

# 旋转磁场对铸造 Al-Si 合金凝固组织及硬度的影响

张雷<sup>1</sup>, 康凯娇<sup>2</sup>, 石德全<sup>2</sup>

(1. 东北轻合金有限责任公司熔铸厂, 黑龙江哈尔滨 150060; 2. 哈尔滨理工大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:** 以Al-7Si-0.45Mg合金为研究对象, 通过控制变量法分别研究了旋转磁场激励电压、磁场频率、磁场换向时间间隔对亚共晶Al-Si合金凝固组织和硬度的影响。结果表明: 当旋转磁场激励电压为90 V、旋转磁场频率为170 Hz、旋转磁场换向时间间隔为15 s时, Al-7Si-0.45Mg合金组织更加均匀, 晶粒更加细小, 合金的力学性能更好。

**关键词:** 旋转磁场; 铸造Al-Si合金; 凝固组织; 硬度

由于铸造Al-Si系合金具有高强高韧性、较低的热膨胀系数、优良的机械加工性能和铸造性能等优点, 已经被广泛应用于制造汽车或中小型内燃机的活塞、汽缸等<sup>[1]</sup>。铸造Al-Si系合金的凝固组织主要由初生 $\alpha$ -Al和共晶Si两相组成, 合金的力学性能主要取决于合金凝固组织中共晶Si相的分布和形貌, 由于合金的基体被Si相严重割裂, 所以合金的力学性能被严重削弱<sup>[2-4]</sup>。改善合金凝固组织中Si相的形貌和分布成为了改善及提高铝硅合金性能的主要方法, 通过将电场、磁场等施加于合金的凝固过程中来细化合金的组织, 是最近发展起来的细化合金凝固组织的技术<sup>[5-6]</sup>。

在Al-Si合金的制备过程中施加旋转磁场, 通过旋转磁场对熔体产生的磁场搅拌作用来改善合金的性能。旋转磁场能够使合金中非金属夹杂物及气泡上浮, 从而降低合金内部气泡及夹杂物的含量, 提高合金的纯净度; 旋转磁场可以加强金属熔体的对流运动, 有利于打碎枝晶, 从而形成等轴晶, 提高合金的等轴晶率; 还可以减少合金中心偏析、缩松和缩孔, 改善合金的凝固组织<sup>[7-9]</sup>。本文对Al-7Si-0.45Mg合金凝固过程中施加旋转磁场, 通过微观观察、成分分析和硬度测试等方法分别研究旋转磁场激励电压、旋转磁场频率、旋转磁场换向时间间隔对合金凝固组织和硬度的影响。

## 1 试验材料与方法

材料选用含铝量99.97%的工业纯铝、Al-12Si合金和含镁量99.99%的镁锭, 按照GB/T15115—2009进行配料, 合金的具体成分(质量分数)为6.95% Si、0.45% Mg、0.12% Ti、0.06% Be。试验选用树脂砂型, 砂型型腔尺寸为 $\Phi 32$  mm  $\times$  180 mm, 将制好的砂型置于160 °C的电阻炉中烘干备用。将烘干的Al-12Si合金和纯铝放入坩埚中, 在750 °C电阻炉待其熔化后加入纯镁, 待合金完全熔化后加入C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>进行除气精炼, 扒渣后静置10 min, 使固体夹杂物与金属液充分分离。设定浇注温度为720 °C, 然后将金属液浇入到置于线圈中的砂型中, 同时打开旋转磁场发生装置, 向金属液中施加不同试验条件的旋转磁场, 直至金属液冷却凝固。

试验中的旋转磁场由3.3 kW三相异步电动机线圈、380 V三相变压器、380 V三相变频器组成。首先将380 V三相交流电接入380 V三相变频器, 380V三相变频器输出端连接380 V三相变压器, 变压器的输出端连接电动机线圈输入端。通过变频器和

作者简介:

张雷(1978-), 男, 工程师, 主要从事铝合金熔铸工艺开发工作。E-mail: dc7539700@163.com

通讯作者:

石德全, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: shidequan2008@163.com

中图分类号: TG244

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)12-1385-06

收稿日期:

