



对含有 Al_2O_3 的铝熔体电磁分离实验研究

曹志强*, 郭庆涛, 李廷举, 王同敏

(大连理工大学 铸造工程研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过向 Al 熔体中加入 SiO_2 颗粒, 成功制备了 Al-10% Al_2O_3 复合材料; 并采用远大于集肤层厚度的直径 30 mm 陶瓷分离管和中空管进行了分离实验. 结果表明大尺寸分离管同样能实现电磁净化, 只是分离时间比中空管略长, 可能是因电磁搅拌效应引起的流动造成的. 对含有 30~200 μm Al_2O_3 颗粒的铝熔体的电磁连续净化实验结果显示: 仅使用泡沫陶瓷过滤该合金时, 平均净化效率为 96.15%; 当施加 0.06 T 的高频磁场时, 复合过滤净化效率的平均值为 97.30%, 比泡沫陶瓷单独净化的效率高了 1.15%. 对 Al-10% Mg 合金的连续净化实验结果表明, 仅用泡沫陶瓷过滤该合金时, 经过两次过滤后可将合金中的氧含量从 0.000 9% 降低为 0.000 4%, 净化效率为 55.6%; 而当泡沫陶瓷外加 0.04 T 磁场复合净化时, 氧含量从 0.001 4% 降低为 0.000 3%, 净化效率达到 78.6%.

关键词: 高频磁场; Al_2O_3 ; 电磁分离; 净化效率

中图分类号: TG136.1 **文献标志码:** A

0 引 言

铝合金在熔炼、浇注过程中表现出易于吸气、氧化的特性, 因而导致其中含有气体和非金属夹杂物, 直接影响其冶金质量和产品的内在质量, 并会引起铸件或型材产生针孔、气孔和夹渣等一系列缺陷, 显著降低材料的强度、疲劳抗力、耐腐蚀性能、应力腐蚀开裂性能和塑性等, 甚至造成产品报废. 所以, 在熔炼、浇注过程中需要因地制宜, 采取专门的工艺措施, 去除铝合金中的气体和非金属夹杂物, 以保证产品质量^[1].

铝合金的净化按原理可大致分为吸附法和非吸附法. 电磁净化法是 1954 年由 Leenov 等^[2] 率先提出来的, 属于非吸附法, 对金属没有污染, 因此引起国内外学者的广泛研究. 电磁净化的主要影响因素是磁场和电流. 电流按产生方式可以分为直流^[3] 和交流^[4,5], 也可分为直接施加电源的接触式和非接触的电磁感应方式; 而根据所用磁场又可以分为感生磁场、超强磁场^[6]、永磁场和交变

磁场^[7,8], 还可以分为稳恒磁场和行波磁场等^[9]. 用不同方式来组合这两个因素, 可得到多种电磁净化方法. 但它们净化的基本原理都是一样的: 根据导电率不同的物质在磁场中受到的电磁作用力大小不同, 实现纯金属和非金属夹杂物的分离. 在上述几个方案中, 施加高频交变磁场是最方便的一种技术, 这种技术不需要在熔体中通入电流, 没有电极污染问题, 而且具有可以分离较小尺寸夹杂颗粒的特点.

郭庆涛等选用 Al-24%Si 合金模拟金属中夹杂物, 并研究了磁感应强度、作用时间、管径和夹杂物尺寸对电磁分离效果的影响^[10,11]. 李克等^[12~15] 对采用高频磁场分离制备的 Al/ Mg_2Si 梯度复合材料进行了系统研究, 结果表明: 在熔体温度保持在 560~580 $^\circ\text{C}$, 施加高频磁场 23 s 后, 可得到分布较好的复合材料; 研究还发现这种复合材料如经复合盐变质剂处理后, 初生 Mg_2Si 相得到显著细化, 其表层耐磨性能会得到进一步提高. 文献^[16~19] 则对电磁净化的电磁场和流速

收稿日期: 2009-03-05; 修回日期: 2010-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50674018; 50874022).

作者简介: 曹志强*(1965-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: caozq@dlut.edu.cn; 李廷举(1958-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: tjuli@dlut.edu.cn.

