

软接触电磁连铸高频磁场的瞬态分析

王宏明^{1,2}, 任忠鸣¹, 李桂荣²

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072;

2. 江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 建立软接触电磁连铸过程电磁场计算模型, 通过分别采用瞬态分析和谐波分析对高频正弦磁场计算结果的比较, 验证高频磁场瞬态分析的准确性。利用瞬态分析方法, 研究高频正弦激励电流密度在结晶器内钢液中产生的磁感应强度、感应电流及电磁力的变化规律。结果表明: 钢液中磁感应强度和感应电流随激励电流密度的变化, 其变化频率与激励电流密度的变化频率相同, 但由于结晶器壁有较强感应电流, 钢液中磁感应强度和感应电流与激励电流密度的变化并非同步, 说明电磁连铸结晶器内的高频磁场并非简谐波磁场; 电磁力的变化频率是激励电流密度变化频率的两倍, 激励电流密度达到正负幅值时, 电磁力达到最大值, 但当激励电流密度为零时, 电磁力不为零, 且部分电磁力会反向, 严重时会导致液面波动, 应加以控制。

关键词: 电磁连铸; 高频磁场; 瞬态分析; 非简谐波磁场

中图分类号: TG 249.7; TG 111.4

文献标识码: A

Transient analysis of high frequency electromagnetic field during electromagnetic soft contact continuous casting

WANG Hong-ming^{1,2}, REN Zhong-ming¹, LI Gui-rong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A computation model of magnetic field in electromagnetic soft contact continuous casting process was developed. The credibility of transient analysis result of high frequency electromagnetic field via model was verified by comparing transient analysis result with harmonic analysis result. The rule of magnetic induction density, induced eddy current and electromagnetic force varied with high frequency sine exciting current was investigated. The results reveal that the magnetic induction density and induced eddy current vary at the same frequency as exciting current. The electromagnetic force varies at double frequency of exciting current. When the exciting current reaches the amplitude value, the electromagnetic force is close to the maximal value, whereas when the exciting current is zero, the electromagnetic force is not zero. At the same time, only partial electromagnetic force reverses its direction. If the reversed electromagnetic force is expanded seriously, the fluctuation of liquid level is induced, which must be controlled.

Key words: electromagnetic continuous casting; high frequency electromagnetic field; transient analysis; nonharmonic magnetic field

电磁软接触连铸技术^[1-2]是在结晶器内金属的初始凝固区域施加高频交变磁场, 利用高频磁场与金属熔体中的感生电流发生交互作用, 产生指向熔体内部

的电磁压力来减少液体金属与结晶器壁间的接触压力, 实现“软接触”状态, 从而减小因结晶器振动对铸坯表面质量的不利影响, 使得铸坯的表面质量得到

基金项目: 江苏省教育厅资助项目(05KJD450043); 江苏省高技术研究计划资助项目(BG2005026); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2006078)

收稿日期: 2008-07-24; 修订日期: 2008-12-10

通讯作者: 王宏明, 副教授, 博士研究生; 电话: 0511-88780191; E-mail: whmlgr@ujs.edu.cn

大幅度改善。因此，该技术近年来备受冶金领域研究者的关注^[3-4]。前期的研究者对施加连续恒幅磁场时结晶器内金属中的磁场、电磁力分布和弯月面行为进行了实验和模拟研究^[5-6]，这些研究都是假设结晶器内磁场为高频简谐波磁场，认为磁场与激励电流密度之间为谐变关系。在施加连续恒幅磁场的基础上，根据保护渣道压力变化和结晶器内液面波动，研究者们相继提出了间嵌磁场^[7]、复合磁场^[8]和调幅磁场^[9]。LI 等^[10]和ZHOU等^[11]对间嵌磁场和复合磁场下弯月面行为及铸坯表面效果进行了研究，LEI等^[12]研究了调幅磁场调制波类型和参数对软接触连铸效果的影响。但要实现通过磁场准确控制结晶器内金属的凝固过程，不仅需要弄清结晶器振动过程中保护渣道动压力的变化规律，更需要弄清激励电流密度与结晶器内金属中的磁场、感应涡流之间的响应关系，进而确定激励电流密度与电磁力之间的关系，因此，要对结晶器内的高频磁场对激励电流密度的响应进行瞬态分析，这在过去的研究中还未见报道。

