

电磁搅拌下混合稀土对半固态 A356 合金 初生 α 相的细化机理

刘 政¹, 许鹤君², 罗浩林², 周志鹏², 谌庆春²

(1. 江西理工大学 机电工程学院, 赣州 341000;

2. 江西理工大学 材料科学与工程学院, 赣州 341000)

摘 要: 为获得细小、圆整且分布均匀的半固态 A356 合金初生 α 相, 向合金熔体中添加了不同含量的混合稀土 La 和 Ce 对合金进行变质处理, 熔体经 620 °C 浇注后, 利用变频控制的电磁搅拌装置对熔体进行电磁搅拌 15 s 并使其在 610 °C 保温 10 min, 观察并分析合金凝固组织中初生 α 相的形貌与尺寸。利用扫描电镜和能谱仪分析测定 La 和 Ce 在基体的分布情况, 探讨混合稀土元素在电磁搅拌条件下对初生 α 相的细化机制。结果表明: La 和 Ce 在电磁搅拌条件下易于均匀分布在初生 α 相周围, 混合稀土元素 La 与 Ce 在短时弱电磁搅拌的条件下可以高效地细化半固态 A356 合金组织, 稀土对半固态 A356 铝合金的初生 α 相细化机制与稀土在铝合金中产生的共晶反应有关。

关键词: 混合稀土; 半固态 A356 合金; 电磁搅拌; 初生 α 相; 共晶反应

中图分类号: TG146; TG244

文献标志码: A

Refinement mechanism of mixed rare earth on primary α phase in semisolid A356 alloy under electromagnetic stirring

LIU Zheng¹, XU He-jun², LUO Hao-lin², ZHOU Zhi-peng², CHEN Qing-chun²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Faculty of Materials Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to obtain the fine, round and uniform distribution primary α phase in semisolid A356 alloy, the different amounts of mixed RE elements La and Ce were added into the alloy melt, and the melt was poured at 620 °C and slightly electromagnetically stirred for 15 s with an electromagnetic stirrer controlled by frequency conversion, then, it was isothermally held at 615 °C for 10 min. The morphology and size of the primary α phase were analyzed, and the distributions of La and Ce were researched by SEM and EDS. The refinement mechanism of mixed RE under electromagnetic stirring was discussed. The results indicate that RE elements La and Ce are easy to uniformly distribute around the primary α phase under electromagnetic stirring, and RE elements La and Ce can effectively refine the primary α phase under the condition of short and weak electromagnetic stirring. The refining mechanism of RE on the primary α phase in semisolid A356 alloy can be concerned with the eutectic reaction induced by RE in the alloy.

Key words: mixed rare earth; semisolid A356 alloy; electromagnetic stirring; primary α -Al phase; eutectic reaction

在制备半固态合金浆料的过程中, 为了获取细小、圆整且分布均匀的初生 α 相, 国内外的研究人员做了

大量的工作, 并提出了多种理论及研究方法。电磁搅拌法由于其高效无污染、细化效果明显且便于操作的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51144009, 51361012); 江西省自然科学基金资助项目(20114bab206014); 江西省教育厅科技落地计划项目(KJLD12070)

收稿日期: 2012-12-13; **修订日期:** 2013-05-17

通信作者: 刘 政, 教授, 博士; 电话: 0797-8312428; E-mail: liukk66@163.com

特点, 成为迄今为止制备半固态铝合金浆料最成功的方法^[1]。另外, 细化晶粒的工艺手段也是该领域的研究重点, 如稀土元素^[2-4]和 Al-Ti-B 合金^[5]等细化剂经常被用来细化铝合金晶粒。目前的研究表明, 稀土在铝硅合金中的作用很复杂, 既细化了初生 α 相和初生硅, 又引起共晶硅的变质^[6-8]。一般认为稀土对铝合金晶粒细化的作用主要是通过稀土元素富集在凝固前沿^[9], 阻碍 α 相晶粒的生长, 以达到细化的目的。徐维等^[10]研究发现, 混合稀土可有效促进初生 α 相的球化生长, 不同的添加量下共晶组织的粒状化效果也各不相同, 并且 Mg 对稀土的细化能起到促进作用。唐小龙等^[11]通过添加不同的混合稀土和 Ti-B-Sr 细化剂研究了二者对 A356 合金的联合细化效果, 发现在 0.3%(质量分数)稀土添加量时效果最佳, 超量的稀土添加量将弱化其变质能力。适量的稀土 Y 对铝合金中初生 α 相有很好的细化作用, 可扩大亚共晶铝硅合金的固液相区^[12]。稀土 La 对半固态 A356 初生 α 相的细化机制研究表明, 加入适量稀土 La 的 A356 铝合金经低过热度浇注可制备具有颗粒状和蔷薇状初生 α 相的半固态浆料, Al 跟 La 在 640 °C 发生共晶反应, 能够为初生 α 相的形成提供形核核心^[4]。目前, 利用质优价廉的混合稀土具有潜在的经济性, 采用先进的制备技术可以保证半固态合金浆料的生产效率和细化效果。但就目前来看, 国内对混合稀土及电磁搅拌工艺二者双重条件下对半固态 A356 合金浆料凝固组织的影响机理研究较少, 且针对各种不同机制(如包晶细化机制与共晶细化机制)细化效果的对比研究也较少。

