

# 电磁搅拌对半固态 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金初生 $\alpha$ -Al 的影响规律\*

毛卫民 赵爱民 崔成林 钟雪友

(北京科技大学铸造研究所, 北京 100083)

**摘要** 研究了 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金半固态等温电磁搅拌过程和连续降温电磁搅拌合金熔体的温度分布。结果表明: 在电磁搅拌条件及低温度梯度下, 可增加初生  $\alpha$ -Al 形核的位置和数目, 细化一次臂和二次臂间距; 在电磁搅拌条件下, 初生  $\alpha$ -Al 的二次臂根部熔断机制是最重要的非枝晶化和细化机制; 激烈的搅拌均匀了熔体温度场, 减小了成分过冷, 初生  $\alpha$ -Al 生长时的过冷度  $\Delta T$  降低, 也均匀了固液界面前沿的溶质场, 结果使初生  $\alpha$ -Al 一次臂的长大失去方向优先性, 并使一次臂生长速度减慢, 二次臂的长大速度与一次臂的长大速度相近, 使 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金出现蔷薇状初生  $\alpha$ -Al。

**关键词** AlSi<sub>7</sub>Mg 合金, 半固态, 电磁搅拌, 温度场

**中图法分类号** TG146.2, TM924.12

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(1999)09-0971-04

## THE FORMATION MECHANISM OF NON-DENDRITIC PRIMARY $\alpha$ -Al PHASES IN SEMI-SOLID AlSi<sub>7</sub>Mg ALLOY

MAO Weimin, ZHAO Aimin, CUI Chenglin, ZHONG Xueyou

Foundry Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

Correspondent: Mao Weimin, professor, Tel: (010)62332882

Manuscript received 1999-04-27, in revised form 1999-06-25

**ABSTRACT** The processes to make nondendritic semi-solid AlSi<sub>7</sub>Mg alloy by electromagnetic stirring and the temperature field of the melt cooled continuously have been investigated in this paper. It is proposed through experiments that a new kinetic condition of primary  $\alpha$ -Al nucleation in AlSi<sub>7</sub>Mg alloy melt, low temperature, is an important condition for the primary  $\alpha$ -Al refinement and the strongly electromagnetic stirring eliminates the composition cooling of the melt and the preferred growth of the first arms, so that many rose-like or spherical primary  $\alpha$ -Al phases emerge finally.

**KEY WORDS** AlSi<sub>7</sub>Mg alloy, semi-solid, electromagnetic stirring, temperature field

在传统凝固中, AlSi<sub>7</sub>Mg 合金析出的初生  $\alpha$ -Al 为树枝晶, 但在强烈的电磁搅拌下凝固, AlSi<sub>7</sub>Mg 合金析出的初生  $\alpha$ -Al 为球状或蔷薇状, 初生  $\alpha$ -Al 晶粒显著细化。对于机械搅拌组织, Flemings<sup>[1]</sup> 认为: 在搅拌的作用下, 折断的初生枝晶碎块之间以及它们与液体之间发生碰撞、摩擦和冲刷作用, 由于初生枝晶碎块的熟化作用, 初生枝晶碎块逐渐转变为玫瑰花状, 最后转变为球状。Vogel 等认为: 搅拌使初生  $\alpha$ -Al 枝晶的二次臂发生大角度塑性弯曲, 在二次臂根部产生大角度位错晶界, 液相使大角度晶界润湿, 最终使二次臂从初生  $\alpha$ -Al 枝晶一次臂上脱落下来<sup>[2,3]</sup>。但 Hellawell<sup>[4]</sup> 认为: 在 Al-Si 合金的半固态两相区进行机械或电磁搅拌, 不会发生  $\alpha$ -Al 枝晶臂的折断, 塑性弯曲也很

困难, 只可能引起初生  $\alpha$ -Al 二次臂根部的溶质富集和温度起伏加剧, 促使初生  $\alpha$ -Al 二次臂根部的熔断, 但未解释温度起伏加剧的原因。上述观点也未解释搅拌组织不出现粗大一次臂的原因, 本文通过等温电磁搅拌和连续降温电磁搅拌熔体的温度场实验, 研究了电磁搅拌对 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金初生  $\alpha$ -Al 的影响规律。

