

电磁搅拌作用对铝合金显微组织的影响^①

朱明原 史文 杨森龙 任忠鸣 邵光杰 许珞萍

(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘要 研究了电磁搅拌对 ZL101A 铝合金显微组织的影响, 阐明了不同搅拌工艺条件下 ZL101A 铝合金的显微组织的变化规律。结果表明: 在磁场强度大于 0.065 T 的 EMS 作用下, ZL101A 合金能够得到非树枝晶组织; 未经细化处理, 晶粒尺寸在 100~300 μm 范围内; 随着 EMS 作用的增强, 晶粒向完全椭圆形发展; 本实验条件下 EMS 没有细化共晶 Si 的作用, 也没有改变共晶 Si 的析出形态; 搅拌作用与合金凝固速度的良好匹配是得到理想非树枝晶组织的关键。

关键词 电磁搅拌 铝合金 显微组织

中图法分类号 TG113.1

半固态成型 (Semi-solid forming, SSF) 技术是一种融合了铸造和锻造工艺的金属成型新技术^[1]。它具有零件精度高、机械加工少、一致性好、模具寿命长、应用范围广、节能高效、便于连续自动化大规模生产等显著优点。随着汽车工业的发展, 它日益受到世界各国的普遍重视。SSF 技术有两个关键环节, 其一是非树枝晶合金原材料的制备, 其二是成型工艺及装备技术的研究, 前者是整个技术的前提和基础。目前, 非接触式的电磁搅拌^[2] (Electromagnetic stirring, EMS) 和应变诱发熔化激活^[3] (Strain induced melt activated, SIMA) 是两种制备半固态成型原材料的最有效可行的方法。EMS 法又因其工艺简单、成本低廉和易于控制而被国际上一些先进企业运用于工业生产。基于学术研究和商业价值的双重意义, 研究电磁搅拌对各类合金组织的影响成为世界范围内研究的热点。

本文研究电磁搅拌工艺与 ZL101A 铝合金金相组织的关系, 分析不同搅拌工艺条件下 ZL101A 合金金相组织的变化, 阐明 EMS 工艺对 ZL101A 合金组织的影响, 初步探讨具有完全等轴晶组织的铝合金制备工艺, 为非树枝晶

铝合金的连铸生产提供实验基础。

1 实验

1.1 实验装置

实验在自制的电磁搅拌静态浇铸系统上进行。该系统主要包括: 结晶器、电磁搅拌器和冷却系统, 系统简图如图 1。本电磁搅拌装置不同于在电磁铸造中应用的电磁感应器^[4~7], 它能在结晶器中心稳定地产生磁场强度最大为

