

小方坯结晶器电磁搅拌模拟研究

李曜光¹, 王宏斌², 白雪松¹, 孙彦辉¹, 张明海², 贾建平²

(1. 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083; 2. 宣化钢铁集团有限责任公司, 河北 张家口 075100)

摘 要: 以小方坯结晶器电磁搅拌为研究对象, 利用 ANSYS 有限元分析软件建立了小方坯结晶器电磁搅拌的三维数学模型。讨论了不同工艺参数下, 电磁感应强度及电磁力的大小和分布规律。结果表明: 结晶器铜管温度对结晶器电磁感应强度有明显的影响; 在搅拌器中心轴线方向, 电磁感应强度呈现“中间大, 两头小”的分布规律, 而在搅拌器中心横截面径向方向, 电磁感应强度和电磁力都呈现“中间小, 两头大”的分布规律; 当频率一定时, 电磁感应强度以及电磁力都随着电流的增大而增大; 当电流强度一定时, 电磁感应强度随着频率的增大而减小, 而电磁力随着频率的增大而增大。

关键词: 连铸; 小方坯; 结晶器; 电磁搅拌; 三维模型; 电磁感应强度; 电磁力

中图分类号: TF777 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)04-0108-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Numerical Simulation of Electromagnetic Stirring in Billet Mold

Li Yaoguang¹, Wang Hongbin², Bai Xuesong¹, Sun Yanhui¹, Zhang Minghai², Jia Jianping²

(1. Collaborative Innovation Center for Common Technology of Iron and Steel, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2. Xuanhua Iron and Steel Group Co., Ltd., Zhangjiakou 075100, Hebei, China)

Abstract: In this study a three-dimensional mathematical model of electromagnetic stirring in billet mold was developed by adopting ANSYS finite element analysis software. The effects of different process parameters on magnetic flux density and electromagnetic force in the billet mold were discussed. It is found out that the temperature of mold copper tube has obvious influence on magnetic flux density. On the axis direction of the stirrer center, the distribution of magnetic flux density is higher on both sides and lower in the middle. Nevertheless, the distribution of magnetic flux density and electromagnetic force is weaker in the middle and stronger on both sides, which is on the radial direction of the cross section of the stirrer center. As the frequency keeps constant, the magnetic flux density and the electromagnetic force increase with the increase of the current. When the current keeps constant, the magnetic flux density decreases with the increase of the frequency, while the electromagnetic force increases with the increase of the frequency.

Key words: continuous casting, billet, mold, electromagnetic stirring, three-dimensional model, magnetic flux density, electromagnetic force

0 引言

结晶器电磁搅拌技术已经被广泛应用于连铸生

产, 该技术可以强化钢水的运动, 改善钢水在凝固过程中的流动、传热、传质等冶金行为, 可以有效改善铸坯表面和皮下质量, 提高中心等轴晶区, 减轻中心

收稿日期: 2019-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.51774030、No.U1860104)。

作者简介: 李曜光(1987—), 男, 河北张家口人, 博士研究生, 主要从事连铸坯质量控制研究。E-mail: li_yg87@163.com。

通讯作者: 孙彦辉(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事品种钢开发及连铸工艺关键技术研究。E-mail: ustb420@126.com。

