

电磁振荡强度对半连铸 7075 铝合金微观组织的影响^①

张 勤, 崔建忠, 路贵民, 张北江

(东北大学 材料电磁过程教育部重点实验室, 沈阳 110006)

[摘 要] 在 7075 铝合金半连铸过程中, 通过同时施加一个稳恒磁场和一个交变磁场, 使金属熔体产生受迫振荡的方法。实验研究了电磁振荡强度对晶粒细化的影响规律。结果表明: 电磁振荡法获得的铝合金晶粒尺寸较 CREM 法的小, 且随着电磁振荡强度的增加, 铸锭微观组织变得更加细小和均匀。对在电磁振荡作用下, 合金凝固组织的细化机理进行了探讨。

[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

铝合金的力学性能与其微观组织(晶粒的尺寸、形状和分布)密切相关。由于等轴细晶组织能使材料具有较高的低温强度、韧性、热处理性能及较小的各向异性、微观偏析和热裂倾向^[1], 因此生产具有等轴细晶组织的铝合金铸锭一直是材料界所关注的课题。对于铝合金, 其凝固组织的细化有以下几种方式: 控制凝固时的温度制度(提高冷却速度、增加过冷度和降低浇注速度)、添加化学制剂的处理方法(在金属液中添加形核剂、孕育剂、长大抑制剂)、物理处理方法(振动、搅拌、摆动)等等。

研究发现, 金属凝固时, 熔体振荡具有声波和超声波特性^[2, 3], 主要有以下 4 方面作用: 1) 细化晶粒; 2) 弥散作用; 3) 除气和降低孔隙率; 4) 增加合金熔体流动性, 提高充型能力。这种通过外力使金属熔体产生受迫振荡, 从而抑制枝晶生长、细化晶粒的方法, 近 20 年来日益受到重视, 它主要包括机械振荡法和电磁振荡法两种类型。其中, 由 Vives^[2, 3]提出的同时施加与铸锭对称轴方向平行的稳恒磁场和交变磁场, 通过两者间相互作用, 产生洛伦兹力, 使熔体产生受迫振荡的电磁振荡方法, 具有如下特点: 1) 设备简单, 操作方便, 可实施性强; 2) 振荡设备不与熔体进行接触, 无污染; 3) 振荡强度在整个液穴范围内相当均匀。因而电磁振荡法一经出现, 便备受瞩目。但是由于此法目前尚处于起步阶段, 且振荡过程中发生的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, 在细化机制等诸多问题上仍难以达成统一。

1 工作原理

根据电磁感应理论, 在半连铸结晶器外同时施加与重力矢量方向平行的磁感应强度为 B_0 的稳恒磁场和磁感应强度为 b 的低频周期性交变磁场(分别简称为稳恒磁场 B_0 和交变磁场 b), 它们分别由通以直流电和频率为 f 的交流电的两个感应线圈产生。与此同时, 交变磁场又在熔体内部诱发形成相同频率的感应电流密度 J , 三者之间交互作用, 在熔体内部产生一力场, 促使熔体进行受迫运动。电磁振荡法的设备安置及产生原理如图 1 和图 2 所示。根据磁流体力学观点, 此运动可被看作是 3 种运动的叠加, 即: 频率分别为 f 和 $2f$ 的交变振荡运动(可分解为一个稳恒分量和一个自由分量的不稳定再循环运动)以及由电磁制动作用产生的逆熔体流动方向的运动。

1) 稳恒磁场 B_0 和交变感应电流密度 J 之间交互作用, 在熔体中产生一频率为 f 的电磁振荡力^[4, 5]:

$$F_1 = J \times B_0 = B_0 J (V/A) \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

式中 V 是熔体体积, A 是垂直于力的方向的表面面积。此力主要集中于熔体的电流集肤深度范围内, 通过液态金属的弹性传播到整个熔体中^[3]。

2) 交变磁场 b 和感应电流 J 之间交互作用, 在熔体中产生电磁体力^[6, 7]:

$$F_2 = J \times b \quad (2)$$

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999906490501)