软接触电磁连铸所用的磁场都是以正弦高频磁场为基础的，因此，本文作者对正弦高频磁场采用瞬态分析，研究结晶器内金属液的中磁场、感应涡电流及电磁力与激励电流密度之间的响应关系，为特殊磁场例如调幅磁场的研究打下基础。由于目前对金属液内磁感应强度的实时测量存在困难，特别是对高频磁场，通过实验无法测定结晶器内有金属液时的磁场瞬时变化规律。因此，本文作者利用ANSYS有限元软件建立电磁连铸系统模型来进行瞬态分析，研究高频磁场的作用规律，为优化实施软接触电磁连铸技术提供参考。

1 电磁场计算数学模型

根据 Maxwell 方程组，电磁场分布满足下列方程^[3]：

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}_s + \boldsymbol{J}_e$$

(1)

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

(2)

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$

(3)

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H}$$

(4)

式中 $\boldsymbol{J}_s$ 为源电流密度， $\boldsymbol{J}_e$ 为感生电流密度， $\boldsymbol{E}$ 为电场电势； $\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度， $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度。

2 物理模型与定解条件

物理模型的结构参数如图 1 所示。圆坯结晶器壁

上的切缝数为 6，且均匀分布，根据计算区域的对称性，取整体区域的六分之一作为实际计算区域。区域内介质的电磁参数如表 1 所列^[14]。

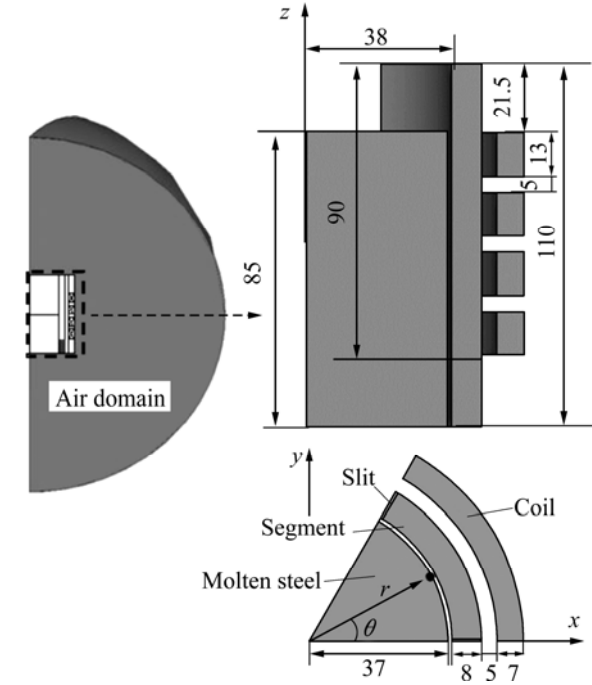


图 1 模型结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of model structure (Unit: mm)

表 1 模型介质的电磁参数
Table 1 Electromagnetic parameters of different media in model

Medium	Relative permeability, μ_R	Electric resistivity, $\rho/(\Omega \cdot m)$
Molten steel (1 520 °C)	1	8.5×10^{-7}
Copper mold (220 °C)	1	2.4×10^{-8}
Coil	1	3.0×10^{-8}
Air	1	1.0×10^{20}
Slag film	1	1.0×10^{15}

利用 ANSYS 的 ADPL 语言编制二次开发程序对结晶器内三维磁场进行计算。电磁场计算模型的定解条件和网格划分详见文献[13-14]。

3 高频磁场瞬态分析方法

高频磁场瞬态分析需要对加载的时变电流按时间离散化，这与谐波分析不同。假定线圈中激励电流密

度为

$$J = J_m \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

式中 J_m 和 f 分别为高频正弦电流密度的幅值和频率, J_m 不随时间变化, 在感应线圈中激励产生频率为 f 的近似谐波磁场, 利用 ANSYS 谐波分析时只需加载 I_m 、 f 两个固定参数, 可计算出磁场特征量的幅值, 其随时间的变化关系假定为谐波即正弦或余弦变化规律。但要弄清磁场特征量随时间的真实变化规律, 需对式(5)的高频正弦电流产生的磁场进行瞬态分析, 即将电流按时间离散化, 按时间步长加载对应的电流载荷, 计算线圈内的瞬态磁场。瞬态分析计算的精度决定于时间步长, 时间步长越短, 计算精确度越高, 但同时计算工作量越大。

