

文章编号: 1004 - 0609(2004)03 - 0354 - 05

## 交流电净化铝合金熔体<sup>①</sup>

吴加雄, 任忠鸣, 张邦文, 钟云波, 邓 康  
(上海大学 上海市钢铁冶金重点实验室, 上海 200072)

**摘 要:** 进行了工频交流电分离铝合金熔体中夹杂物的实验, 探讨电流密度、通电时间、分离器管型等实验参数对夹杂颗粒迁移行为的影响。结果表明: 电流密度越大、通电时间越长, 分离效果越理想; 施加  $4.7 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  的交流电, 并维持 40 s 通电时间, 不同管型的分离器都获得了较明显的分离效果。实验证实单电流电磁净化金属液是可行的。

**关键词:** 电磁分离; 夹杂物; 工频电流; 铝合金熔体

中图分类号: TF 111.18

文献标识码: A

## Electromagnetic purification of aluminum alloy melt only by alternating current

WU Jia-xiong, REN Zhong-ming, ZHANG Bang-wen, ZHONG Yun-bo, DENG Kang  
(Shanghai Enhanced Laboratory of Metallurgy, Shanghai University,  
Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Electromagnetic separation of inclusion particles from aluminum melt only by industrial frequency current was investigated. The influence of processing variables including current density, imposed time, the types of separator on the migration behavior of inclusion particles were studied. The results show that the higher current density and longer imposed time result in higher removal efficiency. When the applied current density is  $4.7 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  and the imposed time is 40 s, there are observable effects in all kinds of pipes. The electromagnetic separation from molten metal only by alternating current is feasible.

**Key words:** electromagnetic separation; inclusion; industrial frequency current; aluminum alloy melt

自 20 世纪 80 年代初期提出电磁净化技术以来, 国内外对此进行了广泛的基础研究, 并提出多种不同的电磁净化技术方案。这些方案主要包括: 1) 磁场和电流分别施加, 如直流电+ 静磁场<sup>[1, 2]</sup>, 交流电+ 交变磁场<sup>[3]</sup>; 2) 交变磁场及其感应电流, 如感应线圈磁场<sup>[4-7]</sup>、行波磁场<sup>[8-11]</sup>; 3) 交变电流及其感生磁场<sup>[12, 13]</sup>。其中方案 1 获得的电磁力较均匀, 但需要 2 套独立的设备产生电磁场, 成本太大; 在方案 2 中, 感应线圈磁场研究较多, 但要满足电磁分离的实际要求, 感应线圈的长度和内径在设计上受到限制, 而行波磁场需要直线电机产生,

成本高、难以维护; 方案 3 仅仅施加电流(直流或交流), 磁场由电流感应产生、不需额外施加, 被称为“单电流电磁净化”方案<sup>[12]</sup>。此方案的最大优点在于设备简单, 工艺容易实施, 是目前比较有工程应用前景的方案之一。在单电流电磁净化方面, Taniguchi<sup>[13]</sup>等较早进行了交流电分离夹杂物的理论研究。ZHANG 等<sup>[12]</sup>把文献[13]的工作推广到直流和不同管型, 提出了单电流分离夹杂物的基本理论框架, 但有关的实验, 尤其是直接使用工频交变电流分离夹杂物的实验还未见报道。

本文作者进行了工频交流电分离铝合金熔体中

① 基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2002AA3Z1410); 国家杰出青年基金资助项目(50225416)

收稿日期: 2003-06-24; 修订日期: 2003-10-14 作者简介: 吴加雄(1978-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 任忠鸣, 教授; 电话: 021-56331102; E-mail: zmrenb@163.com

夹杂物的实验研究, 探讨了多种实验参数对夹杂颗粒迁移行为的影响, 为该技术在工业上的应用提供了实验依据。

## 1 单电流电磁净化的基本原理

在导电液体中通入直流电流( $I$ )并在垂直方向施加磁场( $B$ ), 则其中的不导电颗粒会向液体受到的电磁力( $f_{em} = I \times B$ )的反方向迁移, 这个现象叫电磁分离现象<sup>[14]</sup>。1954 年, Leenov 和 Kolin<sup>[15]</sup>建立了电磁分离的基本理论, 根据这个理论, 颗粒迁移是因为受到一个电磁斥力的作用, 这个电磁斥力又叫电磁浮力( $F_p$ ), 方向与液体受到的电磁力相反, 大小等于其  $3/4$ , 即  $F_p = -0.75 I \times B$ 。