场等进行了理论计算和分析。

以上研究的都不是真正外加的固体颗粒,只是在糊状结晶区形成的初生相,这种相只在一定温度下才能析出.为了真正模拟高温夹杂物,本文采用在纯铝中添加石英砂的办法先制备铝基复合材料,然后再研究高频电磁场作用下 Al_2O_3 的迁移行为,考察陶瓷管束和陶瓷过滤器的净化效率以及净化前后氧含量,为工业化的动态应用进行探索性研究;另外本文还考察大管径以及中空管下铝加石英砂的净化效率,并对 SiO_2 与 Al 的反应机理进行分析。

1 实验方法

高频磁场发生装置如图 1 所示,其由 IGBT 中频电源柜和螺旋管线圈组成.前者用于产生高频电流,输出频率为 20 kHz;后者用于产生高频磁场.线圈由直径 12 mm 的紫铜管绕制而成,其内径为 75 mm,高度为 130 mm,匝数为 10 匝.线圈中心处磁感应强度采用小线圈法测量,测得中心位置的感应电动势后计算求得磁感应强度,其计算公式如下^[16]:

$$B_e = E/4.44fNS \quad (1)$$

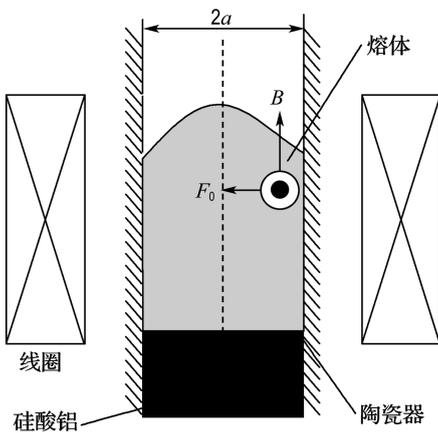


图 1 电磁净化实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the electromagnetic separation experimental apparatus

实验所用原材料为纯度 99.7% 的工业纯铝和粒度 30~200 μm 的石英砂.石英砂经铝熔液反应生成的复合材料的成分为 10% Al_2O_3 .具体过程是先将铝熔液升温至 820 $^{\circ}\text{C}$ 保温,然后将烘干后的石英砂均匀间断加入,加入速度以 50 g/

min 为宜.电磁分离实验时再将反应合成的铝基复合材料棒料,放在高频磁场中进行重熔,调整好温度后施加高频磁场使熔体中氧化物颗粒在电磁力作用下由内向外迁移.为了防止气孔的产生一般在 2 kW 进行加热去气,然后加大功率到 4 kW 进行重熔,电磁场分离的功率一般 2 kW 就足以达到效果.分离时间则视试样尺寸而定,一般不超过 2 min.为保证制备的复合材料组织致密,晶粒细小,在电磁分离过程中还需要进行氩气冷却,分离结束后则通冷却水水冷.将电磁分离后的试样沿纵向和横向解剖、打磨、抛光、腐蚀并拍照,分析复合颗粒在纵向和径向的分布均匀性,计算分离效率.本文除了对 30 mm 的陶瓷管以及中间插有铜管的中空管进行了分离实验外,还考察了 7 根陶瓷管捆绑在一起的分离效果.实验时在线圈中放置 7 根捆绑在一起的内径为 10 mm、管壁厚 1.5 mm 的陶瓷管,然后将经石英砂原位反应生成氧化铝颗粒的铝熔体倒入陶瓷管中,施加 0.04 T 的磁场,进行多管电磁分离实验研究,10 s 后施加磁场的同时吹气冷却制得样品。

动态连续净化实验是将泡沫陶瓷过滤器放在高频电磁感应线圈内,打开 IGBT 中频电源柜,调节输出功率分别为 2 kW 和 3 kW,将配制好的含有 30~200 μm Al_2O_3 颗粒的铝熔体和 Al-10% Mg 合金在 760 $^{\circ}\text{C}$ 进行过滤.此时金属熔体表面磁感应强度分别为 0.04 T 和 0.06 T.过滤前、后分别浇注成圆柱形试样,圆柱形试样直径 $\phi 20$ mm,高 80 mm.不施加电磁场时合金流量为 4~6 kg/min,过滤器内金属熔体温度保持在 700~730 $^{\circ}\text{C}$,施加 2 kW 功率后由于电磁约束力的影响,合金流量降为 2~3 kg/min,过滤器内金属熔体温度升高到 720~750 $^{\circ}\text{C}$,为了防止金属熔体二次氧化,实验过程中还采用了吹氩气保护.施加 3 kW 功率时合金流量降为 1.5~2.0 kg/min,过滤器内金属熔体温度高达 800 $^{\circ}\text{C}$,此时有意没有施加气体保护以考察感应加热对熔体的氧化作用.过滤前、后分别制样,经过机械加工后进行成分化验,检测样品中氧元素的含量。