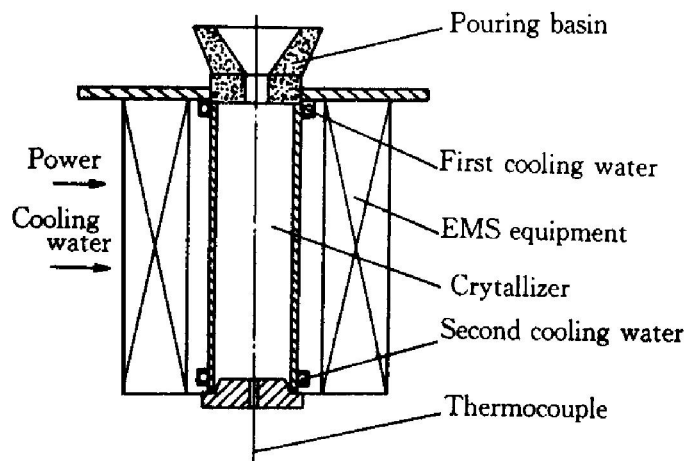


图1 EMS 静态浇铸系统

Fig. 1 Static casting system with EMS equipment

① 收稿日期: 1998-10-12; 修回日期: 1998-12-31 朱明原, 男, 33岁, 博士研究生, 副研究员

0.15 T 的水平旋转磁场, 并连续可调, 以达到无接触搅动熔体的目的; 而后者的作用是产生一个电磁压力, 使铸锭不与铸模相接触, 从而改善铸锭表面和内在质量^[8, 9]。为了监控铸锭心部的冷却过程, 并解决 EMS 作用时热电偶旋转的问题, 用铠装热电偶插入固定在结晶器中心的石英毛细管中, 连接 X-Y 记录仪, 记录冷却曲线。结晶器两端安装冷却水环, 通过调节水压和流量, 控制合金的凝固速度。

1.2 静态浇铸工艺

以工业上应用极广的 ZL101A (即 AlSi7-Mg0.3, 美国牌号 A356) 合金为研究对象, 在中频感应炉中熔化并进行常规变质、除气和精炼处理。浇注前装配结晶器和电磁搅拌器系

统, 安装热电偶, 连接 X-Y 记录仪; 开启冷却水系统, 设定水压; 将融熔的合金浇入结晶器 (浇注温度在 700~ 750 °C 之间) 后, 立即启动电磁搅拌器, 调节至设定强度, 使合金的凝固过程在电磁搅拌条件下进行, 直至合金凝固。

1.3 金相分析

试样取自整个铸锭的底部和中部。试样经打磨抛光, 用 HF 溶液腐蚀后做金相分析。

2 实验结果与讨论

图 2 显示了在没有 EMS 作用下凝固的 ZL101A 合金不同位置的显微组织。照片中白色部分是 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体, 呈树枝状结晶; 灰色