2021-04-13 收到初稿,

2021-05-13 收到修订稿。

变压器控制电动机线圈产生不同频率、不同场强的电磁场。试验装置示意图如图1所示。

试验通过控制变量法分别研究了旋转磁场频率、激励电压、换向时间间隔对Al-7Si-0.45Mg合金凝固组织及硬度的影响。具体试验方案如表1所示。将浇注好的合金试棒截取硬度试样，每个试样的硬度值取8个点维氏硬度值的平均值。利用OLYMPUS-GX71金相显微镜来观察不同旋转磁场参数的Al-7Si-0.45Mg合金凝固组织。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 旋转磁场激励电压对合金凝固组织和性能的影响

为了研究旋转磁场激励电压对Al-7Si-0.45Mg合金凝固组织的影响，将施加旋转磁场的合金的铸态组织与未施加旋转磁场的进行比较，其显微组织如图2所示。图2a为Al-7Si-0.45Mg合金未施加旋转磁场凝固后的铸态组织，可以看出，组织主要由片状或块状和一些长针状的共晶硅组成，杂乱分布在 $\alpha$ -Al基体上。从图2b-g为施加旋转磁场后的显微组织，可以看出，在局部分布的少量的共晶硅枝晶杆出现细化现象，部分由粗长条状逐渐变为长针状，在 $\alpha$ -Al基体上分布更均匀。图2g中共晶硅相的分布开始有序，且二次枝晶开始变细，共晶硅分布有一定的取向性，枝晶间的近球状组织体积增大且形貌近似等轴晶，部分共晶硅被打断成链状，并杂乱地分布在 $\alpha$ -Al基体上<sup>[10-11]</sup>。

图3为不同旋转磁场激励电压下Al-7Si-0.45Mg合金的硬度和晶粒尺寸。可以看出，随着旋转磁场激励电压的增加，Al-7Si-0.45Mg合金的硬度值呈先增加后

下降的趋势，在旋转磁场激励电压为90V时达到最大值，合金的组织得到细化。随着旋转磁场激励电压的增加，Al-7Si-0.45Mg合金的共晶硅由长针状变为细针状，共晶硅的平均晶粒尺寸从72  $\mu\text{m}$ 减小到55  $\mu\text{m}$ ，分布更加均匀。但是当电压值继续增加时，针状共晶硅的平均晶粒尺寸稍微增加。

将旋转磁场施加于合金的凝固过程中，合金熔体受到旋转磁场提供的洛伦兹力的影响，相同位置组元

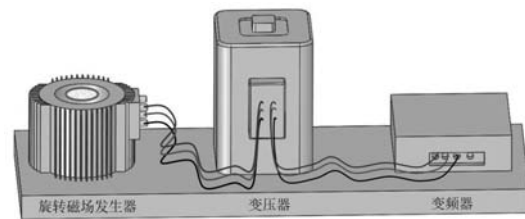


图1 旋转磁场试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the rotating magnetic field experimental setup

表1 旋转磁场凝固处理参数

Table 1 Solidification treatment parameters of the rotating magnetic field

项目	激励电压/V	频率/Hz	换向时间间隔/s
变量1	30, 50, 70, 90, 110, 130	50	15
变量2	90	20, 50, 100, 170, 260, 370	15
变量3	90	50	5, 15, 25, 35, 45, 55

