

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5198

冷却速率与变质剂对 A356.2 铝合金 凝固组织细化的影响

张 正, 刘 柱, 吴夏倪, 刘海涛
(遵义铝业股份有限公司, 贵州 遵义 563100)

摘 要: A356.2 铝合金在航空航天及汽车轻量化领域应用广泛, 但铸件性能的精准预测与调控仍是技术难点。本研究在原有工艺基础上, 通过优化原铝液加料策略和辅料(Ti 和 Si)的加入时序, 提出新的改进方案, 系统探究了冷却速率与稀土(RE)和锶(Sr)变质剂对 A356.2 铝合金凝固组织细化的协同影响。通过扫描电子显微镜(SEM)和光学显微镜(OM)表征发现, 冷却速率是组织细化的主导因素, 水冷条件下的 α -Al 晶粒尺寸较自然冷却显著减小, 且单独添加 RE 可显著细化 α -Al 晶粒, 并获得纤维状的共晶硅。特别地, 水冷条件下 RE 与 Sr 的交互作用由“协同”转为“拮抗”, 试样的晶粒尺寸较单一、粗大, 且共晶硅变质不完全。

关键词: A356.2 铝合金; 变质剂; 冷却速率; 组织细化

中图分类号: TG244+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)08-0936-09

Effects of Cooling Rate and Modifier on Solidification Structure Refinement of A356.2 Aluminium Alloy

ZHANG Zheng, LIU Zhu, WU Xiani, LIU Haitao
(Zunyi Aluminum Co., Ltd., Zunyi 563100, China)

Abstract: A356.2 aluminium alloy is widely used in aerospace and automotive lightweight applications. However, accurate prediction and control of its casting performance remain technically challenging. In this study, an improved process was developed by optimizing the feeding strategy of molten aluminium and the addition sequence of auxiliary materials (Ti and Si). The synergistic effects of the cooling rate and rare earth (RE) and strontium (Sr) modifications on the refinement of the solidification microstructure of A356.2 alloys were systematically investigated. Scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy (OM) characterization reveal that the cooling rate is the dominant factor in microstructure refinement. The grain size of α -Al under water cooling is significantly smaller than that under natural cooling. The addition of RE alone markedly refines α -Al grains and promotes the formation of fibrous eutectic silicon. Notably, the interaction between RE and Sr shifts from synergistic to antagonistic under water-cooling conditions, resulting in a coarser and more uniform grain morphology with incomplete modification of eutectic silicon.

Key words: A356.2 aluminium alloy; modifier; cooling rate; microstructure refinement

在全球倡导绿色低碳与高效制造的背景下, A356.2 铝合金凭借其优异的性能, 已成为航空航天、轨道交通及汽车工业等高端制造领域的关键材料之一^[1-3]。然而, A356.2 铝合金在凝固过程中形成的微观组织存在显著问题, 即粗大的树枝状 α -Al 晶粒降低材料均匀性, 而未变质处理的共晶硅通常呈

尖锐的针片状, 这种形态在应力作用下易引发应力集中, 导致合金的塑性、韧性和疲劳寿命显著恶化^[4-6]。研究表明, A356.2 铝合金的力学性能瓶颈本质上源于其凝固特性, 在凝固后形成的微观组织从根本上决定了其最终的服役性能^[7-8]。因此, 如何通过有效的工艺控制, 将粗大的树枝晶细化为等轴细晶, 并将针

收稿日期: 2025-09-09

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合中引地[2026]013); 遵义铝业股份有限公司企业项目

作者简介: 张 正, 1995 年生, 硕士, 助理工程师。主要从事轻有色金属冶炼工作。Email: 2550345570@qq.com

通信作者: 刘海涛, 1977 年生, 本科, 工程师。主要从事轻有色金属冶炼工作。Email: 13648521963@163.com

引用格式: 张正, 刘柱, 吴夏倪, 刘海涛. 冷却速率与变质剂对 A356.2 铝合金凝固组织细化的影响[J]. 铸造技术, 2026, 47(8): 936-944.

ZHANG Z, LIU Z, WU X N, LIU H T. Effects of cooling rate and modifier on solidification structure refinement of A356.2 aluminium alloy[J]. Foundry Technology, 2026, 47(8): 936-944.

片状的共晶硅变质为细小、弥散的纤维状或颗粒状,是提升 A356.2 铝合金力学性能的核心。在 A356.2 铝合金的凝固过程中,冷却速率直接影响凝固前沿的过冷度,从而影响形核率和生长速率^[9-10]。例如 Samuel 等^[11]研究了凝固速率, Sr 改性和熔体热处理对 A356.2 (Al-7%Si-0.4%Mg 质量分数,下同)合金硅颗粒特性的影响,研究表明较高的凝固速率产生更细的硅颗粒。

此外,稀土(RE)和锶(Sr)元素因其独特的电子层结构,在铝合金中表现出净化熔体、细化晶粒和变质共晶硅的多重作用^[12-13]。例如 Samuel 等^[14]研究了变质和熔体热处理工艺对 Al-Si 合金显微组织和拉伸性能的影响,研究表明 Sr 的加入可以提高 A356 合金铸件的伸长率。同样, Qiu 等^[15]研究了 Sr、La 对 A356.2 合金显微组织的协同作用,结果表明含 0.5% Al-6Sr-7La 的铝合金表现出最佳的显微组织。值得注意的是,冷却速率对复合变质效果的影响也受到关注。胡威等^[16]研究了 Sr-RE 复合变质对 Al-40%Si 合金组织和性能的影响,发现低冷却速率下 Sr-RE 作用能显著细化晶粒组织,但未进一步分析高冷却速率下的变质效果。同样的,张鹏等^[17]考察了 RE-Sr 复合变质对轮毂用 A356 合金组织性能的影响,结果表明,在 0.2%Sr 和 0.2%RE 添加量下,水冷条件能协同细化合金组织形态;然而,过量 RE 会与熔体中的 Sr/Si 元素反应降低变质效果,研究中未对比此添加量在自然冷却条件下的表现。综上所述,复合变质剂的效果(细化和变质)显著依赖于冷却速率和添加量。因此,在变质剂量固定的前提下,有必