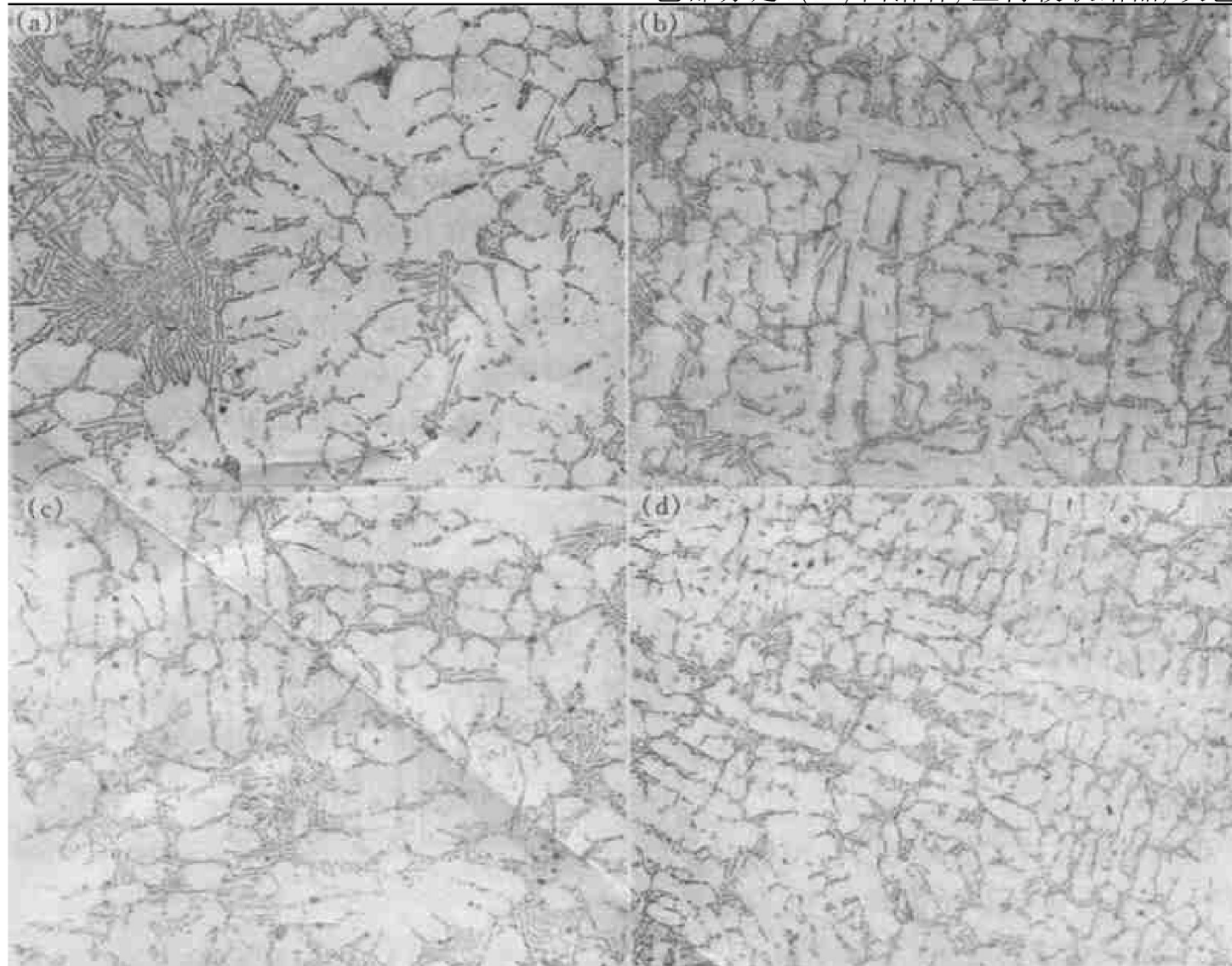


图 2 没有 EMS 作用下凝固的 ZL101A 合金不同位置的显微组织(×50)

Fig. 2 Microstructures of ZL101A alloy without EMS effect(×50)

(a) —Center of top; (b) —Border of top; (c) —Center of bottom; (d) —Border of bottom

针状和片状为共晶($\text{Al}+\text{Si}$)组织,因没有细化处理,组织较粗大。中心区域与边缘区域相比,由于冷却速度较慢而晶粒稍大,底部边缘区域冷却速度最快,故 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体和共晶($\text{Al}+\text{Si}$)均较细。4个区域的组织特征基本一致。

图3显示了在磁场强度0.075 T的电磁搅拌作用下凝固的ZL101A合金的显微组织。显然,白色 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体已不再呈树枝状,而是呈现出分布不十分均匀的玫瑰花形、成熟的玫瑰花形和椭圆形的混合形态。边缘区域和中心区域的晶粒大小比较一致,共晶Si仍呈针状和片状,且因未经细化处理而较为粗大。分析表明:电磁搅拌作用打碎了树枝状晶,基本形

成了等轴晶组织,并使各区域的晶粒尺寸趋于均匀。但EMS作用并未明显改变共晶Si的析出形态。这个结果与Joly等^[10]运用机械搅拌作用改善 $\text{Al}-\text{Si}$ 亚共晶合金中初生铝的形态,以及魏朋义等^[11]通过机械搅拌作用细化 $\text{Al}-12\%\text{Si}$ 合金组织的结果基本一致。

为研究EMS强度对合金组织的影响,对在不同电流强度的EMS作用下凝固的合金组织进行了金相分析。图4是在磁场强度为0.085 T的EMS作用下凝固的ZL101A铸锭的金相组织。该铸锭各部分的金相组织形貌基本一致,虽然共晶Si仍呈平滑的或波浪式的片状长大并分枝而成细枝状,但 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒更圆滑,其形态基本是成熟的玫瑰花形和椭圆形。

