



## 电磁分离高硅铝硅合金制备低硅铝硅合金

张玉峰, 吕国强\*, 马文会\*, 雷云, 何云飞, 谢广杰

(昆明理工大学冶金与能源工程学院, 复杂有色金属资源清洁利用省部共建国家重点实验室, 真空冶金国家工程实验室,  
云南省高校硅冶金材料工程技术研究中心, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 在不考虑杂质元素的情况下研究了含铝45wt%的铝硅合金熔体电磁分离过程中电流频率、下拉速度、保温温度及坩埚材质对初晶硅相分离效果的影响。结果表明, 在电流频率3 kHz、保温温度1000℃、下拉速度10 μm/s的条件下, 以石墨坩埚为容器, 可使合金的硅铝质量比降至0.0939。保温温度对合金中硅的去除影响最大, 相同条件下1500℃时合金硅铝质量比为0.11439; 低频交变电流能强化电磁搅拌从而加强传质, 降低下拉速度对降低合金中硅含量有一定作用, 且可使分离界面更平坦。

**关键词:** 一次铝硅合金; 电磁分离; 硅铝比

中图分类号: TF821

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)03-0582-08

## Preparation of Low-silicon Aluminum Alloy from High-silicon Aluminum Alloy Melts by Electromagnetic Separation Process

Yufeng ZHANG, Guoqiang LV\*, Wenhui MA\*, Yun LEI, Yunfei HE, Guangjie XIE

(Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology,  
State Key Lab of Complex Nonferrous Metal Resources Cleaning Utilization, National Engineering Lab for Vacuum Metallurgy,  
Engineering Research Center for Silicon Metallurgy and Silicon Materials of Yunnan Provincial Universities,  
Kunming, Yunnan 650093, China)

**Abstract:** The effects of current frequency, pull-down velocity, holding temperature and crucible materials on the separation efficiency of Al-Si alloy with 45wt% Al were studied which the impurity elements were not considered. The results showed that the mass ratio of silicon to aluminum reduced 0.0939 by using graphite crucible as the container under the conditions of current frequency of 3 kHz, holding-temperature of 1000℃ and pull-down velocity of 10 μm/s. Holding-temperature had the biggest effect on the removal of silicon in the alloy, under the same conditions, the mass ratio of Si to Al in alloy was 0.11439 at 1500℃. The low frequency alternating current strengthens the electromagnetic stirring to enhance the mass transfer. Reducing the pull-down velocity had an effect on reducing the silicon content in the alloy and can make the separation interface more flat.

**Key words:** coarse aluminum-silicon alloy; electromagnetic separation; ratio of silicon to aluminum

### 1 前言

铝是用途十分广泛且经济的材料之一, 铝硅合金因其密度小、膨胀系数低、比强度高、优秀的机械性能被广泛应用于航空、汽车和船舶制造业<sup>[1]</sup>。世界上每年原铝产量超过58.3 Mt<sup>[2]</sup>, 其中很大部分的金属铝用于生产铝硅合金。随铝硅合金中硅含量增加, 合金凝固温度增加、铸造性能下降、切削加工性能变差, 硅含量超过25wt%的高硅铝硅合金很难直接用于工业生产<sup>[3]</sup>。目前

制备标准型号铝硅合金的方法主要有熔配法、熔盐电解法和电热法<sup>[4-6]</sup>, 其中电热法是主要生产方法。该法以铝土矿或其它硅酸盐矿物为原料, 以煤为还原剂, 用电弧炉制得一次铝硅合金。一次铝硅合金硅含量过高(28%以上), 掺兑纯铝成为降低平均硅含量的主要手段, 不可避免地延长了工艺流程, 增大了能耗<sup>[6]</sup>。

为提高一次铝硅合金品质已做了大量研究<sup>[7-9]</sup>, 取得了一定效果, 但都没能直接将硅从一次铝硅合金中“拿”出来, 避免纯铝掺兑造成的问题。

收稿日期: 2017-09-22, 修回日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51466005)

作者简介: 张玉峰(1991-), 男, 内蒙古赤峰市人, 硕士研究生, 热能工程专业, Tel: 1813835221, E-mail: 944182472@qq.com; 通讯联系人, 吕国强, Tel: 15925198310, E-mail: lvguoqiang\_ok@aliyun.com; 马文会, E-mail: mwhsilicon@126.com

**引用格式:** 张玉峰, 吕国强, 马文会, 等. 电磁分离高硅铝硅合金制备低硅铝硅合金. 过程工程学报, 2018, 18(3): 582-589.

Zhang Y F, Lv G Q, Ma W H, et al. Preparation of Low-silicon Aluminum Alloy from High-silicon Aluminum Alloy Melts by Electromagnetic Separation Process (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(3): 582-589, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217340.

根据铝硅二元相图，高硅铝硅合金凝固过程中，初晶硅率先在铝硅共晶点熔点温度以上析出。若能使先析出的初晶硅在固定区域富集并将其切除，就可降低剩余铝硅合金的硅含量。

硅和铝原子在电磁场中会被洛伦兹力带动，从铝硅熔体中向凝固界面运动，到达凝固界面时，因硅的熔点高于铝，硅率先凝固析出，而铝因其熔点低于凝固界面温度会被带回熔体中，从而实现分离<sup>[10-13]</sup>。Nishi 等<sup>[14]</sup>证明生长速度与扩散系数和温度梯度成正比，并建立了数学表达式。Xue 等<sup>[15]</sup>在此基础上进行了改进。只有生长速度大于凝固速度，初晶硅才能在被凝固界面吞没前形核并连续生长，达到分离的目的。利用该原理可以从一次铝硅合金中将硅除去，获取低硅铝硅合金，同时产出的初晶硅可在一端富集，成为高价值附加产品。近年来电磁定向凝固主要用于高纯硅的精炼<sup>[16-18]</sup>。