### 1 实验方法

实验所用 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金成分 (质量分数, %) 为: Si 7, Mg 0.45, Fe $\leq$ 0.2, 其余为 Al。为了考察电磁搅拌条件下初生  $\alpha$ -Al 的演变, 分两组进行等温电磁搅拌实验: I 组是从 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金液相线温度  $T_L$  (约 615  $^{\circ}$ C) 以下 10  $^{\circ}$ C 开始电磁搅拌, 这时合金熔体中已经析出一定量的树枝状初生  $\alpha$ -Al, 通过实验观察初生  $\alpha$ -Al 枝晶的演变过程; II 组是从 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金液相线温度  $T_L$  以上 5  $^{\circ}$ C 开始电磁搅拌, 此时合金熔体中尚未析出初生  $\alpha$ -Al, 在搅拌的同时缓慢降温至预定的固液两相区, 通过实验观察初生  $\alpha$ -Al 非

\* 国家 863 计划资助项目 715-012-004

收到初稿日期: 1999-04-27, 收到修改稿日期: 1999-06-25

作者简介: 毛卫民, 1958 年生, 男, 教授, 博士

枝晶的形核与长大过程。在搅拌中,不断从搅拌室获取直径 12 mm×12 mm 淬火小试样,进行组织观察。为了考察连续冷却搅拌条件下熔体的径向温度场,检测熔体中心和边部附近的温度变化,测温选用 NiCr-NiAl 热电偶,两偶结点位于同一水平面,两偶结点间距约 18 mm,熔体试样尺寸为直径 54 mm×130 mm。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 等温电磁搅拌

搅拌开始温度  $< T_L$  的淬火小试样的获取条件如表 1 所示。当合金熔体温度低于液相线温度  $T_L$  时,液相中就析出发达的初生  $\alpha$ -Al 树枝晶,如图 1a 所示。从 605 °C 开始搅拌,搅拌 47 s 后,熔体接近等温搅拌温度 600 °C,组织中还存在发达的树枝晶,如图 1b 所示。继续等温搅拌至

216 s,树枝状初生  $\alpha$ -Al 消失,出现许多球形和长条形初生  $\alpha$ -Al,如图 1c 所示。随着搅拌时间的进一步延长,球形初生  $\alpha$ -Al 更加圆整,同时也发生粗化和焊合,但长条状的初生  $\alpha$ -Al 变化较慢,即使搅拌 1274 s,组织中仍然存在长条状的初生  $\alpha$ -Al,这些长条状的初生  $\alpha$ -Al 很可能就是二次臂熔断后的一次臂,如图 1d 所示。

搅拌开始温度  $> T_L$  的淬火小试样的获取条件如表 2 所示。当 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金熔体在液相线温度  $T_L$  以上开始搅拌时,合金熔体边搅拌边降温,一旦合金熔体温度低于  $T_L$ ,熔体中就会析出细小的初生  $\alpha$ -Al 晶体,这时的初生  $\alpha$ -Al 晶体仍属蔷薇状枝晶,但没有粗大的一次臂,如图 2a 所示。继续搅拌,蔷薇状初生  $\alpha$ -Al 发生很大变化,二次臂纷纷脱落下来,形成了大量不太圆整的粒状初生  $\alpha$ -Al,如图 2b 所示。进一步搅拌,初生  $\alpha$ -Al 的二次臂继续脱落,粒状初生

表 1 I 组半固态等温搅拌淬火小试样的获取条件

Table 1 Temperature and stirring time of the small samples quenched in water for the group I isothermal stirring

Sample No.	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7
Sampling temperature, °C	613	605	605	601	600	599	601
Stirring time, s	0	0	5	47	92	216	1274

