

La 对再生 A356 合金凝固组织及力学性能的影响

张全庆 李 振 王复栋 郭丽莉 蔡 佳 张 森 魏新颖
(营口理工学院材料科学与工程学院)

摘 要 采用直读光谱仪、金相显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪、电子万能拉伸试验机和 JMatPro12.4 软件研究了 La 含量对 A356 铝合金凝固组织的影响。结果表明,A356 合金的平衡组织主要由 α -Al、共晶 Si、 Mg_2Si 、 $\beta-Al_9Fe_2Si_2$ 、 $Al_{11}La_3$ 和 $Al_8FeMgSi_6$ 相组成。随 La 含量由 0 增加至 0.5%,A356 合金中的 α -Al 组织几乎全部由粗大枝晶转变为等轴晶和类等轴晶,抗拉强度由 149 MPa 增加至 182 MPa,伸长率由 4.8%增加至 7.7%。

关键词 A356 合金;La;凝固组织;抗拉强度;伸长率
中图分类号 TG146.21;TF805.2 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of La on Solidification Structure and Mechanical Properties of Regenerated A356 Alloy

Zhang Quanqing, Li Zhen, Wang Fudong, Guo Lili, Cai Jia, Zhang Miao, Wei Xinying
(Yingkou Institute of Technology, College of Materials Science and Engineering)

Abstract: The effect of La addition on the solidification structure of A356 aluminum alloy was investigated by direct reading spectrometer, metallographic microscope, scanning electron microscope, X-ray diffractometer, electronic universal tensile tester and JMatPro12.4 software. The results indicate that the equilibrium structure of A356 alloy is mainly composed of α -Al, eutectic Si, Mg_2Si , $\beta-Al_9Fe_2Si_2$, $Al_{11}La_3$ and $Al_8FeMgSi_6$ phases. With the increase of La content from 0 to 0.5%, the structure of α -Al in A356 alloy is almost completely transformed from coarse dendrite to equiaxed and equiaxed-like grain, where the tensile strength is increased from 149 MPa to 182 MPa, and the elongation is increased from 4.8% to 7.7%.

Key Words: A356 Alloy, La, Solidification Structure, Tensile Strength, Elongation

收稿日期:2022-09-18;**修改稿收到日期:**2023-01-29
基金项目:营口理工学院引进人才科研启动经费资助项目(YJRC202017)
第一作者简介:张全庆,男,1986 年出生,硕士研究生,辽宁营口(115100),E-mail:18810471953@163.com
通信作者:李振,男,1988 年出生,讲师,辽宁营口(115100),E-mail:451794353@qq.com
引用格式:张全庆,李振,王复栋,等. La 对再生 A356 合金凝固组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 404-1 408.
ZHANG Q Q, LI Z, WANG F D, et al. Effects of La on solidification structure and mechanical properties of regenerated A356 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 404-1 408.

[3] 邓鹏,郑旺旺,邓铭瑶,等. 脉冲磁场下原位 Mg_2Si / $Mg-7Al$ 复合材料的组织与性能[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(1): 94-96.

[4] 姜文勇,苏宁,杨晓宇,等.脉冲磁场对 $Al-12.5Mg-6.7Si$ 合金中 Mg_2Si 相的影响[J].特种铸造及有色合金, 2014, 34(5): 449-452.

[5] 李英民,艾秀兰. 电磁搅拌对 Al/Mg_2Si 复合材料宏观偏析的影响[J]. 铸造, 2002, 51(12): 756-758.

[6] 刘飞,尹健,邵琦,等.脉冲磁场对高含量自生 Mg_2Si / $Mg-Al$ 基复合材料凝固组织的影响[J].材料导报, 2019, 33(2): 293-297.

[7] WANG D, ZHANG H, GUO C, et al. Effect of cooling rate on growth and transformation of primary Mg_2Si in $Al-Mg_2Si$ in situ composites[J]. Journal of Materials Research, 2018, 33: 3 458-3 465.