[收稿日期] 2001-10-17; [修订日期] 2002-03-05

[作者简介] 张 勤(1970-), 男, 博士生。

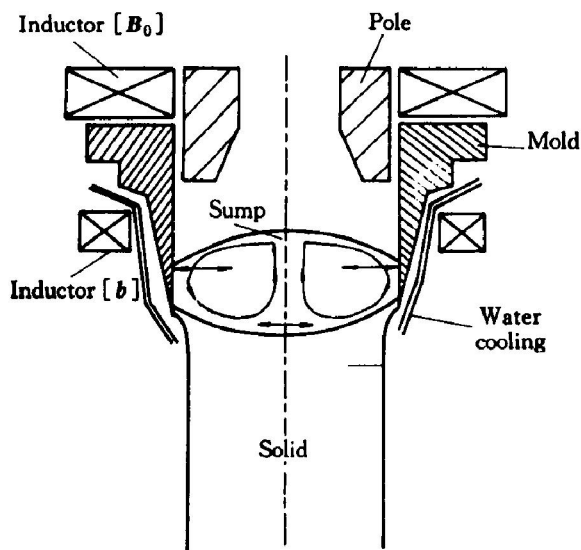


图 1 电磁振荡法半连铸铝合金设备简图

Fig. 1 Schematic diagram of semicontinuous casting of aluminum alloy using an electromagnetic vibration method

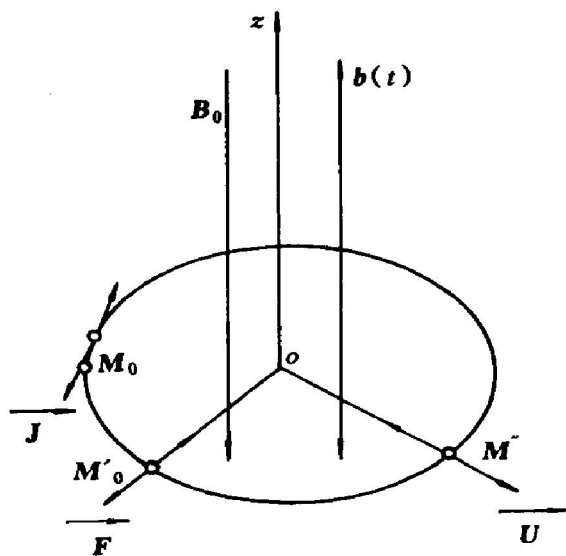


图 2 电磁振荡产生原理

Fig. 2 Principle of production of electromagnetic vibration

它包括一个时间独立分量和一个频率为 $2f$ 的振荡分量。若磁导率为 μ , 则其时间平均电磁体力可分解为一垂直熔体侧表面指向液芯、与熔体静压力梯度平衡、导致熔体自由表面形成弯月形的径向分力 $\nabla(1/2\mu b^2)$ 和由磁感应强度矢量向对称轴倾斜而形成的轴向分力 $1/\mu(b \cdot \nabla)b$, 起到搅拌熔体、进而均匀温度场和合金元素成分的作用。

3) 弯液面处熔体由铸锭中心以速度 U 向周边区域运动, 切割磁力线, 根据洛伦兹定律, 产生一感应电流密度:

$$J_0 = \sigma U_r \times B_0 \quad (3)$$

式中 σ 为熔体电导率, U_r 为 U 与 B_0 垂直的径向分量。 J_0 与 B_0 之间相互作用, 产生电磁力:

$$F_3 = J_0 \times B_0 = \sigma U_r \times B_0^2 \quad (4)$$

此力沿径向方向向内, 有使熔体流动速度减缓的趋势。

4) 熔体流动切割磁力线所产生的感应电流密度 J_0 与交变磁场 b 交互作用, 产生电磁力:

$$F_4 = J_0 \times b = \sigma U_r \times B_0 \times b \quad (5)$$

此力也为一交变振荡力。

2 实验方法与结果

实验所用材料为 7075 铝合金, 化学成分(质量分数, %) 为: 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两个感应线圈产生。线圈中空, 内通冷却水, 匝数分别为 100 匝和 50 匝, 电流和电流频率变化范围分别为, 直流电: 0~200 A; 交流电: 0~100 A, 0~100 Hz。对应的磁场强度变化范围为, 稳恒磁场: 0~20 000 A·t; 交变磁场: 0~10 000 A·t。

在保持稳恒磁场强度为 10 000 A·t 的同时, 固定交变感应线圈电流频率为 25 Hz, 然后变换交变感应线圈电流分别为 100, 150 和 200 A。通过在光学显微镜下分析相应条件铸坯的微观组织来考察电磁振荡强度对半连铸 7075 合金凝固组织的影响。结果如图 3 所示。