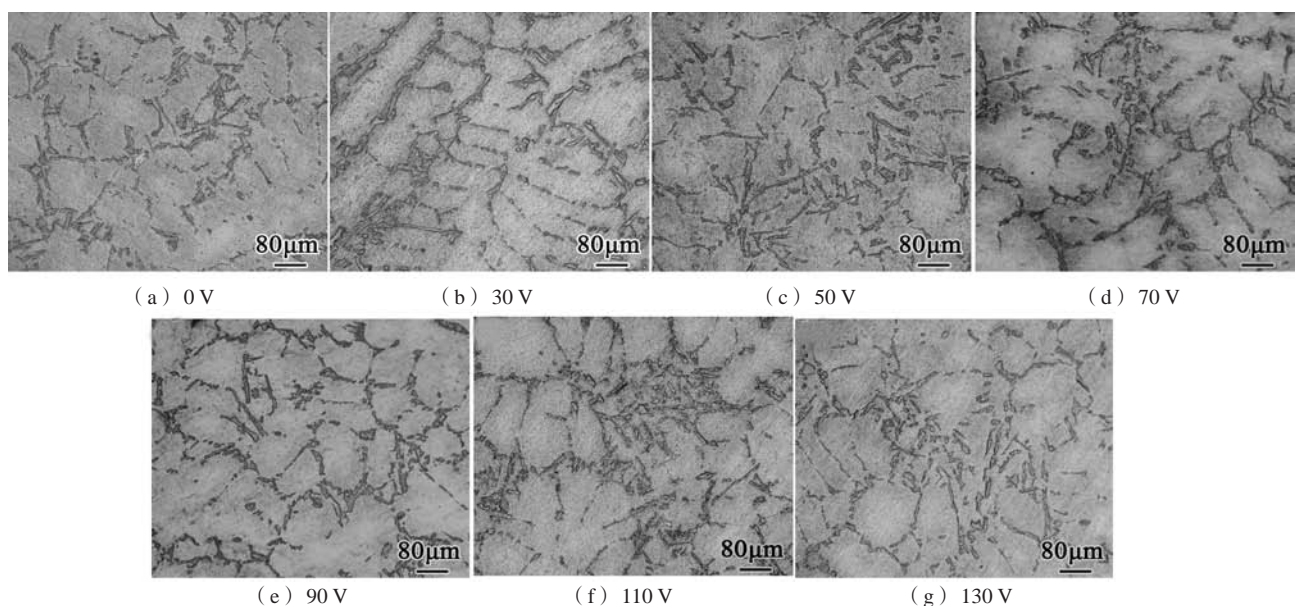


图2 旋转磁场激励电压对Al-7Si-0.45Mg合金显微组织的影响 (50 Hz, 15 s)

Fig. 2 Effect of excitation voltage of the rotating magnetic field on microstructure of the Al-7Si-0.45Mg alloy (50 Hz, 15 s)

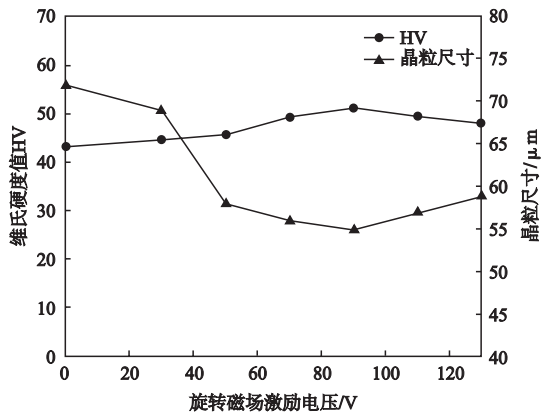


图3 旋转磁场激励电压对Al-7Si-0.45Mg合金硬度和晶粒尺寸的影响 (50 Hz, 15 s)

Fig. 3 Effect of rotating magnetic field excitation voltage on hardness and grain size of the Al-7Si-0.45Mg alloy (50 Hz, 15 s)

所受的力矩增大, 枝晶破碎程度增加, 晶粒细化程度更高。洛伦兹力与旋转磁场的激励电压呈正相关关系, 合金熔体的对流与洛伦兹力的大小同样呈正相关关系。合金熔体的对流越剧烈, 生长过程中的枝晶越容易被打断, 铸件的显微组织更均匀<sup>[12]</sup>。但是当磁场强度增大到一定数值时, 磁场的搅拌作用过于强烈, 细小的晶粒又被迫重新聚集在一起, 形成较为粗大的团块状晶粒。Al-7Si-0.45Mg合金在旋转磁场的激励电压从30 V增加到90 V, 合金组织中共晶硅组织得到细化。当旋转磁场的激励电压增加到110 V时, 共晶硅的晶粒反而变得粗大, 这说明旋转磁场存在一个最佳激励电压, 在一定范围内, 旋转磁场对合金的晶粒细化效果与旋

转磁场的激励电压呈正向关系, 即旋转磁场对合金晶粒的细化效果随着旋转磁场激励电压的增加而更加显著。

## 2.2 旋转磁场频率对合金凝固组织和性能的影响

合金Al-7Si-0.45Mg在旋转磁场激励电压为90 V、旋转磁场换向时间间隔为15 s的条件下, 改变旋转磁场的频率时, 合金的显微组织见图4。可以看出, 随着频率从20 Hz增加到170 Hz, 合金中粗大的块状和树枝状的共晶硅组织得到细化; 当旋转磁场频率超过170 Hz时, 共晶硅组织排布均匀性下降, 碎断枝晶减少, 对基体割裂作用增大。当施加的旋转磁场频率大于某个定值后, 会引发电磁搅拌和电磁振动效果过大, 导致最终的晶粒细化作用弱化。因此, 存在一个合适的旋转磁场频率使Al-7Si-0.45Mg合金凝固组织细化效果最佳。

