

环缝式电磁搅拌法制备半固态浆料过程电磁场的数值模拟

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 建立了环缝式电磁搅拌法制备半固态金属浆料系统电磁场的计算模型, 采用商用 ANSYS 软件对制浆系统内电磁场分布进行了数值模拟, 分析了电流、频率、坩埚材质、冷却器材质和环缝宽度对磁感应强度的影响规律, 并进行了相应的实验验证. 研究表明: 电磁场模拟结果与实验结果具有较好地一致性, 验证了计算模型与软件算法的可行性; 系统电磁力主要分布于环缝内, 提高了对合金熔体的搅拌强度; 在相同的环缝宽度下, 磁感应强度随频率的增大而依次减小, 随电流的增大而依次增大; 同时选用不锈钢坩埚与石墨冷却器可以使环缝内铝合金熔体的磁感应强度获得最大; 相同电流和频率条件下, 磁感应强度随着环缝宽度减小而逐渐增大; 相同搅拌功率条件下, 环缝式电磁搅拌法可以获得更加细小均匀的半固态组织, 平均晶粒尺寸较普通电磁搅拌法减小 31%.

关键词 半固态浆料; 电磁场; 环缝式电磁搅拌; 数值模拟; ANSYS 软件

分类号 TM 153⁺.1

Numerical simulation of electromagnetic field in semi-solid slurry preparation by A-EMS

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 The calculation models of electromagnetic field in semisolid slurry preparation by annular electromagnetic stirring (A-EMS) were established, and the effects of stirring current, stirring frequency, crucible materials, cooler materials and gap width on the magnetic flux density in the slurry-making system were analyzed by ANSYS software with corresponding experimental verification. It is concluded that the simulation results are in good agreement with those obtained by experiment, verifying the reliability of the calculation models and the software algorithm. The electromagnetic force mainly distributed in the strring gap enhances the strring intensity of the A-EMS system. At the same gap width, the magnetic flux density increases with an increase in stirring current, but decreases with the stirring frequency increasing. The maximum magnetic flux density can be obtained by choosing both a stainless crucible and a graphite cooler. At the same current and frequency, the magnetic flux density increases as the stirring gap width decreases gradually. In comparison with conventional electromagnetic stirring, A-EMS can produce a finer and more uniform semi-solid structure with the average grain size decreased by 31% under the same stirring power.

KEY WORDS semisolid slurry; electromagnetic field; electromagnetic stirring; numerical simulation; ANSYS software

电磁搅拌法由于具有非接触、不污染金属液、可精确控制以及容易与大工业生产对接等优点, 在半固态坯料制备领域率先获得工业应用并且实现产业化^[1]. 但是, 传统的电磁搅拌工艺还存在着半固态

坯料组织不均匀、不能制备大尺寸坯料及制备成本高等问题, 主要原因是存在难以克服的集肤效应, 导致被搅拌金属熔体的靠外区域受到强烈的搅拌, 越向中心区域搅拌强度越弱. 为解决这个问题, 国内

收稿日期: 2009-04-14

基金项目: 国家重点基础研究规划资助项目 (No. 2006CB605203); 国家高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA03Z115; No. 2009AA03Z534)

作者简介: 陈兴润(1985—), 男, 硕士研究生; 张志峰(1970—), 男, 高级工程师, 博士, E-mail: zhangzf@grinm.com

外学者均在改变感应器结构、增加功率以及降低频率等方面做了大量工作,但收效甚微,而且还额外增加制备成本,限制了半固态金属加工技术的推广和应用^[2-6].

本课题组在长期的电磁搅拌法和机械搅拌法研究的基础上,通过把电磁搅拌与环缝式制浆室巧妙结合,提出了环缝式电磁搅拌制备半固态浆料新方法,为半固态坯料高质量、低成本制备开辟了新路子. 该方法将交变电磁场集肤效应劣势转变为优势,充分利用集肤效应层磁感应强度高、剪切强度和速率大的优点,在搅拌缝隙宽度可调的环缝式制浆系统内实现半固态浆料强制均匀凝固,可以获得组织细小均匀的半固态浆料,其中,环缝式电磁制浆系统内电磁场的设计是关键.