2 实验结果及讨论

2.1 管径对分离效率的影响

图 2(a)为直径 30 mm Al- Al_2O_3 试样分离后

的宏观组织,可见在中心区域几乎看不到黑色的 Al_2O_3 颗粒,说明此区域得到很好的净化,边缘部分聚集了大量的黑色 Al_2O_3 颗粒,但净化时间需要 50 s,比直径 10 mm 试样的 10 s 略长.图 2(b)

所示为分离后试样中心部分的微观组织,主要由 $\alpha\text{-Al}+\text{Si}$ 共晶体和初生 $\alpha\text{-Al}$ 组成;而边缘微观组织如图 2(c)所示,由黑色 Al_2O_3 和白色基体以及晶间共晶体组成.

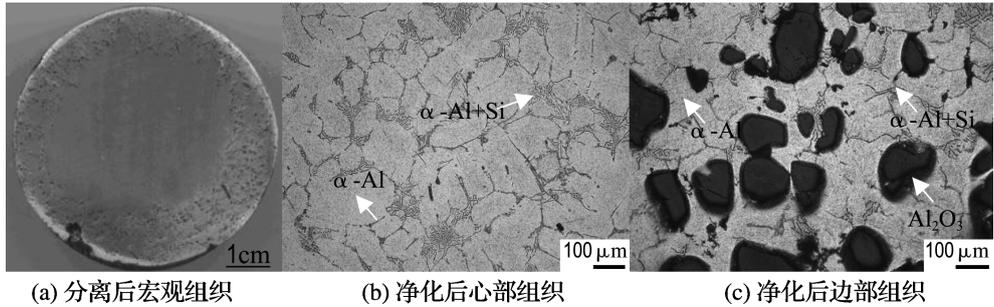


图 2 30 mm 的 $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 试样电磁净化后各区域的组织

Fig. 2 Structures at various zones of 30 mm $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ specimen after electromagnetic separation

原本是纯铝怎么会出共晶硅相呢?经进一步分析发现铝熔体在加入 SiO_2 后,在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 将发生原位置换反应生成 Al_2O_3 :



文献[20、21]认为 Al_2O_3 首先在 SiO_2 界面原位形成薄薄一层,然后再向内部长大,随着时间推移 Al_2O_3 逐渐增多, SiO_2 颗粒逐渐缩小,最终形成的 Al_2O_3 固体颗粒在形貌上与原 SiO_2 颗粒大同小异.而与此同时硅则被置换出来熔入铝液,凝固时析出 $\alpha\text{-Al}+\text{Si}$ 共晶体.

图 3(a)为 30 mm 陶瓷管中间插有 10 mm 铜管的分离实验.同样是黑色的颗粒状 Al_2O_3 聚集在边缘部分,但净化时间缩短为 40 s.这是由于中

心部分是空的,固体颗粒的移动距离缩短了,使实心圆柱熔体内部大部分区域受力较弱的情况得到改善,从而达到提高分离效率的效果.

对于外圆半径为 $2r$ 、内径为 r 的中空管,其外围部分的面积是半径为 r 的小管面积的 3 倍,因此净化效率能明显得到提高.分离后试样中心部分的微观组织见图 3(b),同样是由初生 $\alpha\text{-Al}$ 和晶间 $\alpha\text{-Al}+\text{Si}$ 共晶体组成,没有发现 Al_2O_3 微粒,与图 2(b)相比加铜管后的分离试样中心组织更加细密均匀,这可能是由铜管本身的冷却作用造成的.而图 3(c)边缘部分组织中所示黑色 Al_2O_3 和图 2(c)相比没有什么分别,只是共晶 Si 量更少些.

