

160 mm × 160 mm 连铸坯结晶器电磁搅拌对钢液 流场影响的数值模拟

党爱国^{1,2} 钟保军² 田新中² 李永超²

(1 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081;2 邢台钢铁有限责任公司,邢台 054027)

摘要 采用数值模拟方法对比研究了 160 mm × 160 mm 铸坯电磁搅拌参数对钢液搅动和结晶器内流场的影响。结果表明,在频率(1.0 ~ 5.0 Hz)条件下,磁感应强度随着频率的增大而减小,且变化量较大。钢液内电磁力沿圆周方向对称分布。在电流(200 ~ 500 A)条件下,磁感应强度随着电流的增大而增大。结晶器内半径方向上电磁力波动较大,存在多个波峰,波峰最大的位置都在距结晶器铜管 15 mm 处,与搅拌电流的大小无关,电磁力随电流的增大而增大。小方坯结晶器电磁搅拌频率应控制在 3 ~ 4.5 Hz,电流大小应控制在 300 ~ 500 A。

关键词 160 mm × 160 mm 方坯连铸 结晶器 电磁搅拌

Numerical Simulation on Effect of Electromagnetic Stirring in 160 mm × 160 mm Billet Mould on Flow Field of Molten Steel

Dang Aiguo^{1,2}, Zhong Baojun², Tian Xinzhong² and Li Yongchao²

(1 National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Xing Tai Iron & Steel Co Ltd, Xingtai 054027)

Abstract The influence of electromagnetic stirring parameters of 160 mm × 160 mm cast billet on the stirring of molten steel and the flow field in the mould is studied by numerical simulation. The results show that with frequency 1.0 ~ 5.0 Hz, the magnetic induction intensity decreases with the increase of frequency and the variation is large. The electromagnetic force in molten steel is symmetrically distributed along the circumference. With current intensities (200 ~ 500 A), the magnitude of magnetic induction increases with the increase of current intensities. The electromagnetic force fluctuates greatly in the direction of radius in the mould, and there are multiple wave peaks. The largest wave peak is 15 mm away from the copper tube of the mould, which has nothing to do with the intensity of stirring current. The electromagnetic force increases with the increase of the current. The electromagnetic stirring frequency of the billet mould shall be controlled between 3 Hz and 4.5 Hz, and the current intensity shall be controlled between 300 A and 500 A.

Material Index 160 mm × 160 mm Cast Billet, Mould, Electromagnetic Stirring

连铸电磁搅拌是一个复杂的流动、传热以及存在相变的冶金过程^[1]。单纯利用理论解析的方法进行分析是十分困难的,对此,利用计算机技术对冶金过程中的物理化学机理进行模拟仿真计算已成为解决复杂工程问题的有效手段^[2-4]。本文按照数学模拟研究方法,根据 160 mm × 160 mm 方坯连铸机的实际生产条件,建立了连铸电磁搅拌过程三维数学模型,确定了相关的边界条件,明确了计算参数并对计算区域进行了网格划分,制定了相关的计算方案,通过计算编程实现数值模型的计算,从而分析电磁搅拌对钢液搅动和结晶器内流场的影响。

1 数学模型及其物性参数

1.1 模型的基本假设

(1) 由于电磁搅拌器的本体结构比较复杂,考虑到结晶器冷却水套、不锈钢保护套以及一些绝缘材料的相对磁导率很小,因此可简化为空气区进行

模拟计算;

(2) 只为搅拌器四周建立有限的空气层单元,加磁力线平行边界条件;

(3) 选用载流绞线单元为载流绕线区建立物理模型,电磁搅拌器的线圈绕组简化为具有相同导电面积的载流区,并用载流密度来表征线圈绕组的电流大小;