[8] 曹志强,陈飞,王同敏,等. 高频磁场下制备颗粒增强铝基梯度复合材料[J]. 铸造, 2011, 60(6): 549-553.

[9] 吴晗,周全,王俊,等. 磁场和铸造工艺对 Mg_2Si / Al 复合材料中 Mg_2Si 相的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(6): 656-660.

[10] 李光玉,苏颖超,付宇,等.离心铸造条件对 Mg_2Si / Al 梯度复合材料组织与性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(5): 1 295-1 299.

[11] 谢东原,刘峰,周全,等. 脉冲磁场对石墨型铸造 $Mg-Y-Cu-Zr-Sr$ 合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1 109-1 114.

[12] MANUWONG T, ZHANG W, KAZINCZI P L, et al. Solidification of Al alloys under electromagnetic pulses and characterization of the 3D microstructures using synchrotron X-ray tomography[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2015, A46(7): 2 908-2 915.

[13] 宝磊,贾永辉,王翊,等. 谐波和脉冲磁场在结晶器内的分布和对高纯铜凝固组织的影响[J].铸造, 2020, 69(12): 1 284-1 292.

[14] 梅国宏,张庆军,朱立光,等. 脉冲磁场细化钢材凝固组织的研究进展[J].铸造技术, 2018, 39(11): 2 628-2 631.

[15] 张黎,陈乐平,周全,等. 脉冲磁场对 ZA27 合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 801-805.

[16] 王俊,周全,吴晗,等. 脉冲磁场对 $Al-20Si$ 合金中初生 Si 的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(10): 1 130-1 133.

(编辑:栗万仲)

A356 合金是典型的 Al-Si-Mg 系三元合金,其具有优良的铸造性能,可铸造薄壁和形状复杂的铸件,而且通过热处理可达到较高的强度、良好的塑性和高冲击韧度,因此是汽车铸造铝轮毂的首选材质。随着汽车轻量化的快速发展,汽车制造企业对铝合金轮毂的力学性能提出了更高的要求。因此,如何实现 A356 合金力学性能的进一步提高是研究热点。

大量研究表明,材料的组织对力学性能有显著的影响,通过细化合金的凝固组织可以有效地起到强化材料力学性能的作用^[1-2]。赵艳君等^[3]研究了 Ce 和 La 对 Al-8.5Mg-0.5Mn 合金组织及力学性能的影响。结果表明,随着 Ce 和 La 的加入,A356 合金中 α -Al 粗大树枝晶逐渐向等轴晶发生转变,当 Ce 和 La 加入量分别为 0.55% 和 1.51% 时,合金的抗拉强度达到 229.2 MPa。王红侠等^[4]发现,A356 合金的二次枝晶臂随 La 加入量的增加先减小后增大,在 La 加入量为 0.1% 时, α -Al 的晶粒细化效果最好,二次枝晶臂达到 5.67 μm 。温杨等^[5]在研究 La 对 2024 合金凝固组织及力学性能的影响时发现,随着 La 含量的增加,2024 铝合金的铸态组织逐渐细化,当 La 含量为 0.3% 时,晶粒细化效果最佳,继续提高 La 含量,晶粒将发生粗化,当 La 含量为 0.2% 时,力学性能最佳。李文树等^[6]认为 La、Ce 对 A356.1 合金中初生 α -Al、共晶 Si 和富 Fe 相均有一定的细化变质作用,加入 RE 后,富 Fe 相的长度大幅减小,RE 对富 Fe 相的长大具有显著的抑制作用。洪鑫等^[7]结合 ANSYS 有限元仿真模拟,研究了电磁搅拌下电流突变对半固态 A356 合金凝固组织的影响。结果表明,当控制电磁频率为 25 Hz,突变电流由 2 A 增加到 6 A,初生相的形状因子和平均等积圆直径最佳,分别达到 0.71 和 118 μm 。此外,刘小梅等^[8]、刘政等^[9]研究发现,当浇注温度为 620 $^{\circ}\text{C}$,保温温度为 590 $^{\circ}\text{C}$,保温时间为 10 min,稀土添加量为 0.4%,搅拌时间为 15 s,搅拌频率为 30 Hz 时,半固态 A356 合金的凝固组织细化效果达到最佳,平均形状因子和平均等积圆直径分别为 0.8 和 76.1 μm 。

