

稀土元素 La 对铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金组织及性能的影响

谷欣硕, 相志磊, 杨子安, 李继豪, 韩杨, 闫宇婷, 陈子勇

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100020)

摘要: 采用均等梯度对照试验法研究了稀土元素La对铸造Al-9Si-1.5Cu-0.4Mg合金组织、力学性能、热裂敏感性和流动性的影响。结果表明, 添加La元素能够显著细化合金晶粒, 随着La含量的增加合金二次枝晶臂间距呈先减小后增大的趋势; La的加入提高了共晶Si变质率, 添加0.10%La的合金中, 共晶Si基本呈珊瑚状; 合金组织均由初生 α -Al、共晶Si、 θ -Al₂Cu、Q-Al₃Cu₂Mg₈Si₆和II-Al₈Mg₃FeSi₆相组成。La含量达到0.10%后开始出现富La相, 随着La的增加, 富La相尺寸逐渐增大。当La含量为0.10%时, 合金综合性能最优: 室温抗拉强度、屈服强度及伸长率分别为364 MPa、219 MPa和6.5%; 热裂敏感系数为6, 较基体合金降低80%; 流动长度为937 mm, 较基体合金提高48.0%。

关键词: Al-Si-Cu-Mg合金; 显微组织; 富La相; 热裂敏感性; 流动性

中图分类号: TG146.2; TG113.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 04-0366-10

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0052

Influence of Rare Earth Element La on the Microstructure and Properties of Cast Al-Si-Cu-Mg Alloy

GU Xin-shuo, XIANG Zhi-lei, YANG Zi-an, LI Ji-hao, HAN Yang, YAN Yu-ting, CHEN Zi-yong

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100020, China)

Abstract: The effects of different La contents on the microstructure, mechanical properties, hot tearing sensitivity and fluidity of Al-9Si-1.5Cu-0.4Mg alloy were investigated through equal gradient-controlled experimental method. The results show that the addition of La can significantly refine the alloy grains. The secondary dendrite arm spacings of alloys decrease first and then increase with the increase of La contents. The addition of La improves the eutectic Si modification rate, and the eutectic Si exhibits a coral-like morphology with 0.10%La added. The alloy microstructure consists of primary α -Al, eutectic Si, θ -Al₂Cu, Q-Al₃Cu₂Mg₈Si₆, and II-Al₈Mg₃FeSi₆ phases. When the La content reaches 0.10%, La-rich phases begin to appear, and the sizes of La-rich phases gradually increase with a higher La addition. When the La content is 0.10%, the comprehensive performance of the alloy is optimal, with room temperature tensile strength, yield strength, and elongation of 364 MPa, 219 MPa, and 6.5%, respectively. The hot tearing sensitivity coefficient is 6, which is reduced by 80% compared to the matrix alloy. The flow length is 937 mm, which is increased by 48.0% compared to the matrix alloy.

Key words: Al-Si-Cu-Mg alloy; microstructure; La-rich phase; hot tearing sensitivity; fluidity

在铸造铝合金中, Al-Si合金以其低密度、高比强度、优异的导热性及良好的铸造工艺性等优点, 成为航空航天、汽车制造与轨道交通领域的核心轻量化材料^[1]。尤其在汽车工业中, 轻量化需求驱动铝合金市场渗透率显著提升——据行业实践, 车重每降低10%, 油耗可减少6%~8%, 这促使铝合金在动力总成、底盘系统及车身结构中的应用占比突破40%。随着汽车工业中

发动机技术的发展面向小型化、高功率以及高爆发压力, 现有铸造Al-Si合金的性能需进一步提高。

目前, 工业上应用较多的Al-Si系铸造铝合金为ADC12 (Al-Si-Cu系), 其产量约占国内铝合金总产量的32%, 约占国内再生铝合金产量的75%, 常应用于汽车发动机部件、电子外壳及通信设备等, 在流动性、成本效益及规模化生产方面优势突出, 但仍存在伸长

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51871006)。

收稿日期: 2025-09-18 收到初稿, 2025-12-15 收到修订稿。

作者简介: 谷欣硕 (2000-), 女, 硕士, 主要研究方向为铝合金制备及加工技术。E-mail: m15031299940@163.com

通信作者: 陈子勇, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: czy@bjut.edu.cn

引用格式: 谷欣硕, 相志磊, 杨子安, 等. 稀土元素 La 对铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (4): 366-375.
GU Xinshuo, XIANG Zhilei, YANG Zi'an, et al. Influence of rare earth element La on the microstructure and properties of cast Al-Si-Cu-Mg alloy [J]. Foundry, 2026, 75 (4): 366-375.

率较低、脆性倾向大、热裂敏感性较高等缺陷^[2-3]。结合工业实践及研究数据, ADC12合金在应用过程中也存在铸造缺陷敏感性高、工艺表面处理局限性及力学性能短板等问题。

在优化合金成分、提高综合性能方面, 稀土元素的引入为铝合金研究提供了新方向^[3]。研究表明, 稀土元素的加入能与铝合金中多种元素反应并形成稳定化合物, 从而净化合金熔液, 改善合金组织性能^[3-8]。Lu等^[9]在A356合金中引入稀土元素La, 发现La的加入并未明显改善合金的抗拉强度, 但伸长率明显提高, 达到5.8%; 少量La的加入可以使共晶Si组织细化, 使其形貌更加均匀, 纤维状结构更加明显, 共晶Si颗粒形貌和尺寸的改善也是合金伸长率提升的重要原因。Zheng等^[5]研究发现, Al-6Si合金中 α -Al晶粒平均尺寸随着La的增加而减小, La质量分数为0.06%时晶粒尺寸减小48.4%, 共晶Si颗粒也得到改性, 平均长度降低48.2%, 合金伸长率从6.7%增加到12.9%。另外, 稀土元素对于合金铸造性能也有着十分重要的影响, 宋宪臣等^[10]研究表明, 稀土La和Yb的添加能够细化 α -Al晶粒, 改善共晶Si形态, 进而缩小合金凝固区间, 降低热裂倾向。戚忠乙等^[11]发现, 微量稀土La的加入能够同时作用于Al-7Si合金中 α -Al枝晶细化和共晶Si变质, 进而提升合金热导率及力学性能。Tsai等^[12]研究表明, 合金流动性在一定程度上取决于晶粒细化程度, 更细的晶粒有助于合金流动性的提高。因此, 本课题选择引入稀土元素La, 探究La含量对Al-Si-Cu-Mg合金微观组织、力学性能、热裂倾向及流动性的影响, 并确定La的最优添加量。