上述原理对交流电情形同样适用, 图 1 所示为交流电去除金属液中夹杂物的示意图。圆柱形管中盛有液态金属, 并在纵向通入交变电流  $J$ , 则在圆管的横截面上产生切向(或角向)磁场  $B_\theta$ , 电流与感生磁场相互作用而对金属液产生指向轴心的电磁力  $I \times B_\theta$ , 则夹杂颗粒因导电性差异受到一个向外的电磁浮力而向管壁移动, 并最终附着在管壁上除去。这个基本原理对其他的管型是一样的。

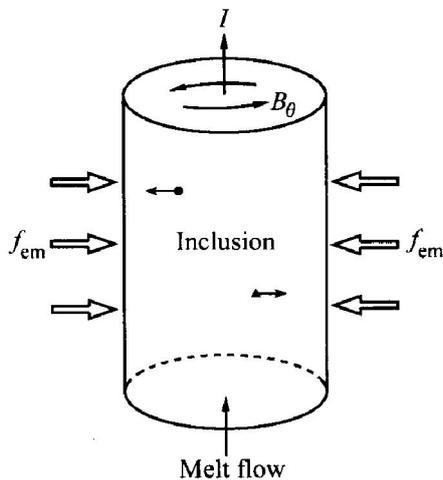


图 1 单电流去除金属液中夹杂颗粒示意图

Fig. 1 Schematic of separation of inclusion particles from molten melt only by imposing current

## 2 实验

实验材料为过共晶铝硅合金(AI20% Si), 由工业纯铝和工业结晶硅在真空感应炉中熔化配置而成。由 AI-Si 相图可知, 在合金凝固过程中, 富 Si 相首先析出, 而初生 Si 相基本不导电, 在电磁浮力

的作用下, 将向管壁迁移、富集, 因此可以用初生 Si 相模拟夹杂物。

实验装置由分离管、电阻预热器及电源系统 3 部分构成(如图 2 所示)。分离管用高温水泥、膨胀料预制而成, 采用圆管、正方形管和正三角形管 3 种管型, 长 20 cm、截面积约为  $0.64 \text{ cm}^2$ 。电源系统由工频电源、调压器、变压器和负载组成, 可提供 0~350 A 可调的交流电。

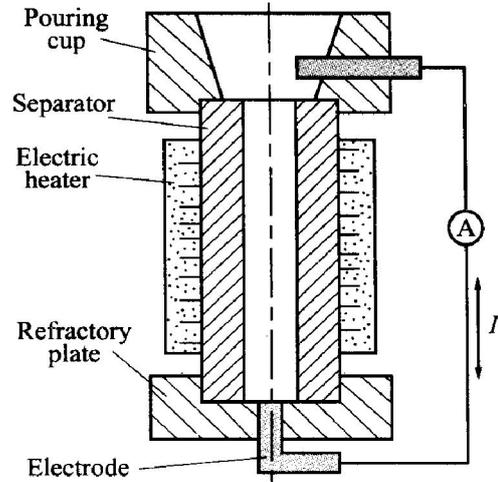


图 2 单电流电磁分离装置示意图

Fig. 2 Schematic of electromagnetic separator by using alternating current

实验时, 将 1 kg 配置好的 AI20% Si 合金在井式电阻炉中熔化, 在  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  保温 1 h。用电阻预热器把分离管预热到  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 然后停止预热。将调配好的铝合金熔体充分搅拌后浇入分离管中, 电路形成回路, 调节电压使电流达到预定值, 并开始计时, 同时打开电风扇以加速熔体的冷却, 到预定时间后关闭电源, 待熔体完全凝固后取试样宏观组织进行分析, 并用体视显微镜拍照。

