

# 电磁场对 Al-18%Si 过共晶合金初晶 Si 相形貌的影响

Effects of Electromagnetic Field on Primary Si Phase of Hypereutectic Al-18%Si Alloy

黄立国, 付大军, 高志玉

(辽宁工程技术大学 材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

HUANG Li-guo, FU Da-jun, GAO Zhi-yu

(College of Materials Science and Engineering,

Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

**摘要:** 研究了交流电场、直流磁场和二者复合产生的电磁振荡对 Al-18% (质量分数) Si 过共晶合金初晶 Si 相形貌的影响。结果表明: 交流电场、直流磁场和电磁振荡都使合金初晶 Si 相的大小经历了一次细化过程, 交流电场使 Si 原子有序偏聚团的尺寸和数目发生改变, 增大形核率, 细化初晶 Si 相; 直流磁场通过电磁制动效应抑制了初晶 Si 相的形核与长大; 电磁振荡细化作用是通过减弱合金的成分过冷和温度梯度从而增大过冷度实现的。三者相比, 在电磁振荡的作用下初晶 Si 相更为细小。

**关键词:** 电磁振荡; 直流磁场; 交流电场; Al-Si 过共晶合金

**中图分类号:** TG146.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2010)01-0032-04

**Abstract:** The article is aimed to study the effects of alternating current (AC) electric field, the direct current magnetic field and the composition of both on the primary Si phase of the hypereutectic. The results show that AC field, the direct current magnetic field and electromagnetic vibration can all lead to the refining process of the size of the hypereutectic Al-Si alloy. AC electric field changes both the size and amount of silicon atom clusters, increases the nucleation rate, and refines the primary Si phase. The direct current magnetic field restrains the nucleation and growth of the primary Si phase through the effect of electromagnetic braking. The refinement of the electromagnetic vibration increases the degree of supercooling through weakening the constitutional supercooling of the alloy and the temperature gradient. Comparatively, the primary Si phase tends to be smaller under the effect of electromagnetic vibration.

**Key words:** electromagnetic vibration; direct current magnetic field; alternating current electric field; Al-Si hypereutectic alloy

在金属凝固过程中, 为了得到没有缺陷、晶粒细小、组织致密的产品, 可以通过孕育处理、强化对流及控制冷却速度等传统方法实现。近年来, 人们发现, 可以利用电磁场控制金属的凝固过程以获得优质的铸件, 电磁场可以单独利用电场和磁场, 也可以利用二者的复合场。单独施加电场能细化晶粒组织、提高铸件性能、影响凝固过程中的溶质再分配及固-液界面的稳定性, 并且能够排除气孔、减少有害杂质在机体中的分布, 得到有别于常规凝固条件下的组织。<sup>[1]</sup>

的研究表明, 电场使铸铁中的石墨变小, 抗拉强度提高了 30% 左右。Ahmed<sup>[2,3]</sup> 等人研究显示, 在 50~400 mA/cm<sup>2</sup> 的直流电场作用下高温合金的微观组织结

构有显著细化, 且降低了偏析和气孔率。Prodhan<sup>[4]</sup> 研究了连续电流对纯 Al 凝固行为影响的实验结果表明: 直流和交流电场都有助于铸件凝固宏观晶粒组织的细化, 并促进了柱状晶向等轴晶的转化。电场细化凝固组织是通过电迁移效应、起伏效应及 Joule 热效应等实现的。磁场的应用始于 20 世纪初期, 目前主要采用交变磁场和直流磁场两种形式。交变磁场的最显著作用是使晶粒细化, 利用它对金属液的搅拌作用改善冶金组织, Langenberg 等人<sup>[5]</sup> 报道了交流磁场下钢锭的晶粒得到明显细化。国内的朱明原<sup>[6]</sup>、毛卫民<sup>[7]</sup> 等的研究表明, 电磁搅拌能打碎 Al-Si 合金的树枝晶, 并且初生 Si 也明显细化, 分布均匀。近年来, 对电磁

复合场作用下的凝固过程研究也广泛展开,二者复合的重要形式是电磁振荡作用,电磁振荡作用也使铸锭组织变得更加细小和均匀<sup>[8]</sup>。过共晶 Al+Si 合金是一种重要的铸造合金,具备良好的综合性能,包括高比强度、耐磨、尺寸稳定性好及热膨胀低等,广泛应用于航空、航天及汽车制造等领域,制造活塞、汽缸衬套、连杆等汽车零部件。但是常规铸造过共晶 Al+Si 合金中的共晶 Si 和初晶 Si 相都非常粗大,割裂基体,严重损害了材料的力学性能。本工作通过研究电磁场对 Al-18% (质量分数,下同) Si 过共晶合金凝固组织的影响,试图细化 Al+Si 合金的凝固组织,提高合金的力学性能。

