

电磁搅拌法制备半固态浆料过程电磁场、流场和温度场的数值模拟

陈兴润，张志峰，徐 骏，石力开

(北京有色金属研究总院 国家有色金属复合材料工程技术研究中心，北京 100088)

摘 要：建立了铝合金半固态浆料电磁搅拌过程宏观传输物理量耦合的数学模型，采用有限元和有限差分相结合的方法实现电磁搅拌条件下电磁场、流场和温度场的耦合模拟分析，研究电磁搅拌工艺参数对流场和温度场的影响规律，并进行实验验证。结果表明：水平旋转的电磁力场在铝合金熔体内均匀分布，其方向与交变电磁场的旋转方向一致，大小则因集肤效应从边部到中心递减；熔体内速度场分布与电磁力相似，但随着搅拌时间的延长，熔体温度降低，速度不断降低；电磁搅拌条件下熔体凝固速度加快，熔体心部和边部的温度梯度变小；搅拌电流强度和频率对电磁场、速度场和温度场分布的影响非常明显。

关键词：电磁搅拌；半固态浆料；电磁场；流场；温度场；数值模拟

中图分类号：TG249.9

文献标志码：A

Numerical simulation of electromagnetic field, flow field and temperature field in semi-solid slurry preparation by electromagnetic stirring

CHEN Xing-run, ZHANG Zhi-feng, XU Jun, SHI Li-kai

(National Engineering & Technology Research Center for Non-ferrous Metal Matrix Composites,
General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: A two-dimensional computational model coupling a macroscopic heat and fluid flow analysis with electromagnetic stirring (EMS) in semisolid slurry preparation was developed. The method combining finite element and finite difference was used to deal with coupling electromagnetic field with flow field and temperature field. The characteristics of electromagnetic field, flow field and temperature field under electromagnetic stirring were analyzed, considering the influences of the stirring current and frequency. The dynamic evolution of transport phenomena during solidification under electromagnetic stirring was presented successfully. The simulated results show that a horizontal rotational electromagnetic force with the same rotating direction with the magnetic flux density is uniformly distributed in the stirred melt, but its magnitude decreases from edge to center due to the skin effect of the induced current. The velocity field distribution is similar to the electromagnetic field, but the velocity quickly decreases with the stirring time increasing when the temperature decreases in the melt. The electromagnetic stirring accelerates the solidification rate, and the temperature difference between the melt edge and the melt center becomes small. The altering stirring current and frequency markedly influence the distribution of electromagnetic field, flow field and temperature field.

Key words: electromagnetic stirring; semisolid slurry; electromagnetic field; flow field; temperature field; numerical simulation

电磁搅拌法(EMS)因具有非接触、清洁(环保)、可精确控制以及容易与大工业生产对接等优点，在半固

态金属坯料制备领域率先获得工业应用，并且实现了产业化^[1-5]。但是如何合理地应用电磁搅拌技术有效控

制熔体凝固过程的传热传质行为从而实现对坯料凝固组织细化、均匀化和非枝晶化则一直是半固态金属加工领域的研究重点。为此，国内外学者在施加电磁场对金属熔体凝固过程流场和温度场的影响规律及相互作用机理方面做了大量研究。ROPLEKAR^[6]和KUMAR 等^[7]建立了电磁场作用下半固态坯料半连续铸造过程宏观传输物理量耦合的数学模型，通过数值模拟研究了施加一个恒定旋转电磁体积力时，电磁搅拌作用下结晶器内熔体温度场、流场、成分场和固相分数的分布规律，发现半固态坯料的铸造行为对工艺参数如熔体过热度、搅拌强度、冷却速率的选择具有很大的敏感性。于海岐等^[8-10]建立了描述连铸结晶器内施加电磁场过程流场和温度场的数学模型，并分别采用有限元和有限体积法进行求解，研究在浸入式水口条件下施加直流电磁场对结晶器内钢液流动形态、温度场的分布规律及夹杂物轨迹特征。郭晓凤等^[11-12]建立了描述铝合金半固态浆料电磁搅拌过程电磁场和流场的数学模型，并且利用 ANSYS 软件对旋转电磁搅拌作用下半固态浆料的稳态流场进行了数值模拟。但是大部分研究工作不是对电磁搅拌过程的电磁力场进行了简化，就是忽略温度场对于流场的耦合影响，完全考虑实际电磁搅拌条件下多物理场耦合影响的研究工作报道不多。因此，在过去研究工作的基础上^[13]，本文作者建立了铝合金半固态浆料电磁搅拌过程宏观传输物理量耦合的数学模型，采用有限元软件 ANSYS 和自编程序相结合的方式实现对电磁搅拌条件下电磁场、流场和温度场的耦合模拟分析，重点研究电磁搅拌工艺参数对流场和温度场的影响规律，并且进行相应的实验验证。

1 电磁搅拌制备半固态浆料的几何模型描述

图 1 所示为电磁搅拌装置示意图。该电磁搅拌装置采用高磁导率的硅钢片制成搅拌器磁轭和铁芯系统，搅拌线圈采用中空的铜导线作为绕组安装在铁芯上，形成一对极的电磁搅拌器。两对线圈通过电容使线圈的相位角相差 90°。其基本工作原理如下：在感应线圈中通入相位角成 90°的交流电流，在搅拌坩埚中产生一个交变旋转磁场，当它切割铝合金熔体时就在其中产生感应电流。载流铝合金熔体和磁场相互作用产生作用在铝合金熔体上的水平旋转电磁力，从而驱动铝合金熔体运动。由于搅拌坩埚的高径比很大，为了计算方便，整个电磁搅拌装置的计算模型可以简化成二维问题来处理。电磁搅拌制浆装置几何模型如