本研究采用电磁分离技术直接分离电热法生产的一次铝硅合金，使初晶硅在一端富集并切除，获得 Si 含量较低的铝硅合金，避免纯铝掺兑造成的工艺流程延长、能耗增加等问题。主要对不同分离条件下剩余合金部分的硅含量、微观结构等进行了分析，并获取了最佳分离条件。

## 2 实验

### 2.1 实验原料

一次铝硅合金的化学成分见表 1，实验时不考虑其中 Fe、Ca、Ti 等杂质元素的影响。实验用硅(湖南红太阳光电科技有限公司)和铝(中国冶金研究总院)的化学成分见表 2、3。将原料装入内径 28 或 18 mm 的坩埚内，于氩气气氛下在电阻炉内升温至 1500 ℃，熔配成硅含量 45wt% 的铝硅合金。

表 1 一次铝硅合金的化学成分

Table 1 The chemical composition of the coarse Al-Si alloy

Component	Si	Fe	Ti	Cu	Mg	Zn	Mn	Ca	Al
Content/wt%	25~28	4.3~7.0	0.7~1.0	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	1.5~2.3	>55

表 2 原料铝的化学成分

Table 2 The chemical composition of aluminum

Component	Al	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Others
Content/wt%	99.996	0.0010	0.0010	0.0015	0.001	0.001	0.001

表 3 原料硅的化学成分

Table 3 The chemical composition of silicon

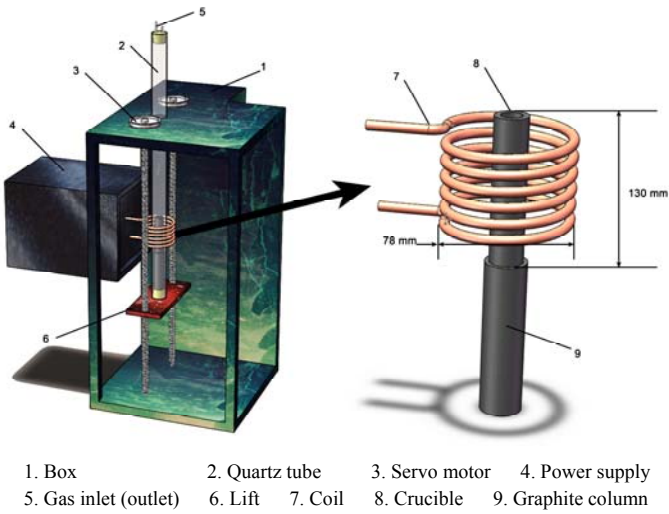
Component	Si	Fe	Al	Mg	B	P	Others
Content/wt%	99.98	0.0001	0.0002	0.0002	0.0005	0.0008	0.0182

### 2.2 实验设备与分析仪器

实验设备由电流频率分别为 30 和 3 kHz 的电磁定向凝固炉组成，示意图见图 1。分析仪器：JXA-8230 电子探针显微镜(EPMA-Mapping，日本电子 JXA 公司)，FEI-Nova Nano SEM 430 场发射电子显微镜(FE-SEM，美国 FEI 公司)。

### 2.3 实验方法

表 4 为实验方案。实验前将熔配好的铝硅合金(熔



1. Box 2. Quartz tube 3. Servo motor 4. Power supply  
5. Gas inlet (outlet) 6. Lift 7. Coil 8. Crucible 9. Graphite column

图 1 实验设备示意图

Fig.1 The schematic of the experimental system

表 4 实验方案

Table 4 The experimental conditions

Group	Holding-temperature/℃	Frequency/Hz	Pull-down velocity/(μm/s)	Crucible
A	1500	3	10	Graphite (28 mm)
		30		
B	1500	3	40	Graphite (28 mm)
			20	
C	1500	3	10	Corundum (18 mm)
				Graphite (18 mm)
D	1500	3	10	Graphite (28 mm)
	1300			
	1000			

点为 973 ℃)置于线圈中央,抽真空后充氩气,充气完成打开排气阀,持续通入氩气,避免高温时硅与氧气反应.控制功率升温至保温温度后保温 30 min. 设定伺服电机速度后开始下拉,待坩埚完全拉出线圈后自然冷却至室温. 样品经金刚线切割机切割后打磨抛光备用.

合金部分的微观结构用 FE-SEM 检测,元素含量用 EPMA-Mapping 检测.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 合金分离效果

采用交变电磁场对熔体进行电磁搅拌,采用定向凝固技术使初晶硅从铝硅合金中析出,获得有清晰分离界面的样品. 用合金部分中的硅/铝质量比表征分离效果,硅铝比越低,分离效果越好.

只经电阻炉熔化混合的硅含量 45wt%的铝硅合金的理论硅铝比约为 0.82,实测值为 0.85(平均 Al 含量为 41wt%,平均 Si 含量为 35wt%),二者接近. 图 2 为样品不同位置的微观结构,可见分离后样品从上到下可分为合金部分、分离界面及初晶硅富集部分,界面清晰.

对不同条件下初晶硅富集相与铝硅合金的分离界面(图 2 中曲线)进行分析. 理想情况下初晶硅呈单向生长,有整齐平坦的分界面,便于后续分离. 将分离界

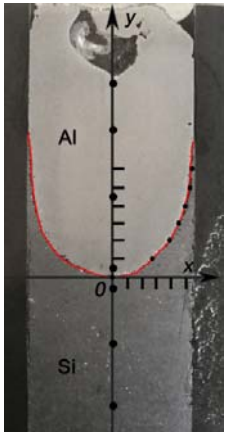


图 2 样品不同位置的微观结构  
Fig.2 Microstructure of sample

面最低点设为坐标原点、坩埚径向方向为  $x$  轴、轴向方向为  $y$  轴,建立直角坐标系,在界面上对称取 11 个点通过 Origin Pro 2015 软件进行拟合,获得界面参数方程,为二次曲线,方程如下:

$$y=x^2/2p, \tag{1}$$

系数 $(2p)^{-1}$ 的变化可直观定量描述分离界面的平坦程度.