偏析、中心疏松等质量问题。由于电磁搅拌技术的众多优点, 研究者们对结晶器电磁搅拌技术进行大量研究^[1-4]。相对于工业试验, 数值模拟的研究方法具有便捷、成本低、自由度高等特点, 所以近几年众多研究者采用数值模拟的方法, 对结晶器电磁搅拌进行相关研究^[5-9]。易军等^[10]建立了大方坯结晶器电磁场和流场的耦合模型, 分别研究了频率为 2、6 Hz 和 8 Hz 时磁场分布特点, 发现在搅拌频率为 6 Hz 时, 电磁感应强度和电磁力最大, 并认为搅拌频率在 2 ~ 8 Hz 存在一个优质值。李桂东等^[11]针对 320 mm×320 mm 方坯结晶器电磁搅拌不同电流方式对电磁搅拌的影响规律进行研究, 发现方波电流较正弦波电流更有助于提高搅拌效率。赵菲等^[12]建立了圆坯结晶器电磁场和流场的数学模型, 并考虑了结晶器弧度对电磁场分布的影响。孙彪等^[13]通过测定不同工艺参数下结晶器电磁搅拌磁场变化规律, 研究了不电磁搅拌参数对中碳小方坯质量的影响规律, 并认为合理的结晶器搅拌参数有利于提高等轴晶比例, 降低小方坯碳偏析指数。王林静等^[14]利用有限元法模拟了不同小方坯结晶器电磁搅拌参数下的电磁场分布, 研究发现铸坯中心等轴晶率与电磁力矩正相关, 随着电磁力矩增大, 铸坯中心等轴晶提高。根据前人们的研究可以发现, 结晶器电磁搅拌磁场分布与电磁搅拌工艺参数有着直接关系, 合理的搅拌参数有利于提高铸坯质量, 而不合理的电磁搅拌参数反而会恶化铸坯质量。因此, 研究结晶器电磁搅拌参数对电磁场的影响规律, 可以为制定合理的电磁搅拌工艺参数提供理论依据, 从而对充分发挥结晶器电磁搅拌的冶金作用以及提高铸坯质量有着尤为重要的作用。

笔者以某厂小方坯结晶器电磁搅拌为研究对象, 利用 ANSYS 有限元分析软件建立了小方坯结晶器电磁搅拌的三维数学模型, 研究了不同工艺参数对结晶器内的电磁感应强度及电磁力的分布和大小的影响规律, 从而为现场生产提供一定的技术支持和理论指导。

1 电磁场数学模型

1.1 基本假设

为了简化模型又不失合理性, 对结晶器电磁搅拌模型的建立做出以下假设:

1) 视钢液为不可压缩的导电流体, 且各向同性;

2) 忽略位移电流, 认为磁场属于磁准静态场;

3) 忽略钢液流动对电磁场的影响, 并将钢液视为静止的;

4) 忽略结晶器锥度以及结晶器内凝固坯壳厚度对感应磁场的影响。

1.2 电磁场控制模型

使用 Maxwell 方程组描述空间电磁分布规律:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\vec{H}$ 为磁场强度, A/m; $\vec{J}$ 为电流密度, A/m²; $\vec{E}$ 为电场强度, V/m; t 为时间, s; $\vec{B}$ 为磁感应强度, T; σ 为介质电导率, S/m。

用时均电磁力来描述结晶器内电磁搅拌力:

$$\vec{F}_{mog} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J} \times \vec{B}) \quad (2)$$

式中 $\vec{F}_{mog}$ 为电磁力, N/m³; Re 为复数表达式的实数部分。

2 结晶器电磁搅拌物理模型

笔者以某厂 150 mm×150 mm 小方坯结晶器电磁搅拌器为研究对象, 利用 ANSYS 有限元软件建立模型并划分网格。模型包括钢液、结晶器铜管、铁芯、线圈, 如图 1(a) 所示。在网格划分过程中, 除空气区域采用四面体网格划分外, 其余区域采用六面体网格划分, 网格划分如图 1(b) 所示, 图中并未显示空气区域。

结晶器电磁搅拌器相关尺寸参数、技术工艺参数, 以及模型过程所需的物性参数如表 1 所示。

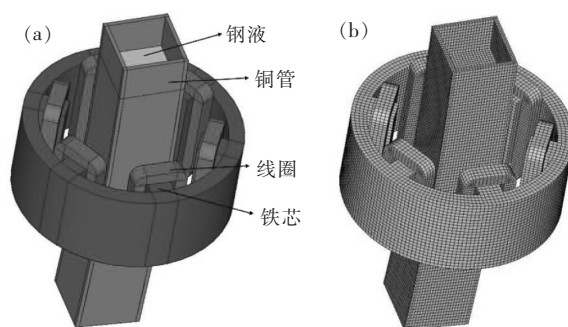


图1 结晶器电磁搅拌物理模型(a)和网格划分(b)

Fig. 1 Physical model of electromagnetic stirring in mold (a) and meshing (b)

表 1 结晶器电磁搅拌相关物性参数
Table 1 Physical parameters of electromagnetic stirring in mold