因此, 本文作者对不同成分比例的混合稀土 La 和 Ce 对 A356 合金熔液进行细化处理后, 再对铝合金熔体进行短时弱电磁搅拌, 研究电磁搅拌工艺和混合稀土细化剂两者对 A356 合金凝固组织中初生 α 相的细化机制, 并在相同工艺条件下对比 Al-Ti-B 的包晶细化机制和混合稀土的共晶细化机制的优劣, 探讨混合稀土细化效果的高效性与实用性, 从而获得半固态 A356 合金初生 α 相新型细化工艺。

1 实验

本试验所用 A356 合金经 Magix(PW2424)X 荧光光谱仪分析, 其实际成分如表 1 所列。

试验中将预先配置好的炉料放入预热到 300 °C 的石墨坩埚中, 在 SG2-3-10 坩埚井式电阻炉中进行熔

表 1 实验用 A356 合金成分
Table 1 Composition of A356 alloy in test (mass fraction, %)

Mg	Si	Fe	S	Cu
0.33	7.14	0.135	0.011	0.002
Mn	Zn	Ti	Zr	Al
0.012	0.021	0.023	0.004	Bal.

炼, 熔化过程中加入覆盖剂(成分为 50%NaCl 和 50%KCl(质量分数))进行覆盖, 形成熔池后, 除去表面熔渣, 将温度缓慢升高并控制在 720 °C, 分 2~3 次除气精炼合金液。精炼结束后静置 1~2 min, 将炉温升至 750 °C, 加入预先配置好的混合稀土, 混合稀土分别以 Al-10%La 与 Al-10%Ce 中间合金的形式加入, 静置 10 min 后将炉温降至液相线附近, 采用低过热度浇注和弱电磁搅拌工艺制备半固态合金浆料^[13]。将 620 °C 的液态合金浇入预先放置在电磁搅拌结晶器内的不锈钢坩埚中(不锈钢坩埚的尺寸为 $d\ 50\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$, 壁厚 3.5 mm), 按照预先设定的频率和搅拌时间对合金熔体作电磁搅拌。试验中通电线圈的磁场大小可以通过控制电流频率大小来实现, 基于以往的研究结果^[14], 该实验的电磁搅拌装置电流频率设定为 30 Hz, 搅拌功率为 350 W, 该条件下可获得较好的搅拌效果, 保证半固态浆料质量的同时并体现节能降耗。待电磁搅拌结束后对浆料在 610 °C 进行保温 10 min, 结束后立即从保温箱取出对其进行水淬并及时脱模。在各工艺条件下所获得的试样同一高度处分别截取 10 mm 厚的圆柱片, 从中取出一扇形块(须经过圆心), 弧长约 34 mm, 作为金相试样。金相试样经预磨、粗磨、精磨、抛光后, 用 0.5%HF 水溶液进行显微组织浸蚀。在 ZEISS Axioskop2 型光学显微镜上观察金相组织。半固态组织中的初生 α 相尺寸采用图像分析软件进行分析, 利用 Image-Pro-Plus 软件对试样进行晶粒度测量, 按下列公式计算出各试样初生 α 相的平均等积圆直径和平均形状因子: 各单独晶粒的等级圆直径 $D=2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$, 形状因子 $R=\frac{4\pi A}{P^2}$ (式中: A 为晶粒面积, P 为晶粒周长; R 值越接近 1, 晶粒圆整度越高)。

2 结果与分析

图 1 所示为未经电磁搅拌和细化处理而直接在 610 °C 保温 10 min 后浇注的 A356 合金试样的显微组

织。图 2 所示为添加了不同成分比例混合稀土的试样经 30 Hz 频率电磁搅拌 15 s 后其初生 α 相的组织形貌。图 3 所示为半固态 A356 铝合金初生 α 相的平均等积圆直径和平均形状因子在电磁搅拌下随混合稀土添加量的变化趋势。从图 2(a)中可以看出, 添加 0.5%La+0.2%Ce 电磁搅拌后的试样, 其金相组织中初生 α 相的形状略有改善, 长条状的晶粒和枝晶数量明显变少, 并出现部分圆整、细小的初生 α 相, 但总体上仍然大小不一、分布不均, 部分细小且圆整度较好的初生 α 相呈聚集分布, 部分粗大柱状晶未得到有效破碎, 局部范围内又产生了共晶组织偏聚的现象, 该初生 α 相

的平均等积圆直径为 $69.93\ \mu\text{m}$, 平均形状因子为 0.78(见图 2(a)和图 3), 总体效果欠佳。在图 2(b)中, 相同电磁搅拌工艺条件下, 当混合稀土含量升至 0.7%La+0.4%Ce 时, 试样的显微组织较常规浇注发生了显著的改变, 初生 α 相得到了明显细化, 蔷薇状组织消失殆尽, 长条状的晶粒几乎全被破碎, 且破碎后的晶粒更加圆整, 分布均匀, 大小趋于一致。由图 3 可看出, 该初生 α 相的平均等积圆直径减小至 $53.06\ \mu\text{m}$, 平均形状因子亦达到了 0.89。随着混合稀土添加量升至 1.0%La+0.6%Ce 时, 初生 α 相的形貌较之前图 2(b)中的差, 其平均形状因子为 0.74, 虽大部分初生 α