1 实验材料与方法

实验采用 99.7% 的工业纯 Al 和 99.3% 的工业纯 Si 配制成 Al-18% Si 过共晶合金作为实验材料,六氯乙烷精炼。在电阻炉中 700 ℃ 下保温 30min,熔炼后浇入预先制好的湿砂型型腔内,制得尺寸为 14mm×80mm 的试样,实验装置如图 1 所示。金属液凝固过程中施加的电流密度值(由电流值除以试样截面积而得)分别为 0, 19.5, 32.5mA/mm<sup>2</sup>,施加的磁感应强度分别为 0.023, 0.032, 0.049T,合金凝固过程中一直通有交流电或磁场。凝固后从试样的中间位置截取横截面,观察显微组织。

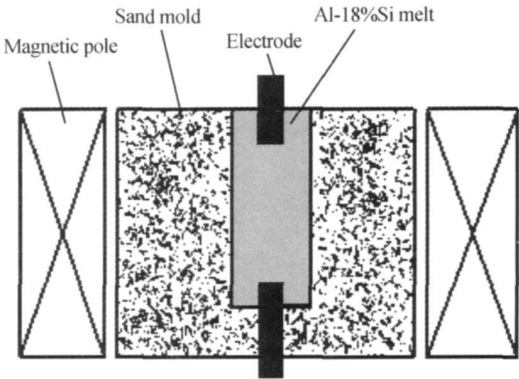


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

2 实验结果与分析

2.1 交流电场对初晶 Si 相的影响

过共晶 Al+Si 合金的力学性能取决于其显微组织中的初晶 Si 相、共晶体 Al+Si 相及空隙的形态大小、分布。常规条件及在电场作用下 Al-18% Si 过共晶合金的显微组织如图 2 所示,无电场作用时(图 2(a))组织中的共晶体 Al+Si 呈针片状,初晶 Si 相呈规则的多边形且较为粗大,这种组织对合金基体有较大的割裂作用,合金的塑韧性较低。电场作用对初生 Si 相的数量、形态以及大小产生了影响(图 2(b), (c)所示),初生 Si 相的形态发生了显著变化,尺寸减小且数量增

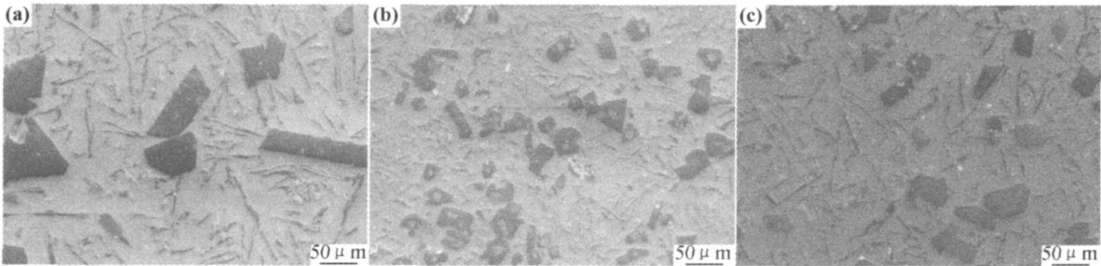


图 2 交流电场对 Al-18% Si 过共晶合金初晶 Si 相形貌的影响

(a)  $I = 0\text{ mA/mm}^2$ ; (b)  $I = 19.5\text{ mA/mm}^2$ ; (c)  $I = 32.5\text{ mA/mm}^2$

Fig. 2 Effects of AC electric field on the primary Si phase of Al-18%Si hypereutectic alloy

(a)  $I = 0\text{ mA/mm}^2$ ; (b)  $I = 19.5\text{ mA/mm}^2$ ; (c)  $I = 32.5\text{ mA/mm}^2$

加,组织形态密实、分布均匀,说明电场对初生 Si 相、共晶体 Al+Si 相起到一定的细化作用,并且随着电流密度的增加,初生 Si 相数量越多,当电流密度为 19.5mA/mm<sup>2</sup> 时合金组织细化最明显。

