● 实用成型技术 Practical Shaping Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.03.010

连铸结晶器方波电流电磁搅拌电磁场-流场数值模拟

李桂东,麻永林,邢淑清,鲍鑫宇,白庆伟

(内蒙古科技大学 材料与冶金学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要:采用 ANSYS 三维有限元数值模拟技术,在 320 mm×320 mm 方坯连铸结晶器电磁搅拌过程中,对比研究了搅拌器加载方波电流和正弦波电流对铸坯内部电磁场、电磁力及流场的影响。结果表明,在其他参数相同条件下,搅拌器加载方波电流时,铸坯内部也可以产生旋转磁场,且磁场分布较加载正弦波电流更大;同时,产生促使钢液旋转的电磁力,且电磁力峰值较大,表现为一种震荡力效果,而加载正弦波电流产生电磁力相对平稳。加载方波电流对铸坯内部将产生逆时针旋转流场,且有震荡效果,更有助于提高搅拌效率。

关键词:方波电流;有限元数值模拟;电磁搅拌

中图分类号:TM924.12 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)03-0276-07

Numerical Simulation of Electromagnetic Field and Flow Field in Square Wave Electromagnetic Stirring of Continuous Casting Mould

LI Guidong, MA Yonglin, XING Shuqing, BAO Xinyu, BAI Qingwei

(School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The influence of square wave current and sinusoidal wave current loaded by the agitator on the electromagnetic field, electromagnetic force and flow field in the continuous casting mould of 320 mm×320 mm billet was studied by ANSYS three-dimensional finite element numerical simulation. The results show that under the same condition of other parameters, when the stirrer loads the square wave current, the rotating magnetic field can also be generated inside the billet, and the magnetic field distribution is larger than that of the sine wave current. At the same time, the electromagnetic force that causes the liquid steel to rotate is generated, and the peak value of the electromagnetic force is large, showing a kind of shock force effect, while the electromagnetic force generated by loading the sine wave current is relatively stable. The loading of square wave current will produce counterclockwise rotating flow field inside the billet, and the effect of vibration is more conducive to improving the stirring efficiency.

Key words: square wave current; finite element numerical simulation; electromagnetic stirring

电磁搅拌(Electromagnetic Stirring,简称 EMS)是目前先进电磁连铸技术的一种,具有高能量密度、非接触性和易于自动控制等优点,在连铸生产中得到了广泛的应用[1],且是电磁冶金领域广泛应用的重要技术之一。该技术可以有效改善铸坯的表面质量和皮下质量,改善铸坯内部的组织结构,扩大等轴晶区域,减轻或消除中心偏析、中心缩孔等内部缺陷[2]。

电磁搅拌器是电磁搅拌技术的核心。由于三相正弦式电源的普遍广泛,使用正弦电源的电磁搅拌器对金属凝固结晶的作用被大量学者广泛研究,而使用其他形式电源电磁搅拌器的研究相对较少。脉冲电源技术是脉冲电磁形成工业技术的基础,在近年来得到不断发展。目前,电压十千伏以上、电流数十千安以上、电流上升时间数十纳秒以下的超大功率、超高速脉冲开关装置已基本成熟。脉冲电源技术的突破与成熟,使得脉冲电流产生的脉冲磁场不断被证实对金属凝固结晶细化晶粒有较好的效果[3],为脉冲电磁技术在冶金应用奠定了基础。由于电磁搅拌作用机理和凝固过程非常复杂,以及现场情况的特殊性[4],国内外学者多采用数值模拟手段来研究电磁搅拌条件下铸坯内的磁场、力场及流场的分布,以分析产生的铸坯特性[5]。为研究其他电流性质的外控电源加载到电磁搅拌器上,使得在搅拌过程中铸坯内部出现新的搅拌特性,从而进一步提高搅拌效率。

收稿日期:2018-08-31

基金项目:内蒙古科技大学电磁冶金与材料新技术创新团队资助项目(52303001)

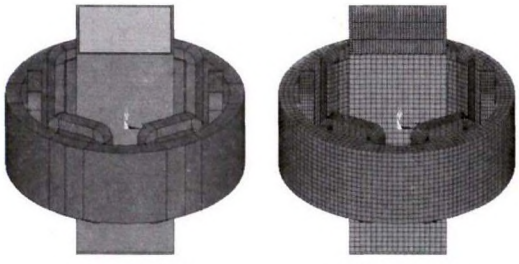
作者简介:李桂东(1993-),山西大同人,硕士生.研究方向:电磁搅拌器数值模拟.电话:15540250256,
E-mail:1020388804@qq.com

