

文章编号: 1004 - 0609(2003)06 - 1500 - 05

电磁振荡下半连铸 Al 合金凝固组织的细化机制^①

张 勤, 崔建忠

(东北大学 材料电磁过程教育部重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 在半连铸 7075 铝合金过程中, 通过同时施加稳恒磁场和交变磁场的方法, 使凝固熔体产生受迫振荡, 研究了电磁振荡的强度和频率对晶粒细化的影响规律。对电磁振荡作用下, 合金凝固组织的细化机理进行了探讨。结果表明: 电磁振荡法获得的晶粒尺寸要较 CREM 法所获得的小, 且随着电磁振荡强度增加及频率降低, 铸锭整体组织变得更加细小和均匀。

关键词: 电磁振荡; 半连铸; 铝合金; 细化机制

中图分类号: TG 249.7; TG 111.4

文献标识码: A

由于等轴细晶组织能显著提高材料的强度、韧性、延展性、疲劳强度及应力腐蚀阻抗性^[1], 因而细化晶粒、生产等轴细晶组织的铝合金铸锭一直是材料界所关注的课题。在半连铸结晶器外同时施加与重力矢量方向平行的稳恒磁场和交变磁场, 通过交互作用, 使熔体产生受迫振荡的方法, 由于具有设备简单、操作方便、可实施性强、振荡设备不与熔体进行接触、无污染、振荡强度分布均匀等特点, 因而一经出现便备受人们的关注。但是由于此法目前尚处于起步阶段, 且其间磁流体力学现象相当复杂, 现有手段难以进行系统全面的研究, 因而对其理解还不够全面和深入, 在诸多问题上尚难以统一认识^[2~5]。在此, 本文作者通过研究电磁振荡强度和频率对半连铸 7075 合金铸锭微观组织的影响规律, 对电磁振荡下半连铸合金凝固组织的细化机制进行了探讨。

1 实验

电磁振荡产生原理及半连铸铝合金设备安置简图参见文献[6]。

实验所用材料为 7075 铝合金, 其化学成分为(质量分数, %): 1.67Cu, 2.22Mg, 5.95Zn, 0.30Mn, 0.35Fe, 0.20Si, 余量为 Al。稳恒磁场和交变磁场由置于结晶器顶部及中部, 分别通以直流电和交流电的 2 个感应线圈产生。线圈中空, 内通

冷却水, 匝数分别为 100 和 50。稳恒磁场为 0~20 000 A·turn; 交变磁场为 0~10 000 A·turn, 频率 0~100 Hz。

在铸造温度为 720 °C, 铸造速度为 60 mm/min, 保持稳恒磁场为 10 000 A·turn 不变的同时, 改变交变感应线圈电流频率为 25, 35, 50, 100 Hz, 并变换交变感应线圈电流强度分别为 100, 150, 200 A, 铸造直径为 200 mm 的铝合金圆锭。代表性选择交变感应线圈电流频率为 25 Hz, 不同电流强度和交变感应线圈电流强度为 200 A(即电磁场为 10 000 A·turn), 不同电流频率条件下的铸坯作为研究对象, 从其横截面距边缘 25 mm 处截取试样, 通过 200 倍光学显微镜分析相应条件下的微观组织, 来考察电磁振荡强度和频率对半连铸 7075 合金凝固组织的影响, 如图 1, 2 所示。

从图 1, 2 可看出: 随着交变磁场感应线圈电流强度增加及电流频率减小, 铸坯中近球形组织增多, 蔷薇型组织减少, 晶粒整体尺寸变得更加细小和均匀。

2 分析与讨论

有关电磁振荡对铸锭组织细化的机制问题, 一直难以达到统一。其中“成穴效应”(Cavitation effect)理论似乎略为占优^[4, 5], 但是由于“成穴”所

① 基金项目: 国家重大基础发展规划项目(G199906490501)