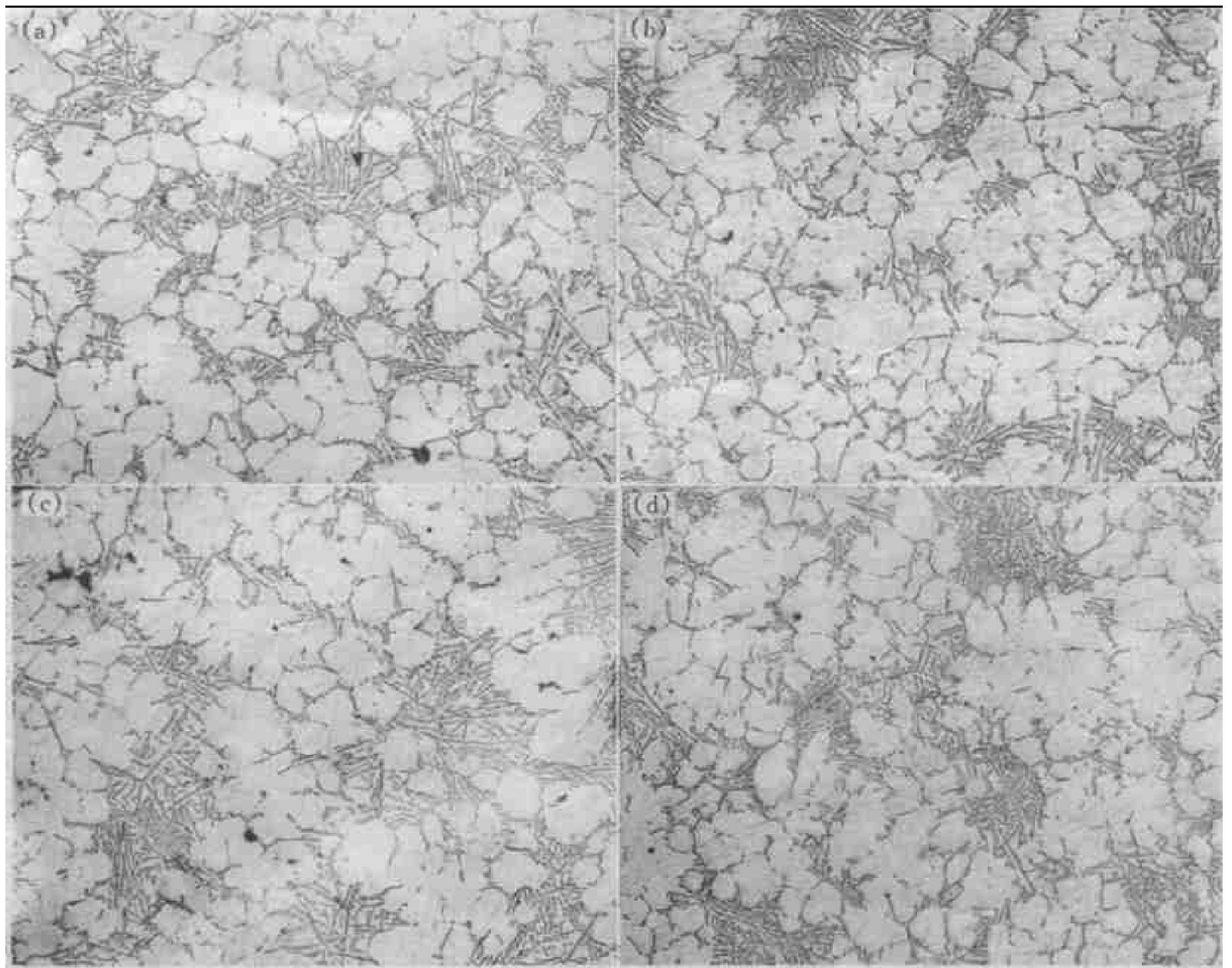


图3 磁场强度0.075 T的EMS作用下凝固的ZL101A的显微组织($\times 50$)

Fig. 3 Microstructures of ZL101A alloy under 0.075 T EMS effect($\times 50$)

(a) —Center of top; (b) —Border of top; (c) —Center of bottom; (d) —Border of bottom