凝聚态物理学认为,Al+Si 合金熔体中存在 Al 和 Si 原子各自有序的偏聚团,它所占的体积比及大小、弥散性与熔体的过热温度、电磁搅拌、物理场处理有

关。交流电场作用在结晶温度附近的 Al+Si 合金熔体上,会使 Si 原子有序的偏聚团的尺寸和数目发生改变,影响液态金属形核率。一方面电场会使准固态原子集团周围电子云密度减小,从而降低了电子云对原子的屏蔽作用,使得这些原子集团不稳定;另一方面电子流对熔体中离子的电子电力提高了原子的活性并促进其扩散。这两方面将有可能使准固态原子集团裂解

成细小的原子集团, 促进晶核的大量生成, 增加凝固金属液的形核率。电场作用下形核率公式可表示为

$$I_e = I_0 \exp \frac{G + G_e}{K(T + J^2 \epsilon t (c)^{-1})} \tag{1}$$

式中:  $J$  为电流密度;  $\epsilon$  为材料的电阻率; 为熔体的密度;  $c$  为比热容;  $t$  为通电时间;  $G$  为最大形核热力学势垒;  $G_e$  为交流电场作用下形核热力学势垒变化值。由公式(1)可知, 当由于电流密度增加导致  $K[T + J^2 \epsilon t (c)^{-1}] > (G + G_e)$  时, 将引起形核率增加,

从而细化晶粒。

2.2 直流磁场对初晶 Si 相的影响

直流磁场作用下合金组织的演变如图 3 所示, 与无磁场作用相比, 随着磁感应强度的增加, 合金组织也经历了一次细化的过程, 由于所采用的直流磁场强度相近, 所以图 3(a) ~ (c) 显示的细化程度差别不是很明显。直流磁场对熔体无搅拌作用, 其细化机制不同于以往的采用交流磁场的情况, 初晶 Si 相的细化是由于电磁制动效应作用的结果。

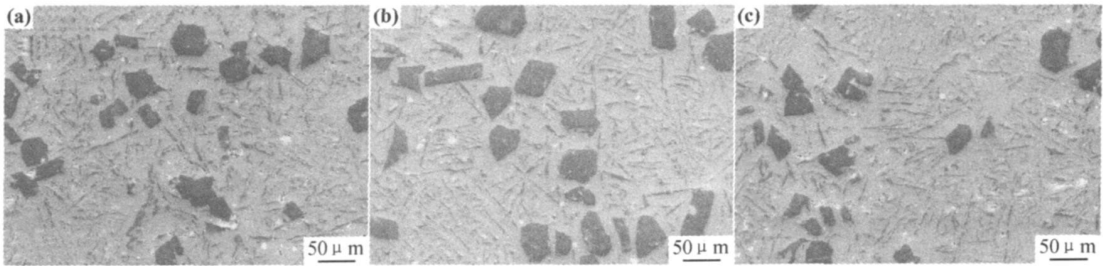


图 3 直流磁场对 Al-18% Si 过共晶合金初晶 Si 相形貌的影响

(a)  $B = 0.023\text{T}$ ; (b)  $B = 0.032\text{T}$ ; (c)  $B = 0.049\text{T}$

Fig. 3 Effects of direct magnetic field on the primary Si phase of Al-18% Si hyper-eutectic alloy

(a)  $B = 0.023\text{T}$ ; (b)  $B = 0.032\text{T}$ ; (c)  $B = 0.049\text{T}$

Al-18% Si 合金中, Si 含量较少, 故可把 Al 相看做是连续分布的, Si 相有序的偏聚团可作为自由粒子来处理。自由粒子沿着磁场中(强度为  $B$ ) 以速度  $v$  运动时, 磁场就会阻碍自由粒子的运动, 其运动的过程中将使周围熔体向两侧排开, 从而产生切割磁力线的运动(图 4), 产生洛伦兹力为

$$F = \sigma v B^2 \tag{2}$$

式中:  $\sigma$  为熔体的电导率;  $\sigma$  为熔体的磁导率。

自由粒子前方的熔体产生顺时针方向环形电流, 自由粒子后方的熔体产生逆时针方向环形电流。前方洛伦兹力指向环形电流的中心, 与合金熔体的流向相反, 阻碍其流动, 产生电磁制动效应, 从而约束自由粒子向前运动。后方洛伦兹力的方向背离环形电流的中心向外, 同样与合金熔体的流向相反而产生电磁制动效应, 后方的合金熔体不能迅速补充到自由粒子的下方, 从而对颗粒形成拖曳力<sup>[9]</sup>, 阻碍自由粒子的运动, 在前后两个限制熔体流动的洛伦兹力作用下, Si 相粒子的扩散将发生困难, 从而抑制初晶 Si 相的形核与长大过程。