本文建立了环缝式电磁搅拌制浆系统二维电磁场计算模型,采用商业软件 ANSYS 分析考查了电磁制浆系统中电流、频率、坩埚材质、冷却器材质和搅拌缝隙宽度对电磁场分布的影响规律,并且进行了相应的实验验证,以期为该方法的进一步工程化应用提供理论依据.

1 电磁场的数值模拟

1.1 环缝式电磁搅拌方法及装置

图 1 为环缝式电磁搅拌装置示意图. 环缝式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. 两极线圈通过电容使线圈的相位角相差 90° . 被搅拌金属熔体在不锈钢坩埚中通过插入冷却器形成环缝. 基本工作原理是:在感应线圈中通入相位角成 90° 的交流电流,在搅拌坩埚和冷却器形成的环缝内产生一个旋转磁场,由于被搅拌熔体主要集中在环缝区域,可以充分利用集肤效应层磁感应强度高、剪切强度和速率大的优点,在熔体中产生较普通电磁搅拌

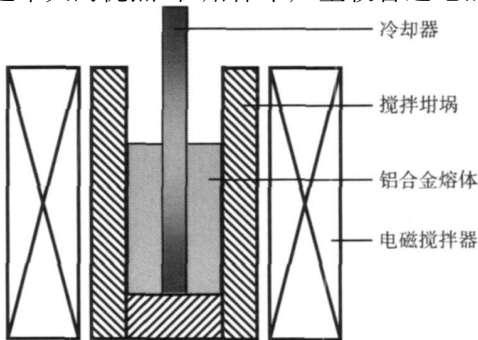


图 1 环缝式电磁搅拌装置示意图

Fig.1 Schematic of an A-EMS apparatus

法更大的旋转电磁力,实现强制均匀搅拌. 其中,线圈尺寸为 $0.04\text{ m} \times 0.14\text{ m}$;硅钢片的外部尺寸为 $0.32\text{ m} \times 0.32\text{ m}$,内部尺寸为 $0.24\text{ m} \times 0.24\text{ m}$;坩埚的外径为 0.09 m ,内径为 0.08 m ,高度为 0.2 m . 实验中选用不同材质的坩埚和冷却器,来研究电磁搅拌装置中磁感应强度的大小. 在搅拌过程中,电压的选择范围是 $0 \sim 220\text{ V}$,频率的选择范围是 $0 \sim 50\text{ Hz}$.

1.2 环缝式电磁搅拌装置的计算模型

由于搅拌坩埚的高径比很大,为了计算方便,整个环缝式电磁搅拌装置的计算模型可以简化成二维问题来处理,物理模型如图 2(a)所示,结构为图 1 横截面,它由磁轭、线圈、坩埚、冷却器、金属熔体及空气几部分组成.

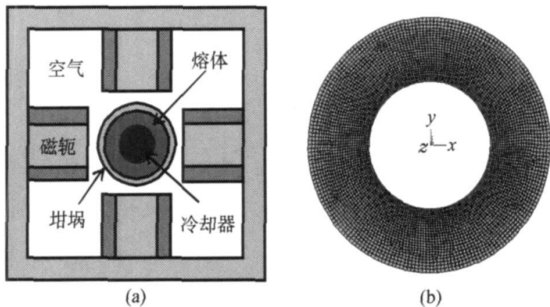


图 2 环缝式电磁搅拌物理模型(a)和熔体有限元模型(b)示意图
Fig.2 Physical model of A-EMS (a) and finite-element model of melt (b)