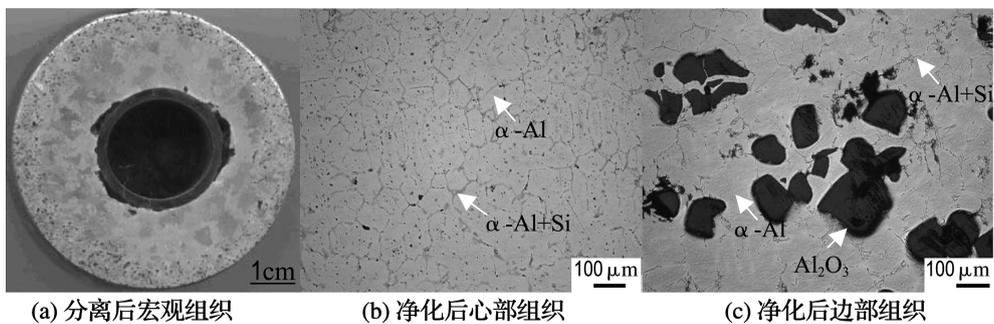


图 3 加铜管时的 $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 试样电磁净化后各区域的组织

Fig. 3 Structures at various zones of $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ specimen with copper pipe after electromagnetic separation

2.2 多管电磁分离

利用多管同时进行电磁分离的实验结果如图4所示.从图中可以看出,无论是中心1#管还是周边2#~7#管,金属熔体中的由石英砂转变为氧化铝的颗粒都被较好地分离到试样的边部.虽然多个细管捆绑在一起,但并不能明显影响各自的电磁分离效果,这也说明了多管同时进行电磁分离是可行的.为此本文将考察陶瓷过滤器的动态连续净化效果.

理论计算结果显示,30 μm 非金属夹杂物颗粒在磁感应强度 B_0 为 0.04 T 时,距离金属熔体表面 3 mm 处的颗粒可以在 2.2 s 左右运动到金属熔体的表面,增加磁感应强度会进一步增加净化效果.由此可知当陶瓷管径增大或者采用陶瓷管的数量增加时很容易满足工业生产的流量需要.而为满足净化时间的需要,则可通过增加陶瓷管束的长度来实现.

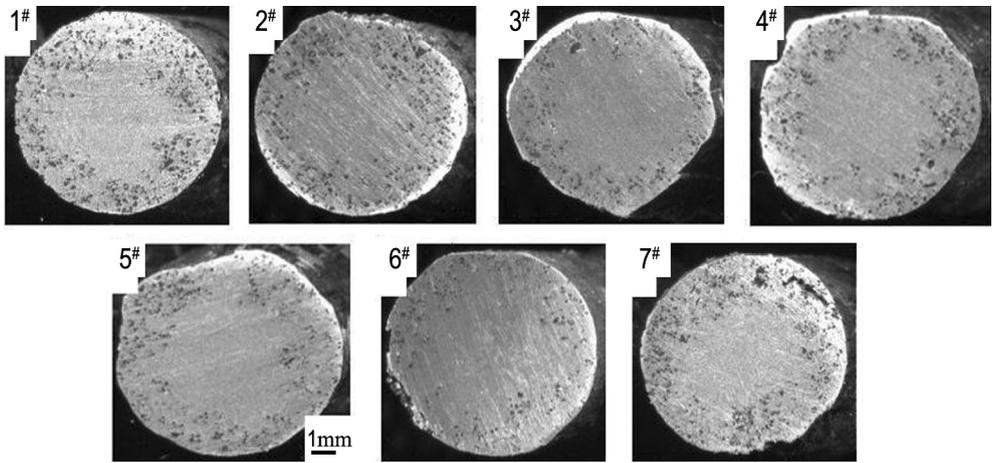


图4 多管电磁分离宏观组织图

Fig. 4 Macrostructure of electromagnetic separation with multi-tubule

3 分析与讨论

关于电磁净化的原理以及规律多有文献报道^[22],但对于该技术是否适合工业化生产的需要研究很少.本文采用泡沫陶瓷过滤器代替陶瓷管束进行了动态净化实验,结果表明,在泡沫陶瓷过滤器外未施加高频磁场时,铝熔体中氧化铝颗粒的平均净化效率为 96.15%;当施加 0.06 T 的高频磁场时,平均净化效率为 97.30%,后者比泡沫陶瓷单独净化的效率高了 1.15%.增加的比例不是很高是因为氧化铝的尺寸较大,采用一般泡沫陶瓷法就很容易去除.为此本文又利用该装置对 Al-10%Mg 合金进行连续净化,结果表明,当没有施加高频磁场时,经过两次过滤后合金中的氧