铸坯尺寸/mm ²	结晶器/mm			电阻率/ $10^{-8}/(\Omega \cdot \text{m})$				磁导率/ $(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$				
	铜管壁厚	铜管长度	有效高度	钢液	线圈	铜管($T_{\text{mold}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	铜管($T_{\text{mold}}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$)	钢液	线圈	铜管	铁芯	空气
150×150	10	900	800	135	1.78	1.78	3.14	1.0	1.0	1.0	1 000	1.0

3 边界条件

结晶器电磁搅拌器所使用的是三相交流电,各相电流的相位差为 120° 。电磁场的边界条件为:磁力线平行于包围电磁搅拌器的空气区域的外表面。单元类型选择 SOLID236 单元。结晶器铜管和钢液部分选择 SOLID236 单元的 AZ-VOLT 自由度,而其他部分则选择 SOLID236 单元的 AZ 自由度。

对于三相结晶器电磁搅拌器,三相电流之间相位差为 120° 相对的两个线圈断面上施加同相位的电流密度,各相线圈电流密度值见式(3)~(5):

$$J_1 = J_0 \sin \omega t \quad (3)$$

$$J_2 = J_0 \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad (4)$$

$$J_3 = J_0 \sin(\omega t + 4\pi/3) \quad (5)$$

其中 J_1 、 J_2 、 J_3 分别为第一相、第二相及第三相的电流密度; ω 为角速度,其值为 $2\pi f$; f 为频率,Hz; t 为时间,s; J_0 为线圈电流密度的幅值,由电流值、线圈匝数及线圈截面积共同决定。

4 模拟结果与分析

4.1 模型的验证

由于结晶器铜管在不同工作温度下电阻率不同,导致铜管对电磁场的屏蔽作用程度不同,从而影响结晶器内的电磁感应强度分布。为了验证所建立结晶器电磁搅拌模型的准确性,使用高斯计测量结晶器空载时结晶器中心轴线不同位置电磁感应强度。根据结晶器空载时和正常浇铸时的铜管工况,在模型验证时,采用温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的铜管电阻率进行模拟计算,而在研究电搅参数对电磁场影响规律时,采用温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的铜管电阻率进行计算。图 2 为电流强度为 240 A 、频率为 4 Hz 工况下的模拟结果和实测结果。由图 2 可知,铜管温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,中心轴线最大电磁感应强度分别为 0.067 T 和 0.078 T ,相差 0.011 T 。铜管温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,模拟结果与现场高斯计测量结果和基本一致,说明本文所建立的模型是合理、可信的。

4.2 工作电流对电磁感应强度的影响

图 3 为结晶器中心纵切面电磁感应强度分布情况。由图 3 可知,电磁感应强度主要分布在电磁搅拌器作用区域。结晶器电磁搅拌中心位置铸坯横截面上某一周期内(0° 、 120° 和 240° 三个相位下)磁感应线方向进行周期性变化,与铸坯在圆周上做相对切割磁感线运动,在铸坯内部产生感应电流和电磁力。

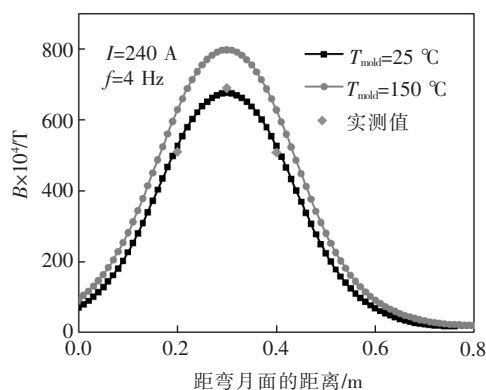


图 2 电磁感应强度在中心轴线的分布规律
Fig. 2 Distribution of magnetic flux density on the central axis