2.3 复合场对初晶 Si 相的影响

由电磁理论可知, 在交流电场  $J$  与直流磁场  $B$  的复合作用下, 将产生一个随时间变化的力场(如图 5 所示), 其大小为

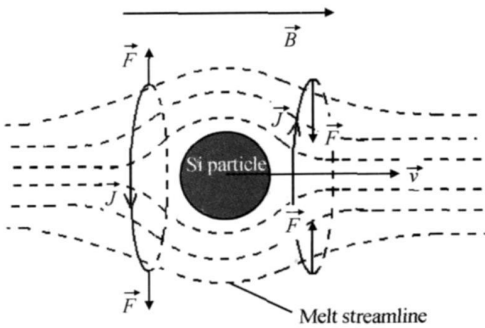


图 4 直流磁场下 Si 相粒子运动示意图

Fig. 4 Schematic of Si particle movement in direct magnetic field

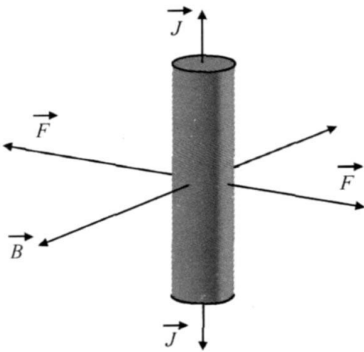


图 5 电磁振荡原理示意图

Fig. 5 Schematic of electromagnetic vibration

$$F = J \cdot B \quad (3)$$

该力方向在试样的径向摆动,在合金凝固过程中引入这个力场,驱动合金熔体而产生电磁振荡效应。在电磁振荡作用下合金的凝固组织如图 6 所示,与

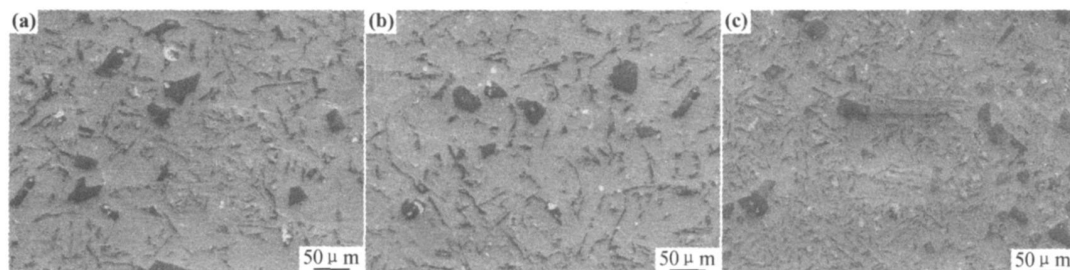


图 6 电磁振荡对 A+18%Si 过共晶合金初晶 Si 相形貌的影响

(a)  $I = 19.5 \text{ mA/mm}^2$ ,  $B = 0.049 \text{ T}$ ; (b)  $I = 32.5 \text{ mA/mm}^2$ ,  $B = 0.032 \text{ T}$ ; (c)  $I = 32.5 \text{ mA/mm}^2$ ,  $B = 0.049 \text{ T}$

Fig. 6 Effects of electromagnetic vibration on the primary Si phase of A+18%Si hypereutectic alloy

(a)  $I = 19.5 \text{ mA/mm}^2$ ,  $B = 0.049 \text{ T}$ ; (b)  $I = 32.5 \text{ mA/mm}^2$ ,  $B = 0.032 \text{ T}$ ; (c)  $I = 32.5 \text{ mA/mm}^2$ ,  $B = 0.049 \text{ T}$

