

文章编号:1674-9669(2017)05-0076-07
DOI: 10.13264/j.cnki.ysjksx.2017.05.011

电磁搅拌方式和稀土对半固态 A356 合金凝固组织的影响

陈涛^{1a}, 刘政^{1b}, 陈志平^{1b}, 张嘉艺²

(1. 江西理工大学, a.材料科学与工程学院; b.机电工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 中南大学材料学院, 长沙 410083)

摘 要:通过双向电磁搅拌和稀土元素制备了半固态 A356 铝合金浆料. 利用 OM、XRD 和 SEM 研究磁场频率 30 Hz 搅拌 12 s 时, 无稀土、单一稀土 0.5 %Ce(质量分数, 下同)、混合稀土 0.3 %La+0.2 %Yb 以及电磁搅拌方式(单向连续搅拌、双向连续搅拌、双向间歇搅拌)对初生相形貌的影响. 结果表明: 在控制稀土等同总百分含量下, 混合稀土对凝固组织优化程度大于单一稀土和无稀土, 初生相平均等积圆直径和形状因子达到 36.4 μm 、0.82; 在此基础上进一步对熔体施加不同搅拌方式处理, 试验发现双向连续搅拌作用液态熔体形成了强烈的紊流和惯性冲击, 加快了凝固体系的质量传输热量传递, 晶粒尺寸和形貌相较于单向连续搅拌、双向间歇搅拌更加细小圆整.

关键词:A356 铝合金; 双向电磁搅拌; 稀土细化; 凝固组织

中图分类号: TG146; TG244 **文献标志码:** A

Effect of electromagnetic stirring way and rare earth on solidification structure of semi-solid A356 alloy

CHEN Tao^{1a}, LIU Zheng^{1b}, CHEN Zhiping^{1b}, ZHANG Jiayi²

(1a. School of Material Science and Engineering; 1b. School of Mechanical and Electronic Engineering,
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Material Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The slurry of semi-solid A356 aluminum alloy was prepared by the mode of two-way electromagnetic stirring, combined with rare earth elements. The effects on its morphology of primary phase were investigated in the way that no rare earth, single rare earth 0.5 %Ce (mass fraction, similarly hereinafter) and mixed rare earth 0.3 %La+0.2 % Yb were applied to be stirred for 12 s in electromagnetic stirring modes (one-way continuous stirring, two-way continuous stirring, and two-way intermittent stirring) in the magnetic field with a frequency of 30 Hz by the ways of OM, XRD and SEM. The results indicate that when the total percentage content of RE is the same, mixed RE is better than the other two in optimizing the solidification microstructure of the alloy with the average of the equal-area-circle diameter and shape factor of the primary phase reaching 36.4 μm and 0.82. On the basis of this, the melt was treated with different mixing methods. This experiment shows that the strong turbulence and inertial impact are formed by two-way continuous stirring, and then accelerate the mass and heat transfer in the solidifying system, in which the size and morphology of grains are more finer and round compared to one-way continuous stirring and two-way intermittent stirring.

Keywords: A356 aluminum alloy; two-way electromagnetic stirring; RE refining; solidification microstructure

收稿日期: 2017-04-28

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(20142bab206012);
江西省教育厅科技资助项目(GJJ14407)

通信作者: 刘政(1958-), 男, 教授, 博导; 主要从事金属凝固控制、稀土在轻合金中的应用等方面的研究; Email: liukk66@163.com.

合金凝固时施加电磁场可增强熔体的流动特性,提升热量的散失速率,促使温度场、溶质场、流场变得均匀化^[1-3]。然而文献[4]研究指出当合金仅在磁场作用时,晶粒的形貌和尺寸还存在区域性差异,有待细化和优化。稀土作为合金中重要的添加元素且其具有独特的物化性质,文献[5-7]研究表明,添加适量稀土元素能够净化熔体、细化枝晶和增强组织均匀性。因此,在电磁场下充分发挥稀土元素的改性作用,是一种制备高品质合金材料可行的技术途径。