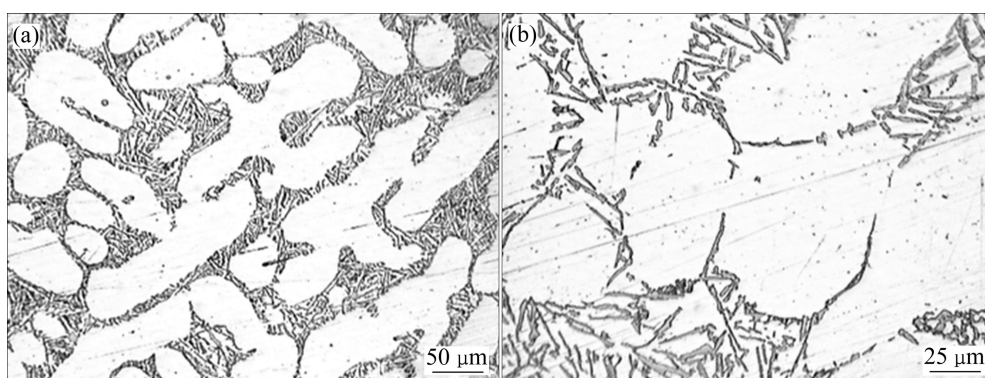


图 1 未经搅拌 A356 合金试样初生 α 相的显微组织

Fig. 1 Microstructures of primary α phase of A356 alloy without stirring: (a) Low magnification (b) High magnification

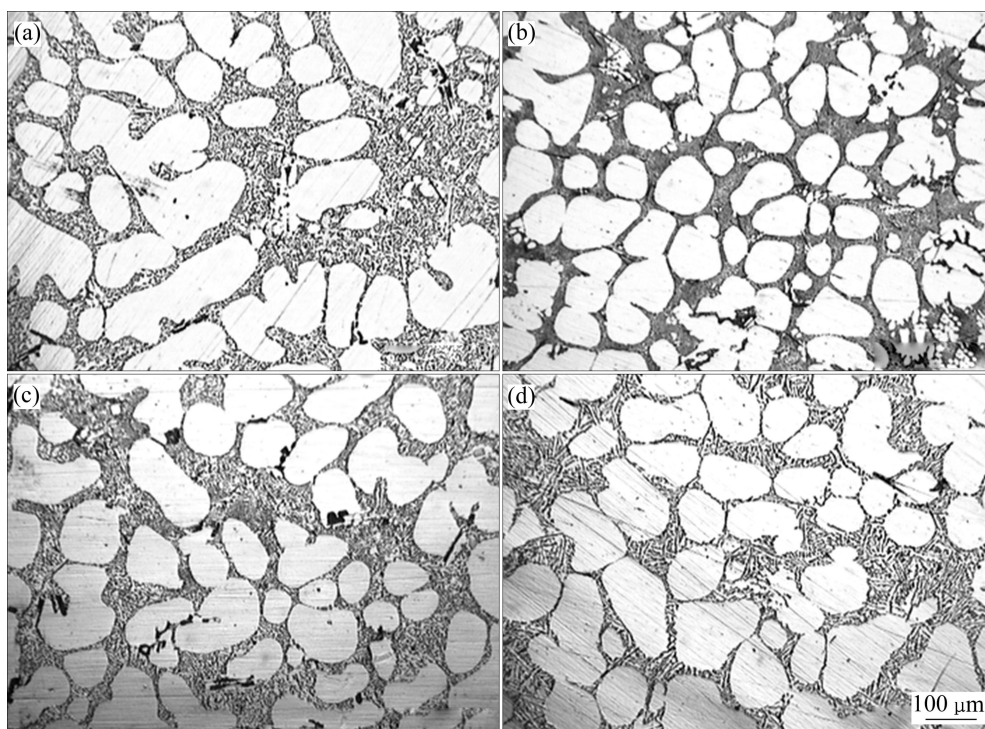


图 2 不同混合稀土添加量下电磁搅拌后 A356 合金初生 α 相的形貌

Fig. 2 Morphologies of primary α phase of A356 alloy under condition of electromagnetic stirring and different mixed rare-earth additions: (a) 0.5%La+0.2%Ce; (b) 0.7%La+0.4%Ce; (c) 1.0%La+0.6%Ce; (d) 1.5%La+1.0%Ce