(4) 忽略钢液的流动对磁场的影响。

1.2 控制方程

空间中电磁场的分布规律由 Maxwell 方程组描述,包括磁感应强度以及电磁感应电流的结晶器内磁场分布可通过求解 Maxwell 方程获得^[5-6],求解方程如下:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = J$$

$$\nabla \times D = \rho_e$$

$$\nabla \times B = 0$$

$$B = \mu H$$

$$J = \sigma E$$

式中: E - 电场强度 / ($V \cdot m^{-1}$); B - 磁感应强度 / T; t - 时间 / s; H - 磁场强度 / ($A \cdot m^{-1}$); J - 电流密度 / ($A \cdot m^{-2}$); D - 电位移矢量 / ($C \cdot m^{-1}$); ρ_e - 电荷体密度 / ($C \cdot m^{-3}$)。另外在耦合磁场和流场计算过程中,时均电磁力可通过以下方程求解:

$$F = \frac{1}{2} R_c (J \times B^*)$$

式中: B^* - 共轭复数; R_c - 实际部分。

1.3 相关计算条件及结构参数

(1) 结晶器电磁搅拌结构参数。160 mm × 160 mm 结晶器电磁搅拌参数:频率 2 ~ 5 Hz;额定电流 500 A。搅拌器距中心截面结晶器上口距离为 300 mm,结晶器铜管长度为 900 mm。电磁搅拌器中心横截面结构如图 1 所示。

(2) 相关计算条件。旋转电磁搅拌器的磁轭铁、线圈、结晶器铜管以及空气的相对磁导率为各向同性,并且都为常数。各物理模型单元的物性参数如表 1 所示。

同时建立了结晶器电磁搅拌有限元模型和网格划分,如图 2 所示。

2 结晶器电磁搅拌计算结果及分析

电磁场是分析连铸过程钢水运动行为的基础,由于受到计算方法和软件的限制,磁场的模拟计算

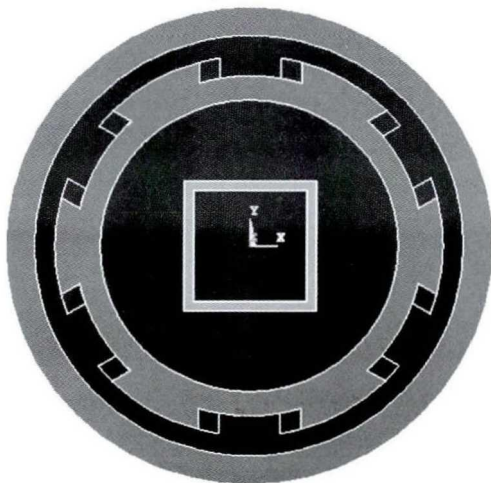


图 1 电磁搅拌器中心横截面结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross section structure of electromagnetic stirrer center

表 1 物理模型单元的物性参数

Table 1 Physical model element physical parameters

实体属性	相对磁导率	电导率 / ($S \cdot m^{-1}$)	密度 / ($kg \cdot m^{-3}$)	粘度 / ($Pa \cdot s$)
空气	1.0	-	-	-
线圈	1.0	-	-	-
磁轭	4 000	-	-	-
钢液	1.0	7.14×10^5	7 020	0.006 2
铜管(20 °C)	1.0	5.56×10^7	-	-
铜管(160 °C)	1.0	3.87×10^7	-	-



图 2 有限元模型及网格划分

Fig. 2 Finite element model and meshing division

成为是冶金研究的难点之一。磁场分布受诸多因素的影响,比如结晶器铜管内径和厚度以及铜管温度、搅拌频率、电流强度等。分析不同断面及不同电磁搅拌参数所对应的不同位置搅拌器的磁场分布规律,为优化电磁搅拌的冶金效果提供理论依据。

2.1 仿真所涉及的工艺条件和研究方案

针对小方坯连铸机结晶器电磁搅拌器的具体情况,制定如下计算方案:

- (1) 研究电磁搅拌器内磁场随时间的变化;
- (2) 空载条件下搅拌器内磁场的分布;
- (3) 研究电磁搅拌参数对结晶器电磁搅拌电磁场分布的影响。

综合以上各因素,本工作计算涉及的工艺条件如表 2 所示。

2.2 空载条件下电磁场分布

空载条件下,电磁搅拌器内磁力线分布如图 3 所示。图 3 表示的是电流为 350 A,搅拌频率为 3.5 Hz 结晶器电磁搅拌器内磁力线分布图。在电磁搅拌器的六组绕线圈上施加三相交流电,其中每相对的两个绕组上加上同相交流电,并且保证相对的两个绕组上的线圈所产生的交变磁场的方向一

