

## 电磁搅拌对过共晶 Al-Si 合金初生 Si 分布的影响\*

毛卫民<sup>1)</sup> 李树索<sup>1,2)</sup> 赵爱民<sup>1)</sup> 崔成林<sup>1)</sup> 钟雪友<sup>1)</sup>

1) 北京科技大学铸造研究所, 北京 100083

2) 北京航空材料研究院, 北京 100095

**摘要** 系统研究了电磁搅拌下过共晶 Al-Si 合金初生 Si 的偏析规律。实验表明, 虽然电磁搅拌引起过共晶 Al-Si 合金中初生 Si 的显著细化和圆整化, 但常会使坯料表面出现初生 Si 偏析层, 合金中 Si 含量越大, 初生 Si 偏析层越厚; 提高电磁搅拌功率、降低合金熔体冷却速度都会减小或消除初生 Si 偏析层; 在电磁搅拌条件下, 坯料表面产生初生 Si 偏析层的主要原因是固-液界面处的温度梯度过大和存在一层流附面层。

**关键词** 电磁搅拌, 过共晶 Al-Si 合金, 初生 Si, 偏析

**中图分类号** TG146.2

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2001)07-0781-04

## EFFECT OF ELECTROMAGNETIC STIRRING ON THE DISTRIBUTION OF PRIMARY SILICON IN HYPEREUTECTIC Al-Si ALLOYS

MAO Weimin<sup>1)</sup>, LI Shusuo<sup>1,2)</sup>, ZHAO Aimin<sup>1)</sup>, CUI Chenglin<sup>1)</sup>, ZHONG Xueyou<sup>1)</sup>

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

2) Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095

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

Manuscript received 2000-11-15, in revised form 2001-03-19

**ABSTRACT** The segregation of primary silicon crystals in solidifying hypereutectic Al-Si alloys stirred by electromagnetic field has been studied systematically. The primary silicon segregation layer often exists near by the billet inner surface, although electromagnetic stirring can fine primary silicon crystals and modify their shape, and the more the amount of silicon content in alloys, the thicker the segregation layer. If the electromagnetic stirring power is increased and the cooling rate of the melt is decreased, the primary silicon segregation layer can become thinner or disappear. The main reasons about emergence of the primary silicon segregation layer is that the temperature gradient between the liquid and solid surface is too large and a lamellar flow area exists near the mould wall.

**KEY WORDS** electromagnetic stirring, hypereutectic Al-Si alloy, primary silicon crystal, segregation

过共晶 Al-Si 合金的常规凝固组织是由初生 Si 和 ( $\alpha$ -Al+Si) 共晶体组成, 初生 Si 一般呈粗大的板片状、多角形块状或花瓣星状。随着 Si 含量的提高, 板片状所占的比例也越来越高, 初生 Si 变得十分粗大, 这显著地降低了过共晶 Al-Si 合金的力学性能和切削加工性能。因此, 改善初生 Si 的形貌、减小初生 Si 的尺寸, 是提高过共晶 Al-Si 合金力学性能和改善其切削加工性能的重要途径。细化初生 Si 的方法有变质处理<sup>[1]</sup>与快速凝固<sup>[2]</sup>,

但变质处理只在较低的 Si 含量范围内有效, 而快速凝固的成本较高。近年来, 一些学者将半固态加工技术应用到过共晶 Al-Si 合金中, 如文献 [3, 4] 采用机械搅拌细化和改善初生 Si 的尺寸和形貌, 李树索等人<sup>[5]</sup> 尝试利用电磁搅拌技术改善和减小了过共晶 Al-Si 合金初生 Si 的形貌和尺寸, 但发现初生 Si 在坯料表面有偏析现象。与初生 Si 的大小一样, 初生 Si 的分布对过共晶 Al-Si 合金的性能也有重要影响。本文系统研究了电磁搅拌下过共晶 Al-Si 合金初生 Si 的偏析规律。

### 1 实验方法

用 ZL104(其质量分数 (%) 为: Si 9.9, Mg 0.28, Mn 0.25) 和结晶硅配制 Al-18%Si, Al-21%Si, Al-24%Si,

\* 国家自然科学基金资助项目 59771011

收到初稿日期: 2000-11-15, 收到修改稿日期: 2001-03-19

作者简介: 毛卫民, 男, 1958 年生, 教授, 博士

Al-27%Si, Al-30%Si 和 Al-40%Si(均为质量分数) 实验合金. 将实验合金在坩埚电阻炉内熔化, 当合金液过热到 100 °C 时, 将其浇入电磁搅拌器中的石墨铸型内立即搅拌至搅不动为止, 再将石墨铸型淬入水中, 以固定合金熔体高温时的组织, 并测定距过共晶 Al-Si 合金坯料上下各 20 mm 处的初生 Si 的偏析层厚度, 取其平均值作为初生 Si 的偏析层厚度.