本文通过 ANSYS 有限元数值模拟，构建六磁极电磁搅拌器模型，在电磁搅拌器上分别加载三相正弦波电流和三相方波电流，分析对比搅拌器对铸坯作用过程中铸坯内部磁场，电磁力及流场分布，以期为实际应用得到更好质量铸坯提供理论依据。

1　模型建立及参数设置

1.1　模型建立

选用三相六磁极电磁搅拌器，使用三维实体单元建立电磁搅拌器、方坯有限元分析几何模型，如图 1 所示。



(a)计算模型　　(b)模型离散化

图 1 电磁搅拌器计算模型

Fig.1 Calculation model of electromagnetic stirrer

电磁搅拌器外径 600 mm，铸坯断面尺寸 320 mm×320 mm，搅拌器长度 400 mm，6 个线圈三对磁极，线圈匝数 85，电流强度 500 A，频率 5 Hz，结晶器厚度 20 mm，铸坯钢液密度 7 400 kg·m^{-3}，钢液粘度 0.006 kg·m^{-1}·s^{-1}。其他材料物性参数如表 1。

表1 材料物性参数

Tab.1 Other physical parameters

材料	相对磁导率	相对电阻率 /(S·m^{-1})
钢液	1	1.3×10^{-6}
线圈	1	1.75×10^{-8}
结晶器	1	1.65×10^{-8}
空气	1	0
线圈铁芯	图 2 B-H 曲线	0

1.2　模型假设条件

假设：

(1)钢液为不可压缩的导电流体。

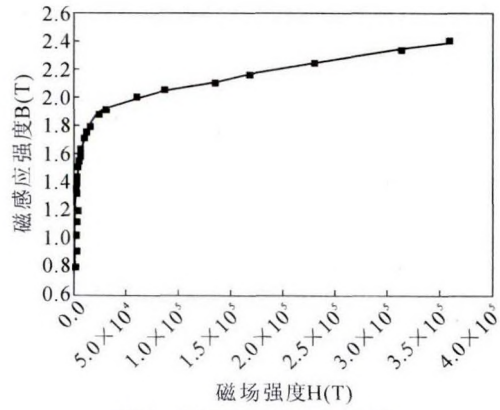


图 2 线圈磁轭的 B-H 曲线

Fig.2 The B-H curve of the coil yoke

(2)钢液的物性参数为常量，不随时间变化。

(3)钢液流动过程中雷诺数很小，可以忽略对磁场的影响。

(4)电磁搅拌器工作电流频率在低频段，可以忽略位移电流。

(5)壁面设定为无滑移壁面，且忽略凝固坯壳对流场的影响。

1.3　加载电流性质

由于搅拌器计算模型为三相六磁极电磁搅拌器，对三对磁极分别加载相位差为 2/3π 的三相正弦波电流和相位差为 2/3π 的三相方波电流，如图 3 所示。

2　控制方程

2.1　磁场控制方程

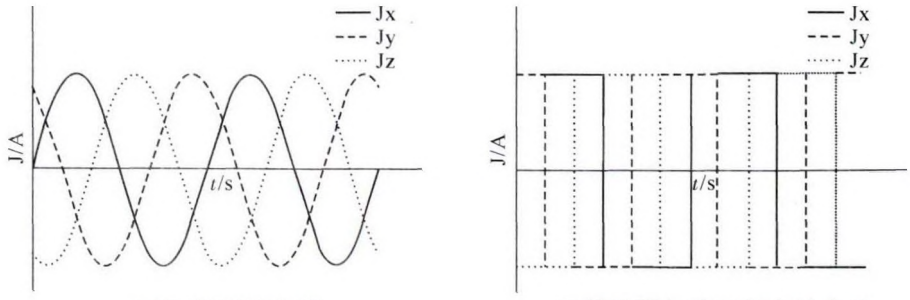
电磁搅拌器工作电流频率范围 1~10 Hz，与传导电流相比，可以忽略在钢液中产生的位移电流。因此，电磁场控制方程包括麦克斯韦方程组、运动流体的欧姆定律和连续方程[2,5-9]，可描述为：

安培定律

$$J=\nabla\times H \tag{1}$$

法拉第电磁感应定律

$$\nabla\times E=-\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2}$$



(a)三相正弦电流　　(b)搅拌器加载三相方波电流

图 3 不同波形加载电流

Fig.3 Different waveforms load current

磁通连续方程

$$\nabla \times B=0 \tag{3}$$

欧姆定律

$$J=\varepsilon[E+(U\times B)] \tag{4}$$

为求得定解需要添加本构方程

$$B=\mu H \tag{5}$$

式中，B 为磁感应强度，T；J 为电流密度，A·m^{-2}；E 为电场强度，V·m^{-1}；H 为磁场强度，A·m^{-1}；U 为流体速度，m·s^{-1}；μ 为相对磁导率，H·m^{-1}；σ 为电导率，S·m^{-1}；