表 2 仿真分析涉及的工艺条件

Table 2 Process conditions involved in simulation analysis

方案号	搅拌位置	铸坯断面/ (mm × mm)	工况	电流/ A	频率/ Hz
1			空载	300 ~ 500	3.5
2	结晶器	160 × 160		350	1 ~ 5
3	电磁搅拌		300 ~ 500	3.5	
4			浇注过程	350	1 ~ 5

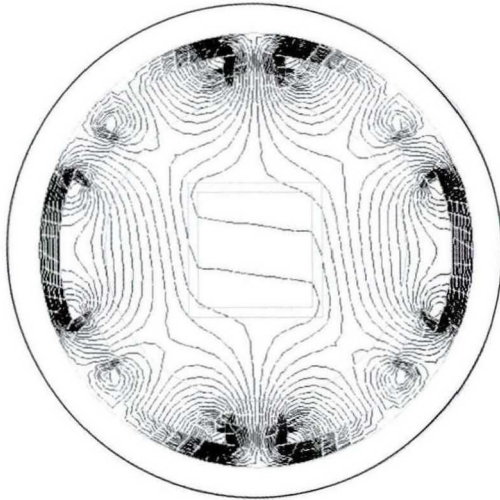


图 3 电磁搅拌器内磁感应强度分布

Fig. 3 Distribution of magnetic induction intensity in electromagnetic stirrer

致。在沿 y 轴的这对绕组线圈上施加的交流电的相位角为 0°，每相交流电的相位差为 120°。从图 3 中可以看出，相对的两组绕组线圈产生一致的磁场，所产生的磁力线一部分从一端载流线圈与 Y 轴成一定角度通过搅拌器中心，到达另一端载流线圈，再沿轭铁从两个周边聚合到起始端，另一部分直接从载流线圈四周闭合到端部。

电磁搅拌器内沿 Y 轴磁感应强度变化如图 4 所示。从图 4 中可以看出，搅拌器内磁感应强度在任意时刻基本对称。结晶器铜管内磁感应强度的大小远小于铜管外磁感应强度的大小。这说明，结晶器铜管对电磁场有很强的屏蔽作用。

2.3 电磁场随时间的变化

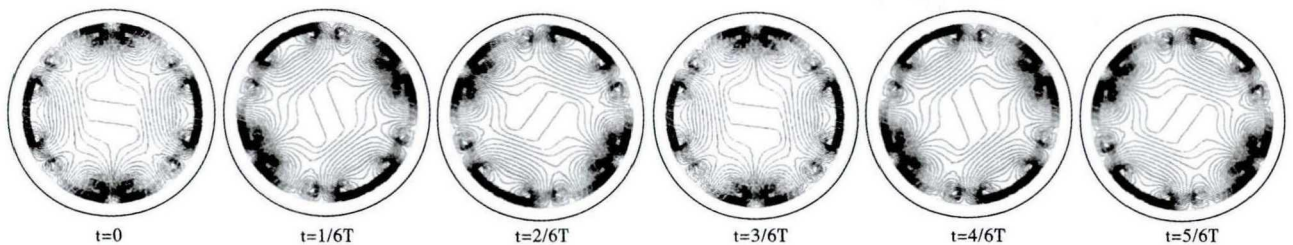


图 5 旋转电磁搅拌器内磁力线分布

Fig. 5 Magnetic force distribution in a rotating electromagnetic stirrer

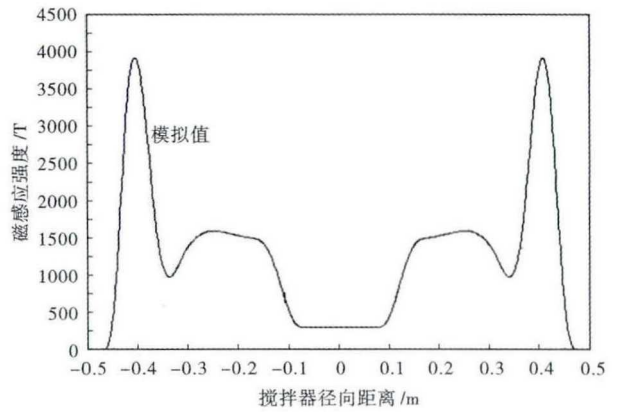


图 4 电磁搅拌器 X 轴方向磁感应强度分布

Fig. 4 Magnetic induction intensity distribution at X-axis direction of electromagnetic stirrer

