

# 交替复合磁场去除铝熔体中夹杂物的研究

高敏锐<sup>1,2</sup>, 李丘林<sup>1</sup>, 杨定国<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>2</sup>

(1. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

(2. 清华大学, 北京 100084)

**摘要:** 铝硅过共晶合金凝固过程中析出的初生硅颗粒被视为铝熔体中的夹杂物颗粒。研究了由交替旋转磁场和下行波磁场组成的交替复合磁场对铝熔体中夹杂物的去除效果。结果表明, 在交替复合磁场作用下, 夹杂物颗粒发生了明显的聚合并迁移至顶部被除去。对比发现, 交替复合磁场的除杂效果要优于单向旋转磁场和下行波磁场组成的单向复合磁场。随着交替复合磁场中的交替旋转磁场的频率和电流的增加, 磁场除杂效果显著上升。交替时间为 10 s 时磁场除杂效果最佳。

**关键词:** 交替复合磁场; 交替旋转磁场; 聚合; 夹杂物; 初生硅

中图分类号: TG249.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)05-1335-05

铝合金由于其低密度、高强度、高热导率和高电导率等优点, 已经被广泛应用于航空航天、船舶、汽车和建筑业等领域。但夹杂物的存在显著地降低了铝合金的力学和机械性能, 同时引起铝合金缺陷增多, 耐腐蚀能力变差<sup>[1,2]</sup>, 因此必须用可行且高效的方法来降低夹杂物的含量。传统的净化方法有重力沉降法、气泡法、精炼法和过滤法, 但这些方法对于细小夹杂物特别是尺寸在 20  $\mu\text{m}$  以下的夹杂物的去除效果较差, 且去除效率也较低<sup>[1]</sup>。电磁法作为一种新型净化方法, 利用金属熔体和非金属夹杂物之间导电率的不同而引起的电磁力的差别, 来实现夹杂物的去除<sup>[3]</sup>。已有多种类型的电磁场被应用到金属熔体的净化中<sup>[4-10]</sup>。但电磁法对于小尺寸的夹杂物去除效率也很低, 且很难实现工业化<sup>[11]</sup>。

解决细小夹杂物颗粒去除问题的一条途径是先使细小颗粒聚合成较大的夹杂物团簇然后再将其除去。该途径的可行性已被一些现有的研究结果所证实。Miki 等<sup>[12]</sup>发现经单向旋转磁场处理过的钢铸锭中有许多夹杂物聚合对, 这种夹杂物颗粒聚合的现象提高了单向旋转磁场去除钢铸锭中氧化物夹杂的效率。Lu 等<sup>[13]</sup>发现了铝硅过共晶合金凝固过程中析出的初生硅颗粒在单向旋转磁场作用下存在聚合现象。He 等<sup>[14,15]</sup>对由单向旋转磁场和下行波磁场组成的单向复合磁场的研究表明, 单向旋转磁场能够使夹杂物聚合成大尺寸的团簇并在行波磁场流场作用下被除去, 从而使复

合磁场具有比单一磁场更好的除杂效果。Alireza 等<sup>[16]</sup>发现在电磁振荡作用下, 铝硅过共晶合金在凝固过程中析出的初生硅发生了一定的团聚现象。Han 等<sup>[17]</sup>进一步验证了电磁振荡对铝硅过共晶合金在凝固过程中析出的初生硅的聚合作用, 并系统研究了频率和电流对聚合效果的影响规律。

本研究用铝硅过共晶合金凝固过程中析出的初生硅颗粒模拟熔体中的夹杂物颗粒, 引入了一种由交替旋转磁场(旋转方向周期性变化)和下行波磁场组成的交替复合磁场, 系统研究了该磁场对夹杂物的去除效果。

## 1 实验

本实验所用原料为 A390 过共晶铝硅合金, 具体化学成分如表 1 所示。实验时, 将直径为 25 mm、高度为 74 mm 的圆柱形合金样品置于直径为 26 mm、高度为 80 mm 的石英坩埚中, 启动伺服电机将样品升至电炉中部, 将试样升温熔化并在 720  $^{\circ}\text{C}$  保温 20 min。随后调整加热电机功率, 使熔体以 8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度降温至 640  $^{\circ}\text{C}$ 。打开励磁电源对样品进行磁场处理并将加热电源关闭。待试样温度降至 580  $^{\circ}\text{C}$  时关闭磁场, 用伺服电机出料, 取出试样并冷却至室温。将试样打磨和抛光后, 对初生硅颗粒的宏观分布和微观结构进行观察。

