

利用高频磁场分离 Al 熔体中的非金属夹杂 *

李 克 孙宝德 李天晓 疏 达 丁文江 周尧和

(上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200030)

摘 要 对利用高频磁场分离 Al 熔体中非金属夹杂的工艺参数进行了研究. 通过理论解析计算得出频率 f 、磁感应强度 B_e 、颗粒直径 d_p 、电磁力作用时间 t 、管径与集肤深度的比值 r_1/δ 等参数与夹杂分离效率 η 的关系, 并与实测分离效率进行了分析和比较. 实验结果表明, 较高的磁场频率和磁感应强度是高分离效率的保证, 对于粒径为 $6\ \mu\text{m}$ 的非金属夹杂, 磁场频率为 15.6 kHz, 磁感应强度为 0.1 T 时, 电磁作用 10 s 即可获得 80% 以上的夹杂分离效率, r_1/δ 值的影响与频率有关, 频率越高, 则 r_1/δ 的取值范围越宽; $r_1/\delta=1.5\text{--}2$ 时可使分离效率获得最大值.

关键词 高频磁场, Al 熔体, 非金属夹杂, 分离

中图分类号 O242, TF111.18, TF114.12 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)04-0405-06

APPLICATION OF HIGH FREQUENCY MAGNETIC FIELD TO SEPARATE INCLUSION PARTICLES IN ALUMINUM MELT

LI Ke, SUN Baode, LI Tianxiao, SHU Da, DING Wenjiang, ZHOU Yaohe
School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030
Correspondent: SUN Baode, professor, Tel: (021)62932569, Fax: (021)62932914,
E-mail: bdsun@mail.sjtu.edu.cn

Manuscript received 2000-09-07, in revised form 2000-12-22

ABSTRACT The effects of processing variables which contain the frequency of magnetic field, magnetic flux density, imposed time, the diameter of inclusions on the efficiency of inclusion separation in aluminum melt with high frequency magnetic field were experimentally investigated. Results showed that higher frequency and magnetic flux density result in higher removal efficiency. While f is 15.6 kHz, B_e is 0.1 T, and imposed time is 10 s, the removal efficiency more than 80% can be obtained for inclusion particles with $6\ \mu\text{m}$ diameter. The higher the frequency, the wider the range of the ratio r_1/δ is. Normally, the removal efficiency reaches maximum while r_1/δ ranges from 1.5 to 2.

KEY WORDS high frequency magnetic field, aluminum melt, inclusion, separation

符 号 说 明

B	磁感应强度, T
B_e	有效磁感应强度, T
ber_n, bei_n	Kelvin 函数
d	圆管内径, mm
d_p	夹杂颗粒粒径, μm
E	感应电动势, V
f	磁场频率, Hz
F_{pr}	作用于夹杂颗粒的电磁挤压力, N

I_{rms}	外加交变电流, A
J	涡电流密度, A/m^2
L	线圈长度, m
N	小线圈匝数
R	无量纲数, $R = r/r_1$
r	夹杂颗粒所在位置的半径, mm
r_1	圆管半径, mm
S, S_1	分离器内夹杂总面积和偏移夹杂的面积, m^2
s	小线圈的有效面积, m^2
t	电磁力作用时间, s
v_{pr}	夹杂颗粒的最终迁移速度, m/s
δ	集肤深度 (m), $\delta = \sqrt{1/\pi\mu_e\sigma_t f}$
η	夹杂分离效率
μ	熔体的粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ_e	熔体的磁导率, H/m