收稿日期: 2002 - 10 - 08; 修订日期: 2002 - 12 - 15

作者简介: 张 勤(1970 -), 男, 博士。

通讯联系人: 张 勤, 博士; 电话: 024 - 83687731; E-mail: Zhangqin - 001@vip.sina.com

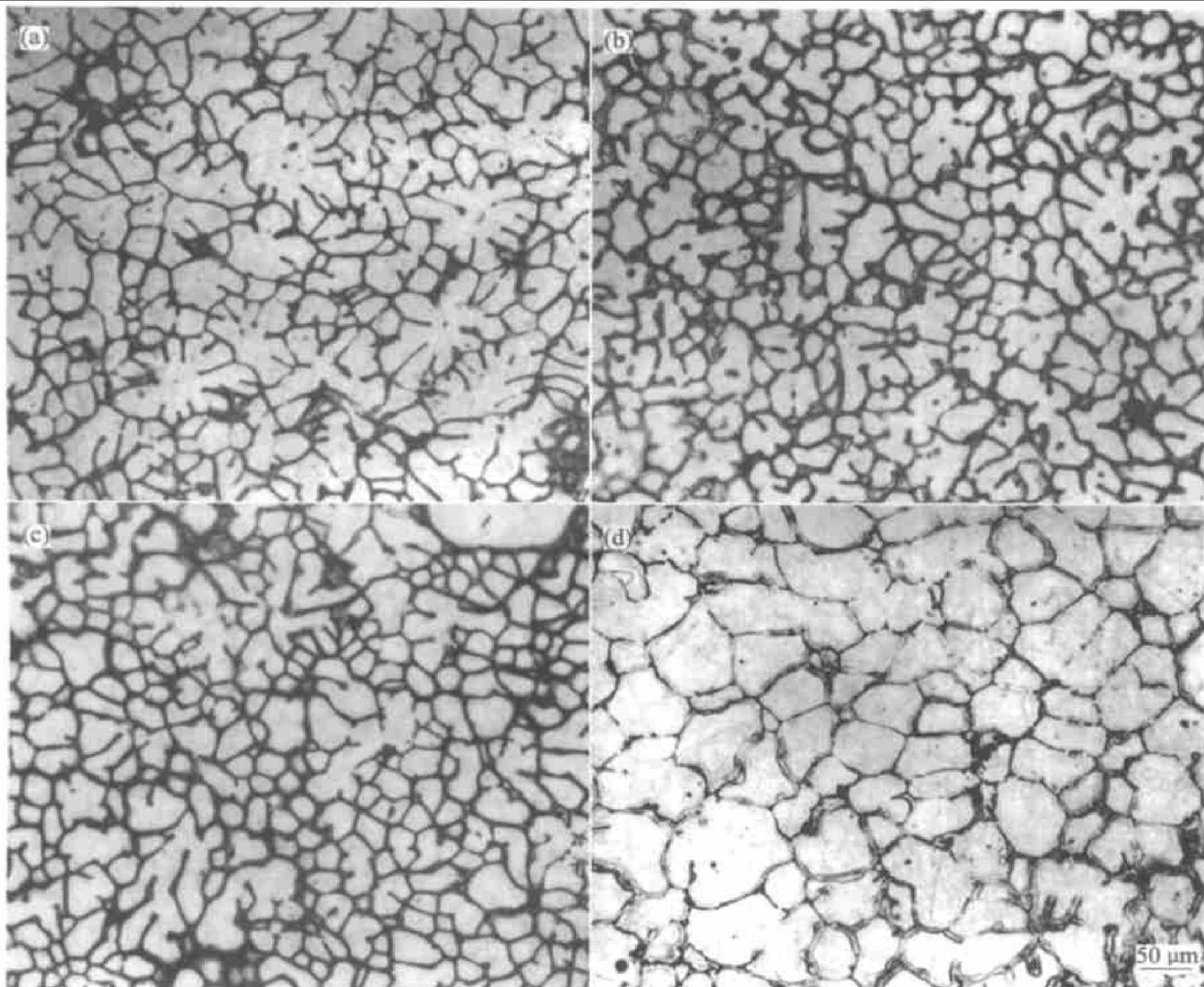


图 1 稳恒磁场为 $10\ 000\ \text{A}\cdot\text{turn}$ 及电磁振荡频率为 $25\ \text{Hz}$ 时, 铸锭的微观组织随电磁振荡强度的变化规律