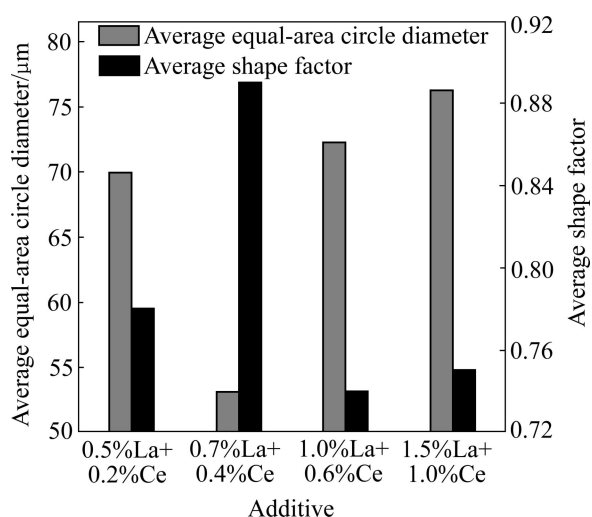


图 3 不同混合稀土添加量下初生 α 相的平均等积圆直径和平均形状因子

Fig. 3 Average equal-area circle diameter and shape factor of primary α phase under different mixed rare-earth additions

相仍能保持基本圆整的形态, 但尺寸相对粗大, 平均等积圆直径上升至 $72.29 \mu\text{m}$ (见图 3)。若继续添加混合稀土含量至 $1.5\%\text{La}+1.0\%\text{Ce}$, 发现该条件下的初生 α 相尺寸相对于图 2(c) 中又有所增大, 经测量其平均等积圆直径为 $76.31 \mu\text{m}$, 至于圆整度, 其平均形状因子为 0.75 (见图 3), 与图 2(c) 中的基本保持一致, 分布情况也与之近似, 总体较为均匀。综合图 2 和 3 的结果可知, 在本试验过程中, 当混合稀土加入量为 $0.7\%\text{La}$ 与 $0.4\%\text{Ce}$ 时得到的凝固组织形貌最好。

3 讨论

3.1 电磁搅拌下混合稀土对初生 $\alpha(\text{Al})$ 相形貌的影响机制

该试验中混合稀土元素对晶粒的细化机制可以理解为熔体在凝固过程中, 稀土元素 La 和 Ce 富集在固液界面前沿, 增大了界面的成分过冷度, 微观上将影响固液界面上原子的迁移过程, 阻碍了初生 α 相长大, 并使得结晶潜热的传出较为困难, 促使内部枝晶温度提高发生熔断, 从而提供更多的形核核心。此外, 稀土元素 La 与 Ce 表面活性较高, 降低合金液面的界面张力和晶粒的形核功, 减小临界晶核半径, 提高形核率。稀土元素 La 和 Ce 的加入, 还可以起到拓宽铝硅合金的固液相区宽度的作用, 延长了合金在固液相

区的停留时间, 即减慢了初生 α 相的长大速度^[15-17]。

为了深入地探讨混合稀土元素对 A356 合金初生 α 相的细化机理, 对本试验中添加混合稀土 La 与 Ce 后初生 α 相形貌最佳的试样进行能谱分析。依照上述理论分析, 推测稀土元素 La 和 Ce 极有可能富集在初生 α 相的边界上, 利用带能谱的 SEM 对试样进行检测分析, 其结果见图 4。从图 4(a) 试样的二次电子像可以明显观察到初生 α 相晶界处的亮白色区域 (图中隐约的白色轮廓线即为晶界)。用能谱仪对该区域进行成分分析, 检测结果如图 4(b) 所示, 定性结果表明该白色亮点区域确实为稀土元素 La 和 Ce 的富集区, 其中各元素的质量分数如图 4(b) 中所示。

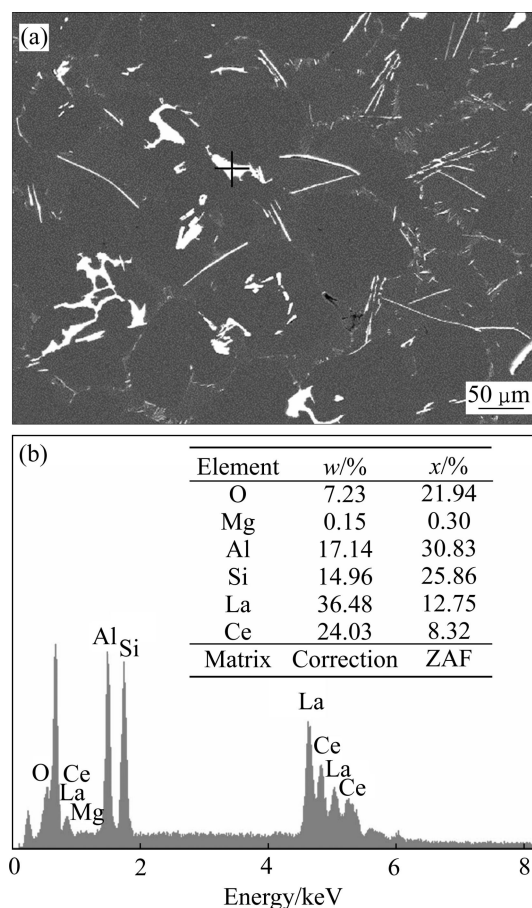


图 4 添加混合稀土元素后 A356 合金的二次电子像及 EDS 谱

Fig. 4 Secondary electronic image(a) and EDS spectrum(b) of A356 alloy with mixed RE