* 国家重大基础研究规划 G1999064900-4 和国家自然科学基金 59871029 资助项目

收到初稿日期: 2000-09-07, 收到修改稿日期: 2000-12-22

作者简介: 李 克, 男, 1971 年生, 博士生

ξ 无量纲数, $\xi = \sqrt{2}r_1/\delta$

σ_f 熔体的电导率, S/m

ω 角频率, rad/s

随着 Al 合金在航空航天、汽车制造、电子器件等领域的应用越来越广泛, 对 Al 合金性能的要求越来越高, 非金属夹杂不仅促进疏松的形成, 还起到应力集中的作用, 使 Al 合金的塑性、韧性下降, 对高强度 Al 合金则使其机械强度和可靠性下降^[1]. 在原材料生产厂家, 采用各种熔体处理方法去除非金属夹杂已成为生产高质量 Al 材的必要环节, 传统的熔体静置、气体精炼、熔剂覆盖、过滤等熔体净化方法存在着夹杂去除效率不高、污染环境等缺点, 净化效果和可靠性方面都有待提高^[2-4]. 去除量少、尺寸小的非金属夹杂又是 Al 合金熔体净化的重点与难点之所在, 因此, 必须寻找一种更有效的分离夹杂工艺.

近年来, 电磁分离净化技术得到了广泛的研究^[5], 不同形式电磁场的金属熔体净化处理方案有: 直流电场正交稳恒磁场^[6]、交流电场^[7]、交变磁场^[8]以及行波磁场^[9]. 在所有应用电磁场分离夹杂的方案中, 外加交变磁场是实施起来最为方便的一种, 与其它几种工艺方案相比较, 这种方案的最大优点是无需再用回路来导通外加电流或感生电流, 没有电极污染问题, 而且分离效率受夹杂颗粒粒径的影响最小, 这对于分离小颗粒夹杂是十分有效的^[10]. 利用外加高频交变磁场净化 Al 熔体的工艺最早由 El-Kaddah 提出^[11], 并于 1990 年申请专利^[12]. 这种方案的磁场从单侧方向施加, 其最大优点是外加磁场的施加和磁感应强度大小的调节方便, 但是同时也带来问题, 即位于施加磁场另一侧的大部分区域磁场很弱, 细小夹杂的去除效率受到很大影响^[10]. Yamao 从理论上论证了利用线圈感生磁场进行电磁分离的可操作性, 并进行了探索性的熔体实验, 但是缺乏准确的实验数据来论证各种工艺参数与夹杂分离效率的关系^[8].

本研究旨在通过静置的熔体实验, 验证理论计算得出的频率 f , 磁感应强度 B_e , 颗粒直径 d_p , 电磁力作用时间 t , 集肤深度比 r_1/δ 与夹杂分离效率 η 之间的关系, 分析电磁分离操作过程中外部因素对实际效率的影响.

1 原理

将充满熔融金属的陶瓷管置于变化的磁场中, 会在金属中感生出频率和交变磁场一致的涡电流. 设定磁感应强度和感应电流密度的实部分别为

$$B = \text{Re}(B_0 e^{j\omega t}) \quad (1)$$

$$J = \text{Re}(J_0 e^{j\omega t}) \quad (2)$$

式中, Re 表示复数的实部. 涡流与感生磁场相互作用而产生指向轴心的电磁力 F 如图 1 所示. 当含有非金属夹杂的熔融金属受到这种电磁力的作用时, 由于非金属夹

杂与金属在导电性上的差异, 夹杂物会受到相反方向体积力 F_{pr} (也称为电磁挤压力) 的作用, 并向逆电磁力方向迁移, 最终附着在管壁上而除去.

电磁挤压力可表示为

$$\vec{F}_{pr} = -J \cdot B \quad (3)$$

式中, 负号表示电磁挤压力方向与熔体所受电磁力相反.

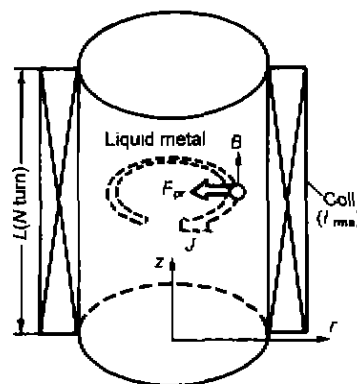


图 1 利用交变磁场去除金属熔体中非金属夹杂的原理示意图

Fig.1 Schematic of removing inclusion particles with electromagnetic force produced by applying current in a solenoid