要深入对比分析高与低冷却速率下的细化机理。尤其在工程实践中,冷却条件受铸件结构制约难以全局优化,亟需揭示变质剂在非理想冷却下的适应性规律。

基于此,本文通过控制变质剂添加和冷却方式,在工业车间级上对比了自然冷却和水冷两种条件下,添加 RE 和 Sr 变质剂对 A356.2 铝合金微观组织的影响,旨在为该铝合金的生产实践提供工艺参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验主要材料包括:纯度 $\geq 99.8\%$ 的电解原铝液(遵义铝业股份有限公司内部供应)、工业纯晶体硅($\text{Si} \geq 99.0\%$)、商业钛剂($\text{Ti} \geq 80.0\%$)、镁锭($\text{Mg} \geq 99.5\%$)、锶(Al-Sr 中间合金)、稀土(Al-RE 中间合金)。自动精炼机(ZH-011Z, 380 V, 中国),精炼剂为 NaCl 和 KCl 的混合盐(质量比为 5:1),工作氮气压力为 0.08 MPa($\text{N}_2 \geq 99.99\%$)。电磁搅拌器(IDEA, 125 kW, 中国),工作参数设定为频率 0.8 Hz、搅拌时间 60 min。此外,采用光学显微镜(MC006-XTZ-D, 中国)分析试样的金相组织;采用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS GeminiSEM 300, 德国)观察试样的组织形貌和尺寸。A356.2 铝合金的目标化学成分如表 1 所示。

1.2 实验方法

实验在 25 t 固定式熔炼炉中进行。为保证熔体质量和成分均匀性,采用标准化的熔炼工艺路线。本研究设计对比了两种熔炼工艺(工艺-1 和工艺-2),其核心区别在于原铝液加料策略和辅料(Ti 和 Si)加

表1 A356.2铝合金目标化学成分
Tab.1 Target chemical composition of A356.2 aluminium alloy

(mass fraction/%)							
Si	Mg	Ti	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
7.2~7.4	0.31~0.33	0.13~0.15	≤ 0.12	≤ 0.01	≤ 0.02	≤ 0.02	surplus content

入时序,旨在优化晶粒细化效果。采用自然冷却与水冷两种方案。自然冷却是铸件经半连续铸造机成型后,置于托盘中进行空冷降温,冷却时长 30 min。水冷是铸件铸造完成后立即转移至盛有 5 L 常温自来水(水温 23~24 °C)的容器中,浸没冷却 10 min。此外,单炉熔体中细化剂的添加比例为铝液质量的 0.26%(65 kg),实验方案如表 2 所示。

1.2.1 熔炼与浇注及工艺对比

工艺-1(基准工艺):①熔化与升温:将辅料硅一次性加入容量为 25 t 的熔炼炉中,升温预热 20 min。接着加入 22.5 t 原铝液(温度约 850 °C),并开启电磁搅拌以促进金属 Si 快速溶解。随后,继续升温控制

表 2 实验方案
Tab.2 Experimental scheme

Number	Process route	Cooling type	Modifier
1	Process-1	Natural cooling	-
		Water cooling	-
2	Process-2	Natural cooling	-
		Water cooling	RE
3	Process-2	Water cooling	Sr
		Water cooling	RE+Sr
4	Process-2	Natural cooling	RE
		Natural cooling	Sr
		Natural cooling	RE+Sr

铝熔体温度为 750~780 °C,熔炼 2 h。②合金化:待铝液温度升至 780 °C 时,加入钛剂,开启电磁搅拌。接着,控制铝熔体温度在 720~730 °C,加入镁锭。③精炼与除气:合金成分调整合格后,在 720~725 °C 进行两段精炼(精炼剂用量为熔体重量的 0.27%),两次均衡添加且精炼时间为 20 min/次,使有效去除熔体中的氢气和夹杂物。④浇注:将处理好的铝熔体经除气体单元和陶瓷泡沫过滤器(40×10⁻⁴%)过滤后,在 (670±5) °C 的温度下,通过水平链式铸造机浇注成质量为(6±0.5) kg 的铝合金锭块。

工艺-2(优化工艺):①熔化与升温:将容量为 25 t 的熔炼炉预热 20 min,加入 13.5 t 原铝液(温度约 850 °C),持续升温。②合金化:待铝液温度升至 780 °C 时,加入钛剂,开启电磁搅拌;加入 9 t 原铝液,铝液温度在 850 °C 以上时一次性加入工业硅,并使用电磁搅拌和搅拌工具辅助搅动,促进金属 Si 快速溶解。接着将熔炼温度控制在 750~780 °C,熔炼 2 h。最后,在 720~730 °C 范围内加入镁锭。③精炼与除气:同上文工艺-1 描述。④变质处理:根据实验设计,在精炼结束并除渣后,按照设计的方法加入定量的 RE 和 Sr 中间合金。添加后,用氮气均匀吹扫 20 min,促进变质元素的溶解和均匀分布,随后静置 15 min,使熔体稳定并使夹杂物上浮。⑤浇注:同上文工艺-1 描述。

图 1 为工艺-1 和工艺-2 流程示意图。工艺-2 采用依次加入部分铝液、钛剂、剩余铝液、工业硅的步骤,避免了在工艺-1 中后期加入钛剂时,熔体中已积累的杂质(如 Fe、P 等)与 Ti 发生反应形成无效化合物(如 TiP)而消耗钛剂,导致形核核心(TiB₂/TiAl₂)数量

减少和细化效果下降。同时,在高温(850 °C)条件下一次性加入辅料硅,促进了金属 Si 的熔化效率,降低了大量铝液与 Si 熔化时产生氧化夹渣的机率,并有助于熔体中金属元素的均匀分布,为后续的晶粒细化创造更有利的条件。

1.3 性能表征与组织观察

采用 ELH- 型铝熔体测氢仪对熔体氢含量进行测试。本实验选取在铸造流槽过滤箱后端固定一个点进行测试,每次进行 3 次氢含量测试并取平均值。此外,试样致密度与含气量呈显著负相关,因此密度测量可作为评估试样含气量的有效指标。精炼完成并静置铝合金液 15 min,使用预先预热干燥的取样勺轻扒开表面浮渣,在炉子深度 1/2 处,距炉门 1/3 宽位置各取铝合金液注入专用磨具中,随后快速转移至真空试样机中进行减压凝固(约 10 min)。试样密度通过下式计算获得:

$$\rho_s = \frac{w_a}{w_z - w_w} \rho_w \quad (1)$$

式中, ρ_s 为试样密度, g/cm³; w_a 为试样在空气中的质量, g; w_w 为试样在水中的质量, g; ρ_w 为水的密度, g/cm³。

如图 2 所示,待铸件完全冷却后,进行截面取样,并在相同位置(标记为 1、2、3)截取金相试样。试样经水磨砂纸逐级打磨,然后进行机械抛光,直至表面光亮如镜、无划痕。采用 0.5% HF 水溶液作为腐蚀剂,对抛光后的试样表面进行腐蚀。最后,在光学显微镜(OM)下观察并拍摄不同点的金相组织照片,重点分析 α -Al 晶粒尺寸、共晶硅形态、分布及针孔等缺陷。