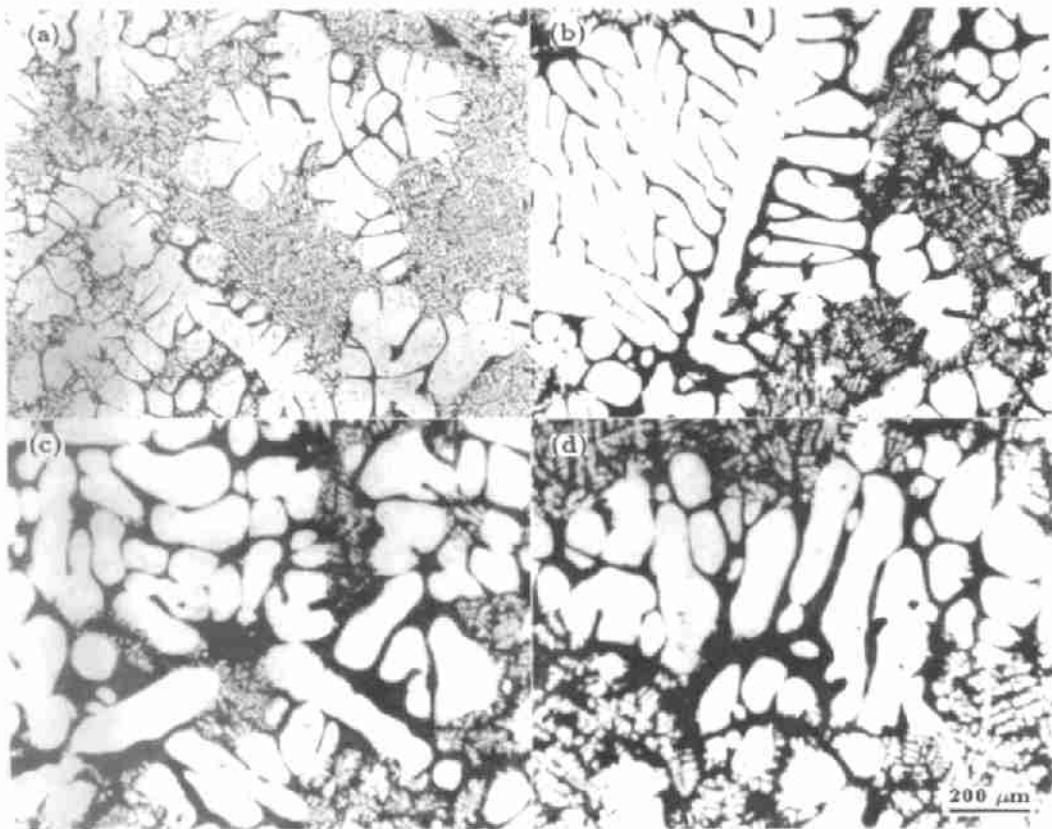


图 1 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金 I 组半固态等温搅拌试样显微组织

Fig.1 Microstructures of AlSi<sub>7</sub>Mg alloy samples of group I stirred by electromagnetic field from 605 °C to 600 °C and then kept isothermally for 0 s (a), 47 s (b), 216 s (c) and 1274 s (d)

$\alpha$ -Al 不断发生圆整化和粗化, 一些脱落的粒状初生  $\alpha$ -Al 同时又发生焊合, 如图 2c,d 所示。

## 2.2 连续降温电磁搅拌熔体径向温度场

连续冷却电磁搅拌和未电磁搅拌的 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金熔体心部和边部附近的温度变化见表 3,  $T_1$  代表熔体中心偶的温度,  $T_2$  代表熔体边部偶的温度。

由表 3 看, 未进行电磁搅拌合金熔体的中心电偶温度均

比边部电偶温度高, 一般约高 4—5 °C。当析出初生  $\alpha$ -Al 时, 这一温度差有所减小, 但不低于 3 °C。在电磁搅拌下, 试样中心热电偶温度比边缘热电偶温度略高一点, 或相互一致, 这一现象一直持续到试样熔体温度下降到某一数值, 这个温度值约为 598—600 °C, 随后两热电偶的温度差又逐渐变大。若搅拌速率高一些, 两偶的温度差也相应小一些<sup>[5]</sup>, 所以在一定的温度区间, 电磁搅拌使熔体径向温度梯度变得

