

## CREM 法半连续铸造 Al 合金非枝晶组织的形成机制\*

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** 研究了低频电磁场作用下 7075Al 合金半连续铸坯的微观组织。结果表明: 铸坯由近球形和蔷薇形晶粒构成, 且随磁场强度增大, 近球形组织增加, 蔷薇形组织减少。整体组织变得细小均匀。这种非枝晶组织的形成机制可解释为: 电磁场作用下, 从结晶器壁游离的晶粒数量增多, 使熔体中的结晶核心增加。此外, 游离晶粒随对流熔体一同运动以及晶粒自身的旋转运动抑制了其按枝晶方式生长, 从而导致最终形成细小均匀的非枝晶组织。

**关键词** Al 合金, 半连续铸造, CREM 法, 非枝晶组织

**中图分类号** TG249.7, TG111.4 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)08-0873-04

## FORMATION MECHANISM OF NON-DENDRITIC STRUCTURE OF ALUMINUM ALLOY PRODUCED BY SEMI-CONTINUOUS CASTING OF CREM PROCESS

ZHANG Qin, LU Guimin, CUI Jianzhong, ZHANG Beijiang

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

Correspondent: ZHANG Qin, Tel: (024)23955426, Fax: (024) 23906316,

E-mail: zhangqin0909@sina.com.cn

Manuscript received 2001-01-21, in revised form 2001-04-09

**ABSTRACT** The microstructure of 7075 Al alloy ingot produced by CREM process under the effect of electromagnetic field with low frequency was studied. The results show that the ingot consists of spheroid-shaped and rosette-shaped grains. With the increase of electromagnetic intensity, the quantity of spheroid-shaped grain increase and rosette-shaped grains decrease. Meanwhile, the microstructure of the ingot becomes more fine and uniform. The formation mechanism of non-dendritic structure can be explained as follows: Under the effects of electromagnetic field, crystal particles are easily dissociated from the crystallizer wall, which increases amount of the grain nuclei in the melt. Furthermore, the movement of free grains together with the melt convection as well as self-rotation of grains restrain them from growing into dendrite, and finally form a fine and uniform, non-dendritic structure.

**KEY WORDS** aluminum alloy, semi-continuous casting, CREM process, non-dendritic structure

由于 Al 合金的机械性能与其微观组织结构密切相关, 所以细化晶粒、生产等轴细晶组织的 Al 合金铸锭一直是材料界所关注的课题。在交变电磁场作用下, 半连续铸造 Al 合金可以获得细小、均匀、近球形或蔷薇形的非枝晶组织。但是有关其结晶核心的来源、增殖及长大机制一直未有统一认识。本文在对比、归纳前人建议的基础上,

结合 CREM 法<sup>[1]</sup> (casting-refining-electromagnetic) 的实际工艺条件, 尝试采用晶粒游离理论以及电磁场对游离晶粒枝晶方式生长起抑制作用的原理对其进行解释和说明。

### 1 实验

#### 1.1 实验方法及原理

由 Vives 首先提出的 CREM 法铸造工艺, 是根据电磁感应理论, 在具有透磁和聚能结构的结晶器外安装感应线圈, 感应线圈通以低频交流电, 在周期性电流的作用下, 产生一交变磁场  $\vec{B}$ , 并在熔体内部诱发形成感应电流

\* 国家重大基础发展规划项目 (973)G199906490501

收到初稿日期: 2001-01-21, 收到修改稿日期: 2001-04-09

作者简介: 张勤, 男, 1970 年生, 博士生

$\vec{J}$ , 感应电流与交变磁场相互作用, 形成一电磁体力  $\vec{F}$ . 若磁导率为  $\mu$ , 则根据电磁学理论可知

$$\begin{aligned}\vec{F} &= \vec{J} \times \vec{B} \\ &= -\nabla\left(\frac{1}{2}\mu\vec{B}^2\right)(1/\mu) + (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{B}\end{aligned}\quad (1)$$

其中, 方程的第一项为体积力  $\vec{F}$  的径向不回旋分力, 它垂直熔体表面指向液芯, 从而降低了熔体与结晶器的接触压力和运动摩擦力, 实现了所谓的“软接触”. 方程的第二项为一由体系边缘效应 (fringe effect)<sup>[1]</sup> 而产生的回旋力, 在熔体中产生一沿凝固前沿垂直向下的涡流, 起到搅拌熔体、进而均匀温度场和合金元素成分的作用. 其工作原理见图 1.

