

La 对大型 6061 铝合金铸锭中光亮晶粒缺陷的改善机制

刘 柱, 吴夏倪, 蓝一峰, 张 正

(遵义铝业股份有限公司(中国铝业股份有限公司), 贵州遵义 563100)

摘要: 针对6061铝合金半连续铸造中因非平衡凝固产生的“光亮晶粒”缺陷, 采用稀土元素镧La进行熔体变质处理, 以调控凝固组织, 消除宏观缺陷。基于25 T级工业熔炼炉试验, 结合OM/SEM分析, 揭示了La对铸锭中关键非平衡共晶相的变质机理。结果表明, 未变质合金中的“光亮晶粒”来源于局部缓冷引起的Fe、Si等溶质偏析, 其本质为晶界处粗大片状 β -Al(FeMgCu)Si相。添加0.12% La可抑制Fe原子参与 β 相择优生长, 使其转变为含La的骨骼状 β -Al(MgCu)Si复合相。工业应用证实, 该工艺可消除铸锭中的光亮晶粒缺陷, 显著提高组织均匀性, 为高品质6061铝合金铸锭的稳定生产提供了理论依据与工艺方案。

关键词: 6061铝合金; 变质处理; 光亮晶粒; 非平衡共晶相

中图分类号: TG146.21; TG244⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0786-05

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0100

Mechanism of La in Improving Bright Grain Defects in Large-Scale 6061 Aluminum Alloy Ingots

LIU Zhu, WU Xia-ni, LAN Yi-feng, ZHANG Zheng

(Zunyi Aluminum Co., Ltd., (Aluminum Corporation of China Limited), Zunyi 563100, Guizhou, China)

Abstract: Aiming at the bright grain defects induced by non-equilibrium solidification during semi-continuous casting of 6061 aluminum alloy, the rare earth element lanthanum (La) was used for melt modification to regulate the solidification structure and eliminate macroscopic defects. Based on the experiment of 25-ton industrial melting furnace, and combined with OM/SEM analysis, the modification mechanism of La on the key non-equilibrium eutectic phase in the ingot was revealed. The results show that the bright grain defects in unmodified alloys originate from the Fe and Si solute segregation caused by local slow cooling, which are essentially coarse lamellar β -Al(FeMgCu)Si phases distributed at grain boundaries. The addition of 0.12% La can inhibit the participation of Fe atoms in the preferential growth of β phase and transform it into a skeletal β -Al(MgCu)Si composite phase containing La. The industrial application results prove that the process can eliminate the bright grain defects in the ingot and significantly improve the uniformity of the microstructure, which provides a theoretical basis and process scheme for the stable production of high-quality 6061 aluminum alloy ingots.

Key words: 6061 aluminum alloy; modification treatment; bright grain; non-equilibrium eutectic phase

6061铝合金作为典型的Al-Mg-Si系可热处理强化合金, 因其综合性能优异, 已广泛应用于航空航天、3C电子等领域^[1-2]。然而, 在工业半连续铸造过程中, 由于其宽凝固温度区间与快速冷却条件, 溶质扩散不充分, 易形成 β -AlFeSi、 Mg_2Si 等非平衡共晶相^[3-5]。由于这些非平衡共晶相与铝基体之间存在电位差, 铸锭经碱腐蚀后, 若晶界处的 β -AlFeSi相等特定晶面暴

露于表面, 该区域会表现出与周围基体不同的反光特性, 在显微镜下呈现为更亮的“光亮晶粒”斑点^[6]。传统上常采用长时间高温均质化处理来消除或转变含铁相。例如, 杜鹏等^[7]人通过均质化促使有害的单斜 β -AlFeSi相转变为相对无害的体心立方 α -Al(FeMn)Si相, 并实现其球化。程志远等^[8]人的研究也表明, 高温均匀化处理能使6061铝合金铸态组织中的长针状

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合中引地[2026]013)。

收稿日期: 2026-03-31 收到初稿, 2026-04-10 收到修订稿。

作者简介: 刘柱(1994-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为轻有色金属冶炼。E-mail: 1259826476@qq.com

通信作者: 张正, 男, 硕士, 助理工程师。E-mail: 2550345570@qq.com

引用格式: 刘柱, 吴夏倪, 蓝一峰, 等. La 对大型 6061 铝合金铸锭中光亮晶粒缺陷的改善机制 [J]. 铸造, 2026, 75 (7): 786-790.