图 2(a)所示，其结构为图 1 所示装置的横截面，由磁轭、线圈、坩埚、金属熔体及空气几部分组成。铝合金熔体为分析的重点，通过控制剖分单元尺寸来进行精细划分，网格划分如图 2(b)所示。

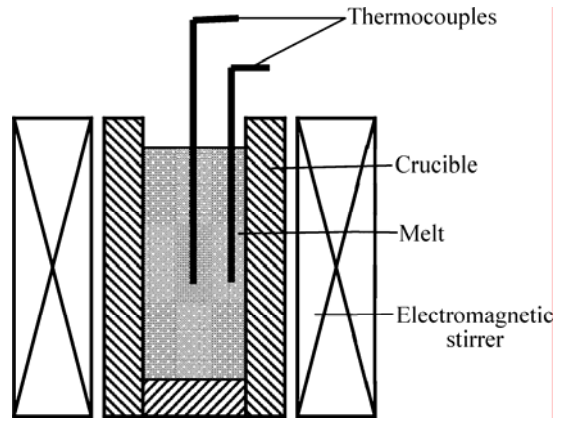


图 1 电磁搅拌装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of EMS apparatus

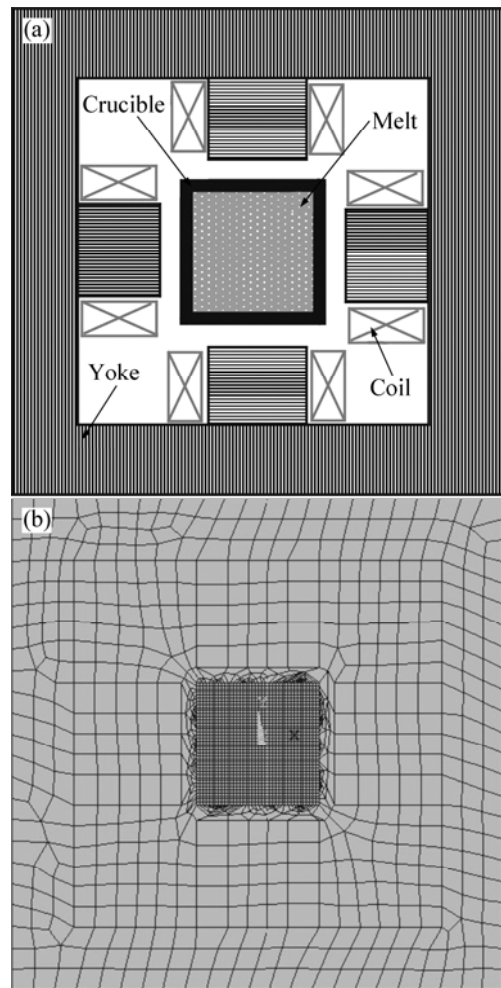


图 2 电磁搅拌装置几何模型(a)和网格划分示意图(b)
Fig.2 Geometrical model of EMS (a) and schematic diagram of its grid division (b)

所有几何参数均完全由现场提供。其中,线圈尺寸为 0.02 m×0.14 m;硅钢片的外部尺寸为 0.32 m×0.32 m,内部尺寸为 0.24 m×0.24 m;坩埚的外径为 0.07m,内径为 0.064 m,高度为 0.3 m。在搅拌过程中,电压的选择范围是 0~220 V,通过控制电压的大小来改变电流,频率的选择范围是 0~50 Hz。实验中选用商用 A357 铝合金,密度为 2 680 kg/m³,黏度随着温度的变化而变化,黏度系数 μ_0 为 1.3 mm/s,相对磁导率为 1,电阻率为 $2.1 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$,热导率为 152 W/(m·°C),比热容为 973 J/(kg·°C),浇注温度为 650 °C,液相线温度为 613 °C;铜线圈的相对磁导率为 1,电阻率为 $1.5 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$;磁轭的相对磁导率为 2 000,电阻率为 0;空气的相对磁导率为 1,电阻率为 0;不锈钢坩埚的相对磁导率为 1,电阻率为 $1.45 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 。

2 数学模型描述

为便于建立数学模型,假设铝合金熔体的流动是不可压缩的黏性流动过程。试验过程中,电磁场的搅拌强度并不是很大,因此熔体的流动速度相对比较小,雷诺数小于 2100,可以采用层流模型。除熔体的黏度随温度发生变化外,假设磁轭、不锈钢坩埚、铜线圈和铝合金熔体均为各向同性材料,磁导率均为常数;除焦耳热外无其他内热源,不考虑温度变化对密度的影响,即忽略加热过程的热膨胀,密度始终设定为固定值;忽略位移电流的产生;铝合金熔体流动对电磁场的影响不考虑,用时均电磁力代替时变电磁力与其它场耦合,本研究主要考虑液态金属熔体的流动状态,不考虑固液两相流动的问题。

2.1 电磁场控制方程

为获得铝合金熔体中的电磁场分布,需要求解电磁场控制方程 Maxwell 方程组:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{J} 为电流密度; \mathbf{B} 为磁感应强度; t 为时间。