3 分析与讨论

有关电磁振荡对铸锭组织细化的机制问题, 一直难以达成统一。其中“成穴效应”(Cavitation effect) 理论似乎略为占优^[4, 5], 其观点如下:

如果熔体振荡具有合适的频率和强度, 则在其中会形成压缩和稀薄两种区域, 此时若拉力足够大, 那么在稀薄区域产生的“负压力”就有可能使熔体中预先存在的未溶解气泡通过吸收附近熔体中溶解的气体而长大, 与此同时, 固/液界面处也可能因拉力的作用而把液体拉离固体表面形成不含任何物质的空腔。在连续周期性反复的拉伸和压缩作用下, 使得它们长大到一定尺寸后, 由于不再能经受得住下个周期的压力及其自身表面张力的复合作用而崩溃。在崩溃的瞬间, 气泡或空腔内的压力能达到几百个 MPa^[3~5](大小直接取决于振荡强度), 其

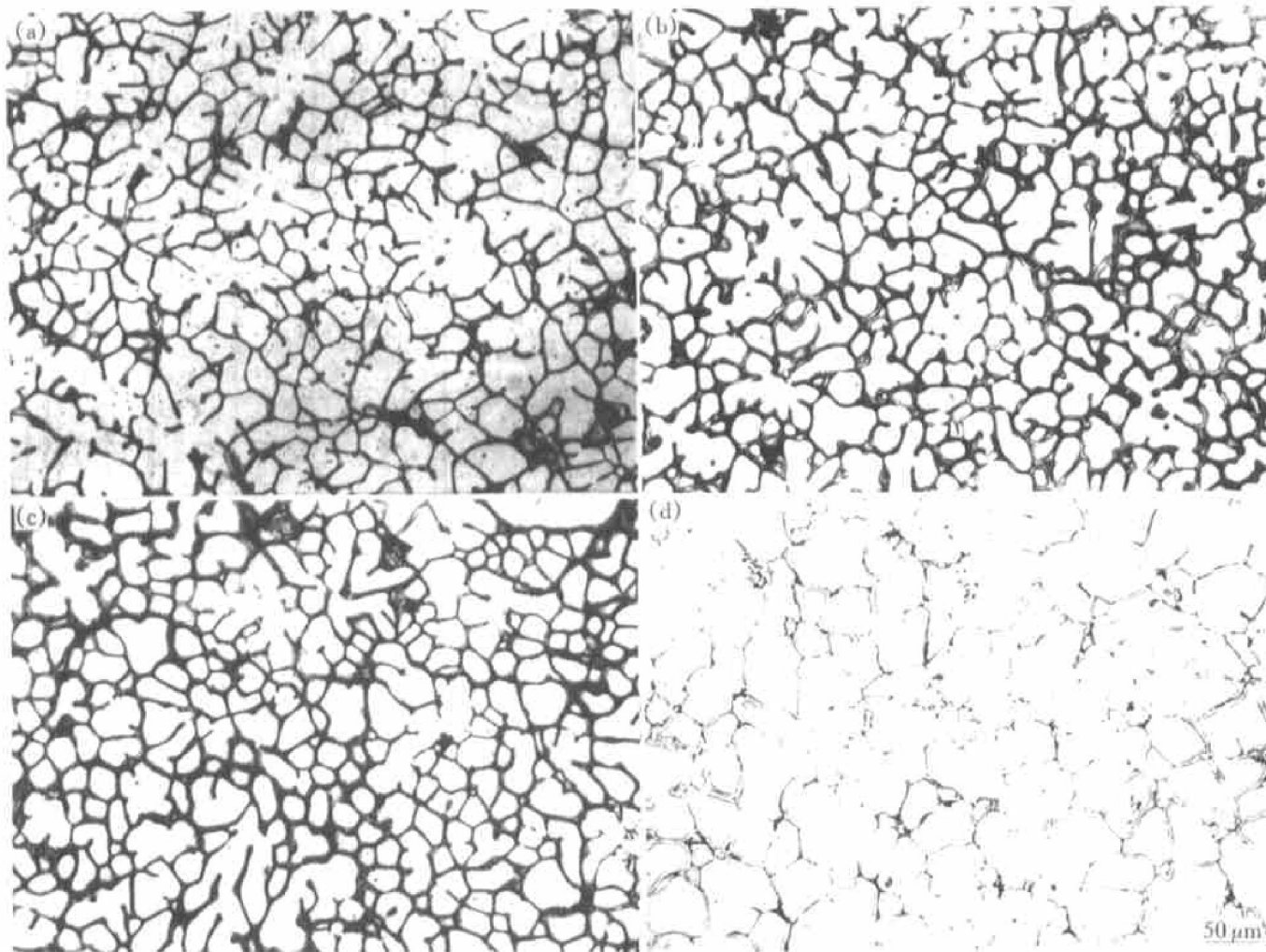


图3 铸锭的微观组织随电磁振荡强度的变化规律

Fig. 3 Evolution of microstructure of ingots with intensity of electromagnetic vibration

(Stationary electromagnetic field intensity $10 \text{ kA} \cdot \text{t}$, frequency of electromagnetic vibration 25 Hz)

(a) $-5 \text{ kA} \cdot \text{t}$; (b) $-7.5 \text{ kA} \cdot \text{t}$; (c) $-10 \text{ kA} \cdot \text{t}$; (d) $-10 \text{ kA} \cdot \text{t}$ without stationary magnetic field

所产生的冲击波使得晶粒破碎, 单个气穴或空腔的崩溃会引发相邻, 直至所有“气穴云”(Cavitation cloud)的共同崩溃, 因而产生大量的晶粒碎片, 其在熔体中能够有效地成为新的形核核心, 增加了形核核心数目, 使得晶粒得以细化。但是由于“成穴”所需的临界电磁压力太大(约 $7 \times 10^4 \text{ Pa}$)^[3], 现有的生产条件下, 通过电磁振荡对熔体产生的电磁压力只能达到 $3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 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。作者认为: 电磁振荡之所以能增加形核核心是由于电磁搅拌作用使得晶粒从结晶器壁游离数量增多; 以及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^[8, 9], 在较大的过冷度下, 大量晶核依附其上, 产生瞬间异质形核。此外,