在电磁搅拌实验中, 探讨了不同搅拌功率、不同搅拌时间和不同冷却速度对过共晶 Al-Si 合金初生 Si 在坯料表面偏析厚度的影响规律. 为了进行对比分析, 浇注一个 Al-24%Si 合金的石墨型试样.

电磁搅拌实验中过共晶 Al-Si 坯料的尺寸为直径 60 mm×170 mm. 从坯料中切取 10 mm 厚的圆片, 再从这一圆片上切取一扇形试样作为金相组织观察试样, 组织观察在 Neophoto 21 型光学显微镜下进行.

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 搅拌功率对初生 Si 偏析的影响

在石墨型铸造条件下, 过共晶 Al-24%Si 实验合金的显微组织由初生 Si 和共晶体组成, 绝大部分初生 Si 呈粗

大的板片状, 少量初生 Si 呈多角块状且分布均匀, 如图 1a 所示. 若在过共晶 Al-Si 合金凝固过程中对其施加强烈的电磁搅拌, 坯料内部初生 Si 明显细化, 且大部初生 Si 的尖角已圆钝呈球团状或块状, 只有个别初生 Si 呈短片状(图 1b). 但在初生 Si 细化和球团化的同时, 合金坯料表面出现初生 Si 的偏析层, 层内 Si 含量高达 80% 以上, 偏析层的厚度可达毫米级, 如图 1c 所示(图中左侧为偏析层表层, 右侧为其内层). 在初生 Si 的偏析层中, 最外层的初生 Si 较细小, 如图 1c 中 A 处, 而内层的初生 Si 粗大得多, 比坯料内部的初生 Si 还要大, 如图 1c 中 B 处. 初生 Si 偏析层与组织均匀的坯料内部收缩性不同, 它们之间易出现裂纹, 如图 1d 所示.

实验表明, 电磁搅拌功率和 Si 含量对初生 Si 偏析层厚度有明显的影响, 如图 2 所示. 在搅拌功率一定时, Si 含量越高, 初生 Si 偏析层的厚度越大. 在搅拌功率较低时, 这一趋势更明显. 如当 Si 含量为 40% 时, 偏析层的厚度可达 10 mm. 在搅拌功率为零或很低时, 熔体没有或几乎没有被搅动, 所以没有产生初生 Si 偏析层; 而一旦出现明显的搅拌, 坯料便会会出现较厚的初生 Si 偏析层, 但随着搅拌功率的增加, 初生 Si 偏析层又逐渐减薄.