以上研究表明,添加 La、Ce、Y 等稀土元素或施加外场手段均会对 A356 合金的凝固组织及力学性能有显著的改善效果。目前虽然已有关于外场下通过进一步添加微量稀土元素改善 A356 铝合金凝固组织及力学性能的研究报道,但这些报道多集中于半固态铸造领域^[10-12],关于重力铸造下的相关研究较少。因此,本研究研究了重力铸造下 La 变质对再生 A356 合金凝固组织及力学性能的影响,并进一步探讨其晶粒细化机制,以期为其资源化回收及保级利用提供参考。

1 试验材料及方法

试验原料为再生 A356 铝合金锭、Al-10La 中间合金、精炼剂($\text{NaCl} + \text{KCl} + \text{Na}_6\text{AlF}_3$);试验设备为 JM-A20002 电子天平、热电偶、DD-25 高频感应加热设备、石墨坩埚。

称取 500 g 再生 A356 铝合金置于石墨坩埚中,通过高频感应加热炉将其由室温加热至完全熔化。待合金完全熔化后,加入 Al-10La 中间合金,分别调整合金中 La 含量为 0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 和 0.5%,按 0.15% 比例加入精炼剂并充分搅拌,扒渣后通过热电偶测量铝液温度,当铝液温度降至 680 $^{\circ}\text{C}$ 时,将其浇入预热 100 $^{\circ}\text{C}$ 的 $\phi 12\text{ mm}$ 拉伸试棒金属型中并冷却至室温,每组试验各浇注 3 个试样。

自拉伸试棒平行段相同位置取样,采用 100、200、600、1200 和 2500 目 SiC 砂纸进行磨抛,磨抛结束后在 Metaser v250 磨抛机上采用 3、1 和 0.02 μm 抛光液对试样进行抛光;在 Imager A2m 金相显微镜下观察合金的凝固组织;通过 JMatPro12.4 材料热力学成分设计软件、ZEISS EVO18 扫描电镜、TD3500 X 射线衍射仪观察、分析合金中的析出相情况;通过 QSG750-II 铝镁基直读光谱仪检测合金试样成分,见表 1;采用 WDW3100 微机电子万能试验机根据 GB/T 229.1-2021 进行拉伸试验,其中,拉伸速率为 1.05 mm/min。

表 1 试验 A356 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of experimental A356 alloy %							
序号	w_B						
	Si	Mg	Fe	Ti	Sr	La	Al
1	7.03	0.32	0.161	0.130	0.013	0	余量
2	7.07	0.32	0.155	0.136	0.012	0.102	余量
3	6.98	0.33	0.165	0.136	0.014	0.201	余量
4	7.11	0.32	0.151	0.133	0.013	0.298	余量
5	7.04	0.32	0.158	0.132	0.012	0.397	余量
6	6.96	0.33	0.162	0.132	0.013	0.502	余量

2 试验结果与讨论

2.1 A356 合金中平衡相

图 1 为通过 JMatPro12.4 软件模拟得到的 A356 试验合金凝固过程中析出相含量变化。可以看出,A356 合金的平衡组织主要由 α -Al + Si + Mg_2Si + β -Al₉Fe₂Si₂ + Al₁₁La₃ + Al₈FeMg₃Si₆ 相组成。当合金由浇注温度 680 $^{\circ}\text{C}$ 分别降至 617.23、574.12、571.34、569.87、497.38 和 397.5 $^{\circ}\text{C}$ 时,开始伴随初生 α -Al、共晶 Si、 β -Al₉Fe₂Si₂、Al₁₁La₃、Al₈FeMg₃Si₆ 和 Mg_2Si 相的析出。在合金温度分别降至 566.61、566.61、390.00、