Liu Zhu, Wu Xiani, Lan Yifeng, et al. Mechanism of La in improving bright grain defects in large-scale 6061 aluminum alloy ingots [J]. Foundry, 2026, 75 (7): 786-790.

β -AlFeSi相转变为骨骼状或颗粒状 α -AlFeMnSi相,且升温有助于该过程进行。当前,通过添加微量变质元素从凝固源头调控相组成,已成为提升铸锭品质的新兴策略。栾粟^[9]指出,Er可与Fe相互作用,使富Fe相由粗大针条状、骨骼状转变为细小短棒状及块状,并在基体中形成微米级球状或类球状含Er富Fe相。特别地,La因其独特的4f电子结构和较强电负性,易于与其他元素反应生成多种金属间化合物^[10]。研究发现,添加La后的Al-Fe合金中出现了 $\text{Al}_8\text{Fe}_4\text{La}$ 、 $\text{Al}_{10}\text{Fe}_7\text{La}_2$ 、 $\text{Al}_{10}\text{Fe}_2\text{La}$ 及 $\text{Al}_{15}\text{Fe}_2\text{La}_2$ 等金属间化合物^[11]。此外,张欣等^[12]人研究混合稀土(37.3% La, 61.5% Ce)对Al-3.0%Mg合金微观组织的影响,发现适量稀土可细化晶粒、枝晶及骨骼状的富铁第二相,而过量稀土则导致在晶界处形成大量粗大骨骼状 $\text{Al}_4\text{Ce}/\text{Al}_4\text{La}$ 相。因此,有必要深入研究在6061铝合金熔体中添加微量La的变质作用,通过调控凝固过程以改变非平衡共晶相的形成机制,从而提升材料性能。

基于此,本研究在25 t级工业熔炼炉中添加Al-La中间合金对熔体进行变质处理,系统探究微量La对6061铝合金中 β -AlFeSi非平衡共晶相的变质机理,阐明其消除“光亮晶粒”缺陷的内在机制,以期为高品质6061铝合金铸锭的工业化稳定制备提供理论依据与工艺参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用主要原材料均由稳定的工业渠道获得。所用基础材料包括:纯度 $\geq 99.8\%$ 的电解原铝液(由遵义铝业股份有限公司内部供应),中间合金硅(Si, 12.0%),商业镁锭($\text{Mg} \geq 99.5\%$)、铜块($\text{Cu} \geq 98\%$)、锰剂($\text{Mn} \geq 90\%$)和稀土镧(La, 10.0%)。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),喷吹氮气压力为0.08 MPa($\text{N}_2 \geq 99.99\%$)。光学显微镜(OM, MC006-XTZ-D, 中国)和扫描电子显微镜(SEM, ZEISS GeminiSEM 300, 德国)用于分析铸件的组织形貌。6061铝合金的目标化学成分如表1所示。

表1 6061铝合金目标化学成分
Tab. 1 Target chemical composition of the 6061 aluminum alloy

aluminum alloy								$w_B/\%$
Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Cr	Zn	Ti	Al
0.56	0.56	0.1	0.17	0.18	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	余量

1.2 试验方法

本试验在容量为25 t的固定式燃气熔炼炉中进行,采用严格的控制变量法开展工业对比试验。A组为未添加La的常规工艺对照组,B组为添加0.12% La的优化工艺组,两组试验保持完全一致的半连续铸造工艺参数:铸造温度设定为725 $^{\circ}\text{C}$,结晶器冷却水流量为370 m^3/h ,铸造速度为130 mm/min。目标产品为直径 $\Phi 152$ mm,长度6 m的圆铸锭,每批次同盘铸造66支。铸造全流程通过高精度热电偶实时监测并记录关键热工参数,确保工艺的稳定性 and 可重复性。