本文利用基于有限元法的 ANSYS10.0 软件,采用矢势法对该搅拌装置的谐波电磁场进行了数值模拟^[7-9],所有的材料均选用 Plane53 有限元单元,金属熔体为分析的重点,集肤效应区域可以通过控制剖分单位尺寸来进行精细划分,网格剖分如图 2(b)所示. 其他区域用 SMARTSIZE 进行智能剖分. 电磁场边界条件为:①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;②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^[9]. 计算过程中,认为铝合金熔体、不锈钢坩埚、线圈和硅钢片均为各向同性材料,且其相对磁导率为常数. 主要的电磁参数选定如下:不锈钢坩埚、铜线圈、冷却器和空气的相对磁导率为 1,铝合金熔体的相对磁导率为 8,硅钢片的相对磁导率为 2000,空气和硅钢片的电阻率为 0,铜线圈的电阻率为 $1.5 \times 10^{-7}\text{ }\Omega \cdot \text{m}$,不锈钢坩埚的电阻率为 $1.45 \times 10^{-6}\text{ }\Omega \cdot \text{m}$,石墨冷却器的电

阻率为 $8.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$, 铝合金熔体的电阻率为 $2.1 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$. 数值模拟计算流程图如图 3 所示.

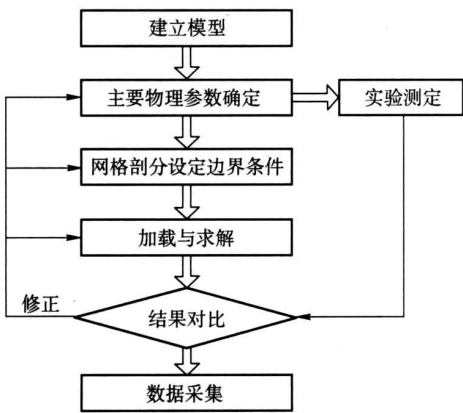


图 3 计算流程示意图
Fig.3 Schematic of the calculation procedure

2 计算结果

2.1 计算结果可靠性的验证

采用 CT3 型特斯拉计测量坩埚中心的磁感应强度. 测量条件: 电流强度 10 A, 频率分别取 5, 10, 20, 30, 40 及 50 Hz, 坩埚材质为奥氏体不锈钢, 坩埚内无铝合金熔体, 不加石墨冷却器. 然后把测量结果和计算结果进行对比, 如图 4 所示. 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 软件能基本描述出环缝式电磁搅拌装置的电磁场分布状况.

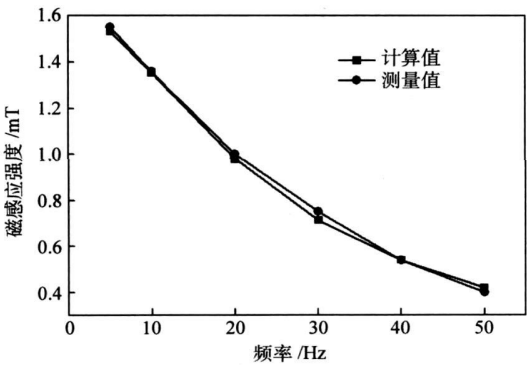


图 4 不锈钢坩埚中心磁感应强度计算结果与实验数据的比较
Fig.4 Comparison of magnetic flux density calculated and measured at the centre of the stainless steel crucible

2.2 环缝式电磁搅拌装置电磁场计算结果分析

图 5 是环缝宽度为 20 mm、搅拌电流为 30 A、频率为 10 Hz 时, 环缝式电磁搅拌装置中磁力线的分布图. 由图 5 可见, 在环缝式电磁搅拌装置中, 只有少量磁力线穿过冷却器. 这主要是因为冷却器材料的电阻率比铝合金熔体大, 磁力线选择电阻率小的

材料穿过. 图 6 为环缝式电磁搅拌装置中电磁力的分布图. 由图可见, 电磁力主要分布在冷却器的外部. 这充分利用了电磁搅拌过程中的集肤效应, 使合金熔体在电磁力比较大的部位旋转运动, 有利于获得好的搅拌效果. 而且在制浆室外尺寸相同条件下, 环缝使得被搅拌熔体的总量减少, 便于对其凝固过程进行精确控制.

