

钢液对软接触结晶器内三维电磁特性影响的数值模拟

邓安元, 贾光霖, 赫冀成

(东北大学宝钢-东大EPM联合研究中心, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 运用有限元程序,数值模拟了有、无钢液条件下电磁软接触结晶器内的三维电磁特性. 结果表明: 结晶器内的电磁特性与有、无钢液密切相关,软接触结晶器内的电磁场对钢液面波动十分敏感,线圈位置对电磁场的影响效果受有、无钢液所决定,高频电磁场有利于弯月面的约束成形和减小电磁力对内部钢液的搅拌,建议采用20 kHz以上的频率,电磁场主要集中在铸坯外表面约10 mm厚度的范围内.

关键词: 软接触结晶器; 钢液; 弯月面; 数值模拟; 三维

中图分类号: TF777 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2001)02-0127-05

1 前言

为在冶金生产中实现高效、无缺陷连铸,在铝等有色金属电磁无模连铸技术的基础上, Vives等^[1, 2]提出了钢的电磁软接触结晶器连铸技术. 软接触结晶器具有复杂的三维分瓣结构. 结晶器内的磁场分布形式和特点对它的优化设计和合理操作参数的选择十分重要. 目前由于测量有钢液时结晶器内的电磁场十分困难,实验研究还仅限于以测量空载下的电磁场为主^[3, 4]. 而钢液感生电流会对电磁场产生很大影响,因此有必要对有、无钢液条件下软接触结晶器内的电磁特性进行模拟研究. 目前主要采用互感法或简化为二维模型来进行数值计算^[5],互感法主要适用于具有中心轴对称的二维电磁场问题. 二维模型只限于几何结构相对简单的结晶器. 本文应用 Garlink 有限元方法对有、无钢液条件下软接触结晶器内的三维电磁特性进行了分析.

2 电磁场基本方程

在正弦交变电流作用下,电磁软接触结晶器连铸系统中的电磁场满足似稳条件^[6],因此位移电流可以忽略不计^[7],该系统满足复数形式的麦克斯韦方程,符号“·”表示相应的复振幅:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad \nabla \times \vec{E} = -i\omega \vec{B}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0.$$

通常采用矢量磁位 \vec{A} 和标量电位 ϕ 对电磁场进行数值求解,其基本方程组为^[8]

$$\begin{cases} \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \vec{A} \right) + i\omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \phi = \vec{J}_s = 0 \\ \nabla \cdot \left(-i\omega \sigma \vec{A} - \sigma \nabla \phi \right) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2000-06-16, 修回日期: 2000-09-04

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(编号: 59734080); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1998061510)

作者简介: 邓安元(1971-), 男, 重庆合川人, 博士研究生.

电磁压力 p_m 可由下式求得^[9], “*”表示复共扼:

$$p_m = \frac{\vec{B} \vec{B}^*}{2\mu} \quad (2)$$

2 数值计算

以 100 mm×100 mm 方坯电磁软接触结晶器为研究对象, 结晶器切缝宽 3 mm, 切缝数为 16, 参见图 1. 线圈高 40 mm, 厚度为 5 mm, 线圈电流强度有效值为 750 A, 电源频率为 20 kHz. 由于磁场在离开激励源一定距离后迅速衰减, 在无穷远处达到零, 通常取达到相对激励源尺寸 3~4 倍远处为无穷远, 在此边界上满足自然边界条件, 自然边界条件在有限元方程中自动满足. 由于结晶器的对称性, 取 1/4 区域进行计算, 网格节点数为 8000, 计算网格为非均匀网格, 网格示意图见图 2. 采用六面体等参元有限元方法, 编制了对三维交变电磁场进行求解的 Fortran 程序, 该程序长 2635 行, 在 PII 350 计算机上进行计算, 运行 1 次用时 4~5 h. 用双精度进行计算, 当磁场迭代残差小于 10^{-9} 时, 即认为收敛.