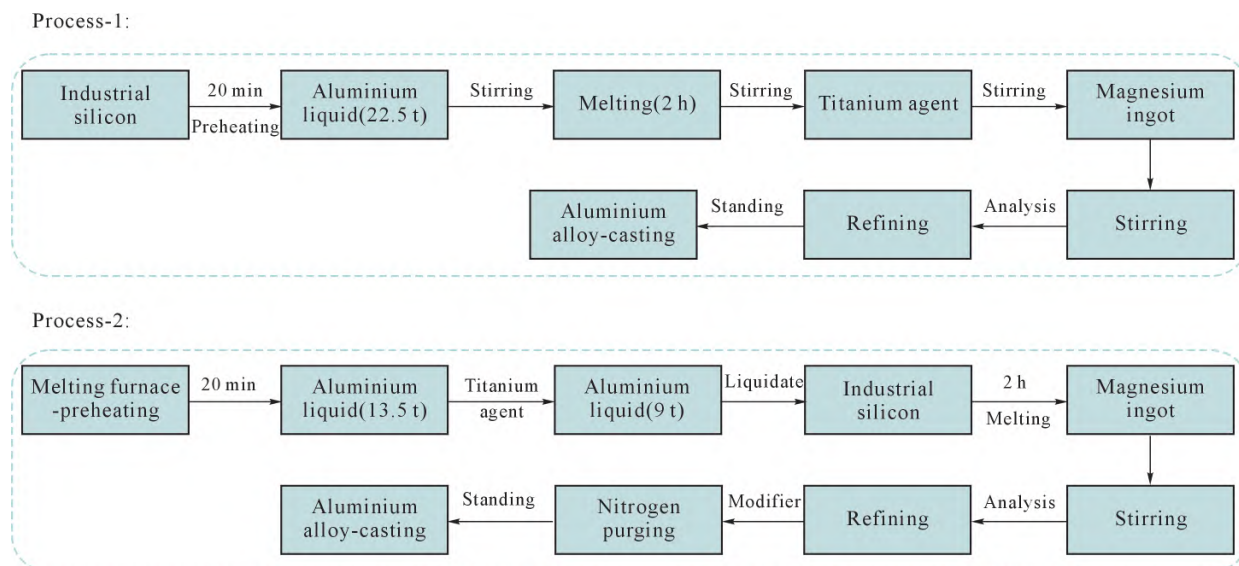


图 1 工艺-1 和 2 流程示意图
Fig.1 Diagram of Processes 1 and 2

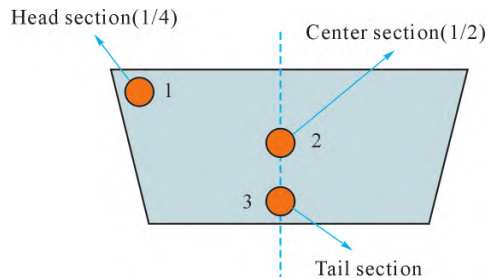


图 2 铸件取样示意图
Fig.2 Sampling diagram of castings

2 实验结果及讨论

2.1 冷却速率对 A356.2 合金基础组织的影响

冷却速率直接决定了铝合金凝固前沿的过冷度和凝固时间,从而深刻影响微观组织的形成^[18-19]。自然冷却和水冷条件下,在工业车间级别上对比了工艺-1 和工艺-2 实验条件下铸件的微观组织。研究表明,氢是导致铝合金产生气孔缺陷的主要原因,因为氢在液态铝中溶解度高,而在固态铝中溶解度急剧下降,凝固过程中析出的氢气若无法逸出则形成气孔^[20-21]。为确保熔体质量的稳定性,对铝液进行了严格的氢含量与密度检测。在两种工艺条件下分别进行了 4 炉次实验,并随机取精炼结束且静置 15 min 后的 2 个蘑菇样,测量试样的密度值。此外,随机对熔体进行氢含量测试。根据表 3 可知,所有试样的密度维持在 $2.67\sim 2.68\text{ g/cm}^3$ 范围,氢含量维持在 $0.094\sim 0.099\text{ mL/100 g Al}$ 范围,表明铸造前工艺处于较稳定状态。

图 3a~c 为工艺-1 在自然冷却条件下,铸件不

表3 氢含量及密度测量值

Tab.3 Measurements of hydrogen content and density

Number	Process-1		Process-2	
	Hydrogen content /(mL/100 g Al)	Average /(g·cm ⁻³)	Hydrogen content /(mL/100 g Al)	Average /(g·cm ⁻³)
1	0.097	2.67	0.095	2.66
2	0.095	2.68	0.097	2.66
3	0.099	2.67	0.098	2.67
4	0.094	2.67	0.098	2.68

同位置(1、2、3)的金相图。可见,工艺-1 条件下获得的铸件晶粒粗大且不均匀。相反,从图 3d~f 中观察到工艺-2 条件下的晶粒更为细小,同时组织中初晶硅相对较少且形成的铝-硅共晶体相对分散均匀。同样地,图 4 进一步表明工艺-2 条件下获得的晶粒尺寸较工艺-1 更细小,工艺-2 下的晶粒平均尺寸为 $10.5\text{ }\mu\text{m}$,工艺-1 下的晶粒平均尺寸为 $12.1\text{ }\mu\text{m}$ 。结果表明,工艺-2 采用的熔炼工艺不仅能有效细化 $\alpha\text{-Al}$ 基体,还能在一定程度上改善共晶组织的形态和分布,这对于提升材料的综合性能至关重要。

此外,如图 5 所示,在水冷却条件下,工艺-2 相比工艺-1,其获得的晶粒也更为细小,晶粒分布也更加均匀。值得注意的是,在相同工艺条件下,相较于自然冷却,水冷可显著提升晶粒细化程度。