当前,研究者对电磁场与稀土元素复合作用下凝固组织的演化机制进行了细致研究^[8-9]。利用低过热度浇注和电磁搅拌复合技术制备金属浆料时,探究熔体的凝固行为,表明初生相 α -Al 的形态和尺寸发生了明显改变^[10]。当添加微量单一稀土元素时,稀土与金属元素可形成熔点与热稳定性较高的稀土化合相,在电磁搅拌作用下弥散分布于初生晶粒的晶界,从而抑制了晶界扩展和晶粒的生长^[11]。另外,有研究指出^[12]当熔体中摄入适量混合稀土时,其细化变质效果大于单一稀土。因此,从上述研究工作中可知,电磁场下合金熔体中摄入适量稀土元素,能够使凝固组织细化已成为共识。然而,当前在研究电磁场对凝固组织作用机制时,所施加的搅拌方式主要是连续单向式的,虽有研究者探究了在恒定总搅拌时间下,施加不同磁场频率时,搅拌方式对凝固组织的影响,但其依旧属于单向搅拌范畴^[13]。施加双向电磁搅拌对初生相形貌演化规律影响的研究报道还不多见,并且,虽利用稀土元素细化晶粒的研究工作较多,但其主要集中在金属液自然对流与重力浇注范围,双向电磁搅拌强对流强剪切凝固环境下,应用混合稀土多重细化效应复合强化、细化合金材料的研究工作较少,有待进一步探究。

为此,试验中对 A356 合金熔体施加双向电磁搅拌处理,并在合金凝固前添加单一稀土(0.5 %Ce)、混合稀土(0.3 %La+0.2 %Yb)进行细化变质,探究稀土元素和电磁搅拌方式对铝合金凝固组织的影响。

1 实 验

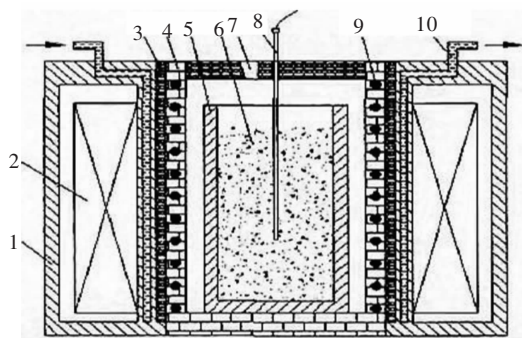
试验材料为 A356 铝合金,X 荧光光谱仪分析其化学成分如表 1 所列。经 DTA (Differential Thermal Analysis)测得合金的液相线温度为 615.3 ℃,固相线温度为 577.5 ℃。应用低过热度浇注和双向电磁搅拌技术制备合金浆料。双向电磁搅拌装置的主要技术参数有:电磁搅拌频率 0~50 Hz 范围内可调;电磁搅拌功率 1.5 kW;电磁搅拌方式采用单向连续搅拌、双

向连续搅拌、双向间歇搅拌(间歇时间 2 s),其中双向间歇搅拌通过电磁调频控制器与自行编辑的程序相结合来实现,装置结构示意图如图 1 所示。为了控制搅拌线圈正常工作温度,在保温炉与搅拌线圈间安置绝缘耐火材料和冷却水套。铝锭经预热后置于 720 ℃的熔炼炉内进行熔炼,熔化后加入覆盖剂(50 % NaCl+50 %KCl)防止熔体在加热过程中被氧化,保温 10 min 处理后进行 2~3 次除气除渣精炼。稀土 Ce 和混合稀土 La+Yb 分别以 Al-15 %Ce、Al-20 %La+Al-5 %Yb 中间合金形式在炉温 780 ℃时加入熔体中,以最终合金中含 0.5 %Ce、0.3 %La+0.2 %Yb 为基准控制其加入量,待中间合金充分熔化后,将熔体温度降至 620 ℃,启动旋转磁场搅拌 12 s,随后在取样口用取样勺取样。并将其置于 590 ℃的箱式电阻炉内进行等温保温 10 min。保温结束后取出浸入水中进行水淬处理。

表 1 试验用 A356 铝合金化学成分/(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of A356 aluminum alloy in test/(mass fraction,%)

合金元素	Mg	Si	Fe	S	Cu	Mn	Zn	Ti	Zr	Al
质量分数	0.33	7.14	0.135	0.011	0.002	0.012	0.021	0.021	0.004	余量



1. 搅拌壳体; 2. 感应线圈; 3. 隔热层; 4. 保温炉; 5. 坩埚; 6. 熔体; 7. 取样口; 8. 热电偶; 9. 电阻丝; 10. 冷却水套。

图 1 双向电磁搅拌装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure of two-way electromagnetic device

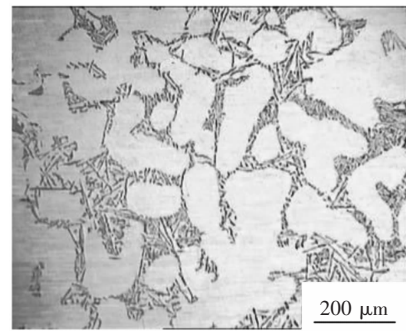
依据作者前期的研究结果^[14-16]:在工频范围内,30 Hz 是制备细晶浆料适宜的电磁参数,且短时搅拌已能够使树枝晶细化。故磁场频率设置为 30 Hz,双向连续搅拌 12 s。试验在 30 Hz 下探讨混合稀土(0.3 %La+0.2 %Yb)、单一稀土(0.5 %Ce)、无稀土;以及在混合稀土细化作用下不同电磁搅拌方式对凝固组织的影响,试样经水磨、抛光并利用 0.5 %HF 水溶液进行腐蚀。随后采用 ZEISS AXIOSKOP2 型光学