依据 Al-La、Al-Ce 的二元相图可知, Al 和 La 在 628°C 发生共晶反应: $L \rightarrow \alpha\text{-Al} + \text{Al}_{11}\text{La}_3$, Al 和 Ce 在 621°C 发生共晶反应: $L \rightarrow \alpha\text{-Al} + \text{Al}_{11}\text{Ce}_3$, 因此可以推断该亮白色区域为化合物 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 、 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 的聚集

区。由此可见,在 610 °C 的保温条件下,合金中的 La 与 Ce 主要是以 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 和 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 的形式分布于初生 α 相的界面前沿。 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 为正方晶格,晶格常数为 $6.28 \times 10^{-10} \text{ m}$,而初生 α 相的晶格常数为 $4.05 \times 10^{-10} \text{ m}$,两者失配度为 35.51%,晶格错配程度较大,故 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 不能直接作为 Al-Si 合金中初生 α 相异质形核的核心,只能分布在晶界处,阻碍初生 α 相的长大。 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 为体心立方,晶格常数为 $4.40 \times 10^{-10} \text{ m}$,与初生 α 相的失配度仅为 7.95%,二者可近似形成共格相界面,因此, $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 可直接作为初生 α 相的异质核心,从而起到提高形核率的作用。但若继续增大稀土元素 Ce 的加入量,则细化效果反而不好,可能是由于化合物 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 产生了局部偏聚的现象,电磁搅拌过程未能将偏聚物破碎,最终呈块状形式分布,从而降低稀土元素的细化效果。需要指出的是,试验中电磁搅拌过程本身亦会给熔体中的初生 α 相带来细化作用,初生 α 相在外加电磁场的作用下会作旋转运动并且可以破碎粗大枝晶,“冲刷”晶粒的过程中使其相互磨合形状趋于圆整,电磁搅拌还可以向半固态熔液中输入额外的能量以提供形核功,提高形核率^[18-21]。

为进一步获取稀土元素 La 和 Ce 在基体的分布情况,利用扫描电镜对其进行面扫描,结果见图 5。图 5(a)和(b)所示分别为 La 元素和 Ce 元素对应的区域面扫描图。可以看出,合金熔体在电磁搅拌的作用下,稀土元素整体上较为均匀地弥散分布于基体初生 α 相的晶界处(图中由代表稀土元素的点勾画出的轮廓所包围的空白部分即为初生 α 相所占据的位置),可见对熔体施加电磁搅拌确实一定程度上起到了改善稀土元素在基体分布的作用。

另外,由 Al-La 和 Al-Ce 相图可知,Al 与稀土元素 La 和 Ce 于一定温度下将发生共晶反应: $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + \text{Al}_{11}\text{RE}_3$ 。这些反应产物中除了铝稀土化合物,亦有一定数量的 $\alpha(\text{Al})$ 相,在共晶反应刚结束时,这些 $\alpha(\text{Al})$ 相尺寸应是细小的,而且可以作为铝合金熔体随后凝固时初生 α 相的形核质点。在电磁搅拌器的外加磁场下,这些形核质点可较为均匀地分布于熔体内,从而改善晶粒细化效果。由杠杆定律可计算得到铝-稀土共晶反应产物中 $\alpha(\text{Al})$ 和 $\text{Al}_{11}\text{RE}_3$ 的相对比例,可知随着稀土加入量的减小,生成的 $\alpha(\text{Al})$ 的相对含量增大, $\text{Al}_{11}\text{RE}_3$ 的相对含量则减小。由铝稀土二元相图可知,当 La 和 Ce 的含量过低时,如试验中 0.5%La+0.2%Ce,会使固液相区接触点偏高,起始结晶温度也较高,在固液相区等温停留并经电磁搅拌后,