2 实验方法

高频磁场发生设备为天津高频设备厂生产的 JGGCI-50-10/30 型 IGBT 感应加热电源, 用直径为 12 mm 的紫铜管绕成内径 d 为 60 mm, 长度 L 为 120 mm, 匝数 N 为 7 的感应加热线圈, 接在非晶变压器的输出端, 可产生频率 f 为 8.3 和 15.6 kHz 的高频感生磁场, 磁感应强度 B 的测定采用小线圈测量法^[13]. 用示波器测出某位置的感应电动势 E , 则该位置的磁感应强度有效值

$$B_e = \frac{E}{4.44fNs} \quad (4)$$

实验采用的合金为 Al-3.68Si-1.72Al₂O₃, 用纯铝、Al-19Si 中间合金和 Al-6Al₂O₃ 复合材料调配获得. Al₂O₃ 颗粒平均粒径 d_p 为 6 μm . 将原始合金置于石墨坩埚内, 在高温电阻炉中经 750 $^{\circ}\text{C}$ 熔化并保温 5 min, 充分搅拌后倒入静置于感应线圈中的分离器中, 分离器载体采用直径 d 分别为 4.5, 6, 8 和 10 mm 的圆管, 开启高频电源, 调节输出功率到预定值并保持一定时间后, 断开电源使合金熔体迅速冷却, 待凝固后取其金相组织进行分析.

用 OLYMPUS PME3 型卧式显微镜和 LECO 图像分析系统测定合金中 Al₂O₃ 的含量, 得出电磁分离前后 Al₂O₃ 颗粒在分离器内体积分数分布的变化. 对于静置熔

体电磁分离情况, 如果颗粒发生明显偏移, 并在近壁面聚集形成体积分数大于原始体积分数的区域, 即可认为在电磁力作用下实现了夹杂颗粒的分离. 静置熔体实验的分离效率计算公式为

$$\eta = \frac{S_1}{S} \times 100\% \quad (5)$$

3 实验结果

表 1 为不同电磁分离工艺参数条件下进行的静置熔体分离实验结果.

表 1 静置熔体电磁分离实验结果

Table 1 Experimental result of inclusion separation in aluminum melt

Sample No.	d , mm	B_e , T	f , kHz	r_1/δ	t , s	η , %
1	10.0	0.120	15.6	2.131	300	100.0
2	10.0	0.120	15.6	2.131	60	100.0
3	10.0	0.120	15.6	2.131	30	99.6
4	10.0	0.120	15.6	2.131	20	98.0
5	10.0	0.120	15.6	2.131	5	61.0
6	4.5	0.120	15.6	0.959	10	81.0
7	6.0	0.120	15.6	1.279	10	93.7
8	8.0	0.120	15.6	1.705	10	95.1
9	10.0	0.120	15.6	2.131	10	98.5
10	4.5	0.175	8.3	0.700	10	53.5
11	6.0	0.175	8.3	0.933	10	89.6
12	8.0	0.175	8.3	1.244	10	91.5
13	10.0	0.175	8.3	1.555	10	94.0

4 分析与讨论

4.1 理论夹杂分离效率计算公式的推导

根据文献 [6] 中 Korovin 的推导, 在理想的无限长螺线管线圈中用圆管容器约束金属熔体时, 熔体中单位体积夹杂颗粒受到的电磁挤压力

$$F_{pr} = \frac{B_e^2}{\sqrt{2}\mu_e r_1} f^*(\xi, R) \quad (6)$$

式中, $f^*(\xi, R)$ 是与颗粒所在位置 r 以及管径集肤深度比 r_1/δ 有关的函数, 即

$$f^*(\xi, R) = \xi \left\{ \text{ber}_0(\xi, R) \left[\text{ber}_1(\xi, R) + \text{bei}_1(\xi, R) \right] - \text{bei}_0(\xi, R) \left[\text{ber}_1(\xi, R) - \text{bei}_1(\xi, R) \right] \right\} / \left[\text{ber}_0(\xi, R)^2 + \text{bei}_0(\xi, R)^2 \right] \quad (7)$$