由麦克斯韦方程组推导得到磁场计算方程

$$\nabla \times(\nabla \times B)=-\mu\sigma\frac{\partial B}{\partial t} \tag{6}$$

磁场与感应电流相互作用得到推动钢液运动的洛伦兹力

$$F=J\times B \tag{7}$$

式中，F 为电磁力，N。

2.2 流场控制方程

连续性方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}=0 \tag{8}$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial P}{x_i}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu_i+\mu_j)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+F_i \tag{9}$$

k-ε 紊流双方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K)+\nabla\cdot(\rho U\varepsilon)=\nabla\cdot\left[\left(\mu_0+\frac{\mu_0}{\sigma_k}\right)\nabla\cdot K\right]+G-\rho\varepsilon \tag{10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\nabla\cdot(\rho U\varepsilon)=\nabla\cdot\left[\left(\mu_0+\frac{\mu_0}{\sigma_k}\right)\nabla\cdot\varepsilon\right]+C_1G\frac{\varepsilon}{K}-\rho\varepsilon \tag{11}$$

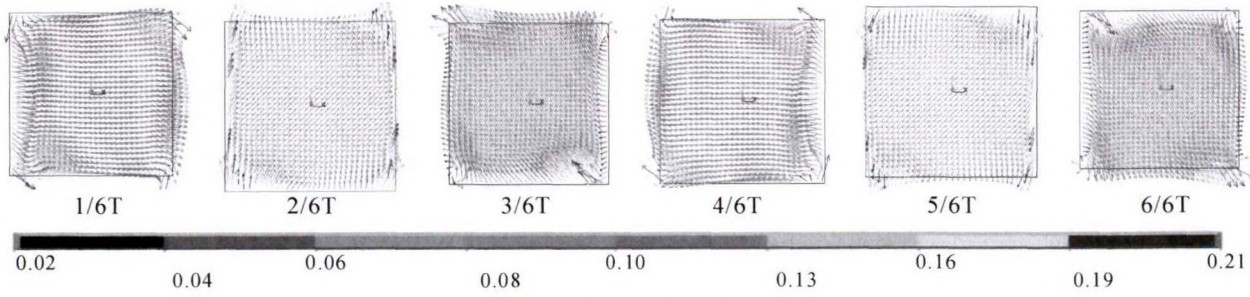
$$G=\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{12}$$

式中，ρ 为钢液密度，kg·m^{-3}。$u_{i(j)}$ 为 $x_{i(j)}$ 方向上的速度分量，m·s^{-1}。$x_{i(j)}$ 为不同坐标方向，m。p 为压力，Pa。μ_i+m^{-1}·s^{-1}。G 为 x_i 方向上的电磁力密度，N·m^{-3}；K 为紊流动能，kg·m^2·s^{-2}；u_i 为动力粘度系数，kg·m^{-1}·s^{-1}；μ_t 为紊流粘度系数，kg·m^{-1}·s^{-1}。ε 为紊流动能耗散率，kg·m^2·s^{-3}。