显微镜(OM)进行组织分析,利用 D&ADVANCE 型 X 射线衍射仪和 XL30W/TMP 型 SEM 对添加稀土与未添加稀土的试样进行物相检测和能谱分析. 利用 Image-pro-plus、Excel 对初生相的平均等积圆直径 D 和平均形状因子 F 进行计算. $F=4\pi A/P^2$; $D=2(A/\pi)^{1/2}$. 其中 P 为初生相的平均周长; A 为初生相的平均面积. F 的数值介于 0~1,越趋近于 1 则表明初生晶粒呈现近球形,此时凝固组织形貌较佳、性能较优.

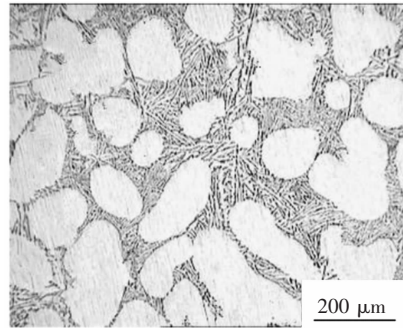
2 实验结果与分析

2.1 双向连续电磁搅拌下稀土元素对合金凝固组织的影响

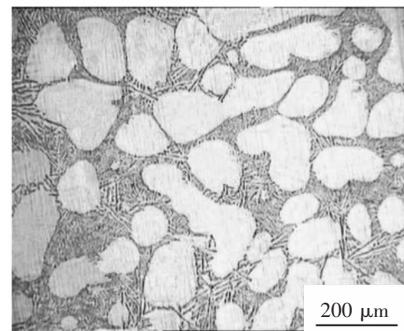
图 2 所示为电磁搅拌下无稀土、单一稀土(0.5 % Ce)和混合稀土(0.3 % La+0.2 % Yb)时初生相的形貌. 图 3 所示为初生相平均等积圆直径和形状因子柱状图. 从图 2 和图 3 中可看出,无稀土时初生 α -Al 为长棒状晶和蔷薇状晶(见图 2(a)). 由图 2(b)可知,稀土元素 Ce 加入使得初生相的形貌由树枝状演变为类球状和球状,尺寸细化. 平均等积圆直径由无稀土时的 53.2 μm 降至 38.2 μm 、形状因子从 0.62 增至 0.75. 稀土 Ce 优化 α 相的作用机理可理解为: 铝熔体在低过热度条件下浇注且进行适时等温保温处理. 形成了一个相对稳定的热环境. 一方面,稀土元素 Ce 与铝合金已发生共晶反应,反应产物 α -Al 和 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$, 两者能够作为有效形核核心和形核衬底^[5]. 另一方面,稀土 Ce 在与 Al 形成铝稀土化合物之前,部分 Ce 以质点形式弥散分布于合金熔体中,或者在晶粒的界面前沿富集. 使得原子的扩散迁移受阻,从而使晶粒尺寸细化. 图 2(c)所示为添加混合稀土时初生相的形貌. 从图 2(c)中可看出,初生相的尺寸在混合稀土作用下相较于单一稀土得到了进一步优化. 平均晶粒直径降至 36.4 μm 、形状因子增至 0.82. 原因在于: 混合稀土共晶反应产物作为形核质点时,晶粒形核、长大过程中产生了比单一稀土更多的有效核心,晶核数量增加、晶核密度更加密集. 另外,依据错配度理论可知,混合稀土与铝合金反应生成的共晶产物 YbAl_3 的错配度为 3.7 %,小于单一稀土 Ce 与铝合金共晶产物 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 的 5.39 %,混合稀土另一共晶产物 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 的错配度为 35.5 %,晶格错配度大于有效错配度(15 %),因此不能作为有效核心质点,但其不固溶于合金中,富集于初生相的晶界和相界. 使得单位体积熔体内部每个初生相的生长空间缩小,有效地抑制了初生相的生长. 因此,初生相在混合稀土细化作用下优化程度高于单一稀土.