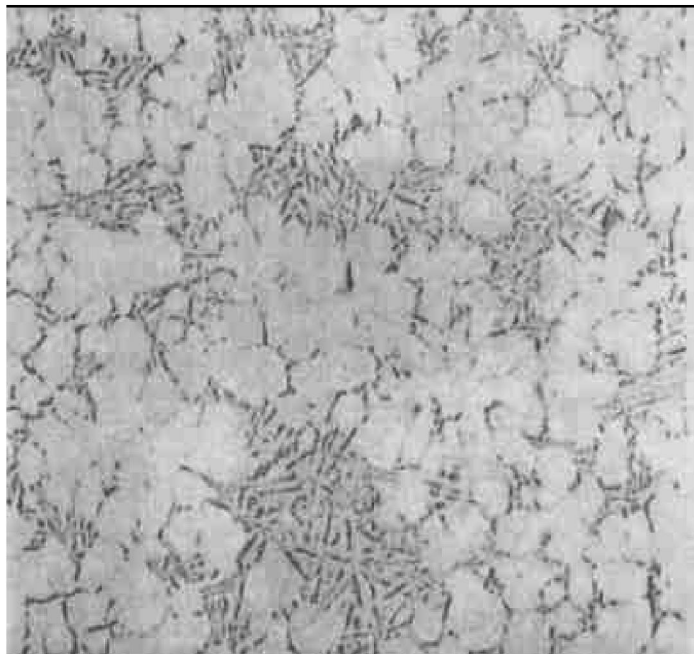


图4 磁场强度0.085 T 的 EMS 作用下凝固的 ZL101A 的显微组织(×50)

Fig. 4 Microstructure of ZL101A alloy under 0.085 T EMS effect(×50)

晶粒直径约在100~300 μm 范围内,与文献[3]报道的结果相比,晶粒大小相当(100~400 μm,未经细化处理),等轴晶组织不够均匀,共晶 Si 比较粗大。进一步加大磁场强度,合金组织变化不大,但由于搅拌强烈,气体卷入量增加,造成针孔度等级下降。

造成组织不均匀和晶粒较大的原因,除了合金未经细化处理之外,搅拌工艺与冷却速度的匹配是重要问题。图5是 ZL101A 在本实验中 EMS 作用下实测的典型冷却曲线之一。实验测得:合金在 $L + \alpha(\text{Al})$ 两相区的时间是120~130 s,共晶反应时间约为120 s,比同一浇注工艺没有 EMS 作用下凝固稍快。从理论上分析:增大搅拌强度,延长搅拌时间,减低冷却速度,会使合金组织沿着初始枝晶碎片→枝晶生长→玫瑰花形→成熟的玫瑰花形→椭球形发展。因而单纯从获得椭球形合金组织出发,较理想的冷却过程是:在 $L + \alpha(\text{Al})$ 两相区缓慢冷却,以使搅拌作用充分打碎树枝晶,而一旦达到共晶反应温度,则能较快冷却,以确保被打碎的枝晶不再长大。但是,在两相区缓慢的冷却速度,会导致晶粒长大,不利于提

高合金的力学性能。

图6为典型的在 EMS 下快速冷却得到的 ZL101A 合金的金相组织。照片显示:因冷却速度太快,以致于在边缘区域搅拌未能完全起作用时,合金已经凝固,所以边缘区域合金组织玫瑰花形和树枝状晶非常明显;而中心区域由于冷却速度与搅拌作用匹配较好,因此组织为较圆整的、均匀的等轴晶,其共晶组织也非常细小。就其金相组织而言,已与美国 Alumax 公司生产的同类材料(金相组织如图7)相类似^[1]。

可见,加快冷却速度虽能显著细化合金组织,但却不利于形成完全等轴晶组织。因此,搅拌作用与冷却速度的合理匹配是得到理想非树枝晶组织的关键。可以预计,搅拌工艺(强度和时间)、冷却速度及拉坯速度三者是实现非树枝晶铝合金连铸生产的非常重要的工艺参数。