收稿日期: 2015-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(50904042)

作者简介: 高敏锐, 男, 1988 年生, 硕士, 清华大学材料学院, 北京 100084, 电话: 010-62772853, E-mail: gaominrui@gmail.com

表 1 过共晶铝硅合金的化学成分  
Table 1 Chemical composition of hypereutectic Al-Si alloy ( $\omega/\%$ )

Si	Cu	Fe	Mg	Zn	Ti	Al
18~20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	Bal.

## 2 实验结果

### 2.1 交替复合磁场的除杂效果

图 1 给出了初生硅颗粒在不同磁场作用下的分布情况。从图 1a 可以看出, 无任何磁场作用时, 初生硅颗粒在样品中基本呈弥散分布。对比图 1b, 图 1c 和图 1e 可以看出, 复合磁场处理后样品的无硅区面积要大于单一磁场处理后的样品中的无硅区面积, 这表明

复合磁场的除杂效果要优于单一磁场。对比图 1b, 图 1d 和图 1f 也可以得出同样规律。对比图 1e 和图 1f 可以看出, 当频率和电流相同时, 交替复合磁场处理后的样品无硅区面积要大于单向复合磁场处理后的样品中的无硅区面积, 这表明交替复合磁场的除杂效果要优于单向复合磁场。

### 2.2 交替旋转磁场的频率和电流对除杂效果的影响

图 2 给出了初生硅颗粒在不同电流和频率的交替复合磁场作用下的分布情况。对比图 2a 和图 2b 可以看出, 当交替复合磁场中的交替旋转磁场的频率从 5 Hz 提高到 40 Hz 时, 试样中无硅区的面积显著增大, 顶部颗粒分布更为集中。对比图 2b, 2c 和 2d 可看出, 当复合磁场中的交替旋转磁场的电流按 20、50、80 A

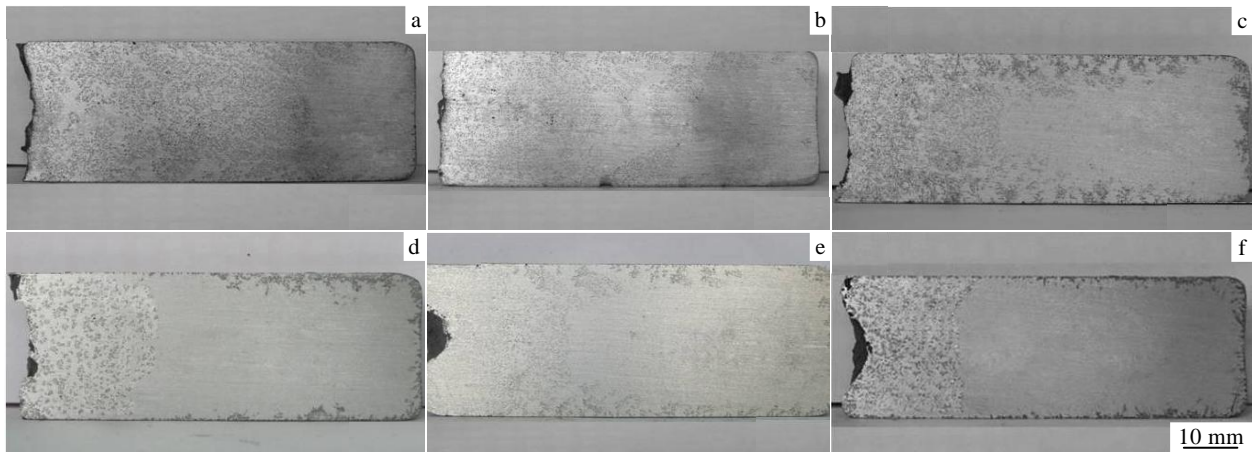


图 1 不同磁场下初生硅颗粒的分布情况

Fig.1 Distribution of primary silicon under different magnetic fields: (a) 0, (b) RMF (20 A/40 Hz), (c) TMF (20 A/50 Hz), (d) RMF (20 A/40 Hz/10 s), (e) RMF (20 A/40 Hz)+TMF (20 A/50 Hz), and (f) RMF (20 A/40 Hz/10 s)+TMF (20 A/50 Hz)

