yang ,Li Bao-kuan. Calculation on electromagnetic force in electromagnetic stirring of continuous casting of steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica* 2006 ,42(5) 540 – 544.)

[4] Chang F C ,Hull J R ,Beitelman L. Simulation of flow control in the meniscus of a continuous casting mold with opposing alternating current magnetic fields[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B* 2004 ,35(6) 1129 – 1137.

[5] Natarajan T T ,El-Kaddah N. Finite element analysis of electromagnetic and fluid flow phenomena in rotary electromagnetic stirring of steel[J]. *Applied Mathematical Modelling* 2004 ,28(1) 47 – 61.