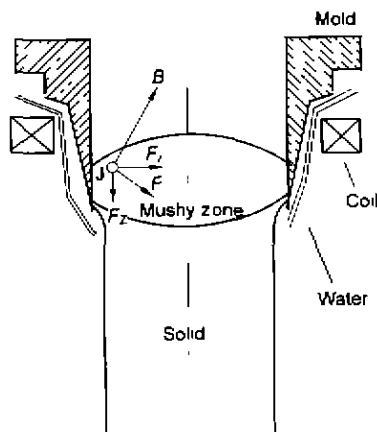


图 1 CREM 法工作原理图

Fig.1 Schematic of the CREM process

## 1.2 实验过程

实验所用材料为 7075 Al 合金, 化学成分 (质量分数, %) 为: 89.31 Al, 1.67 Cu, 2.22 Mg, 5.95 Zn, 0.30 Mn, 0.35 Fe, 0.20 Si. 感应线圈由直径为 6 mm、内通冷却水、彼此绝缘的 160 匝铜管, 在结晶器外顺序缠绕而成, 在感应线圈中通以频率为 25Hz 的交流电, 电流强度分别为 100, 150, 200 A. 在半连续铸造机上铸造 7075 Al 合金圆锭. 从横截面截取的试样在 200 倍的光学显微镜下观察其组织形貌.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 实验结果

图 2 中 a—d 分别为未施加电磁场以及感应线圈电流为 100, 150, 200 A 条件下的金相组织. 从中可看出: 与未施加电磁场相比, 在电磁场作用下, 7075 合金铸坯由细小、均匀的近球形和蔷薇形微观组织构成. 随着磁场强度的增大, 铸坯中近球形组织越来越多, 蔷薇形组织所占的比例越来越少, 尺寸也变得更加细小和均匀, 当感应线圈电流达到 200A 时, 整个铸坯基本由近球形组织构成.

### 2.2 非枝晶组织的形成机制

合金组织非枝晶化的条件主要是熔体中结晶核心的增加和结晶核心枝晶生长条件的消除, 电磁场可使熔体中结晶核心增加和抑制枝晶生长, 但是对于增殖结晶核心的来源问题, 却各持己见. Flemings<sup>[2]</sup> 认为是二次枝晶臂折断、碎块演化的结果. Vogel 等<sup>[3]</sup> 学者则认为剪切作用使初生  $\alpha$ -Al 枝晶二次臂发生大角度塑性弯曲, 在枝晶臂根部产生附加位错群, 这些位错经迁移或回复再结晶形成晶界, 当这种位于二次臂根部的晶界大于  $20^\circ$  时, 其所具有的能量将超过固液界面能量的二倍. 若与液相接触, 晶界就逐渐被液体薄膜所取代, 二次臂便逐渐脱落下来, 形成新的结晶核心. Hellawell 等<sup>[4]</sup> 认为搅拌会使熔体产生强烈的温度起伏和成分起伏, 引起二次臂根部的熔断. 同时 Zhang 等<sup>[5]</sup> 认为搅拌作用使得金属液中许多小的热起伏和成分起伏区域同时具备了形核条件. 目前, 基本上是非枝晶机械断裂、枝晶根部熔断以及爆发形核等几种理论并存.