1 试验材料与方法

试验以Al (纯度 $\geq 99.9\%$)、Al-20%Si、Al-50%Cu、Mg (纯度 $\geq 99.7\%$)、Al-10%La、Al-10%Ti、Al-10%Sr为原材料。基体合金采用本课题组调控优化后的Al-9Si-1.5Cu-0.4Mg合金, 稀土La的添加量 (质量分数) 分别为0、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%。采用重力铸造方法进行熔铸, 熔炼设备为井式坩埚炉。首先将配置好的中间合金及纯Al、纯Mg原材料进行表面清洁, 去除表面油污并保证材料干燥, 在预热后的坩埚内表面刷涂料 (硅酸钠和氧化锌按质量比1:3配制溶液) 使其呈现黄色; 然后将Al以及Al-20%Si、Al-50%Cu、Al-10%La、Al-10%Ti中间合金放入坩埚中, 在750℃加热熔炼; 待合金完全熔化后, 加入六氯乙烷精炼剂进行精炼, 搅拌扒渣后静置5 min; 加入Al-10%Sr中间合金, 静置15 min; 最后将易烧损的纯Mg用铝箔包好, 使用夹子压入铝液下面, 防止纯Mg

飘起与空气产生反应, 静置3 min; 再次对金属液搅拌扒渣后进行浇注。浇注模具材料为铸铁, 壁厚30 mm, 使用前不经预热, 模具温度约25℃。浇注时, 以夹具夹持坩埚自模具顶部匀速倾入熔体, 浇注温度不低于690℃, 待铸锭完全冷却至室温后开模取出。经ICP光谱仪测定, 合金实际化学成分如表1所示。

表1 合金实际化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the alloy $w_B/\%$

编号	Si	Cu	Mg	Ti	La	Al
1	8.78	1.51	0.43	0.13	0	余量
2	8.73	1.48	0.45	0.09	0.05	余量
3	8.69	1.49	0.43	0.12	0.11	余量
4	8.70	1.52	0.46	0.10	0.15	余量
5	8.75	1.49	0.47	0.11	0.23	余量

从浇注件上截取金相试样, 经粗磨、细磨、抛光后, 采用Quanta 650 FEG型和SEM5000Pro型场发射扫描电镜 (SEM) 观察合金微观组织, 电压为20 kV、束斑直径为5.0 nm, 并通过配备的能谱仪 (EDS) 进行微区成分分析。通过D/MAX-3C旋转阳极X射线衍射仪 (XRD) 分析合金的相组成。采用Image Pro-Plus软件计算合金中相的平均直径和面积分数。采用Instron-5569电子万能材料试验机进行室温拉伸测试, 拉伸试样按照GB/T 228.1—2021规定进行加工, 如图1所示, 设置拉伸速率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

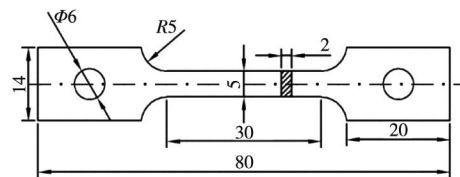


图1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tensile specimen

采用如图2所示的热裂约束杆试验装置^[13]对合金进行热裂敏感性测试, 该装置由冒口和热裂约束棒模具组成。在模具内部及冒口处喷涂氮化硼脱模剂并将模具加热至300℃, 用测温计进行实时温度监测, 确保模具温度保持稳定, 将熔炼好的合金熔液浇注到模具中, 浇注温度为710℃, 脱模后对试验数据进行分析。

采用“约束杆”钢模铸造法进行合金热裂敏感性评定, 相关数学表达式^[13]如下:

$$f_{\text{HCS}} = \sum (f_{\text{length}} \times f_{\text{location}} \times w_{\text{crack}}) \quad (1)$$

式中: f_{HCS} 为热裂敏感系数; f_{length} 为热裂纹棒长系数因子; f_{location} 为热裂纹位置系数因子; w_{crack} 为热裂纹宽度系数因子。

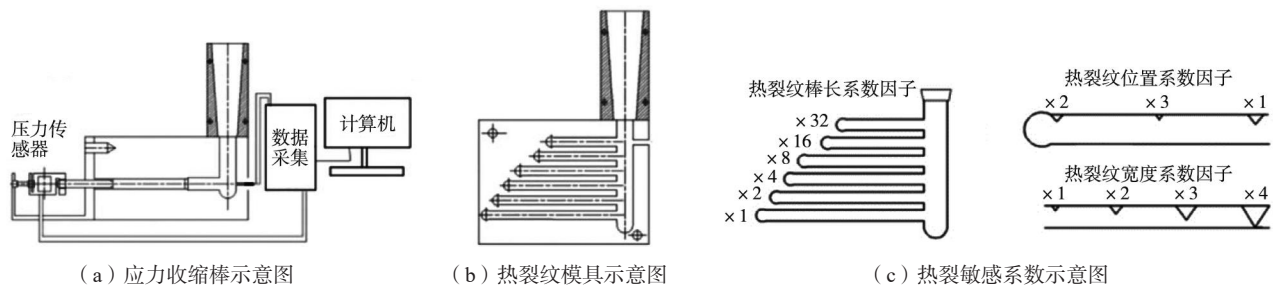


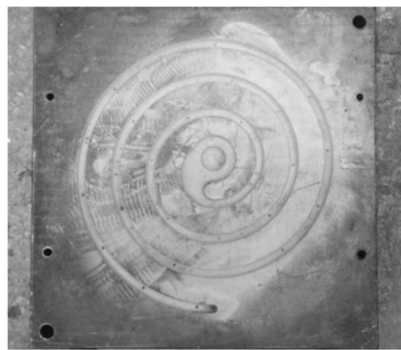
图2 热裂约束杆试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device for hot crack restraint bar