交变电流与感生磁场强度有以下关系 [13]

$$B_e = \mu_e \cdot \frac{NI_{rms}}{L} \quad (8)$$

因此, 式 (6) 又可以表示为

$$F_{pr} = - \frac{B_e^2}{\sqrt{2}\mu_e r_1} f^*(\xi, R) \quad (9)$$

根据电磁挤压力与粘性阻力相互平衡的原理, 可得颗粒的最终迁移速度

$$v_{pr} = - \frac{d_p^2}{24\mu} \cdot F_{pr} \quad (10)$$

将式 (9) 代入式 (10) 则

$$v_{pr} = - \frac{d_p^2 B_e^2}{24\sqrt{2}\mu\mu_e r_1} f^*(\xi, R) \quad (11)$$

单个颗粒 i 从 $R_i (= r_i/r_1)$ 处迁移到达壁面所需时间用下式计算

$$t_i = r_1 \cdot \int_{R_i}^1 \frac{1}{v_{pr}} dR \quad (12)$$

当电磁力作用时间为 t_i 时, 可认为 R_i 以外的颗粒均能运动到壁面, 故相应的夹杂分离效率可定义为

$$\eta = 1 - R_i^2 \quad (13)$$

4.2 r_1/δ 对分离效率的影响

对固定管径, 且粒径 d_p 分别为 5, 10 和 20 μm , r_1/δ 值变化时的理论夹杂分离效率进行了比较. 取 $B_e=0.1$ T, $r_1=5$ mm, $t=10$ s, 得到 r_1/δ 对分离效率 η 的影响曲线 (图 2a). 由图可见, 夹杂颗粒粒径对分离效率的影响很大, 粒径 d_p 从 5 μm 增至 10 μm , 最大分离效率提高了 13%. 不同粒径的夹杂的最大分离效率均对应于同样的频率范围, 粒径越大, 可应用的频率范围越宽, 如对于 d_p 为 20 μm 的夹杂, 在 $f=10-50$ kHz 范围内均可获得较高的分离效率.

不同频率下 r_1/δ 对分离效率 η 的影响见图 3a. f 为 8.3, 15.6 和 30 kHz 下的夹杂分离效率均在 $r_1/\delta=1.5-2$ 时达到最大值, 此时三种频率对应的管半径 r_1 分别为 4.8—6.4, 3.5—4.7 和 2.5—3.4 mm. 当 r_1/δ 超过 3 以后, 分离效率迅速降低. 考虑到实际应用中分离器管径太大会使夹杂颗粒运动距离增大, 并影响熔体的稳定流动, 而管径太小则容易造成夹杂的淤积, 使电磁过滤效率降低. 因此, 本实验采用半径 r_1 分别为 2.25, 3, 4 和 5 mm 的圆管作为分离器载体.

鉴于本熔体实验所使用的 Al_2O_3 夹杂颗粒的平均直径 $\bar{d}_p \approx 6$ μm , 故另以直径为 6 μm 的球形颗粒为对象进行分离效率的理论计算. 图 2b, 3b 即为 $B_e=0.12$ T, $d_p=6$ μm 时 r_1/δ 与理论及实际分离效率的关系曲线. 由图可见, 在固定分离器管径和固定磁场频率两种情况下, 熔体实验测定的实际效率值与理论计算曲线的变化趋势一致: 当 r_1/δ 处于 1—2 之间时, 分离效率取得最大值.