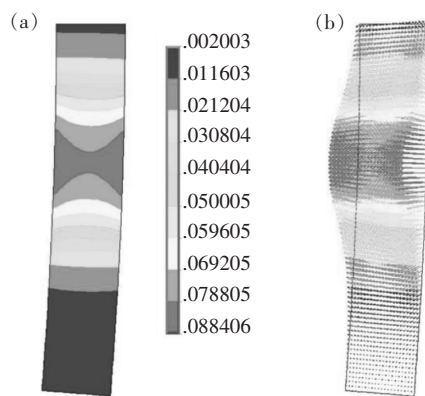


图 3 搅拌器中心轴线纵切面电磁感应强度分布云图(a)和矢量图(b)
Fig. 3 Contour (a) and vector (b) of magnetic flux density distribution on the longitudinal section of the central axis of stirrer

图 4 为电磁搅拌频率为 4 Hz 时,在不同电流强度下电磁感应强度在中心轴线上的分布规律。

由图4可知,轴线方向电磁感应强度分布呈“中间大,两头小”分布规律。同时发现,随着电流强度的增大,电磁感应强度增大。电流强度从160 A增大到320 A,电磁感应强度最大值由0.053 2 T增大到0.106 4 T,每增大40 A,电磁感应强度最大值增大0.013 3 T。

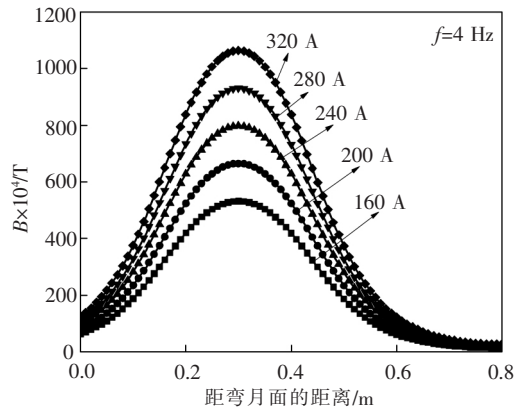


图4 在不同电流强度下电磁感应强度在中心轴线上的分布规律

Fig. 4 Distribution of magnetic flux density on the central axis under different currents

图5为电磁搅拌频率为4 Hz时,不同电流强度下电磁感应强度在中心横截面径向方向的分布规律。电流强度对径向方向的电磁感应强度的影响与对轴线方向的影响规律基本一致,同样随着电流强度增大,电磁感应强度增大。但径向方向电磁感应强度呈现“中间小,两头大”分布规律,即距铸坯表面越近,电磁感应强度越大,这主要是由于存在“集肤效应”的影响。同时发现,随着电流强度的提高,铸坯表面处与铸坯中心处的电磁感应强度差值变大,电流强度从160 A到320 A,铸坯表面处与铸坯中心处的电磁感应强度最大相差0.015 4 T,最小相差0.007 7 T。

4.3 工作频率对电磁感应强度的影响

图6为电磁搅拌电流强度为240 A时,在不同工作频率下电磁感应强度在中心轴线上的分布规律。

由图6可知,随着频率的增大,电磁感应强度减小,这与电流强度对电磁感应强度的影响有所不同。频率由2 Hz增大到6 Hz,电磁感应强度最大值由0.086 6 T减小到0.071 4 T,每增大1 Hz,电磁感应强度最大减小0.004 3 T,最小减小0.003 0 T。

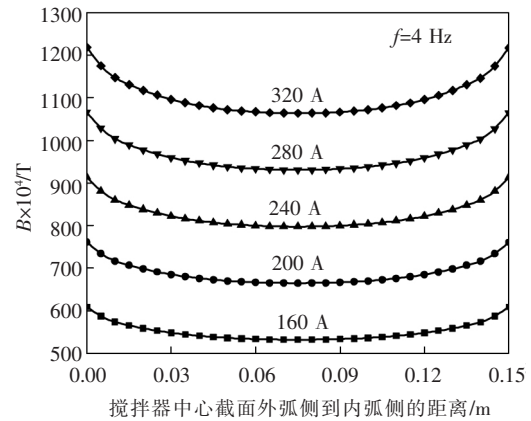


图5 不同电流强度下电磁感应强度在中心横截面径向方向的分布规律

Fig. 5 Distribution of magnetic flux density in radial direction of central cross section under different currents