以往的文献显示<sup>[10,11]</sup>,电磁振荡作用对合金凝固组织的细化作用是由于空化效应引起的,但是由于空化效应所需的临界电磁压力太大(约  $7 \times 10^4 \text{ Pa}$ )<sup>[8]</sup>,在本实验条件下,由于采用的电场与磁场均较小,空化效应难以发生。A+Si 合金熔体中存在 Si 原子的有序偏聚团微区作为潜在的形核质点存在,温度下降后此微区满足过冷度的要求,就以此为质点形核。在电磁振荡力的驱动下,合金熔体中产生强制对流,过热释放迅速,成分起伏和温度分布趋于均匀,初晶 Si 相固-液界面前沿的成分过冷和温度梯度被削弱,从而抑制了合金的形核与长大,合金熔体将被深度过冷,由金属凝固理论可知,过冷增加将引起 Si 原子的有序偏聚团数量的增加,从而形核质点增加,形核率增大,初晶 Si 相得到细化。同时,电磁振荡力对 A+18%Si 合金熔体具有反复拉伸和压缩作用,加剧了颗粒之间以及颗粒与液体之间的摩擦,其对晶粒的剪切力为

$$F = 6 \cdot (L/r)^3 \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为合金熔体的黏度;  $v$  为合金熔体的流动速度;  $L$  为晶粒长度;  $r$  为晶粒半径。该剪切力促使粗大多边形状的初晶 Si 相的薄弱处产生断裂,形成小尺寸的颗粒状形貌。

另外,在交流电场与直流磁场的作用下,由于交流电场增加形核率和直流磁场的电磁制动效应阻碍 Si 相粒子的迁移,也具有细化初晶 Si 相的作用,因此,在复合场的作用下, A+18%Si 合金组织的演变是多种因素综合作用的结果,正是由于多种因素的共同作用,才使得图 6 中的初晶 Si 相组织要比图 2、图 3 中的更细小。

常规凝固组织相比,初晶 Si 相的尺寸明显得到了细化,形状由原来粗大的多边形转变为颗粒状且弥散分布,这样的组织无疑对提高合金的力学性能是有利的。

### 3 结论

(1) 在交流电场的作用下, A+18%Si 合金中粗大的初晶 Si 相得到细化,其尺寸减小且数量增加。

(2) 在直流磁场的作用下, A+18%Si 合金中粗大的初晶 Si 相也经历了一次细化过程,且初晶 Si 相数量增加。

(3) 在电场振荡的作用下, A+18%Si 合金中初晶 Si 相发生明显的细化,初晶 Si 相尺寸显著减小,演变成细碎的颗粒状。

(4) 对比交流电场、直流磁场和电磁振荡对 Si 相形貌的影响,电磁振荡的细化效果最佳。

(5) 交流电场使 Si 原子有序偏聚团的尺寸和数目发生改变,增大形核率从而造成初晶 Si 相的细化;直流磁场的电磁制动效应阻碍了 Si 相粒子的迁移,抑制了初晶 Si 相的生长,从而细化合金中的初晶 Si 相;电磁振荡使 Si 相细化除了增大形核率和电磁制动效应抑制 Si 相生长作用外,还由于它产生的强制对流,削弱了固-液界面前沿的成分过冷和温度梯度,增大了合金凝固的过冷深度,从而细化 Si 相的尺寸。

### 参考文献

- [1] . [J]. , 1973, (2): 27- 29.
- [2] AHMED S, BOND R, MCKANNAN E C. Solidification processing superalloys in an electric field[J]. Adv Mater Proc, 1991, 10: 30- 38.

(下转第 41 页)

### 3 结论

(1) 在制备高锰含量 Mg-Mn 中间合金过程中, 锰颗粒的粒度大小对锰的平均含量有着显著影响, 而冷却方式对锰的均匀度有显著影响。

(2) 在本试验条件下, 电磁搅拌法制备 12% 含锰量 Mg-Mn 中间合金最佳工艺参数如下: 粉体粒度 150 ~ 68  $\mu\text{m}$ , 冷却方式铜模空冷, 保温时间 4min, 加热功率 10kW。

(3) 采用本最佳方案工艺参数, 成功制备了 Mg-12Mn 中间合金, 并成功地用于制备 MB1 合金, 其中 Mn 的收得率为 86.1%。

#### 参考文献

- [1] 刘正, 王越, 王中光, 等. 镁基轻质材料的研究及应用[J]. 材料研究学报, 2000, 15(5): 449- 455.
- [2] 范靖亚, 康广范. Mg-Y-Mn 合金高性能板材的研究[J]. 轻合金加工技术, 1994, 22(8): 45- 48.
- [3] SONG Guang-ling, ATRENS A. Corrosion mechanisms magnesium alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 1999, 1(1): 11- 33.
- [4] 汤启良. 中间合金的生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1959. 67- 68.
- [5] 汤妙香. 镁锰中间合金的制造方法[P]. 中国专利: 91108819. 9, 1991-09-11.
- [6] 刘正. 一种镁锰中间合金及其制备方法[P]. 中国专利: 03133459. 8, 2003-06-17.
- [7] GROBNER J, MIRKOVIC D, OHNO M, et al. Experimental investigation and thermodynamic calculation of binary Mg-Mn phase equilibria[J]. Journal of Equilibria and Diffusion, 2005, 26(3): 234- 239.
- [8] 江伯鸿. 材料热力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999. 134

- 135.