同时,在工艺-1 和工艺-2 下,分别探究了水冷对铸件低倍组织的影响。如图 6 所示,两者均未观察到明显的针孔现象,表明熔体处理和浇注过程控制良好。

综上所述,工艺-2 实验下的铸件具有较好的组织结构,这归因于工艺-2 在铝液纯净时(加入 13.5 t

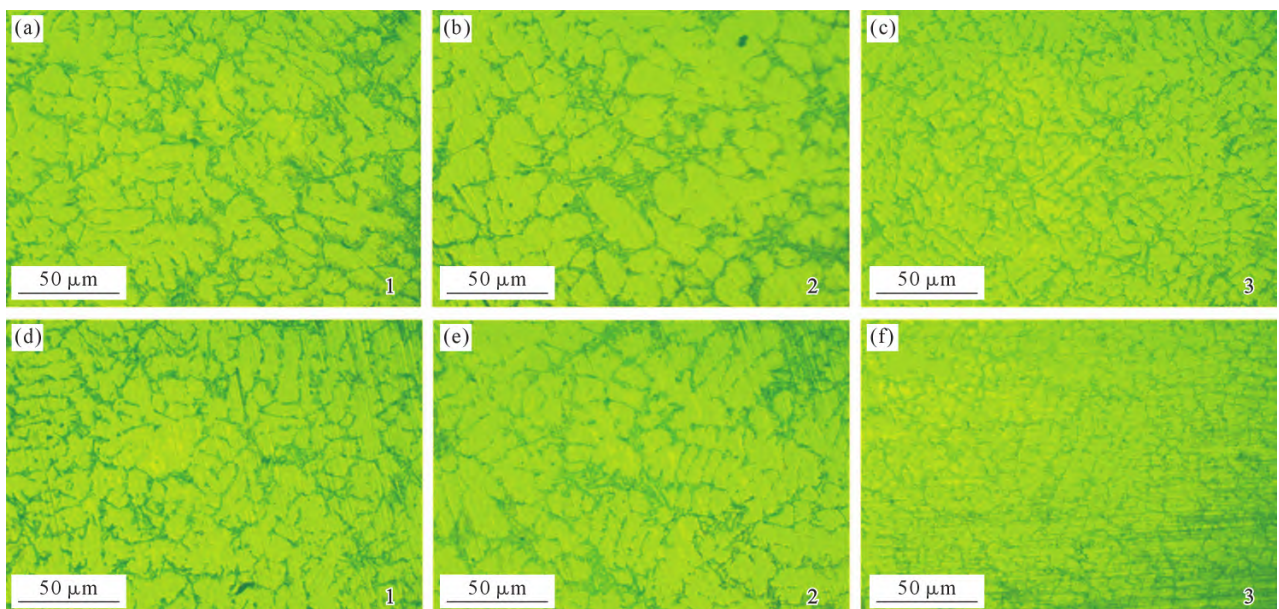


图 3 铸件金相图:(a~c) 工艺-1 且自然冷却条件下;(d~f) 工艺-2 且自然冷却条件下

Fig.3 Metallographic images of castings: (a~c) under Process-1 with natural cooling conditions; (d~f) under Process-2 with natural cooling conditions

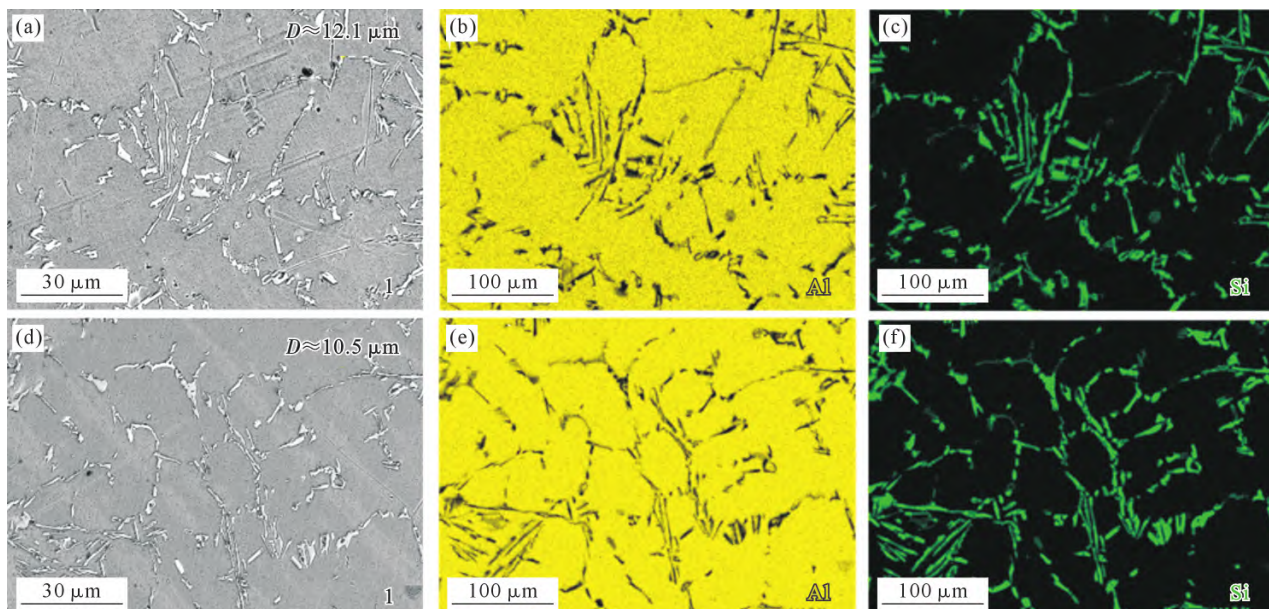


图4 铸件的高分辨图:(a~c) 工艺-1 及自然冷却条件下的 SEM 和 EDS 图;(d~f) 工艺-2 及自然冷却条件下的 SEM 和 EDS 图
Fig.4 High-resolution images of the casting: (a~c) SEM and EDS images of Process-1 under natural cooling conditions; (d~f) SEM and EDS images of Process-2 under natural cooling conditions

