

文章编号: 1004-0609(2005)07-1112-06

高频磁场电磁净化模拟^①

郭庆涛, 金俊泽, 李廷举

(大连理工大学 材料科学与工程系, 大连 116023)

摘 要: 为了更准确地分析高频交变电磁场对金属熔体中的非金属夹杂物的去除效果, 分别利用硅含量为 18%、12.6% 和 10% 3 种铝硅合金所生成的尺寸为 100、50 和 10 μm 的硅块来模拟非金属夹杂物以进行电磁净化实验研究。实验证明: 生成的硅块可以更好地模拟金属液中单个的非金属夹杂物; 施加电磁场后发现, 电磁挤压力对单个尺寸在 100 和 50 μm 的非金属夹杂物的去除效果明显, 同时也可以去除 10 μm 左右的非金属夹杂物。

关键词: 电磁力; 电磁净化; 非金属夹杂物

中图分类号: TF 111.18

文献标识码: A

Simulation of electromagnetic purification by using high frequency magnetic field

GUO Qing-tao, JIN Jun-ze, LI Ting-ju

(Department of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, China)

Abstract: To accurately analyze the eliminative effect of high frequency electromagnetic field on the nonmetallic inclusions in liquid metal, the electromagnetic eliminating experiments were made with 100, 50 and 10 μm primary Si produced by Al-Si alloys with Si content of 18%, 12.6% and 10% respectively, and was used to simulate the non-metallic inclusions. The results show that the produced primary Si are more suitable to substitute the single non-metallic inclusions in the molten alloys. Primary Si with size of 100, 50 μm can be wiped off evidently under electromagnetic force, similarly primary Si with size of 10 μm can also be eliminated.

Key words: electromagnetic force; electromagnetic purification; nonmetallic inclusions

金属电磁净化技术是利用金属与非金属的导电性差异分离液态金属中非金属杂质的技术。金属和非金属在磁场中受到的电磁力大小不同, 因而会产生相对的运动, 达到一定条件, 即可实现分离^[1, 2]。目前常用的电磁分离方案有: 直流电场正交稳恒磁场^[3, 4]、交流电场^[5]、交变磁场^[6, 7]、行波磁场^[8, 9]和 高频磁场^[10-13]等。在这些电磁分离技术方案中, 高频交变磁场以其操作的简便性, 得到了更广泛的关注。El-Kaddah 等^[14]最早提出利用外加高频交变

磁场净化 Al 熔体的工艺, 并于 1988 年申请了专利。Yamao 等^[7]从理论上论证了利用高频线圈感生磁场进行电磁分离的可操作性, 随后众多的科研工作者进行了探索性实验^[10-13, 15]。但是目前普遍的电磁净化实验研究是在纯金属或合金中加入不熔性氧化物颗粒来模拟非金属夹杂物, 其缺点是: 当氧化物颗粒较少时实验现象不明显, 而氧化物颗粒过多则容易发生团聚现象, 很难准确验证电磁挤压力对不同尺寸颗粒的影响。为了克服以上缺点, 本文作

① 基金项目: 国家自然科学基金和上海宝钢集团联合资助项目(50274017)

收稿日期: 2004-11-11; 修订日期: 2005-05-24

作者简介: 郭庆涛(1978-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 郭庆涛, 电话: 0411-84709284; E-mail: mystone_2002@tom.com

者进行了两个方面的研究: 1) 采用了铝硅合金中自生的硅块模拟非金属夹杂物以更加准确的再现实际情况; 2) 研究了交变电磁场对小尺寸的硅块去除情况。

1 电磁分离原理

如图 1 所示, 线圈中通入高频交变电流后, 在金属内部产生一个与线圈电流频率一致、方向相反的感生电流(J), 感生电流(J)与磁场相互作用产生指向金属中心的电磁体积力, 即

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B} \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{F}$ 为电磁体积力, N/m^3 ; $\boldsymbol{J}$ 为感应电流, A ; $\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度, T 。