(a) 0 %RE



(b) 0.5 %Ce



(c) 0.3 %La+0.2 %Yb

图 2 磁场频率 30 Hz 双向连续搅拌有无稀土以及多元稀土下半固态 A356 合金初生相的形貌

Fig. 2 Morphologies of primary α phase in semisolid A356 alloy under absence of rare earth or multiple rare earth with magnetic field frequency 30 Hz

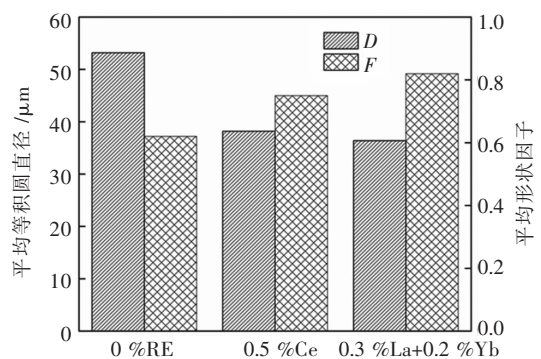


图 3 磁场频率 30 Hz 双向连续搅拌有无稀土以及多元稀土下半固态合金初生相的平均等积圆直径和形状因子

Fig. 3 Average equal-area circle diameter and average shape factor of primary α phase in semisolid A356 alloy under absence of rare earth or multiple rare earth with magnetic field frequency 30 Hz

对 A356 铝合金、A356+0.5 %Ce、A356+0.3 %La+0.2 %Yb 做 XRD 分析,结果如图 4 所示,由图 4 可知,A356+0.5 %Ce 图谱除了存在与 A356 合金图谱中相同的 α -Al、 Mg_2Si 和 Si 相的衍射峰外,还存在 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 相的峰,在 A356+0.3 %La+0.2 %Yb 的衍射图谱中则存在 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相和 YbAl_3 相衍射峰.由此推断稀土 Ce 和混合稀土 La+Yb 在合金中形成铝稀土化合相.结合前述稀土化合相错配度计算结果、图 2 初生相的形貌演化以及图 4 的 XRD 分析结果,可得出初步结论:混合稀土对 α -Al 相细化效果强于单一稀土.为了进一步明确混合稀土、单一稀土与铝合金生成了 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 、 YbAl_3 和 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相.对 A356+0.5 %Ce

和 A356+0.3 %La+0.2 %Yb 试样分别作 EDS 点扫(见图 5(a)、(b)中箭头),结果如图 5 所示.结合图 4 和图 5 可知,在 A356+0.5 %Ce 和 A356+0.3 %La+0.2 %Yb 合金中生成了 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 、 YbAl_3 和 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相.

2.2 电磁搅拌方式对合金凝固组织的影响

图 6 所示为铝-多元稀土合金施加不同电磁搅拌方式时,初生相的形貌.由图 6 可见,单向连续搅拌时,在电磁力的搅拌作用下,发达树枝晶受到液流强力冲刷,枝晶尖端断裂、破碎成长条状枝晶,平均等积圆直径为 $46.2\text{ }\mu\text{m}$ 、形状因子为 0.71 (见图 6(a)).图 6(b)所示为双向间歇搅拌下初生相的形貌,初生相形貌由发达枝晶、粒状晶转变为细小的球晶和椭圆