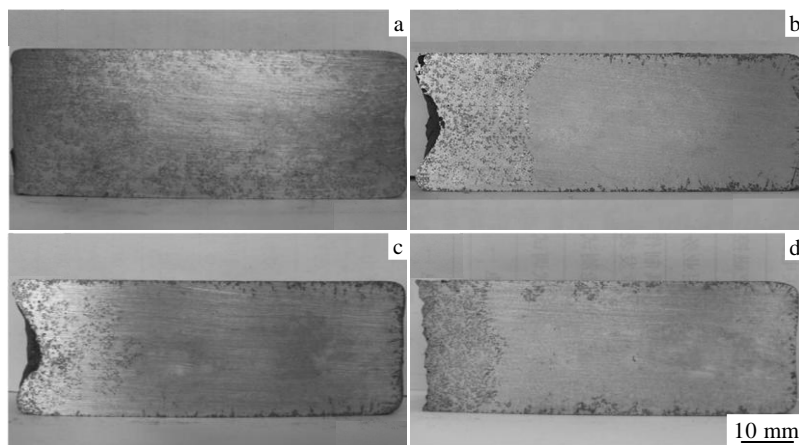


图 2 交替旋转磁场频率和电流对初生硅颗粒分布的影响

Fig.2 Distribution of primary silicon under different frequencies and currents of alternating magnetic fields: (a) RMF (20 A/5 Hz/10 s) + TMF (20 A/50 Hz), (b) RMF (20 A/40 Hz/10 s) + TMF (20 A/50 Hz), (c) RMF (50 A/40 Hz/10 s) + TMF (20 A/50 Hz), and (d) RMF (80 A/40 Hz/10 s) + TMF (20 A/50 Hz)

依次提高时, 试样中无硅区的面积也依次增大, 初生硅颗粒分布变得更紧密。交替复合磁场的除杂效果随着交替复合磁场中的交替旋转磁场的电流和频率的增加而提高。

### 2.3 交替时间对除杂效果的影响

图 3 给出了初生硅在不同交替时间下的分布状况。交替复合磁场中的交替旋转磁场的电流和频率固定在 20 A 和 40 Hz, 行波磁场的电流和频率固定在 20 A 和 50 Hz。从图 3a 可以看出, 交替时间为 5 s 时, 试样中无硅区面积较小, 且试样下部和侧壁上有较多硅颗粒残留。从图 3b 可以看出, 当交替时间变为 10 s 时, 试样中无硅区的面积明显变大, 硅颗粒向试样顶部迁移行为显著变好, 试样底部和侧壁上基本没有残余的初生硅颗粒出现。从图 3c 可以看出, 当交替时间增至 15 s 时, 试样中无硅区的面积与 10 s 时差别不大, 但试样底部和侧壁上又出现了一定数量的初生硅颗粒。对比图 3a、3b 和 3c 可知, 交替时间为 10 s 时交替旋转磁场的除杂效果最佳。

### 2.4 交替旋转磁场与单向旋转磁场聚合效果对比

图 4 给出了初生硅颗粒在交替旋转磁场和单向旋转磁场下的宏观和微观分布情况。对比图 4a 和 4c 看出, 当磁场电流和频率相同时, 交替旋转磁场下试样的无硅区面积仅略大于单向旋转磁场下样品中的无硅区面积。但对比图 4b 和 4d 可以看出, 单向旋转磁场样品顶部初生硅颗粒基本呈现弥散状分布, 而交替旋转磁场样品顶部颗粒却发生了明显且紧密的聚合。因此交替旋转磁场比单向旋转磁场对硅颗粒有着更好的聚合作用。

## 3 分析与讨论

在单向或交替旋转磁场作用下, 铝熔体会受到一个切向的电磁力并在其作用下沿圆周方向运动。同时熔体运动时会对初生硅颗粒产生一个与电磁力方向相反的挤压力, 使得硅颗粒在该挤压力的作用下也开始沿圆周方向运动。初生硅颗粒沿圆周运动时, 因其密度