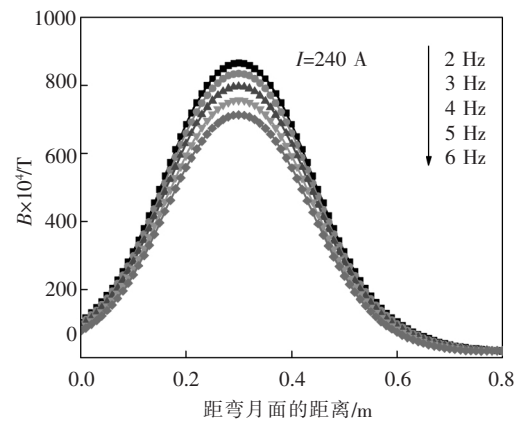


图6 在不同工作频率下电磁感应强度在中心轴线上的分布规律

Fig. 6 Distribution of magnetic flux density on the central axis at different frequencies

图7为电磁搅拌电流强度为240 A时,不同工作频率下电磁感应强度在中心横截面径向方向的分布规律。工作频率对径向方向的电磁感应强度的影响与对中心轴线方向的影响规律基本一致,同样随着频率增大,电磁感应强度减小。在同一频率下,随着频率增大,铸坯表面处与铸坯中心处的电磁感应强度差值明显变大。频率从2 Hz到6 Hz,铸坯表面处与铸坯中心处的电磁感应强度最大相差0.013 5 T,最小相差0.008 9 T。

4.4 工作电流对电磁力的影响

图8为搅拌器中心横截面电磁力分布云图和矢量图。由图8可知,电磁力的最大值出现在铸坯表面区域,这主要是由于铸坯内部产生的感应电流强度受到“集肤效应”的影响,从而影响了电磁力的分布。

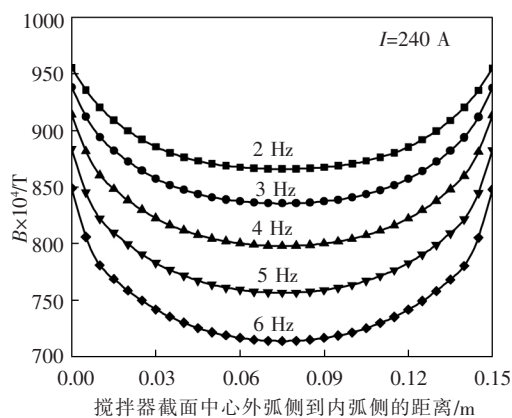


图 7 不同工作频率下电磁感应强度在中心横截面径向方向的分布规律

Fig. 7 Distribution of magnetic flux density in radial direction of central cross section at different frequencies

图 9 为不同频率为 4 Hz 时, 不同电流强度下电磁力在中心横截面的分布规律。由图 9 可知, 电磁力在搅拌器中心截面径向方向也呈“中间小, 两头大”的分布规律。在相同的电流强度下, 电磁力由铸坯截面中心到表面线性增大。同时, 随着电流的增大, 电磁力逐渐增大, 并且越靠近铸坯表面, 电磁力增幅越大。电流强度由 160 A 增大到 320 A, 电磁力最大值由 1 577.6 N/m³ 增大到 6 310.5 N/m³。并且在相同的电流强度增幅下, 电流越大, 电磁力最大值增幅越大, 电磁力最大增幅为 1 478.9 N/m³, 最小增幅为 887.3 N/m³。

4.5 工作频率对电磁力的影响

图 10 为电流强度为 240 A 时, 不同工作频率下电磁力在中心截面径向方向分布规律。由图 10 可知, 随着频率的增大, 电磁力逐渐增大, 并且越靠近铸坯表面, 电磁力增幅越大。