1.3 组织表征

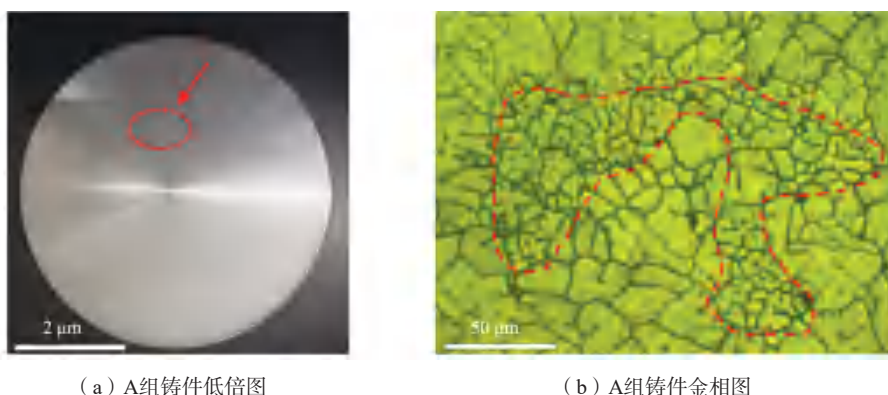
采用每组铸造的圆铸锭,在分别切除长度为150 mm的头、尾不稳定部分后,于中段位置截取厚度为20 mm的圆片铸件。铸件经表面车削平整后,在10% NaOH水溶液中腐蚀3~5 min,取出后用流水冲洗干净,再用30% HNO_3 溶液中和,最后冲洗吹干。使用OM观察并统计截面上的光亮晶粒缺陷的数量和分布。使用SEM观察光亮晶粒区域及周围基体的微观形貌,并利用其附带的能谱分析仪(EDS)对目标区域进行微区点扫分析,以确定各物相的元素组成和分布规律。

2 结果与讨论

2.1 未变质处理 6061 铝合金中光亮晶粒的物相鉴定与形成机理

为了揭示6061铝合金圆铸锭中“光亮晶粒”缺陷的物理本质,并阐明其与非平衡共晶相的内在关联,首先对未添加La变质剂的A组铸件进行了表征。图1展示了A组铸件经碱腐蚀且酸洗后的宏观与微观组织形貌。从宏观低倍组织图1(a)可以清晰地观察到,在整体呈均匀暗灰色的铝基体背景上,随机散布着若干尺寸较大、轮廓异常清晰的亮灰色斑块,这即工业生产中极力避免的典型“光亮晶粒”缺陷。这些宏观缺陷严重破坏了铸锭组织的连续性与均匀性。进一步的光学显微分析图1(b)表明,缺陷区域内的晶粒尺寸存在极端的分布特征,光亮斑块区域对应的晶粒尺寸显著大于周围正常基体,表现为异常长大的粗大晶粒群。

为探究导致宏观反光异常的微观结构根源,利用高分辨SEM对光亮晶粒核心区域进行了深度观察,如图2(a)所示。在微观尺度下,光亮晶粒晶界处富集了大量粗大(长度 $d \approx 25 \mu\text{m}$)、具有强烈方向性的非平衡凝固结晶片状产物。这些片状相在晶界处构建了一个局部的刚性粗糙网络,与周围基体中相对细小的

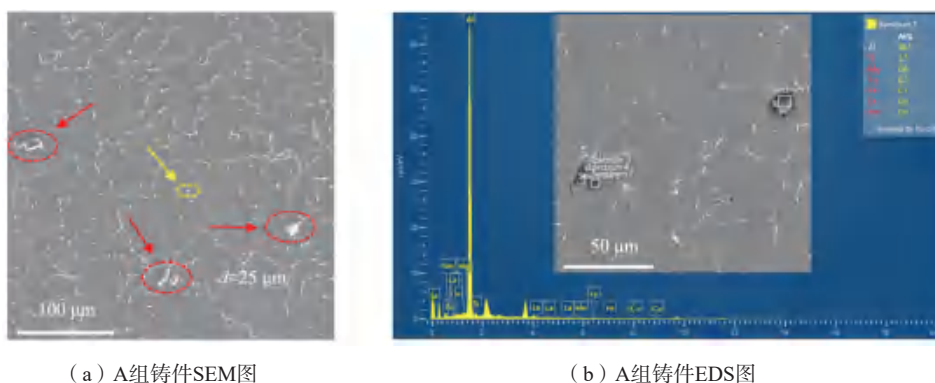


(a) A组铸件低倍图

(b) A组铸件金相图

图1 A组铸件的低倍图和金相图

Fig. 1 The macrograph and metallographic diagram of the group A castings



(a) A组铸件SEM图

(b) A组铸件EDS图

图2 A组铸件SEM图和EDS图

Fig. 2 SEM images and EDS diagram of the group A castings

α -Al枝晶形成了极大的形态反差。同时,晶粒内部仅散落少量细小的初生 Mg_2Si 粒子。研究表明,这种大尺寸的片状硬脆相是导致材料局部塑性急剧下降和应力高度集中的主要原因^[13]。