## 3 结果与分析

### 3.1 单电流电磁净化的可行性验证

图 3 所示为在未施加电流时 3 种管型的试样横截面宏观组织照片(所有的试样均取轴中心对称位置处横截面)。可见, 在未通电流时, 铝合金熔体中的初生 Si 在析出时较均匀分布于整个截面上。图 4 所示为在通电 40 s, 电流 300 A(有效值  $I_e$ ) 时对应的宏观组织。此时初生 Si 相明显地偏聚于整个截面的四周, 并在近壁面形成了体积分数大于原始体积分数的区域。图 5 所示为图 4 中方形管试样的局部显微组织。可以看出, 在试样边缘的偏聚区富集

了粗大的初生 Si, 而在中心区已几乎看不到初生 Si 相。这样即可认为已实现了夹杂颗粒的电磁分离, 即证实了单电流电磁净化的可行性。

### 3.2 实验参数对初生 Si 相迁移行为的影响

#### 3.2.1 通电时间的影响

图 6 所示为电流 300 A, 不同通电时间正方形柱状试样的宏观组织。可见, 当通电时间为 10, 20 s 时, 部分初生 Si 相未完全偏聚; 通电时间延长至 40 s 后, 初生 Si 相已明显偏聚于整个截面的四周。

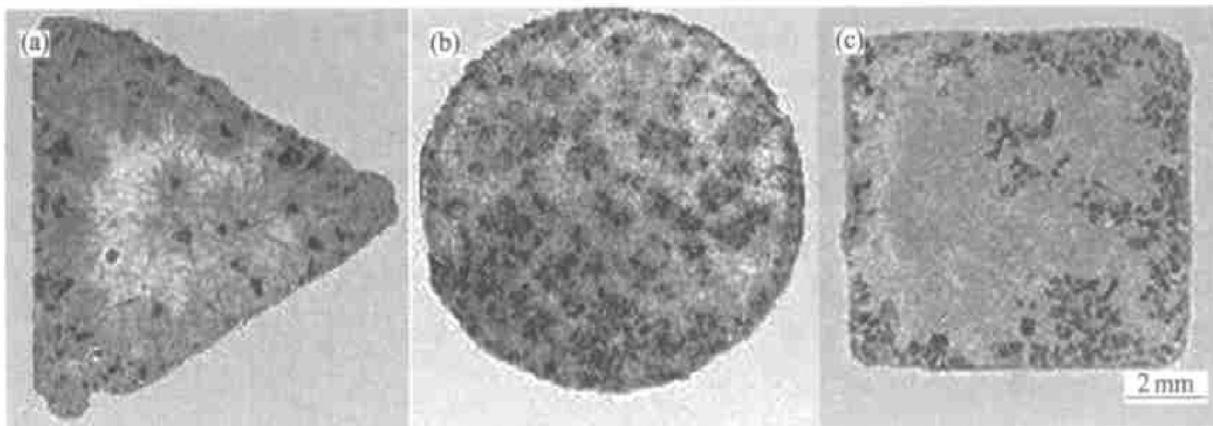


图 3 未施加电流时 3 种管型试样的宏观组织

Fig. 3 Macrostructures of AlSi alloy in different pipes without current

(a) —Triangle pipe; (b) —Circular pipe; (c) —Rectangle pipe

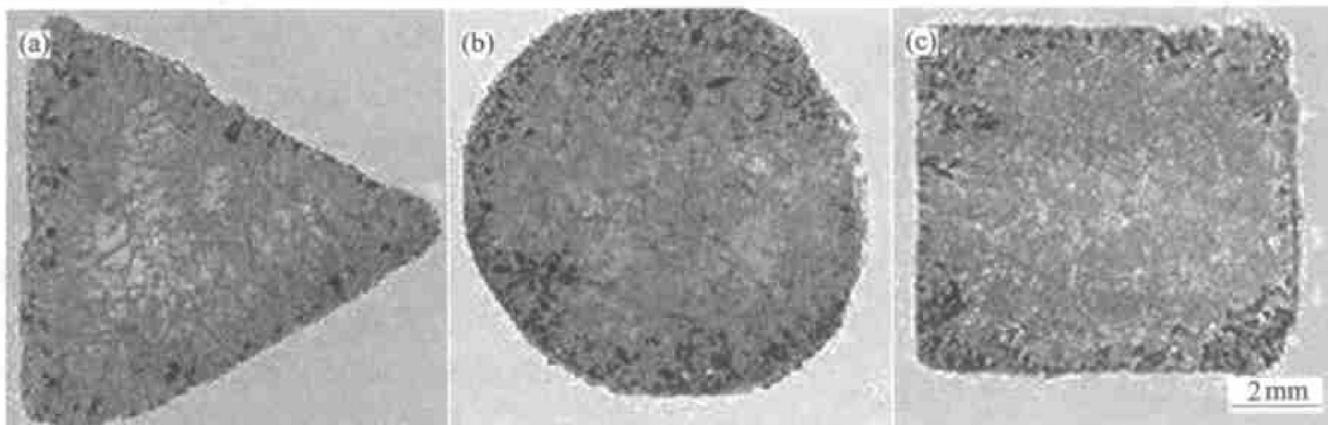


图 4 施加 300 A 电流时 3 种管型试样的宏观组织

Fig. 4 Macrostructures of AlSi alloy in different pipes with current of 300 A

(a) —Triangle pipe; (b) —Circular pipe; (c) —Rectangle pipe



图 5 图 4 中方形管试样的局部显微组织

