

[文章编号] 1004-0609(2002)01-0048-04

# CREM 法半连铸铝合金初凝壳与磁场强度的关系<sup>①</sup>

张 勤, 路贵民, 崔建忠, 张北江

(东北大学 材料电磁过程教育部重点实验室, 沈阳 110004)

**[摘 要]** 研究了不同强度交变电磁场作用下, 7075 合金凝固壳高度及铸锭表面质量的变化规律。结果表明, 随着磁场强度增加, 熔体与结晶器的接触高度以及凝固壳高度减小, 初凝壳形成位置点降低, 铸锭表面质量提高。采用晶粒游离理论解释了电磁场作用下初凝壳的形成机制, 认为电磁场作用下, 晶粒从结晶器壁游离数量增加, 稳定初凝壳难以形成, 是延缓初凝壳形成时间和降低初凝壳形成位置的根本原因。

**[关键词]** CREM 法; 半连续铸造; 铝合金; 初凝壳

**[中图分类号]** TG 249.7; TG 111.4

**[文献标识码]** A

CREM 法<sup>[1, 2]</sup> (Casting-refining-electromagnetic) 虽然由于电磁力的径向约束作用, 极大地减小了合金熔体与结晶器壁间的接触和滑动摩擦力, 但是有别于无模电磁铸造, 结晶器仍对熔体有很大的支撑和成型作用, 其凝固仍分为结晶器部分的一次冷却和直接水冷部分的二次冷却两个阶段。合金铸锭表面缺陷(偏析瘤, 发汗等)大部分产生在结晶器内部的初凝壳部分<sup>[3, 4]</sup>, 因为此时液固相变引发的体积收缩常常使铸锭离开结晶器壁, 导致铸锭表面散热显著减少, 产生再熔化逆偏析。因此, 为了提高合金铸锭表面质量, 必须对电磁场作用下 CREM 法初凝壳的形成机制和变化规律有一个清晰和明确的认识。本文作者研究采用 CREM 法电磁半连续铸造制备 7075 铝合金时, 凝固壳高度随磁感应强度的变化规律, 并采用电磁场作用下的晶粒游离理论对其进行解释和说明。

## 1 实验

### 1.1 CREM 法的工作原理

CREM 法是根据电磁感应理论, 在用透磁材料制得的结晶器外安装感应线圈, 感应线圈通以低频交流电, 周期性交变电磁场在熔体内部诱发形成感应电流, 两者之间交互作用产生洛伦兹力, 则根据电磁学理论<sup>[5, 6]</sup>有

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = -\nabla(1/2 \mu \mathbf{B}^2) + 1/\mu(\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{B} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{F}$  为洛伦兹力,  $\mathbf{B}$  为磁感应强度;  $\mathbf{J}$  为感应

电流密度,  $\mu$  为磁导率。

方程第一项为电磁力的径向有势分力, 它垂直熔体侧表面指向液芯, 对熔体表现为一提升作用的压力, 导致熔体自由表面形成凸起的弯月形, 降低了铸锭与结晶器的接触高度和接触压力, “软接触”导致的熔体与结晶器间传热系数降低以及结晶器和熔体中感应电流的焦耳热效应对热流分布有极大影响, 使得一次冷却强度降低。

方程第二项为由体系边缘效应(Fringe effect)所产生的电磁力轴向旋转分力<sup>[1]</sup>, 它沿径向方向迅速递减, 直接导致了熔体内部存在一个在铸锭周边区域沿凝固前沿垂直向下, 而后经轴中心线向上返回液面的涡流。这个强制对流有效地消除了局部过热和成分过冷, 明显减小了熔体内部的温度和浓度梯度, 使整个液穴内部温度和合金元素分布趋于平衡。其工作原理如图 1 所示。

### 1.2 实验方法

实验所用材料为 7075 铝合金, 在坩埚式电阻炉内以工业纯 Al(纯度 99.7%), Cu, Mg, Zn, Al-Mn 中间合金(锰剂)为原料进行熔炼, 精炼后其成分如表 1 所示。