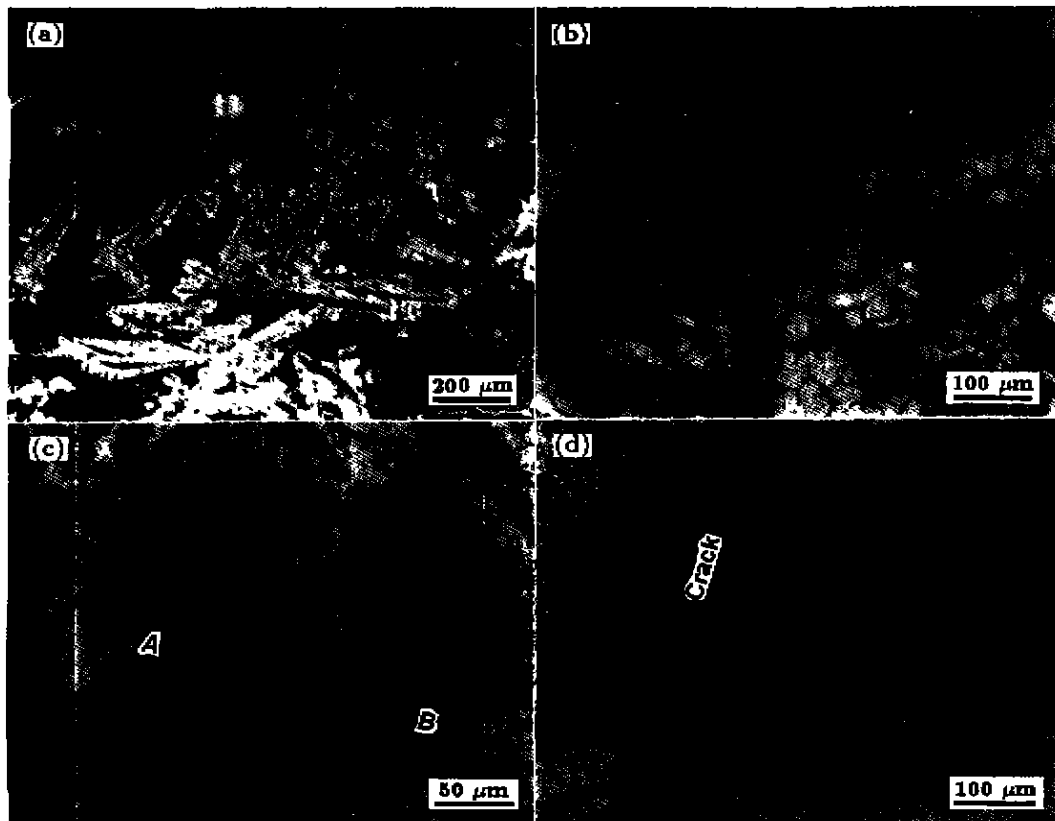


图 1 Al-24%Si 过共晶合金的显微组织

Fig.1 Microstructures of hypereutectic Al-24%Si alloy

(a) traditional graphite casting (b) stirred by electromagnetic field

(c) primary silicon segregation layer (d) crack between primary silicon segregation layer and inner matrix

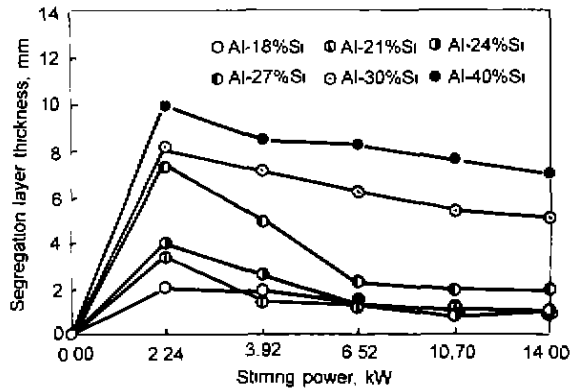


图2 电磁搅拌功率与初生 Si 偏析层厚度的关系

Fig.2 Relation between stirring power and thickness of primary silicon segregation layer

## 2.2 搅拌时间对初生 Si 偏析的影响

搅拌时间是指合金熔体在电磁力作用下处于固-液两相区的实际搅拌时间。本实验考察了搅拌时间对 Al-24%Si 合金初生 Si 偏析的影响(图 3)。从图可见,初生 Si 偏析层在搅拌初期很短时间内即已形成;搅拌时间进一步延长,初生 Si 偏析层的厚度基本不变。其它成分的过共晶 Al-Si 合金亦有类似规律。

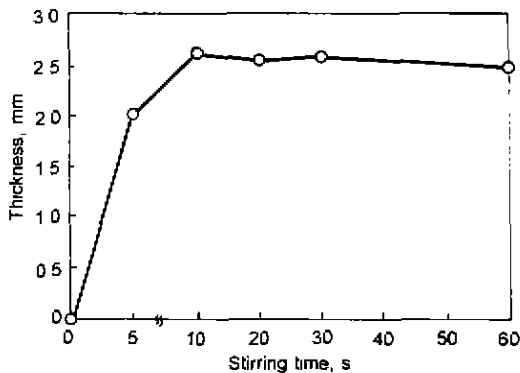


图3 搅拌时间对 Al-24%Si 合金初生 Si 偏析层厚度的影响

Fig.3 Effect of stirring time on the thickness of primary silicon segregation layer of Al-24%Si alloy

## 2.3 冷却速度对初生 Si 偏析的影响

过共晶 Al-Si 合金熔体在凝固时的冷却速度对初生 Si 偏析层的厚度也有明显影响。Al-24%Si 合金初生 Si 偏析层厚度与冷却速度的关系如下:当冷却速度为 0.083, 0.17, 0.33, 0.74 和 1.43  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,富 Si 层的厚度分别为: 0, 0, 0.5, 1.7 和 2.6 mm。随着冷却速度的增加,初生 Si 偏析层厚度不断增加;随着冷却速度的降低,初生 Si 偏析层厚度不断减小甚至消失。但当合金的 Si 含量达到 40% 以上时,即使降低合金熔体凝固时的冷却速度,坯料的初生 Si 偏析层也无法完全消除。