旋转电磁搅拌器的工作原理类似于异步电动机，异步电动机的定子由硅钢片叠成的圆形铁芯和嵌在其中的绕组组成，当定子上通上三相交流电时，就能激发产生以同步速度旋转的磁场。当电磁搅拌器通上交流电时也会产生类似的旋转磁场。

给定电流为 350 A，频率为 3.5 Hz，在有限元模型上施加载荷并进行计算。图 5 为电磁搅拌器内电磁场随时间的变化图。每相对线圈上施加方向相同的电流密度，每相对绕组上的相位角依次为 0°、120°、240°。从图 5 中可以看出，在不同时刻，钢液不同位置上的电磁场方向与 Y 轴方向成一定的角度。随着时间的推移，旋转电磁搅拌器内的电磁场沿圆周方向的旋转变化的。

2.4 结晶器电磁搅拌器内电磁场分布

2.4.1 电磁搅拌频率的影响

(1) 不同频率条件下结晶器内磁感应强度分布。电流为 500 A，搅拌频率分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 Hz 下结晶器内磁感应强度分布，如图 6 和图 7 所示（图形基本一致，结果值不同，本文截取一部分图例进行描述）。

由图 7 可以看出，结晶器内中心部位磁感应强度分布比较均匀，边缘处磁感应强度大于中心部位，

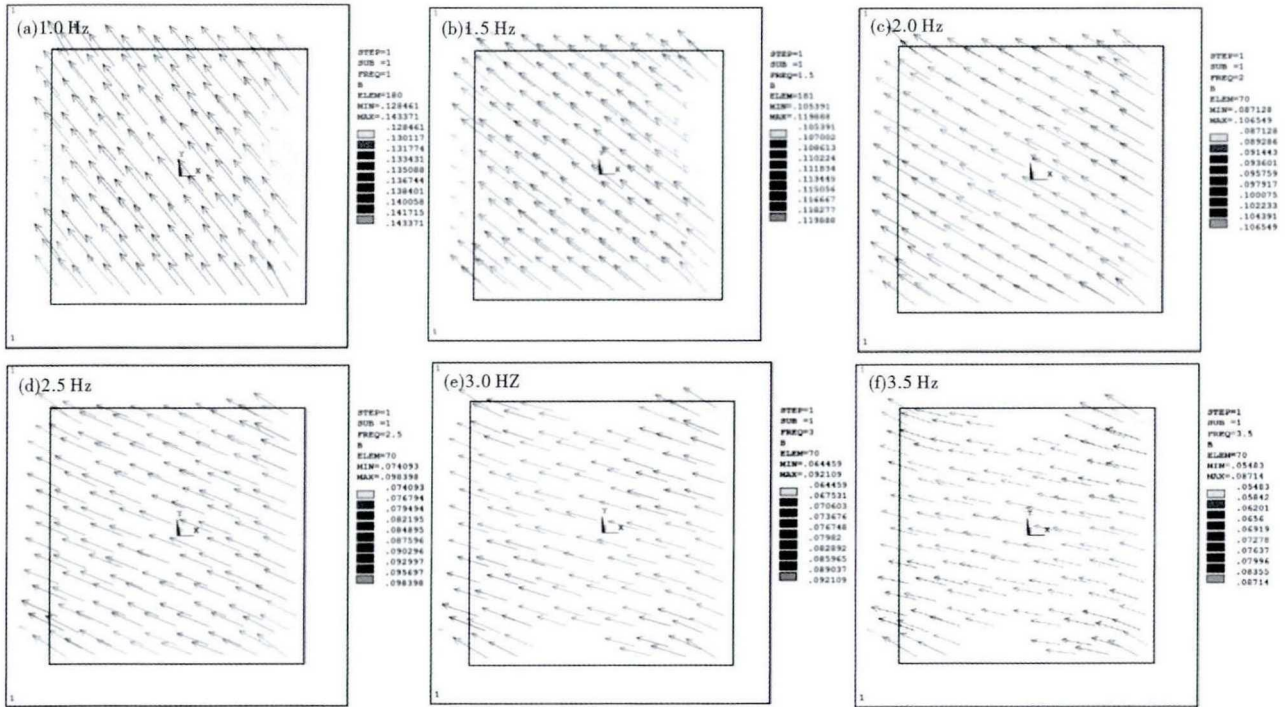


图 6 结晶器内磁感应强度分布矢量图
 Fig. 6 Vector diagram of magnetic induction intensity distribution in mould