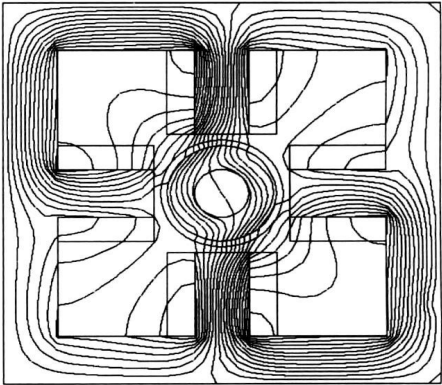


图 5 环缝式电磁搅拌装置中磁力线分布图
Fig.5 Distribution of magnetic flux lines

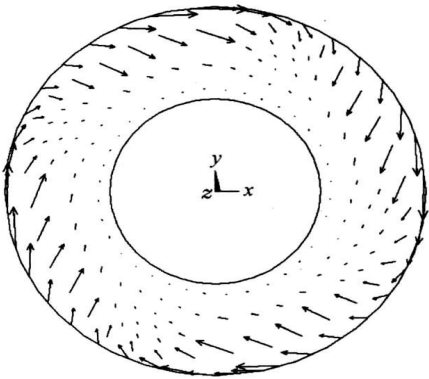


图 6 环缝式电磁搅拌装置中电磁力分布图
Fig.6 Distribution of electromagnetic force

2.3 频率对环缝式电磁搅拌装置磁感应强度的影响

在搅拌缝隙宽度为 20 mm, 电流 $I=10 \text{ A}$ 的情况下, 分别取 $f=5, 10, 20, 30, 40$ 及 50 Hz, 计算环缝式电磁搅拌装置中磁感应强度的大小. 选取不锈钢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沿坩埚半径方向上磁感应强度的变化如图 7 所示. 由图可见, 在半径方向上, 磁感应强度随频率的增大依次减小. 这与任兵芝等的结果是一致的^[10]. 频率一定的情况下, 冷却器所在的区域磁感应强度变化不大, 在铝合金熔体所在的区域中磁感应强度的大小变化明显. 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.

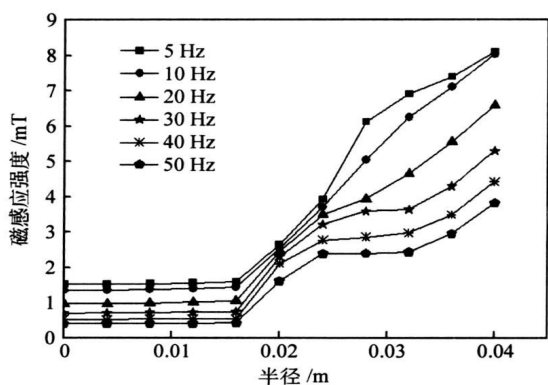


图 7 相同电流强度下磁感应强度随频率的变化规律

Fig.7 Effect of stirring frequency on the magnetic flux density at the same current

2.4 电流强度对环缝式电磁搅拌装置磁感应强度的影响

除了频率,搅拌电流强度是影响搅拌效果的另外一个重要参数.在搅拌缝隙宽度为 20 mm,频率 $f=10\text{ Hz}$ 的情况下,分别取电流 $I=10, 20, 30, 40$ 和 50 A 计算环缝式电磁搅拌装置中磁感应强度的大小.选取不锈钢坩埚中心到边部路径上的点进行分析,得到不同电流强度下沿坩埚半径方向上电磁搅拌装置中磁感应强度的变化如图 8 所示.由图可见,在半径方向上,磁感应强度随电流强度的增大依次增大.电流强度一定的情况下,冷却器所在的区域磁感应强度变化不大,在铝合金熔体所在的区域中磁感应强度的大小变化明显.这和上面的结果是一致的.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.

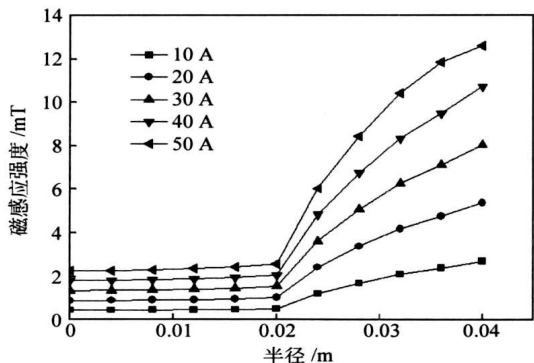


图 8 相同频率条件下磁感应强度随搅拌电流的变化规律

Fig.8 Effect of stirring current on the magnetic flux density at the same stirring frequency

