

# 脉冲电流作用下 LY12 铝合金的微观 结构和合金元素分布\*

班春燕 巴启先 崔建忠 路贵民 訾炳涛

(东北大学材料电磁过程教育部重点实验室, 沈阳 110004)

(2001 年 3 月 12 日收到 2001 年 4 月 5 日收到修改稿)

研究了在凝固过程中施加脉冲电流对 LY12 铝合金微观结构和合金元素分布的影响. 实验结果表明, 在脉冲电流作用下, LY12 合金的微观结构发生了明显变化, 聚集在晶界和枝晶网的共晶组织大大减少, 网络变得不连续, 在晶内和晶界附近存在弥散的近似球状的共晶质点. 另外, 脉冲电流能有效地改善合金中 Cu 和 Mg 的成分偏析, 其中对 Cu 在 Al 合金中的负偏析现象的改善更为显著, 使 Cu 较均匀地分布于整个试样.

关键词: LY12 铝合金, 脉冲电流, 显微结构, 偏析

PACC: 8130F, 4765

## 1 引 言

硬铝广泛地应用于机械制造、航空、航天等领域, 这些领域的快速发展, 要求合金具有更高强度、塑性等综合机械性能, 而合金的凝固组织在很大程度上决定了它的机械性能, 因此研究合金的凝固过程具有十分重要的意义. 其中, 凝固组织形态和成分偏析问题是研究凝固过程的两个核心问题. 近年来在材料凝固过程中, 对其施加电磁场这一方法受到了极大地关注, 已发展成一种新的改善金属凝固组织的技术<sup>[1-5]</sup>, 该方法具有无污染、操作简便等优点. Vives 等研究了在铝合金凝固过程中交流磁场, 或稳恒磁场和交流磁场叠加以及稳恒磁场和交流电

流叠加等外场对凝固组织的细化作用, 而使金属熔体在脉冲电场中凝固是另一种新兴的电磁细化方法<sup>[6-8]</sup>, 但大都集中于 Pb-Sn 等低熔点合金, 最近, 崔建忠等人将脉冲电流技术用于熔点较高、应用广泛的铝合金, 为这一细化方法的应用开辟了新的领域<sup>[9, 10]</sup>. 以上这些工作多集中于脉冲电流对晶粒尺寸的影响, 而对脉冲电流作用下合金元素的分布问题尚未见报道. 本文研究了脉冲电流对 LY12 合金的微观结构和合金元素分布的影响, 初步探讨了其形成机理.

## 2 实验材料及方法

实验所用材料为 LY12 合金, 其成分如表 1 所示.

表 1 LY12 合金成分

元素	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Ni	Al
wt%	4.6	1.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	余量

实验所用脉冲电流处理设备如图 1 所示. 它包括充放电部分(由供电电源、调压器、整流电路、脉冲电容器组等组成); 控制部分(由各种控制仪表、触发电路、放电开关等组成); 工作台及负载部分(由试样、放电电极等组成); 加热装置(由电阻炉、热电偶和电位差计组成).

把 LY12 合金板切成 5cm × 1cm 的小条, 将合金小条装入圆柱形陶瓷坩埚中, 放入电阻炉内加热、熔化, 使合金熔体在高于熔点 80℃ 下保温 10min 后, 从电阻炉内取出, 自然冷却至液相线温度(约 650℃) 时, 向熔体中通入脉冲电流, 约 20s 释放一次, 直至合金熔体凝固结束为止. 采用的脉冲电流放电工艺

\* 国家重大基础研究发展规划项目(批准号: G1999064905)资助的课题.

为脉冲电流器的电容  $C = 80\mu\text{F}$ , 放电电压  $V = 5\text{kV}$ . 将试样沿中部横截面切开, 制成金相样品, 在扫描电

镜下观察其显微组织, 并用能谱分析确定试样不同部位的成分分布.