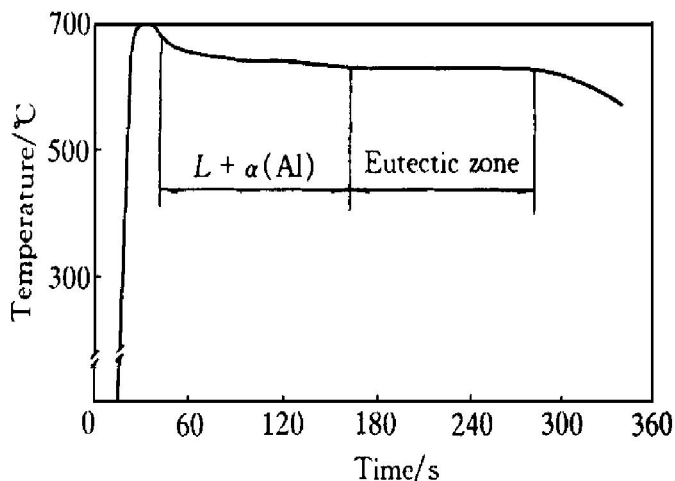


图5 ZL101A 合金在 EMS 作用下的典型冷却曲线

Fig. 5 Typical cooling curve of ZL101A alloy under EMS effect

3 结论

(1) 在磁场强度大于 0.065 T 的 EMS 作用下, ZL101A 合金能够得到非树枝晶组织。未经细化处理,晶粒直径在 100~300 μm 范围内。随着 EMS 作用的增强,等轴晶组织逐渐均匀,晶粒向完全椭球形发展。