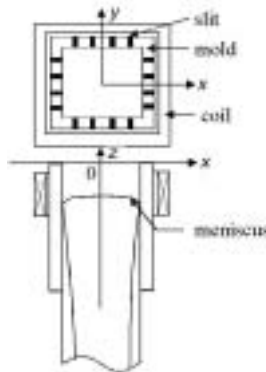


图 1 软接触电磁结晶器示意图
Fig.1 Sketch of soft-contact EMC mold

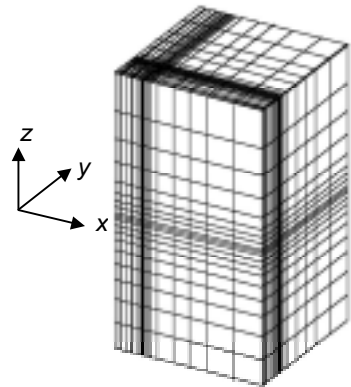


图 2 三维网格示意图
Fig.2 Three-dimensional grid system

3 结果与讨论

电磁软接触结晶器内的电磁特性受到线圈参数、钢液性质、结晶器结构等多方面因素的影响. 其中钢液的电导率为 7.14×10^5 S/m, 磁导率为 4×10^{-7} H/m.

3.1 模型验证

为验证计算方法的合理性, 用已开发出的有限元程序计算了无钢液、有导电介质存在时标准三维电磁场测试装置^[10]内的三维电磁场分布, 计算结果见图 3. 由图可见, 理论计算值与实验测试值吻合较好, 这说明所采用的计算方法和开发的有限元程序可以用来分析电磁软接触结晶器内的三维电磁特性.

3.2 软接触结晶器内的电磁特性

图 4 是有、无钢液时, 在结晶器中心截面上的电磁场分布. 由图可见, 钢液对电磁软接触结晶器内的电磁场分布有显著影响. 与无钢液时相比, 当结晶器内充满钢液时, 铸坯外表面上在弯月面位置 ($z = -0.045$ m) 附近处的磁感应强度明显增强, 而在液芯处的磁感应强度减弱, 甚至接近

于 0。这一方面是由于钢液对交变磁场的屏蔽作用，另一方面是感生磁场的影响。由于感生电流方向与激励源电流方向相反，二者在液芯一侧产生的磁场方向相反，因此激励磁场和感生磁场相互合成使液芯处的磁场减弱；反之，在铸坯表面一侧，二者产生的磁场方向相同，使铸坯表面附近的磁场增强。如图所示，对于连铸坯，电磁场主要集中在铸坯表面，而在无钢液时，结晶器内的电磁场分布比较均匀。钢液对软接触结晶器内电磁场的这种影响效果有利于增加弯月面处的电磁压力，因此也有利于交变磁场对弯月面的约束成形。

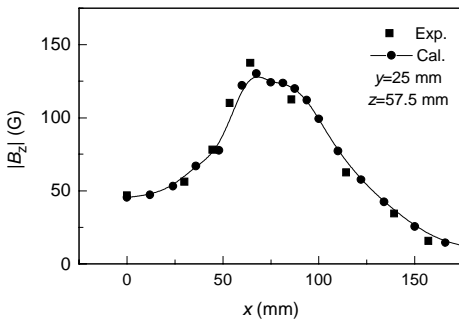


图 3 无钢液时 $|B_z|$ 理论计算值与实验值的比较
Fig.3 Comparison of calculated and experimental magnetic flux density along x axis

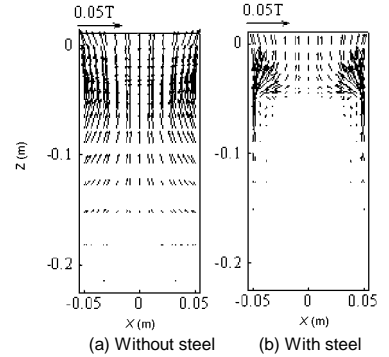


图 4 结晶器内中心截面上的磁场分布计算结果
Fig.4 Magnetic field in center section of EMC mold

图 5 是结晶器内沿中心轴线上磁感应强度 $|B_z|$ 的变化规律。由图 5(a)可见，在无钢液时，磁感应强度 $|B_z|$ 在线圈中心位置附近会出现最大值，该最大值随着线圈在高度方向上的位置下移而逐渐减小，这与 Nakata 等^[3]的实验结果一致。当结晶器内有钢液存在时[图 5(b)]，中心轴线上磁感应强度 $|B_z|$ 小于空载时相应位置处的磁感应强度，且在液面以下，中心轴线上磁感应强度几乎趋近于 0；磁感应强度 $|B_z|$ 在靠近结晶器顶部出现最大值点，虽然该最大值随线圈下移逐渐减小，但最大值点不随线圈位置移动而改变。如图 6 可见，电磁软接触结晶器内钢液面的波动对结晶器内的磁感应强度分布影响很大，中心轴线上磁感应强度最大值点的位置随钢液面降低而下移，同时最大值增大。可见，电磁软接触结晶器内的电磁特性对钢液面的波动比较敏感，通常，感应线圈位置在实际电磁连铸生产中已按设计要求固定下来，而在生产过程中存在液面波动，因此应采取合理的措施尽量减小钢液面的波动，以实现稳定生产。