565.68、397.51 和 390 ℃ 时,以上各相的析出量无明显变化,分别为 93.9%、5.54%、0.55%、0.48%、1.22% 和 0.29%。

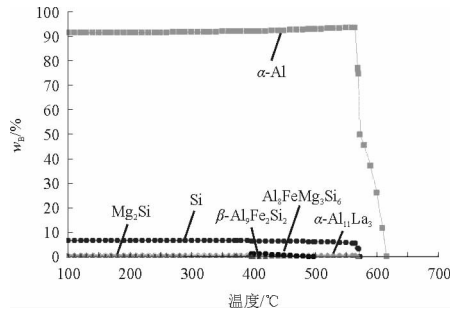


图 1 A356 合金中平衡相情况

Fig.1 Equilibrium phase of A356 alloy

图 2 为 A356 试验合金 XRD 分析结果。结果表明,A356 合金中的物相主要包括 α -Al、共晶 Si、AlSiFe 和 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相,这与 JMatPro12.4 软件预测结果基本一致。另外, Mg_2Si 相可能由于含量较低,同时受设备检测精度的限制,因此在 XRD 分析结果中未发现该相。另外,由于 $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 和 $\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$ 相均主要由 Al、Si、Fe 等元素组成,同时受设备精度的限制,在 XRD 检测结果中识别两相为 AlSiFe 相。

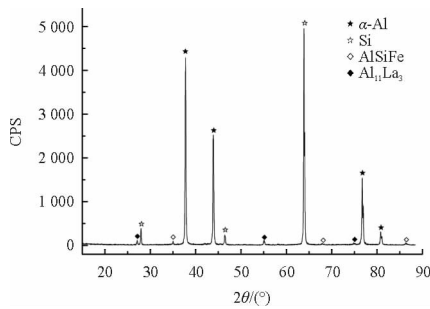
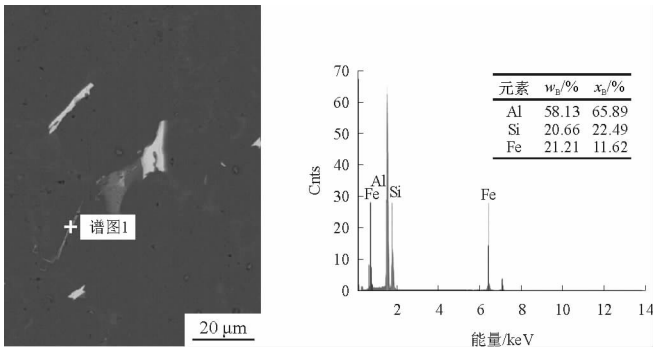


图 2 A356 合金的 XRD 分析结果

Fig.2 XRD patterns of A356 alloy

图 3~图 5 分别为 A356 合金中不同析出相的 SEM 和 EDS 分析结果。结果表明,在 A356 合金中存

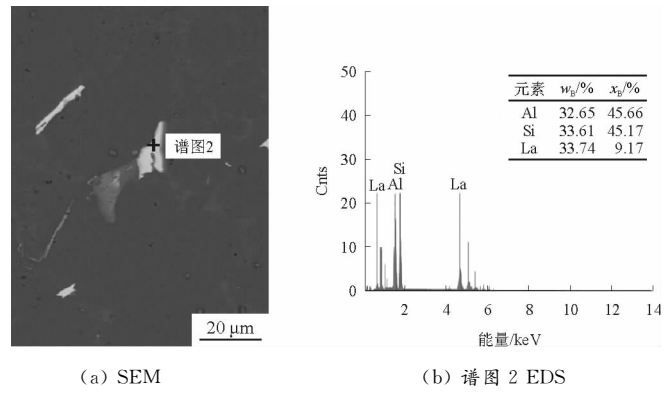


(a) SEM

(b) 谱图 1 EDS

图 3 A356 合金中 $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 相 SEM 形貌及 EDS 分析