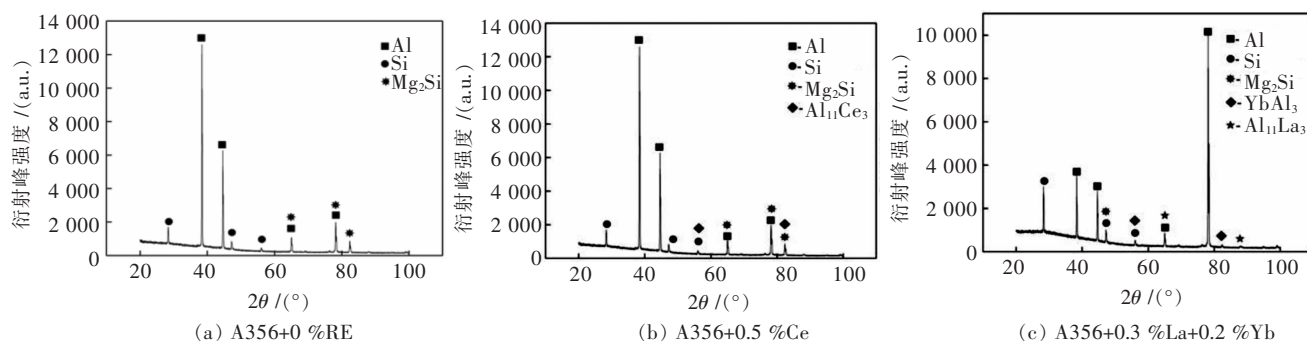


图 4 半固态 A356 合金与 A356-RE 合金的 XRD 结果

Fig. 4 Analysis of XRD in semisolid A356 alloy and semisolid A356-RE alloy

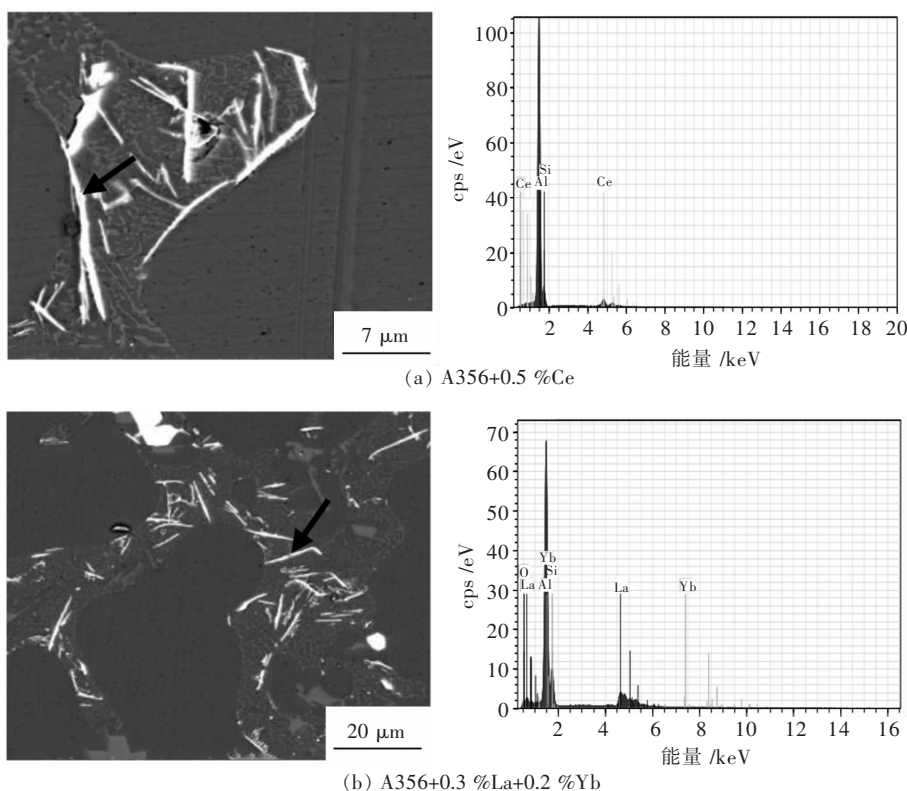
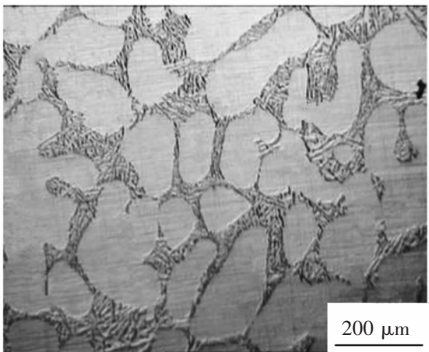


图 5 半固态 A356-RE 合金的 EDS 谱

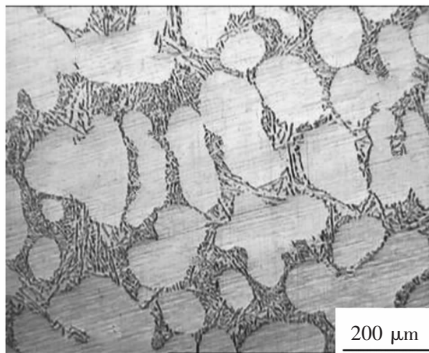
Fig. 5 EDS spectra of semi-solid A356-RE alloy

状晶. 树枝晶已在组织中消失, 组织得以细化改善. 平均等积圆直径为 42.5 μm 、形状因子 0.78. 图 6(c) 所示为双向连续电磁搅拌下初生 α 相的形貌, 晶粒的形态和尺寸相较于单向连续搅拌、双向间歇搅拌得到了明显优化, 此时初生 α 相主要以细小圆整的球晶为主. 平均晶粒直径为 36.4 μm 、形状因子 0.82. 金相组织表明, 双向连续搅拌制备的浆料相比于其他 2 种方式下品质更加优异. 原因在于: 单向连续搅拌时熔体随磁场一起同向运动、相对运动趋势较小、流场