4 高频磁场瞬态分析结果

为验证高频磁场瞬态分析计算结果的准确性, 对同一高频正弦电流激发的恒幅磁场分别按瞬态分析和谐波分析计算, 由于恒幅高频磁场的谐波分析是文献[13-14]中验证过的计算方法, 其他研究者^[3, 7-8]也曾多次采用该方法, 因此, 通过比较两种计算结果的一致性, 可以验证磁场瞬态分析结果的可靠性。

对于线圈中输入的高频正弦电流密度:

$$J = 3.3 \sin(4 \times 10^4 \pi t) \quad (10^6 \text{ A/m}^2) \quad (6)$$

分别按瞬态分析和谐波分析计算磁感应强度和电磁力的变化规律。

图2所示为瞬态分析计算得到的结晶器内钢液面下方5 mm处, 钢液柱侧表面上分瓣体中心对应处的

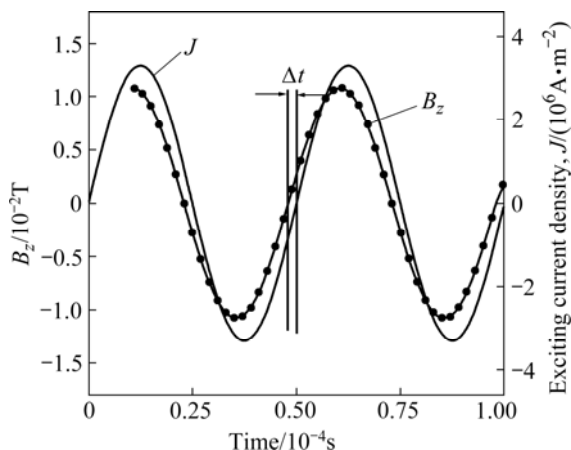


图2 瞬态分析磁感应强度随激励电流密度的变化

Fig.2 Magnetic flux density of transient analysis varying with exciting current density

磁感应强度(B_z)随激励电流密度的变化关系。结果表明, 感应线圈内输入高频正弦电流时, 在结晶器内钢液中产生同频率的近似正弦变化的磁场, 但需要进一步验证磁感应强度幅值的大小。另外, 磁感应强度与激励电流密度随时间的变化并非同步, 磁感应强度曲线滞后激励电流密度曲线的时间为 Δt (本研究中 $\Delta t=2 \times 10^{-6}$ s), 在理想情况下, $\Delta t=0$, 结晶器内的磁场为高频简谐波磁场^[15], 但实际情况下, $\Delta t \neq 0$, 这是结晶器内磁场并非高频简谐波磁场的关键特征。 Δt 的大小与结晶器的材质、结构和磁场的频率有关, 结晶器导电性越好, 涡流损耗越小, 磁场频率越高, Δt 就越小, 这也是电磁软接触连铸倾向于采用切缝式铜结晶器并使用高频磁场的原因之一。

图3所示为谐波分析得到的钢液侧表面上分瓣体中心线对应点处的磁感应强度幅值沿高度方向的分布情况。液面下方5 mm处的磁感应强度为0.011 T, 与瞬态分析结果相同, 证明瞬态分析磁感应强度随电流变化的结果准确。

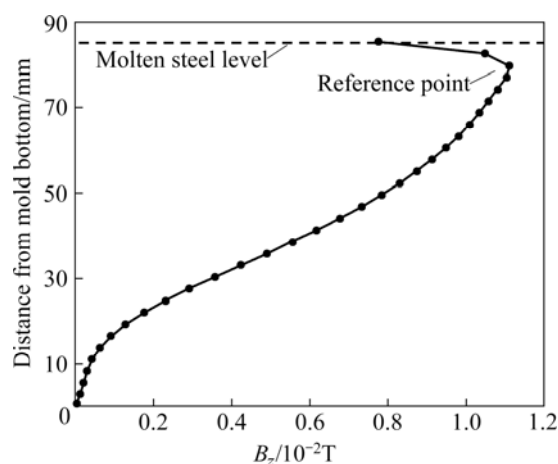


图3 谐波分析磁感应强度幅值沿高度方向的分布

Fig.3 Magnetic flux density distribution of harmonic analysis along height direction