耦合计算时采用时均洛伦兹力作为搅拌力,其表达式为

$$f_L = \text{Re}\{\mathbf{J} \times \mathbf{B}\} \quad (4)$$

2.2 流动模型控制方程

在熔体搅拌过程中,认为流体始终处于连续状态,

其表达式如下:

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

纳维-斯托克斯方程

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}_L - \nabla p \quad (6)$$

$$\mu = \mu_0 \exp[-A(T - T_0)] \quad (7)$$

式中: ρ 为铝合金熔体密度; \mathbf{u} 为流体速率; μ 为黏度; p 为压力; μ_0 为黏度系数; A 为常数,计算中取 0.5; T_0 为熔体凝固温度。

2.3 能量方程

能量方程如下:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho L \frac{df_s}{dt} \quad (8)$$

式中: T 是熔体温度; c_p 为定压比热容; λ 为热导率; L 为结晶潜热; f_s 为固相分数。

3 边界条件和求解方法

试验中磁轭采用高磁导率的硅钢片组成,搅拌系统的漏磁很小,因此计算过程中设定电磁搅拌器最外层节点的磁势位为零,计算模型上施加磁力线平行边界条件。电磁搅拌装置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强度。

流场边界条件为铝合金熔体边界 x 方向和 y 方向的速度为 0。

对于温度场计算,在熔体和不锈钢坩埚界面、不锈钢坩埚和空气界面采用牛顿冷却定律来处理。其中不锈钢坩埚密度为 8 000 kg/m³,热导率为 14.5 W/(m·°C),比热容为 580 J/(kg·°C),预热温度为 500 °C。

计算过程分两步完成。首先,由 ANSYS 采用磁矢量势方法求解铝合金熔体中电磁搅拌条件下的电磁场分布,导出铝合金熔体区域的时均电磁力数据文件 F_x 和 F_y ;其次,利用有限差分法和自编 VC 程序相结合的方式,将时均电磁力加载到流场和温度场计算所用的模型上,对瞬态的流场和温度场进行求解。流场和温度场计算采用 SIMPLE 算法,当连续方程的质量源小于 10^{-4} ,即认为迭代收敛,详细计算方法见文献[13]。

4 模拟结果和讨论

4.1 磁场分布特征

在搅拌电流为 30 A，频率为 10 Hz 的条件下，计算得到铝合金熔体中磁力线和电磁力分布如图 3 所示。从图 3(a)可以看出，线圈产生的磁力线完全穿过铝合金熔体。水平旋转的电磁力场在铝合金熔体内均匀分布，电磁力的作用方向与磁场的旋转方向一致，使铝合金熔体在水平方向上产生旋转流动。从图 3(b)可以看出，由于感应电流的集肤效应，合金熔体中的电磁力由外向内依次减小。这意味着在搅拌区域内铝合金熔体均受到电磁力的作用，整个区域内的熔体都将获得搅拌处理。

搅拌电流决定着搅拌过程中的磁感应强度大小。在频率 $f=10\text{ Hz}$ 的情况下，分别取电流强度为 10、20 和 30 A 计算电磁搅拌装置中磁感应强度的大小。选取坩埚中心到边部路径上的点进行分析，得到不同电流下沿坩埚半径方向上磁感应强度的变化如图 4 所示。由图 4 可见，在半径方向上，磁感应强度随电流的增

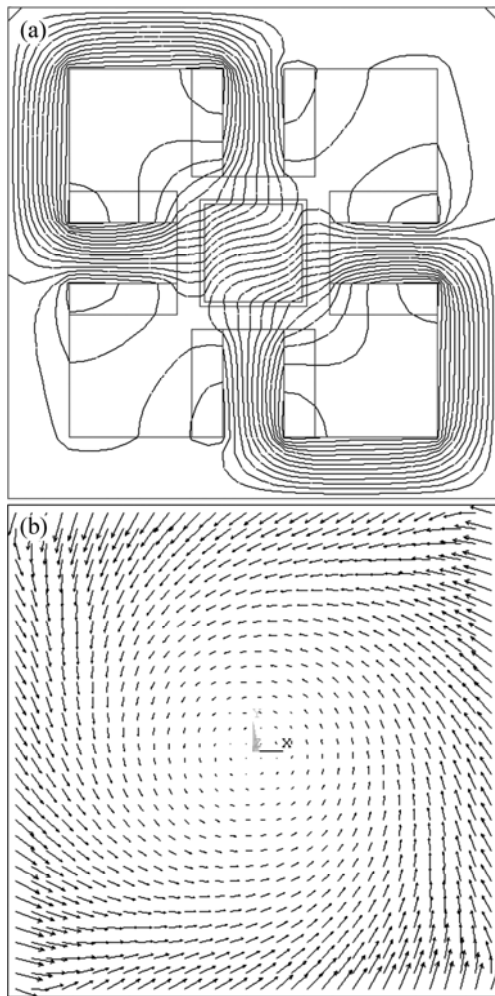


图 3 电磁搅拌装置中磁力线分布图(a)与浆料内电磁力分布图(b)
Fig.3 Distributions of magnetic flux lines in EMS apparatus (a) and electromagnetic force in slurry (b)