2.5 坩埚材质对环缝式电磁搅拌装置磁感应强度的影响

在搅拌缝隙宽度为 20 mm、搅拌电流为 50 A、频

率为 10 Hz 时,选用不同材质坩埚对磁感应强度进行研究,其中铸铁坩埚的相对磁导率为 200,电阻率为 $5.0\times 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$.坩埚中各节点磁感应强度随半径的变化如图 9 所示.由图可见,选用三种不同的坩埚,由于铸铁坩埚的相对磁导率大,对磁通透入或削弱作用很强,磁通被铸铁坩埚所吸收,在熔体区域和冷却器所在的区域磁感应强度比选用铜合金和不锈钢都要低.在半径方向上,选用不锈钢坩埚各节点磁感应强度都要比选用铜合金坩埚大.这主要是因为不锈钢坩埚的电阻率比铜合金坩埚大,有利于减少涡流损失,提高电磁场的渗透深度,磁场的利用率高.因此在采用金属坩埚的条件下,材料的相对磁导率和电阻率是需要重点考虑的因素之一,通过选用不锈钢材料制作坩埚,能够大幅度地减小电磁场的涡流损耗,提高有效功率.

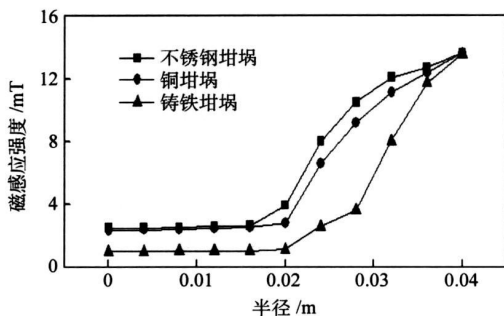


图 9 不同材质坩埚对磁感应强度的影响规律

Fig.9 Effect of crucible materials on the magnetic flux density

2.6 冷却器材质对环缝式电磁搅拌装置磁感应强度的影响

搅拌缝隙宽度为 20 mm 时,选用石墨冷却器、铜冷却器和铸铁冷却器进行模拟计算,其中铸铁冷却器的相对磁导率为 200,电阻率为 $5.0\times 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$.当搅拌电流为 50 A,频率为 10 Hz 时,选取不锈钢坩埚中心到边部路径上的点进行分析,得到各节点磁感应强度随半径的变化图 10 所示.由图可见,选用石墨冷却器在半径方向上磁感应强度比选用铜和铸铁冷却器都要大.在冷却器材质一定的情况下,在冷却器所在的位置磁感应强度变化不大,在铝合金熔体所在区域磁感应强度变化明显.磁感应强度和电磁力是成正比的,磁感应强度越大,金属熔体的搅拌效果越好.因此为了得到好的搅拌效果,应该选用石墨冷却器.

2.7 搅拌缝隙宽度对环缝式电磁搅拌装置磁感应强度的影响

搅拌缝隙宽度是不锈钢坩埚的内壁与冷却器外壁之间的环缝宽度.在频率 $f=50\text{ Hz}$ 、 $I=50\text{ A}$ 的情

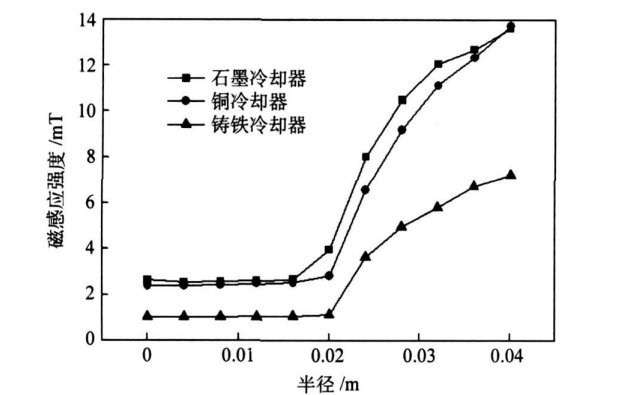


图 10 冷却器材质对磁感应强度的影响规律
Fig.10 Effect of cooler materials on the magnetic flux density