为进一步验证瞬态分析计算高频磁场作用在钢液侧表面的磁感应强度和电磁力结果的准确性, 比较两种计算方法得到的高频磁场作用在钢液柱侧表面上两条特征线, 即分瓣体中心线和切缝中心线上的磁感应强度幅值沿高度方向的分布, 如图4(a)所示。研究表明, 两种分析方法得到的磁感应强度结果基本吻合。图4(b)所示为两种分析方法计算得到的钢液柱侧表面上电磁力平均值沿结晶器高度方向分布的比较结果, 可以看出, 两种分析方法得到的电磁力的分布规律完全一致, 瞬态分析的结果稍高于谐波分析, 这是因为瞬态分析考虑了结晶器壁感应涡流的积累效应, 两种

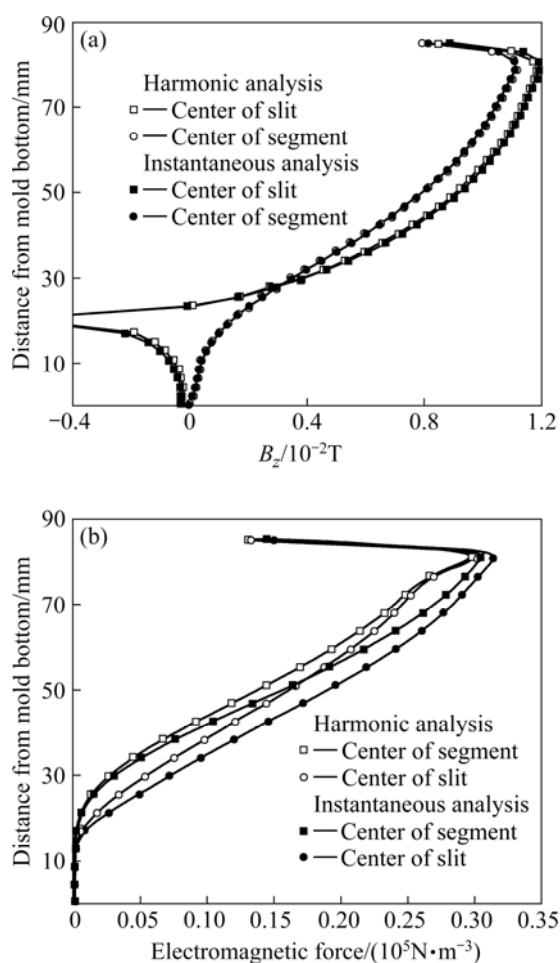


图4 瞬态分析与谐波分析磁感应强度和电磁力结果的比较

Fig.4 Comparison between transient analysis and harmonic analysis of magnetic flux density (a) and electromagnetic force distribution (b)

分析结果的最大偏差小于 8%，证明了瞬态分析结果的正确性。

5 高频正弦波磁场变化规律的瞬态分析

利用开发的高频磁场瞬态分析程序计算了频率 20 kHz、电流密度幅值为 $6.6 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 的正弦激励电流密度在结晶器内钢液中的磁感应强度、感生电流及电磁力随时间的变化情况。

图 5 所示为正弦激励电流密度变化一个周期的曲线,根据正弦函数变化特征,一个周期分成四步段(1~4 Step),每个步段分成 5 个子步段(Sub),分别给出了 4 个步段特征点时刻(最后时刻, Sub=5)的计算结果。