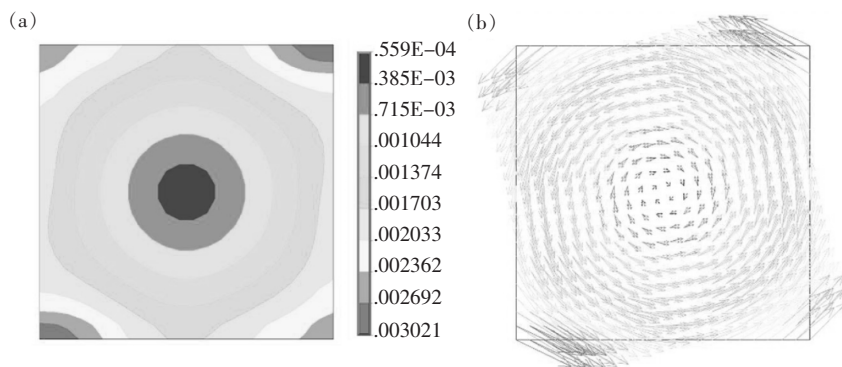


图 8 搅拌器中心横截面电磁力分布云图 (a) 和矢量图 (b)

Fig. 8 Contour (a) and vector (b) of electromagnetic force distribution in the cross section of the stirrer center

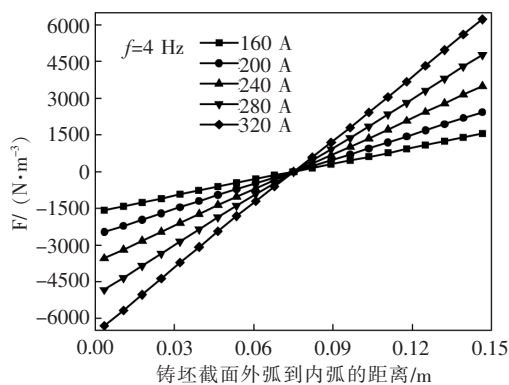


图 9 不同电流强度下电磁力在中心横截面径向方向的分布规律

Fig. 9 Distribution of electromagnetic force on the radial direction of central cross section under different currents

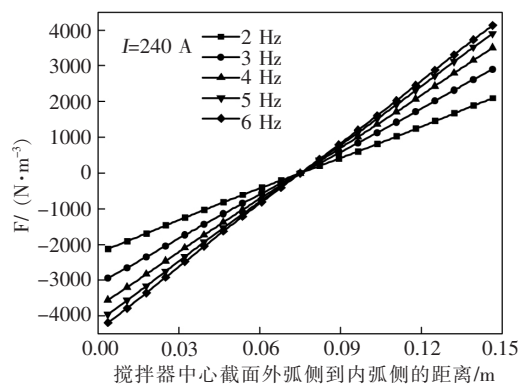


图 10 不同工作频率下电磁力在中心横截面径向方向的分布规律

Fig. 10 Distribution of electromagnetic force on the radial direction of central cross section at different frequencies

同时发现,电磁力的最大值随着频率的增大而增大。频率由2 Hz增大到6 Hz,电磁力由 $2\,121.4\text{ N/m}^3$ 增大到 $4\,189.8\text{ N/m}^3$,在相同的电流强度增幅下,频率越大,电磁力最大值增幅越小,最大增幅为 820.8 N/m^3 ,最小增幅为 235.2 N/m^3 。

4.6 结晶器电磁安装位置对磁场分布的影响

图11为电流强度为240 A,频率为4 Hz时,不同电磁搅拌器中心距弯月面0.3、0.4、0.5 m时,电磁搅拌器中心轴线电磁感应强度分布情况。

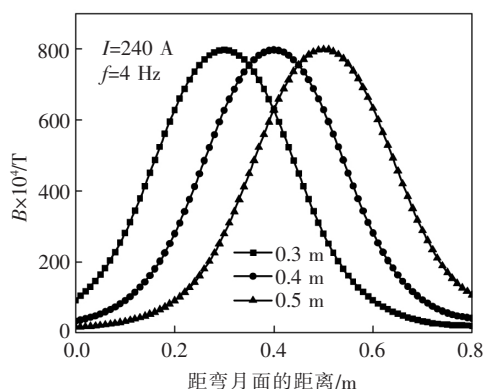


图11 不同电磁搅拌器安装位置下的电磁感应强度在中心轴线分布规律

Fig. 11 Distribution of electromagnetic induction intensity on central axis under different installation positions of electromagnetic stirrer