况下,分别插入 $\phi 20\text{ mm}$ 、 $\phi 40\text{ mm}$ 、 $\phi 60\text{ mm}$ 的三种石墨冷却器形成宽度为 30, 20 和 10 mm 的环缝,计算环缝式电磁搅拌装置中磁感应强度的大小. 选取不锈钢坩埚中心到边部路径上的点进行分析,得到不同环缝宽度下铝合金熔体在坩埚半径方向上磁感应强度的变化如图 11 所示. 由图可见,在铝合金熔体中插入冷却器影响了整个磁场的磁感应强度大小. 在冷却器所在的区域中,磁感应强度随半径的变化很小. 随着环缝宽度的减小,磁感应强度依次增大. 因此为了获得好的搅拌效果,应该选取尽量小的搅拌缝隙宽度.

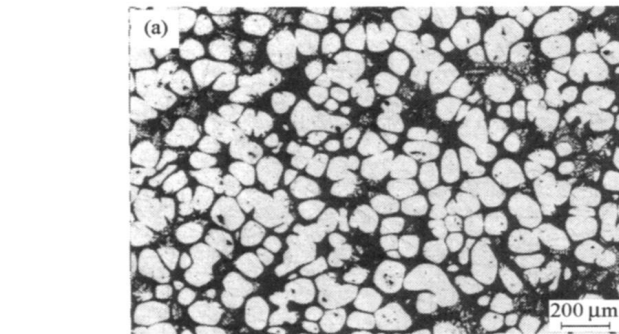


图 12 采用不同方法制备的 A357 铝合金半固态浆料的金相照片. (a) 普通电磁搅拌法; (b) 环缝式电磁搅拌法
Fig.12 Metallographic photos of A357 alloy semisolid slurry by different methods: (a) normal EMS; (b) A-EMS

磁搅拌装置初生相晶粒平均尺寸为 $49.1\text{ }\mu\text{m}$, 平均晶粒尺寸减小了 31%, 组织也更加均匀.

3 结论

- (1) 电磁场模拟结果与实验结果具有较好的一致性, 验证了计算模型与软件算法的可行性, 说明利用 ANSYS 软件能基本描述出环缝式电磁搅拌装置的电磁场分布状况.
- (2) 和普通电磁搅拌装置相比, 环缝式电磁搅拌装置中电磁力主要分布在冷却器的外部, 使合金

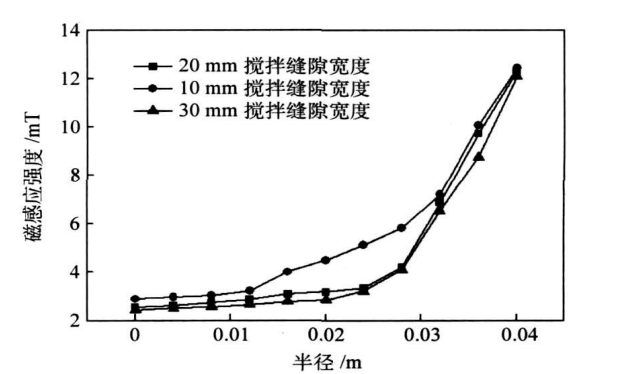
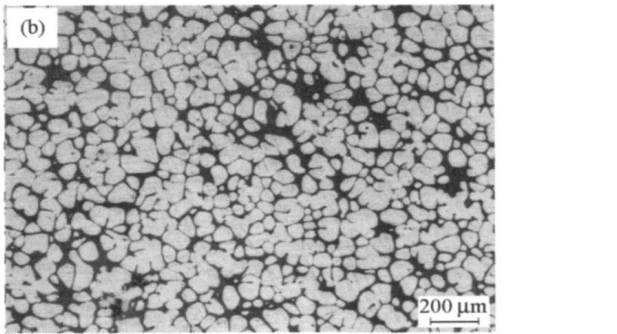