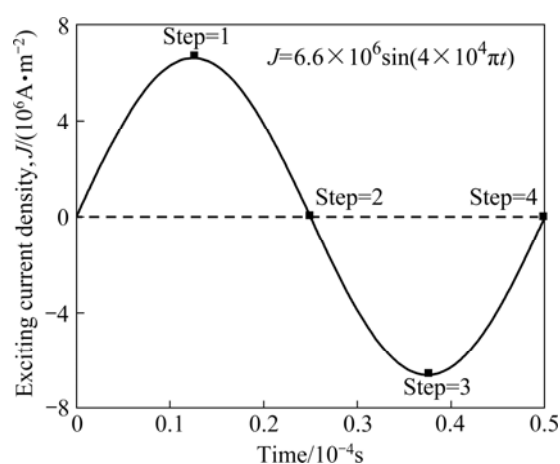


图5 正弦激励电流密度曲线

Fig.5 Curve of sine exciting current

图 6 所示为钢液中磁感应强度计算结果的矢量图。研究表明,钢液中的磁感应强度随激励电流密度周期性地变化,当激励电流密度达到峰值(Step=1)和谷值(Step=3)时,磁感应强度也具有较高值(非最大值),且方向相反;当激励电流密度为零时(Step=2 和 Step=4),钢液中的磁感应强度不为零,此时磁感应强度与前一时间步相比,方向相反,可以判定是结晶器壁感应涡流感生的磁场,但其绝对值较小。

图 7 所示为钢液内感应涡流矢量的计算结果。研究表明,钢液内的感应涡流也随激励电流密度周期性地变化,当激励电流密度达到幅值时,感应涡流也达到最高值,同样,当激励电流密度为零时,钢液内的感应涡流不为零。

图 8 所示为钢液内电磁力矢量的计算结果。研究表明,钢液内的电磁力也随激励电流密度周期性地变化,当激励电流密度达到正负幅值时,电磁力都达到较大值,此时,电磁力的方向都沿径向指向钢液柱中心,所以电磁力的变化周期是激励电流密度变化周期的二分之一。另外,当激励电流密度为零时,钢液内的磁感应强度和感应涡流都不为零,因此,电磁力并不为零,但此时电磁力很小。另外,激励电流密度在零值附近时,磁感应强度和感应涡流的方向发生变化,而且不同部位的变化时间稍有差别,且磁感应强度和感应涡流归零换向时刻并不同步。因此,电流为零时,钢液内部分电磁力的方向是沿钢液侧表面法向方向指向外侧,表现为电磁拉力,但该力很小(反向电磁力最大值不超过正向电磁力幅值的 10%),作用时间很短($\approx \Delta t$),对软接触影响不大。但如果高频磁场的功率大,反向电磁力的绝对值也较大;或者磁场频率较低, Δt 值大,电磁力方向变化的时间较长,都会引起较