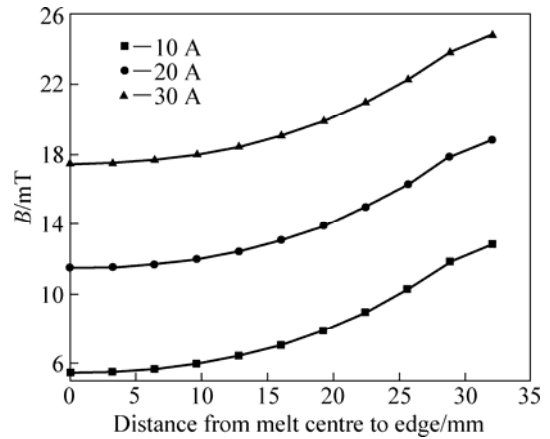


图 4 相同频率条件下搅拌电流对磁感应强度随的影响
Fig.4 Effect of stirring current on magnetic flux density at same frequency

大依次增大，最大磁感应强度由 10 A 时的 12.781 3 mT 增大到 30 A 时的 24.844 mT。在电流一定的情况下，铝合金熔体中边部到心部磁感应强度依次减小。

频率是决定搅拌过程中的磁感应强度的另外一个因素。在 $I=30\text{ A}$ 的情况下，分别取频率为 10、30 和 50 Hz 计算电磁搅拌装置中磁感应强度的大小。选取坩埚中心到边部路径上的点进行分析，得到不同频率下沿坩埚半径方向上磁感应强度的变化如图 5 所示。由图 5 可见，在半径方向上，磁感应强度随频率的增大依次减小。在频率一定的情况下，由于感应电流的集肤效应，沿着路径方向磁感应强度依次增大。

采用 CT3 型特斯拉计测量坩埚中心的磁感应强度。测量条件：频率为 10 Hz，电流分别取 10、20、30、40 和 50 A，坩埚内无铝合金熔体，然后把测量结

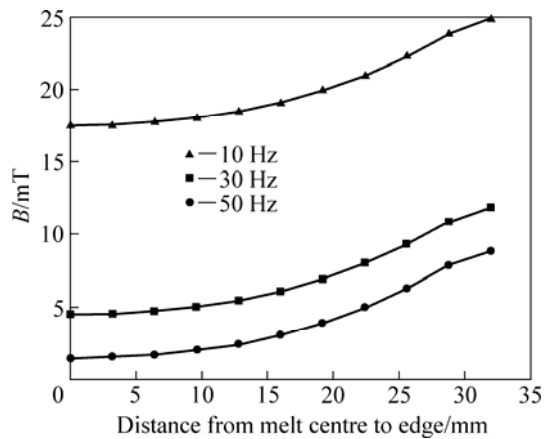


图 5 相同电流下搅拌频率对磁感应强度的影响
Fig.5 Effect of stirring frequency on magnetic flux density at same current

果和计算结果进行对比, 如图 6 所示。由图 6 可以看出, 计算值和实测值吻合较好, 验证了计算模型与软件算法的可行性; 说明利用 ANSYS 软件能基本描述出电磁搅拌装置的电磁场分布状况。

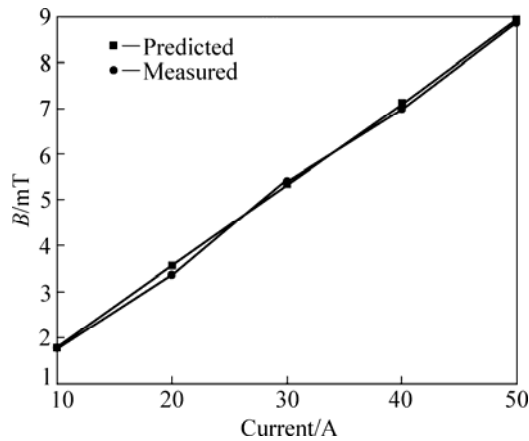


图 6 不同搅拌电流条件下不锈钢坩埚中心磁感应强度计算与测量结果比较

Fig.6 Comparison of calculated and measured magnetic flux densities at center of crucible at various stirring currents

4.2 流场分布特征

在频率为 10 Hz, 电流为 10 A 的条件下, 计算不同时间下铝合金熔体内流场的分布, 如图 7 所示。从图 7(a)可以看出, 在电磁搅拌时间为 5 s 时, 铝合金熔体还处于完全液态, 在旋转电磁力的作用下, 在水平面上呈旋转运动, 速度场分布基本均匀。由于感应电流的集肤效应, 合金熔体中的电磁力由外向内依次减小, 这也导致流速在铝合金熔体边缘达到最大值, 边缘到中心依次减小, 在铝合金熔体中形成搅拌漩涡。随着搅拌时间的延长, 金属熔体的温度降低, 黏度增加, 流动速度减小。搅拌时间为 10 s 时的熔体与 5 s 时的相比, 流动速度明显减小, 如图 7(b)所示。

在频率为 10 Hz、电流分别为 10、20 和 30 A, 搅拌时间为 5 s 时计算铝合金熔体中流动速度的大小。选取坩埚中心到边部路径上的点进行分析, 得到不同电流下铝合金熔体中各节点熔体流动速度随半径的变化如图 8 所示。由图 8 可见, 在半径方向上, 熔体流动速度随电流的增大依次增大, 最大流动速度由 10 A 的 29.1 mm/s 增大到 30 A 的 33.12 mm/s。在电流一定的情况下, 铝合金熔体中心到边部流动速度依次增大。金属熔体中的旋转运动有利于降低熔体的温度, 但并不是电流越大越好, 过强的旋转运动在金属熔体中心区域会形成很深的液穴, 容易卷入气体和夹杂物, 所以电流不宜太大。