Fig. 5 Microstructures of rectangle pipe sample in Fig. 4

(a) —Edge area; (b) —Transition area; (c) —Center area

这说明随着通电时间的延长, 即电磁力作用时间的延长, 向管壁迁移的初生 Si 相增多, 即夹杂颗粒的分离效率不断提高。

### 3.2.2 电流密度的影响

图 7 所示为通电时间 40 s, 电流分别为 150, 250 和 300 A 时三角形柱状试样的宏观组织。所对应的电流密度分别为  $2.3 \times 10^6$ ,  $3.9 \times 10^6$  和  $4.7 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。可见, 随着电流密度的增加, 初生 Si 相偏聚越来越明显, 中心区域数量越来越少。

理论分析<sup>[12]</sup>表明, 夹杂颗粒所受的电磁力与电流密度的二次方成正比, 随着电流密度的增加, 电磁力相应地迅速增大, 夹杂颗粒的迁移速率也随之增大。图 7 所示的实验结果与理论分析相符。

### 3.2.3 分离器管道截面形状的影响

从图 4 的实验结果可以看到, 在 3 种管型截面积几乎相等的条件下, 使用方形管、三角形管分离

器所得试样中初生 Si 相的偏聚比使用圆管分离器的偏聚更为明显。

在异型管(方管、三角管)中, 由于交变电流及其磁场所产生的电磁力是有旋的非保守力, 会在截面形成局部二次流<sup>[13, 16]</sup>。这种二次流有两方面作用: 一是将中心区域的细小颗粒带到熔体外层, 加速了颗粒向壁面的偏聚; 二是作为不稳定因素, 会打破电磁力场的平衡状态, 改变颗粒的定向迁移运动, 从而有可能对分离效率产生不利影响。如果电磁力足够强, 这种不利影响将会减小。

实验得到的结果证实了二次流的有利一面, 即在电磁分离过程中, 方形管或三角形管中的二次流对细小夹杂产生拖拽力, 可带动中心区域的夹杂颗粒迅速迁移到熔体外层, 这样颗粒在外层较强的电磁力作用下能迅速偏移到壁面。因此, 二次流加强了分离效果, 使分离效率得到提高。