#### 3.2 交变电磁场频率对合金分离的影响

传热传质过程对合金分离有重要作用. 在 1500 ℃、

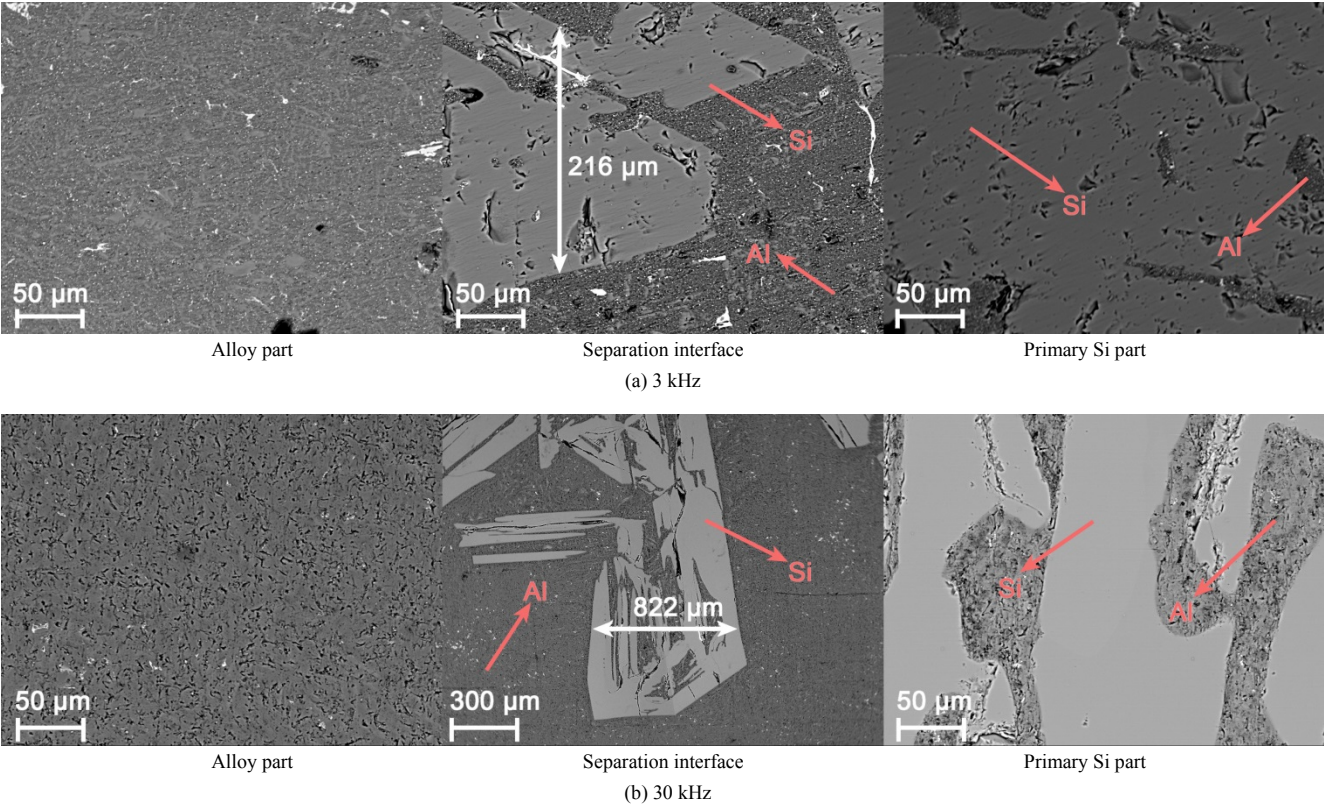


图 3 1500 ℃下不同电流频率分离的样品的背散射图  
Fig.3 BSE images of samples separation with different frequencies at 1500 ℃

氩气气氛下改变交变电磁场的电流频率, 分析驱动力对合金分离的影响, 结果如图3所示. 从图可以看出, 3 kHz 电流频率下分离后样品中析出的初晶硅比 30 kHz 下分离的样品更细密, 界面处初晶硅尺寸(216  $\mu\text{m}$ )远小于后者(822  $\mu\text{m}$ ), 初晶硅连续生长且致密, 夹杂的铝相也远少于后者.

对样品从上到下取 7 个点(图2纵坐标上黑点)进行能谱分析, 结果见图4. 电流频率 3 kHz 下分离界面(点4)处 Al 与 Si 浓度突变, 合金部分的 Si 含量为 27.79wt%~17.83wt% [图4(a)], 30 kHz 下 Al 和 Si 浓度均匀渐变, 合金部分的 Si 含量为 44.39wt%~17.36wt% [图4(b)].

根据法拉第电磁感应定律和焦耳-楞次定律, 电磁感应炉通过交变电流产生的变化磁场会在坩埚及合金内产生感应电流(即涡流)用于熔炼金属. 由于导体的集肤效应, 越靠近导体中心电流密度越低, 越靠近导体

表面电流密度越高, 如式(2)所示:

$$I_x = I_0 e^{-x/\delta}, \quad (2)$$

式中,  $x$  为表面到测量处的距离(cm),  $I_x$  为  $x$  处的电流密度(A/cm<sup>2</sup>),  $I_0$  为导体表面的电流密度(A/cm<sup>2</sup>),  $\delta$  为电流透入深度(cm), 计算如下:

$$\delta = (10^9 \rho / \mu_t f)^{1/2} / 2\pi = 5030 (\rho / \mu_t f)^{1/2}, \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为被加热物体的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ ),  $\mu_t$  为被加热物体的相对磁导率,  $f$  为电流频率(Hz).

可以看出, 随透入深度  $\delta$  增加, 电流密度  $I_x$  呈指数减少, 而  $\delta$  与电流频率成负相关. 因此, 电流频率越低穿透深度越大, 电磁力衰减越少, 即搅拌强度越高. 频率对搅拌强度的影响使低频率下的样品分离效果提高, 出现明显的分离界面. 强大的搅拌力使分离后合金部分的成分更均匀, 避免了大浓度梯度的产生.