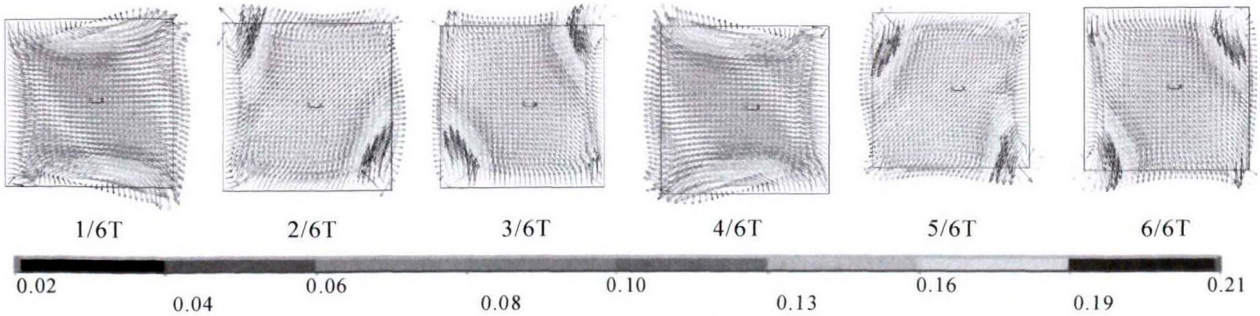
3 模拟结果分析

3.1 铸坯内部磁场分布

在固定电磁搅拌频率为 5 Hz，电流强度为 500 A 的搅拌参数下，取搅拌器加载正弦电流和方波电流时，铸坯中心径向截面一周期内磁场分布如图 4。搅拌器加载正弦波电流时，磁场在一周期呈逆时针旋转，磁感应强度分布呈现中心小边缘大的特点，中心部位磁感应强度在 0.08~0.10 T。搅拌器加载方波电流时，在铸坯中心径向截面一周期内分布规律，与加载正弦波交流电基本相似，也为逆时针旋转，中心部位磁感应强度在 0.1~0.13 T。因为方波电流瞬时值持续不变，且每对磁极磁场同时存在，对铸坯内部有叠加效果，所以搅拌器加载方波电流时，铸坯中心径向截面磁感应强度在中心区域和一些边部位置均有一定程度的增大。



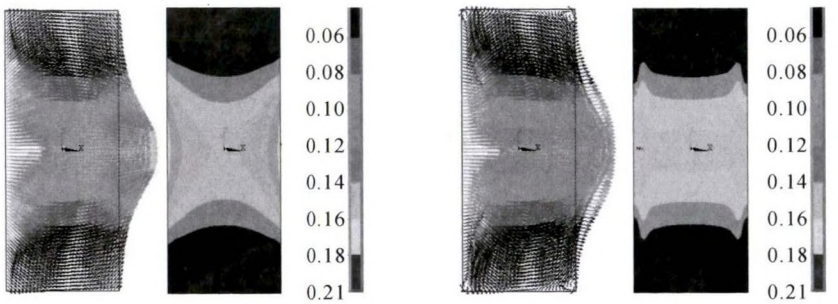
(a)搅拌器加载正弦波电流



(b)搅拌器加载方波电流

图 4 一周期内铸坯中心横截面磁感应强度分布

Fig.4 Distribution of magnetic induction intensity across central cross section of billets in one cycle



(a)正弦波电流　　(b)方波电流

图 5 1/6T 时刻下铸坯中心纵截面磁感应强度分布

Fig.5 Distribution of magnetic induction intensity of center longitudinal section of billet at 1/6 t

取 1/6 T 时刻铸坯纵截面磁场分布，图 5 为搅拌器加载不同波电流时铸坯轴向磁场矢量图和云图分布。由图 5 可以看出，磁感应强度分布主要集中在搅拌器摆放位置，与图 4、1/6 T 时刻分布结果相对应。并对比加载正弦波电流，加载方波电流对铸坯中心区域磁感应强度相对较大。

从图 6 不同位置在两周期内磁场随时间变化趋势可以看出，在两个周期内 0.15 s 以后，各点磁场均达到稳定状态，呈现周期性变化，在中心位置加载正弦波电流，铸坯内部磁感应强度已经基本稳定在 0.095 T。加载方波电流时在一定范围内有波动，但波动范围 0.101~0.115 T 均大于 0.095 T，且在各点位置均大于加载正弦波交流电在铸坯内产生的磁感应强度。所以相比搅拌器加载正弦波电流，加载方波电流可以使得铸坯内部磁感应强度增强，且使铸坯内部磁场有较大波动。

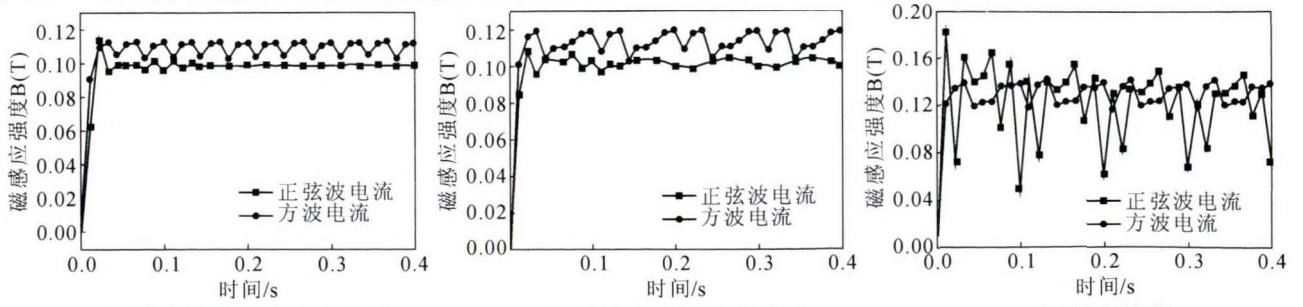
通过以上分析，加载正弦波电流在铸坯内部产生磁场和电磁力的分布规律与前人研究结果基本吻合[2,6-8,10]，证明磁场分析的准确性。