熔融状态金属的导电率远大于非金属夹杂物的导电率, 因而, 液态金属受到较大的指向金属内部的电磁力, 而非金属夹杂物相对受到了一个与电磁力方向相反的电磁挤压力的作用。在电磁挤压力的作用下, 非金属夹杂物逐渐运动到金属熔体的表面, 进而可以去除, 即施加高频交变磁场电磁净化的基本原理。

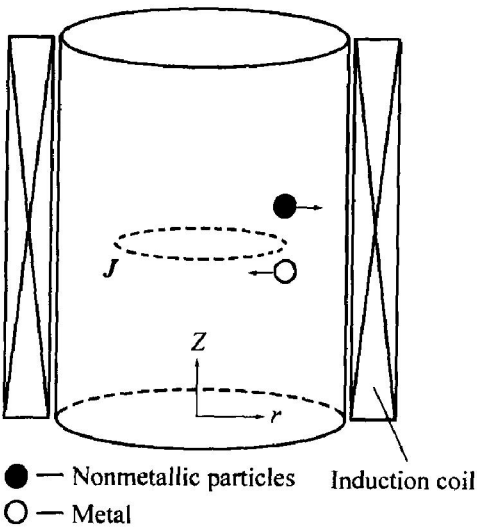


图 1 高频磁场电磁净化原理图

Fig. 1 Principle diagram of electromagnetic purification with high frequency magnetic field

在流动速度很小的假设条件下, 电磁场在电导率不同的夹杂物中产生的电磁力合力, 由 Leenov 和 Kolin^[1] 计算为

$$F_p = - \frac{3}{2} \frac{\sigma_p - \sigma_l}{2\sigma_l + \sigma_p} \frac{\pi d_p^3}{6} F \tag{2}$$

式中 F_p 为电磁挤压力; σ_l , σ_p 分别为熔体和夹杂物的电导率; d_p 为夹杂物粒子直径。对于许多非金

属夹杂物, 导电率趋近于零, 因此式(2)变为

$$F_p = - \frac{3}{4} \frac{\pi d_p^3}{6} F \tag{3}$$

由式(3)可以看出: 作用在夹杂物上的电磁挤压力与电磁力方向相反; 电磁挤压力与熔体的动力粘度无关; 非金属夹杂物的直径对电磁净化效果有显著的影响, 颗粒直径越小, 所受电磁挤压力越小, 越难从熔融金属中去除。

在本实验中, 忽略重力对非金属夹杂物运动的影响, 根据电磁挤压力与 Stokes 粘滞力的平衡, 可以确定颗粒的最终分离速度为^[11]:

$$u_p = \frac{d_p^2 F}{24 \eta} \tag{4}$$

式中 η 为熔体的运动粘度。

2 实验与结果

电磁净化实验装置示意图如图 2 所示, 其中电磁场由 IGBT 中频电源柜控制。施加电磁场时, 电源柜的输出电压为 160 V, 功率为 6 kW, 频率为 20 kHz。线圈中心处磁感应强度由 CT3-A 型特斯拉计测定可以达到 0.2 T。实验用线圈及陶瓷管具体尺寸如图所示。实验所用原材料为纯度为 99.7% 的国产工业纯铝和纯度为 99.9% 的工业用硅。铝硅合金在 SG2-5-12 坩埚电阻炉中配制。为了生成不同尺寸的硅块, 实验中共配置了含硅量为 18%、12.6% 和 10% 的 3 种铝硅合金, 在不同的凝固条件下, 分别生成了尺寸为 100、50 和 10 μm 的硅块,