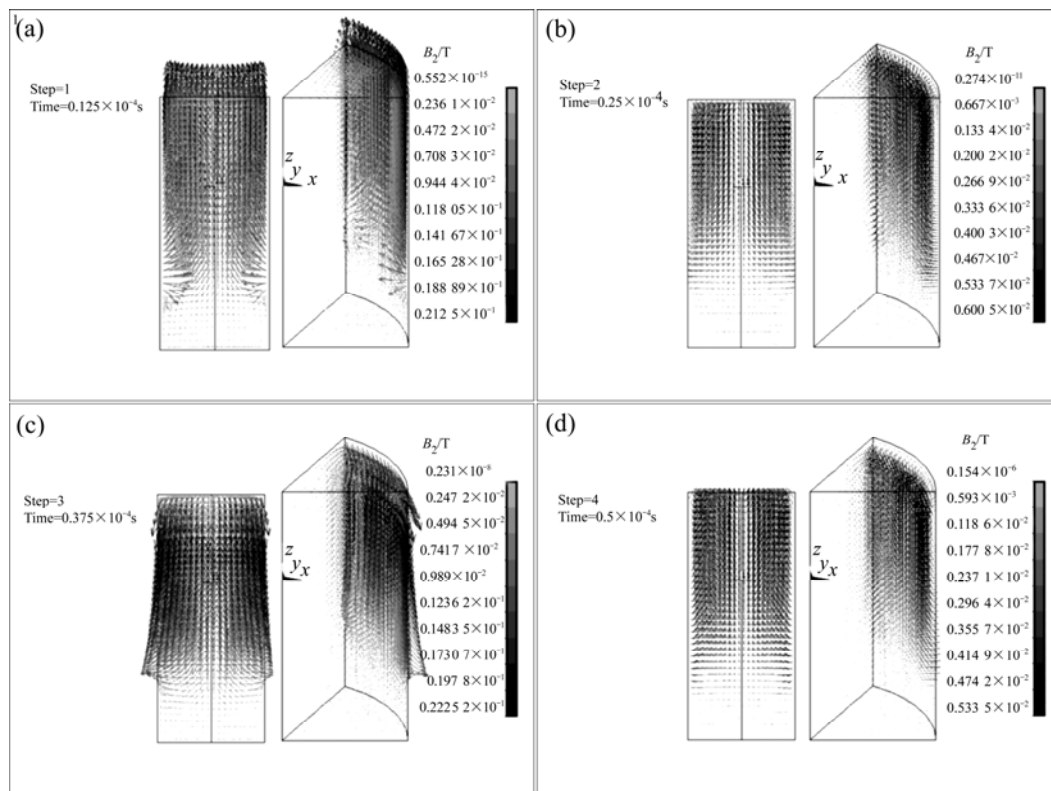


图 6 磁感应强度计算结果的矢量图

Fig.6 Vector graphs of magnetic induction density by computation

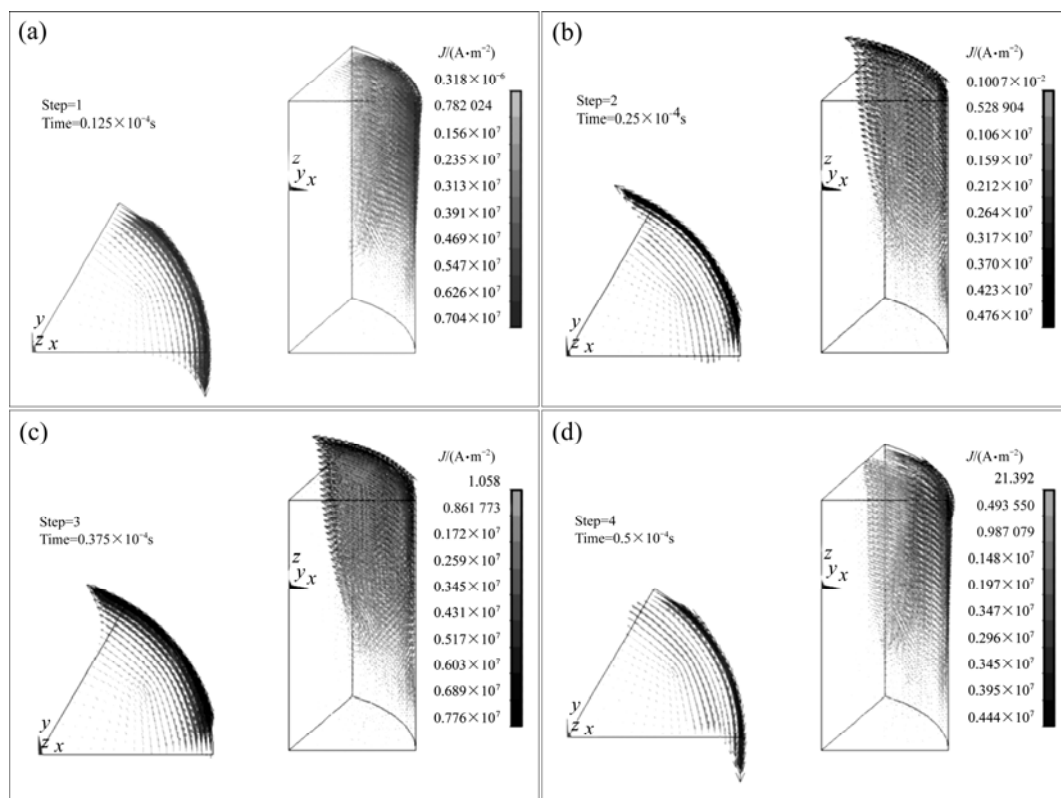


图 7 感应涡流计算结果的矢量图

Fig.7 Vector graphs of induced eddy current by computation

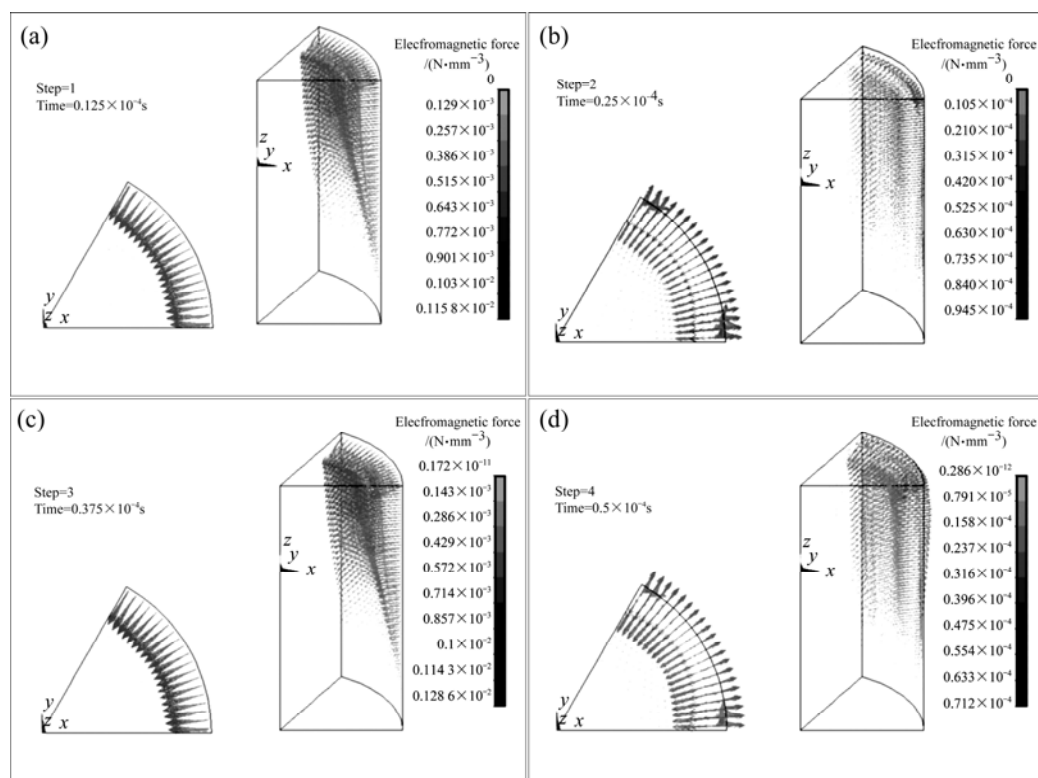


图8 电磁力计算结果的矢量图

Fig.8 Vector graphs of electromagnetic force by computation

明显的液面波动，这解释了高频磁场功率过高会导致液面波动且铸坯表面质量下降的现象，也合理解释了NAKATA等^[2]采用超高频磁场($>100\text{ kHz}$)可以抑制液面波动的原因。在结晶器结构材质设计、磁场频率和功率的选择时，应通过优化参数减小 Δt 值并适当控制磁场频率和功率来减小反向电磁力值，以避免造成液面波动，给软接触连铸带来不利影响。

6 结论

1) 钢液中磁感应强度矢量和感应电流矢量随激励电流密度变化，且变化频率与激励电流密度的变化频率相同，但由于结晶器壁有较强感应涡流，磁感应强度与激励电流密度随时间的变化并非同步，当激励电流密度归零时，钢液中磁感应强度矢量和感应电流矢量并不为零，说明电磁连铸系统结晶器内的高频磁场并非真正的简谐波磁场。

2) 电磁力矢量随激励电流密度变化的频率是激励电流密度变化频率的两倍，当激励电流密度达到正负幅值时，电磁力都达到最大值；但当激励电流密度为零时，电磁力不为零，而且部分电磁力会反向，由