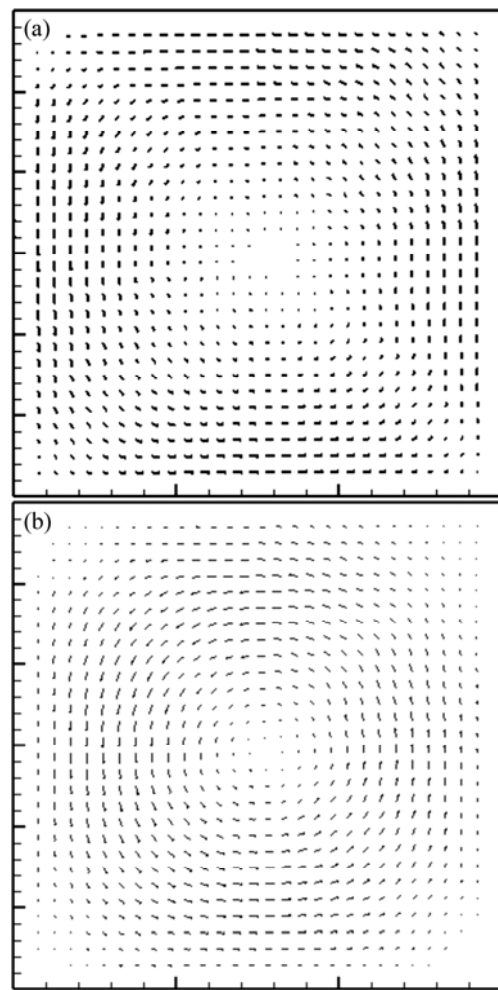


图 7 不同搅拌时间下熔体内流场分布图

Fig.7 Distribution of flow fields at different stirring times: (a) $t=5$ s; (b) $t=10$ s

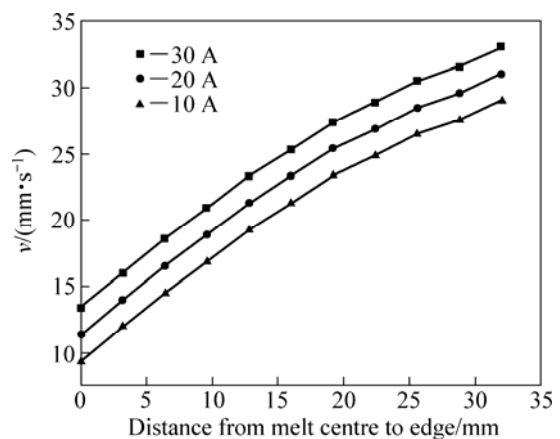


图 8 搅拌电流对熔体流动速度的影响

Fig.8 Effect of stirring current on the flow velocity

在电流为 30 A, 频率分别为 10、30 和 50 Hz, 搅拌时间为 5 s 时计算电磁搅拌装置中熔体速度的大小。

选取坩埚中心到边部路径上的点进行分析，得到不同频率下铝合金熔体中各节点熔体流动速度随半径的变化如图9所示。由图9可见，在半径方向上，熔体流动速度随频率的增大依次减小。由于感应电流的集肤效应，沿着路径方向速度依次增大。这和上面得到的结论是一致的。

4.3 温度场分布特征

在施加和不施加电磁搅拌的两种情况下，计算瞬态温度场的分布。频率为10 Hz，电流为10 A时，在不同的搅拌时间下铝合金熔体中温度场的分布图如图10所示。从图10可以看出，施加和不施加电磁搅拌时的温度场的分布有很大差别。选取金属熔体中心到边部路径上的点进行分析，得到不同时间下沿金属熔体半径方向上的温度分布如图11所示。由图11可见，在不施加电磁搅拌、 $t=5\text{ s}$ 时，熔体中心的温度为644.718，只比浇注温度低了5.282，边部的温度

则为622.394，心部和边部的温度梯度为22.324； $t=10\text{ s}$ 时，心部和边部的温度梯度更大，为31.734，这个时间熔体的部分区域已经处于固液两相区，开始