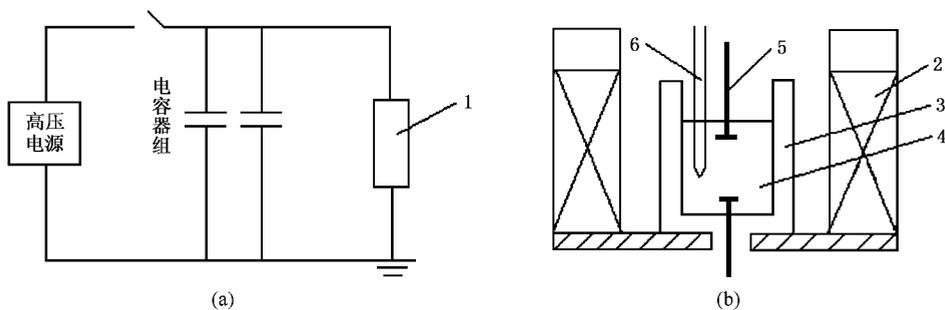


图1 实验电路(a)及实验装置(b)简图 1. 试样, 2. 电阻炉, 3. 陶瓷坩埚, 4. 合金液, 5. 铜电极, 6. 热电偶

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 脉冲电流对 LY12 合金显微组织的影响

图2显示了没有脉冲电流作用下凝固的 LY12 合金中心部位和边缘部位的显微组织. 照片中黑色部分是  $\alpha\text{-Al}$  固溶体, 白色部分是  $\alpha + \text{CuAl}_2$  两相共晶组织和  $\alpha + \text{CuAl}_2 + \text{CuMgAl}_2$  三相共晶组织, 呈网络状. 照片表明, 在合金凝固过程中未加脉冲电流时, 共晶网连续、发达. 试样边缘部位枝晶网格细小, 中心部位网格大小不均, 不如边部连续. 这是因为铸造时的结晶速度直接影响枝晶网格的大小, 结晶速度越大, 枝晶网格的平均尺寸越小, 合金在凝固时, 靠近模壁处即铸锭的边缘部位温度较低, 散热较快, 结晶速度较大, 所以枝晶网格尺寸较小.

图3为经脉冲电流处理后合金的显微组织, 可以看出, 它们与图2所示的显微组织有显著区别, 聚集在晶界上的共晶组织大大减少, 枝晶网不连续,

在晶内和晶界附近存在弥散的共晶质点.

经脉冲电流处理后枝晶网之所以不连续, 是因为当快速变化的脉冲电流通入导电熔体时, 会在样品中产生快速变化的脉冲磁场, 脉冲电流和脉冲磁场之间的相互作用会在金属熔体中产生电磁力, 该力使金属熔体内产生剧烈的强迫对流, 对流作用降低了熔体中的温度梯度, 使整个熔体的温度趋于均匀, 这样就使得树枝晶的正常生长受到抑制, 生成许多短枝晶, 由于熔体中有强烈的对流存在, 因而在短枝晶周围存在温度起伏和成分起伏, 这可能会使一部分短枝晶熔化, 所以, 这些短枝晶不会交叉成网状.

枝晶网格的大小对铸锭性能影响很大, 特别是对合金元素含量高的合金更明显, 因为它可以直接影响到枝晶间化合物(共晶组织)的大小及分布状态. 枝晶网格越细, 化合物越细小且分布均匀, 铸锭的机械性能越好. 可见脉冲电磁场处理可以改善合金的机械性能.