3.2 铸坯内部电磁力分布

铸坯内部电磁力是由磁感应强度和感应电流共同作用产生。图 7 为搅拌器加载正弦波电流和方波电流时，铸坯中心横截面一周期内电磁力分布。由图 7(a)可以看出，加载正弦波电流时由于铸坯内部感生电流与旋转磁场相互作用，在一周期内连续产生一对促进铸坯旋转的电磁力耦，电磁力耦旋转方向与磁场旋转方向相同都为逆时针旋转，使得结晶器内搅拌区域产生环流现象。由图 7(b)加载方波电流时发现，铸坯内部产生电磁力分布规律与加载正弦波交流电基本相似，但是电磁力力耦数值均有一定程度增大，且边部电磁力增大程度较大，是由于搅拌器加载方波电流时，方波电流较大的电流变化率，使铸坯表层感应电流增强，从而使得铸坯表层获得更大电磁力，且铸坯表面集肤效应比加载正弦波电流更加明显。

图 8 为搅拌器加载正弦波电流和方波电流 1/6 T 时铸坯中心轴向截面电磁力分布。可以看出，搅拌器加载正弦波电流和方波电流时，电磁力主要分布在搅拌器摆放位置，对应铸坯内部磁感应强度分布，径向电磁力表现为中间小两边大规律，呈哑铃状分布规律。搅拌器加载方波电流时，铸坯内部电磁力分布规律基本相似；加载正弦波电流时，电磁力对中心区域透入作用力更大，相等大小电磁力作用范围更大。

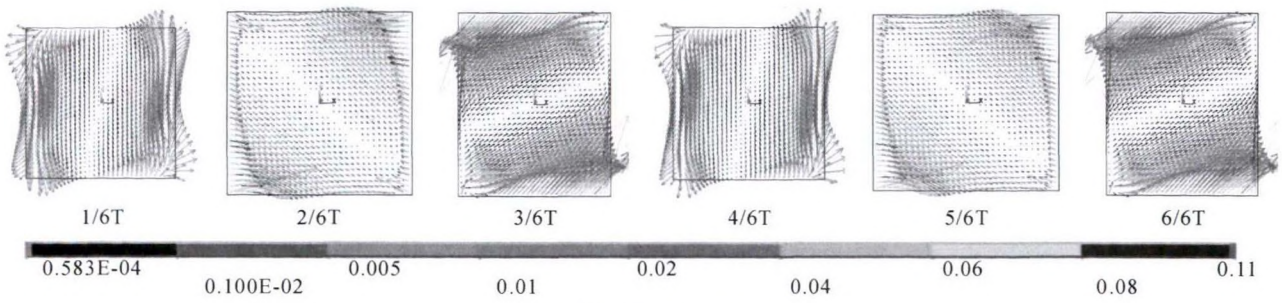
图 9 为不同位置在两周期内电磁力随时间变化趋势。由图 9 可以看出，在两周期内 0.15 s 后电磁力基本稳定。由于方波电流变化率在一瞬间极大，而正弦波电流变化率相对较为稳定，所以加载正弦波交流电产生电磁力为正弦波规律稳定分布，而搅拌器加载方波电流时在铸坯内部产生电磁力为连续震荡力，在边部震荡作用最明显，中心位置也有冲击力，但冲击力冲量相对较小。



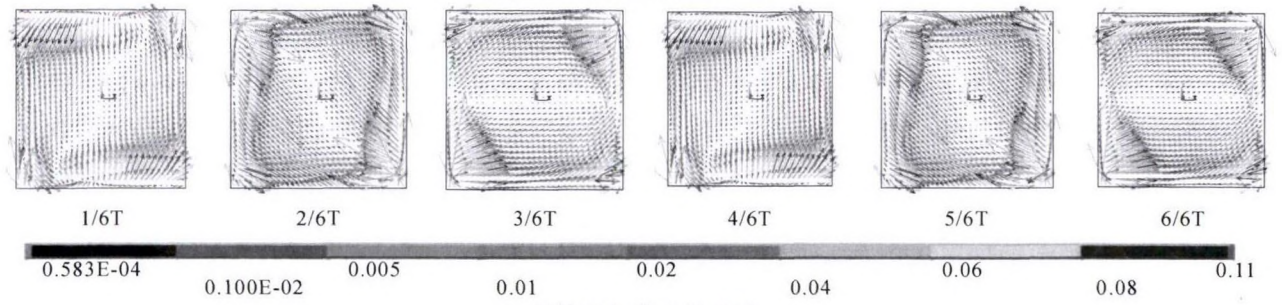
(a)径向横截面上中心位置　　(b)径向中心到边部中点　　(c)径向边部

图 6 两周期内某点磁感应强度随时间变化规律

Fig.6 The variation of magnetic induction intensity with time at a certain point in two periods