参数值如图2(c)所示。根据热裂纹形成的难易程度,将最长杆的 f_{length} 设置为1,随着杆长的减小,后续杆依次设置为2、4、8、16、32,呈指数级增长;浇注时热裂杆和浇注通道之间连接处的形状变化最明显,热裂纹最有可能出现在连接处,因此将此处的 $f_{location}$ 设置为1,然后根据热裂纹出现位置的不同,将末端设置为2,中间位置设置为3;最后根据热裂程度及

裂纹宽度的不同,将半发裂纹的 w_{crack} 设置为1,发裂纹设置为2,半断裂设置为3,完全断裂设置为4。

采用如图3(a)所示的单螺旋型流动性模具测试合金流动性,模具温度为200℃。浇注时取大量合金熔液,持续浇注至熔液从冒口溢出,凝固后所得试样的长度可表征流动性^[14]。粘度测试数据由广测产品检验研究所提供,所用高温粘度计如图3(b)所示。



(a) 流动性模具



(b) 高温粘度计

图3 流动性模具及粘度测试计

Fig. 3 Fluidity mould and viscosity tester

2 试验结果与分析

2.1 La含量对铸态合金微观组织的影响

图4表明,不同La添加量下铸态合金均主要由 α -Al、共晶Si、 θ -Al₂Cu、Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆和 Π -Al₈Mg₃FeSi₆五种相组成。图5为不同La添加量下铸态合金的微观组织,Al基体呈现浅灰色,共晶Si相衬度略深,分布于Al基体上。为进一步明确金属间化合物的形貌与成分,对铸态合金微观组织进行EDS点分析,结果见表2。可知:未添加La的合金中,点1为亮白色块状 θ -Al₂Cu相;点2为Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆相,呈浅灰色复杂块状;点3是由杂质Fe所形成的汉字状 Π -Al₈Mg₃FeSi₆相。上述3种第二相在五种不同La含量的合金中均可稳定检出,说明La微合金化并未改变合金的基本相组成。

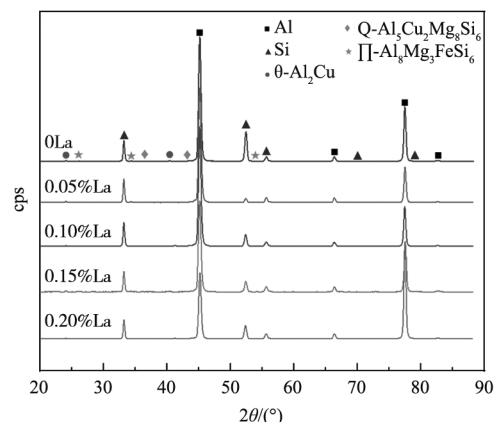


图4 铸态合金的XRD测试结果

Fig. 4 XRD test results of as-cast alloys

图5(f)-(h)为不同La添加量下合金中富La相的形貌。0.05%La合金中,由于La较少,未观察到可分辨的La富集区。La添加量为0.10%时,共晶Si附近首次出

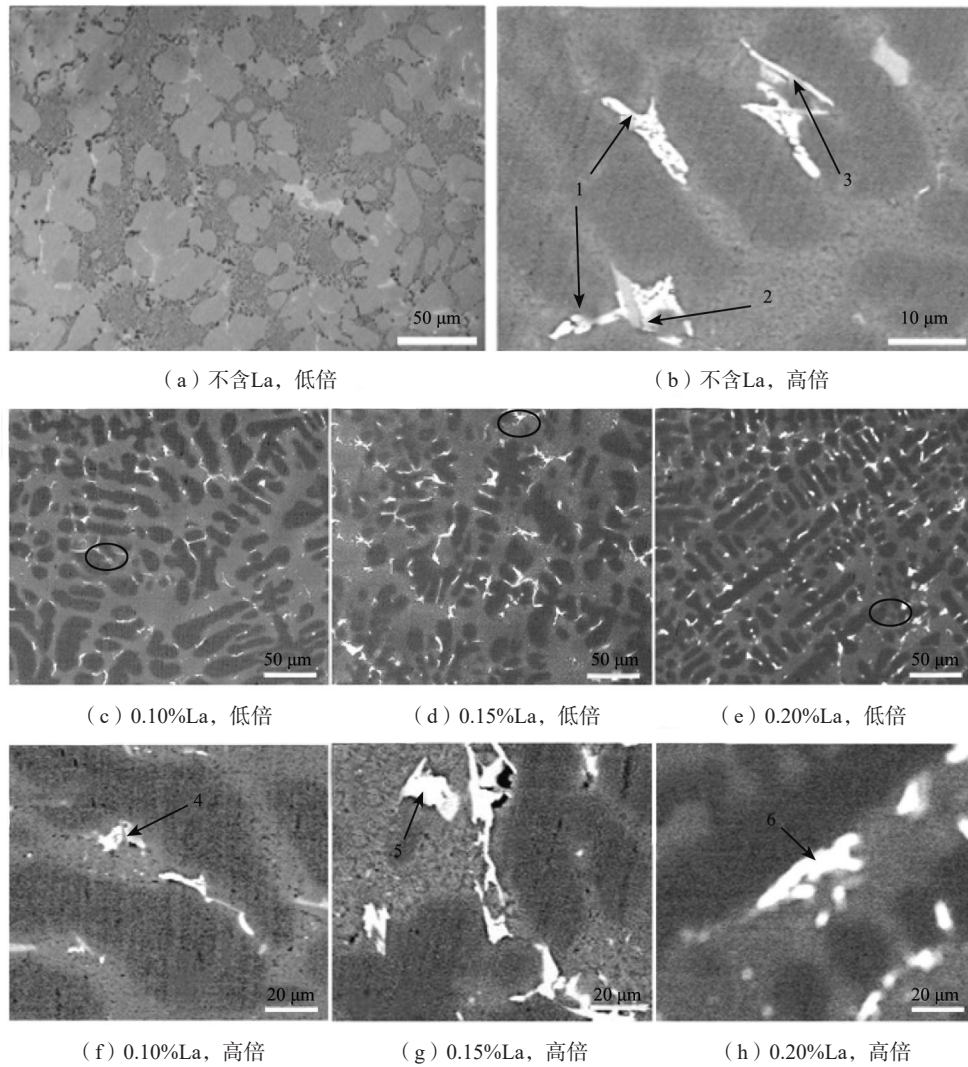


图5 不同La含量下铸态合金的微观组织

Fig. 5 Microstructures of as-cast alloys with different La contents

表2 图5中各点的EDS能谱分析结果
Tab. 2 EDS spectrum analysis results of the points in Fig. 5

测试点	原子分数/%						第二相
	Al	Si	Cu	Mg	Fe	La	
1	79.4	1.2	19.5	—	—	—	θ -Al ₂ Cu
2	38.1	27.6	6.1	28.2	—	—	Q-Al ₃ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆
3	28.6	22.3	—	15.7	3.4	—	Π -Al ₈ Mg ₃ FeSi ₆
4	55.2	6.2	28.8	0.4	3.2	6.2	富La相1
5	65.5	5.6	16.7	4.5	0.7	7.0	富La相2
6	68.1	7.4	15.1	1.4	0	7.9	富La相3