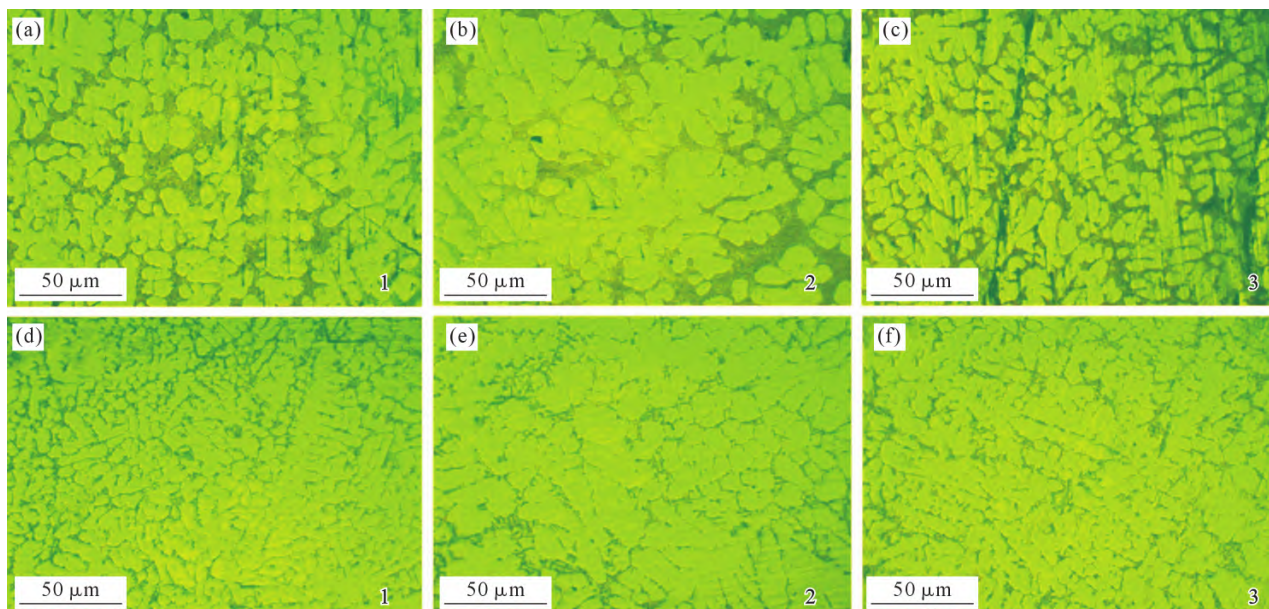


图5 铸件的金相图:(a~c) 工艺-1 且水冷条件下;(d~f) 工艺-2 且水冷条件下
Fig.5 Metallographic images of the casting: (a~c) under Process-1 with water cooling; (d~f) under Process-2 with water cooling

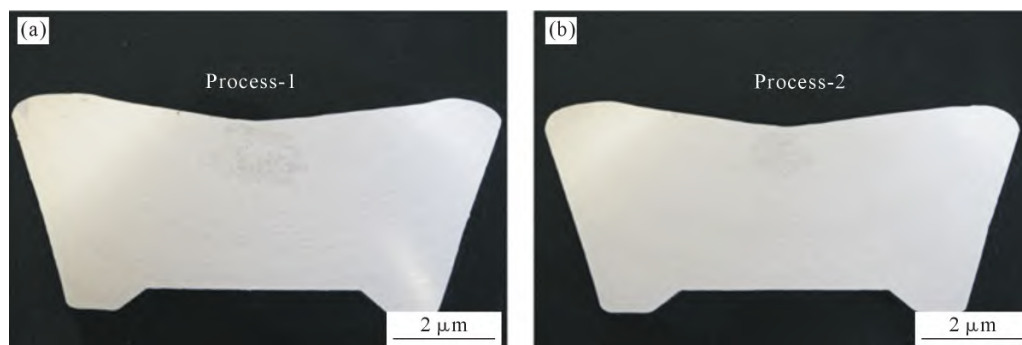


图6 铸件的低倍分析图:(a) 工艺-1 且水冷条件下;(b) 工艺-2 且水冷条件下
Fig.6 Low-magnification analysis diagram of the casting: (a) under Process-1 with water cooling; (b) under Process-2 with water cooling

原铝液后)立即添加钛剂,避免工业硅杂质消耗 Ti 元素,确保 $\text{TiB}_2/\text{TiAl}_3$ 形核核心高效弥散。相反,工艺-1 后期加入钛剂时熔体已富集杂质,导致细化剂失活。同时,工艺-2 分批加铝液(13.5 t $\rightarrow$ 钛剂 $\rightarrow$ 9 t),减少氧化夹渣,促进成分均匀性。此外,在相同工艺条件下,水冷比自然冷却具有更优异的组织细化效果,即形成的晶粒小且分布均匀。这是因为水冷提供了极大的冷却速率,导致凝固前沿的过冷度急剧增大,从而提高了形核率,晶粒来不及长大便相互接触,形成了细小的等轴晶组织。这验证了冷却速率是控制晶粒尺寸的最主要因素之一。

2.2 水冷条件下变质剂的作用效果及“拮抗效应”的发现

基于上述实验结果,在工艺-2 下,为了进一步研究冷却速率与变质剂的交互作用,开展了一系列水冷和自然冷却条件下的实验。图 7 展示了在水冷条件下,分别向熔体中添加铝液质量 0.26% 的 RE、Sr,以及质量比为 1:1 的 RE 与 Sr 的复合剂,并分析了 A356.2 铝合金在不同位置(1、2、3)的微观组织。

在水冷条件下,不同变质剂的作用效果也呈现出明显差异。由图 7a~c 和图 8a~c 可见,仅添加 RE 的试样,其晶粒细化效果最佳(平均颗粒直径 $D \approx 8.6 \mu\text{m}$),

其组织由非常细小、均匀的等轴晶组成,共晶硅也呈现出一定程度的改性。这表明稀土元素在高冷却速率下能够发挥优异的形核作用。相比之下,由图 7d~f 和图 8d~f 可知,仅添加 Sr 的试样,其 $\alpha\text{-Al}$ 相对粗大(平均颗粒直径 $D \approx 10.1 \mu\text{m}$),同时共晶硅分布相对集中。值得注意的是,由复合添加 RE+Sr 的试样(图 7g~i 和图 8g~i)可知,其晶粒细化效果不如单独添加 RE 的试样,晶粒相对粗大(平均颗粒直径 $D \approx 9.1 \mu\text{m}$),同时组织中析出了较多的块状或粗大针状的共晶硅。研究表明,在某些条件下,不同变质元素之间会相互削弱甚至抵消彼此的作用^[22]。

实验观察到水冷条件下 RE 与 Sr 复合添加产生了一定的相互抑制作用,即“拮抗效应”。在高冷却速率下,RE 可能通过形成高熔点的 RE-Al 化合物或富 RE 相作为异质形核核心。Sr 元素则主要通过吸附在硅晶体的生长表面上,改变其生长机制,促使共晶硅由片状向纤维状转变。然而,在高冷却速率下,Sr 可能优先吸附在由 RE 形成的潜在形核核心表面,或与 RE 元素反应生成其他化合物(如 Sr-RE 化合物),覆盖或消耗了原本有效的异质形核核心,导致 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒细化效果减弱。同时,Sr 被逐渐消耗,也削弱了其对共晶硅的变质效果。由此推断出 RE 和