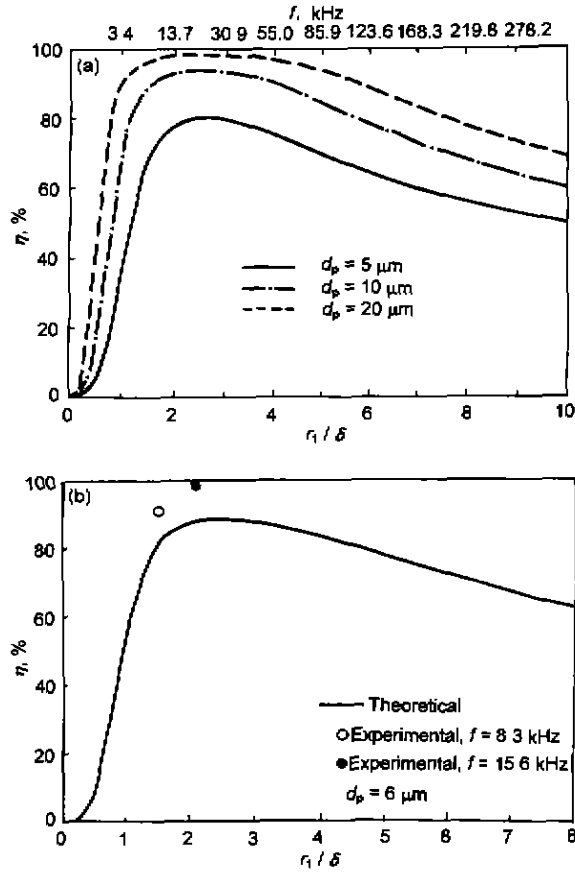


图2 管径固定时 r_1/δ 对分离效率的影响

Fig.2 Effect of r_1/δ on removal efficiency with constant separator diameter ($t=10 \text{ s}$, $r_1=5 \text{ mm}$)
(a) removal efficiency of particles with different d_p values ($B_e=0.1 \text{ T}$)
(b) comparison of experimental and theoretical η values ($B_e=0.12 \text{ T}$, $d_p=6 \mu\text{m}$)

4.3 电磁力作用时间对效率的影响

图4是 $f=15.6 \text{ kHz}$, $r_1=5 \text{ mm}$ ($r_1/\delta=2.131$), $d_p=6 \mu\text{m}$ 时, 夹杂颗粒的分离效率 η 随电磁力作用时间 t 的变化。当 $B_e=0.1 \text{ T}$ 时, $t=10 \text{ s}$ 就能获得80%以上的分离效率, 本实验使用的 IGBT 电源可以很容易地获得 0.1 T 以上的交变磁场, 因此实验中电磁力作用时间 t 以 10 s 为主。为了便于比较不同电磁力参数的影响, 大部分静置熔体实验中磁场力施加时间设定为 10 s 和 60 s 两种。从实验结果来看, 10 s 的处理时间就能使效率达到85%以上, 这与理论计算的结果基本接近, 亦即实际情况下电磁力作用时间控制在 10 s 左右即可获得足够的夹杂分离效果。延长处理时间至 30 s 以上可以得到更高的分离效率, 有的情况下夹杂甚至可以100%被去除(如试样 No.1 和 No.2)。但在工业生产中对流动熔体进行如此长时间的净化处理似不切实际。