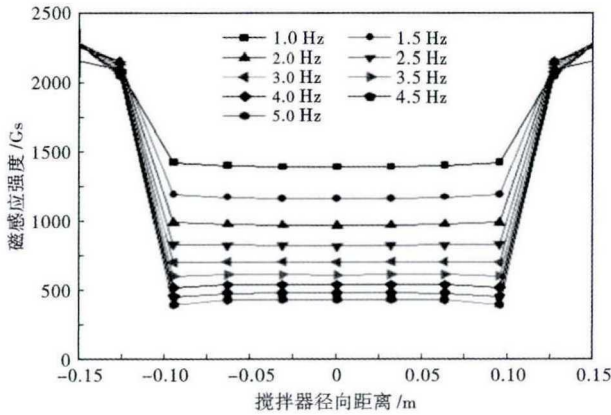


图 7 结晶器内磁感应强度随电磁搅拌频率的变化
 Fig. 7 Variation of magnetic induction intensity in mould with frequency of electromagnetic stirring

不同频率条件下,磁感应强度随着频率的增大而减小且变化量较大。

(2)不同频率条件下结晶器内电磁力分布。电磁搅拌器在结晶器内对钢液产生旋转电磁力。电流为 500 A,搅拌频率分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 Hz 结晶器内电磁力分布,如图 8 和图 9 所示(取部分图例描述)。

由图 8 和图 9 可得,钢液内电磁力沿圆周方向对称分布,钢液中心部位电磁力分布比较均匀,电磁力的大小随着频率的增加而减小。

2.4.2 电流大小的影响

(1)不同电流大小下结晶器内磁感应强度分布。搅拌频率为 3.5 Hz,电流分别为 200、300、400、500 A 时,结晶器内磁感应强度分布如图 10 所示。

由图 10 可得,不同电流大小下,结晶器内磁感应强度的分布趋势基本相同,磁感应强度的大小随着电流的增大而增大。

(2)不同电流条件下结晶器内电磁力分布。图 11 为搅拌频率为 3.5 Hz,电流分别为 200、300、400、500 A 时,结晶器内电磁力分布。

由图 11 可以看出,结晶器内半径方向上电磁力波动较大,存在多个波峰,波峰最大的位置都在距结晶器铜管 15 mm 处,电磁力的大小随电流的增大而增大。

炼钢厂根据生产情况的不同所采取的频率和电流也不相同,根据水口插入深度,钢液过热度消失以及卷渣情况调整电磁搅拌参数。一般情况下铸坯中心磁感应强度应控制在 500 ~ 1 000 Gs,电磁力最大值控制在 30 ~ 50 N/m²,因此,小方坯结晶器电磁搅拌频率应控制在 3 ~ 4.5 Hz,电流应控制在 300 ~ 500 A,不宜超过 500 A。