Fig. 1 Evolutions of microstructure of ingot with intensity of electromagnetic vibration at stationary electromagnetic field of $10\ 000\ \text{A}\cdot\text{turn}$ and electromagnetic vibration frequency of $25\ \text{Hz}$

(a) $-5\ 000\ \text{A}\cdot\text{turn}$; (b) $-7\ 500\ \text{A}\cdot\text{turn}$; (c) $-10\ 000\ \text{A}\cdot\text{turn}$; (d) $-10\ 000\ \text{A}$ without stationary magnetic field

需的临界电磁压力太大(约 $7.0 \times 10^5\ \text{Pa}$)^[3], 现有的生产条件, 通过电磁振荡对熔体产生的电磁压力只能达到 $3.0 \times 10^5\ \text{Pa}$ 左右。因而, 在实际铸造过程中, “成穴现象”难以发生。合金组织的细化和非枝晶化, 可归结为熔体中结晶核心的增加和枝晶生长条件的消除, 电磁振荡法之所以能增加形核核心是由于:

1) 电磁力垂直熔体侧表面指向液芯的径向分力, 对熔体表现为一提升作用的压力, 降低了熔体与结晶器的接触高度, 使得一次冷却强度减小, 熔体在结晶器壁上的形核数减少, 稳定初凝壳难以形成。与此同时, 其由于磁感应强度矢量向铸锭对称

轴方向倾斜而形成的轴向旋转分力, 引发熔体强制对流, 在晶粒根部产生剪切力 $F_{\tau} = 6\eta v(L/r)^3$, 当其大于晶粒与结晶器间的粘着力 $F_a = 2.05\gamma/\delta$ 时 (L 和 r 为晶体的长度和根部半径; η 和 v 分别为熔体的粘度及流动速度; γ 为晶体与器壁间的界面张力; δ 为界面的平衡厚度), 晶粒发生游离^[7], 使形核核心增加。

2) 电磁振荡力对熔体表现为反复的拉伸与压缩作用, 使得熔体中存在的 MnAl_6 和 FeAl_3 等高温固相化合物, 由于部分解析了吸收的气体, 而增加了与金属熔体的润湿, 较高的过冷度以及二者之间较小的润湿角, 大大降低了以其为基底的异质形