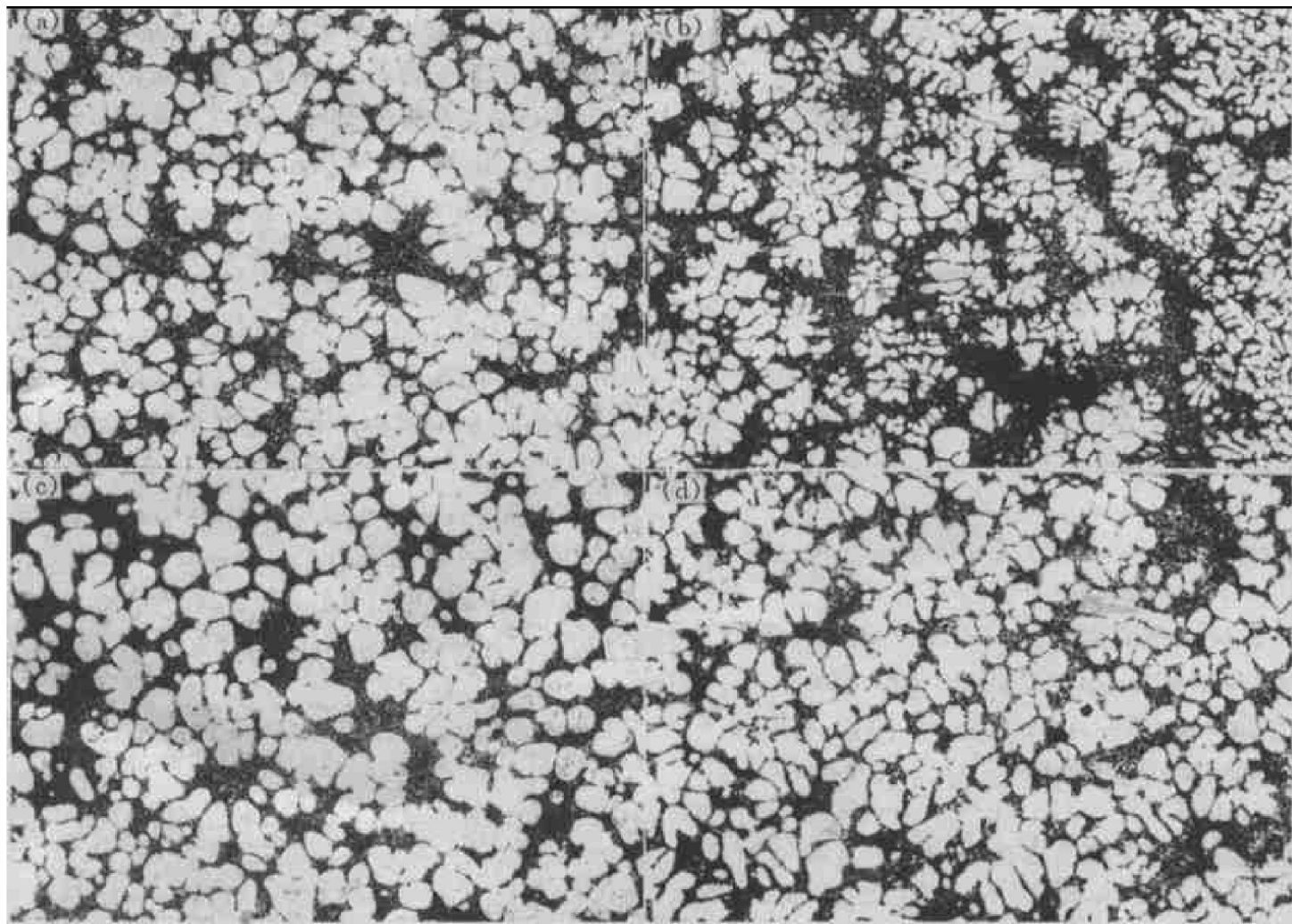


图6 EMS作用下快速凝固的ZL101A合金的显微组织(×50)

Fig. 6 Microstructures of ZL101A alloy under EMS effect and high solidification rate(×50)

(a) —Center of top; (b) —Border of top; (c) —Center of bottom; (d) —Border of bottom