初始凝固壳位置的测定采用“插丝法”, 即分别插入金属丝, 测量  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  值(如图 1 所示位置)。其中,  $H_1$  为沿铸锭中心线方向测得的结晶器顶部到凝固前沿中心的距离,  $H_2$  为沿结晶器内壁测得的结晶器顶部到凝固前沿周边区域的距离,

① [基金项目] 国家重大基础研究发展规划资助项目(G199906490501)  
[作者简介] 张 勤(1970-), 男, 博士研究生。

[收稿日期] 2001-02-05; [修订日期] 2001-04-16

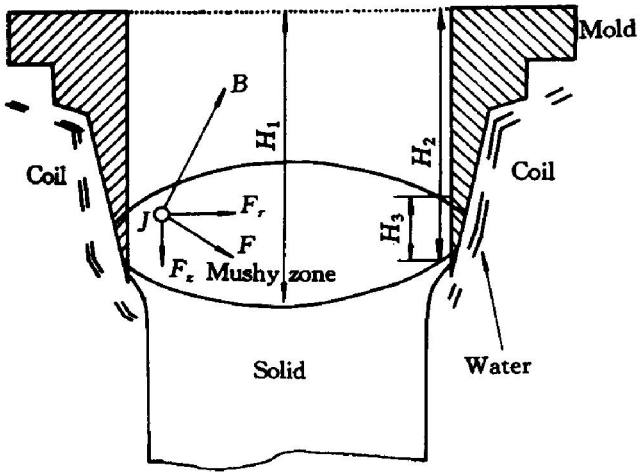


图 1 CREM 法电磁半连续铸造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CREM process

表 1 实验用 7075 合金成分(质量分数, %)

Table 1 Composition of 7075 alloys  
(mass fraction, %)

| Al   | Cu    | Mg    | Zn    | Mn    | Fe    | Si    |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bal. | 1. 67 | 2. 22 | 5. 95 | 0. 30 | 0. 35 | 0. 20 |

$H_3$  为熔体与结晶器壁的接触高度, 定义  $H = H_1 - H_2$  为凝固壳高度, 根据凝固壳高度判断初凝壳的形成和变化情况。

固定浇注温度为 720 ℃, 感应线圈电流频率 15 Hz, 铸造速度 40 mm/min, 在相同冷却速度的前提下, 改变电流分别为 50 A, 100 A, 150 A, 200 A,

分别测得  $H_1$ ,  $H_2$  和  $H_3$  值, 进而求得  $H$  值, 得出不同电磁场强度条件下, 凝固壳高度的变化, 亦即初凝壳形成位置点的变化规律。

2 结果及分析

凝固壳高度随感应线圈电流变化关系如表 2 所示。可见, 随着感应线圈电流增大, 熔体与结晶器接触高度以及凝固壳高度都随之减小。

表 2 凝固壳高度随感应线圈电流变化关系  
Table 2 Relationship between solidified shell height and current of coil

| $I / \text{A}$ | $H_1 / \text{mm}$ | $H_2 / \text{mm}$ | $H_3 / \text{mm}$ | $H / \text{mm}$ |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 50             | 85                | 38                | 34                | 47              |
| 100            | 85                | 46                | 26                | 39              |
| 150            | 85                | 51                | 21                | 34              |
| 200            | 84                | 53                | 18                | 31              |

图 2 和图 3 分别为在感应线圈电流为 100 A, 150 A, 200 A 条件下铸锭的表面状况和微观组织。从中可看出, 随着感应线圈电流增加, 初凝壳形成位置点降低, 铸锭表面的偏析现象减弱, 表面质量明显得到提高, 当电流达到 200A 时, 偏析瘤完全得到消除。相应地, 随着感应线圈电流增加, 微观组织中粗大的蔷薇形晶粒所占比例逐渐减小, 最