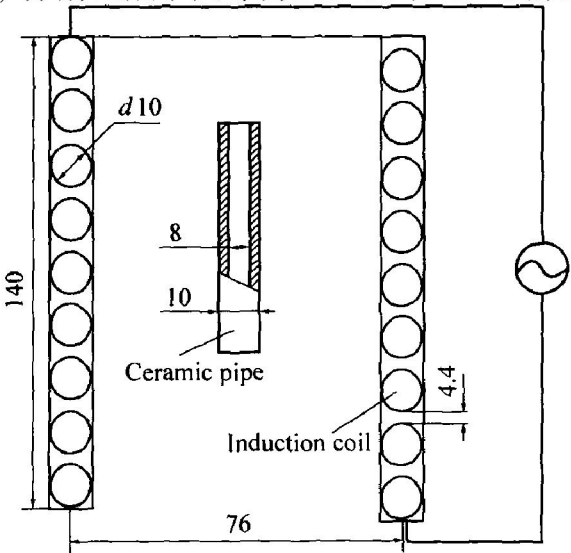


图 2 电磁净化实验装置示意图

Fig. 2 Sketch of experimental apparatus for electromagnetic purification (mm)

并进行了电磁净化实验。实验中,假设试样所处位置的电磁场分布均匀;由于陶瓷管内径较小,故忽略流动对电磁净化效果的影响。

2.1 100 μm 硅颗粒的制备及电磁净化实验

首先将配置好的成分为 18% 的铝-硅过共晶合金在电阻炉中加热熔化至 720 $^{\circ}\text{C}$, 保温 20 min, 然后倒入预热的内径为 8 mm 的细陶瓷管中, 风冷, 取样, 磨制, 获得原始试样。从图 3(a) 中可以看出初晶硅比较均匀地分布在试样中。

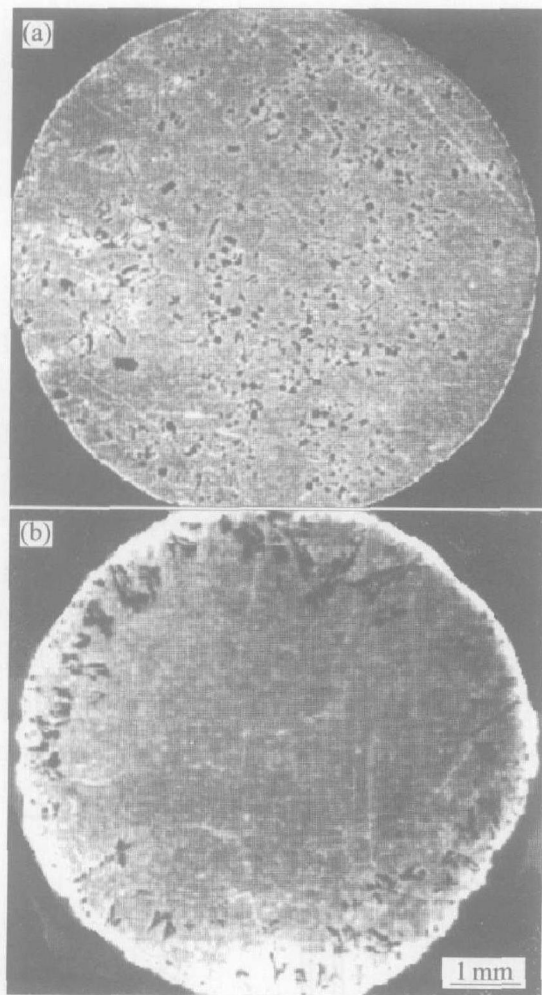


图 3 Al-18% Si 合金的凝固组织

Fig. 3 Optical micrographs of cross section of solidified Al-18% Si alloy

(a) —Without electromagnetic field;

(b) —With electromagnetic field

由铝硅二元合金相图可知, 18% 的铝硅过共晶合金在 680 $^{\circ}\text{C}$ 左右即有初晶硅生成, 为了保证初晶硅块的数量和尺寸, 以及保持金属液的良好流动性, 在电磁净化实验时, 将熔化温度为 720 $^{\circ}\text{C}$ 的铝硅倒入图 2 所示的陶瓷管中降温至 (655 $\pm$ 5) $^{\circ}\text{C}$ 时保持温度恒定并施加高频电磁场, 通电 1 min, 然