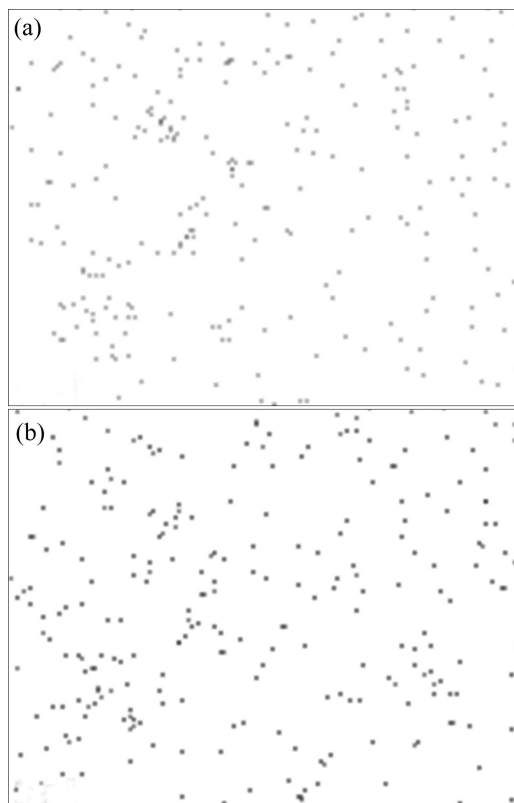


图 5 A356 合金试样中稀土元素的面扫描图

Fig. 5 Area scanning of RE elements in A356 alloy: (a) La; (b) Ce

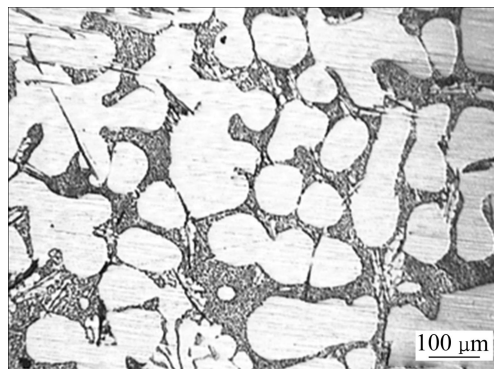


图 6 铝稀土共晶反应温度之上保温处理后 A356 合金的显微组织

Fig. 6 Microstructures of A356 alloy held above eutectic reaction temperature of Al and RE

熔体内部温度场趋于稳定,释放的结晶潜热易使已生成的初生 $\alpha(\text{Al})$ 晶核产生重熔的现象,降低了形核质点的数量,即降低了形核率。若继续添加稀土元素,如 1.0%La+0.6%Ce 和 1.5%La+1.0%Ce,随着稀土加入量的继续增加,共晶反应生成的 $\alpha(\text{Al})$ 数量减少,共晶相的含量增加,细化效果减弱。

为证明上述这一结论, 选用试验中效果最理想的混合稀土添加方案: 加入量为 0.7%La+0.4%Ce, 依照相同工艺参数作电磁搅拌处理, 并改为在 630 °C (铝稀土共晶反应温度之上) 保温 10 min, 观察浇注后试样在室温下的金相组织, 如图 6 所示。由图 6 可以看出, 该条件下试样凝固组织的形貌较差, 由于合金熔体在保温过程中未发生铝稀土共晶反应, 未能提供一定数量的形核质点, 导致形核率降低, 最终试样基体中部分初生 α 相不圆整, 且出现粗大的柱状晶。可见铝稀土共晶反应确实为随后的铝合金凝固时初生 α 相的形成提供了数量较为可观的形核质点, 对细化铝合金的凝固组织起到了至关重要的作用。

3.2 电磁搅拌下混合稀土与 Al-Ti-B 细化初生 α (Al) 相的高效性对比

为了更直观地探讨混合稀土在晶粒细化方面的高效性和实用性, 本研究还选用常用的 Al-Ti-B 细化剂与之作对比。Al-Ti-B 作为一种传统的高效晶粒细化剂, 也常被用于铸造铝合金的细化工艺中。本研究依据 Al-Ti 相图及相关理论参数^[22]设计 4 组不同 Ti 添加量的试验, Ti 元素以 Al-5%Ti-1%B 合金的形式加入,

除变质剂不同外, 其他试验条件均设定为相同, 试验结果如图 7 所示。图 8 所示为 A356 合金初生 α 相的平均等积圆直径和平均形状因子随 Ti 添加量的整体变化趋势图。

从图 8 中可以看出, 与常规浇注的试样相比, 加入 Al-Ti-B 后的晶粒组织略有改善, 对初生 α 相的细化具有一定效果。依据国内目前对 Al-Ti-B 细化机制的研究, 其主要还是集中在 Al-Ti 二元包晶反应上。Al-Ti-B 中间合金中主要的化合物为 TiAl_3 、 TiB_2 和 AlB_2 , 前者是细化过程的主要形核相, 后两者形核则较差, 不易单独形核相, 甚至对基体组织无影响^[23]。由于 Al 在 615 °C 下与 Ti 发生包晶反应, 其包晶反应中 Ti 的临界成分点在 0.07% 左右, 超过该点后, B 的作用就相对明显, 低于这个成分点时, B 可以有效富集在 TiAl_3 相中显著提高其细化效果, 这也是本实验在 0.07% 范围内出现“转折点”的原因。当 Ti 的加入量在 0.07% 时, 从数据上看, 此时的初生相晶粒平均等积圆直径最小(69.35 μm), 平均形状因子最大(0.69), 但和混合稀土的最佳试验结果对比, 晶粒度相差近 31%, 圆整度相差近 23%, 整体效果和混合稀土实验不在同一等级, 后者具备更高效的细化效果。