小于铝熔体密度还会受到一个离心力的作用使其向熔体中心迁移并发生离心碰撞<sup>[10]</sup>。颗粒在碰撞后易发生聚合, 因为聚合能够降低其表面能。铝液对初生硅颗粒的挤压力<sup>[11]</sup>为

$$F_p = -\frac{3\pi d_p^3}{4 \cdot 6} f \quad (1)$$

其中,  $d_p$  表示颗粒的直径,  $f$  表示单位体积铝熔体所受到的电磁力, 负号表示挤压力的方向与电磁力的方向相反。铝液沿圆周运动时除了受到该挤压力外还受到一个与挤压力方向相反的粘滞阻力<sup>[18]</sup>

$$F_s = 3\pi\eta d_p h \quad (2)$$

$v$  和  $\eta$  表示颗粒的运动速度和熔体的粘滞系数。挤压力与颗粒粒径三次方成正比, 阻力与颗粒粒径成正比。两者达到平衡时, 在圆周方向上, 颗粒将以一个恒定的平衡速度运动。类比斯托克斯碰撞模型<sup>[18]</sup>, 可知初生硅颗粒的平衡速度与颗粒粒径的平方成正比。因此速度慢的小颗粒会被速度快的大颗粒追上, 发生切向速度梯度碰撞。

在交替旋转磁场下, 磁场旋转方向会周期性地反向, 铝熔体和硅颗粒在圆周上的运动方向也随之反向。与小颗粒相比, 大颗粒完成反向所需时间更长。因此已经反向的小颗粒会与尚未反向的大颗粒发生切向相对碰撞。离心碰撞和切向速度梯度碰撞同时存在于单向和交替旋转磁场下, 而切向相对碰撞只存在于交替旋转磁场下。

复合磁场对初生硅颗粒的作用机理如图 5 所示<sup>[15]</sup>。将熔体分为 2 个区域, 即熔体中心部位的 I 区和熔体边缘部位的 II 区。下行波磁场在熔体的经纬面上会形成中心向上边缘向下的环形流场<sup>[19-22]</sup>。施加单向复合磁场时, II 区的初生硅颗粒会在单向旋转磁场产生的离心力的作用下向中心的 I 区迁移, 在径向上有很大的迁移速度, 并在熔体中心处碰撞聚合成为大尺寸团簇。此时中心部位 I 区的大尺寸颗粒会在行波磁场引起的流场和自身所受浮力共同作用下向熔体上部迁移。施加交替复合磁场时, 交替旋转磁场除了有驱使

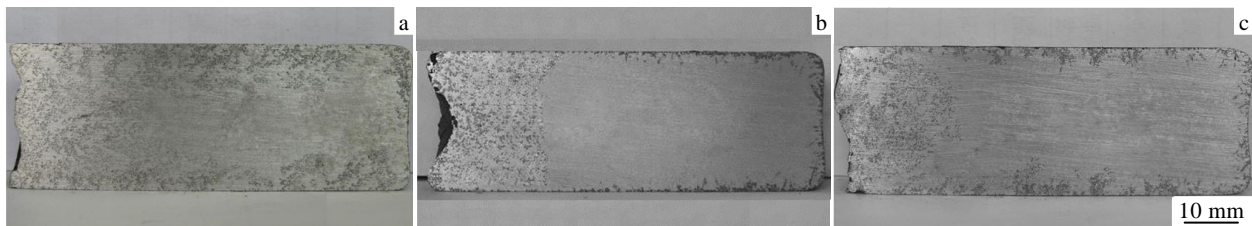


图 3 交替旋转磁场交替时间对初生硅颗粒分布的影响

Fig.3 Distribution of primary silicon under alternating magnetic fields for different alternating time: (a) RMF (20 A/40 Hz/5 s) + TMF (20 A/50 Hz), (b) RMF (20 A/40 Hz/10s) + TMF (20 A/50 Hz), and (c) RMF (20 A/40 Hz/15 s)+TMF (20 A/50 Hz)