- [9] ROHATGI P K, ASTHANA R, YADAV R N, et al. Energetics of particle transfer from gas to liquid during solidification processing of composites [J]. Metall Trans, 1990, 21A: 2073- 2082.
- [10] ROHATGI P K, ASHANA R, DAS S. Solidification structures and properties of cast metal-ceramic particle composites [J]. Inter Mater Rev, 1986, 31(2): 115- 139.
- [11] 郝斌, 崔华, 蔡元华, 等. 搅拌铸造法制备金属基复合材料的热力学和动力学机制[J]. 稀有金属快报, 2005, 24(6): 22- 25.
- [12] POTTSCHKE J, ROGGE V. On the behaviour of foreign particles at an advancing solid-liquid interface [J]. Journal of Crystal Growth, 1989, 94(3): 726- 738.
- [13] 郑成琪, 雄书明. 复合材料凝固过程中的颗粒/界面行为数学模型[J]. 铸造设备研究, 2002, (1): 17- 19.
- [14] 王振东, 曹孔健, 何纪龙. 感应炉冶炼[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 15- 17.
- [15] KOLIN A. An electromagnetokinetic phenomenon involving migration of neutral particles [J]. Science, 1953, 117(3032): 134- 137.
- [16] 钟云波. 电磁力场作用下液态金属中非金属颗粒迁移规律及其应用研究[D]. 上海: 上海大学, 2000. 7- 8.
- [17] 陈建美, 张新明, 邓运来, 等. 镁合金熔炼的热力学[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2003, 37(3): 427- 432.

基金项目: 国家 863 重点项目(2008AA031203); 重庆市科技攻关项目(CSTC, 2007AB4019)

收稿日期: 2009-04-03; 修订日期: 2009-10-28

作者简介: 高家诚(1947 ), 男, 教授, 从事镁合金材料方面研究, 联系地址: 重庆市沙坪坝区重庆大学材料科学与工程学院(400045), E-mail: gaojch@cqu.edu.cn

通讯作者: 范科, 硕士研究生, 联系地址: 重庆市沙坪坝区重庆大学材料科学与工程学院(400045), E-mail: fanke\_524@163.com

(上接第 35 页)

- [3] AHMEDS, MCKANNAN E C. Control of morphology in nickel base superalloys through alloy design and densification processing under electric field[J]. Mater Sci Tech, 1994, 10: 941- 946.
- [4] PRODHAN A. Solidification of aluminum in electric field[J]. Metall Mater Trans, 2001, 32B: 372- 378.
- [5] LANGENBERG F C, PESTEL G, HONEYCUTT C R. Grain refinement of steel ingots by solidification in a moving electromagnetic field[J]. Trans Metall Soc AIME, 1961, 221: 993- 1001.
- [6] 朱明原, 史文, 杨森龙. 电磁搅拌作用对铝合金显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 1999, (S1): 29- 34.
- [7] 毛为民, 李树索, 赵爱民. 电磁搅拌 Al-24% Si 合金的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(10): 819- 823.
- [8] 张勤, 崔建忠, 路贵民, 等. 电磁振荡强度对半连铸 7075 铝合金微观组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 222- 226.

- [9] 余建波, 任忠鸣. 强磁场下电磁振荡对 AlSi 过共晶合金凝固中初生硅分布和形貌的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(9): 994- 998.

- [10] VIVES C. Effects of electromagnetic vibrations on the microstructure of continuously cast aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1993, A173: 169- 172.

- [11] VIVES C. Crystallization of aluminium alloys in the presence of cavitation phenomena induced by vibrating electromagnetic pressure [J]. Journal of Crystal Growth, 1996, 158(1): 118- 127.

基金项目: 辽宁工程技术大学优秀青年基金资助项目(09-248)

收稿日期: 2009-01-06; 修订日期: 2009-11-17

作者简介: 黄立国(1979 ), 男, 讲师, 工学硕士, 主要从事金属电磁凝固方面的研究, 联系地址: 辽宁阜新辽宁工程技术大学材料科学与工程学院(123000), E-mail: liguoh@126.com