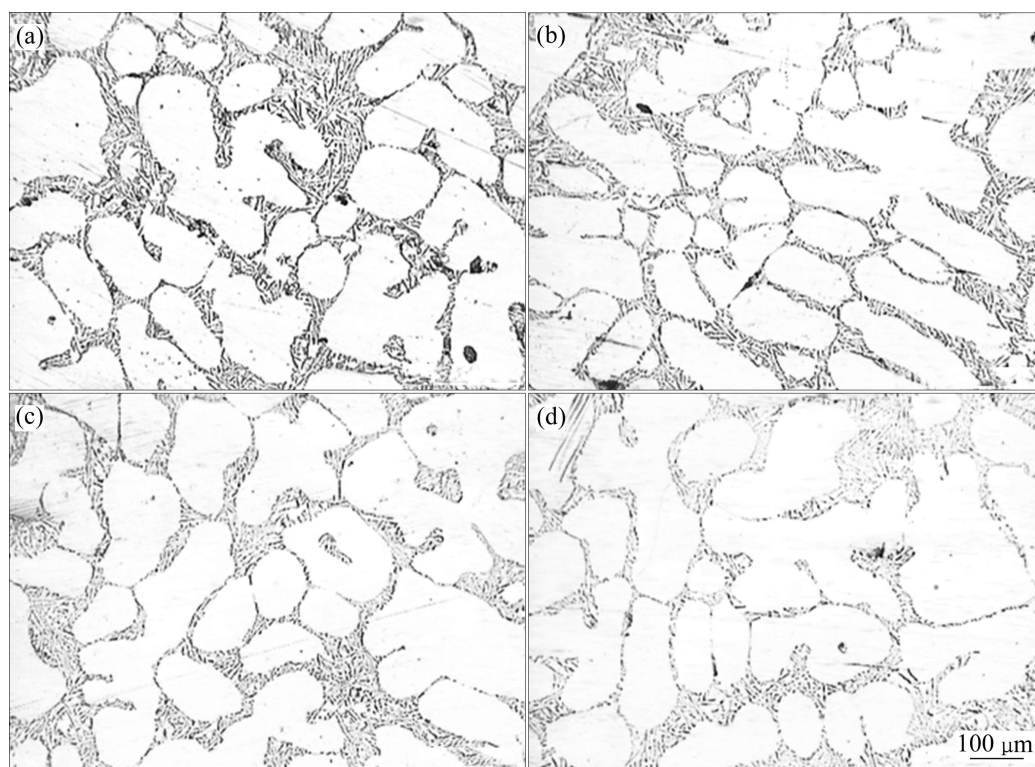


图 7 不同 Al-Ti-B 添加量下初生 α 相的形貌

Fig. 7 Morphologies of primary α phase under different Al-Ti-B additions: (a) 0.03%Ti; (b) 0.05%Ti; (c) 0.07%Ti; (d) 0.09%Ti

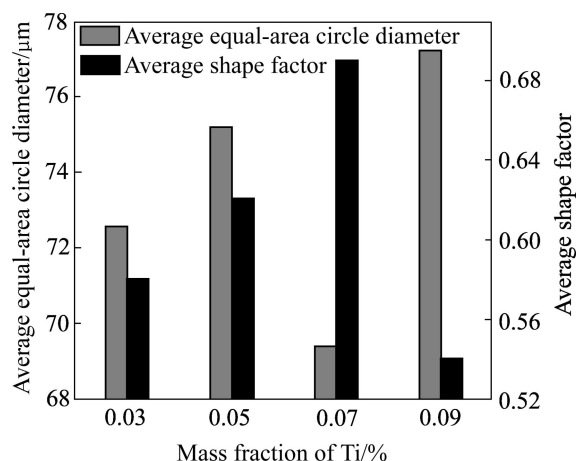


图8 不同混合稀土添加量下初生 α 相的平均等积圆直径和平均形状因子

Fig. 8 Average equal-area circle diameter and shape factor of primary α phase under different Ti additions

4 结论

1) 与未添加混合稀土所制备的试样相比, 加入混合稀土变质后再经电磁搅拌处理的半固态 A356 铝合金坯料的初生 α 相尺寸细小、圆整度高且分布均匀, 可以满足该合金半固态金属流变成形的需求。

2) 在本实验的范围内, 合适的半固态 A356 合金态浆料的制备工艺参数为添加 0.7%La+0.4%Ce 后, 经 620 °C 浇注, 并在电流频率为 30 Hz 电磁搅拌 15 s, 在 610 °C 保温 10 min。

3) 铝与稀土元素的共晶反应是铝合金凝固组织细化的一种新机制, 该反应的产物能够为随后的铝合金凝固时初生 α 相的形成提供可观数量的形核质点, 可以有效提高合金的形核率, 达到细化凝固组织的效果。

4) 与常规浇注相比, 本试验中 Al-Ti-B 细化剂对初生 α 相虽具有一定细化效果, 但和混合稀土的实验效果对比相差较远, 其实用性和高效性不及混合稀土的。

REFERENCES

[1] NAFISI S, EMADI D. Effects of electromagnetic stirring and superheat on the microstructural characteristics of Al-Si-Fe alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 432: 71-83.

[2] LIU Zheng, HU Yong-mei. Effect of yttrium on microstructure in

semi-solid A356 Al alloy[J]. Rare Metals, 2008, 27(5): 536-540.

[3] XU C L, JIANG Q C, YANG Y F. Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al-Si alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 422: L1-L4.

[4] LIU Xiao-mei, LIU Zheng, HU Yong-mei. Research on effect of La on microstructure in semi-solid A356 alloy[J]. Advanced Material Research, 2010, 139/141: 693-697.

[5] FENG P F, TANG J L. Influences of preparation conditions and melt treatment procedures on melt treatment performance of Al-5Ti-B and Al-10Sr master alloys[J]. J Mater Sci Technol, 2006, 22(1): 50-54.