明亮白色、边缘光滑的短小片状富La相，见图5 (f)。当添加0.15%La时，富La相尺寸显著增加，呈现亮白色粗片状，见图5 (g)。当La添加量达到0.20%时，富La相进一步粗化，并穿插在 α -Al基体和共晶Si之间生长。上述演化表明，富La相的体积分数和尺寸随La添加量增加而逐渐增加。

图6为不同La含量铸态合金的偏光金相组织。可

以看到，随着La含量的增加，合金中枝晶组织先细化后又逐渐增大。未添加La元素时， α -Al枝晶粗大，形状不规则，枝晶边缘圆整度低，二次枝晶臂间距(SDAS)为15.5 μm 。添加0.05%La后，枝晶边缘趋于圆滑，尺寸略有减小。当La添加量增加至0.10%时，细化效果最为显著，二次枝晶臂间距降至13.5 μm ，降幅为12.9%，且枝晶形貌最为圆整。结合图中5高倍组织观察与EDS分析可知，0.10%La合金中，尺寸介于0.5~2 μm 之间的富La相弥散分布，其与 α -Al晶格匹配度较高，为 α -Al提供了额外的形核位点，从而提升了形核率；同时部分La与Si原子结合，降低了溶质对晶界迁移的拖拽效应，抑制了晶粒的异常长大^[15-16]。继续提高La含量至0.15%、0.20%，富La相粗化并沿晶界富集，二次枝晶臂间距反而增大，说明过量的La会削弱细化效果。综上，0.10%La为本试验条件下铸态合金组织细化的最佳添加量。

进一步分析La含量对合金中共晶Si相形貌和尺寸

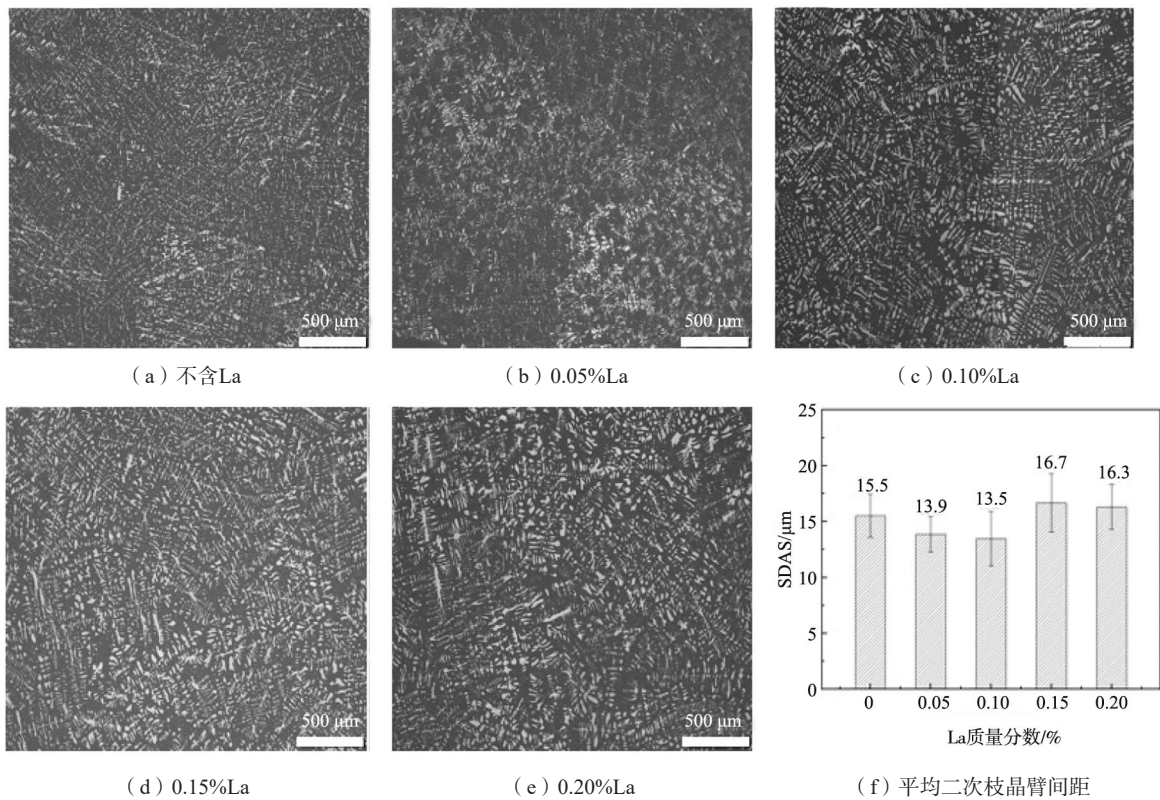


图6 不同La含量下铸态合金偏光金相相组织及平均二次枝晶臂间距统计

Fig. 6 Polarized metallographic structures and average secondary dendrite wall spacings of as-cast alloys with different La contents

的影响。如图7所示，未添加La时，未变质的共晶Si较多，其呈粗大块状分布于 α -Al枝晶间，见图7(a)椭圆框。0.05%La合金中块状Si减少，珊瑚状共晶Si相增加，但变质尚不完全，见图7(b)椭圆框。随着La含量增加至0.10%，共晶Si相经过充分的变质，几乎全部转化为均匀细小的珊瑚状，见图7(c)，这种细短