图5为不同旋转磁场频率下Al-7Si-0.45Mg合金的硬度和晶粒尺寸。随着旋转磁场频率的增加, Al-7Si-0.45Mg合金的硬度值呈先增加后下降的趋势, 在旋转磁场频率为170 Hz时达到最大值。旋转磁场的强度与频率有关, 当旋转磁场频率逐渐增加, 随之获得的旋转磁场强度也增加, 对流作用和剪切作用增大, 从而抑制了晶粒的生长。因此, 当旋转磁场频率越大, 晶粒细化的越明显。从图4中可以看出, 当旋转磁场频率为20 Hz时, 晶粒尺寸较大, 主要原因是旋转磁场频率过低, 在合金熔体中引起的强制对流作用较弱, 晶核游离的数量较少, 因此形核数目较少; 当频率为170 Hz时, 合金组织更加均匀, 晶粒更加细小。但是当频率

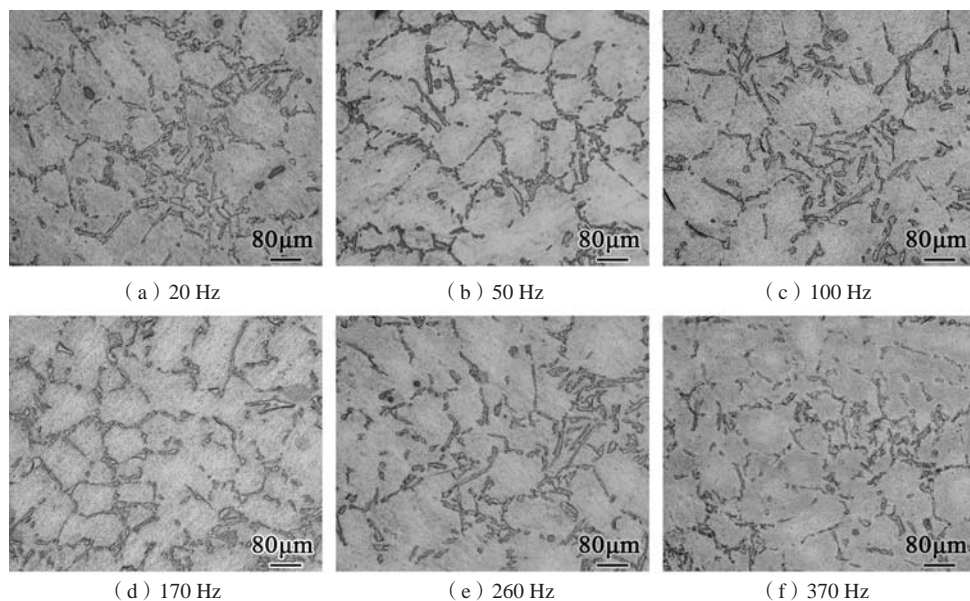


图4 旋转磁场频率对Al-7Si-0.45Mg合金显微组织的影响 (90 V, 15 s)

Fig. 4 Effect of rotating magnetic field frequency on microstructure of the Al-7Si-0.45Mg alloy (90 V, 15 s)

大于170 Hz以后,晶粒尺寸又开始变的粗大,这是由于集肤效应产生的结果<sup>[13]</sup>。

### 2.3 旋转磁场换向时间间隔对合金凝固组织和性能的影响

Al-7Si-0.45Mg合金在旋转磁场激励电压为90 V、旋转磁场的频率为50 Hz,改变旋转磁场换向时间间隔时,合金的显微组织见图6。可以看出,当旋转磁场换向时间间隔由5 s增加到55 s时,共晶硅晶粒的平均尺寸呈先减小后增加的趋势,在基体中的分布由聚集变得稀疏松散,当旋转磁场换向时间间隔为15 s时,合金的晶粒尺寸最细小,分布最均匀,对于铝基体割裂作用最小,从而保证了合金本身的性能。