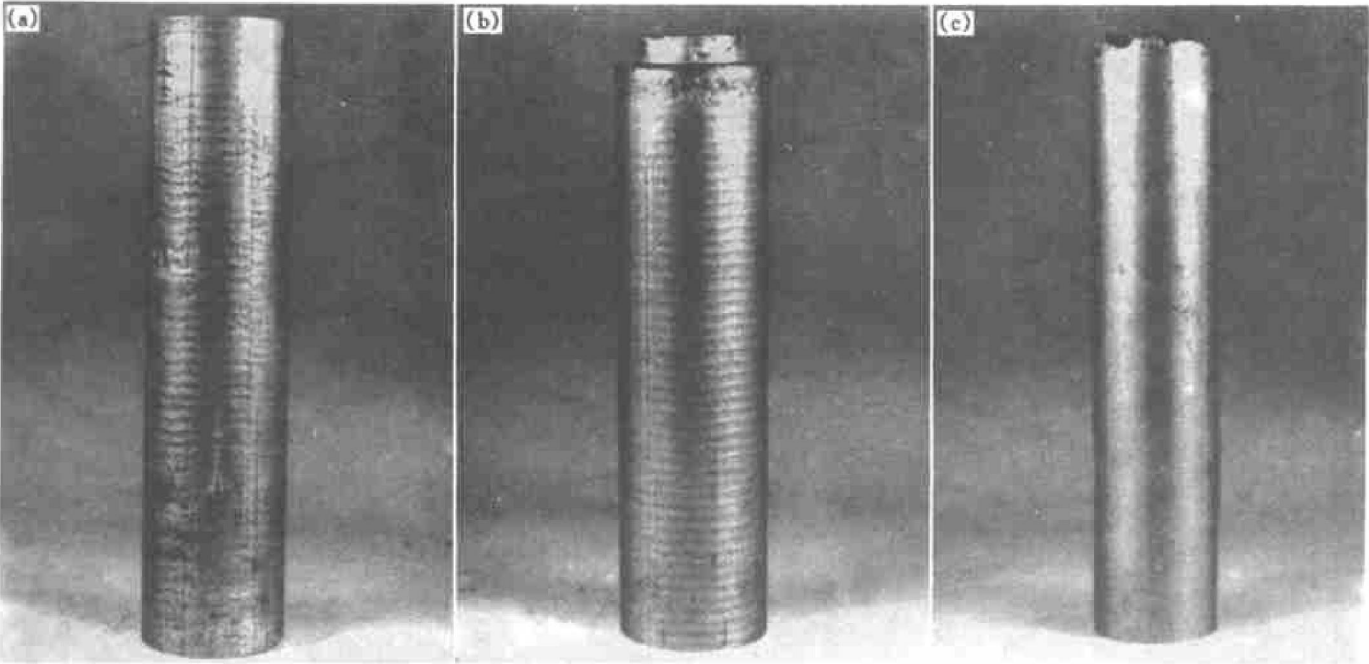


图 2 不同强度电磁场条件下 7075 合金铸锭的表观质量

Fig. 2 Surface aspects of 7075 alloy ingot produced in various current of coil  
(a)  $-I = 100 \text{ A}$ ; (b)  $-I = 150 \text{ A}$ ; (c)  $-I = 200 \text{ A}$