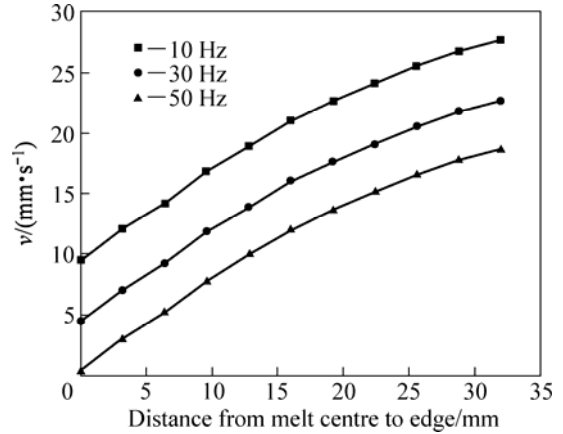


图9 搅拌频率对熔体流动速度的影响

Fig.9 Effect of stirring frequency on the flow velocity

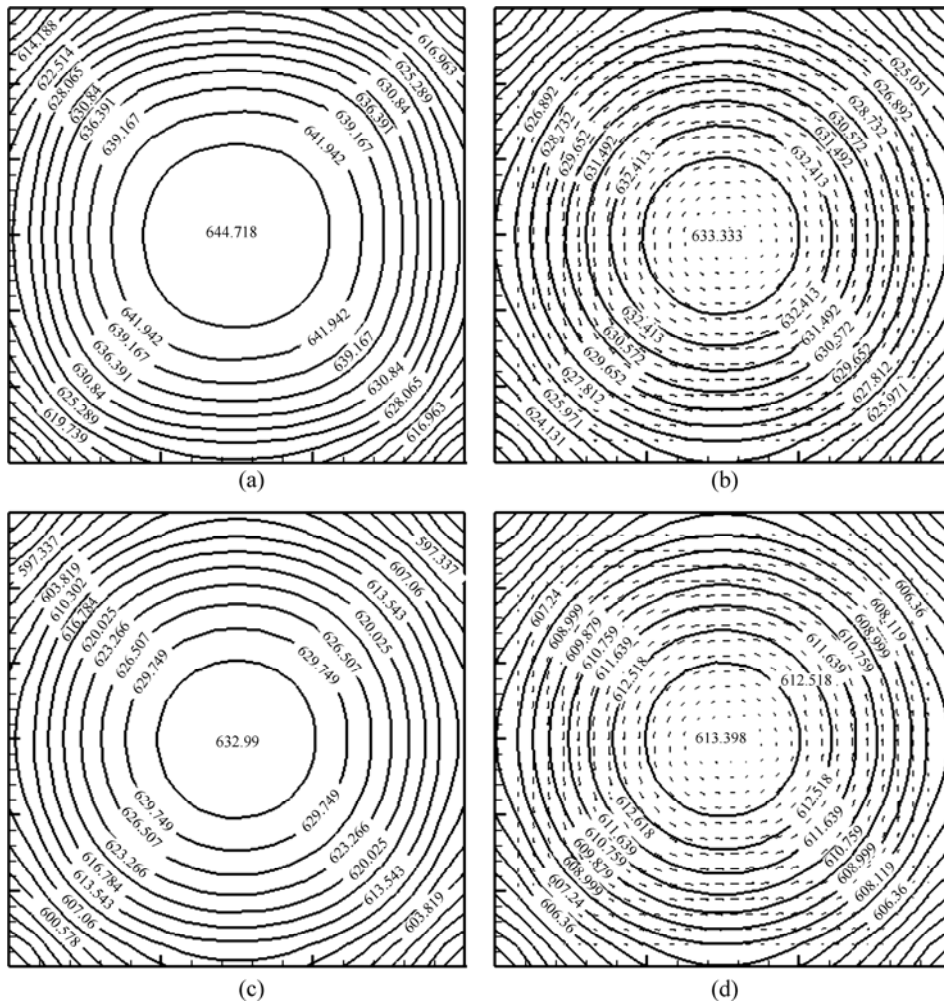


图10 有无电磁搅拌条件下不同时间节点熔体内温度场的分布

Fig.10 Distribution of temperature fields at different times: (a) Without EMS, $t=5\text{ s}$; (b) With EMS, $t=5\text{ s}$; (c) Without EMS, $t=10\text{ s}$; (d) With EMS, $t=10\text{ s}$ (unit:)

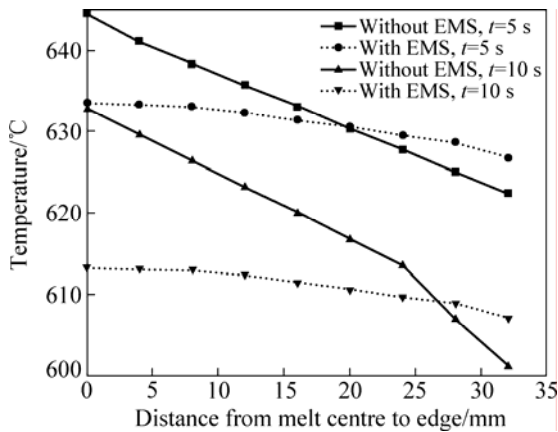


图 11 有无电磁搅拌条件下沿熔体径向不同时间节点温度场分布

Fig.11 Distribution of temperature fields in radial direction at different times without and with EMS

形核, 如此大的温度梯度不利于同时形核。在施加电磁搅拌、 $t=5\text{ s}$ 时, 熔体中心的温度为 633.333 , 边部的温度为 626.775 , 温度梯度为 6.558 ; $t=10\text{ s}$ 时, 熔体心部的温度比 $t=5\text{ s}$ 时的降低了 19.935 , 心部和边部的温度梯度也降低了 0.53 , 此时熔体的大部分区域已经处于固液两相区, 熔体中开始同时形核, 有利于获得好的组织。这主要是因为: 在不施加电磁搅拌作用下, 铝合金熔体内部的热量传输主要通过热传导来进行, 熔体内外温度梯度较大, 冷却过程由外向内进行, 熔体边部温度降低比中心温度快; 在电磁搅拌作用下, 铝合金熔体内部的热量传输由热传导和搅拌处理所带来的熔体传质来完成, 并且熔体的传质起主要作用。搅拌作用使金属熔体产生水平旋转运动, 有利于内外部高低温熔体的混合和熔体热量的释放。该过程降低了熔体内外温度梯度, 延缓了坩埚壁附近熔体的冷却, 同时加速了熔体内部和整体的温度降低^[14-15]。