2.4.3 现场试验验证

(1)通过工艺参数的优化,将电流提高为 350 A,频率降低至 3.5 Hz,小方坯低倍合格率为 98.05%,

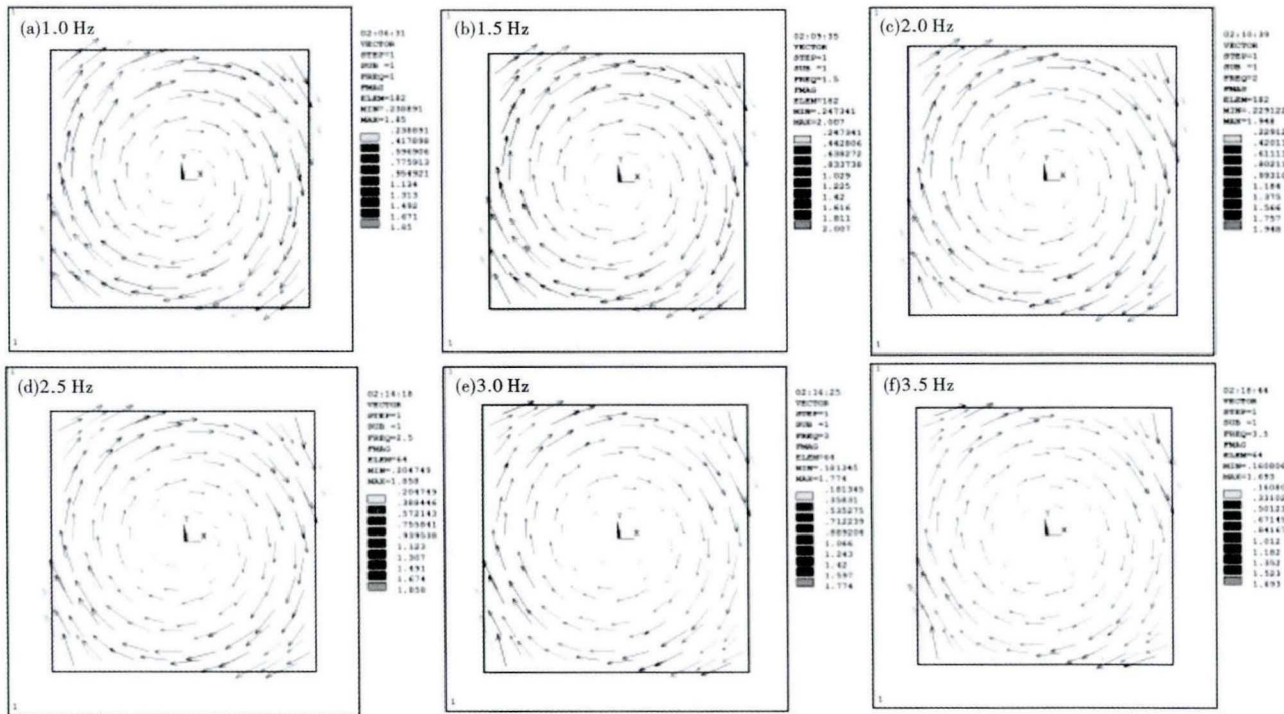


图 8 结晶器内电磁力分布矢量图

Fig. 8 Vector diagram of electromagnetic force distribution in mould

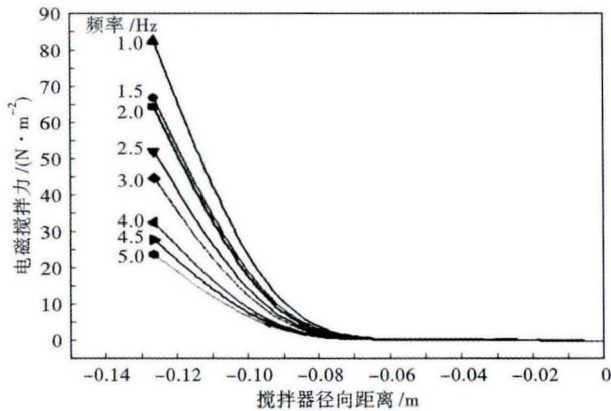


图 9 结晶器内电磁力随电磁搅拌频率的变化

Fig. 9 Variation of electromagnetic force in mould with frequency of electromagnetic stirring

比调整前提高了 4.35%，由此可以得出，电磁搅拌工艺参数的优化对铸坯低倍的改善效果明显。

(2) 通过对比电磁搅拌参数优化前后的铸坯低倍组织，可以明显发现，优化后柱状晶区域减小，等轴晶区域面积增大 15% 左右（向外扩展 20 mm），可以减轻铸坯中心偏析。

(3) 通过对比参数优化前后的铸坯裂纹状况发现，铸坯角部和表面裂纹比率基本没有变化，通过电磁搅拌可以提高铸坯低倍合格率，减轻铸坯中心偏析的内部质量，但对铸坯表面裂纹影响不大。