珊瑚状的Si相在固溶处理中易熔断和球化，可显著提升合金性能。进一步提升La含量至0.15%、0.20%时，珊瑚状Si相尺寸未见进一步细化。

为更好地分析La对共晶Si的变质效果，对不利于合金性能的块状共晶Si相所占所有Si相的比例、共晶Si颗粒的平均面积和平均长度进行统计，结果见图8。随La

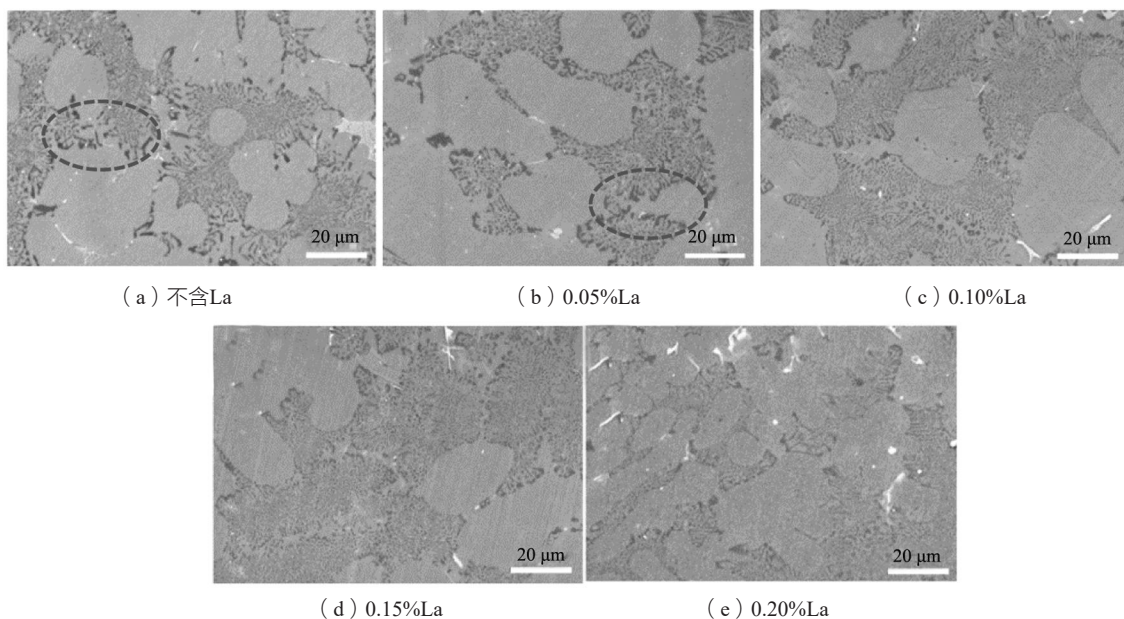
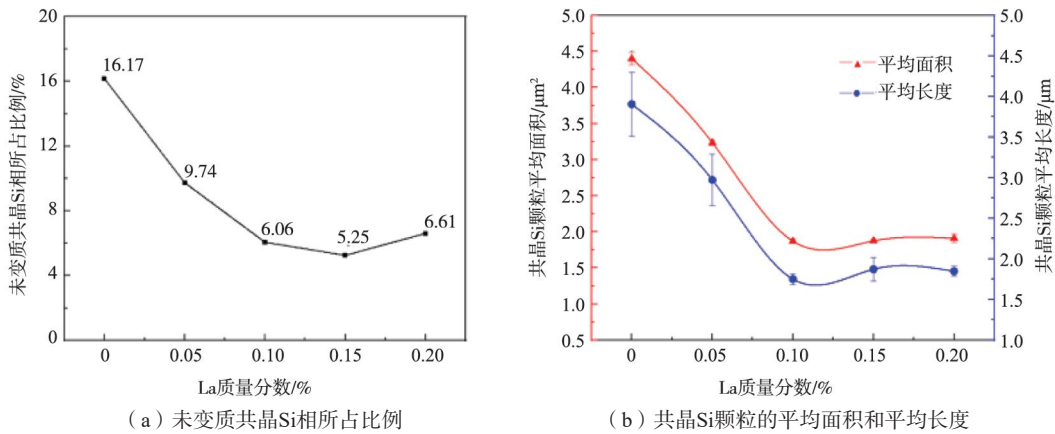


图7 不同La含量下铸态合金共晶Si相形貌

Fig. 7 Morphologies of eutectic Si phases in as-cast alloys with different La contents



(a) 未变质共晶Si相所占比例

(b) 共晶Si颗粒的平均面积和平均长度

图8 共晶Si颗粒与La添加量的关系

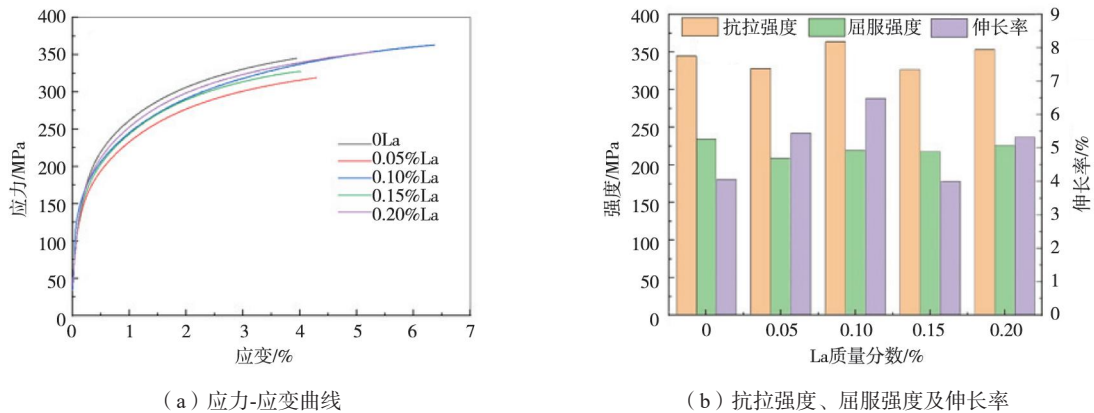
Fig. 8 Relationships between eutectic Si particles and La contents