图 11 搅拌缝隙宽度对磁感应强度的影响规律
Fig.11 Effect of gap width on the magnetic flux density

2.8 实验验证

在相同的实验条件下(电流 $I=50\text{ A}$, 频率 $f=10\text{ Hz}$), 用普通电磁搅拌装置和环缝式电磁搅拌装置制备 A357 铝合金半固态浆料, 环缝式电磁搅拌装置中搅拌缝隙宽度为 20 mm. 把半固态浆料直接水冷得到金相试样, 在金相研磨抛光机上进行研磨和抛光, 在德国产 ZEISS 200MAT 型金相显微镜上进行观察和图像采集, 得到的金相照片如图 12 所示. 采用 Micro-image Analysis and Process System 软件测量初生相尺寸. 经过测量得到普通电磁搅拌装置初生相晶粒平均尺寸为 $71.2\text{ }\mu\text{m}$, 而环缝式电



- 熔体在电磁力比较大的部位产生旋转运动; 在相同的环缝宽度下, 环缝式电磁搅拌装置中磁感应强度随频率的增大依次减小, 随电流的增大依次增大; 同时, 选用不锈钢坩埚和石墨冷却器可以使环缝内铝合金熔体的磁感应强度获得最大.
- (3) 相同电流和频率条件下, 环缝式电磁搅拌装置中磁感应强度随着搅拌缝隙宽度减小而逐渐增大; 相同搅拌功率条件下, 环缝式电磁搅拌法较普通电磁搅拌法可以获得更加细小均匀的半固态组织, 平均晶粒尺寸减小 31%.

参 考 文 献

- [1] Zhang Z F, Li T J, Wen B, et al. Electromagnetic continuous casting by imposing multi-electromagnetic field. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10(6): 741
- [2] Tian Z F, Zhang Z F, Xu J, et al. The MSCP process for semi-solid slurry production // *9th International Conference Advanced Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. Korea, 2006: 362
- [3] Zhang Z F, Xu J, Shi L K. Study on multiple electromagnetic continuous casting of aluminum alloy. *Mater Sci Technol*, 2006, 22(4): 437
- [4] Zhang Z F, Tian Z F, Xu J, et al. Effect of multiple electromagnetic stirring on microstructure of A357 alloy. *Chin J Rare Met*, 2006, 30(2): 217
(张志峰, 田战峰, 徐骏, 等. 施加复合电磁搅拌对 A357 合金微观组织的影响. 稀有金属, 2006, 30(2): 217)
- [5] Kang C G, Bae J W, Kim B M. The grain size control of A356 aluminum alloy by horizontal electromagnetic stirring for rheology forging. *J Mater Process Technol*, 2007, 187/188: 344
- [6] Zhao Z D, Mao W M, Zhong R M. Preparation of semi-solid AlSi7Mg alloy slurry through traveling-wave electromagnetic stirring. *Chin J Mater Res*, 2008, 22(4): 369
(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. 材料研究学报, 2008, 22(4): 369)
- [7] Jia G L, Pang W C. *Electromagnetic Metallurgy Theory and Process*. Shenyang: Northeastern University Press, 2003
(贾光霖, 庞维成. 电磁冶金原理与工艺. 沈阳: 东北大学出版社, 2003)
- [8] Li G, Li H D. Simulation of the electromagnetic field in steel slabs based on the finite element method. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2004, 26(1): 95
(李光, 李华德. 利用有限元法对板坯电磁搅拌中电磁场的数值模拟. 北京科技大学学报, 2004, 26(1): 95)
- [9] Guo X F, Wang C Z, Zhang Y T, et al. The numerical simulation of magne to fluids in the course of semisolid slurry preparation of aluminum alloy. *Res Stud Foundry Equip*, 2007(1): 19
(郭晓凤, 王承志, 张玉妥, 等. 铝合金半固态浆料制备过程的电磁-流体数值模拟. 铸造设备研究, 2007(1): 19)
- [10] Ren B Z, Zhu M Y, Wang H D, et al. 3D numerical simulation of electromagnetic field and flow field in bloom continuous casting mold with electromagnetic stirring. *Acta Metall Sin*, 2008, 44(4): 507
(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. 金属学报, 2008, 44(4): 507)