4.4 磁感应强度大小的影响

不同磁感应强度作用下的实际分离效率与理论计算

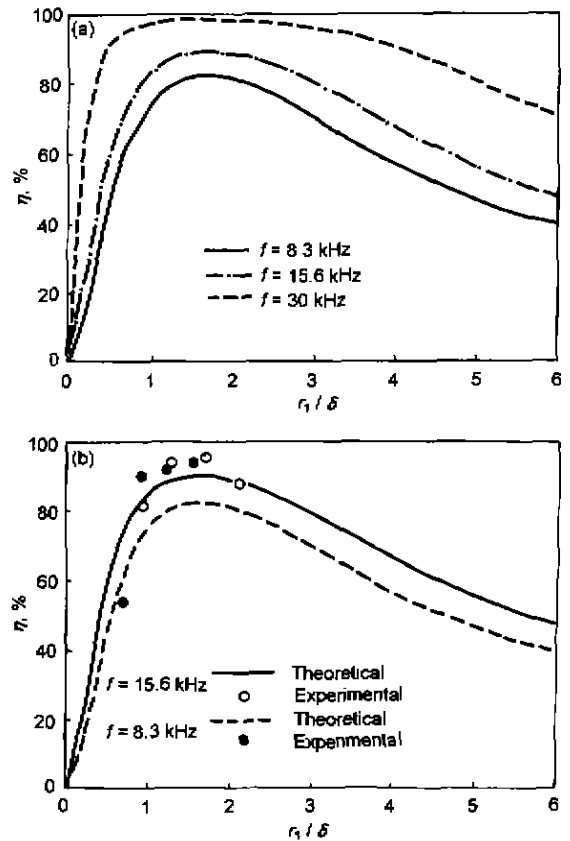


图3 不同频率条件下 r_1/δ 对分离效率的影响

Fig.3 Effect of r_1/δ on removal efficiency with constant particle diameter ($d_p=6 \mu\text{m}$, $t=10 \text{ s}$, $B_e=0.12 \text{ T}$)
(a) removal efficiency at different frequencies
(b) comparison of experimental and theoretical η values

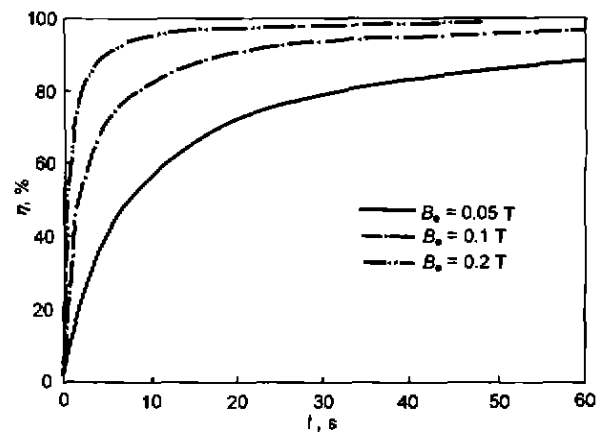


图4 夹杂分离效率和电磁力作用时间的关系

Fig.4 Relationship between removal efficiency (η) and processing time (t) ($d_p=6 \mu\text{m}$, $f=15.6 \text{ kHz}$, $r_1=5 \text{ mm}$)

值的比较见图5, 实测感应线圈内不同截面位置的磁感应强度 B_e 值呈图6中的曲线状分布, 据此可以取不同截面

位置的金相组织, 对其中的夹杂分布进行定量分析. 实验得到频率 f 分别为 15.6 和 8.3 kHz 时不同 B_e 值处的实际分离效率, 当 B_e 值超过 0.1 T 时, 两种频率下的夹杂分离效率均在 80% 以上; 随着 B_e 的降低, 分离效率急剧下降, 这说明比较高的磁感应强度仍然是高分离效率的保证.

图 7 是纵向截取圆管分离器中熔体凝固后试样在线

圈宽度范围内剖面的宏观照片和局部组织的放大金相照片. 从图 7a 可以看出, 分离效率沿线圈宽度方向的分布为: 中间磁感应强度高的区域夹杂偏移现象明显, 且夹杂分布集中; 在接近两端出口处, 夹杂偏移量少, 分布不集中. 显然, 由于线圈两端磁感应强度较中部小得多, 对夹杂颗粒的电磁力作用较小, 相应分离效率就较小.

两种频率下的分离效率均比理论计算值高, 其中频率

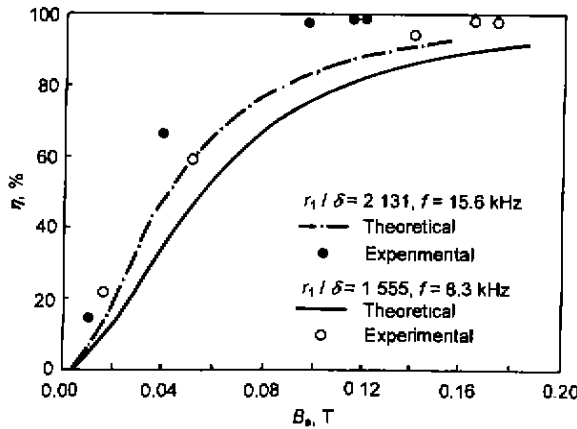


图 5 实际分离效率与理论计算值的比较

Fig.5 Comparison of experimental and theoretical η values ($d_p=6 \mu\text{m}$, $t=10 \text{ s}$, $r_1=5 \text{ mm}$)