振荡有着与搅拌相同的作用, 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, 这样就使得结晶过程能够围绕着分布于整个液穴范围内的大量形核核心同时进行, 几个因素综合作用的结果, 使得晶粒尺寸减小, 组织得到细化。

对于实验研究的 7075 铝合金, 外加交变电磁场 $\mathbf{b}$ 与其在熔体中诱发形成的感应电流 $\mathbf{J}$ 之间交互作用, 产生电磁体力 $\mathbf{F}_2 = \mathbf{J} \times \mathbf{b}$, 其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, 减少了熔体在结晶器壁上的形核数; 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径向旋转分力, 由于引发强制对流, 而在晶体根部产生剪切力 $F_{\tau} = 6\eta\omega(L/r)^3$, 促使晶粒从器壁游离数量增多, 形核核心增加。此

外, 由于稳恒磁场 B_0 与交变电流密度 J_0 之间交互作用而产生的电磁体力 $F_1 = J \times B_0$, 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 $FeAl_3$ 等高温固相化合物部分解吸了表面吸收的气体, 从而增加了与金属熔体的润湿, 较大的过冷度以及较小的润湿角大大降低了以高温固相化合物为基底的异质形核临界自由能, 因此得以成为新的形核核心。更需提及的一点是, 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, 分布十分均匀而且深度过冷, 此时熔体中形成的大量准固相原子团簇, 不仅由于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拉力的作用, 与原子团簇间有着极好的润湿条件, 根据 Stefanescu 等提出的瞬态形核理论^[11], 在此条件下, 将有大量的晶核以准固相原子团簇为基底, 瞬间异质形核而成。以上所述 3 条原因共同作用的结果, 使得电磁振荡半连铸 7075 铝合金熔体中游离的结晶核心大幅度增加。