含量升高,未变质Si相比例、共晶Si的平均面积和平均长度均逐渐下降并趋于稳定。La含量为0.10%时,共晶Si的平均面积和平均长度降至最小值,分别为 $1.87 \mu\text{m}^2$ 和 $1.75 \mu\text{m}$,相较于未添加La的合金分别减小了57.5%和55.2%。提升La含量至0.15%、0.20%,Si相的变质效果变化不大。因此,0.10%La为本试验条件下共晶Si变质的最优添加量。

2.2 La含量对合金力学性能的影响

图9为五种不同La含量铸态合金的室温应力-应变曲线和力学性能统计。可以看出,随La含量的增加,合金的抗拉强度波动变化,屈服强度变化不明显,伸长率先上升后下降。未添加La时,合金抗拉强度、屈

服强度和伸长率分别为346 MPa、234 MPa和4.1%;而当La添加量为0.10%时,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为364 MPa、219 MPa和6.5%,与未添加La的合金相比,抗拉强度提高5.2%,而伸长率增幅达58.5%,此时合金的综合力学性能最好。同时组织演化也表明,当La添加量为0.10%时,合金中 α -Al枝晶组织和二次枝晶臂间距均降至最小,共晶Si的变质细化最为充分,因此合金抗拉强度和伸长率同步提升。而当La添加量增至0.15%、0.20%时,合金 α -Al枝晶组织粗化,二次枝晶臂间距增大;富La相尺寸增加,呈粗片状分布于 α -Al基体与共晶Si界面,此类硬脆相容易割裂基体,不利于其连续性,导致合金塑性降低^[17-18]。



(a) 应力-应变曲线

(b) 抗拉强度、屈服强度及伸长率

图9 不同La含量下铸态合金的拉伸性能

Fig. 9 Tensile properties of as-cast alloys with different La contents

2.3 La含量对合金热裂敏感性的影响

为研究稀土元素La对Al-9Si-1.5Cu-0.4Mg合金热裂敏感性的影响,对未添加La和含0.10% La的合金进行热裂敏感性测试。如图10(a)、(b)所示,对由短到长的6根试棒分别编号1~6。由试验结果可知,未添加

La的合金中3~6号试棒根部均出现裂纹,开裂程度依次增大,6号试棒根部裂纹深度与宽度最大,3号试棒只在表面出现轻微裂纹;而添加0.10%La的合金中,6根试棒均未出现明显热裂纹。