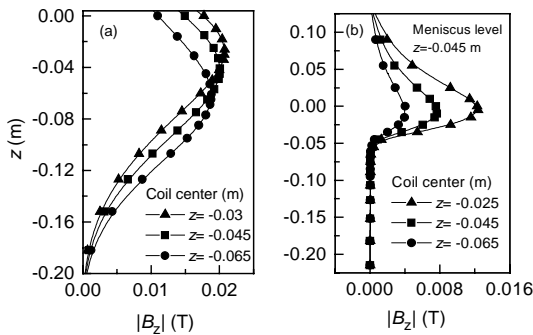


图 5 中心轴线上磁感应强度计算结果
Fig.5 Magnetic flux density along the central axis
[(a) Without steel (b) With steel]

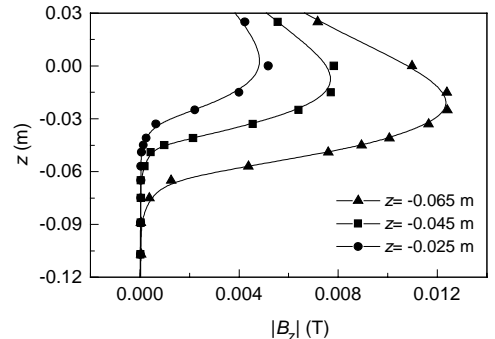


图 6 液面位置对中心轴线上磁感应强度的影响计算结果
Fig.6 Effect of meniscus level on magnetic flux density along central axis

在无钢液条件下,如图 7 可见,从液芯到铸坯表面磁感应强度 $|B_z|$ 逐渐增加,在液芯和铸坯表面处的 $|B_z|$ 相差幅度不大. 但有钢液存在时,由于钢液对磁场屏蔽作用,从铸坯表面到液芯, $|B_z|$ 迅速衰减,磁场主要集中在铸坯外表面以下厚度约为 10 mm 的范围内. 铸坯外表面处的磁感应强度比无钢液时对应点处的值大,而在液芯处的磁感应强度 $|B_z|$ 明显小于空载时该点处的值. 钢液的屏蔽作用减小了铸坯内部的磁感应强度,因此可以减弱电磁力对内部钢液的搅拌作用,有利于保持弯月面的稳定,而铸坯表面磁感应强度增强又有利于改善电磁压力对弯月面的约束成形效果.

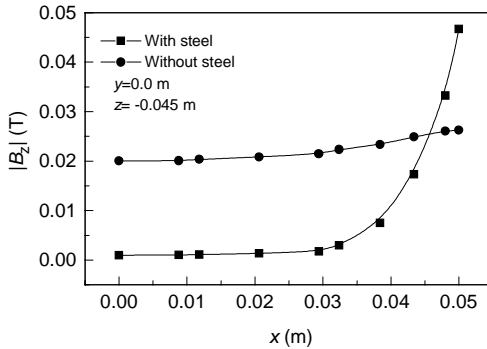


图 7 x 轴线上的磁感应强度计算结果
Fig.7 Magnetic flux density along x axis

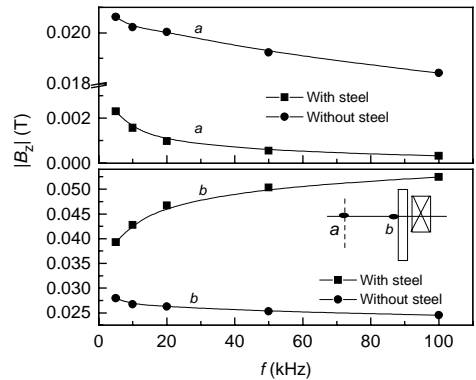


图 8 频率对磁感应强度的影响计算结果
Fig.8 Effect of frequency on magnetic flux density

对于无钢液时的结晶器,如图 8 所示,随着电源频率增加,结晶器内的磁感应强度 $|B_z|$ 逐渐减小;反之,当结晶器内充满钢液时,随着电源频率增加,铸坯表面处的 $|B_z|$ 相应增大,而液芯处的 $|B_z|$ 逐渐减小. 当频率从 5 kHz 增加到 20 kHz 时,铸坯表面处的磁感应强度 $|B_z|$ 增加较快,随后 $|B_z|$ 的变化幅度减弱. 因此在实际应用中,应采用 20 kHz 或以上的频率,以得到合理的弯月面形状. 这也说明增加频率,不但有利于增大铸坯表面电磁压力,还有利于减弱内部钢液的搅拌作用.

