

电磁搅拌处理 Al-Si 合金晶粒组织细化的机理分析

张雪峰¹, 李林风¹, 麻永林¹, 苍大强²

(1 内蒙古科技大学理学院, 包头 014010; 2 北京科技大学生态科学与工程系, 北京 100083)

摘要 利用真空感应炉对铝硅合金在感应加热熔化的同时进行电磁搅拌处理, 试验表明: 电磁搅拌能够改变正常的铝硅合金凝固行为。从形核动力学的基本原理出发, 对其细化机理进行了分析讨论, 认为 α -Al 相细化和球团化的主要原因是: 电磁搅拌后由于磁吉布斯自由能的存在, 使晶核半径变小, α -Al 相得到了明显细化。

关键词 电磁搅拌 形核 磁吉布斯自由能

Analysis of the Mechanism of Grain Refinement of Al-Si Alloys under Magnetic Field

ZHANG Xuefeng¹, LI Linfeng¹, MA Yonglin¹, CANG Daqiang²

(1 Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010; 2 Department of Ecological Science and Engineering, Beijing Science and Technology University, Beijing 100083)

Abstract Al-Si alloy is melted by using vacuum induction melting furnace heated with medium-frequency induction and stirred simultaneously. Test show that Electromagnetic stirring can change the behavior of solidification in gear to Al-Si alloys. Based on the basic principles of nucleation, the mechanism of Grain refinement are discussed with respect to the theoretical analysis. The main reason for the refining and nodulizing of primary α -Al phase are: due to the existence of magnetic Gibbs free energy, the nucleus radius became smaller and α -Al phase was refined obviously after electromagnetic stirring.

Key words electromagnetic stirring, nucleation, magnetic Gibbs free energy

Al-Si 合金由于耐高温、耐磨、硬度高的特性, 应用较为广泛。一般情况下, 合金中的主要相包括初生硅、共晶硅及枝晶 α -Al 相等, 各相的细化程度和分布情况是影响铸造合金力学性能的主要因素。常用的改善方法包括电磁搅拌、电脉冲处理以及稀土元素变质处理等, 其中电磁搅拌具有搅拌力强、易实现金属液三维流动以及搅拌过程中与金属液不接触等优点而得到广泛研究。电磁搅拌是利用外加电磁场与金属熔体之间的相互作用来驱动金属液流动的一种材料处理工艺。在传统凝固条件下, 合金 α -Al 相的显微结构一般为枝晶, 经电磁搅拌处理后合金显微结构发生了细化和圆整化, 而且该技术具有环境友好、操作简便等优点, 因此它一直受到材料界的关注。但对其机理的分析, 相关文献对此问题讨论较少, 本文从形核动力学角度分析其细化机理。

1 电磁搅拌对初生 α -Al 相的影响

1.1 试验条件以及结果

试验所用的材料为 ZL102Al-Si 合金(其中 Si 占 10.0%~13.0%, 其余为 Al)。放入石墨坩锅中于 2G-0.01 型真空感应炉中熔化搅拌; 其中搅拌频率为 4000Hz, 功率为 10kW, 搅拌时间为 30min, 实验结束后样品在室温状态下自然冷却。切取金相试样, 经过粗磨、细磨和抛光, 再经过 0.5%HF 浸蚀, 在金相显微镜(ZEISS AXIOVERT LEICA)下观察微观组织。

2 金相分析

图 1(a)是未加外磁场时的金相显微组织, 图 1(b)为电磁

搅拌后的显微组织。黑色区域为初生硅, 白色区域为 α -Al 相, 其余为共晶组织。由图可以发现, 没有加磁场时, α -Al 相成片状和枝晶状, 而且分布也不均匀。加入磁场后, α -Al 相有了明显变化, 枝晶被打断, 组织变得细化, 而且也比较均匀。

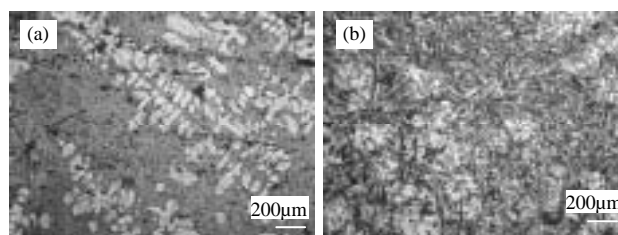


图 1 Al-Si 合金金相组织

通过对合金熔体受力分析发现, Al-Si 合金熔体的运动是熔体表面附近层受 Lorentz 力向上运动升到一定温度后, 在重力的作用下又向下流动到合金液的中心, 从而引起 Al-Si 合金熔体的轴向流动, 此外还有旋转运动, 因此可以设想液态或凝固前期的 Al-Si 合金熔体的轴向温度差也会很小, 即外加磁场使得熔体存在能量涨落和结构涨落^[1,2], 从而创造了一个新的形核动力学条件^[3]。初生 α -Al 相几乎可以在整个熔体区域生核, 增加了初生 α -Al 相的形核数目和位置, 由于形核数目和位置的增多, 将有利于形成等轴的或蔷薇状的初生 α -Al 相, 而不会出现一次臂很长的初生 α -Al 枝晶^[4], 这是磁场作用下细化初生 α -Al 相的重要原因, 也促使了进一步演变为球状的重要基础^[5]。其次, 强制对流降低了熔体温度梯度和晶核界面处的成分过冷, 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。

3 晶粒形核的热力学分析

在液态金属凝固结晶形核的过程中，无规则的过冷液态金属将聚集形成晶胚，此时部分原子有转变为规则排列的固态原子的倾向，将引起过冷液体总自由能 ΔG 的降低。同时晶胚的出现将建立一个液、固界面，由于表面原子处于高能状态而产生新的表面自由能，使过冷液体的总体自由能增加。如果过冷液体中晶胚的半径小于临界晶核半径，这种晶胚的出现将引起过冷液体总自由能的增加。