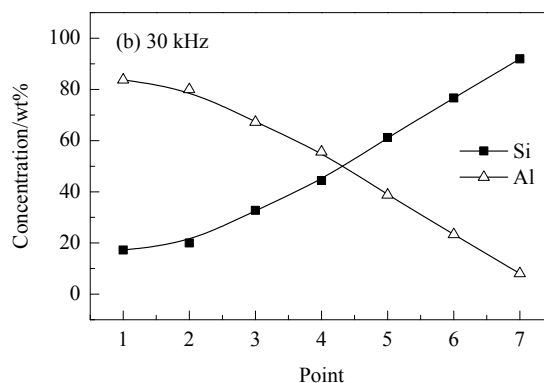
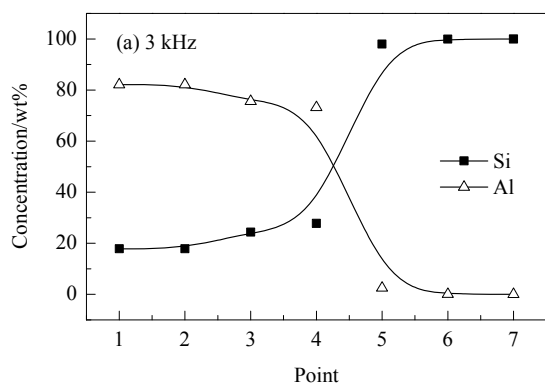


图4 电流频率 3 和 30 kHz 下 Si 和 Al 元素浓度的变化

Fig.4 Changes of Si and Al concentrations with frequency of 3 and 30 kHz

### 3.3 保温温度对合金分离的影响

在保温温度 1000、1300 和 1500  $^{\circ}\text{C}$  下以 10  $\mu\text{m/s}$  的速度下拉样品, 对分离后合金部分的硅相进行电子探针分析, 结果如图5所示. 可以看出, 保温温度为 1000  $^{\circ}\text{C}$  (接近合金熔点 973  $^{\circ}\text{C}$ ) 时, Si 相围绕 Al 相边缘呈树枝状分散析出; 保温温度升至 1500  $^{\circ}\text{C}$ , 析出的 Al 相不再均匀且面积减小. 从背散射图可以看出, 不同温度下合金部分的致密程度不同, 温度越高, 孔洞增加(背散射图片中黑色点状区), 保温温度为 1000  $^{\circ}\text{C}$  时几乎没有孔洞. 这是因为提高保温温度需加大功率, 熔体内的对流扩散加剧, 凝固时裹挟的气体无法及时排出而滞留在样品内部. Si 元素线扫描结果显示, 相同条件下合金部分 Si 相均匀析出, 且根据其浓度可知 Si 相均以合金形式存在.

分离后样品合金部分的硅铝比如图6所示. 从图可

以看出, 合金部分的硅铝比随保温温度降低而降低, 而高保温温度时样品内有较多孔洞, 更大程度影响低含量硅测定, 使所测硅含量下降, 从而降低样品的硅铝比. 综合比较, 当保温温度趋于熔点时, 相分离效果最好.

由成分过冷理论可知, 铝硅合金固液界面前沿液体的 Si 元素比全部液相中高, 从而在界面处产生过冷状态. 过冷度越大, 晶体生长时会出现更多枝晶, 同时也会提高晶体的非均匀形核率, 使晶体细化<sup>[19]</sup>. 此外, 金属熔体的热历史会使熔体结构发生不可逆变化. 铝硅合金在加热时, 提高过热度会使其过冷度增加, 当熔体达到最大过冷度后继续提高过热度, 会使熔体过冷度下降, 导致初晶硅晶体析出速度下降<sup>[20]</sup>. 因此, 1500  $^{\circ}\text{C}$  下初晶硅相由于较低的熔体过冷度导致析出速度过慢, 被“滞留”在合金中无法连续析出, 被搅拌作用打散, 导致合金部分硅浓度提高.