由图11可知,电磁感应强度的最大值出现在电磁搅拌器中心位置,并且随着电磁搅拌器中心的安装位置的变化而变化。电磁搅拌器中心位于距弯月

面0.3、0.4、0.5 m时,对应的弯月面处钢液受到的电磁感应强度分别0.009 2、0.003 2 T和0.001 5 T。从中可以看出,当搅拌器中心位于距弯月面0.3 m位置时,在弯月面处钢液也会受到电磁场的影响,这有可能会造成液面不稳定,从而有可能导致卷渣的发生,这不利于洁净钢的生产。搅拌器中心位于距弯月面0.4 m和0.5 m的位置时,电磁场对弯月面处的钢液影响相对较小,从而减小由电磁力引起的液面波动。

5 结论

1) 电磁感应强度沿搅拌器中心轴线方向呈现“中间大,两头小”的分布规律,而在搅拌器中心横截面径向方向,电磁感应强度和电磁力呈现“中间小,两头大”的分布规律。

2) 随着电流强度增大,电磁感应强度增大,同时铸坯表面处与铸坯中心处的电磁感应强度差值变大。而电磁感应强度随着频率增大而减小,并且频率越大,铸坯表面处与铸坯中心处的电磁感应强度差值越大。

3) 随着电流强度增大,电磁力增大,并且在相同的电流增幅下,电流越大,电磁力最大值增幅越大。电磁力也随着频率的增大而增大,但在相同的频率增幅下,频率越大,电磁力最大值增幅越小。

4) 搅拌器中心安装位置在距弯月面0.4 m或0.5 m的位置时,电磁场对弯月面处的钢液影响相对较小,有利于避免液面波动引起的卷渣。

参考文献

- [1] Li Hongguang, Chen Tianming, Yang Wenzhong *et al.* Effects of M-EMS stirring intensity on homogeneity and dendritic structure of rail steel [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2019, 40(2): 121–126.
(李红光, 陈天明, 杨文中, 等. M-EMS 搅拌强度对重轨钢均质性及凝固组织的影响[J]. 钢铁钒钛 2019, 40(2): 121–126.)
- [2] Wang Pu, Li Shaoxiang, Chen Lie *et al.* Investigation of mold metallurgical behavior under electromagnetic stirring for round bloom [J]. Iron and Steel 2019, 54(8): 82–89, 186.
(王璞, 李少翔, 陈列, 等. 电磁搅拌对大圆坯结晶器冶金行为影响的探讨[J]. 钢铁 2019, 54(8): 82–89, 186.)
- [3] Li Hongguang. Study on the effects of EMS stirring intensity on carbon homogeneity of 360 mm×450 mm gear steel bloom and control [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2019, 40(1): 112–117.
(李红光. 360 mm×450 mm 大方坯电磁搅拌强度对齿轮钢碳元素均质性的影响与控制研究[J]. 钢铁钒钛 2019, 40(1): 112–117.)
- [4] Sun Tao, Yue Feng, Wu Huajie *et al.* Effect of Mold electromagnetic stirring current on internal quality of Ø650 mm heavy round bloom [J]. Special Steel, 2015, 36(5): 43–46.
(孙涛, 岳峰, 吴华杰, 等. 结晶器电磁搅拌电流对 Ø650 mm 大圆坯内部质量的影响[J]. 特殊钢 2015, 36(5): 43–46.)