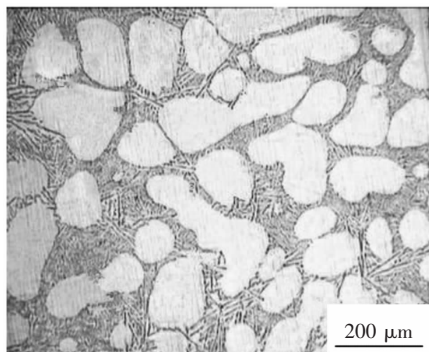
变化不明显. 而双向连续电磁搅拌时磁场和熔体间存在剧烈的相对运动, 晶粒在液流的冲刷作用下, 碰撞剪切几率增大, 增强了细化程度. 此外, 间歇搅拌时, 熔体存在短时停留状态. 导致晶粒的细化程度有所降低. 图 7 所示为不同搅拌方式下初生 α 相平均等积圆直径和形状因子曲线图. 从图 7 中可得出如下规律: 双向连续搅拌下初生相的平均等积圆直径和形状因子较单向连续搅拌、双向间歇搅拌都得到了改善, 表明该搅拌方式更有利于获得晶粒尺寸细小的半固态浆料.



(a) 单向连续搅拌



(b) 双向间歇搅拌



(c) 双向连续搅拌

图 6 磁场频率 30 Hz 不同电磁搅拌方式下半固态 A356-多元稀土合金初生相的形貌

Fig. 6 Morphologies of primary α phase in semisolid A356-multi element RE alloy under different electromagnetic stirring ways with magnetic field frequency 30 Hz

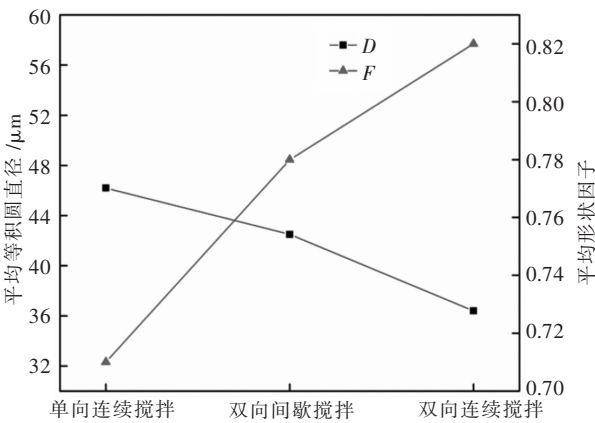


图 7 磁场频率 30 Hz 不同电磁搅拌方式下半固态 A356-多元稀土合金初生相的平均等积圆直径和形状因子

Fig. 7 Average equal-area circle diameter and average shape factor of primary α phase in semisolid A356-multi element RE alloy under different electromagnetic stirring ways with magnetic field frequency 30 Hz

3 讨论

3.1 双向电磁搅拌下稀土元素对凝固组织细化的作用机制

图 2 所示的金相组织表明铝合金凝固过程加入适量稀土元素形成了热稳定性较高的铝稀土化合相, 依据错配度理论^[7], 其可作为形核质点且能有效地细化晶粒. 当施加单向连续电磁搅拌、双向间歇搅拌时, 搅拌强度较低不足以使铝稀土化合相完全均匀分布于合金中. 并且依据金属凝固理论, 初生相 α -Al 大量形核需在大的过冷度条件下进行, 单向连续电磁搅拌、双向间歇搅拌终了后熔体的温度处于较高位置, 晶粒的形核过程在高温阶段进行, 则初生相将以粗大的树枝晶形式结晶, 形成了尺寸粗大的树枝晶 (见图 2(a)、图 2(b)). 而双向电磁搅拌依靠方向周期性变化的电磁力对熔体进行双向搅拌, 合金液流在双向快速剪切作用下混合更加充分. 促使稀土元素

随金属液流动,分布将更加弥散.从而有效地发挥稀土元素对晶粒形貌和尺寸的细化效应.另外,依据晶粒形核匹配原则^[18],可知当铝稀土化合相作为有效异质形核质点时,混合稀土相较于无稀土和单一稀土形核质点数目更多.因此,初生相的细化程度将更大.此外从稀土元素物化特性来看,由于稀土元素原子半径大于 Al 和合金中其他元素的半径,在凝固过程中扩散迁移速率更小,从而导致稀土元素主要分布于晶界和相界,可能在晶粒的表面形成一薄层稀土元素富集层,一定程度上抑制了晶粒的生长.因此,混合稀土抑制作用较单一稀土更加明显,从而使初生相的尺寸得到进一步细化(见图 2(c)).