为了精准确定该非平衡粗大相的化学组成,利用EDS对其进行了微区点扫分析,如图2(b)所示。能谱定量结果显示,该粗大片状相主要由Al、Si、Fe以及部分固溶的Mg、Cu这5种元素组成。结合其单斜片状的晶体学特征,可确定该物相为Mg、Cu掺杂的非平衡 β -Al(FeMgCu)Si固溶体相。这一关键发现表明,6061铝合金中的“光亮晶粒”缺陷,其微观本质是在凝固中后期, Si和Fe原子发生严重的宏观偏析,并优先在局部晶界处析出、聚集形成的粗大 β -AlFeSi基相团簇。由于该区域消耗了大量的溶质原子,导致其周围难以达到形成正常细小共晶组织所需的浓度起伏条件,从而形成了贫溶质的异常粗大 α -Al晶粒。

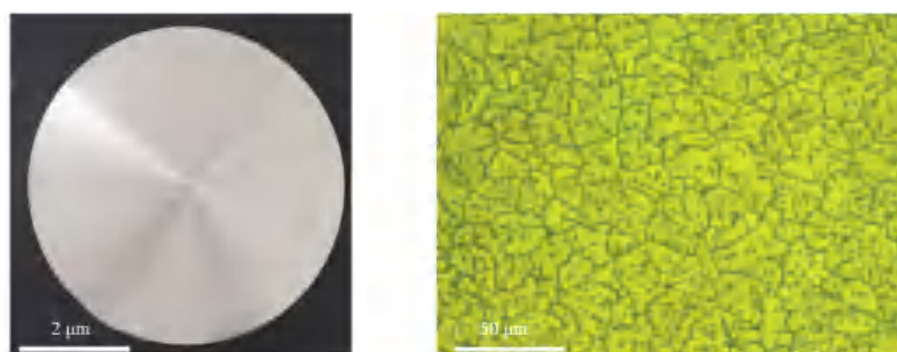
在半连续铸造的深液穴中,若局部热工参数(如冷却水膜破裂、导热不均)发生微小波动,极易在铸锭心部或特定半径处形成局部缓冷区^[14]。因此,在此低冷却速率条件下,溶质元素Fe和Si拥有充足的时间扩散,被不断推进的 α -Al固-液界面排斥并高度富集于枝

晶间的残余液相中。当局部微区的Fe、Si浓度突破共晶点阈值时,便以初生相的形式爆发性析出 β -AlFeSi相。由于 β 相具有强烈的各向异性生长习性,其极易沿特定晶面(如基面)快速二维生长,最终演变为宏观可见的粗大片状团簇^[15]。这些团簇在耐碱腐蚀性能上与基体存在显著的电位差,导致在宏观酸碱洗后呈现出“光亮”的视觉假象。

2.2 La变质对光亮晶粒及含铁相的抑制作用

在明确了缺陷的物相本质后,重点评估了添加0.12% La的B组(优化组)铸件的组织演变。图3(a)展示了B组铸件在相同严苛腐蚀条件下的宏观截面形貌。与未变质组形成强烈反差的是,添加La后的铸锭截面组织极其致密、均匀,整体呈现一致的暗灰色调,未观察到任何肉眼可见的“光亮晶粒”斑点。这进一步证实微量La的引入能够消除导致产品降级的局部偏析缺陷。金相观察图3(b),进一步证实变质后全截面的晶粒尺寸分布高度均匀,消除了晶粒异常长大的现象。