含量从 0.000 9% 降低为 0.000 4%,净化效率为 55.6%;当施加 0.04 T 的高频磁场进行净化时,合金中的氧含量从 0.001 4% 降低为 0.000 3%,净化效率达到 78.6%,净化效率提高了 23.0%.具体结果详见表 1.表 1 中还列出了 0.06 T 磁场没有氩气保护的情况,结果发现当过滤器出口处没有气体保护时,合金中氧元素的含量非但没有减少,反而增加了.这是由电磁感应热的作用造成金属熔体温度升高,氧化加重所致.经测量 0.06 T 高频磁场在动态过滤的同时可以将金属熔体温度加热到 800~820 $^{\circ}C$,造成熔体的二次氧化,因此在今后工业生产中应该充分考虑惰性气体的保护作用.

表 1 对 Al-10%Mg 合金电磁过滤的实验结果

Tab. 1 Elimination result of Al-10%Mg alloy with foam ceramic filter and electromagnetic field

		$w(\text{O}_2)/\%$	净化效率/ $\%$	备注
无外加磁场	原始试样	0.000 9		
	过滤一次	0.000 4	55.6	
	过滤二次	0.000 4	55.6	过滤器出口处吹氩气保护
$B_0=0.04\text{ T}$	原始试样	0.001 4		
	过滤一次	0.000 9	35.7	
	过滤二次	0.000 3	78.6	
无外加磁场	原始试样	0.000 2		
	过滤一次	0.000 1	50.0	
	过滤二次	0.000 2	0	过滤器出口处无气体保护
$B_0=0.06\text{ T}$	原始试样	0.000 2		
	过滤一次	0.000 6	-200	
	过滤二次	0.000 9	-350	

4 结 论

(1) 通过向添加 30~200 μm 石英砂颗粒的铝熔体中施加高频电磁场作用后发现,在试样的边缘附近产生了非常明显的由石英砂原位反应生成的 Al_2O_3 聚集层,而在试样的内部形成了细小而均匀的 $\alpha\text{-Al}$ 初晶以及 $\alpha\text{-Al}+\text{Si}$ 共晶组织.采用空心柱状熔体可以使实心圆柱熔体内部大部分区域受力较弱的情况得到改善,从而达到提高分离效率的效果.并证实了多管同时电磁分离的实验是可行的.

(2) 对含有 30~200 μm Al_2O_3 颗粒的铝熔体的电磁连续净化实验结果显示:当施加 0.06 T 的高频磁场时,泡沫陶瓷外加高频磁场复合过滤净化效率的平均值为 97.30%,比泡沫陶瓷单独净化的效率高出了 1.15%.

(3) 对 Al-10%Mg 合金的连续净化实验结果表明:泡沫陶瓷外加高频磁场复合净化时,氧含量从 0.001 4%降低为 0.000 3%,净化效率达到 78.6%,较仅用泡沫陶瓷过滤时提高了 23.0%.

参 考 文 献:

[1] FU Gao-sheng, QIAN Kuang-wu, CHEN Wen-zhe, *et al.* Analyses of the current situation and existing problem in the research of aluminum sheet used for making can [J]. **Journal of Materials Engineering**, 2000, **14**(1):25-28

[2] LEENOV D, KOLIN A. Theory of electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically

oriented cylindrical particles [J]. **Journal of Chemical Physics**, 1954, **22**(4):683-688

[3] 钟云波,任忠鸣,邓康,等.行波磁场净化液体金属的电磁力参数[J].中国有色金属学报,1999, **9**(3):482-487

[4] GUO Q T, LI T J, WANG Tong-min, *et al.* Effect of turbulent flow on electromagnetic elimination with high frequency magnetic field [J]. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 2006, **16**:1141-1147

[5] ZHANG Zhong-tao, GUO Qing-tao, YU Feng-yun, *et al.* Motion behavior of non-metallic particles under high frequency magnetic field [J]. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 2009, **19**:674-680

[6] EL-KADDAH N, PATEL A D, NATARAJAN T T. The electromagnetic filtration of molten aluminium using an induced-current separator [J]. **JOM**, 1995, **47**(5):46-49

[7] SINHA Ashok, GANGULY Ranjan, PURI I K. Magnetic separation from superparamagnetic particle suspensions [J]. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 2009, **321**(14):2251-2256

[8] TAKAHASHI K, TANIGUCHI S. Electromagnetic separation of nonmetallic inclusion from liquid metal by imposition of high frequency magnetic field [J]. **ISIJ International**, 2003, **43**(6):820-827