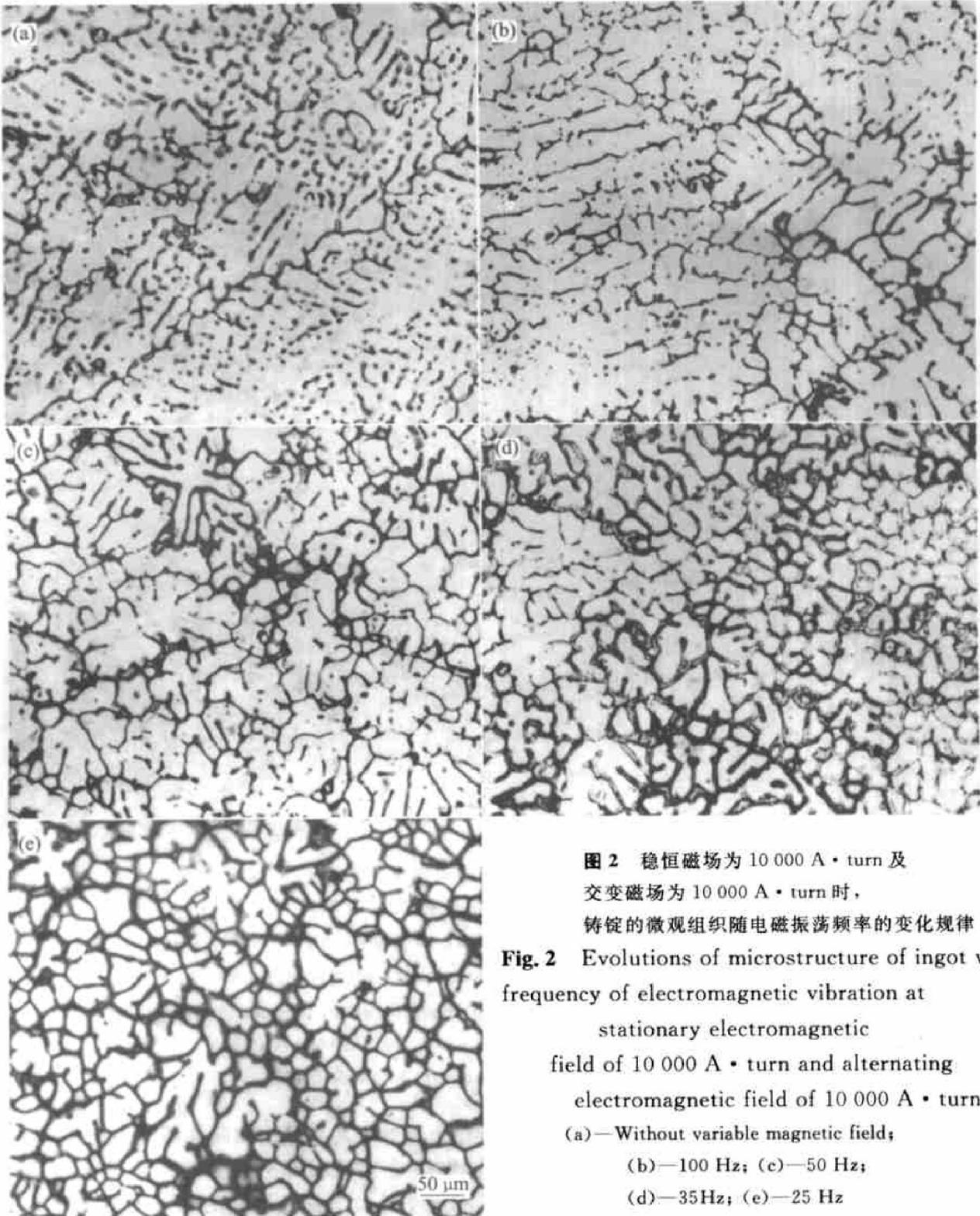


图 2 稳恒磁场为 $10\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$ 及
交变磁场为 $10\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$ 时，
铸锭的微观组织随电磁振荡频率的变化规律

Fig. 2 Evolutions of microstructure of ingot with
frequency of electromagnetic vibration at
stationary electromagnetic
field of $10\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$ and alternating
electromagnetic field of $10\,000\text{ A}\cdot\text{turn}$
(a)—Without variable magnetic field;
(b)—100 Hz; (c)—50 Hz;
(d)—35Hz; (e)—25 Hz

核临界自由能^[8, 9]，因此得以成为新的形核核心。

3) 熔体在电磁振荡及搅拌力的作用下，过热释放十分迅速，温度场在较短时间内达到平衡，分布均匀而且过冷度较大，此时熔体中形成的大量准固相原子团簇，不仅有着与晶核相似的原子结构和键型，而且由于电磁振荡力的作用，使得熔体克服了表面张力和流体力拉力的作用，与原子团簇间有着极好的润湿条件，根据瞬态形核理论，在此条件下，将有大量的晶核以准固相原子团簇为基底，异质瞬态形核而成。

上述 3 条原因共同作用，使得电磁振荡法半连铸 7075 铝合金凝固熔体中游离的结晶核心大幅度增加。此外，游离晶粒之所以长成近球形或蔷薇形组织的原因，类似于 CREM 法^[10]，主要有以下几点：

1) 电磁振荡力与搅拌力作用下，产生强制对流，降低了熔体温度梯度和晶核界面处的成分过冷现象。使得晶粒处于一个相对均匀的生长环境中，不利于枝晶的生长。

2) 晶粒在振荡和搅拌作用下的运动过程中，

受到温度和成分扰动的作用, 其表面处于反复局部熔化和生长的状态, 晶粒的突出部位由于具有较高的能量, 更易熔化, 使得枝晶臂重熔。

3) 晶粒自旋运动, 使得晶粒的生长表现出各向同性。

4) 游离晶粒间相互碰撞粘合或碰撞磨圆。

5) 晶核的电导率是合金熔体的 3~5 倍^[4, 5], 因而其内部诱发形成的感应电流密度及因此而承受的电磁振荡力要较熔体为大, 在振荡过程中, 二者间产生相对位移而发生剪切作用, 有均匀溶质和碎断枝晶“晶芽”的作用。