为了揭示La消除宏观缺陷的微观机制,对B组铸件进行了高分辨SEM表征,如图4(a)所示。显微结构

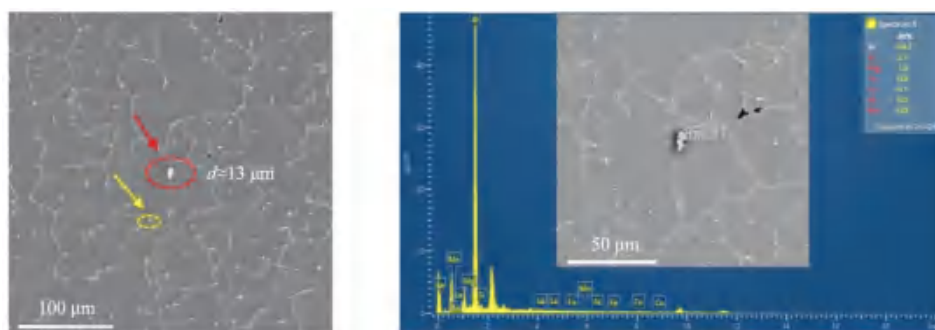


(a) B组铸件低倍图

(b) B组铸件金相图

图3 B组铸件低倍图和金相图

Fig. 3 The macrograph and metallographic diagram of the group B castings



(a) B组铸件SEM图

(b) B组铸件EDS图

图4 B组铸件SEM图和EDS图

Fig. 4 SEM images and EDS diagram of the group B castings

发生了颠覆性的变化：A组晶界处泛滥的粗大片状Mg/Cu掺杂 β -AlFeSi相几乎消失，取而代之的是一种尺寸显著细化（平均长度 $d \approx 13 \mu\text{m}$ ）、形态高度紧凑的骨骼状第二相。与尖锐的片状 β 相相比，这种新型骨骼状相的边缘较为圆钝，其对铝基体的割裂作用被降至最低^[16]。可知，这种形态的转变将大幅缓解材料在受力时的微观应力集中效应，从而显著提升合金的韧性^[17]。

对图4(a)中的新型骨骼状相进行EDS精确定量分析，如图4(b)所示，获得了极具启发性的结果。能谱不仅检测到了Al、Si、Mg和Cu等常规基体元素，更清晰地捕捉到了La元素的富集信号。更为关键的是，在该相的检测区域内，原本富集有害元素Fe的信号几乎完全消失。这一成分的突变强有力地证明：La元素的介入，不仅在物理形态上改变了析出相，更在化学成分上产生了“置换”效应。La成功抑制了Fe元素参与非平衡共晶相的构建，促使原本的 β -Al(FeMgCu)Si相转变为一种全新的、不含Fe的含La多元复合相，即 β -Al(MgCu)Si-La相。推测该复合相在电化学性质上与基体更为接近，在宏观碱洗腐蚀时不再产生强烈的差异性溶解，从而从根本上消除了“光亮晶粒”引起的视觉特征。

3 La变质抑制光亮晶粒的机理探讨

综合上述宏观现象与微观表征结果，本研究提出微量La元素对6061铝合金非平衡共晶相的调控及缺陷消除机理，主要包含以下两个协同作用维度。（1）固液界面前沿的溶质再分配机制。根据固溶体畸变理论，La原子半径远大于Al和Fe，其La极难固溶于 α -Al基体中，在凝固过程中会被强烈排斥至固-液界面前沿的富溶质液相区^[18-19]。当富含Fe、Si的残余液相达到过冷度开始形核生长初生金属间化合物时，具有高表面活性的La原子会优先吸附在 β -AlFeSi相的高能生长台阶（如特定晶面）上，阻断了 β 相沿长轴方向的快速一维生长，迫使其向各向同性的三维骨骼状演变。同时，La的强电负性使其更易与Si、Cu等元素结合，在热力学上促使Mg、Cu替代Fe的位置，最终诱导生成了对力学性能危害较小的含La骨骼状 β -Al(MgCu)Si复合相。（2）异质形核与组织细化机制。EDS分析证实La参与不含铁复合相的形成。在熔炼及凝固初期的高温阶段，La极易与铝液中的Al、Si等元素发生反应，原位生成大量弥散分布的微小稀土金属间化合物。这些高熔点微粒与 α -Al基体具有良好的晶体学匹配度，可

作为极其高效的异质形核核心。形核质点使得晶粒在形核初期便相互接触并限制彼此的生长空间, 不仅显著细化了宏观晶粒尺寸, 也使得残余液相被分割成无数微小孤岛。这从根本上切断了Fe、Si元素进行长程扩散和宏观偏析的通道, 使得含铁相在消耗完局部微量溶质后便停止生长, 从而有效抑制了粗大相的形成。

4 结论

针对6061铝合金工业半连续铸造过程中的“光亮晶粒”缺陷及非平衡共晶相粗大问题, 引入微量La元素进行熔体变质处理, 通过25 T级工业试验及OM/SEM表征, 系统阐明了La的变质机理。