Fig.3 SEM morphology and EDS results of $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ phase in A356 alloy

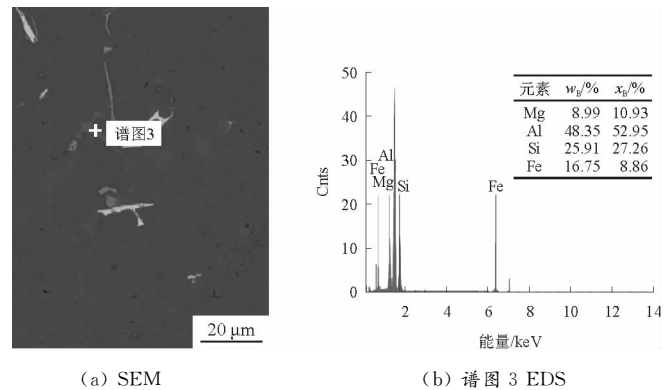


(a) SEM

(b) 谱图 2 EDS

图 4 A356 合金中 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相 SEM 形貌及 EDS 分析

Fig.4 SEM morphology and EDS results of $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ phase in A356 alloy



(a) SEM

(b) 谱图 3 EDS

图 5 A356 合金中 $\text{Al}_8\text{FeMgSi}_6$ 相 SEM 形貌及 EDS 分析

Fig.5 SEM morphology and EDS results of $\text{Al}_8\text{FeMgSi}_6$ phase in A356 alloy

在的针状灰色析出相主要由 Al、Fe、Si 元素组成。相关研究表明,当合金中 Si 含量高于 Fe 含量时,铝合金中容易形成富 Si 化合物 $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 相。 $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 相呈粗大针状,既硬又脆,使铝合金的塑性急剧下降^[13]。结合 SEM 和 EDS 结果,合金中生成的针状析出相为 $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 相。另外,在合金晶界处存在较多亮白色块状和针状析出相,EDS 结果显示其主要由 Al、Si 和 La 元素组成。结合 JMatPro12.4 预测结果、XRD 物相分析结果及刘政等^[14-15]的研究成果,该析出相可能为 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相。此外,在合金中还存在大量深灰色针状析出相,该析出相主要由 Al、Fe、Si、Mg 元素组成。根据 JMatPro12.4 预测结果,该析出相应为 $\text{Al}_8\text{FeMgSi}_6$ 相。由于 Mg_2Si 相析出量较少,同时 Mg 优先在 $\text{Al}_8\text{FeMgSi}_6$ 相中析出,因此,在 SEM 和 EDS 检测结果中未发现 Mg_2Si 相。

2.2 不同 La 加入量下 A356 铝合金的凝固组织

图 6 为不同 La 加入量下 A356 铝合金的凝固组织。可以看出,合金的凝固组织以初生 $\alpha\text{-Al}$ 和点状共晶 Si 为主。未添加 La 时,合金中 $\alpha\text{-Al}$ 几乎全部为枝晶组织,且尺寸较为粗大;当 La 加入量为 0.1% 时,合