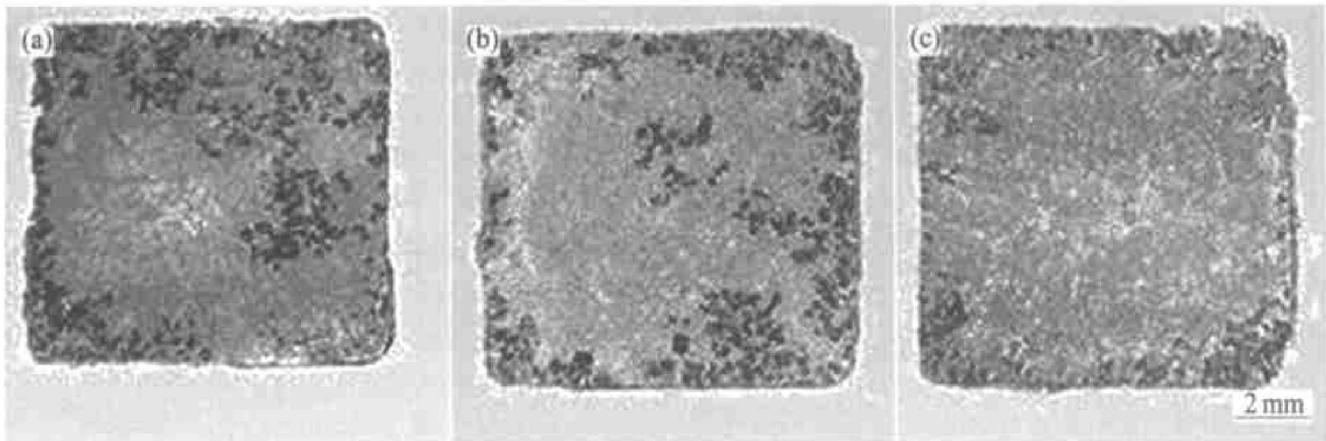


图 6 电流为 300 A 时不同通电时间对初生 Si 相迁移行为的影响

Fig. 6 Effects of imposed time on migration behavior of Si

(a)  $-t=10 \text{ s}$ ; (b)  $-t=20 \text{ s}$ ; (c)  $-t=40 \text{ s}$

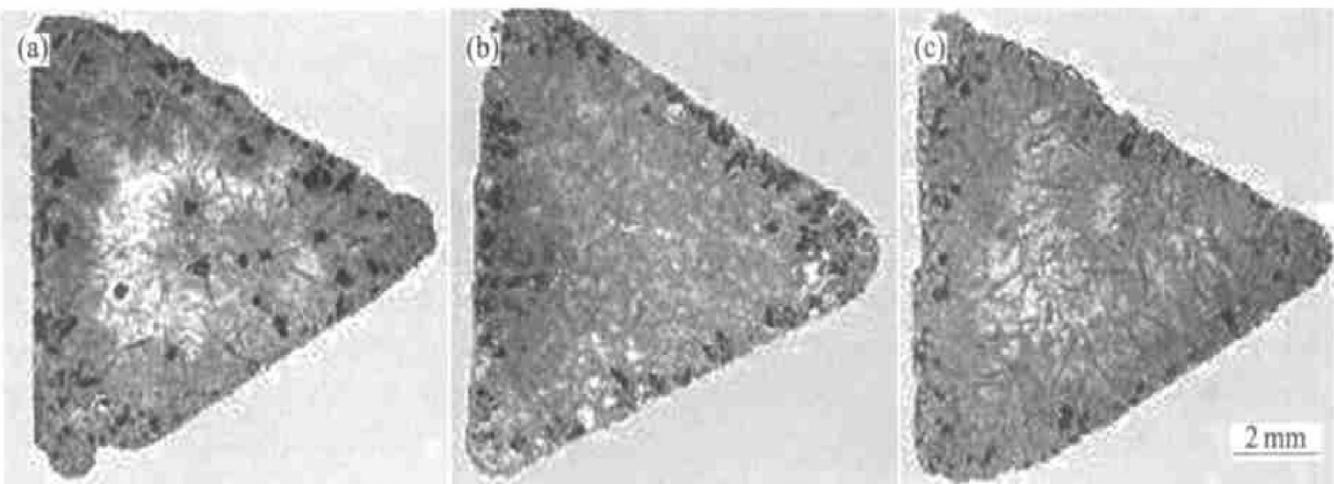


图 7 通电 40 s 时不同电流对初生 Si 相迁移行为的影响

Fig. 7 Effects of current on migration behavior of Si

(a)  $-I_e=150 \text{ A}$ ; (b)  $-I_e=250 \text{ A}$ ; (c)  $-I_e=300 \text{ A}$