## 2.4 初生 Si 偏析层产生的机理分析

由本工作的实验结果可知,在过共晶 Al-Si 合金的凝固过程中,如果不对合金熔体进行电磁搅拌,就不会产生初生 Si 表面偏析,只是初生 Si 的尺寸较粗大且形貌呈板片状。只要对凝固过程中的过共晶 Al-Si 合金熔体进行电磁搅拌,在坯料表面就会产生厚度不同的初生 Si 偏析层。搅拌功率越大,初生 Si 偏析层厚度越小;当合金熔体的冷却速度较低时,初生 Si 偏析层就会减薄或消失;一旦初生 Si 偏析层形成,即使延长搅拌时间,初生 Si 偏析层的厚度变化不大。这些结果都说明初生 Si 偏析层与电磁搅拌和传热的凝固动力学条件有关。

在常规非电磁搅拌条件下,浇入石墨铸型的过共晶 Al-Si 合金熔体在铸型表面受到激冷作用,析出细小的初生 Si,而铸型内部的熔体尚处在液态之中。随着熔体内部向外逐渐传热,熔体内部也逐次进入凝固,析出初生 Si。由于凝固过程中的自然对流很微弱,初生 Si 不会出现明显的内外偏析。当进行电磁搅拌时,熔体凝固的热力学条件不会产生大的变化,但动力学条件发生了很大的变化。与常规非电磁搅拌凝固一样,合金熔体在铸型表面会析出一薄层细小的初生 Si,但由于激烈的电磁搅拌使合金熔体产生了两个区域,即最外层的很薄的层流附面层和内部的大范围的紊流流动区。在搅拌下,熔体产生了快速水平旋转(本实验为水平电磁搅拌),熔体上端产生很深的液穴,同时熔体先沿着四周的固-液界面向上流动,再沿着自由表面向熔体内部流动。熔体的这种流动作用产生了两个基本现象:一是均匀了熔体的温度场,使熔体各处几乎同时进入凝固<sup>[6]</sup>,析出初生 Si;二是将内部各处析出的初生 Si 不断带入固-液界面处的层流附面层,也不断将初生 Si 从固-液界面处的层流附面层带回熔体内部。正是这两个基本作用引起过共晶 Al-Si 合金坯料表面产生初生 Si 的偏析层。如果搅拌功率增大,熔体的运动速度增大,Reynold 数  $Re$  变大,减小了固-液界面处的层流附面层的厚度,减弱了初生 Si 在坯料表面的粘着偏析;如果降低冷却速度,则减小了铸型表面处的温度梯度,提高了表面附面层处熔体的温度,降低了熔体的表现粘度,提高了 Reynold 数  $Re$ ,减小或消除了固-液界面处的层流附面层,减弱或消除了初生 Si 在坯料表面的粘着偏析;一旦形成了初生 Si 的偏析层,该偏析层的导热系数较低,传热速度迅速下降,提高了表面附面层处熔体的温度,降低了熔体的表现粘度,提高了 Reynold 数  $Re$ ,初生 Si 的粘着偏析将基本停止,而且由于初生 Si 之间的结合力较大,尚未发现电磁搅拌能将粘着偏析的初生 Si 再剥离下来。

综合上述实验结果和分析,初生 Si 偏析层形成的物理模型如下:

(1) 当过共晶 Al-Si 合金液浇入铸型后,在铸型表面

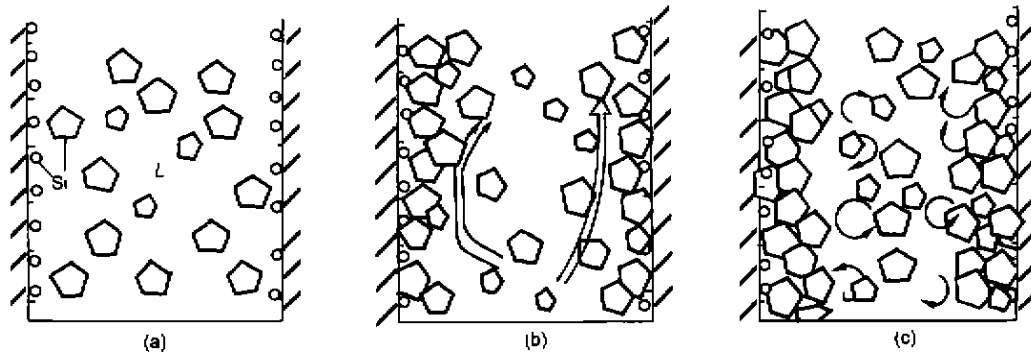


图4 初生 Si 偏析层形成的物理模型

Fig.4 Formation model of primary silicon segregation layer

(a) early solidification stage (b) formation of primary Si segregation layer  
(c) later solidification stage with constant primary Si segregation layer