本文认为, 电磁场作用下, 晶粒从结晶器壁游离数量的增多, 是熔体中结晶核心增加的最主要原因. 游离晶粒随对流熔体一同运动以及自身旋转运动所带来的枝晶生长抑制作用, 是最终凝固组织为近球形和蔷薇形的根本原因. 磁场强度增大, 将促进游离晶粒中的变形枝晶向近球形化形态生长, 从而减少了蔷薇形初生相在组织中所占的比例. 当然, 电磁场作用下所形成的熔体强制对流, 有可能使处于强烈温度起伏条件下的初生枝晶二次臂机械断裂或根部熔断, 但这不是结晶核心增加的根本原因. 因为, 感应电流趋肤效应, 使得引起熔体流动的电磁轴向分力在熔体的周边部位最大, 并沿径向递减, 这就使得凝固前沿熔体的流速要比周边区域小, 剪切力也相应减小. 电磁场的强烈搅拌作用, 减弱甚至消除了液穴内结晶前沿的温度梯度和成分过冷现象, 极大地抑制了枝晶的生长, 至少在一次冷却的较短时间内难以形成较大的二次枝晶臂, 因此也就很难提及枝晶二次臂的碎断问题. 正如 Zhang 等<sup>[5]</sup> 的建议, 枝晶碎断观点的主要缺陷在于假设熔体中首先生成枝晶.

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在较大温度范围内趋于均匀, 但是结晶器壁附近仍然存在一个过冷度较大的温度边界层, 以结晶器壁为衬底的异质形核, 其稳定形核功小, 因而将优先形核. 但是由于电磁体力的作用使得熔体与结晶器壁接触高度和接触压力减小, 以及结晶器和熔体中感应电流的 Joule 热效应, 导致一次冷却强度大大降低, 结晶器壁的冷却能力减小. 由于晶粒的稳定形核功  $\Delta G_{\max}$  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, 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, 并且在晶粒长大的过程中有可能在与