后断电, 风冷, 观察实验结果。从图 3(b) 中可以看出经过电磁场作用后, 块状黑色初晶 Si 主要分布在试样的边缘附近。图 4 所示为 Al-18% Si 合金的金相组织照片, 图 4(a) 所示为中心部组织, 主要是铝-硅共晶组织; 图 4(b) 所示为边部组织, 含较多硅块。

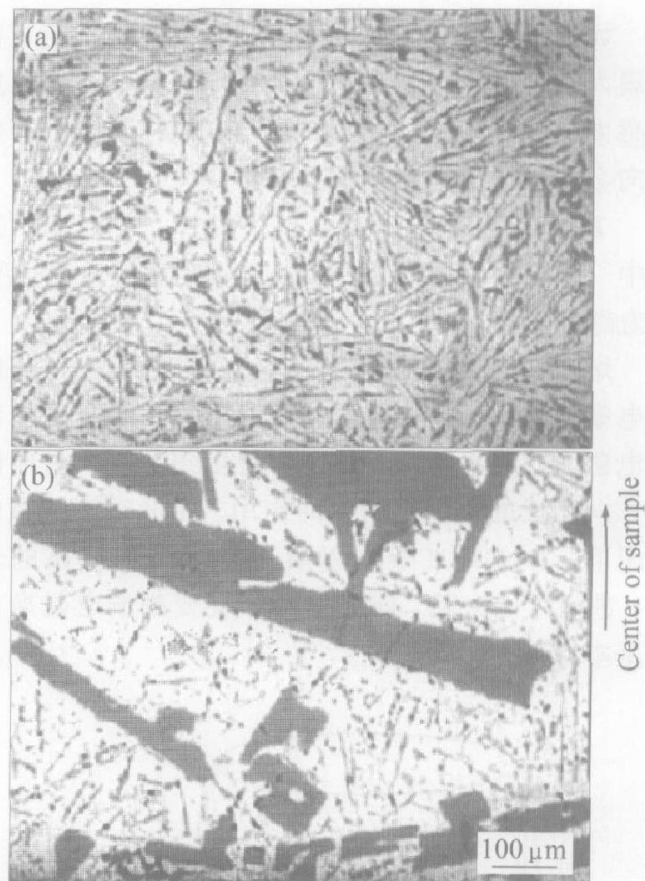


图 4 电磁场作用后 Al-18% Si 合金不同部位的微观组织

Fig. 4 Microstructures of Al-18% Si alloy in different positions with electromagnetic field

(a) —Center of sample; (b) —Brim of sample

2.2 50 μm 硅颗粒的制备及电磁净化实验

原始试样的制备是将配制好的含硅量 12.6% 的铝硅共晶合金在电阻炉中熔化加热至 720 $^{\circ}\text{C}$, 保温 20 min, 然后倒入预热的细陶瓷管, 风冷, 取样, 磨制试样。

通过金相显微镜观察发现, 原始试样中存在极少量初晶硅块, 但分布没有明显规律。这些硅块应该是在不平衡凝固条件下生成的, 如图 5 所示。

电磁净化试样的制备 将铝硅共晶合金在电阻炉中熔化, 加热至 720 $^{\circ}\text{C}$ 并保温 20 min, 浇入陶瓷管中, 施加电磁场 2 min, 然后降温至 (645 $\pm$ 5) $^{\circ}\text{C}$ 时再施加电磁场 1 min, 取样, 其微观组织如图 6 所示。由图可知, 试样中的硅块在电磁挤压力的作用