在频率为 10 Hz 的情况下, 分别取电流 10 、 20 和 30 A , 计算瞬态温度场的分布。选取金属熔体中心到边部路径上的点进行分析, 得到 $t=5\text{ s}$ 时沿金属熔体半径方向上的温度分布如图 12 所示。由图 12 可见, 在相同的搅拌时间下, 熔体整体的温度随着电流的增大而依次减小。随着电流增大, 电磁力也随之增大, 铝合金熔体的旋转运动增强, 熔体内部的热量传输更快。熔体中心的温度由 10 A 时的 633.305 降低到 30 A 时的 617.161 。因此, 搅拌强度能最大限度地增强熔体传质传热的动力学过程, 可以控制这个参数来获得好的搅拌效果。

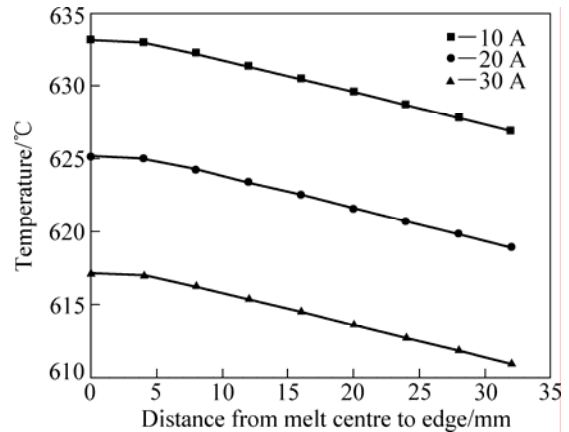


图 12 搅拌电流对熔体温度场的影响

Fig.12 Effect of stirring current on the temperature field in the melt

在电流为 30 A 的情况下, 频率分别为 10 、 30 和 50 Hz , 计算瞬态温度场的分布。选取金属熔体中心到边部路径上的点进行分析, 得到 $t=5\text{ s}$ 时沿金属熔体半径方向上温度的分布如图 13 所示。从图 13 可以看出, 在相同的搅拌时间下, 熔体整体的温度沿着金属熔体半径方向上随着频率的减小而依次减小。这主要是因为频率越大, 电磁场的透入深度越小, 从而使铝合金熔体中的电磁力减小, 对铝合金熔体的搅拌作用减小, 导致热量传输也比较慢。

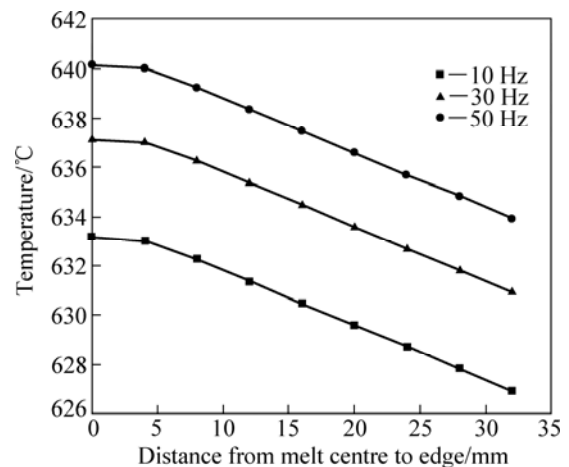


图 13 熔体温度场随搅拌频率的变化规律

Fig.13 Effect of stirring frequency on the temperature field in melt

在施加和不施加电磁搅拌的两种情况下, 用测温模块采集不同时间下铝合金熔体中心和边部的温度, 然后和模拟数据进行对比, 如图 14 所示。测量时的条件如下: 铝合金熔体浇注温度为 650 , 坩埚预热温

度为 500 ，熔体浇注到坩埚中后立即测量，到 20 s 时结束测温；施加电磁搅拌时，电流为 30 A，频率为 10 Hz。测温模块包括测温热电偶、数据采集模块及上位微机。数据采集模块由 PS010 热电偶端子板、USB7325 高速光电隔离型模入数据采集模块、电源等构成。PS010 热电偶端子板为十六路信号放大器。从图 14 可以看出，试验结果和模拟结果具有较好的一致性。不施加电磁搅拌时，熔体中心温度降低比较慢，而边部温度降低比较快，心部和边部温度梯度比较大；施加电磁搅拌时，熔体中心和边部温度降低趋势差不多，两者之间温度梯度比较小，不超过 7 ，这和模拟结果是完全一致的。

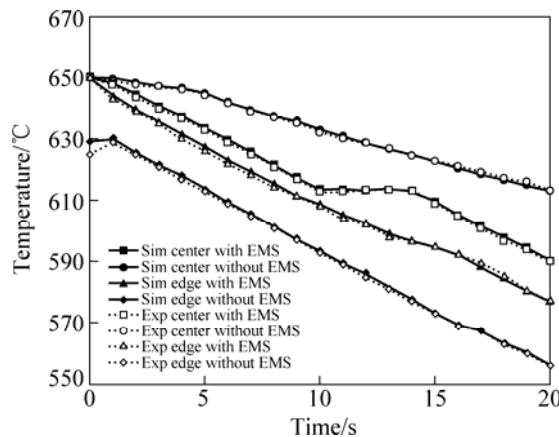


图 14 有无电磁搅拌条件下 A357 铝合金冷却曲线的比较

Fig.14 Comparison of cooling curves of A357 alloy with and without electromagnetic stirring