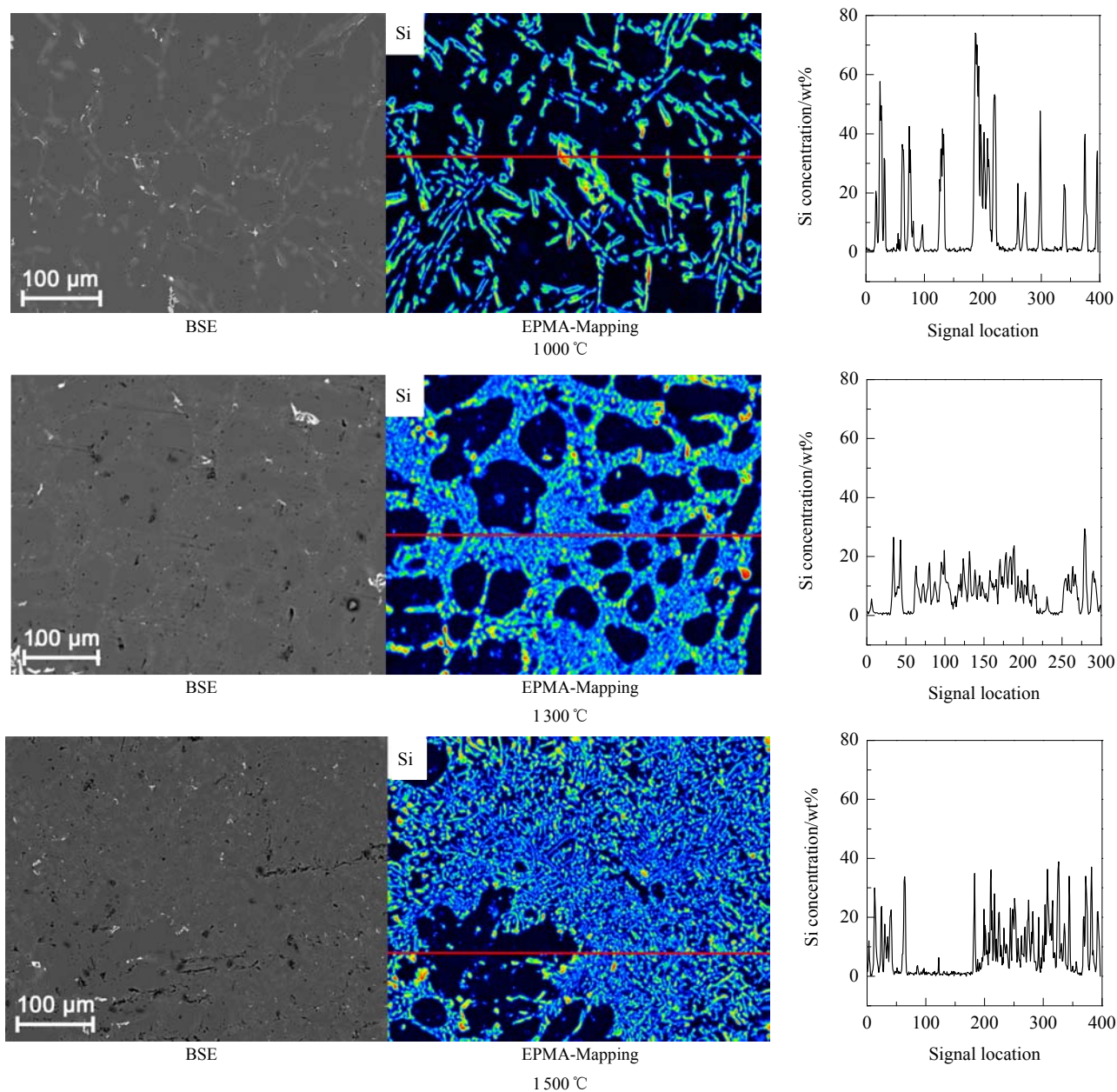


图 5 不同保温温度下合金的微观结构

Fig.5 Microstructure of alloys at different holding-temperatures

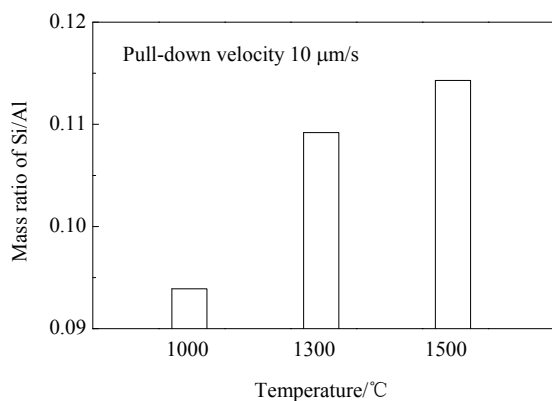


图 6 保温温度对合金部分硅铝比的影响

Fig.6 Ratio of Si/Al in alloy at different holding-temperatures

用如式(1)对不同保温温度下以  $10 \mu\text{m/s}$  速度下拉分离样品的分离界面进行拟合, 结果如图 7 所示. 图 7(b) 中  $x^2$  的系数  $(2p)^{-1}$  变化很小, 即界面几乎不受保温温度影响.

### 3.4 下拉速度对合金分离的影响

在保温温度  $1500^\circ\text{C}$  下, 分别以  $20$  和  $40 \mu\text{m/s}$  的速度下拉样品, 对分离样品上层合金部分作电子探针分析, 结果见图 8. 由图可以看出, 下拉速度为  $40 \mu\text{m/s}$  时, 硅相呈树枝状析出, 速度降低至  $20 \mu\text{m/s}$  时, 铝相大面积集中析出.

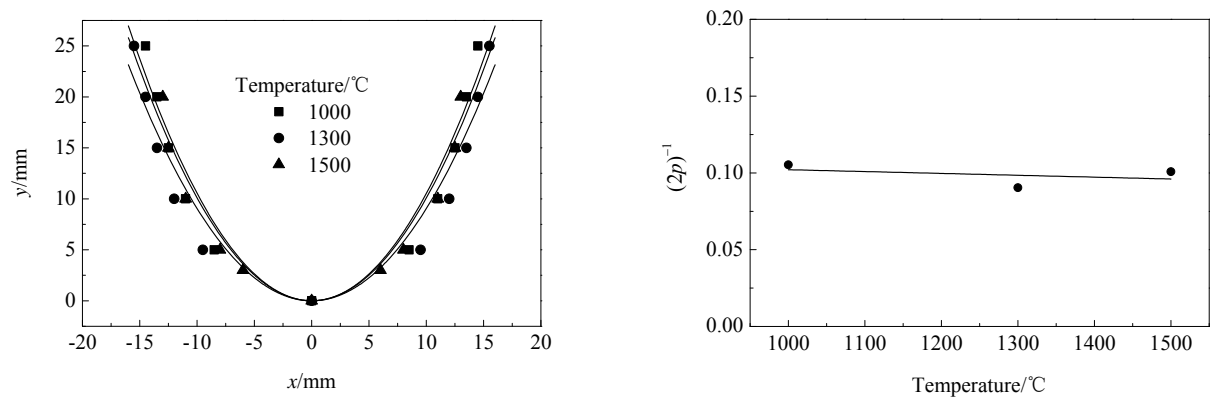


图 7 不同保温温度下样品分离界面的拟合曲线  
Fig.7 Fitting curves of separation surface at different holding-temperatures