6) 由于结晶器壁的制约, 使得尺寸越大的晶粒在电磁振荡的作用下, 向铸锭中心方向的运动趋势越强, 芯部区域温度相对较高, 使得二次枝晶臂的重熔效应增强, 有抑制枝晶生长及晶粒异常长大的趋势。

7) 当熔体固相分数较高时, 引起摩擦力急剧增大, 在熔体运动速度大幅减小之后, 电磁振荡力仍能在两相区晶间熔体中产生受迫振荡, 起到了克服自然对流, 减小了晶核凝固前沿的温度梯度和由于溶质富集而产生的成分过冷, 抑制枝晶生长, 进而细化晶粒和提高等轴晶比例的作用。

综上所述, 电磁振荡法使得熔体中结晶核心增加的同时, 又抑制了游离晶核按枝晶方式生长, 所以最终形成均匀细小的非枝晶凝固组织。

随着交变感应线圈电流强度增加, 电磁力的径向分力增大, 对熔体的提升作用增强, 在降低熔体与结晶器壁接触高度, 使一次冷却强度减小的同时, 其轴向分量相应加大, 对熔体搅拌作用增强, 晶粒从结晶器壁游离数量增多。此外, 电磁振荡力也相应增大, 使液穴内部熔体整体过冷度加大, 在温度场和合金元素分布更加均匀的同时, 与高温固相化合物及准固相原子团簇间的润湿性也相应提高, 因而以两者为基底的异质形核数增加, 形核核心增多。与此同时, 由于电磁振荡和搅拌作用增强而带来的枝晶生长抑制作用加大, 使得结晶过程能够在整个液穴范围内围绕大量的结晶核心同时进行, 因而对晶粒的细化程度提高, 晶粒变得更加细小和均匀。

随着电磁场频率降低, 磁力线逐渐深入熔体内部, 电磁力的旋转分量逐渐增加, 在对熔体搅拌作用增强的同时, 其频率为 $2f$ 的振荡分量也相应增加且深入熔体内部, 起着更好地均匀温场和合金元素的作用。并且, 电磁振荡力也大幅度提高, 特别是在集肤深度以外的液穴部分增加尤为明显^[3], 有

着促使熔体中结晶核心增加及抑制枝晶生长作用增强的趋势, 尤其是在凝固过程进行到由于熔体中固相分数较高(超过 0.55), 熔体流动因粘滞力急剧增加而近乎停滞的阶段, 由小频率的电磁振荡力所引发的晶间熔体受迫振荡, 更接近熔体的惯性响应区间, 对减小晶粒凝固前沿的温度梯度和因溶质元素富集而产生的成分过冷作用更加显著, 因而对细化晶粒, 抑制枝晶的过分长大, 改善溶质元素分布, 消除微观偏析^[11-13]的作用增强, 铸锭组织趋于更加细小均匀。

3 结论

1) 电磁振荡法所具有的搅拌作用使得晶粒从结晶器壁游离数量增多; 电磁振荡力的反复拉伸与压缩作用, 增加了熔体对高温固相化合物及准固相原子团簇的润湿, 减少了以它们为基底的异质形核临界自由能。

2) 振荡有着与搅拌同样的作用, 使熔体产生相当大的扰动, 起着弥散合金元素、均匀温度场、加大熔体整体过冷度、增加并弥散形核核心、抑制枝晶生长的功能。

3) 电磁振荡强度增加, 细化作用增强, 晶粒尺寸变小。

4) 电磁振荡频率降低, 振荡压力增大, 且透入深度加深, 所引发的晶间熔体受迫振荡, 对抑制枝晶的过分长大, 改善溶质元素分布, 消除微观偏析作用增强, 晶粒细化程度提高。