对试棒根部进行微观组织观察,如图11所示。未

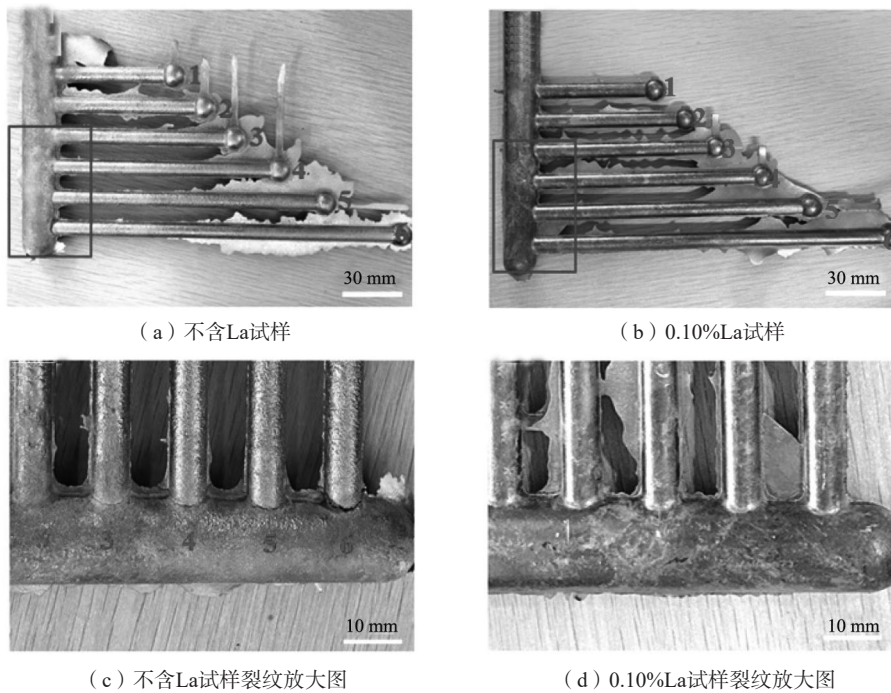


图10 0La和0.10%La合金热裂敏感性试样

Fig. 10 Hot tearing sensitivity samples of 0La and 0.10%La alloys

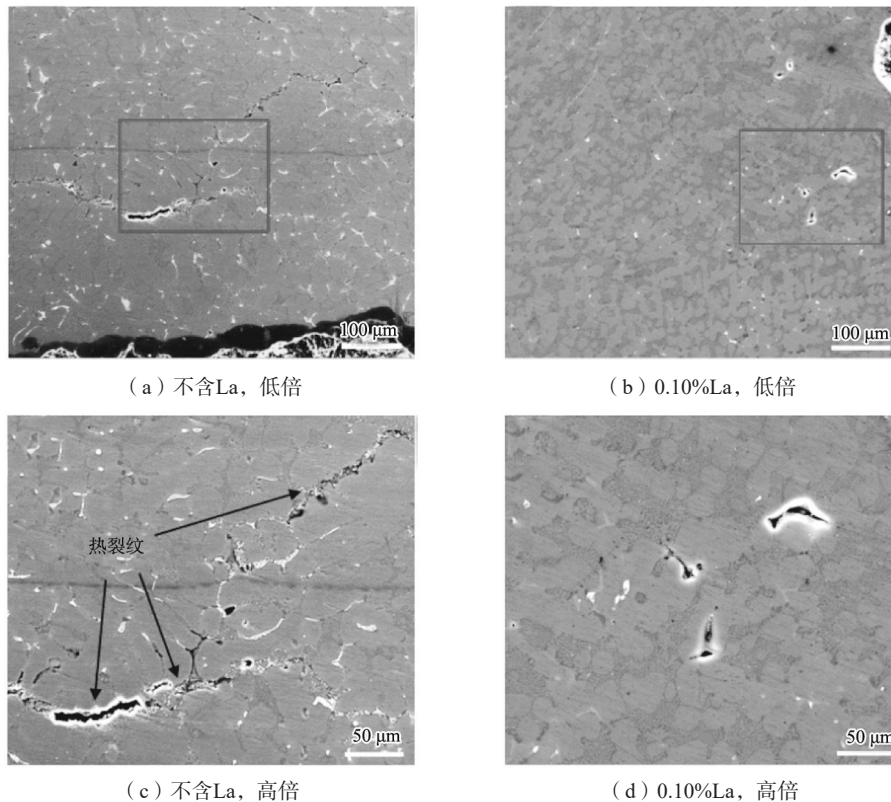


图11 0La和0.10%La合金热裂纹微观形貌

Fig. 11 Micro-morphologies of hot tearings in 0La and 0.10%La alloys

添加La的基体合金不仅产生明显的宏观裂纹，宏观裂纹周围还出现较多形状细长且连续的微观热裂纹，见图11(c)。而添加0.10%La的合金中只在试棒6的根部出现十分细小、长度不超过50 μm的微裂纹，见图11

(d)。采用式(1)计算可得，基体合金的热裂敏感系数为30，而0.10%La合金的热裂敏感系数为6，降幅达80%。另外，由图6(f)可知，0.10%La合金的二次枝晶臂间距相比于基体合金降低12.9%，α-Al枝晶得到

较大程度的细化, 晶粒间的补缩距离变短, 液相补缩通道增加, 促使合金在凝固后期补缩能力提高^[19-20], 进而提高了合金的抗热裂性。

未添加La和含0.10%La合金的DSC测试结果见图12。DSC曲线中, 放热峰为向下的峰, 吸热峰为向上的峰。对比分析发现, 合金升温过程中, 在580℃左右形成一个明显的高峰, 为Al-Si共晶峰, 而Al-Si合金中 α -Al相变和Al-Si共晶反应均发生在577℃附近, 两者相变温度接近, 因此吸热峰在DSC曲线中重叠。与未添加La的合金相比, 0.10%La合金的曲线更加平缓, 在相变过程中能够更加均匀缓慢地释放能量, 晶粒生长更为缓慢, 有利于晶粒的细化。由DSC曲线确定两组合金的液相线温度(α -Al峰开始温度)和共晶温度(Al-Si共晶峰开始温度), 0La合金的液相线温度为543.5℃, 共晶温度为589℃, 凝固区间相差45.5℃; 0.10%La合金的液相线温度为545.5℃, 共晶温度为584.5℃, 凝固区间相差39℃。因此, 稀土元素La的加入使合金凝固区间变窄, 延长了共晶液相存在的时

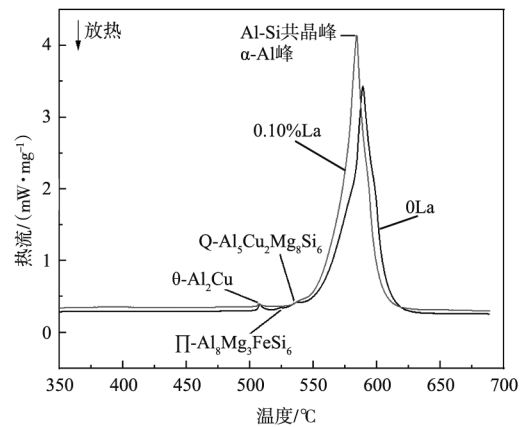
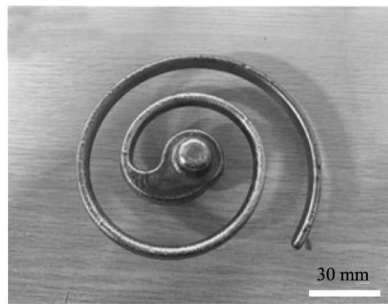


图12 0La和0.10%La合金的DSC曲线
Fig. 12 DSC curves of 0La and 0.10%La alloys

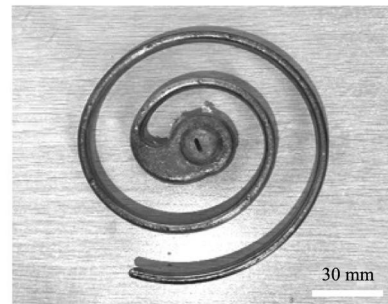
间, 提升了合金凝固后期的补缩能力, 从而有效降低了合金热裂倾向。

2.4 La含量对合金流动性的影响

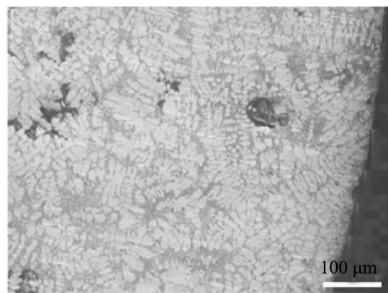
如图13(a)、(b)所示, 未添加La和0.10%La



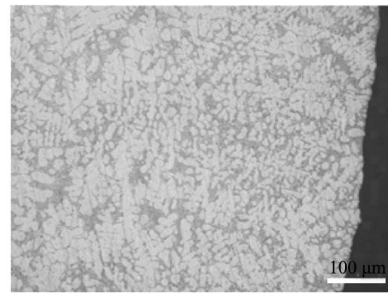
(a) 不含La合金流动性试样



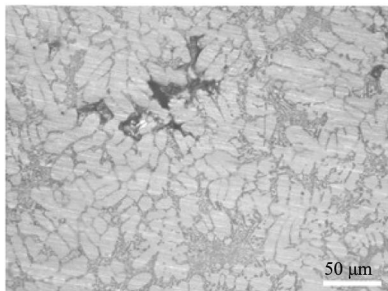
(b) 0.10%La合金流动性试样



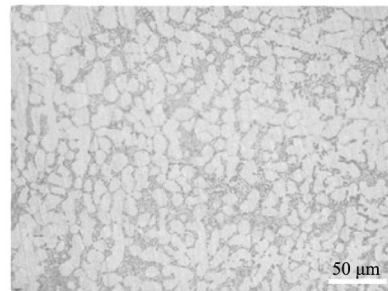
(c) 不含La合金低倍组织



(d) 0.10%La合金低倍组织



(e) 不含La合金高倍组织



(f) 0.10%La合金高倍组织

图13 0La和0.10%La合金流动性试样及流动性组织图

Fig. 13 Fluidity samples and fluidity microstructure diagrams of 0La and 0.10%La alloys