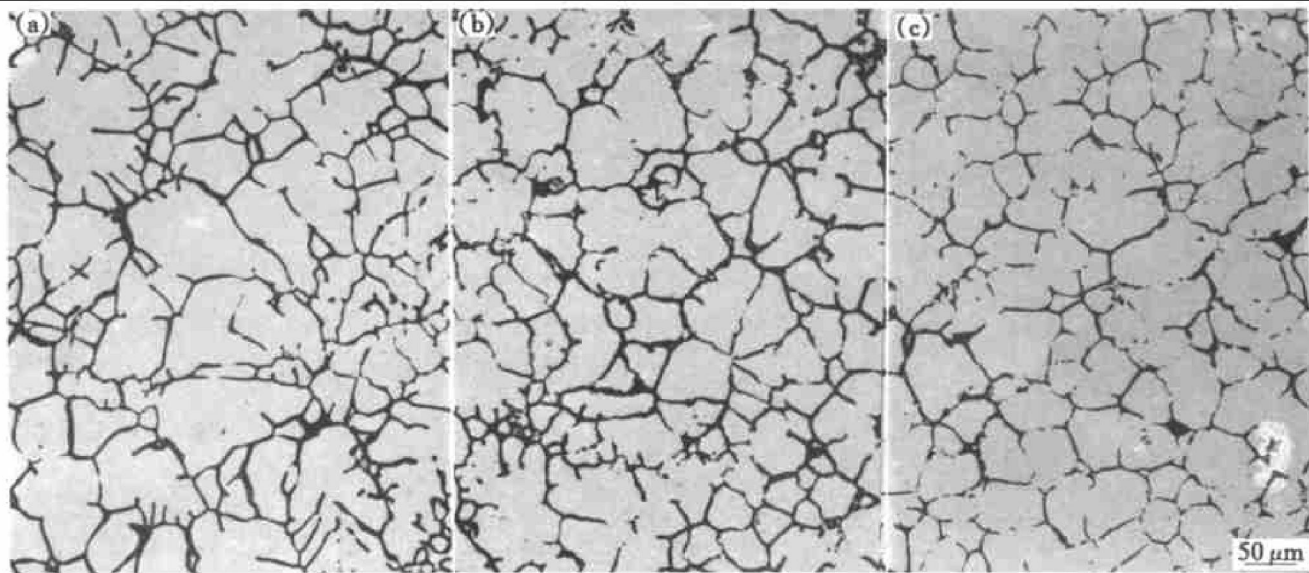


图3 不同强度电磁场条件下 7075 合金铸锭的微观组织

Fig. 3 Microstructure of 7075 alloy ingot produced in various current of coil

(a)  $-I = 100$  A; (b)  $-I = 150$  A; (c)  $-I = 200$  A

终全部转变为细小均匀的近球状形态。

结合 CREM 法的工艺条件可知, 尽管电磁场的搅拌作用可使熔体温度在较大范围趋于均匀, 但是在一次冷却的连续降温作用下, 结晶器壁附近仍然存在一个过冷度较大的温度边界层<sup>[7]</sup>, 以结晶器壁为衬底的异质形核, 其稳定形核功小, 因而优先形核。CREM 法电磁半连续铸造中, 电磁力的作用使得熔体与结晶器壁接触高度降低和接触压力减小, 以及结晶器和熔体中感应电流的焦耳热效应, 都是使一次冷却强度降低的直接原因, 因而结晶器壁的冷却能力较常规铸造要小许多。由于晶粒的稳定形核功与过冷度的平方成正比, 所以在浇注熔体刚进入结晶器的初始阶段, 结晶器壁上的形核数很少, 相邻晶粒间难以在短时间内彼此相连形成稳定的初凝壳, 并且在晶粒长大过程中有可能在与结晶器壁交接处发生溶质偏析, 使得成分过冷而导致颈缩。当由电磁搅拌作用引起的紊流在晶粒根部产生的剪切力大于晶粒与结晶器间的粘着力时, 晶粒发生游离<sup>[8]</sup>。一次冷却使得液穴内熔体过热度持续降低; 固液比逐渐提高, 并且随着铸锭下移, 熔体沿铸锭向下传导的散热作用加强, 使得沿结晶器壁生长的晶粒迅速长大并彼此紧密相连, 电磁搅拌作用形成的剪切力难以再使之发生游离, 因而便形成了稳定的初凝壳。随着感应线圈电流增加, 熔体运动加剧以及结晶器对熔体一次冷却强度减小, 导致晶粒游离数量增加, 难以形成稳定的初凝壳, 因而,

初凝壳形成位置点降低, 初凝壳高度减小。

此外, 为了探讨感应器壁和熔体中感应电流的焦耳热效应对形成初凝壳的影响, 先假设感应线圈电流  $I_E = I_{E0}e^{j\omega t}$ , 则感应器壁和熔体中感应电流分别为  $I_{S1} = I_{S01}e^{j\omega t}$ ,  $I_{S2} = I_{S02}e^{j\omega t}$ , 两者与感应电流关系<sup>[9]</sup>为

$$\begin{cases} I_{S1} = [-j\omega M_{ES1}/(R_1 + j\omega L_1)] I_E \\ I_{S2} = [-j\omega M_{ES2}/(R_2 + j\omega L_2)] I_E \end{cases} \quad (2)$$