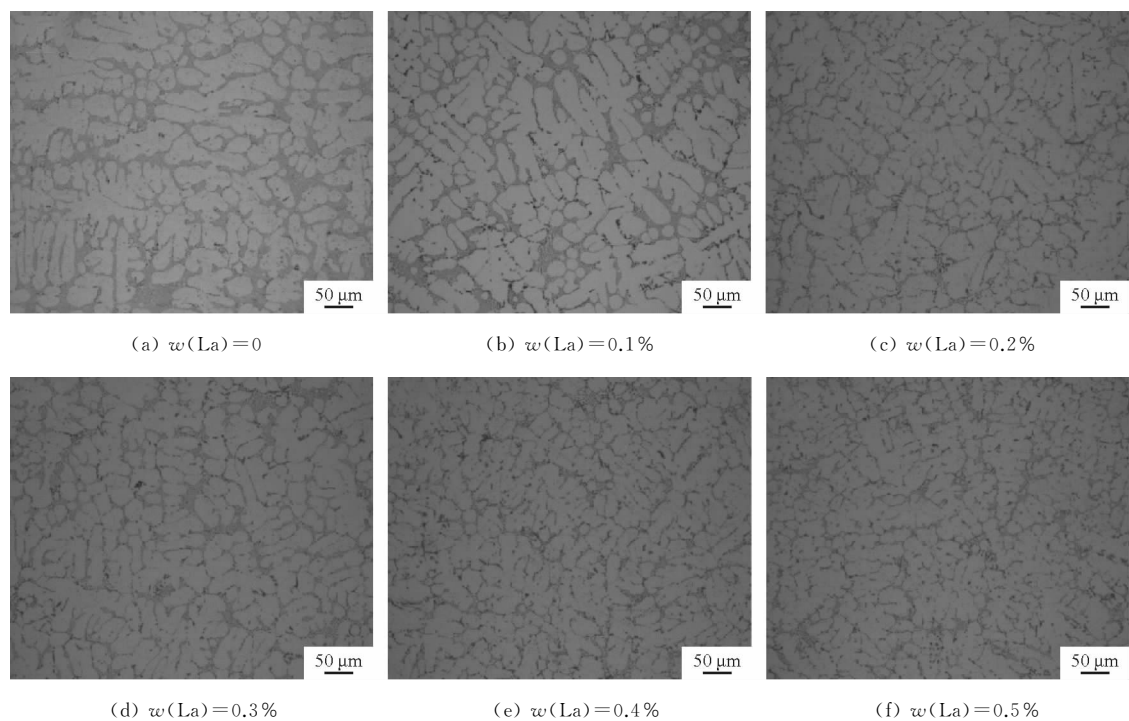


图 6 不同 La 加入量下 A356 铝合金的凝固组织
Fig.6 Solidification structure of A356 aluminum alloy with different La addition

金中 α -Al 枝晶组织开始向等轴晶和蔷薇状组织发生转变;随 La 加入量增加,合金中等轴晶和类等轴 α -Al 晶粒明显增多,枝晶臂明显变细、变短;当 La 含量增加至 0.4% 时,合金中的 α -Al 几乎全部由粗大的枝晶组织转变为细小的等轴晶和类等轴晶组织;进一步增加 La 含量至 0.5%,合金中的 α -Al 相无明显变化。

研究表明,异质形核点与基底相的晶格错配度必须要小于 12% 方可起到晶粒细化作用,尤其是当两者的晶格错配度小于 6% 时,其细化效果较好^[16]。根据 XRD、SEM 和 EDS 分析结果,A356 合金在添加 La 后会导致 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相生成。因此,为探讨 La 对 A356 合金凝固组织的细化机理,首先需对 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 和 α -Al 相的晶格错配度进行计算。 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 为正方晶格,其晶格常数 $a=0.628\text{ nm}$,而 α -Al 相的晶格常数为 $a=0.405\text{ nm}$,两者晶格错配度高达 35.51%,故 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相难以直接作为 α -Al 相的异质形核核心^[15]。

由于稀土 La 的原子半径较大,其在铝合金中的固溶度极低,平衡分配系数 $k<1$,凝固时 La 易在固/液界面前富集,一方面可有效阻止液相中的原子向初生相扩散,从而减慢初生相长大速度,凝固后其与 Al 形成的 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相存在于合金晶界处,这与 SEM 和 EDS 的分析结果一致^[17]。另一方面,随着凝固过程进行,稀土 La 在固/液界面前富集加剧,当稀土 La 富集到一定程度后,进一步增大成分过冷而使晶体分枝过程加剧,枝晶细化。由于浇注温度较低,熔体内细小枝晶处于过