合金流动性试样的长度分别为633 mm和937 mm,后者相较于前者提升了48.0%。因此,0.10%La的添加量能够显著提升合金的流动性。通过流动性试样末端组织也能看出,未添加La的合金末端组织均匀性差, α -Al枝晶粗大且树枝晶较多,其凝固过程以树状晶和等轴晶混合生长模式进行;添加0.10%La的合金组织更加均匀, α -Al枝晶尺寸较小,呈等轴状,其凝固过程多以等轴晶生长模式进行。高温粘度测试结果也表明,在合金凝固过程中,0.10%La合金的熔体粘度更低,对应流动性最佳,见图14。

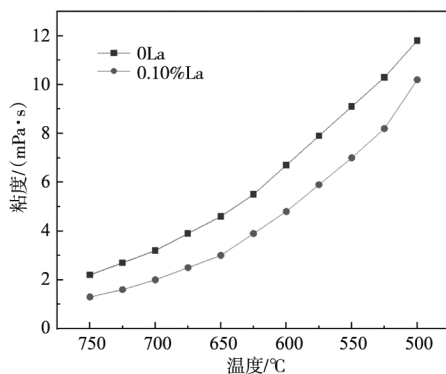


图14 0La和0.10%La铸态合金粘度测试结果

Fig. 14 Viscosity test results of 0La and 0.10%La as-cast alloys

参考文献:

- [1] 王祝堂. 中国汽车用铝知多少 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49 (1): 49.
- [2] FARAHANY S, IDRIS M H, OURDJINI A, et al. Evaluation of the effect of grain refiners on the solidification characteristics of an Sr-modified ADC12 die-casting alloy by cooling curve thermal analysis [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 119 (3): 1593-1601.
- [3] 谷立东, 王乐耘, 应韬, 等. 稀土La对铸造Al-Si合金组织与性能的影响 [J]. 铸造技术, 2024, 45 (5): 475-478.
- [4] PATEL D N, SUTARIA M P. Effect of trace rare earth Er addition on microstructure and tensile properties of 319 Al-Si-Cu alloy [J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16 (4): 2199-2209.
- [5] ZHENG Q J, ZHANG L L, JIANG H X, et al. Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 47: 142-151.
- [6] MAHMOUD M G, ZEDAN Y, SAMUEL A M, et al. Effect of rare earth metals (Ce and La) addition on the performance of Al-Si-Cu-Mg cast alloys [J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16 (3): 1164-1190.
- [7] RAVI K R, PILLAI R M, AMARANATHAN K R, et al. Fluidity of aluminum alloys and composites: a review [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 456 (1/2): 201-210.
- [8] YI H K, ZHANG D, SAKATA T, et al. Microstructures and La-rich compounds in a Cu-containing hypereutectic Al-Si alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 354 (1/2): 159-164.
- [9] LU T, PAN Y, WU J L, et al. Effects of La addition on the microstructure and tensile properties of Al-Si-Cu-Mg casting alloys [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2015, 22 (4): 405-410.
- [10] 宋宪臣. 低热裂高流动性 (La+Yb) 混合稀土铝合金及压铸成型 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [11] 戚忠乙, 王博, 江鸿翔, 等. 微量稀土La对Al-7%Si-0.6%Fe合金组织与性能的影响 [J]. 物理学报, 2024, 73 (7): 246-256.
- [12] TSAI Y C, CHOU C Y, JENG R R, et al. Effect of rare earth elements addition on microstructures and mechanical properties of A356 alloy [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2011, 24 (2): 83-87.
- [13] MA C X, RONG L, CHEN J S, et al. Effect of Er and Zr on hot crack resistance and mechanical properties of Al-Cu-Mn-Cd alloy [J]. International Journal of Metalcasting, 2025, 19 (3): 1388-1402.
- [14] ZOU G T, CHAI Y D, SHEN Q S, et al. Analysis of the fluidity and hot tearing susceptibility of AISi3.5Mg0.5Cu0.4 and A356 aluminum alloys [J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16 (2): 909-923.

3 结论

(1) 稀土元素La的添加对Al-9Si-1.5Cu-0.4Mg合金晶粒细化效果显著,La含量为0.10%时,合金二次枝晶臂间距最小,较未添加La时减小12.9%,组织细化效果最好。随La含量增加,共晶Si的变质程度提高并趋于稳定。添加0.10%La后,晶界处变质不充分的块状共晶Si基本转化为珊瑚状,Si相的平均长度和平均面积较未添加La时分别减小55.2%、57.5%。

(2) 随La含量增加,合金抗拉强度波动变化,屈服强度变化不明显,伸长率呈先上升后下降。La含量为0.10%时,合金伸长率为6.5%,抗拉强度为364 MPa,与未添加La时相比分别提高了58.5%和5.2%。

(3) La的添加对合金铸造性能有较大提高。添加0.10%La后,合金的抗热裂性能显著提升,热裂敏感系数由30降至6,降幅为80%;同时合金的流动性和粘度也有较大提升,螺旋流动长度由633 mm增加至937 mm,增幅为48.0%;凝固过程中,合金熔体粘度明显降低。

- [15] TIMELLI G, CAMICIA G, FERRARO S. Effect of grain refinement and cooling rate on the microstructure and mechanical properties of secondary Al-Si-Cu alloys [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23 (2) : 611-621.
- [16] RZYCHON T, KIELBUS A. The influence of pouring temperature on the microstructure and fluidity of AE42 alloy [J]. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2007, 28 (10) : 601-604.
- [17] 刘强, 庞小兰. Ce-La添加量对汽车用Al-Si-Cu-Mg-Ni合金组织与力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2024, 53 (14) : 130-132.
- [18] KWON Y D, LEE Z H. The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al-4.5Cu-0.6Mn and A356 alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 360 (1/2) : 372-376.
- [19] 许荣福. 亚共晶Al-Si合金热裂形成过程的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [20] 李培跃, 张明辉, 孙文韬, 等. Ce和La对Al-Zn合金微观组织和力学性能的影响 [J]. *材料研究学报*, 2024, 38 (9) : 651-658.