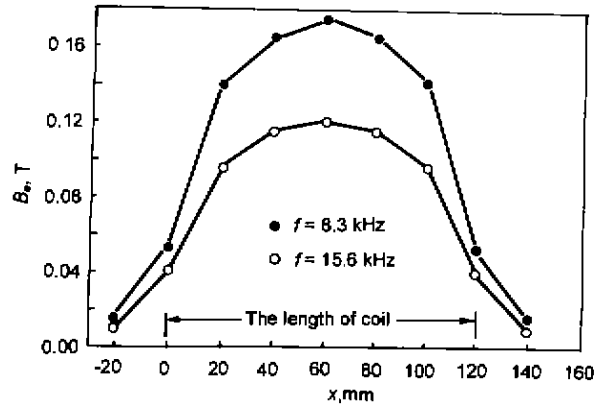


图 6 感应加热线圈中磁感应强度沿轴向的分布

Fig.6 Axial distributions of magnetic flux density in induce coil

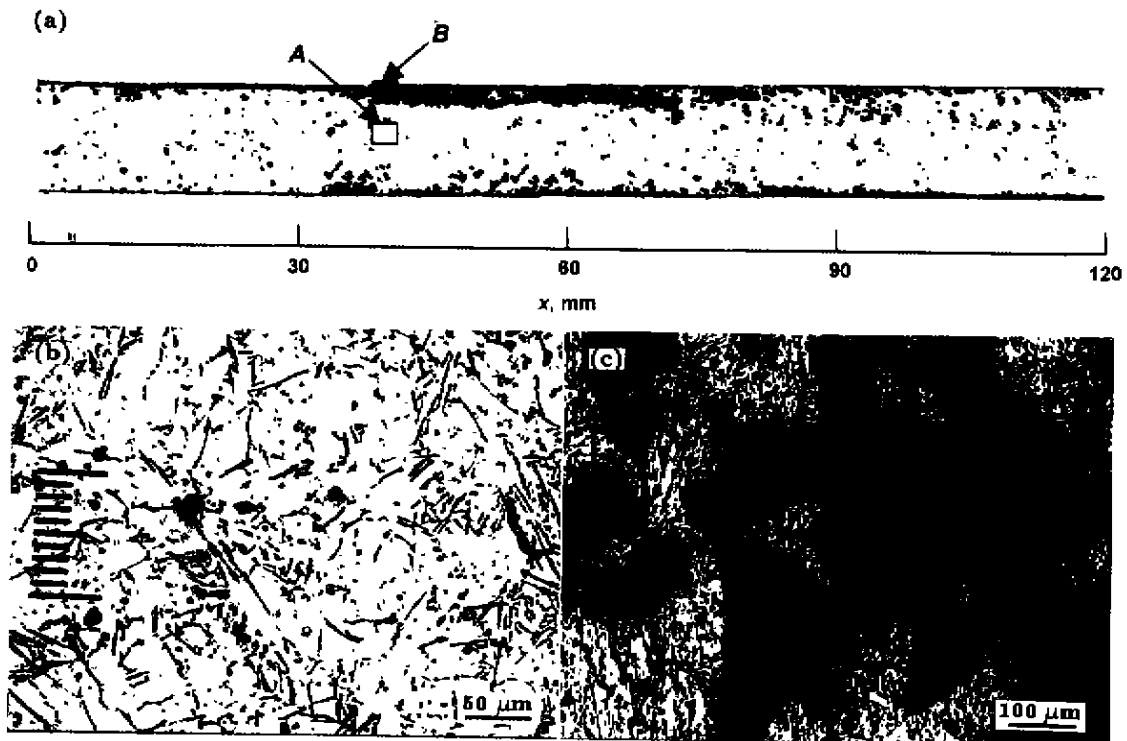


图 7 电磁分离处理后圆管分离器中取样的纵剖面宏观照片及局部组织放大金相照片

Fig.7 Metallographs of longitudinally cutting sample in the circular pipe separator ($r_1=3 \text{ mm}$, $B_e=0.12 \text{ T}$, $f=15.6 \text{ kHz}$, $t=10 \text{ s}$)