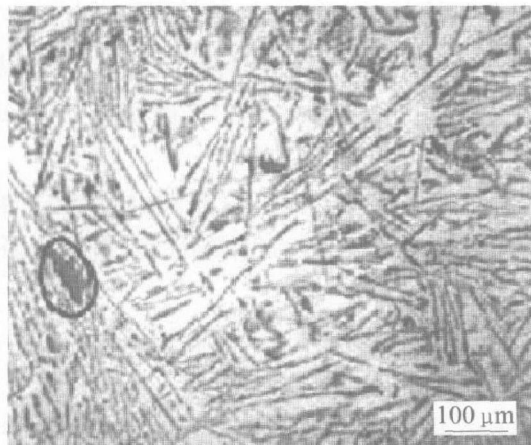


图 5 Al-12.6% Si 合金的原始组织

Fig. 5 Cross section microstructure of solidified Al-12.6% Si alloy (Without electromagnetic field)

下运动到试样的边缘, 尺寸约在 $50\ \mu\text{m}$ 左右。

2.3 $10\ \mu\text{m}$ 硅颗粒的制备及电磁净化实验

含硅量 10% 的铝硅合金的原始试样(制备方法 与铝硅共晶合金的原始试样的制备方法相同)的显微组织中没有发现硅块。

将铝-硅亚共晶合金熔化, 在 $720\ ^\circ\text{C}$ 浇入陶瓷管中, 施加电磁场 5 min, 然后降温至 $640\ ^\circ\text{C}$ 时再施加电磁场 1 min, 油冷, 其微观组织如图 7 所示, 由图可知尺寸在 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 之间的硅块分布在试样的边缘, 而在试样的内部则没有发现块状硅。

若改“油冷”为“保温(2~3 min)、油冷”, 则虽然试样经过电磁场处理, 但在试样边部和内部没有发现硅块。

3 分析与讨论

3.1 实验条件对硅块尺寸的影响

从图 4(b) 中可以看出, 在试样的边部有很多尺寸约在 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 的初生硅块, 而试样近边部位置(距离试样边部 $0.5\sim 1.5\ \text{mm}$ 范围)的硅块尺寸多在 $100\ \mu\text{m}$ 以上, 在长度方向上有些硅块可以达到 $800\ \mu\text{m}$ 。实验分析认为, 边部较小的硅块, 是由于受电磁挤压力作用而运动到试样边部, 这是由于边部冷却速度较大, 硅块来不及长大形成的。近边部位置的硅块由于冷却速度相对较小, 同时由于试样近边部硅原子含量较高, 有利于促进硅块的进一步长大, 因而生成的硅块尺寸较大。

从图 6 可以看出, 试样边部的硅块比原始试样中的硅块($10\ \mu\text{m}$)大得多, 尺寸约在 $50\ \mu\text{m}$ 左右, 表明这些硅块不是不平衡凝固形成的。实验结果说明, 在电磁挤压力的作用下在金属熔体中有利于生成尺寸稍大的硅块。硅块可以在电磁挤压力的作用下运动到试样的边缘。

图 7 中所示的硅块是在特定实验条件下生成的。在没有电磁挤压力作用的条件下, 将含硅量 10% 的铝硅合金浇入陶瓷管中快速冷却, 在此样品的金相试样中没有发现硅块; 即使试样经过电磁场处理但缓慢冷却, 在试样边部和内部也没有发现硅块。由此说明在本实验中, 只有在电磁力的作用下引起非金属原子的富集, 才能在亚共晶铝硅合金中生成硅块, 同时必须在快速冷却的条件下这些硅块才能保留在合金中。