REFERENCES

- [1] Yeh J W, Jong S H, Liu W P. The improved microstructures and properties of alloys produced by a water-cooling centrifugal casting method[J]. Metall Trans A, 1996, 27A: 1933 - 1943.
- [2] Vives C. Effects of electromagnetic vibration on the microstructure of continuously cast of aluminium[J]. Mater Sci Eng A, 1993, A173: 169 - 172.
- [3] Vives C. Effects of forced electromagnetic vibration during the solidification of aluminum alloys[J]. Metall Trans B, 1996, 27B: 445 - 455.
- [4] Alireza R, Kenji M. An investigation of the effects caused by electromagnetic vibration in a hypereutectic Al-Si alloy melt[J]. Metall Trans A, 1998, 29A: 1477 - 1483.
- [5] Alireza R, Kenji M, Toshiyuki N. Effects of the inten-

- sity and frequency of electromagnetic vibration on the microstructural refinement of hypoeutectic AlSi alloys[J]. Metall Trans A, 2000, 31A: 755 - 762.
- [6] 张勤, 崔建忠, 路贵民, 等. 电磁振荡法半连铸7075合金的微观组织及溶度元素分布[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1184 - 1191.
ZHANG Qin, CUI Jianzhong, LU Guimin, et al. Microstructure and solute distribution of 7075 alloy produced by semi-continuous casting under electromagnetic vibration[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1184 - 1191.
- [7] 邢书明, 马静, 陈维视, 等. 半固态亚共晶铝硅合金非枝晶固相的形成与演变[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(S1): 270 - 274.
XING Shuming, MA Jing, CHEN Weishi, et al. Formation and evolution of nondendritic solid phase of semisolid AlSi alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(S1): 270 - 274.
- [8] 王家骥, 黄积荣, 林建生. 金属的凝固及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
WANG Jiexin, HUANG Jirong, LIN Jiansheng. Metallic Solidification and Its Controlling[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983.
- [9] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
ZHOU Yaohe, HU Zhuangqi, JIE Wanqi. Solidification Technique[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998.
- [10] 张勤, 路贵民, 崔建忠, 等. CREM法半连铸Al合金非枝晶组织的形成机制[J]. 金属学报, 2001, 37(8), 873 - 876.
ZHANG Qin, LU Guiming, CUI Jianzhong, et al. Formation mechanism of non-dendritic structure of aluminum alloy produced by semi-continuous casting of CREM process [J]. Acta Metall Sinica, 2001, 37(8): 873 - 876.
- [11] Boettinger W J, Coriell S R, Greer A, et al. Solidification microstructures: recent developments, future directions[J]. Acta Materialia, 2000, 48: 43 - 70.
- [12] Walker J S. Bridgman crystal growth with a strong, low-frequency, rotating magnetic field[J]. Journal of Crystal Growth, 1998, 192: 318 - 327.
- [13] Tewari S N, Shah R. Macrosegregation during dendritic arrayed growth of hypoeutectic Pb-Sn alloys: influence of primary arm spacing and mushy zone length[J]. Metall Mater Trans A, 1996, 27A: 1353 - 1362.

Microstructural refinement mechanism on aluminum alloy produced by semi-continuous casting in electromagnetic vibration

ZHANG Qin, CUI Jianzhong

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials for Ministry of Education, Northeastern University, Shengyang 110004, China)

Abstract: The influence of the intensity and frequency of electromagnetic vibration produced by simultaneous application of a stationary magnetic field and a periodic magnetic field, on grain refinement of 7075 aluminum alloy cast by semi-continuous casting process, was examined. The refinement mechanism of electromagnetic vibration on alloy microstructure was also discussed. The results show that the mean grain size obtained by this electromagnetic vibration method is smaller than that produced by CREM process. And with the increase of electromagnetic intensity and the decrease of electromagnetic frequency, the microstructure of ingot becomes more fine and uniform.

Key words: electromagnetic vibration; semi-continuous casting; aluminum alloy; mechanism of refinement

(编辑 李向群)