3.2 双向电磁搅拌对凝固组织细化的作用机制

文中 2.2 章节中研究表明双向连续搅拌获得了形貌圆整、尺寸细小的初生相 α -Al,相较于单向连续搅拌、双向间歇搅拌能更好地使晶粒球化、细化.当施加电磁场时,初生相的形态和尺寸与熔体受到扰动程度密切相关,扰动程度的强弱将对合金元素的扩散、迁移和分布;熔体的流动状态以及对流混合程度、凝固体系质量动量传输速率、热量的传递方式及散失速率及晶粒形核长大的热力学和动力学条件等产生重要的影响.通常人们以电磁力的搅拌效果来表征合金液流受到扰动的强弱.单向电磁搅拌时,由于熔体和磁场间协同转动,两者间的转速差趋近于零;并且由于磁感应强度梯度分布诱导的电流集肤效应显著,导致电磁力搅拌作用衰减.因此,初生相 α -Al 的形貌呈树枝晶和蔷薇状晶(见图 6(a)).而双向连续搅拌可避免熔体整体旋转,实现各部分局部搅拌.此搅拌方式有效地消除熔体相对静止状态,通过惯性作用使金属液一直处于紊流状态,在相同的剪切速率下形成了强烈的紊流,加速了枝晶尖端的钝化,促使初生相球化^[19].温度场方面:双向连续搅拌使金属液流动更加剧烈,温度梯度进一步减小,凝固界面前沿成分过冷降低.并且周期性的熔体对流使 Joule 热效应较单向连续搅拌、双向间歇搅拌更加明显且适度.一方面,为形核提供了热力学条件促使晶粒的形核过程能够有序进行.另一方面,在 Joule 热效应的作用下熔体中许多细小的热起伏加快了枝晶的熔蚀速率,细化了晶粒尺寸.此外,双向连续搅拌下熔体的运动惯性产生很大的速度差和惯性冲击,液态金属受周期性的多变应力和运动环境的影响,其运动形态和运动轨迹具有多变性,从而得到了全方位搅拌,增强了电磁搅拌效果^[20].流场方面:双向连续搅拌引起液态金属强制流动,使初生相形核析出的溶质在较短时间内迁移分散到熔体的每一处,不会在晶粒界面堆积.因此,

浆料从宏观上看是溶质成分均匀的.此外,已有研究发现初生相 α -Al 除了随液态金属强制流动外,自身长大过程中还存在自旋运动^[21],固液界面的温度场和溶质场处于瞬时变化状态,晶粒的各方向可保持同性生长.并且双向搅拌下自旋运动更加显著,促进了初生相的细化.得到了如图 6(c)所示圆整的球状晶.

另外,从枝晶臂折断机制^[22]分析电磁搅拌对凝固组织细化的作用机制,可知凝固过程中电磁力搅拌使得枝晶的二次枝晶臂与枝晶主轴连接处受到剪切力的作用,当剪切力超出了枝晶臂承载的最大剪切强度时,导致枝晶分支从母体分离并随液流流动进入熔体中心.双向连续搅拌下枝晶受到的剪切强度较单向连续搅拌、双向间歇搅拌更强,破碎枝晶数量增多,大量块状枝晶在高速液流作用下碰撞逐渐钝化,弥散分布于熔体中,成为有效质点.当晶粒数目增加时,将缩小初生相的生长空间.此外,从凝固形态学角度来分析晶粒球化的实质是^[23]:失稳到稳态的转变以及稳态维持的过程,在双向连续搅拌下金属流剪切冲刷枝晶,使凝固界面突出的枝晶熔蚀,界面稳定性大大增强.促进了初生相球化稳态的维持,有利于初生相 α -Al 在凝固始终保持球状形貌.

综上所述,通过分析稀土元素和电磁搅拌方式对初生相形貌、尺寸的作用机制.试验发现,在磁场频率 30 Hz、混合稀土和双向连续搅拌工艺条件下能够使电磁搅拌凝固系统达到较佳的电磁特效,此工艺条件下制备的合金浆料组织形态圆整、晶粒尺寸细小,可满足优质合金材料的组织要求.

4 结 论

1) 磁场频率 30 Hz 双向连续搅拌条件下单一稀土 (0.5 %Ce) 以及混合稀土 (0.3 %La+0.2 %Yb) 都能够有效地细化晶粒组织,控制稀土元素同等总百分含量时,混合稀土对初生相 α -Al 的细化程度大于单一稀土.初生 α 相的平均等积圆直径从 38.2 μm 降至 36.4 μm ;形状因子从 0.75 增至 0.82.