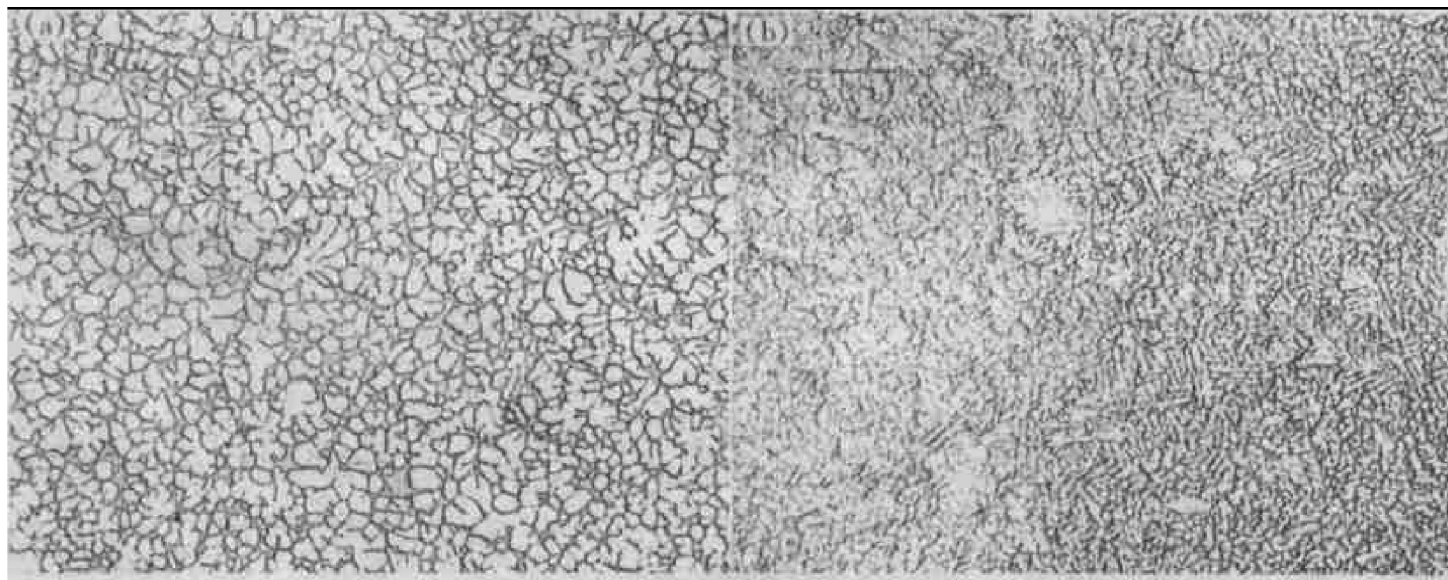


图7 美国Alumax公司生产的同类材料的显微组织(×50)

Fig. 7 Microstructures of A356 produced by Alumax Company in USA(×50)

(a) —Center part; (b) —Border part

(2) 在目前实验条件下, 电磁搅拌没有细化共晶 Si 的作用, 也不能改变共晶 Si 的析出形态。

(3) 搅拌作用与冷却速度的良好匹配是得到理想非树枝晶组织的关键。

REFERENCES

- 1 Ed Nussbanu A L. Light Metal Age, June, 1996.
- 2 Flemings M C and Young K P. "Rheocasting" Yearbook of Science and Technology. New York: McGraw-Hill, 1978.
- 3 Young K P. Ryonka C P and Courtois J A. US Patent 4415374. 1983.
- 4 Ren Zhongming(任忠鸣) and Yang Mei(杨眉). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1994, 4(4): 78.
- 5 Ren Zhongming(任忠鸣), Fan Jianghong(范江虹) and Jin Junze(金俊泽). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1993, 3(2): 93.
- 6 Ren Zhongming(任忠鸣) and Jiang Guochang(蒋国昌). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(1): 108.
- 7 Zhao Xiaolin(赵啸林), Mao Daheng(毛大恒) and Chen Qiangen(陈欠根). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1995, 5(4): 145.
- 8 Zhang Xingguo(张兴国), Jin Junze(金俊泽) and Cao Zhiqiang(曹志强). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1994, 4(Suppl): 171.
- 9 Cao Zhiqiang(曹志强), Zhang Xingguo(张兴国) and Jin Junze(金俊泽). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1995, 5(3): 78.
- 10 Joly P A and Meharahn R. J Mater Sci, 1976, 11: 1397-1418.
- 11 Wei Mingyi(魏明义), Fu Hengzhi(傅恒志) and Reif W. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(1): 98.

INFLUENCE OF EMS ON ALUMINUM ALLOY MICROSTRUCTURE

Zhu Mingyuan, Shi Wen, Yang Senlong, Ren Zhongming, Shao Guangjie and Xu Luoping

School of Materials Science and Engineering,

Shanghai University, Shanghai 200072, P. R. China

ABSTRACT The influence of electromagnetic stirring process on the ZL101A aluminum alloy microstructure was studied. The changing regularity of ZL101A alloy microstructure was revealed under different electromagnetic stirring conditions. It showed that when the magnetic field intensity is greater than 0.065 T, the nondendritic and spheroidal microstructure can be obtained in ZL101A alloy; without refinement treatment, the grain size ranges from 100 to 300 μm ; as the EMS effect increases, the nondendritic structure evolves towards more spheroid; under the experiment conditions, EMS has no refinement effect on eutectic Si, and can not change its separation form. The results also showed that the EMS effect, solidification rate and their matching are the key to obtaining the ideal nondendritic structure.

Key words electromagnetic stirring aluminum alloy microstructure

(编辑 袁赛前)