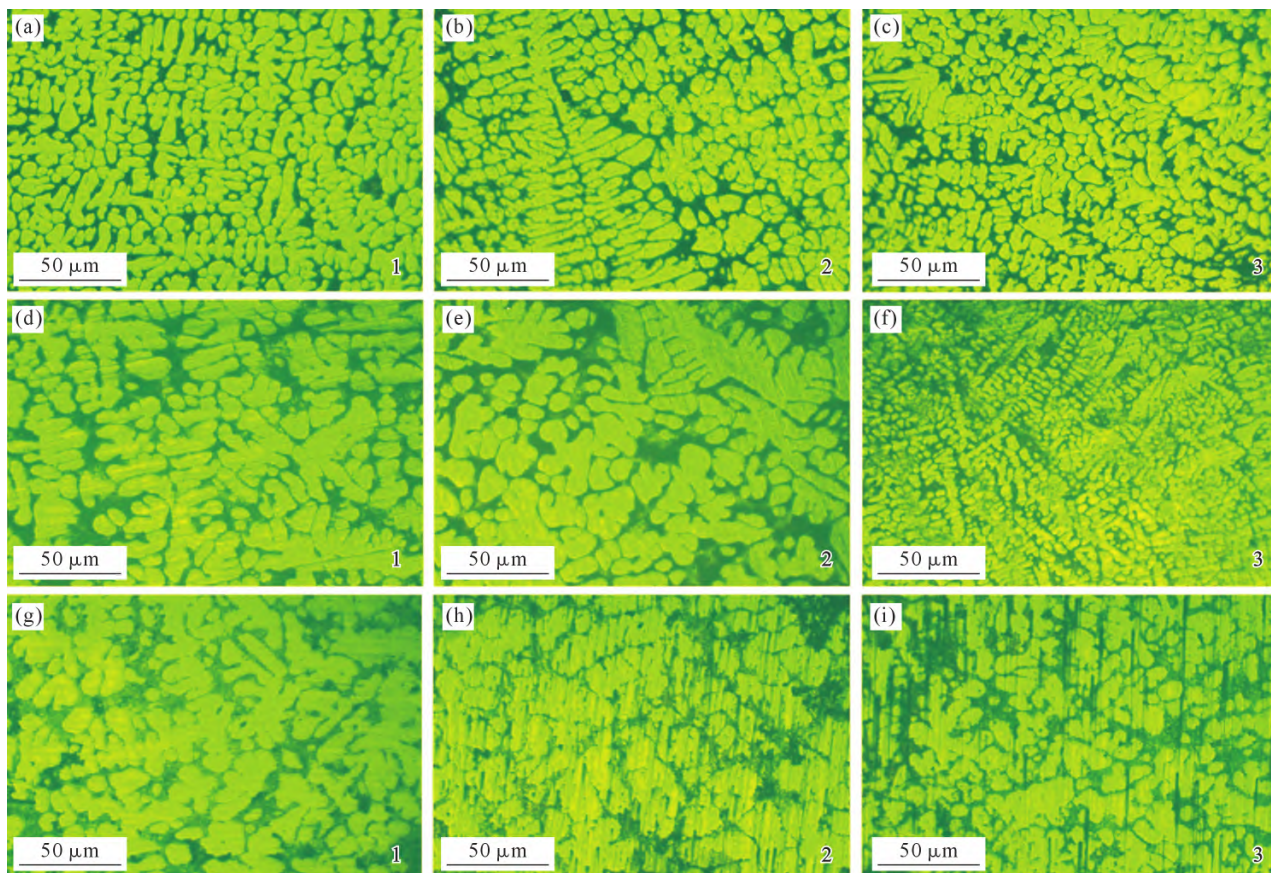


图 7 铸件金相图:(a~c) 添加 RE;(d~f) 添加 Sr;(g~i) 添加(RE+Sr)复合剂

Fig.7 Metallographic images of the casting: (a~c) with RE addition; (d~f) with Sr addition; (g~i) with (RE+Sr) composite modifier

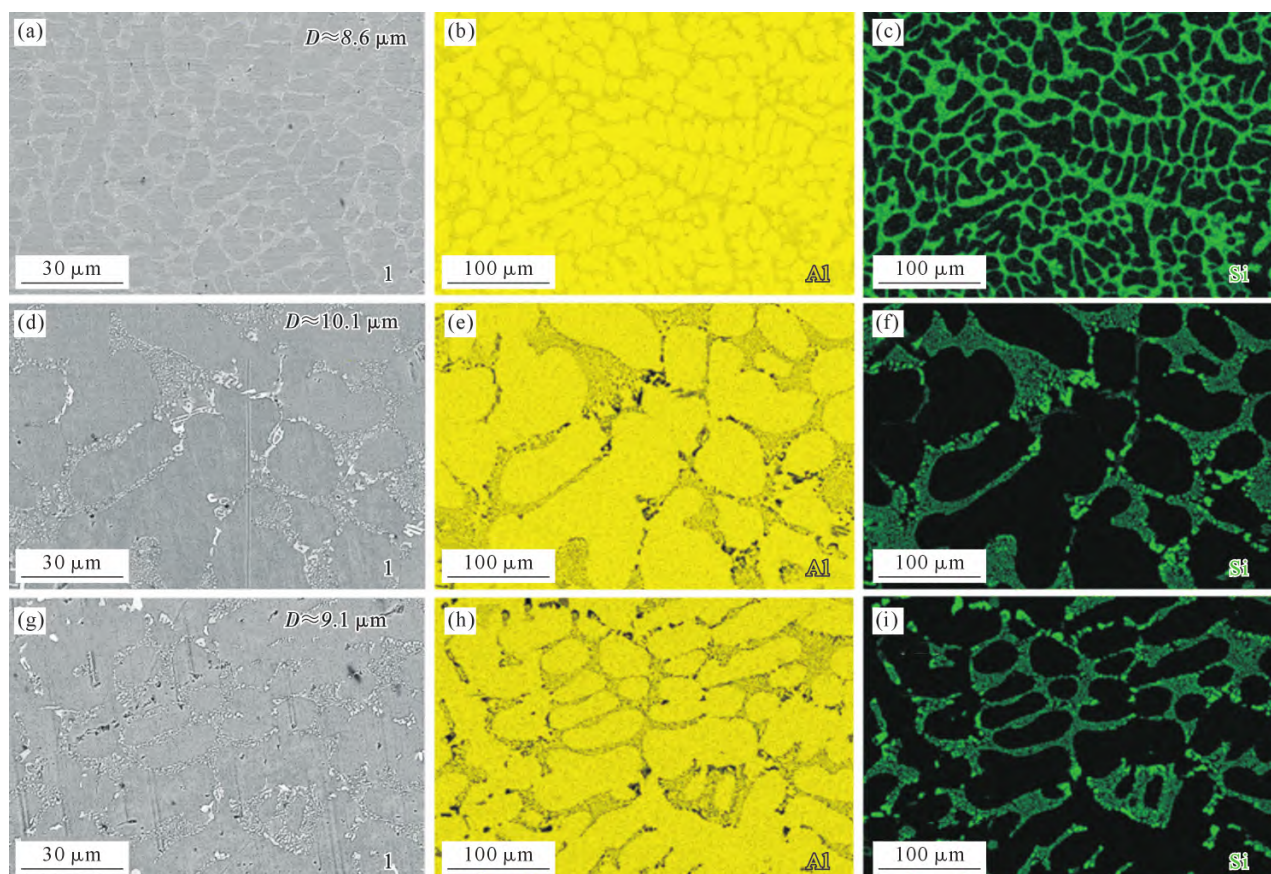


图8 铸件的高分辨图:(a~c)添加RE后的SEM和EDS图;(d~f)添加Sr后的SEM和EDS图;(g~i)添加(RE+Sr)复合剂后的SEM和EDS图

Fig.8 High-resolution images of the cast samples: (a~c) SEM image and EDS image with RE addition; (d~f) SEM image and EDS image with Sr addition; (g~i) SEM image and EDS image with (RE+Sr) composite modifier