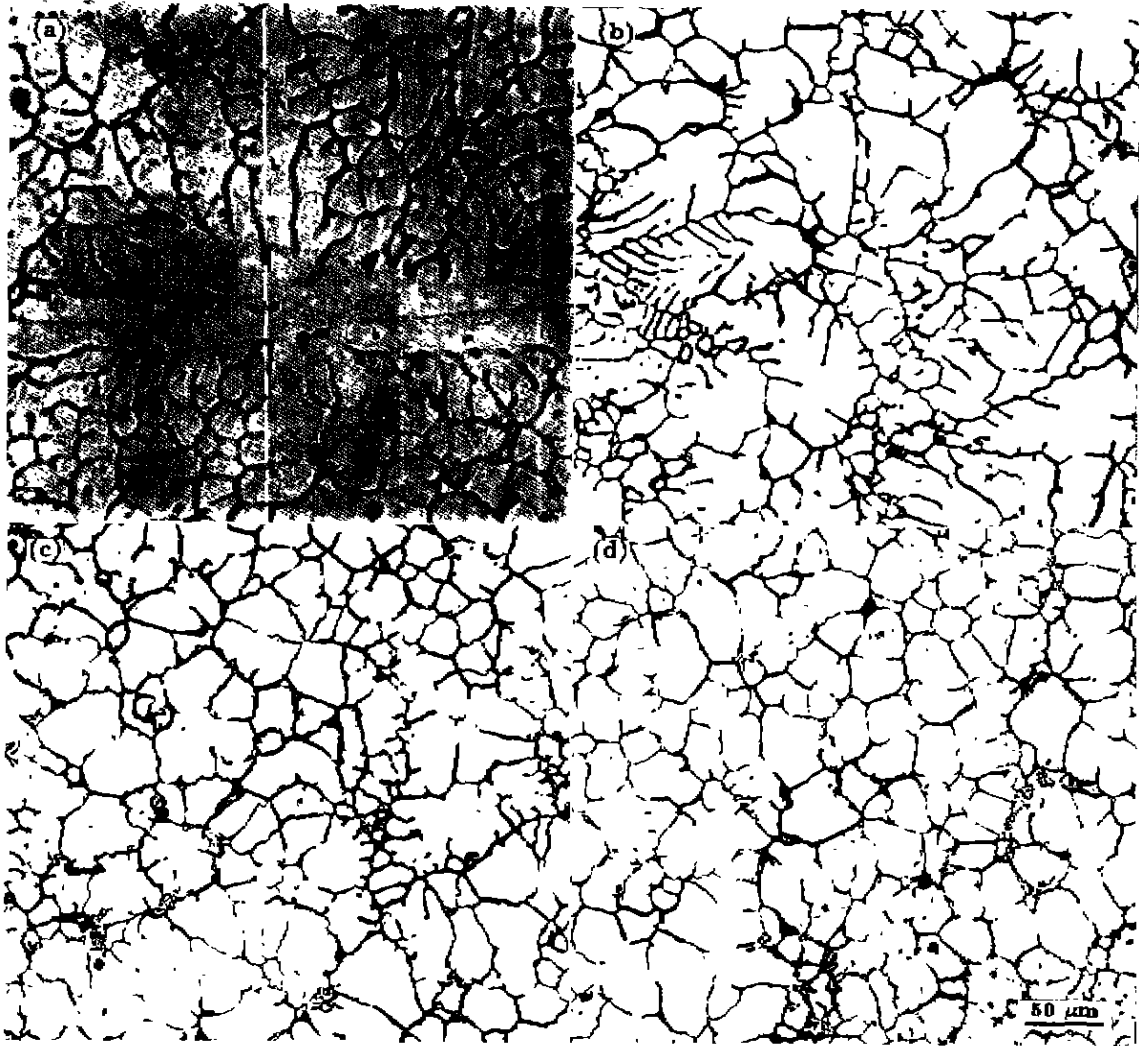


图 2 不同电磁场条件下制备的 7075 合金显微组织

Fig.2 Microstructures of 7075 alloy cast in various currents of inductor coil

(a) 0 A (b) 100 A (c) 150 A (d) 150 A

结晶器壁交接处发生溶质偏析,使得成分过冷,而导致颈缩。当由电磁体力搅拌作用引起的紊流,在晶粒根部产生的剪切力  $F_{\tau} = 6\eta v(L/r)^3$  大于晶粒与结晶器间的粘着力  $F_{\lambda} = 2.05\gamma/\delta$  (其中  $L$  和  $r$  为晶体的长度和根部半径,  $\eta$  和  $v$  分别为熔体的粘度及流动速度,  $\gamma$  为晶体与器壁间的界面张力,  $\delta$  为界面的平衡厚度) 时,晶粒发生游离<sup>[7]</sup>。一次冷却使得先期浇入液穴内的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的加强,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使之再发生游离,因而形成了稳定的初凝壳。凝固前沿溶体的流动速度较其它部位要稍小<sup>[1]</sup>,同稳定凝固壳一样,即便在附近有熔体流动,也难以因剪切力的作用使晶粒发生游离,可以认为:在结晶器壁上部与熔体接触的

部位发生晶粒游离,而在结晶器壁下部,则是一个不断形成初始凝固壳,以及游离晶粒不断长大沉积、凝固前沿逐渐向前推进的过程。随着电流强度增加,晶粒游离增加,熔体中异质形核核心增多,造成了铸坯组织细化。

在结晶器壁上形成的初始晶粒一般是球冠状,但电磁搅拌作用带来的温度及成分扰动,以及合金生长的  $\langle 100 \rangle$  择优取向,决定了它们还会以枝晶方式生长<sup>[8,9]</sup>。由于 CREM 法的特点,深入熔体内部枝晶臂尖端的热过冷度和成分过冷度较小,径向生长受到抑制,甚至发生重叠,相比之下,轴向过冷度相对较大,从而形成短粗的枝晶臂或发生二次分支而形成变形枝晶,不发生分枝的则成为条状晶<sup>[2,7]</sup>。综上所述,从结晶器壁上游离的晶粒大致有三种形态:球冠状、条状、短粗枝晶臂变形枝晶。虽然变形枝晶和条状晶的游离倾向强,但它们都是由球冠状晶