## 4 结论

1) 利用工频交流电, 实现了铝合金熔体中夹杂物(以初生 Si 相模拟夹杂物)的电磁分离, 证实单电流电磁净化金属液技术是完全可行的。

2) 夹杂物的迁移行为主要与电流密度、通电时间、分离器管型等参数有关。电流密度越大、作用时间越长, 分离效果越理想。施加  $4.7 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>的交流电, 并维持 40 s 通电时间, 不同管型的分离器都获得了较明显的分离效果。

3) 在截面积几乎相等的条件下, 方管和三角管比圆管更有利于夹杂颗粒向管壁的迁移, 夹杂分离效果更显著。

## REFERENCES

- [1] Park J P, Sassa K, Asai S. Moving behavior of inclusions by electromagnetic force imposed in the horizontal direction[J]. CAMP-ISIJ, 1993, 6(1): 2.
- [2] Park J P, Tanaka Y, Asai S, et al. Elimination of tramp elements in molten metal using electromagnetic force[J]. Tetsu-to-Hagane, 1994, 80(5): 31-36.
- [3] Taniguchi S. Separation of inclusions in liquid metals using alternating current and magnetic field[J]. CAMP-ISIJ, 1998, 11(1): 89.
- [4] El-Kaddah N, Patel A D, Natarajan T T. The electromagnetic filtration of molten aluminum using an induced current separator[J]. JOM, 1995, 47(5): 46-49.
- [5] Yamao F, Sassa K, Iwai K, et al. Separation of inclusions in liquid metals using fixed alternating magnetic field[J]. Tetsu-to-Hagane, 1997, 83(1): 30-35.
- [6] LI Tian-xiao, SHU Da, XU Zhen-ming, et al. Physical simulation and theoretical analysis of migrating rate of inclusion in aluminum melt in electromagnetic field[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2001, 11(1): 30-34.
- [7] LI Ke, WANG Jun, SHU Da, et al. Separation of inclusions from aluminum melt using alternating electromagnetic field[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 12(6): 1107-1111.
- [8] Tanaka Y, Sassa K, Iwai K, et al. Separation of nonmetallic inclusions from molten metal using traveling magnetic field[J]. Tetsu-to-Hagane, 1995, 81(12): 12-17.
- [9] 钟云波, 任忠鸣, 邓康, 等. 行波磁场净化液态金属的电磁力参数[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 482-487.
- ZHONG Yun-bo, REN Zhong-ming, DENG Kang, et al. Electromagnetic force parameters during process of purifying liquid metal by traveling magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(3): 482-487.
- [10] ZHONG Yun-bo, REN Zhong-ming, DENG Kang, et al. Separation of inclusions from liquid metal contained in a triangle/square pipe by traveling magnetic field[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(2): 240-245.
- [11] 钟云波, 任忠鸣, 邓康, 等. 交变磁场净化金属液时金属液紊流的形成及其控制[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 541-546.
- ZHONG Yun-bo, REN Zhong-ming, DENG Kang, et al. Formation and control of turbulent in metal melts purified by alternating magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 541-546.
- [12] ZHANG Bang-wen, REN Zhong-ming, DENG Kang, et al. Theoretical investigation on by-only-current electromagnetic separation of inclusion from molten melts[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2002, 15(5): 416-424.
- [13] Taniguchi S, Brimacombe J K. Application of pinch force to the separation of inclusion particles from liquid steel[J]. ISIJ Int, 1994, 34(9): 722-731.
- [14] Kolin A. An electromagnetic phenomenon involving migration of neutral particles[J]. Science, 1953, 117(6): 134-137.
- [15] Leenov D, Kolin A. Theory of electromagnetophoresis (I): magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles[J]. J Chem Phys, 1954, 22(4): 683-688.
- [16] 张邦文, 任忠鸣, 邓康, 等. 感应磁场对电磁净化的影响[J]. 计算物理, 2002, 19(6): 527-531.
- ZHANG Bang-wen, REN Zhong-ming, DENG Kang, et al. Effects of induced magnetic field on electromagnetic separation of inclusions from liquid metals[J]. Computational Physics, 2002, 19(6): 527-531.

(编辑 陈爱华)