Sr之间相互作用形成了复杂的金属间化合物(如Sr-RE-Al三元相)。这些化合物在高冷却速率下可能来不及溶解或均匀析出,形成尺寸较大、对形核和变质均无益甚至有害的粗大相。这些粗大相的存在不仅不能提供有效的形核基底,反而可能成为应力集中点,或阻碍RE和Sr对Si的变质作用。

此外,为探究自然冷却条件下不同变质剂的晶粒细化效果,在工艺-2及自然冷却条件下开展了不同变质剂的对比实验,实验结果如图9所示。可见,在自然冷却条件下,RE与Sr在熔体中的相互作用对有效形核并未形成显著干扰,即二者未产生明显的相互抑制现象。同时,对比图7(水冷条件)与图9(自然冷却)可知,在维持变质剂参数相同的情况下,水冷条件下的晶粒细化效果优于自然冷却条件,这与图5的实验结果一致。

根据实验结果可知,在水冷条件下RE与Sr的“拮抗效应”是多种因素共同作用的结果,核心在于快速凝固环境下,RE与Sr在熔体中的相互作用、对有效形核核心的干扰,以及在固/液界面的竞争性吸附,导致两者的细化与变质效能均未充分发挥,甚至相互抑制。这种效应在相对缓慢的自然冷却条件下

可能被掩盖(此时元素有更充分的时间扩散和发挥作用),但在高冷却速率下则变得显著。这一结果说明,在工业生产中复合添加变质元素时,须谨慎考虑元素间的协同或“拮抗效应”。

结合自然冷却和水冷两组实验结果,可以得出:①工艺-2相较于工艺-1,在改善组织方面表现更优,具有较好的工业应用前景;②提高冷却速率和添加变质剂是细化铸造铝合金A356.2晶粒的两种有效途径,且两者具有协同作用;③水冷本身就能获得细晶,在此基础上添加合适的变质剂,效果更佳;④本实验中,RE与Sr的组合在水冷条件下表现不佳,提示在进行合金成分设计和工艺制定时,需通过实验验证元素间的匹配性,并非所有元素的复合添加都能产生“1+1>2”的效果。

3 结论

(1)研究开发了一条A356.2铝合金生产工艺路线,其中工艺-2通过优化合金化顺序与搅拌策略,显著提升晶粒细化效果(α -Al晶粒尺寸减小约13%),为工业化应用提供了可靠的技术支撑。

(2)研究表明,冷却速率是影响A356.2铝合金

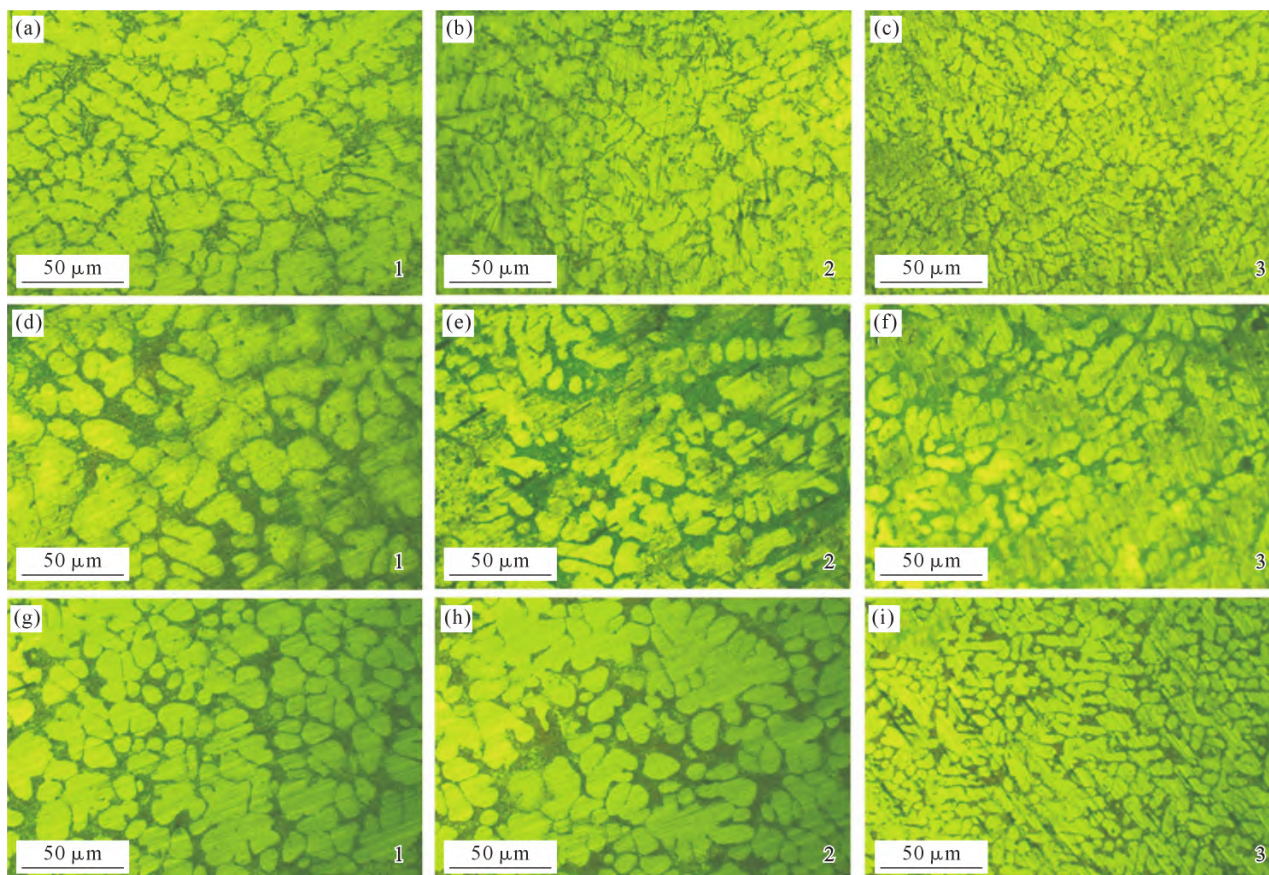


图 9 铸件的金相图:(a~c) 添加 RE;(d~f) 添加 Sr;(g~i) 添加(RE+Sr)复合剂

Fig.9 Metallographic images of the casting: (a~c) with RE addition; (d~f) with Sr addition; (g~i) with (RE+Sr) composite modifier