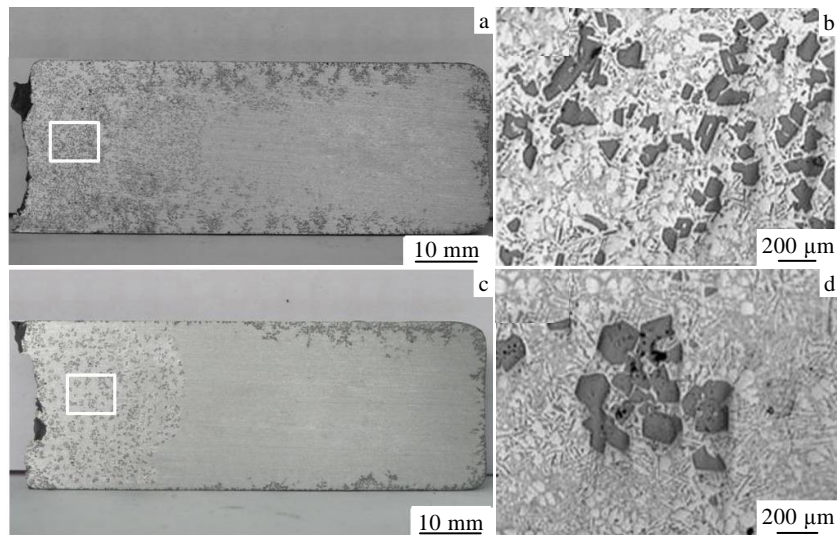


图 4 单向旋转磁场与交替旋转磁场下初生硅颗粒分布

Fig.4 Distribution of primary silicon under oriented RMF and alternating RMF: (a, b) RMF (20 A/40 Hz) and (c, d) RMF (20 A/40 Hz/10 s)

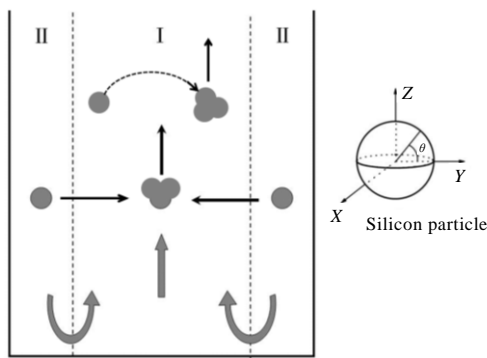


图 5 复合磁场除杂机理示意图

Fig.5 Schematic diagram of the removal mechanism of combined magnetic field

颗粒径向迁移的效果外，还会大大促进颗粒在切向上的碰撞聚合。交替旋转磁场在熔体切向上引发的相对碰撞会大大增加颗粒的碰撞概率，使得硅颗粒形成较大尺寸的团簇，在下行波磁场和自身浮力的作用下会更快向熔体上部迁移。因此交替复合磁场的净化效果要优于单向复合磁场。

硅颗粒圆周方向运动速度随交替旋转磁场频率和电流的增加而增加<sup>[13]</sup>，3 种碰撞也会随着此速度的增加而增强。因此在交替复合磁场下，随着交替复合磁场中的交替旋转磁场的频率和电流的增加，硅颗粒的碰撞聚合增强，颗粒也更易迁移至熔体顶部，磁场除杂效果变好。

若交替时间太短，短于颗粒加速至平衡速度所需

时间，则初生硅在磁场中来不及加速至平衡速度就在磁场的反向作用下开始减速，此时其圆周方向运动速度较低，所受的离心力和其沿径向迁移的速率也较低，离心碰撞较弱。同时颗粒的切向速度梯度碰撞和切向相对碰撞的行为也都较弱。若交替时间太长，超过颗粒加速至平衡时所需时间，此时颗粒运动已达到平衡速度，再进一步提高交替时间时也不会增强离心碰撞和切向速度梯度碰撞。相反，当磁场处理总时间一定时，交替时间的增加会使磁场转向次数减少，即颗粒运动方向改变的次数变少，这会使得金属液中初生硅颗粒发生切向相对碰撞的概率降低，从而减弱初生硅颗粒的碰撞聚合。因此，交替时间存在一最佳值。本实验中，10 s 要优于 5 和 15 s。