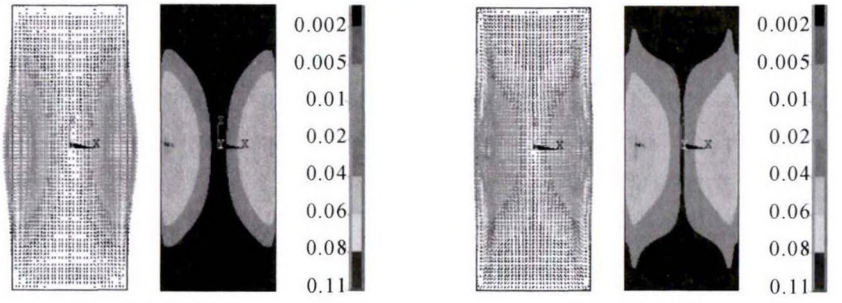
(a)搅拌器加载正弦波电流



(b)搅拌器加载方波电流

图 7 不同波形电流径向截面电磁力分布

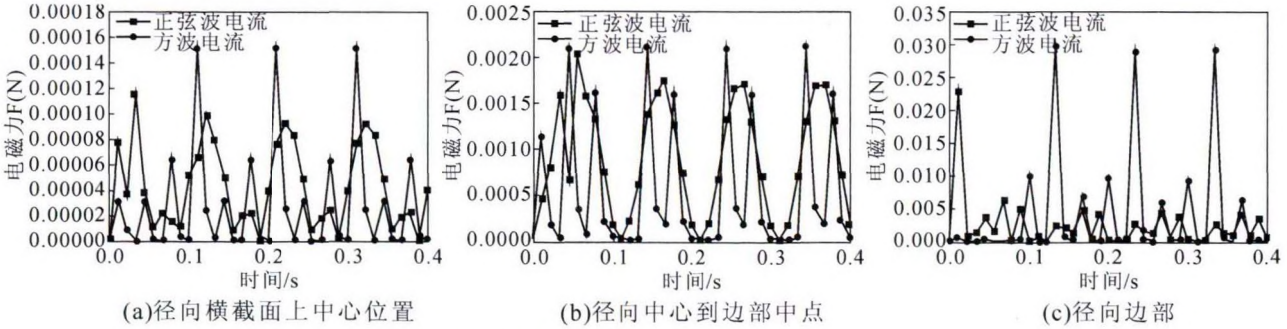
Fig.7 Electromagnetic force distribution in radial section of different waveforms of current



(a)正弦波电流　　(b)方波电流

图 8 不同波形电流纵向截面电磁力分布

Fig.8 Electromagnetic force distribution in longitudinal section of different waveforms of current



(a)径向横截面上中心位置　　(b)径向中心到边部中点　　(c)径向边部

图 9 两周期内电磁力随时间变化规律

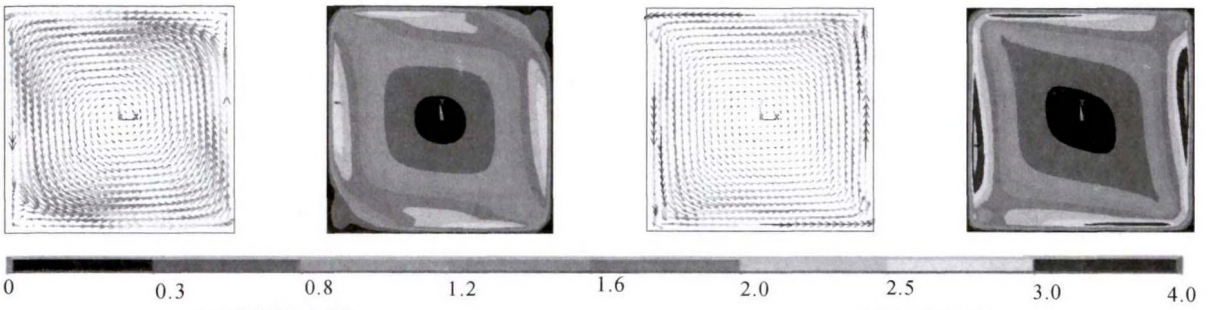
Fig.9 The law of electromagnetic force changing with time in two periods

3.3 铸坯内部流场分布

假设流场对磁场影响可以忽略不计，通过 ANSYS 间接耦合的方式，提取磁场计算稳定时节点电磁力结果，导入流场分析模型中，作为外加电磁力条件，分别计算铸坯加载正弦波电流和方波电流时铸坯内部产生的流场分布。