[6] SEBAIE O E, SAMUEL A M, SAMUEL F H, DOTY H W. The effects of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the eutectic Si particle characteristics of A319.1, A356.2 and A413.1 Al-Si casting alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 480: 342-355.

[7] TSAI Y C, CHOU C Y, LEE S L, LIN C K, LIN J C, LIM S W. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487: 157-162.

[8] HOSSEINIFAR M, MALAKHOV D V. The sequence of intermetallics formation during the solidification of an Al-Mg-Si alloy containing La[J]. Metall and Mater Trans A, 2011, 42: 825-832.

[9] NOGITA K, YASUDA H, YOSHIYA M, MCDONALD S D, UESUGI K, TAKEUCHI A, SUZUKI Y. The role of trace element segregation in the eutectic modification of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 489: 415-420.

[10] 徐 维, 赵宝荣, 高 平. 混合稀土加入量对 A356 合金组织及性能的影响研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(1): 48-51.

XU Wei, ZHAO Bao-rong, GAO Ping. Study of effect of quantity of accession of rare earth on the structure and properties of A356 alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(1): 48-51.

[11] 唐小龙, 彭继华, 黄芳亮, 许德英, 杜日升. 混合稀土含量对 A356 铝合金组织结构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(11): 2112-2117.

TANG Xiao-long, PENG Ji-hua, HUANG Fang-liang, XU De-ying, DU Ri-sheng. Effect of mass fraction of mischmetal addition on microstructures of A356 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(11): 2112-2117.

[12] LIU Zheng, HU Yong-mei, LIU Xiao-mei. Research on refining mechanism of yttrium on primary α -Al in semi-solid Al alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 23(4): 277-284.

[13] LIU Zheng, MAO Wei-min, ZHAO Zhen-duo. Effect of pouring temperature on semi-solid slurry of A356 Al alloy prepared by weak electromagnetic stirring[J]. Transactions of Nonferrous

- Metals Society of China, 2006, 16(1): 71–76.
- [14] LIU Zheng, WANG Fu-yong, CAO Kai, XU Hong-biao, HUANG Mei-yan. Application of frequency conversion in preparation of semisolid A356 alloy slurry[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 430/432: 886–889.
- [15] 刘 政, 胡咏梅. 稀土细化剂对 ZL101 半固态组织影响的研究[J]. *铸造*, 2008, 57(6): 596–599.
LIU Zheng, HU Yong-mei. Effect of RE grain-refiner on microstructure of semi-solid ZL101 Al alloy[J]. *Foundry*, 2008, 57(6): 596–599.
- [16] 郑志强, 熊新根, 易荣喜, 王 丽, 裴志昆. 稀土元素在 ZL101 合金中的偏聚状态及对 α 相生长的影响[J]. *有色金属*, 2010, 62(1): 6–9.
ZHENG Zhi-qiang, XIONG Xin-gen, YI Rong-xi, WANG Li, PEI Zhi-kun. Asymmetry distribution of rare earth element on ZL101 and influence on α solidification[J]. *Nonferrous Metals*, 2010, 62(1): 6–9.
- [17] 张秀梅, 史志铭, 张瑞英. 混合稀土变质对 ZL101 铝合金组织和性能的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2011, 39(5): 63–66.
ZHANG Xiu-mei, SHI Zhi-ming, ZHANG Rui-ying. Effect of mixed rare-earth modification on microstructure and properties of ZL101 aluminum alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2011, 39(5): 63–66.
- [18] REISI M, NIROUMAND B. Effects of stirring parameters on rheocast structure of Al-7.1wt% Si alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 470: 413–419.
- [19] 关志成, 苏华锋, 贾志东. 通电空心线圈系统产生的磁场分析[J]. *高压电技术*, 2009, 35(11): 2745–2740.
GUAN Zhi-cheng, SU Hua-feng, JIA Zhi-dong. Analysis on magnetic field distribution generated by axisymmetric hollow coils systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(11): 2745–2740.
- [20] 王 晶, 李培杰, 何良菊, 弭光宝, 钟约先. 电磁搅拌对 A356 合金熔体结构及其凝固行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(12): 2090–2098.
WANG Jing, LI Pei-jie, HE Liang-ju, MI Guang-bao, ZHONG Yue-xian. Influence of electromagnetic stirring on structure of A356 melt and its solidification behavior[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(12): 2090–2098.
- [21] 刘 政, 许鹤君. 电磁搅拌时间对半固态 A356 合金凝固组织的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2012, 32(9): 828–832.
LIU Zheng, XU He-jun. Effect of electromagnetic stirring time on microstructure of semisolid A356 alloy[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloy*, 2012, 32(9): 828–832.
- [22] JULIUS C S, MARTIN P. Reassessment of the binary aluminum-titanium phase diagram[J]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2006, 27(3): 255–277.
- [23] 孝云祯, 马宏声, 路贵民, 刘劲波. Al-Ti-B 晶粒细化合金中的有效形核相[J]. *中国有色金属学报*, 1997, 7(3): 137–139.
XIAO Yun-zhen, MA Hong-sheng, LU Gui-min, LIU Jin-bo. Effective nucleation particles in grain refining of Al-Ti-B master alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(3): 137–139.

(编辑 李艳红)