## 4 结 论

- 1) 在交替复合磁场下，夹杂物颗粒发生明显的聚合并迁移至顶部被除去。对比发现交替复合磁场的除杂效果优于单向复合磁场。
- 2) 随着交替复合磁场中的交替旋转磁场的频率和电流的增加，颗粒聚合和迁移更加明显，磁场除杂效果更好。
- 3) 交替时间为 10 s 时磁场除杂效果最佳。

### 参考文献 References

[1] Shu D, Sun B D, Wang J *et al. Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2000, 31(6): 1527  
 [2] Li K, Wang J, Shu D *et al. Materials Letters*[J], 2002, 56(3):

- 215
- [3] Kolin A. *Science*[J], 1953, 117(3032): 134
- [4] Park J P, Sassa K, Asai S J. *Journal of Japan Institute of Metals*[J], 1995, 59(7): 733
- [5] Park J P, Tanaka Y, Sassa K *et al.* *Conference on Electromagnetic Processing of Materials*[C]. Nagoya: ISIJ, 1994: 497
- [6] Takahashi K, Taniguchi S. *ISIJ International*[J], 2003, 43(6): 820
- [7] Kaddah N, Ala T. *US Patent, US4909836*[P], 1990
- [8] Zhao Chunhui(赵春晖), Li Qiulin(李丘林), Liu Wei(刘伟). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 573
- [9] Guo Qintao(郭庆涛), Jin Junze(金俊泽), Li Tingju(李廷举). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(5): 849
- [10] Wu Jiexiong(吴加雄), Ren Zhongming(任忠鸣), Zhang Bang-wen(张邦文) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2004, 14(3): 354
- [11] Leenov D, Kolin A. *Journal of Chemical Physics*[J], 1995, 22(4): 683
- [12] Miki Y, Kitaoka H, Skuraya T *et al.* *ISIJ International*[J], 1992, 32(1): 142
- [13] Lu D H, Jiang Y H, Guan G S *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 189(1-3): 13
- [14] He Y J, Li Q L, Liu W. *Materials Letters*[J], 2011, 65(8): 1226
- [15] He Y J, Li Q L, Liu W. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2012, 43(5): 1149
- [16] Alireza R, Kenji M. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2002, 33(9): 3025
- [17] Han Y C, Li Q L, Liu W *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2012, 43(5): 1400
- [18] Tacke T H, Ludwing J H. *Steels Research*[J], 1987, 58(6): 262
- [19] Grant I, Klyukin A, Gerbeth G. *Journal of Crystal Growth*[J], 2009, 311(17): 4255
- [20] Grant I, Gerbeth G. *Journal of Crystal Growth*[J], 2004, 269(2-4): 630
- [21] Lantzsch R, Galindo V, Grants I *et al.* *Journal of Crystal Growth*[J], 2007, 305(1): 249
- [22] Zaidat K, Khachroum T O, Vian G R. *Journal of Crystal Growth*[J], 2005, 275(1-2): 150

## Removal of Inclusions from Aluminum Melt Using Alternating Combined Magnetic Field

Gao Minrui<sup>1,2</sup>, Li Qiulin<sup>1</sup>, Yang Dingguo<sup>1,2</sup>, Liu Wei<sup>2</sup>

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

(2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Primary silicon particles precipitating from the solidification of Al-Si hypereutectic alloy are regarded as inclusions which need removing. The effect of alternating combined magnetic field (CMF) composed of downward travelling magnetic field (TMF) and alternating rotating magnetic field (RMF) on the inclusions removal from aluminum melt was investigated. Inclusion particles agglomerated into clusters and migrated to the top of the melt under alternating CMF. It is found alternating CMF has a better removing effect than oriented CMF composed of oriented RMF and downward TMF. The removing effect of alternating CMF increases when the current and frequency of alternating RMF consisting of alternating CMF increase. Alternating CMF has the best removing effect when the alternating time is 10 s.

**Key words:** alternating combined magnetic field; alternating rotating magnetic field; agglomerate; inclusions; primary silicon particles

---

Corresponding author: Li Qiulin, Ph. D., Associate Professor, Advanced Materials Institute, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, P. R. China, Tel: 0086-755-28036424, E-mail: liql@sz.tsinghua.edu.cn