图7为不同旋转磁场换向时间间隔下Al-7Si-0.45Mg合金的硬度和晶粒尺寸的影响。随着旋转磁场换向时间间隔的增加,Al-7Si-0.45Mg合金的硬度值呈先增加后下降的趋势,在旋转磁场换向时间间隔为15 s时达到最大值。从图6可以看出,随着换向时间的增加,合金组织逐渐变得细小均匀,当换向时间在15 s时,合金组织最均匀细小。随着换向时间的继续延长,晶粒有变粗大的趋势,但不是很明显。不同的旋转磁场换向时间间隔主要影响金属液的三维流动<sup>[14]</sup>。金属液受到洛伦兹力的作用,金属液在砂型内做复杂的三维流动,根据牛顿力学定律可以知道,当金属液大致沿一个方向运动时,具有一定的线速度,当洛伦兹力和由于金属液粘度而引起的摩擦力平衡时,这个线速度达到一定值。当旋转磁场方向瞬间改变时,洛伦兹力方向和金属液的线速度方向相反,金属液做减速运动。由于

三相异步电动机定子线圈结构特性,金属液不能同时受到相同力的作用,所以有一部分金属液仍然由于惯性沿原有路线继续运动。这就导致前后两部分金属液产生强烈的对流现象,使温度场分布更加均匀。旋转磁场的换向时间间隔越短,这种对流现象就越剧烈。强烈的对流虽然使温度场和成分变得均匀,但是换向时间间隔越长,在一定程度上使已经破碎的枝晶又重新聚集在一起,形成较大晶粒。

图8为铸态Al-7Si-0.45Mg合金的微观组织,通过SEM和EDS分析可知,Al基体上的针状及块状组织为共晶硅,凝固组织中没有层片状共晶硅。铝硅合金为非小平面-小平面不规则共晶,由于磁场激励电压很强,抑制自然对流,使Si原子浓度起伏变大,当合金熔

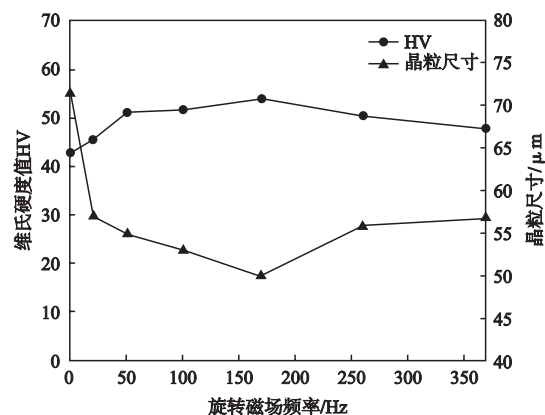


图5 旋转磁场频率对Al-7Si-0.45Mg合金硬度和晶粒尺寸的影响 (90 V, 15 s)

Fig. 5 Effect of rotating magnetic field frequency on hardness and grain size of the Al-7Si-0.45Mg alloy (90 V, 15 s)

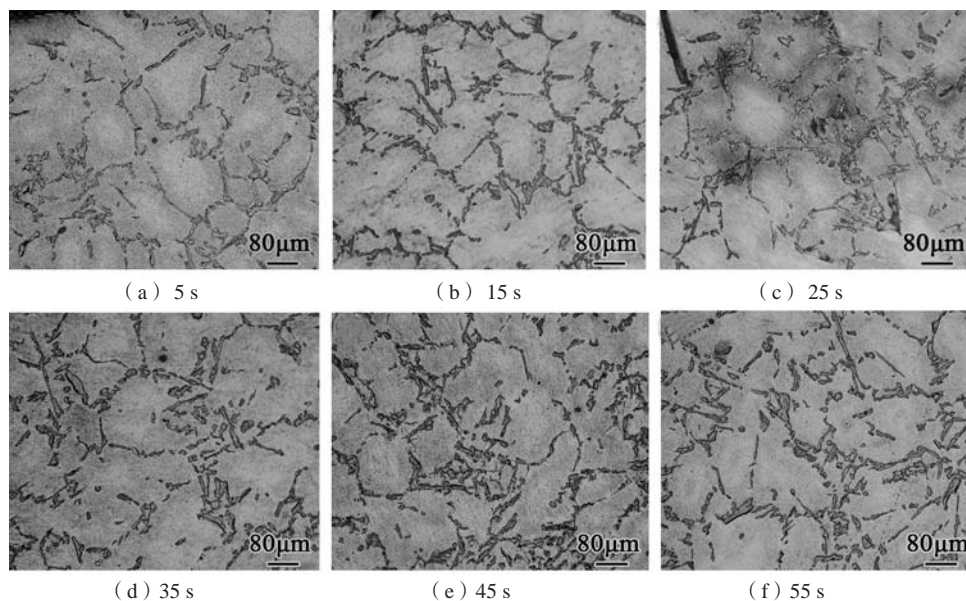


图6 旋转磁场换向时间间隔对Al-7Si-0.45Mg合金显微组织的影响 (90 V, 50 Hz)