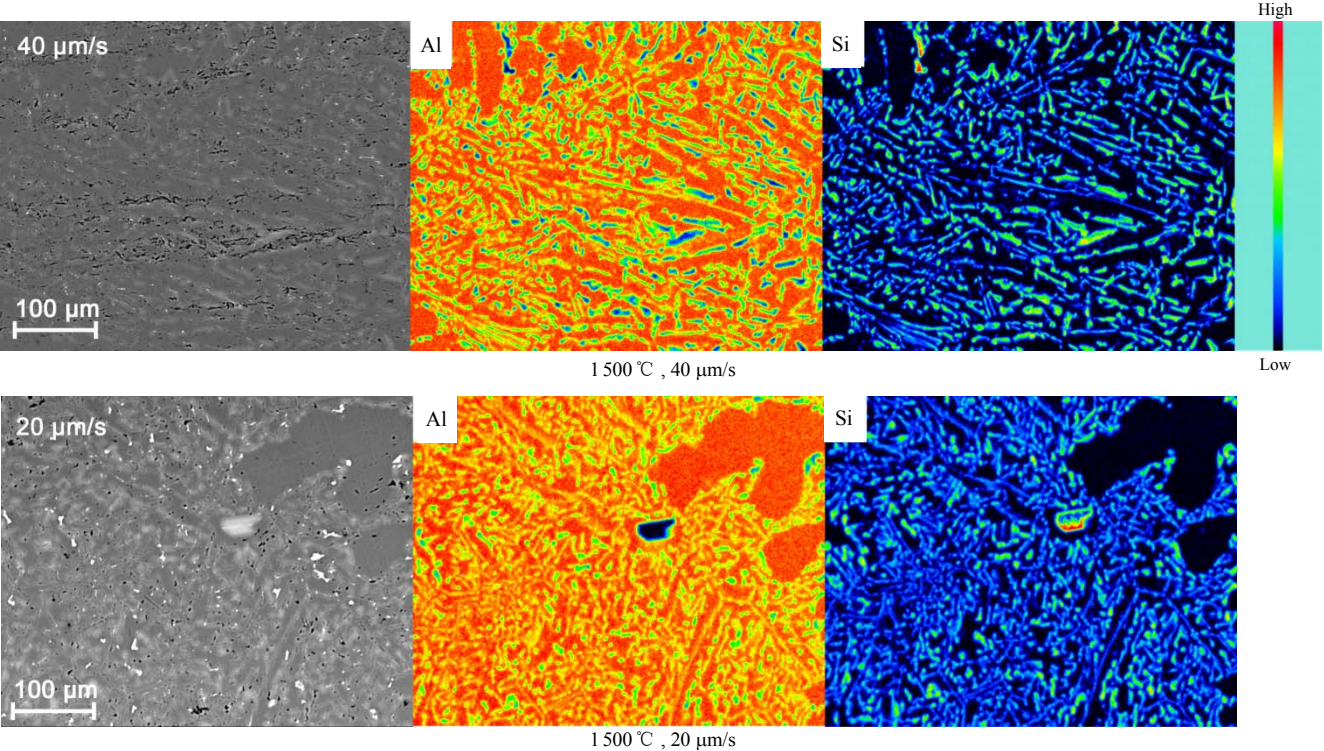


图 8 下拉速度对铝硅合金微观结构的影响  
Fig.8 Effect of pull-down velocity on microstructure of alloy

为研究不同下拉速度时合金成分的变化，结合图 6 获得不同下拉速度时的硅铝比，如图 9 所示。由图可知，下拉速度提高会使合金部分硅铝比提高。为研究其原因，对样品底部富集的初晶硅相进行分析，结果如图 10 所示。从图 10(a)可以看出，低拉速下底部初晶硅生长更连续质密，减少了铝夹杂；过大的下拉速度会使初晶硅的生长速度与凝固界面的吞没速度之差缩小，使在样品底部富集的初晶硅相生长成为稀疏的板状初晶硅[图 10(b)]，板状硅之间形成封闭的空间，阻碍了铝原子流动，使铝原子滞留在初晶硅富集相中，是导致合金部分硅铝比下降的主要原因。

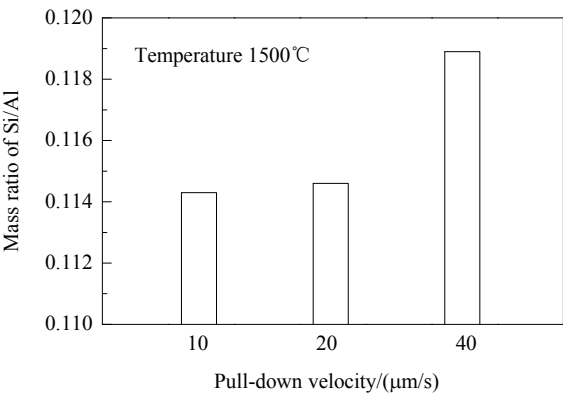


图 9 不同下拉速度时合金的硅/铝质量比  
Fig.9 Mass ratio of Si/Al in alloy at different pull-down velocities



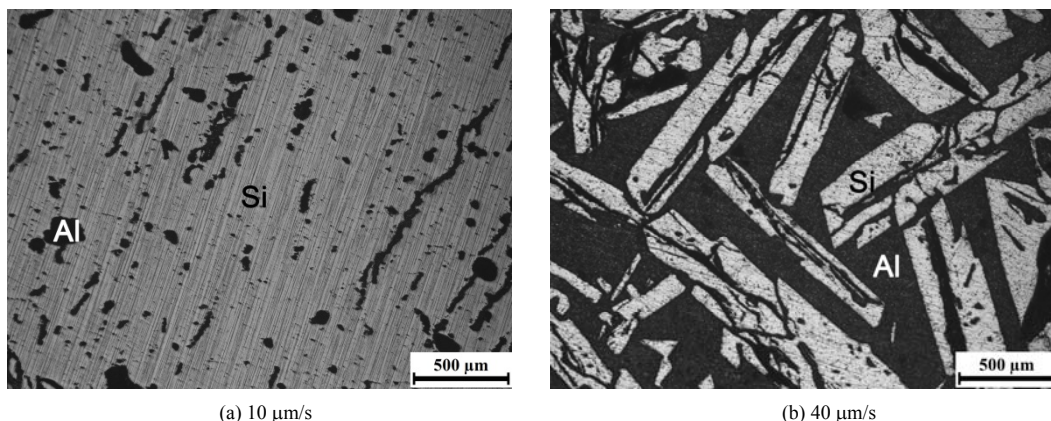
(a) 10  $\mu\text{m/s}$ (b) 40  $\mu\text{m/s}$ 