立即出现一激冷层, 形成细小的初生 Si, 如图 1c 中 A 处; 同时, 在电磁搅拌作用下, 合金熔体内部温度迅速降至液相线温度以下, 熔体内部析出一定数量和一定尺寸的初生 Si 颗粒, 如图 4a 所示。

(2) 在搅拌初期, 铸型表面存在一个层流附面层, 由于铸型激冷, 铸型内表面处合金熔体温度梯度很大、流动速度较低, 内部初生 Si 颗粒在熔体流动的作用下被带到铸型的表面, 一部分被吸附并停留在层流附面层内, 与已在此处固定不动的初生 Si 合并长大, 如此反复便形成初生 Si 的偏析层, 如图 4b 所示。

(3) 当初生 Si 偏析层形成以后, 此处的温度梯度大为降低, 附面层内熔体的粘度下降, 使熔体的 Reynolds 数达到临界值  $Re_c$ , 附面层内熔体的流动由层流变为紊流, 初生 Si 颗粒在表面吸附的条件不再成立, 初生 Si 偏析层的厚度不再变化, 如图 4c 所示。

(4) 加大电磁搅拌功率, 会增强合金熔体的流动和减弱层流附面层, 最终减小初生 Si 偏析层的厚度; 降低合金熔体冷却速度, 会降低层流附面层处熔体的温度梯度, 提高了表面附面层处熔体的温度, 降低了熔体的表现粘度, 提高了 Reynolds 数  $Re$ , 减小或消除初生 Si 偏析层; 初生 Si 偏析层一旦形成, 固-液界面处的温度梯度大为降低, 消除了初生 Si 表面吸附的条件, 即使延长搅拌时间, 初生 Si 偏析层的厚度也不再发生大的变化。

### 3 结论

(1) 在本实验条件下, 电磁搅拌引起过共晶 Al-Si 合金中初生 Si 的显著细化和圆整化, 但同时会引起坯料表

面出现初生 Si 偏析层。

(2) 提高电磁搅拌功率及降低合金熔体冷却速度, 都会减小或消除初生 Si 偏析层。

(3) 在电磁搅拌条件下, 坯料表面产生初生 Si 偏析层的主要原因是: 固-液界面处的温度梯度过大和存在一个层流附面层, 采取消除或减弱这些原因的措施均可以减小或消除电磁搅拌过共晶 Al-Si 合金中的初生 Si 偏析层。

### 参考文献

- [1] Gui M C, Song G S, Jia J, Li Q C. *Acta Metall Sin.* 1995; 31: A177  
(桂满昌, 宋广生, 贾军, 李庆春. 金属学报, 1995, 31: A177)
- [2] Yuan X G, Xu D M, Zhang S Y, Li Q C. *Act Metall Sin.* 1997; 33: 248  
(袁晓光, 徐达鸣, 张淑英, 李庆春. 金属学报, 1997; 33: 248)
- [3] Ryoo Y H, Kim I J, Kim D H. In: Kirkwood D H, Kapranos P eds, *Proc 4th Int Conf on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Sheffield, UK: The Department of Engineering Materials, University of Sheffield, 1996: 66
- [4] Diewwanit I, Flemings M C. In: Kirkwood D H, Kapranos P eds., *Proc 4th Int Conf on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Sheffield, UK: The Department of Engineering Materials, University of Sheffield, 1996: 30
- [5] Li S S, Wang D R, Mao W M, Zhong X Y. *Spec Cast Non-ferrous Alloys*, 1998; (Suppl.): 1  
(李树素, 王德仁, 毛卫民, 钟雪友. 特种铸造及有色合金, 1998; (增刊): 1)
- [6] Mao W M, Zhao A M, Zhong X Y. *Acta Metall Sin.* 1999; 35: 971  
(毛卫民, 赵爱民, 钟雪友. 金属学报, 1999; 35: 971)