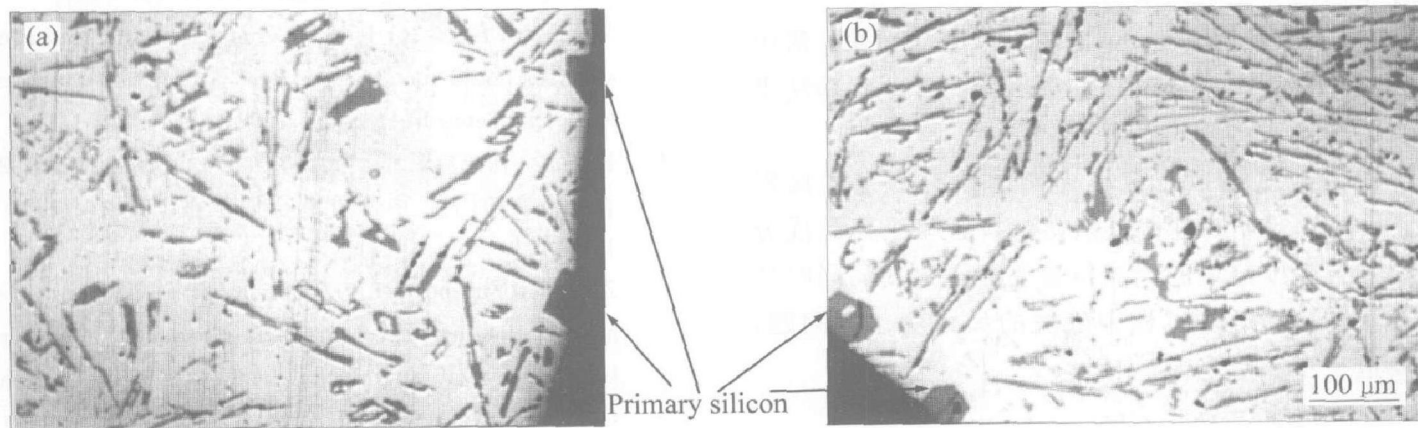


图 6 Al-12.6% Si 合金电磁场作用后试样的边部组织

Fig. 6 Cross section microstructures of solidified Al-12.6% Si alloy near pipe under electromagnetic field

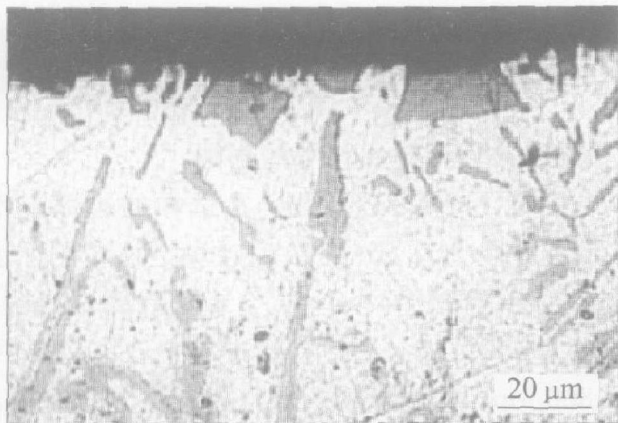


图 7 Al-10% Si 合金电磁场作用后试样的边部组织

Fig. 7 Cross section microstructure of solidified Al-10% Si alloy near pipe under electromagnetic field

从上述实验结果的分析可以看出电磁场具有电磁偏聚及电磁净化两个作用,同时,在实验中还存在电磁场的热效应,电磁感应热可以有效地弥补金属液的温度降,合理地处理电磁感应热和金属液散热之间的关系,可以较好地控制金属液的温度。

3.2 硅块模拟非金属夹杂物电磁净化实验的可比性

实验结果表明,硅块模拟具有一定的可比性,其原因如下。

1) 硅块与非金属夹杂物的导电率均趋近于零,因而在电磁场中,硅块可以代替非金属夹杂物进行电磁净化实验研究。

2) 根据合金成分的不同以及冷却条件的不同,可以生成尺寸不同的硅块,这些硅块可以用来模拟尺寸不同的非金属夹杂物。

3) 在本实验条件下,硅块不会发生团聚,避免了合金中夹杂物含量过高发生团聚而导致实验结果失真的现象。

但用硅块模拟非金属夹杂物还有一定的局限性,如硅块的生成过程复杂,在共晶和亚共晶成分的铝硅合金中硅块的生成位置受到限制等,同时还存在在硅块的运动过程中硅块的尺寸变化的问题,需要进一步的研究。