[9] SONG Chang-jiang, XU Zhen-ming, LI Jian-guo. In-situ Al/Al₃Ni functionally graded materials by electromagnetic separation method [J]. **Materials Science and Engineering A**, 2007, **445-446**:148-154

[10] 郭庆涛.高频磁场电磁净化理论计算及实验研究

- [D]. 大连:大连理工大学, 2007
- [11] 陈东风, 曹志强, 杨 森, 等. 高频磁场下制备表面增强自生梯度复合材料[J]. 铸造, 2006, **55**(8): 821-824
- [12] 李 克, 王 俊, 疏 达, 等. 电磁分离法制备原位 $\text{Al}/\text{Mg}_2\text{Si}$ 功能梯度复合材料[J]. 上海交通大学学报, 2004, **39**(9):1433-1437
- [13] 李 克, 王 俊, 周 鸣. 过共晶铝硅自生梯度复合材料的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2002, **12**(3):521-524
- [14] 李 克, 周 新, 胡世飞, 等. 电磁分离制备自生梯度复合材料工艺中磁场有效作用时间的分析[J]. 南昌大学学报, 2006, **28**(1):31-34
- [15] 李赤枫, 王 俊, 疏 达, 等. 利用高频磁场制备自生梯度复合材料的熔体温度选择[J]. 中国有色金属学报, 2004, **14**(6):973-978
- [16] GUO Qing-tao, CAO Zhi-qiang, ZHANG Zhong-tao, *et al.* Separation efficiency of alumina particles in Al melt under high frequency magnetic field [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, **20**:153-157
- [17] AFSHAR M R, ABOUTALEBI M R, ISAC M, *et al.* Mathematical modeling of electromagnetic separation of inclusions from magnesium melt in a rectangular channel [J]. *Materials Letters*, 2007, **61**(10):2045-2049
- [18] NATARAJAN T T, EL-KADDAH N. A new method for three-dimensional numerical simulation of electromagnetic and fluid-flow phenomena in electromagnetic separation of inclusions from liquid metal [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2002, **33**(5):775-785
- [19] OGASAWARA T, YOSHIKAWA N, TANIGUCHI S, *et al.* Electromagnetic flow around two non-conducting particles and the interaction forces — Different diameter cases [J]. *ISIJ International*, 2003, **43**(6):862-868
- [20] 张守魁, 赵 红. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 基颗粒增强复合材料的凝固组织 [J]. 铸造设备研究, 2001(3):21-25
- [21] 张守魁, 王丹虹, 赵 红, 等. 石英玻璃与铝液的反应[J]. 机械工程材料, 2001, **25**(1):28-31
- [22] 陈东风, 曹志强, 张 婷, 等. 电磁分离制备过共晶 Al-5\%Fe 自生表层复合材料[J]. 功能材料, 2007, **38**(4):529-531, 539

Experimental research on electromagnetic separation of Al_2O_3 from aluminum melts

CAO Zhi-qiang*, GUO Qing-tao, LI Ting-ju, WANG Tong-min

(Research Center of Foundry Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Al-10% Al_2O_3 composite material is successfully fabricated by adding SiO_2 into the pure aluminum melt, and used to engage in the electromagnetic separation experiment through the ceramic separation pipes of 30 mm diameter far bigger than the skin depth and hollow pipes. It is found that the Al_2O_3 particles accumulate in periphery of specimen by separation pipes with big diameter, which may be helped by the flow caused by electromagnetic stirring, although it takes more time to reach the periphery than that of hollow pipe. The continuous elimination results with the molten aluminum which contains 30-200 μm Al_2O_3 particles show that the average elimination efficiency is 96.15% and it increases to 97.30% when the magnetic induction intensity is 0.06 T, and the latter is higher about 1.15% than that without magnetic field. The continuous elimination results with the Al-10%Mg alloy show that without magnetic force, the percentage of oxygen in the alloy decreases from 0.0009% to 0.0004% after twice elimination and the elimination efficiency is 55.6%. When the magnetic induction intensity around the foam ceramic filter is 0.04 T, the percentage of oxygen decreases from 0.0014% to 0.0003% and the elimination efficiency is 78.6%.

Key words: high frequency magnetic field; Al_2O_3 ; electromagnetic separation; purification efficiency