2) 磁场频率 30 Hz 混合稀土作用下,施加单向连续搅拌、双向间歇搅拌、双向连续搅拌制备金属浆料时,双向连续搅拌相较于其他 2 种搅拌方式,可使金属液处于强烈紊流状态,枝晶间碰撞剪切强度和几率增大.熔体的运动惯性形成惯性冲击,加快了凝固体系传质传热行为,细化了初生相.平均等积圆直径达到最小值 36.4 μm 、形状因子为 0.82.

3) 双向电磁搅拌和稀土元素细化处理获得了凝固组织形貌呈非枝晶化、球化和均一化的合金浆料,实验

优质半固态合金浆料制备工艺条件为:磁场频率 30 Hz、双向连续搅拌 12 s 和混合稀土复合作用。

参考文献:

- [1] JUNG B I, JUNG C H, HAN T K, et al. Electromagnetic stirring and Sr modification in A356 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1): 69–73.
- [2] KANG C G, LEE S M. Development of a new rheology forming process with a vertical-type sleeve with electromagnetic stirring[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(5): 462–473.
- [3] NAFISI S, EMADI D, SHEHATA M T, et al. Effects of electromagnetic stirring and superheat on the microstructural characteristics of Al–Si–Fe alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 432A: 71–83.
- [4] CHUNG I, BOLOURI A, KANG C. A study on semisolid processing of A356 aluminum alloy through vacuum-assisted electromagnetic stirring[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1): 237–245.
- [5] EID M A, MAHDY A A, EID K A, et al. Behaviour of chemically modified bagasse in sorption of rare earth elements[J]. Journal of Entific and Industrial Research, 2007, 66(2): 162–169.
- [6] LIU Z, LUO H L, CHEN Q C. The refinement mechanism of La–Ce binary alloy on primary α phase in A356 alloy under electromagnetic stirring [J]. Solid State Phenomena, 2014, 217(3): 340–346.
- [7] LI Q L, XIU T D, ANY F L A, et al. Effect of rare earth cerium addition on the microstructure and tensile properties of hypereutectic Al–20 %Si alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 562(1): 25–32.
- [8] KAUR P, DWIVEDI D K, PATHAK P M. Effects of electromagnetic stirring and rare earth compounds on the microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al–Si alloys[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63 (1): 415–420.
- [9] LI J H, SUETSUGU S, TSUNEKAWA Y. Refinement of eutectic Si phase in Al–5Si alloys with Yb additions[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(2): 669–681.
- [10] LIU Z, MAO W M, ZHAO Z D. Manufacture technique of semi-solid slurry of hypoeutectic Al–Si alloy by low superheat pouring and weak electromagnetic stirring[J]. China Foundry, 2006, 3(2): 102–107.
- [11] 胡桂云, 陈送义, 姜慧丽, 等. 稀土 Ce 对 7A52 铝合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1372–1382.
- [12] 唐小龙, 彭继华, 黄芳亮, 等. 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.
- [13] 刘政, 周翔宇. 分级电磁搅拌对半固态 Al–Cu 合金凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 49–57.
- [14] 刘政, 张嘉艺, 余昭福. 电磁场作用下中铝合金熔体流动的混沌特征的仿真与分析[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3026–3032.
- [15] 刘政, 湛庆春, 许鹤君, 等. 稀土 Y 在电磁搅拌条件下对半固态 ZL101 铝合金初生 α 相的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2013, 4(6): 92–98.
- [16] 刘政, 黄美艳, 柯婷婷. 稀土 La 对半固态 A356 初生相细化机制的研究[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(5): 24–28.
- [17] BRAMTUFF B. The effect of carbide and nitride additions on the heterogeneous nucleation behavior of liquid iron[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1970, 1(7): 2958–2958.
- [18] 刘政, 湛庆春, 郭颂, 等. A356–RE 合金中稀土铝化合物/初生 α 相界面二维错配度的计算及验证[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(4): 859–865.
- [19] 冯鹏发, 唐靖林, 李双寿, 等. 制浆–成形分离式铝合金变成形技术[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(2): 239–247.
- [20] ZHANG Z F, CHEN X R, XU J, et al. Numerical simulation on electromagnetic field, flow field and temperature field in semisolid slurry preparation by A–EMS[J]. Rare Metals, 2010, 29 (6): 635–641.
- [21] 祁明凡, 康永林, 周冰, 等. 强制对流搅拌流变压铸 AZ91D 镁合金的组织与性能[J]. 金属学报, 2015, 51(6): 668–676.
- [22] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metallurgical Transaction A, 1991, 22(5): 957–981.
- [23] POOLE G M, HEYEN M, NASTAC L, et al. Numerical modeling of macrosegregation in binary alloys solidifying in the presence of electromagnetic stirring [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(5): 1834–1841.