图 10 为搅拌器加载正弦波电流和方波电流下铸坯中心径向截面流场分布，由于电磁力对铸坯的驱动作用，使铸坯中部位置形成环流效果，从边部位置到中心位置流速逐步减小。搅拌器加载正弦波电流时，边部流速范围 1.6~3 m/s，中心位置到边部位置之间流速在 0.3~1.6 m/s，中心部位流速在 0~0.3 m/s，如图 10(a)。搅拌器加载方波电流时，铸坯内部流场规律与加载正弦波电流基本相似，能达到与加载正弦波电流相近的环流效果，见图 10(b)。

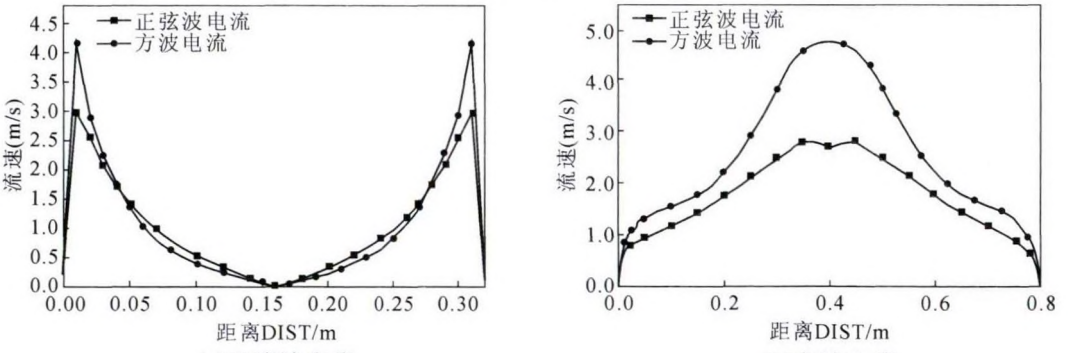
图 11 为搅拌器加载不同波形电流下径向和轴



(a)正弦波电流　　(b)方波电流

图 10 不同波形电流径向中心截面稳定流场分布

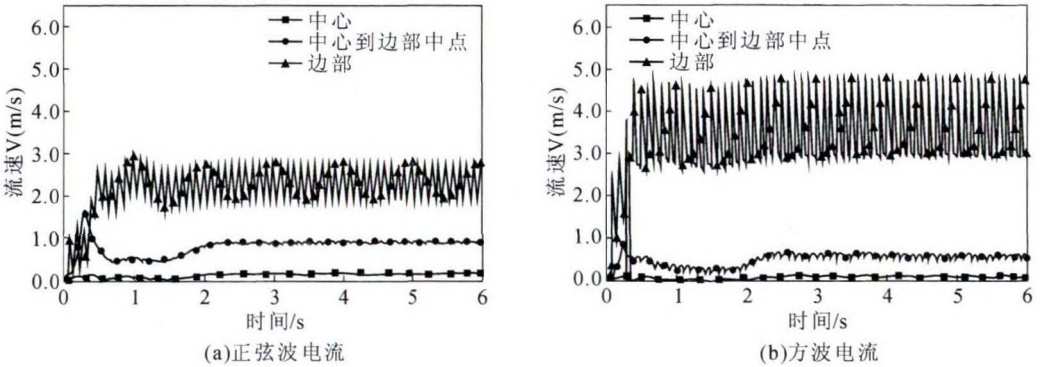
Fig.10 Stable flow field distribution of radial central cross section of different waveforms of current



(a)正弦波电流　　(b)方波电流

图 11 不同波形电流径向和轴向路径流速对比分布

Fig.11 The radial and axial path velocities of different waveforms compared and distributed



(a)正弦波电流　　(b)方波电流

图 12 不同波形电流下铸坯内不同节点流速随时间变化规律

Fig.12 The variation rule of flow velocity of different nodes in the slab with different waveform currents with time

向路径流速对比。由图 11(a)可以看出,边部位置加载方波电流流速较大,是由于方波电流在边部有较大电磁力,中心部位流速相对变小是由于加载方波电流时铸坯中部电磁力表现为短时间内较大的冲击作用,并不足以维持流场快速运动,而加载正弦波电流时作用在铸坯上的电磁力相对稳定,由 11(b)可以看出,在靠近搅拌器摆放位置,加载方波电流时,铸坯流速较大。