(a) macroscopical photo of longitudinally cutting sample (arrows A and B showing the different areas in the pipe)
(b) magnified photo of area A in Fig.6a (c) magnified photo of area B in Fig.6a

为 15.6 kHz 时相差更为明显。分析其原因,可能是由于实验熔体中掺杂氧化铝颗粒的体积分数较大,不同颗粒容易相互碰撞而聚集形成更大粒径的团簇,电磁分离效率因而相应增大。同时,由于高频线圈中感生磁场存在不均匀分布,使熔体产生不稳定流动,这种流动可以把中心部位的夹杂带到电磁挤压力大的集肤层当中,从而提高了电磁分离效率。扰动作用在线圈端部的表现尤其明显,其力的大小及其对电磁分离的负面影响,尚需从理论上进行分析和进一步的实验验证。

5 结论

(1) 理论效率计算和熔体实验结果均表明,改变圆管分离器的管径以及不同频率下夹杂分离效率均在 r_1/δ 处于 1.5—2 之间达到最大值。

(2) $f=15.6$ kHz, $r_1=5$ mm ($r_1/\delta=2.131$) 以及 $B_0=0.1$ T 时,电磁力的作用时间为 10 s 就能使直径为 $6\ \mu\text{m}$ 的夹杂颗粒获得 80% 以上的分离效率。

(3) 较高的磁场频率和磁感应强度对夹杂分离有利,特别是分离器管径, r_1/δ 值增大后,必须增大磁感应强度才能保证夹杂分离效率。

参考文献

[1] Peterson R. D. In: Huglen R. ed., *Proc 3rd Int Conf on Aluminum Processing*, Vol. I, Warrendale, PA: TMS, 1994:

75

- [2] Robert A. R. *JOM*, 1997; 49: 21
- [3] Cochran B. P., Fenyes M. L., Jeanneret J. L. *AFS Trans*, 1992; 100; 737
- [4] Eckert C. E., Miller R. E., Apelian D. *Light Metals*. Warrendale, PA: TMS, 1984: 1281
- [5] Asai S. *ISIJ Int*, 1989; 29: 981
- [6] Park J. P., Morihira A., Sassa K., Asai S. *Tetsu Hagané*, 1994; 80: 389
(朴浚杓, 森平淳志, 佐佐健介, 浅井滋生. 铁と钢, 1994; 80: 389)
- [7] Taniguchi S., Brimacombe J. K. *ISIJ Int*, 1994; 34: 722
- [8] Yamao F., Sassa K., Iwai K., Asai S. *Tetsu Hagané*, 1997; 83: 30
(山尾文孝, 佐佐健介, 岩井一彦, 浅井滋生. 铁と钢, 1997; 83: 30)
- [9] Tanaka Y., Sassa K., Iwai K., Asai S. *Tetsu Hagané*, 1995; 81: 1120
(田中佳子, 佐佐健介, 岩井一彦, 浅井滋生. 铁と钢, 1995; 81: 1120)
- [10] Shu D., Sun B. D., Wang J. *Metall Mater Trans*, 1999; 30A: 2979
- [11] El-Kaddah N. *IEEE on Industrial Applications*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988: 1162
- [12] Hobson D., Alexeff I., Sikka V. *US Pat*, 4 909 836, 1987
- [13] Qin Z. H. *Electrotechnics (I)*. Beijing: Higher Education Press, 1999: 231
(秦曾焯. 电工学(上册). 北京: 高等教育出版社, 1999: 231)