Fig. 6 Effect of commutation time interval of rotating magnetic field on microstructure of the Al-7Si-0.45Mg alloy (90 V, 50 Hz)

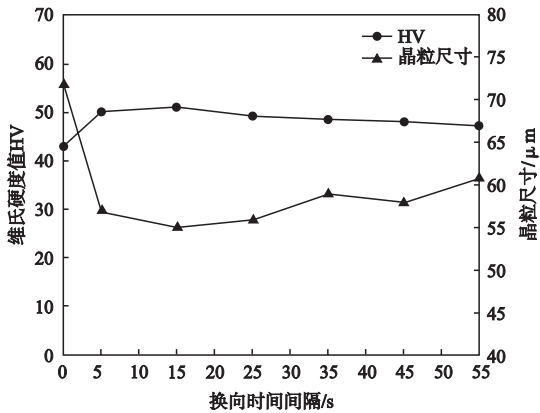
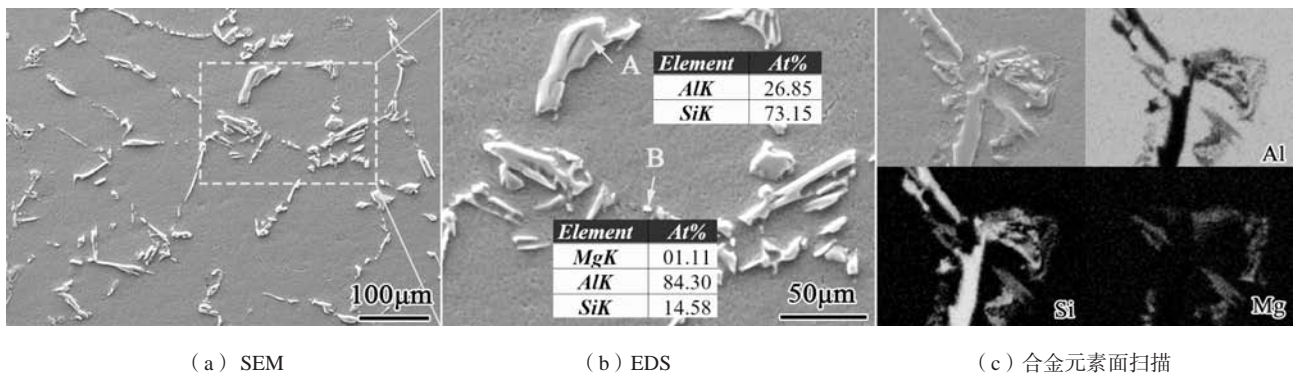


图7 旋转磁场换向时间间隔对Al-7Si-0.45Mg合金硬度和晶粒尺寸的影响 (90 V, 50 Hz)

Fig. 7 Effect of commutation time interval of rotating magnetic field on hardness and grain size of the Al-7Si-0.45Mg alloy (90 V, 50 Hz)

体冷却至亚共晶相生长时, 硅晶体就产生了更多的孪晶进行大角度分枝, 在Si原子的富集区长方向非常集中, 所以在硅晶体的局部富集区域就有了更为复杂的丛簇状的共晶硅。当洛伦兹力由旋转磁场感生, 洛伦兹力也具有交变特性, 即瞬时出现又瞬时消失, 在熔体中的不是恒定作用力, 而是具有一定周期的冲击作用力, 熔体将沿其轴线方向被反复压缩, 造成液态金属的震荡, 加强了对流作用, 洛伦兹力大于晶粒与型壁粘附作用力的时候, 该晶粒就会脱离型壁向铸件心部运动, 心部即增加了形核核心数目, 铸件组织变得致密。树枝晶不像等轴晶在各个方向上很均匀, 在弱面上的抗拉强度远低于沿轴线方向上的抗拉强度。在旋转磁场作用下, 树枝晶将沿其弱面折断和破碎, 成为细小晶粒, 这在一定程度上也增加了形核核心的数量。