表 2 II 组半固态等温搅拌淬火小试样的获取条件

Table 2 Temperature and stirring time of the small samples quenched in water for the group II isothermal stirring

Simple No.	II-1	II-2	II-3	II-4	II-5	II-6	II-7
Sampling temperature, °C	614	610	607	605	600	600	600
Stirring time, s	5	129	217	295	475	675	964

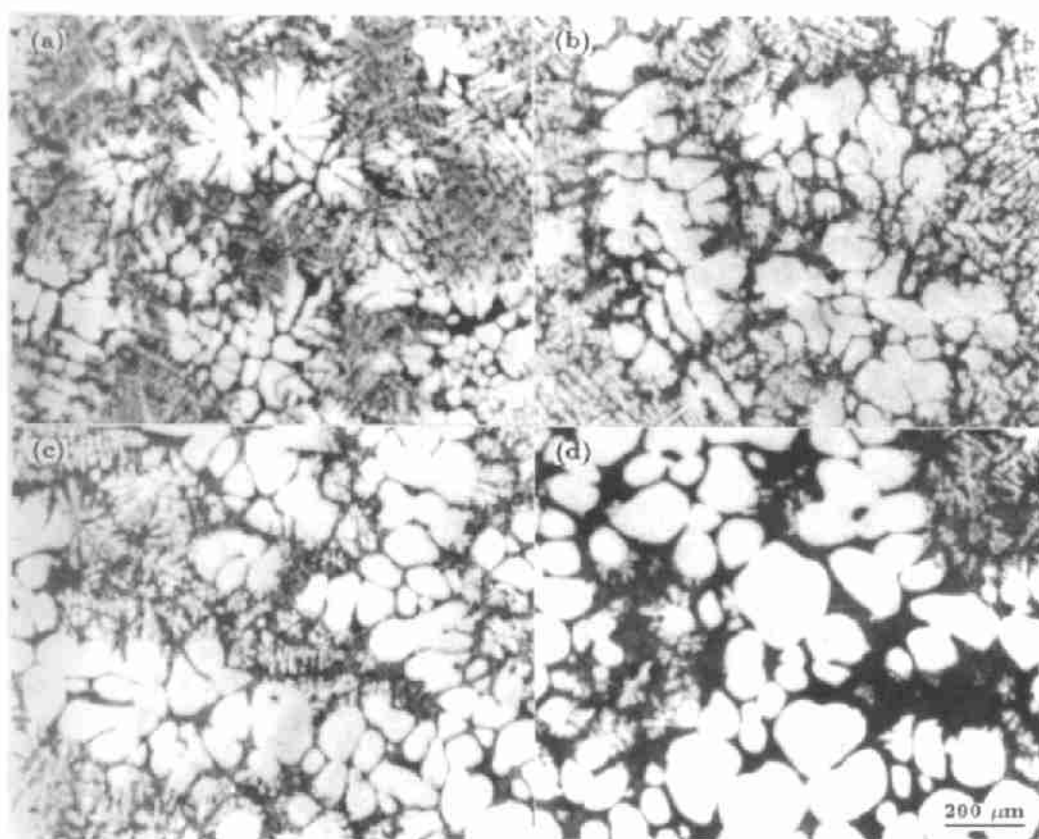


图 2 AlSi<sub>7</sub>Mg 合金 II 组半固态等温搅拌试样显微组织

Fig.2 Microstructures of AlSi<sub>7</sub>Mg alloy samples of group II stirred by electromagnetic field from 620 °C to 600 °C and then kept isothermally for 5 s (a), 129 s (b), 295 s (c) and 964 s (d)

表 3 搅拌和未搅拌合金熔体的温度分布

Table 3 Temperature variation of the melt unstirred and stirred by electromagnetic field