粒发展而来的,所以,随着磁场强度加大,晶粒游离趋势增强,球冠形晶粒在发展成条状晶和变形枝晶之前游离数量增多,在游离晶粒中所占比例增大,尺寸小的游离晶粒将发生重熔,而尺寸大于临界形核半径的游离晶粒,得以保存下来并长大。

游离晶粒之所以长成近球形或蔷薇形非枝晶相的原因,主要有以下几点:(1)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,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)晶粒在游离过程中,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中,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。

球冠状和条状游离晶在运动过程中以近球形方式生长<sup>[7]</sup>,具有短粗枝晶臂变形枝晶的生长比较复杂,其在运动生长过程中,或发生枝晶臂重熔,或因短枝晶臂的生长没有明显方向性,使得二次分枝间距缩小,直至完全融合,而导致枝晶臂合结并生长,或发生枝晶臂根部熔断脱落,形成新的结晶核心而单独生长,或游离晶粒间发生碰撞粘和及磨圆等,使得变形枝晶向着近球形的形态演化,磁场强度小,变形枝晶向近球形形态转变得不完全,因而出现蔷薇形和近球形及条形初生相组织共存的情形(图2a)。随着磁场强度的增大,球冠形晶粒在游离晶粒中所占比例增加,变形枝晶和条状晶向近球形形态转化趋势增强,蔷薇形初生相所占比例减少,铸坯全部由均匀细小的近球形非枝晶相组成(图2c)。

### 3 结论

(1) 电磁场作用下,晶粒从结晶器壁游离数量的增

加,是熔体中结晶核心增加的最主要原因,从结晶器壁上游离的晶粒大致有三种形态:球冠状、条状、短粗枝晶臂变形枝晶。

(2) 游离晶粒随对流熔体一同运动以及自身旋转运动所带来的枝晶生长的抑制作用,是最终凝固组织为近球形和蔷薇形的根本原因。

(3) 磁场强度增大,游离晶粒数量以及球冠形游离晶粒所占比例增加,磁场促使变形枝晶和条状晶向近球形形态转化趋势增强,导致最终组织全部转化为均匀细小的近球形非枝晶相。

### 参考文献

- [1] Vives C. *Metall Trans*, 1989; 20B: 623
- [2] Flemings M C. *Metall Trans*, 1991; 22A: 957
- [3] Vogel A, Dohkety R D, Cantor B. *Proceeding of International Conference on Solidification*. London: University of Sheffield, 1979: 518
- [4] Hellawell A. In: Kirkwood D H, Kapranos P eds., *Proceeding the 4<sup>th</sup> International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Compositions*. Sheffield, 1996: 60
- [5] Zhang K, Liu G J, Xu J, Si L K. *Chin J Nonferrous Met*, 2000; 10: 47  
(张 奎, 刘国钧, 徐 骏, 石力开 有色金属学报, 2000; 10: 47)
- [6] Zhang J X, Zhang K, Liu G J, Si L K. *Chin J Nonferrous Met*, 2000; 10: 511  
(张景新, 张 奎, 刘国钧, 石力开 有色金属学报, 2000; 10: 511)
- [7] Xing S M, Ma J, Chen W S, Li Y M. *Chin J Nonferrous Met*, 1999; 9: 270  
(邢书明, 马 静, 陈维视, 李亚敏 有色金属学报, 1999; 9: 270)
- [8] Smeuiders R J, Mischgowsky F H, Frankena H J. *J Crystal Growth*, 1986; 76: 151
- [9] Huang S C, Ghkesmann M E. *Acta Met*, 1981; 29: 717