(a) SEM

(b) EDS

(c) 合金元素面扫描

图8 Al-7Si-0.45Mg合金的SEM微观组织形貌和成分分析

Fig. 8 SEM microstructure morphology and EDS analysis of the Al-7Si-0.45Mg alloy

### 3 结论

(1) 在亚共晶铝硅合金的凝固过程中施加旋转磁场可显著改善合金的组织, 能够细化晶粒, 使合金组织分布均匀。

(2) 当旋转磁场激磁电压为90 V时, Al-7Si-0.45Mg合金组织中共晶硅组织得到细化。当旋转磁场频率为170 Hz时, 合金熔体中引起的强制对流作用较

强, 晶核游离的数量增加, 形核数目较多, 合金组织更加均匀, 晶粒更加细小。随着旋转磁场换向时间的增加, 合金组织逐渐变得细小均匀, 当换向时间在15 s时, 组织较为均匀细小。

(3) 改善Al-7Si-0.45Mg合金凝固组织的最佳旋转磁场参数为: 旋转磁场激磁电压90 V, 旋转磁场频率170 Hz, 旋转磁场换向时间15 s。

#### 参考文献:

- [1] 彭晋民, 钱翰城. 铸态铸造铝硅合金的现状和发展 [J]. 铸造技术, 2000 (6): 32-34.
- [2] 张伟强, 王小丽, 裴延玲. 电磁振荡对铝硅合金凝固组织的影响 [J]. 铸造, 2005, 54 (11): 1148-1149.
- [3] 杨玲玲. 电磁场对共晶铝硅合金组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (13): 79-81.
- [4] 李少博, 坚增运, 许军锋, 等. Al-Si合金的成分和其凝固收缩率与摩尔体积的关系 [J]. 铸造, 2015, 64 (7): 609-614.
- [5] 訾炳涛, 巴启先, 崔建忠, 等. 强脉冲电磁场对金属凝固组织影响的研究 [J]. 物理学报, 2000 (5): 1010-1014.
- [6] 贾鹏, 王恩刚, 鲁辉, 等. 电磁场对Inconel 625合金凝固组织及力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2013, 49 (12): 1573-1580.
- [7] 王建元, 陈长乐. 磁场作用下的金属凝固研究进展 [J]. 材料导报, 2006, 20 (5): 78-81.
- [8] 晋芳伟, 任忠鸣, 王晖, 等. 强磁场对Al-18Si合金凝固组织的影响及其机理研究 [J]. 材料工程, 2005 (4): 30-32.
- [9] 屈淑维. 稳恒磁场及直流电场对铝硅合金凝固过程及组织性能的影响研究 [D]. 太原: 中北大学, 2009: 10-42.

- [10] LI Run-xia, LI Rong-de, ZHAO Yu-hua, et al. Effect of heat treatment on eutectic silicon morphology and mechanical property of Al-Si-Cu-Mg cast alloys [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2004, 14 (3): 496-500.
- [11] 连峰, 李廷举. 磁场对铝硅合金凝固组织和变质处理的影响 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 30-103.
- [12] 赵玉谦, 秦绪军, 陈文斌. 电磁场下亚共晶铝硅合金组织和性能的研究 [J]. *铸造*, 2012, 61 (10): 1116-1119.
- [13] 赵明欣. 电磁场对铝硅合金铸造组织和性能影响的研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009: 17-45.
- [14] VIVES C. Elaboration of semisolid alloys by means of new electromagnetic rheocasting processes [J]. *Metall Trans*. 1992, 23B (3): 189.

---

## Effect of Rotating Magnetic Field on Solidification Microstructure and Hardness of Casting Al-Si Alloy

ZHANG Lei<sup>1</sup>, KANG Kai-jiao<sup>2</sup>, SHI De-quan<sup>2</sup>

(1. Melting and Casting Plant, Northeast Light Alloy Co., Ltd, Harbin 150060, Heilongjiang, China; 2. School of Materials Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

### Abstract:

Taking Al-7Si-0.45Mg alloy as the research object, the effects of the excitation voltage, frequency and commutation time interval of rotating magnetic field on the solidification microstructure of hypoeutectic Al-Si alloy were studied by the variable controlling method. The results show that when the exciting voltage was 90 V, the frequency was 170 Hz, and the commutation time interval was 15 s, the microstructure of the Al-7Si-0.45Mg alloy was more uniform, the grains were finer, and the mechanical properties of the alloy were better.

### Key words:

rotating magnetic field; casting Al-Si alloy; solidification microstructure; hardness

---