(1) 没有外场作用下的晶粒形核

单位体积的液相转变为固相时的体积自由能的改变为 ΔG_v ，假定是均匀形核，核心是半径为 r 的球体，则形成一个核心时的体积自由能的改变 ΔG_v 为：

$$\Delta G_v = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v \quad (1)$$

由于液相转变固相时是释放能量的过程，因而体积自由能的改变为负值。与体积自由能相反的是，晶胚的形成是需要能量来形成新的表面，即形成表面是需要系统提供能量。假设形成新表面时的表面自由能的改变为 ΔG_s ，则有：

$$\Delta G_s = 4\pi r^2 \gamma_{sl} \quad (2)$$

式中： γ_{sl} 为晶胚比表面能。这部分能量是随晶胚尺寸的增加而增加的，如图 2 所示。

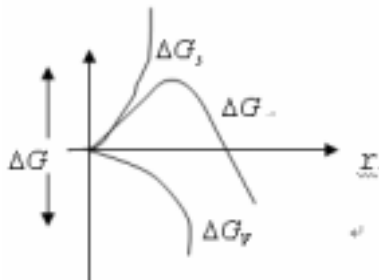


图 2 晶核半径与表面自由能的关系图

形成一个晶胚时总的自由能的转变为 ΔG ：

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma_{sl} \quad (3)$$

只要晶核的半径达到临界半径 r^* ，就能稳定成长，晶胚就可能成为晶核而最终结晶为晶粒。那些尺寸小于临界尺寸的原子的团只能称为晶核的胚胎，当胚胎的尺寸大于临界尺寸时，胚胎就成为了晶体核心，而小于临界核心尺寸的胚胎随时都可能消失。因此，要在液体中析出晶体，必须产生临界晶核。

令 $\frac{d\Delta G}{dr} = 0$ ，得出临界半径^[7]：

$$r^* = -\frac{2\gamma_{sl}}{\Delta G_v} \quad (3)$$

(2) 加入外磁场的晶粒形核

在合金凝固的过程中加入电磁场，当液相中出现晶核时，系统总自由能的变化必须考虑磁吉布斯自由能的变化。总自由能的变化：

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 (\Delta G_v + \Delta G_m) + 4\pi r^2 \gamma_{sl} \quad (5)$$

其中： ΔG_m 为磁吉布斯自由能， γ_{sl} 为晶胚比表面能。

此时临界半径为：

$$r^* = -\frac{2\gamma_{sl}}{\Delta G_v + \Delta G_m} \quad (6)$$

其中单位体积的磁吉布斯自由能公式为^[8]：

$$\Delta G_m = -\frac{1}{2}\mu_0(\chi^s - \chi^l)H^2 = -\frac{1}{2}\mu_0\Delta\chi^{sl}H^2$$

式中： μ_0 为真空磁导率， χ^s, χ^l 分别为金属液相和固相的体积磁化率， H 为施加的磁场强度。抗磁性物质磁化率为负值，一般不随物质状态而变化；顺磁性物质在外磁场中受到一个磁矩作用，力图将磁矩转向外磁场方向。呈现顺磁性，磁化率为正值^[9,10]。

磁场中合金熔体在一定过冷度下凝固，形成单位体积的体积自由能差 $\Delta G_v < 0$ ，是相变的驱动力。从式(7)可知， ΔG_m 的正负由 $\Delta\chi^{sl}$ 决定。

我们研究的是 -Al 相的形核规律，Al 为顺磁性物质，顺磁性金属的磁化率有 $\chi^s > \chi^l > 0, \Delta\chi^{sl} > 0, \Delta G_m < 0$ ，所以 $|\Delta G_v + \Delta G_m|$ 增大。在过冷度和外磁场强度一定的情况下， γ_{sl} 一般为常数。所以比较式(4)和(6)： $|r^*| < |r^*|$ 。

4 结论

(1)通过对 EMS 下铝硅合金组织的观察，发现 -Al 相的析出数量和形状随搅拌过程而变化。初生枝晶臂发生熔断，有利于 -Al 相形成等轴或蔷薇状。

(2)电磁搅拌后，由于磁吉布斯自由能的存在，临界晶核半径变小，则有更多的晶胚可以达到临界形核半径，稳定长大形成晶粒，从而使材料组织明显细化。

参考文献

- 1 杨为佑, 陈振华, 吴艳军, 等. 半固态非枝晶组织合金的制备技术. 铝加工, 2002, 24(1): 32
- 2 罗守靖, 田文彤, 等. 半固态加工技术及应用. 中国有色金属学报, 2000, 12(6): 765
- 3 毛卫民, 赵爱民, 崔成林, 等. 电磁搅拌对半固态 AlSi7Mg 合金初生 -Al 的影响规律. 金属学报, 1999, 35(9): 971
- 4 毛卫民. 电磁搅拌对半固态 AlSi7Mg 合金初生 Al 分布的影响. 金属学报, 2001, 37(7): 781
- 5 刘宗昌, 任慧平, 宋义全. 金属固态相变教程. 北京: 冶金工业出版社, 2003. 10
- 6 徐祖耀, 李麟. 材料热力学. 北京: 科学出版社, 1999
- 7 肖建中. 材料科学导论. 北京: 中国电力出版社, 2001
- 8 袁聪. 强磁场对铝硅合金性能的影响: [硕士论文]. 大连: 大连理工大学, 2005
- 9 程守洙, 江之水. 普通物理学 2. 北京: 高等教育出版社, 1982. 223
- 10 张邦文, 任忠鸣. 合金凝固过程中晶粒取向的动力学研究. 金属学报, 2004, 40(60): 604