冷液体包围之中,其结晶潜热的传出较为困难。枝晶长大时放出的潜热提高了枝晶臂连接处的温度,促使局部区域产生缩颈、熔断,从而提供更多的形核核心。另外,La 的加入还会导致 A356 合金共晶温度的降低及结晶温度区间的增大,延长了合金在两相区的停留时间,相应地减慢了晶体的长大速度^[18-19]。此外,通过 Al-La 二元合金相图也可以解释 La 对初生 α -Al 相的细化机理^[17,20],见图 7。

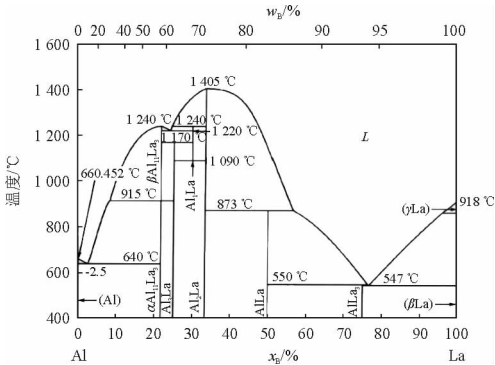


图 7 Al-La 二元合金相图
Fig.7 Phase diagram of Al-La binary alloy

Al-La 共晶反应温度为 640 °C,而 JMatPro 预测结果显示,试验 A356 合金的液相线温度为 617.23 °C,所以上述共晶反应是发生在合金液开始凝固之前。由于该共晶反应结晶析出的 α -Al 相与基底相成分一致,因此其可以作为 α -Al 相的有效形核质点,从而达到细化初生 α -Al 相的作用。另外,稀土 La 是表面活性元素,

可使合金液的界面张力降低,晶粒的形核功下降,临界晶核半径减小,形核更容易,晶核细化,最终导致铸态组织细化^[14]。

2.3 不同 La 加入量下 A356 合金的力学性能

图 8 为不同 La 加入量下 A356 合金的力学性能。可以看出,随 La 加入量增加,A356 合金的抗拉强度和伸长率均逐渐增大。当未添加 La 时,A356 合金的抗拉强度和伸长率仅分别为 149 MPa 和 4.8%;当 La 加入量为 0.1% 时,A356 合金的抗拉强度和伸长率显著增加至 163 MPa 和 6.1%;当 La 加入量增加至 0.4% 时,A356 合金的抗拉强度和伸长率将增加至 182 MPa 和 7.7%;进一步增加 La 加入量至 0.5%,A356 合金的抗拉强度和伸长率仅分别增大至 184 MPa 和 7.8%。这主要是由于在未添加 La 时,合金中的 α -Al 主要为粗大的枝晶组织,随 La 加入量增加至 0.4% 时,合金中 α -Al 枝晶组织几乎全部转变为等轴晶和类等轴晶,同时 α -Al 相尺寸明显减小,因此抗拉强度和伸长率随 La 加入量的增加显著增大;当 La 加入量进一步增加至 0.5% 时,合金中 α -Al 组织无明显变化,因此抗拉强度和伸长率保持稳定。

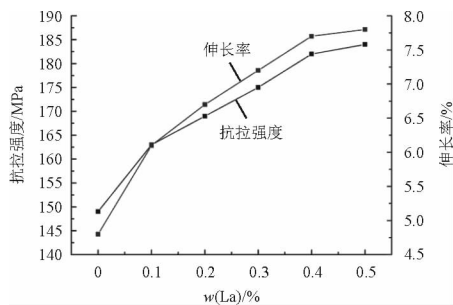


图 8 A356 合金不同 La 加入量下的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of A356 alloy with different La addition