凝固组织的关键因素。与自然冷却相比,水冷能显著提高冷却速率,使铝合金获得更为细小的晶粒组织。

(3)在相同冷却条件下,RE、Sr 变质剂能有效促进异质形核,显著细化 α -Al 晶粒。

(4)在水冷条件下,不同变质剂的效果差异明显。单独添加 RE 的晶粒细化效果最佳。而单独添加 Sr 以及 RE+Sr 复合剂时,细化效果减弱,并导致较多粗大共晶硅的析出。首次揭示水冷条件下 RE 与 Sr 的拮抗机制,为变质剂适配性设计提供新思路。

参考文献:

- [1] BI J, WU L, LIU Z, WANG H, JIA X, CHEN X, CHEN X, STAROSTENKOV M D, DONG G. Formability, surface quality and compressive fracture behavior of AlMgScZr alloy lattice structure fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19:391-403.
- [2] OLMO R D, REVILLA R I, ANDREATTA F, GRAEVE I D. Layered double hydroxides on additively manufactured Al-Si alloy: Growth mechanism, microstructure and corrosion performance[J]. Applied Surface Science, 2025, 710: 163891.
- [3] 王宏宇, 苏宏福, 胡静怡, 高通, 刘相法. Al-Si 合金弹性模量与 Si 相含量及其形态的相关性研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(4): 362-370.
WANG H Y, SU H F, HU J Y, GAO T, LIU X F. Study of the relationships between the elastic modulus of Al-Si alloys and the Si

content and morphology [J]. Foundry Technology, 2025, 46 (4): 362-370.

- [4] KORKMAZ A, YAGCI T, CULHA O. A computational and experimental approach to the enhancement of heat treatment processes for Al-Si-Mg alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1035: 181468.
- [5] BAZHENOV V E, BARANOV I I, TITOV A Y, SANNIKOV A V, OZHERELKOV D Y, LYSKOVICH A A, KOLTYGIN A V, BELOV V D. Effect of Ti, Sr, and B addition on the fluidity of A356.2 grade aluminum alloy [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2022, 63(5): 526-536.
- [6] 蔡菲儿, 王议坚, 王文礼. 组织缺陷对 Mg-Y-Ca-Zr 镁合金力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2025, 46(7): 695-701.
CAI F E, WANG Y J, WANG W L. Effect of microstructure defects on mechanical properties of Mg-Y-Ca-Zr magnesium alloy [J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 695-701.
- [7] LI F, ZHANG W, KOOI B J, PEI Y. Eutectic aluminum alloys fabricated by additive manufacturing: A comprehensive review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2026, 250: 123-164.
- [8] FINKELSTEIN A, SCHAEFER A, CHIKOVA O, BORODIAN-SKIY K. Study of Al-Si alloy oxygen saturation on its microstructure and mechanical properties [J]. Materials, 2017, 10(7):786.
- [9] YANG B, PENG Q, MILKEREIT B, SPRINGER A, LIU D, RETTENMAYR M, SCHICK C, KEBLER O. Nucleation behaviour and microstructure of single Al-Si12 powder particles rapidly solidified in a fast scanning calorimeter [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(22):12881-12897.

- [10] AO X, XIA H, LIU J, HE Q, LIN S. A numerical study of irregular eutectic in Al-Si alloys under a large undercooling[J]. Computational Materials Science, 2021, 186: 110049.
- [11] SAMUEL A M, DOTY H W, VALTIERRA S, SAMUEL F H. New method of eutectic silicon modification in cast Al-Si alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2017, 11(3): 475-493.
- [12] LI Y, LIU Q, LI T, BI H, SHEN Z. Recent achievements in rare earth modified metal oxides for environmental and energy applications: A review[J]. Chinese Chemical Letters, 2025, 36(9): 110698.
- [13] YUAN S, PENG J, WANG W, GAN P, JI J, ZENG J. A new strategy for a combination of permanent magnet stirring and La-Ce addition toward the solidification of A356 aluminum alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2024, 55(10): 3968-3981.
- [14] SAMUEL A M, GARZA-ELIZONDO G H, DOTY H W, SAMUEL F H. Role of modification and melt thermal treatment processes on the microstructure and tensile properties of Al-Si alloys[J]. Materials & Design, 2015, 80: 99-108.
- [15] QIU C, MIAO S, LI X, XIA X, DING J, WANG Y, ZHAO W. Synergistic effect of Sr and La on the microstructure and mechanical properties of A356.2 alloy[J]. Materials & Design, 2017, 114: 563-571.
- [16] 胡威, 李小松, 梁志敏, 郑海燕. Sr+RE 在 Al-40wt% Si 合金中的复合变质作用[J]. 热加工工艺, 2011, 40(11): 42-49.
- HU W, LI X S, LIANG Z M, ZHENG H Y. Compound modification of Sr+RE in Al-40 wt % Si alloy[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(11): 42-49.
- [17] 张鹏, 马海英. RE-Sr 复合变质对轮毂用 A356 合金组织性能的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(4): 977-979.
- ZHANG P, MA H Y. Effect of RE-Sr composite modification on microstructure and properties of A356 alloy for wheel hub[J]. Foundry Technology, 2015, 36(4): 977-979.
- [18] DEEV V B, PRUSOV E S, SHUNQI M, RI E H, BAZLOVA T A, TEMLYANTSEV M V, SMETANYUK S V, PONOMAREVA S V, VPOVIN K N. The influence of the melt cooling rate on shrinkage behaviour during solidification of aluminum alloys[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537(2): 022080.
- [19] SAMUEL A M, DOTY H W, VALTIERRA S, SAMUEL F H. On the impact properties and fracture mechanisms of A356.2-Type cast alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2017, 11(4): 766-777.
- [20] CUI L, PENG Z B, CHANG Y Q, HE D Y, CAO Q, GUO X Y, ZENG Y. Porosity, microstructure and mechanical property of welded joints produced by different laser welding processes in selective laser melting AlSi10Mg alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 150: 107952.
- [21] YANG X, LUO X F, ZHANG X F, CHEN J M, GAO L Q. Characterization of hydrogen in a high strength aluminum alloy[J]. Materials Testing, 2020, 62(9): 962-964.
- [22] WANG J J, ZHANG K X, YING G B, CHENG J B, SONG D, JIANG J H, MA A B. Effects of RE (RE=Sc, Y and Nd) concentration on galvanic corrosion of Mg-Al alloy: A theoretical insight from work function and surface energy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 6958-6967.

(责任编辑:李亚敏)