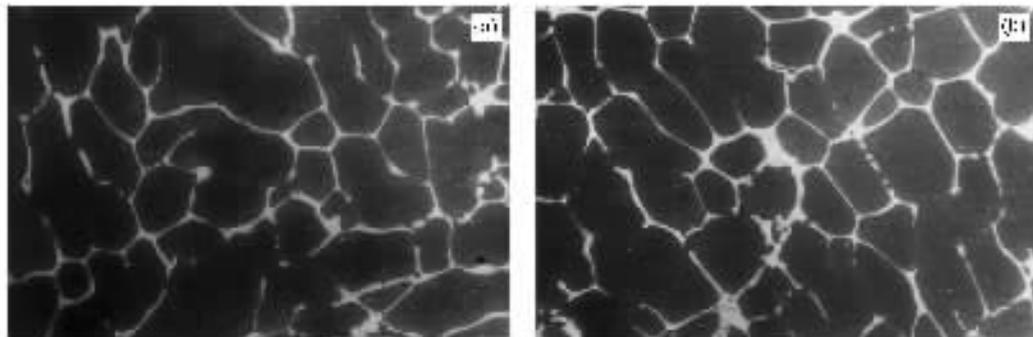


图2 未经电磁场处理的 LY12 合金显微组织 (a) 心部组织 (b) 边部组织

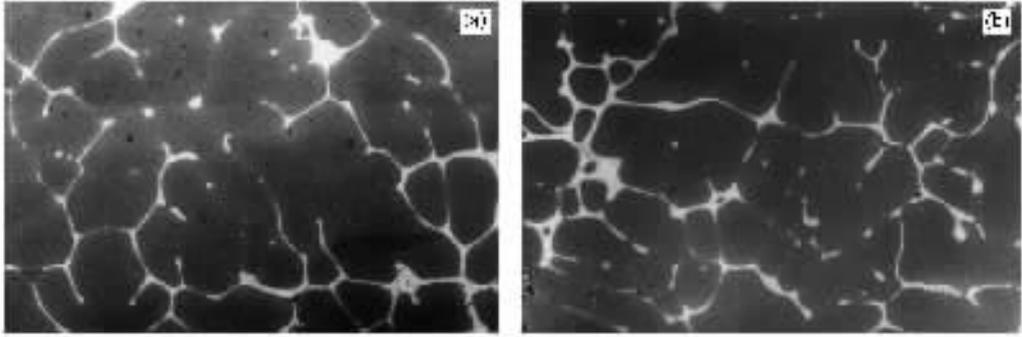


图3 经脉冲电流处理后 LY12 合金的显微组织 (a) 心部组织 (b) 边部组织

### 3.2 脉冲电流对 LY12 合金成分偏析的影响

成分偏析现象是铸态组织中常见的现象,它会对材料的性能产生很大的影响,因此在各种工艺中尽可能地减小成分偏析,把它对材料性能的不良影

响降低到最低限度.众所周知,Cu 的负偏析是 Al-Cu 合金中常见的成分偏析现象. LY12 合金在无脉冲电流作用下以及有脉冲电流作用下的成分分布如表 2 所示.

表 2 LY12 合金在不同凝固条件下的 Cu 元素分布, wt%

凝固条件	中心部位 ( $C_1$ )	过渡部位 ( $C_2$ )	边缘部位 ( $C_3$ )	平均 ( $C_{\text{平}}$ )	$\left  \frac{C_i - C_{\text{平}}}{C_{\text{平}}} \times 100\% \right _{\text{max}}$
无脉冲电流	4.86	4.18	5.12	4.72	11.35
脉冲电流	4.69	4.57	4.76	4.67	2.14

从表 2 可以看出,无脉冲电流作用下,Cu 元素在 LY12 合金中的负偏析特别严重,Cu 元素分布的最大偏差率较大,在脉冲电流作用下,Cu 元素分布

比较均匀,最大偏差率很小,比无电流作用的试样减小了一个数量级,可见脉冲电流对 Cu 在 LY12 中的宏观偏析有明显改善.

表 3 LY12 合金在不同凝固条件下的 Mg 元素分布, wt%

凝固条件	中心部位 ( $C_1$ )	过渡部位 ( $C_2$ )	边缘部位 ( $C_3$ )	平均 ( $C_{\text{平}}$ )	$\left  \frac{C_i - C_{\text{平}}}{C_{\text{平}}} \times 100\% \right _{\text{max}}$
无脉冲电流	1.83	0.63	0.94	1.13	61.69
脉冲电流	1.07	1.22	1.46	1.25	16.80

从表 3 中可以看出,Mg 在 LY12 中的宏观偏析是非常严重的,在脉冲电流作用下,成分偏析得到大大改善,但是,偏析现象仍然比较严重.