4 结 论

在电磁软接触结晶器的前提下,三维模拟结果显示:

(1) 无钢液时结晶器内的磁场分布较均匀,有钢液时结晶器内的磁场主要集中在铸坯表面以下约 10 mm 的范围内;钢液存在能增大铸坯外表面处的磁感应强度.

(2) 增加频率,无钢液时结晶器内的磁感应强度减弱;有钢液时液芯处的磁感应强度减弱,铸坯外表面处的磁感应强度明显增强,高频磁场有利于弯月面的约束成形和减少对内部钢液的电磁搅拌,建议实际应用中采用 20 kHz 或以上的频率.

(3) 无钢液时,中心轴线上的磁感应强度在线圈中心位置处有最大值,该最大值随线圈下移而减小;有钢液时,该最大值点出现在结晶器顶端出口处,且在一定范围内,最大值点的位置不随线圈位置变化而变化,而是随着液面的波动位置而变化.

参考文献:

- [1] Vives C. Electromagnetic Refining of Aluminum Alloys by the CREM Process: Part 1. Working Principle and Metallurgical Results[J]. Metall. Trans., 1989, 20B: 623-629.
- [2] 李廷举. 间断高频磁场作用下连铸铸型内金属液的运动和铸坯的表面质量: I. 液体金属弯月面运动对铸坯表面质量的影响[J]. 金属学报, 1997, 33(5): 524-528.

- [3] Nakata H, Kokita M, Morisita M, et al. Improvement of Surface Quality of Steel by Electromagnetic Mold [A]. International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials[C]. Nagoya: ISIJ, 1994. 166–171.
- [4] Park J, Sim D, Jeong H, et al. Effect of High Frequency Electromagnetic Field on Continuously Cast Billet [J]. CAMP-ISIJ, 1999, 12: 57–60.
- [5] Kuwabara M, Nakata H, Sassa H, et al. Theoretical Analysis of Electromagnetic Field of Induction Cold Crucible Taking Account of Azimuthal Distribution [A]. Proceeding of the Sixth International Iron and Steel Congress[C]. Nagoya: ISIJ, 1990. 246–253.
- [6] 冯慈章. 电磁场 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1986. 302.
- [7] 胡之光. 电机电磁场的分析与计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 8–20.
- [8] Brio O, Preis K. On the Use of the Magnetic Vector Potential in the Finite Element Analysis of Three Dimensional Eddy Currents [J]. IEEE Trans. Magn., 1989, 25(4): 4145–4158.
- [9] Sakane J, Li B Q, Evans J W. Mathematical Modeling of Meniscus Profile and Melt Flow in Electromagnetic Casters [J]. Metall. Trans., 1988, 19B: 397–408.
- [10] Nakata T, Fujiwara K. Present Status of 3-D Numerical Analysis of Magnetic Fields[A]. Tani J, Takagi I. Electromagnetic and Application [C]. Elsevier Science Publishers, 1992. 227–230.

Numerical Simulation of Effect of Steel on Electromagnetic Characteristics of Soft-contact Mold

DENG An-yuan, JIA Guang-lin, HE Ji-cheng

*(Baoshan Steel Corp—NEU Cooperative Research Center for EPM, Northeastern University,
Shenyang, Liaoning 110006, China)*

Abstract: A three-dimensional mathematic mold for electromagnetic field of soft-contact mold and the related finite element program verified by experimental data have been developed to study the relationship between three-dimensional electromagnetic characteristics and the steel in soft-contact mold. The results from numerical simulation show that the electromagnetic characteristics of soft-contact mold has close correlativity with the existence of charge and is sensitive with the fluctuation of meniscus level, the effect of coil position on electromagnetic characteristics lies on the existence of steel, high frequency electromagnetic field is propitious to the confinement of meniscus and weakens the stirring intensity of interior steel, the optimal frequency is 20 kHz or higher, the magnetic field mainly concentrates in the range of 10 mm thickness from outer surface of billet.

Key words: soft-contact mold; molten steel; meniscus; numerical simulation; three-dimension