4 结论

1) 用硅块模拟非金属夹杂物,可以避免外加非金属夹杂物在电磁净化过程中发生团聚现象,具

有一定的真实性。

2) 3 种不同尺寸的硅块在电磁场作用下均聚集到试样的表面,实验结果证明在夹杂物不发生团聚的情况下,利用电磁挤压力去除尺寸在 $10\ \mu\text{m}$ 的非金属夹杂物是可行的。

3) 依靠电磁挤压力可以在亚共晶铝硅合金中生成初生硅块,但具体的生成条件还需实验研究。

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Marty P, Alemany A. Theoretical and experimental aspects of electromagnetic separation—metallurgical applications of magnetohydrodynamics[A]. Proceedings of Symposium of the international and applied mechanics (IUTAM)[C]. Cambridge, 1982. 245 - 259.
- [3] Joon Pyou P, Atusi M, Kensuke S, et al. Elimination of non-metallic inclusions using electromagnetic force[J]. Tetsu-to-Hagane, 1994, 80(5): 31 - 36.
- [4] LI Tian-xiao, XU Zhen-ming, SUN Bao-de, et al. Electromagnetic separation of primary iron-rich phases from aluminum-silicon Melt[J]. Trans Nonferrous Met Soc, 2003, 13(1): 121 - 125.
- [5] Taniguchi S, Brimacombe J K. Application of pinch force to the separation of inclusion particles from liquid steel[J]. ISIJ International, 1994, 34(9): 722 - 731.
- [6] Sassa K, Yamao H, Asai S. Separation of inclusions in liquid metal using fixed alternating magnetic field[A]. International symposium on electromagnetic processing of materials[C]. Paris, 1997. 157 - 161.
- [7] Yamao Y, Sassa K, Iwai K, et al. Separation of inclusions in liquid metal using fixed alternating magnetic field[J]. Tetsu-to-Hagane, 1997, 83(1): 30 - 35.
- [8] 钟云波, 任忠鸣, 邓康, 等. 行波磁场连续净化铝合金液实验[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 167 - 171.
- [9] ZHONG Yun-bo, REN Zhong-ming, DENG Kang, et al. Continuously purifying experiment of aluminum base alloy melt by traveling magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 167 - 171.
- [9] Tanaka Y, Sassa K, Iwai K, et al. Separation of non-metallic inclusions from molten metal using traveling magnetic field[J]. Tetsu-to-Hagane, 1995, 81(12): 12 - 17.

- [10] Norihisa W, Kensuke S, Shigeo A. Magnetic separation of inclusion in molten metal using a high magnetic field[J]. Tetsu-to-Hagane, 2000, 86(6): 363 - 369.
- [11] Takahashi K, Taniguchi S. Electromagnetic separation of nonmetallic inclusion from liquid metal by high frequency magnetic field [J]. ISIJ International, 2003, 43(6): 820 - 827.
- [12] 李 克, 孙宝德, 李天晓, 等. 利用高频磁场分离 Al 熔体中的非金属夹杂[J]. 金属学报, 2001, 37(4): 405 - 410.
- LI Ke, SUN Bao-de, LI Tian-xiao, et al. Application of high frequency magnetic field to separate inclusion particles in aluminum melt [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(4): 405 - 410.
- [13] SHU Da, SUN Bao-de, LI Ke, et al. Continuous separation of non-metallic inclusions from aluminum melt using alternating magnetic field[J]. Materials Letters, 2002, 55: 322 - 326.
- [14] El-Kaddah N, Tucalooss A. Apparatus and a method for improved filtration of inclusions from molten metal[P]. USA 4909836, 1988.
- [15] 秦学智, 曹志强, 任振国. 铝熔体电磁连续净化工艺研究[J]. 铸造, 2004, 53(1): 26 - 30.
- QIN Xue-zhi, CAO Zhi-qiang, REN Zhen-guo. Technical study of continuous electromagnetic purification of aluminum melt[J]. Foundry, 2004, 53(1): 26 - 30.

(编辑 龙怀中)