图 10 不同下拉速度时样品底部初晶硅富集相的微观结构

Fig.10 Microstructures of primary Si with different pull-down velocities

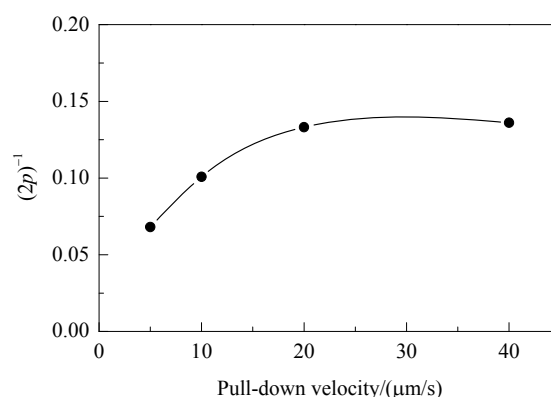
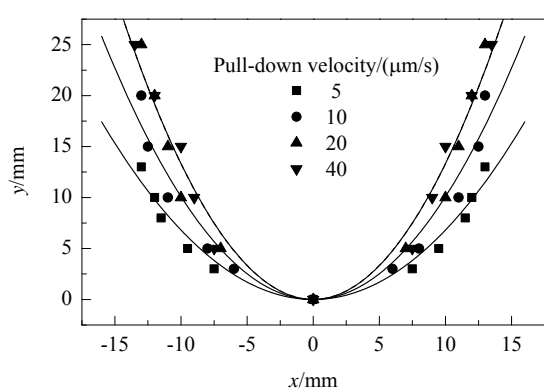


图 11 1500 °C 下不同下拉速度时分离界面的拟合曲线

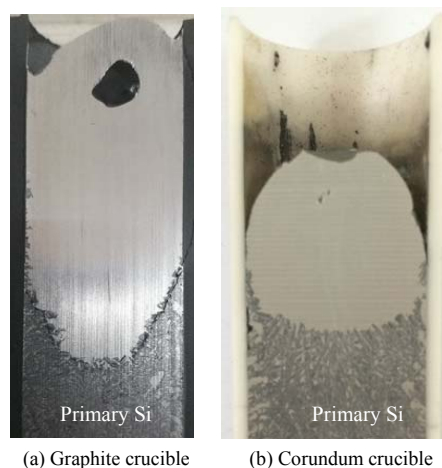
Fig.11 Fitting curves of separation surface with different pull-down velocities at 1500 °C

不同拉速时分离界面的拟合曲线见图 11. 下拉速度增大,  $x^2$  的系数逐渐增大, 曲线弯曲程度增大, 拉速达 20  $\mu\text{m/s}$  后, 界面的弯曲程度不再明显增加, 可见降低下拉速度可使样品的分离界面更平坦.

### 3.5 坩埚材质对合金分离的影响

根据电磁感应电流的透入深度可知, 坩埚材质的导电性在感应加热中有重要作用. 图 12 是使用刚玉坩埚和石墨坩埚(内径 18 mm)在温度 1500 °C、下拉速度 10  $\mu\text{m/s}$  条件下所得样品的微观结构, 可见使用石墨坩埚得到的样品初晶硅富集相比使用刚玉坩埚时细密.

样品合金部分的硅铝比计算结果见图 13. 从图可以看出, 使用刚玉坩埚分离的样品合金部分的硅铝比是使用石墨坩埚时的 2 倍以上. 原因是石墨是电和热的良导体, 在升温熔化阶段, 石墨坩埚内的感应电流先将坩埚加热, 坩埚再将热量传递给物料, 物料完全熔化后, 因合金熔体导电性比石墨坩埚好, 使熔体内部的感应电流增大, 由于集肤效应, 感应电流大部分产生于石墨坩埚壁面, 石墨坩埚作为刚体所受洛伦兹力是以



(a) Graphite crucible

(b) Corundum crucible

图 12 坩埚材质对样品微观结构的影响

Fig.12 Microstructures of samples using different crucibles

中心轴对称分布的, 坩埚壁各方向的洛伦兹力与熔体内自感应的洛伦兹力叠加, 强化了熔体流动. 而刚玉坩埚为磁绝缘材料, 在感应过程中对磁场有一定屏蔽作用, 会减弱搅拌效果, 降低分离效果.

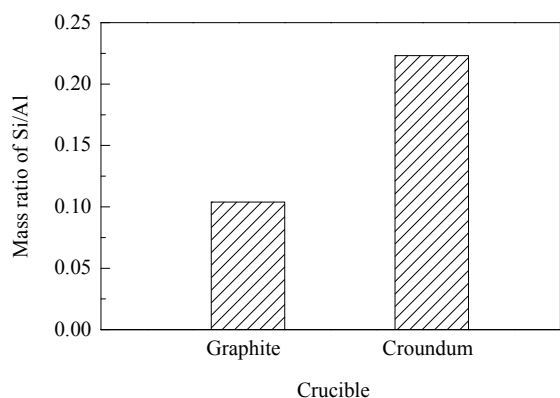


图13 不同材质坩埚分离的合金部分的硅铝比

Fig.13 Si/Al ratio of alloy separation using different crucibles

## 4 结论

考察了电流频率、保温温度、下拉速度和坩埚材质对电磁分离高硅铝硅合金效果的影响, 得出如下结论:

(1) 电流频率 3 kHz、保温温度 1000 °C、下拉速度 10  $\mu\text{m/s}$  条件下高硅铝硅合金可有效分离, 分离后的样品呈清晰的分离界面, 铝硅合金浓度分布较均匀。将感应电流频率从 30 kHz 降至 3 kHz, 铝硅合金中 Si 含量从 17.26wt%~44.39wt%减至 17.83wt%~27.79wt%, 硅富集区硅含量从 91.93wt%提高至 99.981wt%。