Time	$t, s$	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204	216
Unstirring	$T_1, ^\circ\text{C}$	633	629	623	619	614	609	606	606	606.5	607	607	607	607	606	604.5
	$T_2, ^\circ\text{C}$	629	624	619	614	609	605	603	603	603.5	604	603.5	603	602	601	600
Stirring	$T_1, ^\circ\text{C}$	621	616	611	609	608	607	606	605	603	601.5	600.5	600	600	599	597.5
	$T_2, ^\circ\text{C}$	621	616	611	609	608	607	606	605	603	601.5	600.5	600	600	598.5	597

Note:  $T_1$  and  $T_2$  represent respectively the temperatures of the center and periphery thermocouples in the melt

很小。

### 2.3 电磁搅拌条件下初生 $\alpha$ -Al 的形核和长大

Flemings, Vogel, Hellowell 等学者的研究工作均未探讨搅拌对初生晶一次臂的影响。本实验表明: 激烈的电磁搅拌创造了一个新的形核动力学条件, 即低温度梯度。当熔体温度降至液相线温度以下时, 由于低温度梯度现象, 整个熔体温度均低于液相线温度, 初生  $\alpha$ -Al 可在整个熔体区域生核, 增加了初生  $\alpha$ -Al 同时形核的位置, 而非传统凝固方式的由外及里的发展, 这可能是电磁搅拌细化初生  $\alpha$ -Al 的重要原因。过冷度减小使初生  $\alpha$ -Al 一次臂的长大失去方向优先性, 大大减慢了一次臂的生长速率。二次臂长大的速率与一次臂的长大速率接近, 所以组织中出现了许多蔷薇状的初生  $\alpha$ -Al, 如图 2a 所示。

在  $\text{AlSi}_7\text{Mg}$  合金的电磁搅拌组织中还出现许多球状或粒状的初生  $\alpha$ -Al, Flemings 认为这是二次枝晶臂折断碎块演化的结果; Vogel 等学者认为: 剪切不会使二次枝晶臂立即折断, 剪切使初生  $\alpha$ -Al 枝晶二次臂发生塑性弯曲, 弯曲使枝晶臂根部产生附加位错群, 这些位错经过回复再结晶或迁移形成晶界; 若枝晶根部的晶界大于  $20^\circ$ , 该晶界所具有的能量  $\sigma_{\text{gb}}$  比固液界面能量  $\sigma_{\text{s-l}}$  的二倍还要大; 如果这种高能量晶界在枝晶臂中形成并与液相接触, 晶界就会逐渐被液体薄膜所取代, 枝晶臂便最终从初生  $\alpha$ -Al 的一次臂上脱落下来<sup>[2,3]</sup>; Hellowell 也认为搅拌不会折断二次枝晶臂, 甚至发生二次臂的塑性弯曲都不可能, 搅拌会使熔体产生强烈的温度起伏, 引起二次臂根部的熔断。本文作者认为电磁搅拌组织中出现许多球状或粒状的初生  $\alpha$ -Al 主要是二次臂根部熔断的结果, 主要依据如下:

(1) Pilling 在假定初生  $\alpha$ -Al 枝晶一次臂远大于二次、二次臂存在缩颈、熔体流动方向与二次臂垂直、作用力均匀分布在二次臂上和枝晶不会发生转动的条件下, 得出二次臂根部所受应力的方程式<sup>[6]</sup>。再参照图 1a,b 中的枝晶, 二次臂缩颈处的直径约为  $30\ \mu\text{m}$ 、长度约为  $100\ \mu\text{m}$ ; 固液相 (固相率为  $0.2 - 0.3$ ) 粘度  $\eta=0.25\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ <sup>[1]</sup>, 假定以纯铝在熔点时的屈服强度作为  $\text{AlSi}_7\text{Mg}$  合金在固液两相区初生  $\alpha$ -Al 的屈服强度, 且为  $6.5\ \text{MPa}$ <sup>[6]</sup>。计算表明: 当合金液体相对于初生  $\alpha$ -Al 的运动速度为:  $1.46\ \text{m/s}$  时, 假定的初生  $\alpha$ -Al 枝晶二次臂才可能塑性弯曲。在电磁搅拌过程中, 初生  $\alpha$ -Al 与熔体的相对运动速率很难达到  $1.46\ \text{m/s}$ , 所以初生  $\alpha$ -Al 枝晶的二次臂不可能发生塑性弯曲, 更不可能发生断裂。(2) 从图 1a,b 看, 呈排分布的二次臂间距很小, 即使其中一个二次臂能发生弯曲, 其弯曲角度只有几度, 根本达不到  $20^\circ$  以上的大角度, 所以 Vogel 模型的假设条件难以成立, Flemings 的枝晶折断假设更难成立。(3) 如果二次枝晶臂能够被搅拌折断或弯曲, 那么在极短的时间内就能使所有的二次臂折断分离或弯曲, 但试验结果否定了