影响,从而影响溶质元素的微观偏析或宏观偏析.关于这一问题的深入研究,正在实验室进行中.

柱状晶体的长大以及结晶时体积收缩是造成负偏析的两个主要原因,细小等轴晶带的形成会阻碍单向树枝晶体的扩展,使富集溶质的液体不易排向表层.文献 [9] 和文献 [10] 所做的研究发现在合金凝固过程中对其施加脉冲电流,可以使凝固组织细化、等轴化,因此脉冲电流作用于合金的凝固过程,可改善负偏析现象.

## 4 结 论

1. 脉冲电流使 LY12 合金的析出相的形态发生了变化,由原来的较为粗大连续的枝晶网转变为细小且不连续的结构,并且有球状的共晶组织分布在晶界附近或晶内.

熔融金属是大量带电粒子组成的体系,带电粒子在电磁场作用下存在各种电磁效应.这些效应对溶质原子在试样不同部位的分布可能会产生一定的

2. 施加脉冲电流使 LY12 合金的溶质元素的宏观分布趋于均匀,Cu 元素的负偏析减弱,使 Mg 元素的偏析大大改善.

- [ 1 ] C. Vives , *Metall. Trans.* , **B20**( 1989 ) , 623 .
- [ 2 ] C. Vives , *Mater. Sic. Eng.* , **A173**( 1993 ) , 169 .
- [ 3 ] A. K. Misra , *Metall. Trans.* , **16A**( 1985 ) , 1354 .
- [ 4 ] Y. Wang *et al.* , *Acta Metall. Sin.* , **33**( 2000 ) , 159 ( in Chinese )  
[ 王艳等 , *金属学报* **36**( 2 ) ( 2000 ) , 159 ].
- [ 5 ] S. H. Ge *et al.* , *Acta Physica Sinica* , **50**( 2001 ) , 149 ( in Chinese ) [ 葛世慧等 , *物理学报* **50**( 2001 ) , 149 ].
- [ 6 ] M. Nakada , *ISIJ Inter.* , **30**( 1990 ) , 27 .
- [ 7 ] J. P. Barnak *et al.* , *Scr. Metall. Mater.* , **32**( 1995 ) , 879 .
- [ 8 ] J. M. Li *et al.* , *Scr. Metall. Mater.* , **31**( 1994 ) , 1691 .
- [ 9 ] B. T. Zi *et al.* , *Scr. Mater.* , **43**( 2000 ) , 376 .
- [ 10 ] B. T. Zi *et al.* , *Acta Physica Sinica* , **49**( 2000 ) , 1010 ( in Chinese ) [ 訾炳涛等 , *物理学报* **49**( 2000 ) , 1010 ].

## MICROSTRUCTURES AND DISTRIBUTION OF ALLOYING ELEMENTS OF LY12 Al-ALLOY MODIFIED BY A PULSED CURRENT<sup>\*</sup>

BAN CHUN-YAN BA QI-XIAN CUI JIAN-ZHONG LU GUI-MIN ZI BING-TAO

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

( Received 12 March 2001 ; revised manuscript received 15 April 2001 )

### ABSTRACT

The effect of pulsed current on the microstructures and distribution of alloying elements of LY12 Al alloy during solidification process was studied. The experimental result showed that the microstructures of a LY12 Al alloy was evidently changed by pulsed current treatment , the eutectic structure which aggregated at grain boundary and dendrite net , was greatly reduced. The net became discontinuous , the dispersive and approximately spherical eutectic particles were formed inside the grains and near the boundary. The pulsed current can effectively reduce the segregation of Cu and Mg in the alloy , especially for Cu , and can remarkably improve the negative segregation phenomena of Cu in Al alloy , make Cu element more uniformly distributed in the whole sample.

**Keywords :** LY12 , pulsed current , microstructure , segregation

**PACC :** 8130F , 4765

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Program of Basic Research of China ( Grant No. G1999064905 )