5 结论

1) 水平旋转的电磁力场在铝合金熔体内均匀分布，其方向与交变电磁场的旋转方向一致，大小则因集肤效应从边部到中心递减。在搅拌电流为 30 A，搅拌频率为 10 Hz 时磁力线完全穿过铝合金熔体。

2) 电磁搅拌作用下在熔体内形成一个水平旋转的速度场，大小和分布与电磁力相似，但随着搅拌时间的延长，熔体温度降低，速度不断降低。

3) 不施加电磁搅拌熔体中心温度降低比较慢，边部温度降低比较快，心部和边部温度梯度比较大；施加电磁搅拌熔体整体凝固速度加快，熔体心部和边部的温度梯度变小。

REFERENCES

[1] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semi-solid

state[J]. Metallurgical Transactions, 1991, 22A(5): 957-981.

[2] VIVES C. Elaboration of semisolid alloys by means of new rheocasting processes[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1992, 23: 189-206.

[3] ZHANG Z F, XU J, SHI L K. Study on multiple electromagnetic continuous casting of aluminum alloy[J]. Materials Science Technology, 2006, 22(4): 437-440.

[4] 许珞萍, 邵光杰, 任忠鸣, 朱明原, 史文. 电磁搅拌作用下非树枝晶铝合金组织演变过程的数学描述[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 52-56.

XU Luo-ping, SHAO Guang-jie, REN Zhong-ming, ZHU Ming-yuan, SHI Wen. Semi-quantitative mathematical description of evolution of non-dendritic structure of aluminum alloy under electromagnetic stirring condition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 52-56.

[5] 赵振铎, 毛卫民, 钟荣茂. 用行波电磁搅拌制备半固态 AlSi7Mg 合金浆料[J]. 材料研究学报, 2008, 22(4): 369-372.

ZHAO Zhen-duo, MAO Wei-min, ZHONG Rong-mao. Preparation of semi-solid AlSi7Mg alloy slurry through traveling-wave electromagnetic stirring[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22(4): 369-372.

[6] ROPLEKAR J K, DANTZIG J A. A study of solidification with a rotating magnetic field[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2001, 14: 79-95.

[7] KUMAR A, DUTTA P. Modeling of transport phenomena in continuous casting of non-dendritic billets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 3674-3688.

[8] 于海岐, 朱苗勇. 圆坯结晶器电磁搅拌过程三维流场与温度场数值模拟[J]. 金属学报, 2008, 44(12): 1465-1473.

YU Hai-qi, ZHU Miao-yong. 3D numerical simulation of flow field and temperature field in bloom continuous casting mold with electromagnetic stirring[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(12): 1465-1473.

[9] 陈永, 张长利, 沈厚发, 柳百成. 连铸结晶器电磁搅拌磁场及钢液流场模拟[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(7): 11-14.

CHEN Yong, ZHANG Chang-li, SHEN Hou-fa, LIU Bai-cheng. Numerical simulation of electromagnetic stirring field and molten steel flow field in mold of bloom continuous casting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(7): 11-14.

[10] 陈永, 朱苗勇. 电磁搅拌结晶器钢液流场和温度场模拟仿真[J]. 钢铁钒钛, 2009, 30(4): 55-59.

CHEN Yong, ZHU Miao-yong. Simulation on flow field and temperature field of molten steel in bloom mold with EMS[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2009, 30(4): 55-59.

[11] 郭晓凤, 王承志, 张玉妥, 黄勇. 铝合金半固态浆料制备过程的电磁-流体数值模拟[J]. 铸造设备研究, 2007(1): 19-22.

GUO Xiao-feng, WANG Cheng-zhi, ZHANG Yu-tuo, HUANG Yong. The numerical simulation of magnetofluids in the course

- of semisolid slurry preparation of aluminum alloy[J]. Research Studies on Foundry Equipment, 2007(1): 19-22.
- [12] 林冲, 胡建华, 张文贻. 铝合金半固态浆料电磁搅拌下流场的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2009, 38(1): 73-75.
LIN Chong, HU Jian-hua, ZHANG Wen-ze. Numerical simulation of flow field under electromagnetic stirring of semi-solid slurry of aluminium alloy[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(1): 73-75.
- [13] ZHANG Z F, KIM J M, HONG C P. Numerical simulation of grain structure evolution in solidification of an Al-5.0wt%Cu alloy under electromagnetic stirring and its experimental verification[J]. ISIJ International, 2005, 45(2): 183-191.
- [14] 张景新, 张奎, 刘国钧, 徐骏, 石力开. 电磁搅拌制备半固态材料非枝晶组织的形成机制[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(4): 511-515.
ZHANG Jing-xin, ZHANG Kui, LIU Guo-jun, XU Jun, SHI Li-kai. Formation mechanism of non-dendritic structure in semi-solid metals produced by ES process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 511-515.
- [15] STEINBACH S, RATKE L. The effect of rotating magnetic fields on the microstructure of directionally solidified Al-Si-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 413/414: 200-204.

(编辑 何学锋)