式中  $M_{ES}$  为感应线圈与结晶器以及熔体间的互感系数,  $R$  和  $L$  分别为结晶器和熔体各自的电阻和电感。根据热力学定律, 感应电流在结晶器壁和熔体中产生的焦耳热分别为

$$\begin{cases} Q_1 = I_{S1}^2 \cdot R_1 \\ Q_2 = I_{S2}^2 \cdot R_2 \end{cases} \quad (3)$$

通常认为结晶器壁与熔体间的传热系数呈线性关系, 所以引起熔体过冷度减小为

$$\Delta t = \frac{kQ_1 + Q_2}{mc} = \frac{1}{mc} \{ kR_1 \cdot [-j\omega M_{ES1}/(R_1 + j\omega L_1)]^2 + R_2 \cdot [-j\omega M_{ES2}/(R_2 + j\omega L_2)]^2 \} I_E^2 \quad (4)$$

式中  $m$  为熔体质量,  $c$  为熔体的热容, 又由于稳定形核功  $\Delta G_{\max}$  反比于  $\Delta t^2$ , 所以  $\Delta G_{\max}$  反比于  $I_E^4$ 。因此, 感应线圈电流增大, 结晶器壁和熔体中感应电流的焦耳热效应引起熔体过冷度减小, 形核功增大, 初凝壳难以形成。

### 3 结论

1) 感应线圈电流增加, 液穴深度变浅, 初凝壳的形成位置降低, 铸锭表面质量提高。当感应线圈电流达到 200 A 时, 完全消除了表面偏析现象。

2) 感应线圈电流增加, 晶粒从结晶器壁游离数量增加, 以及结晶器壁和熔体中焦耳热效应增强, 引起熔体过冷度减小和晶粒稳定形核功增加是延缓初凝壳形成时间和降低初凝壳形成位置点的根本原因。

#### [ REFERENCES ]

- [ 1 ] Vives C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: part 1. working principle and metallurgical results [ J ]. Metal Trans B, 1989, 20B( 10 ): 623– 629.
- [ 2 ] Vives C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: part 2. specific practical problems and their solutions [ J ]. Metal Trans B, 1989, 20B( 10 ): 631– 643.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术 [ M ]. 1998.

ZHOU Yao-he, HU Zhuang-qi, JIE Wan-qi. Solidification Technique [ M ]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998.

- [ 5 ] 徐 游. 电磁学 [ M ]. 南京: 江苏科技出版社, 1987.  
XU You. Electromagnetism [ M ]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1987.
- [ 6 ] 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. Effect of strong pulsed electromagnetic field on metal's solidified structure [ J ]. Acta Physica Sinica, 2000, 49( 5 ): 1010 – 1013.
- [ 7 ] 张景新, 张 奎, 刘国钧, 等. 电磁搅拌制备半固态材料非枝晶组织的形成机制 [ J ]. 中国有色金属学报, 2000, 10( 4 ): 511– 515.  
ZHANG Jing-xin, ZHANG Kui, LIU Guo-jun, et al. Formation mechanism of non-dendritic structure in semi-solid metals produced by ES process [ J ]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10( 4 ): 511– 515.
- [ 8 ] 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– 274.  
XING Shu-ming, MA Jing, 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– 274.
- [ 9 ] Furui M, Kojima Y, Matsuo M. Fabrication of small aluminum ingot by electromagnetic casting [ J ]. ISIJ international, 1993, 33( 3 ): 400– 404.

## Relationship between electromagnetic intensity and initial solidified shell height of aluminum alloy produced by CREM process

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

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

**[ Abstract ]** Under the effect of electromagnetic field with low frequency, the evolutions of solidified shell height and surface aspects, bearing on 7075-aluminum alloy produced by CREM process, have been investigated. The results show that the gradual enhancement of the electromagnetic intensity allows a decrease in the height of solidified shell and in the contact height between melt and mold, which improve surface aspects of the ingot. Crystal dissociating theory are used to explain the formation mechanism of initial solidified shell under the effect of electromagnetic field. It is pointed out that under the effects of electromagnetic field, the decrease of crystal particles dissociated from the crystallizer wall results in the difficulty of formation of solidified shell, which is the key reason that delay the time and decrease the position of forming the initial solidified shell.

**[ Key words ]** CREM process; semi-continuous casting; aluminum alloy; initial solidified shell

( 编辑 杨 兵 )