(1) 明确了6061铝合金铸锭中“光亮晶粒”缺陷的微观物相本质。该缺陷并非单纯的晶粒粗大, 而是由于凝固末端局部缓冷导致Al、Si、Mg、Cu和Fe元素

发生宏观偏析, 在晶界处异常析出并聚集的粗大片状Mg/Cu掺杂的 β -Al(FeMgCu)Si非平衡共晶相团簇所致。

(2) 证实了微量稀土La是调控非平衡共晶相、消除宏观偏析缺陷的极佳变质剂。在工业生产中添加0.12%的La, 能够消除铸锭全截面的光亮晶粒缺陷。La原子通过在固液界面前沿的偏聚作用, 强烈排斥Fe元素参与新相的构建, 成功促使有害的粗大片状 β -Al(FeMgCu)Si相转变为细小且弥散分布的含La骨骼状, 即 β -Al(MgCu)Si-La复合相。

(3) 揭示了La变质的多重协同机制。La不仅通过改变相变热力学路径实现了物相的“去铁化”转变, 还通过原位生成高熔点化合物促进异质形核细化组织。该研究成果为高品质6061铝合金的工业化稳定生产提供了切实可行的工艺优化方案和理论支撑。

参考文献:

- [1] Liu Q, Jin Y, Bian Q, et al. Influence of the solidification rate on the microstructure and mechanical properties of rapidly solidified Al-Mg-Si alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 39: 692-702.
- [2] Chi Y, Murali N, Li X. Rapid investment casting of nanotechnology-enhanced aluminum alloy 6061 [J]. Rapid Prototyping Journal, 2024, 31 (1): 23-31.
- [3] Whitney M A, Jin H, Wells M A, et al. Thermal analysis and characterization of cast 6061 aluminum alloy microstructures with elevated iron content [J]. Thermochimica Acta, 2025, 746: 179951.
- [4] Jin D, Li H, Yang C, et al. The effects of Mg and Si contents on the microstructure and solidification behavior of dilute Al-Mg-Si-Fe alloys [J]. JOM, 2023, 75 (11): 4845-4857.
- [5] 薛冠霞, 钟鼓, 王征, 等. 均匀化对锻造车轮用6061铝合金铸棒组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (5): 686-691.
- [6] 蒋秋妹, 周伟, 吴信康, 等. 电池托盘用6061铝合金型材的点蚀分析与热处理工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (7): 1050-1056.
- [7] 杜鹏, 闫晓东, 李彦利, 等. 6061铝合金中富铁相在均匀化过程中的相变机理 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (5): 981-987.
- [8] 程志远, 王经涛, 郭丰佳, 等. 均匀化处理对6061铝合金显微组织及相演变行为的影响 [J]. 金属热处理, 2023, 48 (5): 196-203.
- [9] 栾粟. Er含量对6061铝合金铸轧板组织演变行为影响研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021.
- [10] 赵冠楠, 耿开杰, 郑增, 等. Al-Fe合金相变研究现状 [J]. 有色金属材料与工程, 2016, 37 (6): 301-308.
- [11] Srinivasan S, Raman A, Ferrel R E, et al. Lanthanum-containing ternary solid solutions with NaZn_{13} , ThMn_{12} and $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ -type crystal structures [J]. International Journal of Materials Research, 2021, 88 (6): 474-479.
- [12] 张欣, 王泽华, 邵佳, 等. 稀土对Al-3.0wt.%Mg合金微观组织结构的影响和作用机理 [J]. 铸造, 2020, 69 (1): 51-57.
- [13] 刘满平, 薛周磊, 彭振, 等. 后时效对超细晶6061铝合金微观结构与力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2023, 59 (5): 657-667.
- [14] 左玉波, 张淑颖, 王睿, 等. 高强铝合金外场辅助半连续铸造研究现状与展望 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (6): 881-889.
- [15] 符云帆, 易幼平, 黄始全, 等. 超低温压缩对6061铝合金微观组织的影响 [J]. 机械工程学报, 2025, 61 (14): 56-62.
- [16] 柳玉军. 超声功率对ZL114A-0.6Y合金组织与性能影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (11): 1548-1553.
- [17] 薛彦庆, 李博, 王新亮, 等. 微合金化对 TiB_2 颗粒增强铝基复合材料微观组织和力学性能影响的研究进展 [J]. 材料工程, 2021, 49 (11): 51-61.
- [18] 许乾, 傅高升, 宋莉莉, 等. La和Ce掺杂对 α -Al结构和弹性性质影响的第一性原理研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (8): 939-944.
- [19] 张丽丽, 吉宗威, 赵九洲, 等. 亚共晶Al-Si合金中微量元素La变质共晶Si的关键影响因素 [J]. 金属学报, 2023, 59 (11): 1541-1546.