3 结 论

(1)再生 A356 合金中的平衡组织主要包括 α -Al、共晶 Si、 β -Al₉Fe₂Si₂、Al₁₁La₃、Al₈FeMgSi₆ 和 Mg₂Si 相,其中 Al₁₁La₃ 相和 Mg₂Si 相为合金中的主要强化相。

(2)Al₁₁La₃ 相是导致再生 A356 合金中 α -Al 枝晶组织细化的主要原因。随 La 加入量增加至 0.5%,合金中的 α -Al 枝晶组织几乎全部转变为细小的等轴晶和类等轴晶组织。

(3)再生 A356 合金的抗拉强度和伸长率随 La 加入量的增加均逐渐增大。未添加 La 时,合金的抗拉强度和伸长率分别为 149 MPa 和 4.8%;当 La 加入量为 0.4% 时,合金的抗拉强度和伸长率达到 182 MPa 和

7.7%;进一步增加 La 加入量至 0.5%,合金的抗拉强度和伸长率无明显变化。

参 考 文 献

- [1] HALL E O. The deformation and ageing of mild steel: III. Discussion of results[J]. Phys. Soc., 1951, B64(9): 747-753.
- [2] PETCH N J. The cleavage strength of polycrystals[J]. J. Iron Steel Inst., 1953, 174(1): 25-28.
- [3] 赵艳君,周成云,马本莉,等. 稀土 Ce、La 对 Al-8.5Mg-0.5Mn 合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(4): 446-449.
- [4] 王红侠,李新星,汤亮. 稀土 La、Nd 对 A356 铝合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1 376-1 379.
- [5] 温杨,于长富,孙巍,等. 稀土元素 La 对 2024 铝合金铸态组织及性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2021, 42(6): 6-9.
- [6] 李文树,宋东福,周海涛,等. 细化变质处理对 A356.1 合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1 491-1 501.
- [7] 洪鑫,刘政,张课微,等. 电磁搅拌下电流突变对磁场及半固态 A356 铝合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1 393-1 399.
- [8] 刘小梅,刘政,白光珠,等. 电磁搅拌频率对半固态 A356 初生 α 相的影响[J]. 材料导报, 2016, B30(2): 141-145.
- [9] 刘政,罗浩林,白光珠. 电磁搅拌频率对半固态 A356 铝合金初生 α 相和铈分布的影响[J]. 中国稀土学报, 2015, 33(3): 328-335.
- [10] 曹杨婧,李元东,罗晓梅,等. 铸造方式对 A356 铝合金组织、热导率和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1 424-1 430.
- [11] 李景潭,王顺成,戚文军,等. 浇注温度和细化剂对半固态 A356 合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(6): 525-528.
- [12] 李伟东,陈和兴,王顺成,等. 工艺参数对半固态挤压铸造 A356 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(7): 611-614.
- [13] 王群驊. 有色金属热处理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [14] 刘政,徐丽娜,余昭福,等. 电磁场作用下半固态 A356-La 铝合金初生相形貌及分形维数的研究[J]. 技术学报, 2016, 52(6): 698-706.
- [15] 刘政,许鹤君,罗浩林,等. 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[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2 110-2 117.
- [16] BRAMFITT B L. The effect of carbide and nitride additions on the heterogeneous nucleation behavior of liquid iron[J]. Metallurgical Transactions, 1970, 1(7): 1 987-1 995.
- [17] 刘小梅,刘岚,刘政. 稀土 La 对半固态 A356 铝合金凝固组织的影响[J]. 铸造, 2010, 59(7): 708-711.
- [18] 郑志强,陈克燕. 稀土铝合金结晶过程的研究[J]. 材料与冶金学报, 2004(3): 202-205.
- [19] KNUUTINEN A, NOGITA K, MCDONALD S D. Modification of Al-Si alloys with Ba, Ca, Y and Yb[J]. Journal of Light Metals, 2001, 1(4): 229-240.
- [20] 戴永年. 二元合金相图集[M]. 北京:科学出版社, 2009.

(编辑:栗万仲)