(2) 降低保温温度有利于硅相富集, 当保温温度接近硅含量 45wt%的铝硅合金的熔点(973 °C)时, 合金部分的硅含量降至最低, 硅铝质量比为 0.0939, 但保温温度对分离界面形状影响不明显。

(3) 下拉速度对分离效果有一定影响, 下拉速度降至 10  $\mu\text{m/s}$  时铝硅合金中硅含量略有降低, 初晶硅富集区硅相为连续致密结构, 分离界面更平坦。

(4) 石墨坩埚能强化分离过程的传热传质, 并使铝硅合金中的晶粒细化, 合金硅铝比从用刚玉坩埚时的 0.2232 降至 0.104。

### 参考文献:

- [1] 张洪峰, 田光辉, 熊运昌, 等. 铝硅合金铸造新工艺的研究与应用 [J]. 铸造, 2008, 57(9): 892-894.  
Zhang H F, Tian G H, Xiong Y C, et al. Research and Application of New Casting Technique for Al-Si Alloy [J]. Foundry, 2008, 57(9): 892-894.
- [2] Purohit P, Höglund-Isaksson L. Global Emissions of Fluorinated Greenhouse Gases 2005-2050 with Abatement Potentials and Costs [J]. Atmos. Chem. Phys., 2017, 17(4): 1-33.
- [3] 张卫文, 尹志民, 赵阳, 等. 过共晶高硅铸造铝合金磷-稀土双重变质处理 [J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(1): 59-62.  
Zhang W W, Yin Z M, Zhao Y, et al. Double-metamorphic Treatment of Phosphorus-Rare Earth in Hypereutectic High Silicon Casting Aluminum Alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(1): 59-62.
- [4] 尤晶. 由电热法生产的一次铝硅合金制取铸造用铝硅合金的研

究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 5-10.

You J. Study of Making Casting Grade Al-Si Alloys with Coarse Al-Si Alloy Produced by Electrothermal Reduction of Aluminous Ore [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008: 5-10.

- [5] 赵劲. 铝硅合金的生产方法 [J]. 铝镁通讯, 2002, (3): 32-34.  
Zhao S. Production Methods of Al-Si Alloy [J]. Lv Mei Tong Xun, 2002, (3): 32-34.
- [6] 周祥宇. 用一次铝硅合金制取铸造铝硅合金的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2007: 6-10.  
Zhou X Y. Study on Casting Al-Si Alloy by Aluminum-Silicon Alloy [D]. Shenyang: Northeastern University, 2007: 6-10.
- [7] 王耀武, 冯乃祥, 孙挺, 等. 自然沉降法去除铝硅合金中铁相的机制探讨 [J]. 稀有金属, 2010, 34(1): 28-33.  
Wang Y W, Feng N X, Sun T, et al. Mechanism of Removing Iron Phase in Al-Si Alloy by Natural Deposition [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(1): 28-33.
- [8] You J, Wang Y W, Feng N X, et al. Preparation of Casting a Alloy ZL101 with Coarse Aluminum-Silicon Alloy [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2008, 18(1): 116-120.
- [9] Xu C L, Jiang Q C. Morphologies of Primary Silicon in Hypereutectic Al-Si Alloys with Melt Overheating Temperature and Cooling Rate [J]. Mater. Sci. Eng., A, 2006, 437(2): 451-455.
- [10] Morita K, Miki T. Thermodynamics of Solar-grade-silicon Refining [J]. Intermetallics, 2003, 11(11): 1111-1117.
- [11] Yoshikawa T, Morita K. Refining of Si by the Solidification of Si-Al Melt with Electromagnetic Force [J]. ISIJ Int., 2005, 45(7): 967-971.
- [12] Yoshikawa T, Morita K. Removal of B from Si by Solidification Refining with Si-Al Melts [J]. Metall. Mater. Trans. B, 2005, 36(36): 731-736.
- [13] Yoshikawa T, Morita K. Refining of Silicon during Its Solidification from a Si-Al Melt [J]. J. Cryst. Growth, 2009, 311(3): 776-779.
- [14] Nishi Y, Kang Y, Morita K. Control of Si Crystal Growth during Solidification of Si-Al Melt [J]. Mater. Trans., 2010, 51(7): 1227-1230.
- [15] Xue H Y, Lv G Q, Ma W H, et al. Separation Mechanism of Primary Silicon from Hypereutectic Al-Si Melts under Alternating Electromagnetic Fields [J]. Metall. Mater. Trans. A, 2015, 46(7): 2922-2932.
- [16] Lei Y, Sun L E, Ma W H, et al. Enhancing B Removal from Si with Small Amounts of Ti in Electromagnetic Solidification Refining with Al-Si Alloy [J]. J. Alloys Compd., 2016, 666: 406-411.
- [17] Li J Y, Ni P, Wang L, et al. Influence of Direct Electric Current on Solidification Process of Al-Si Alloy [J]. Mater. Sci. Semicond. Process., 2017, 61: 79-84.
- [18] 陈杭, 王志, 池汝安, 等. Al-Si 合金熔析结晶过程中界面稳定性与硅晶体生长的控制 [J]. 过程工程学报, 2015, 15(3): 435-442.  
Chen H, Wang Z, Chi R A, et al. Control of the Stability of Solid-Liquid Interface and Growth of Si Crystal during Solvent Refining Process of Al-Si Alloy [J]. Chin. J. Process Eng., 2015, 15(3): 435-442.
- [19] Huang L G, Li G, Fu D J, et al. Effects of Electromagnetic Field on Primary Si Phase of Hypereutectic Al-18%Si Alloy [J]. J. Mater. Eng., 2010, 24(1): 32-33.
- [20] Li P J, Nikitin V I, Kandalov E G, et al. Effect of Melt Overheating Cooling and Solidification Rates on Al-16wt.%Si Alloy Structure [J]. Mater. Sci. Eng., 2002, 332(1): 371-374.