图 12 为搅拌器加载正弦波电流和方波电流下铸坯内不同节点流速随时间变化规律。由图 12 可以看出,电磁搅拌器作用大约 20 个周期后流场达到稳定状态,铸坯内部节点流速表现出与电磁力相同规律。加载正弦波电流时,在边部位置流速在 1.7~2.5 m/s 之间波动,中心到边部中点位置流速 0.6 m/s 基本保持不变,中心位置流速在 0.16 m/s 基本不变,见图 12(a)。加载方波电流时,在边部位置流速在 2.5~4 m/s 之间波动,中心到边部中点位置流速在 0.5~0.7 m/s 之间波动,中心位置流速在 0.1~0.16 m/s 之间波动,见图 12(b)。所以搅拌器加载正弦波电流时,铸坯内部流场相对稳定,而加载方波电流时,铸坯流场波动性较大。越靠近边部波动越大,由于铸坯凝固特性,波动性越大的流场更有利于打碎柱状晶,遏制枝晶生长,增加形核率及细化效果。

4 结论

(1)相同参数条件下,在电磁搅拌器上加载方波电流也会使铸坯内部形成连续旋转的磁场,且铸坯

内部磁感应强度较加载正弦波电流产生磁感应强度更大。

(2)相同参数条件下,在电磁搅拌器上加载方波电流相对于加载正弦波电流使铸坯内部电磁力更大,且产生的电磁力表现为震荡效果,可以在凝固过程中击碎体积较大的柱状晶和枝晶,使其变为等轴晶,从而提高铸坯质量。

(3) 搅拌器加载方波电流时也可以在铸坯内部形成环形流场,使铸坯在凝固过程中流动速度更大且具有震荡的特性,从而增强搅拌效率。

参考文献:

[1] 陈荣, 沈厚发. 板坯结晶器电磁搅拌电磁场与流场的数值模拟[J]. 连铸, 2010(3): 1-5.

[2] 易军. 基于旋转磁场、行波磁场电磁搅拌器的数值模拟 [D]. 包头:内蒙古科技大学, 2014.

[3] 李建超,吉利宏,王宝峰. 方坯连铸结晶器电磁搅拌磁场与流场数值模拟[J]. 铸造技术, 2010, 31(11): 1468-1472.

[4] 陈国军. 低频脉冲磁场金属凝固晶粒细化机理研究[D]. 沈阳:东北大学, 2015.

[5] Jung-Eui LEE, Heung Nam HAN, Kyu Hwan OH, et al. A fully coupled analysis of fluid flow, heat transfer and stress in continuous round billet casting [J]. ISIJ International, 1999, 39 (5): 435-444.

[6] 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,2011,33(6): 702-708.

[7] 任兵芝,朱苗勇,王宏丹,等. 大方坯连铸结晶器电磁搅拌三维电磁场与流场的数值模拟[J]. 金属学报,2008,44(4) : 507-512.

[8] 陈永,朱苗勇,蔡可森,等. 280 mm×380 mm 方坯连铸结晶器电磁搅拌数值模拟[J]. 钢铁钒钛,2008,29(2) : 43-49.

[9] 张静,王恩刚,邓安元,等. 大方坯结晶器电磁搅拌磁场流场耦合数值模拟[J]. 铸造,2011,60(5): 469-472.

[10] 丁国,李建超,王宝峰,等. 小方坯连铸结晶器电磁搅拌磁场和流场的耦合分析[J]. 包头钢铁学院学报,2006 (25): 222-225.

《熔模铸造缺陷图册》简介

《熔模铸造缺陷图册》(简称《图册》)是作者根据自己数十年在生产现场积累的实际经验和知识,参阅了国内外大量资料后精心编著而成的。

《图册》收录了典型的蜡模(也称“熔模”)缺陷 15 例、型壳缺陷 28 例、铸件缺陷 42 例共 105 幅图片,直观呈现了缺陷,描述了缺陷特征,具体分析了缺陷产生的原因,同时还给出了防止缺陷的有效措施,使读者能从中得到宝贵的资料和启迪,提高解决生产实际问题的能力。

《图册》覆盖面广,适用于中低温蜡料(也称“模料”),水玻璃型壳与硅溶胶型壳,以及碳钢、低合金钢、不锈钢以及高合金钢等铸件。

《图册》参考价值大,附录收集了适用于低温蜡料与水玻璃型壳、低温蜡料与硅溶胶型壳、低温蜡料与复合型壳以及中温蜡料与硅溶胶型壳等四种方案的压制蜡模工艺参数、型壳制造工艺参数。

总之,《图册》图文并茂、通俗易懂,是熔模铸造缺陷分析方面的资料库;可供熔模铸造生产现场、工艺设计、技术服务与研究等方面的人员使用。









联系人:潘玉洪 13509655192 pyhsz@163.com