- [5] Wang Xuebing, Zhang Xinzong, Qiu Shengtao *et al.* Numerical simulation of electromagnetic stirring in slab secondary cooling stage[J]. Hot Working Technology 2019 48(7): 117-120.
(王学兵, 张兴中, 仇圣桃, 等. 板坯二冷段电磁搅拌数值模拟研究[J]. 热加工工艺 2019 48(7): 117-120.)
- [6] Zhang Wenjie, Luo Sen, Chen Yao *et al.* Numerical simulation of fluid flow, heat transfer, species transfer and solidification in billet continuous casting mold with M-EMS[J]. Metals 2019 9(1): 66.
- [7] Trindade, Leonardo B, Nadalon *et al.* Modeling of solidification in continuous casting round billet with mold electromagnetic stirring (M-EMS) [J]. Steel Research International 2017 88(4): 1600319.
- [8] Ren B Z, Chen D F, Wang H D *et al.* Numerical simulation of fluid flow and solidification in bloom continuous casting mould with electromagnetic stirring[J]. Ironmaking & Steelmaking 2015 42(6): 401-408.
- [9] Yang Zhenguo, Wang Bao Zhang, Xiaofeng *et al.* Effect of electromagnetic stirring on molten steel flow and solidification in bloom mold[J]. Journal of Iron and Steel Research International 2014 21(12): 1095-1103.
- [10] Yi Jun, Xing Shuqing, Wang Jun *et al.* The numerical simulation of the magnetic and flowing fields in M-EMS bloom casting process[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology 2013 32(2): 162-168.
(易军, 邢淑清, 王军, 等. 350 mm 大方坯连铸结晶器电磁搅拌电磁场与流场耦合数值模拟[J]. 内蒙古科技大学学报, 2013 32(2): 162-168.)
- [11] Li Guidong, Ma Yonglin, Xing Shuqing *et al.* Numerical simulation of electromagnetic field and flow field in square wave electromagnetic stirring of continuous casting mould[J]. Foundry Technology 2019 40(3): 276-282.
(李桂东, 麻永林, 邢淑清, 等. 连铸结晶器方波电流电磁搅拌电磁场—流场数值模拟[J]. 铸造技术 2019 40(3): 276-282.)
- [12] Zhao Fei, Bai Minghua, Xu Kuan *et al.* Numerical simulation on flow field in curved mold with electromagnetic stirring[J]. Continuous Casting 2017 42(1): 13-19.
(赵菲, 白明华, 徐宽, 等. 电磁搅拌作用下弧形结晶器流场的数值模拟[J]. 连铸 2017 42(1): 13-19.)
- [13] Sun Biao, Liu Xuehua, Liang Jun *et al.* Effects of M-EMS on quality of medium-carbon steel billet[J]. Continuous Casting, 2015 40(6): 54-58.
(孙彪, 刘学华, 梁军, 等. 结晶器电磁搅拌对中碳钢小方坯质量的影响[J]. 连铸 2015 40(6): 54-58.)
- [14] Wang Linjing, Bao Yanping, An Hanghang *et al.* Effect of M-EMS on quality of 55CrSi spring steel billet[J]. Continuous Casting 2015 40(5): 62-66.
(王林静, 包燕平, 安航航, 等. 结晶器电磁搅拌对 55CrSi 弹簧钢铸坯质量的影响[J]. 连铸 2015 40(5): 62-66.)

编辑 邓淑惠

(上接第 107 页)

- [8] Hou Xiangdong, Chen Jin, Shi Xuehong *et al.* Analysis of factors influencing solid-phase reduction and dephosphorization of carbon bearing manganese ore powder by microwave heating[J]. Science and Technology Innovation Guide 2009 (3): 17-19.
(侯向东, 陈津, 史学红, 等. 微波加热含碳锰矿粉固相还原脱磷影响因素分析[J]. 科技创新导报 2009(3): 17-19.)
- [9] Li Yongjun, Li Guangqiang, Zhu Chengyi *et al.* Experimental study on simultaneous dephosphorization by carbothermal reduction of high phosphorus iron ore[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology 2012 (4): 254-259.
(李永军, 李光强, 朱诚意, 等. 高磷铁矿碳热还原同步脱磷的试验研究[J]. 武汉科技大学学报 2012(4): 254-259.)
- [10] Wang Shuhuan, Wu Yanqing, Liu Xinsheng *et al.* Experimental study on the gasification dephosphorization of converter slag by silicon reduction[J]. Iron and Steel 2008 (2): 31-34.
(王书桓, 吴艳青, 刘新生, 等. 硅还原转炉熔渣气化脱磷试验研究[J]. 钢铁 2008(2): 31-34.)
- [11] Fangxiong miyashi, Liu Jingming, Yamada Jiansan *et al.* Processing method of molten steel, Japanese Patent: tk-51-121030 [P]. 1975-04-16.
(宫下方雄, 柳井明, 山田健三, 等. 製鋼溶融スラク処理方法, 日本专利: 特开昭 51-121030 [P]. 1975-04-16.)

编辑 杨冬梅