3 结论

(1) 结晶器内中心部位磁感应强度分布比较均匀，边缘处磁感应强度大于中心部位，不同电磁搅拌

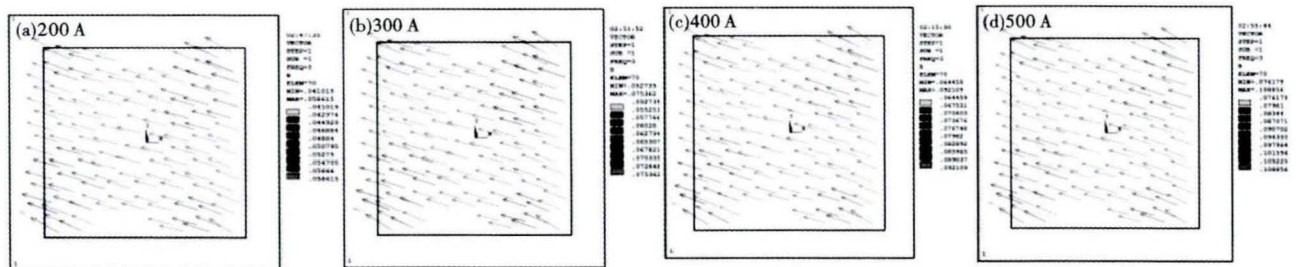


图 10 结晶器内磁感应强度随电磁搅拌电流的变化

Fig. 10 Variation of magnetic induction intensity in mould with intensity of electromagnetic stirring current

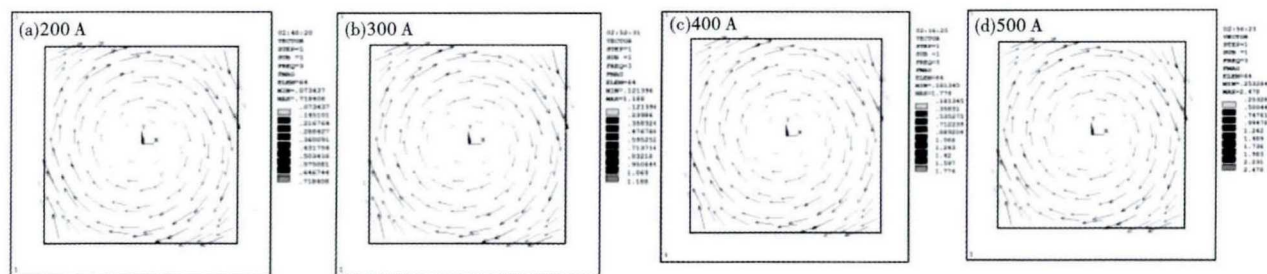


图 11 结晶器内电磁力随电磁搅拌电流的变化

Fig. 11 Variation of electromagnetic force in mould with intensity of electromagnetic stirring current

频率下,磁感应强度随着频率的增大而减小且变化量较大。钢液内电磁力沿圆周方向对称分布,电磁力的大小随着频率的增加而减小。

(2)磁感应强度的大小随着电流的增大而增大。结晶器内半径方向上电磁力波动较大,存在多个波峰,波峰最大的位置都在距结晶器铜管 15 mm 处,与搅拌电流的大小无关,电磁力的大小随电流的增大而增大。

(3)一般情况下小方坯中心磁感应强度应控制在 500 ~ 1 000 Gs,电磁力最大值控制在 30 ~ 50 N/m²,因此,小方坯结晶器电磁搅拌频率应控制在 3 ~ 4.5 Hz,电流应控制在 300 ~ 500 A,不宜超过 500 A,可以根据过热度消失和钢液搅动情况进行微调。

参考文献

- [1] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- [2] 李建超,崔建忠,王宝峰,等. 大方坯连铸跨结晶器电磁搅拌的数值模拟[J]. 东北大学学报:自然科学版,2006,27(5):497-499.
- [3] 陈永,朱苗勇,蔡可森,等. 280mm × 380mm 方坯连铸结晶器电磁搅拌数值模拟[J]. 钢铁钒钛,2008,29(2):43-47.
- [4] 张宏丽,王恩刚,贾光霖,等. 搅拌器的结构参数对钢液内电磁场和流场分布的影响[J]. 钢铁研究学报,2002,14(4):10-14.
- [5] 魏宁,包燕平,吴华杰,等. 大方坯连铸结晶器电磁搅拌三维电磁场的数值模拟[J]. 北京科技大学学报,2011,6(33):702-708.
- [6] 于洋,李宝宽,杨刚. 钢连铸电磁搅拌工艺中流场的数值模拟[J]. 北京科技大学学报,2011,2(33):43-47.

党爱国(1984-),男,博士在读(钢铁研究总院),高级工程师,2008年辽宁科技大学(本科)毕业,连铸坯质量控制。
E-mail:dangaiguo@163.com

收稿日期:2020-06-19

欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010