这种可能性。(4) 在连续冷却的水平旋转电磁搅拌中, 熔体主要水平旋转流动, 但同时存在一种附加流动, 即熔体和蔷薇状初生  $\alpha$ -Al 一会进入较冷的边缘区域, 一会又进入较热的坯料中心区域, 造成蔷薇状小枝晶强烈的忽冷忽热或温度起伏, 而且初生  $\alpha$ -Al 枝晶二次臂根部的溶质富集仍很严重<sup>[5]</sup>, 所以二次臂根部熔断的条件很充分, 从而造成二次臂根部的大量熔断, 组织中出现大量球状或粒状初生  $\alpha$ -Al, 进一步细化了初生  $\alpha$ -Al。

图 1 和图 2 试样的熔体大部分时间处于等温搅拌中, 但其前期 (二次臂根部大量熔断的时期) 是处于缓慢降温搅拌中, 所以二次臂熔断的温度起伏加剧是存在的。图 1 组织说明: 在  $T_L$  以下某温度开始搅拌, 由于初生  $\alpha$ -Al 枝晶已较发达, 二次臂比较粗大, 为了能熔断分离二次臂, 需要更多次的温度起伏, 所以需要较长的搅拌时间。图 2 组织说明: 在  $T_L$  以上开始搅拌, 初生  $\alpha$ -Al 为细小的蔷薇状枝晶, 在二次臂较小时就开始熔断, 熔断二次臂所需的搅拌时间较短, 较容易得到粒状组织, 这也说明二次臂根部熔断是一个重要的非枝晶化和细化机制。

在电磁搅拌过程中, 除了初生  $\alpha$ -Al 二次臂根部熔断和一次臂细化现象外, 初生  $\alpha$ -Al 与合金液体、或与初生  $\alpha$ -Al 发生强烈的碰撞、摩擦, 最终使初生  $\alpha$ -Al 端部变得很圆整, 而且电磁搅拌越激烈, 时间越长, 初生  $\alpha$ -Al 的形貌越圆整。

### 3 结论

(1) 在  $T_L$  以下  $10\ ^\circ\text{C}$  开始搅拌, 二次臂熔断所需搅拌时间较长, 一次臂难以球化; 在  $T_L$  以上  $5\ ^\circ\text{C}$  开始搅拌, 不会析出粗大的枝晶, 二次臂熔断容易。

(2) 在电磁搅拌下, 合金熔体的径向温度梯度很小。

(3) 低温度梯度是电磁搅拌初生  $\alpha$ -Al 形核的新动力学条件。

(4) 电磁搅拌促使了初生  $\alpha$ -Al 二次臂的熔断和一次臂的细化。

### 参考文献

- [1] Flemings M C. *Metall Trans*, 1991; 22A:957
- [2] Vogel A, Doherty R D, Cantor B. *Proceeding of International Conference on Solidification*. London: University of Sheffield, 1979: 518
- [3] Doherty R D, Lee H I, Feest E A. *Mater Sci Eng*, 1984; 65: 181
- [4] Hellowell A. In: Kirkwood D H, Kapranos P eds., *Proceeding the 4th Intenational Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Compositions*. Sheffield, 1996: 60
- [5] Mao W M. *Ph D Thesis*, University of Science and Technology Beijing, 1999  
(毛卫民, 北京科技大学博士学位论文, 1999)
- [6] Pilling J, Hellowell A. *Metall Mater Trans*, 1996; 27A: 229