于该力很小且作用时间很短，对软接触影响不大，但严重时会导致液面波动，应加以控制。

REFERENCES

- [1] VIVES C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part I. Working principle and metallurgical results[J]. Metal Trans B, 1989, 20(10): 623–629.
- [2] NAKATA H, INOUE T, MORI H, AYATA K, MURAKAMI T, KOMINAMI T. Improvement of billet surface quality by ultra-high-frequency electromagnetic casting[J]. ISIJ Int, 2002, 42 (3): 264–272.
- [3] 金百刚, 王 强, 刘 燕, 崔大伟, 吴成涛, 王恩刚, 赫冀成. 软接触电磁连铸结晶器内磁场分布与弯月面行为[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(11): 1931–1938.
JIN Bai-gang, WANG Qiang, LIU Yan, CUI Da-wei, WU Cheng-tao, WANG En-gang, HE Ji-cheng. Magnetic field distribution and molten metal meniscus behavior in soft contact electromagnetic continuous casting mold[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(11): 1931–1937.
- [4] PARK P, JEONG H, KIM H, KIM J. Laboratory scale continuous casting of steel billet with high frequency magnetic field[J]. ISIJ Int, 2002, 42(4): 385–391.

- [5] 张林涛, 邓安元, 张兴武, 王恩刚, 赫冀成. 矩形电磁软接触连铸结晶器内弯月面行为[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(8): 1405–1410.
- ZHANG Lin-tao, DENG An-yuan, ZHANG Xing-wu, WANG En-gang, HE Ji-cheng. Behavior of meniscus in soft-contact electromagnetic continuous casting (EMCC) rectangular mold[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(8): 1405–1410.
- [6] NA X Z, XUE M, ZHANG X Z, GAN Y. Numerical simulation of heat transfer and deformation of initial shell in soft contact continuous casting mold under high frequency electromagnetic field[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2007, 14(6): 14–21.
- [7] TANI M, SHIO K, WAJIMA K. The control of initial solidification by the imposition of pulsative AC electromagnetic field[C]// Proceeding of the 3rd International Symposium on EPM, Nagoya: ISIJ, 2000: 381–384.
- [8] LI T J, LI X T, ZHANG Z F, JIN J Z. Effect of multi-electromagnetic field on meniscus shape and quality of continuously cast metals [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2006, 33(1): 57–60.
- [9] LEI Z S, REN Z M, DENG K, LI W X, ZHONG Y B. Amplitude-modulated magnetic field coupled with mold oscillation in electromagnetic continuous casting[J]. ISIJ Int, 2006, 46(5): 680–686.
- [10] LI T J, SASSA K, ASAI S. Surface quality improvement of continuous cast metals imposing intermittent high frequency magnetic field and synchronizing the field with mold oscillation[J]. ISIJ Int, 1996, 36(4): 410–416.
- [11] ZHOU Y, SASSA K, ASAI S. Experimental study of feasibility on mold oscillation substituted by the imposition of an intermittent alternating magnetic field in continuous casting[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2001, 37(7): 777–780.
- [12] LEI Z S, REN Z M, DENG K, LI W X, WANG H M. Experimental study on mould oscillation-less continuous casting process under high frequency amplitude-modulated magnetic field[J]. ISIJ Int, 2004, 44(11): 1842–1846.
- [13] 夏小江, 王宏明, 戴起勋, 李桂荣, 赵玉涛. 电磁软接触连铸高频磁场的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(3): 529–534.
- XIA Xiao-jiang, WANG Hong-ming, DAI Qi-xun, LI Gui-rong, ZHAO Yu-tao. Numerical simulation of high frequency magnetic field for electromagnetic soft-contact continuous casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(3): 529–534.
- [14] 王宏明, 任忠鸣, 夏小江, 戴起勋, 李桂荣. 电磁软接触结晶器内钢液面高度对磁场分布的影响[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(7): 797–801.
- WANG Hong-ming, REN Zhong-ming, XIA Xiao-jiang, DAI Qi-xun, LI Gui-rong. Effect of molten steel level on magnetic field distribution in electromagnetic soft-contact continuous casting mold[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(7): 797–801.
- [15] SAEED M. Finite element analysis theory and application with ANSYS[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- (编辑 李向群)