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^[12]。作者认为主要有以下几点: 1) 在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, 削弱了枝晶的生长条件; 2) 晶粒在振荡和搅拌作用下, 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等。此外, 电磁振荡还具有: 1) 由于晶核比合金熔体的电导率大 3 ~ 5 倍^[4, 5], 因而其内部诱发形成的感应电流及因此而承受的电磁振荡力较熔体的为大, 在振荡过程中, 两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; 2) 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加强, 由于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; 3) 当熔体固相分数超过 0.55, 而引起摩擦力急剧增大, 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, 电磁振荡使得熔体中结晶核心增加, 以及磁场对游离晶核枝晶生长条件的抑制作用, 使得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的增加, 交变磁场 b 及其在熔体中诱发行成的感应电流 J 增强, 两者之间交互作用, 产生的电磁体力 $F_2 = J \times b$ 的径向分力增大, 对熔体的提升作用增强, 降低了熔体与结晶器壁的接触高度, 使得在一次冷却强度降低的同时, 其轴向分量相应加大, 对熔体搅拌作用增强 (系统实验证明, 在交变磁场强度 b 较大的情形下, 电磁制动效应只在弯液面的中间区域较为明显 (局部速度减小 20%), 而在其他部位则无关紧要, 可以忽略^[3]), 使形核核心增多。此外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, 如图 3 所示。

4 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, 此外, 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, 在过冷度较大的条件下, 大量晶核依附其上, 产生瞬间异质形核, 增加了形核核心的数量。

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。

[REFERENCES]

- [1] Jien-wei Y, Shang-haw J, Wen-pin L. The improved microstructures and properties of 7075 alloys produced by a water-cooling centrifugal casting method [J]. Metall Trans, 1996, 27A: 1933.
- [2] Vives C. Effects of electromagnetic vibrations on the microstructure of continuously cast aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1993, A173: 169.
- [3] Vives C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys(I) —solidification in the presence of crossed alternating electric fields

- and stationary magnetic fields [J]. *Metall Trans*, 1996, 27B: 445.
- [4] Alireza R, Kenji M. Investigation of the effects caused by electromagnetic vibrations in a hypereutectic Al-Si alloy melt [J]. *Metall Trans*, 1998, 29A: 1477.
- [5] Alireza R, Kenji M, Toshiyuki N. Effects of electromagnetic vibration on hypereutectic Al-Si alloy melt [J]. *Metall Trans*, 1999, 31A: 755.
- [6] 徐游. 电磁学 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1987.
- XU You. *Electromagnetism* [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1987.
- [7] 訾炳涛, 巴启先, 崔建忠, 等. 强脉冲电磁场对金属凝固组织影响的研究 [J]. *物理学报*, 2000, 49(5): 1010-1013.
- ZI Bing-tao, BA Qi-xian, CUI Jian-zhong, et al. Investigation of the effect of strong impulsive electromagnetic field on metal solidified structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(5): 1010-1013.
- [8] 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 Yao-he, HU Zhuang-qi, JIE Wan-qi. *Solidification Technique* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998.
- [9] 王家炘, 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 Jia-xin, HUANG Ji-rong, LIN Jian-sheng. *Metallic Solidification and Its Controlling* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983.
- [10] 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(Suppl. 1): 270.
- XING Shu-ming, MA Jiang, CHEN Wei-shi, et al. Formation and evolution of nondendritic solid phase of semisolid Al-Si alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1999, 9(Suppl. 1): 270.
- [11] Stefanescu D M, Padhya G, Yopdhyay D B. Heat transfer-solidification kinetics modeling of solidification of casting [J]. *Metall Trans*, 1990, 21A: 998.
- [12] 张勤, 路贵民, 崔建中, 等. CREM 法半连续铸造 Al 合金非枝晶组织形成机制 [J]. *金属学报*, 2001, 37(8): 873.
- ZHANG Qin, LU Gui-min, CUI Jian-zhong, et al. Formation mechanism of non-dendritic structure of aluminum alloy produced by semi-continuous casting of CREM process [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(8): 873.

Influence of electromagnetic vibration intensity on microstructural refinement of aluminum alloy produced by semi-continuous casting

ZHANG Qin, CUI Jian-zhong, LU Gui-min, ZHANG Bei-jiang

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

[Abstract] The influence of the intensity of electromagnetic vibration on the microstructure of 7075 alloy ingot produced by semi-continuous casting was examined, when a stationary magnetic field and a periodic magnetic field were simultaneously applied. The results show that the mean grain size obtained by this electromagnetic vibration method is smaller than that of produced by CREM process. And with the increase of electromagnetic vibration intensity, the microstructure of ingot becomes more fine and uniform. Moreover, the refinement mechanism of alloy microstructure under electromagnetic vibration is also discussed.

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

(编辑 杨 兵)