

Research Progress on Laser Additive Manufacturing of High-Performance Aluminum Alloys

Xunqiang Zhang Yingbo Guo Chunxin Shu Zhitong Huang Mengping Huang

School of Materials and Environment, Guangxi University for Nationalities, Nanning, Guangxi, 530006, China

Abstract

Aluminum alloys have become key materials for lightweight manufacturing in the aerospace industry due to their high specific strength and lightweight characteristics. However, traditional preparation processes struggle to meet the high-performance requirements of complex components. Although laser additive manufacturing technology offers a new pathway for forming high-performance aluminum alloys, it still faces core challenges such as hot cracking susceptibility, porosity defects, and microstructural anisotropy. This paper systematically reviews the research progress in laser additive manufacturing of high-performance aluminum alloys. Firstly, the core issues during the forming process are elaborated from three aspects: solidification cracking, porosity defects, and anisotropy. Secondly, the application of two major strategies—alloy composition design and process control—in defect suppression is analyzed emphatically. Finally, the performance breakthroughs of typical aluminum alloy systems are summarized, and future directions for multi-objective optimization design are prospected.

Keywords

laser additive manufacturing; high-performance aluminum alloy; defect control; microalloying; multi-energy field coupling

激光增材制造高性能铝合金研究进展

张训强 郭迎博 舒春鑫 黄智同 黄梦萍

广西民族大学材料与环 境学院, 中国 · 广西 南宁 530006

摘 要

铝合金因其高比强度和轻质特性成为航空航天领域轻量化制造的关键材料, 但传统制备工艺难以满足复杂构件的高性能需求。激光增材制造技术虽为高性能铝合金成形提供了新路径, 但仍面临热裂纹敏感、气孔缺陷及组织各向异性等核心挑战。本文系统综述了激光增材制造高性能铝合金的研究进展。首先, 从凝固裂纹、孔隙缺陷及各向异性三个方面阐述了成形过程中的核心问题; 其次, 重点分析了合金成分设计与工艺调控两大策略在缺陷抑制中的应用; 最后, 总结了典型铝合金体系的性能突破并对未来多目标优化设计方向进行展望。

关键词

激光增材制造; 高性能铝合金; 缺陷调控; 微合金化; 多能场复合

1 引言

铝合金作为低密度、高比强度的金属材料, 在航空航天、新能源汽车等领域具有不可替代的轻量化优势^[1-2]。随着我国大飞机制造、深空探测等重大工程的推进, 对复杂薄壁、整体化铝合金构件的需求日益迫切。激光增材制造技术(包括选区激光熔化和激光金属沉积)凭借其逐点成形的柔性化特征能够实现快速熔化细化晶粒、抑制成分偏析, 为高性能铝合金复杂构件的短周期制备提供了新途径^[3]。然而, 铝合金高激光反射率、高导热率及高氢溶解度等物理特性导致增材制造过程极易产生热裂纹、气孔及组织各向异性等缺陷^[4],

严重制约了其在关键承力构件中的应用。

2 激光增材制造铝合金面临的核心问题

2.1 凝固裂纹敏感性制约高强铝合金成形

高强铝合金(如 7075、2024 等)含有大量 Cu、Zn、Mg 等强化元素, 固液相线温度区间较宽, 凝固末期易形成固液共存的“糊状区”^[5]。激光增材制造极高的温度梯度与冷却速率导致熔池内产生显著热应力同时熔体流动性差, 难以有效回填收缩形成的微孔, 最终在晶界液膜处萌生凝固裂纹^[6]。研究表明, 7xxx 系铝合金的临界开裂应力仅为 63 MPa^[7], 成形难度极大。尽管微合金化改性(如添加 Sc、Zr、Ti 等元素)可通过异质形核细化晶粒、延长裂纹扩展路径降低裂纹形成^[5-6], 但完全消除裂纹仍需结合后续热处理与工艺优化。

【基金项目】广西民族大学自治区级大学生创新创业训练计划项目资助(项目编号: S202410608238)。

【作者简介】张训强, 男, 本科, 从事金属材料工程研究。

2.2 孔隙缺陷显著降低构件疲劳寿命

孔隙是激光增材制造铝合金的另一类关键缺陷，主要分为未熔合孔隙与氢气孔两类。铝合金对近红外激光反射率高达 94%，能量耦合效率低，易导致粉末未充分熔化形成未熔合缺陷；同时，铝液对氢溶解度随温度变化显著，快速凝固过程中气体来不及逸出形成球形氢气孔^[4]。高分辨率 X 射线显微 CT 观察显示，气孔多位于熔池内部，而未熔合缺陷集中于熔池边界与层间界面^[6]。这些孔隙在循环载荷下成为裂纹萌生源，显著降低构件的高周疲劳寿命，严重制约了其在航空发动机等关键部件中的应用。

2.3 组织各向异性导致力学性能不均匀

激光增材制造的逐层堆积特性与熔池极端温度梯度促使晶粒沿构建方向外延生长形成粗大柱状晶，导致显著的组织与各向异性^[8]。电子背散射衍射分析表明，AlSi10Mg 合金经选区激光熔化后呈现强烈的 <100> 丝织构，水平方向与垂直方向力学性能差异可达 20% 以上^[8]。此外，熔池边界与中心区域凝固条件差异导致组织不均匀，中心细晶区与外围粗晶区并存进一步恶化了性能一致性。虽然通过添加晶粒细化剂可弱化织构强度^[6]，但实现真正的各向同性仍需突破现有工艺局限。

3 高性能铝合金性能突破研究

3.1 合金成分设计与微合金化改性

针对热裂纹敏感性，微合金化改性被视为调控凝固行为的有效手段。Sc、Zr、Ti 等元素与铝形成 Al₃Sc、Al₃Zr、Al₃Ti 等 L1₂ 结构纳米相，作为异质形核核心可有效细化晶粒、促进柱状晶向等轴晶转变^[9-10]。Deng 等^[9]通过热力学计算并设计了 Al-Zn-Mg-Sc 合金，Sc 的加入改变了凝固路径，经固溶时效处理后抗拉强度达 390 MPa、延伸率为 29.6%。Li 等^[10]利用商用 TC4 钛合金粉末引入 Ti、V 元素，使 7075 铝合金抗拉强度提升至 441 MPa。此外，TiC、TiB₂ 等纳米颗粒增强技术通过外加陶瓷相提供形核位点，同时利用载荷传递机制实现复合强化^[11]，为高强铝合金无裂纹成形提供了新途径。

多元协同合金化设计是研发耐热铝合金的重要方向。Singh 等^[12]开发的 Al-Ni-Ti-Zr-Mn 合金利用 Ni 元素的共晶凝固机制抑制裂纹，形成纳米级 L1₂ 析出相与亚微米共晶通道的分级组织，在密度仅 0.77 g/cm³ 时点阵结构压缩屈服强度达 63.13 MPa。Qi 等^[13]设计的 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金通过超低扩散系数元素构建热稳定纳米析出相，在 300℃ 下屈服强度仍保持常温时的 37%，突破了传统铝合金的高温软化瓶颈。

3.2 工艺参数优化与多能场辅助

工艺参数直接决定熔池热流行为与凝固特征。研究表明，激光功率与扫描速度的比能量输入显著影响气孔率与晶粒尺寸：功率过低导致未熔合，过高则引起匙孔气孔^[14]。吴尚育等^[14]优化激光熔丝增材工艺，在 3.0 kW 功率与 4.5 m/min 送丝速率下气孔率降至 1.46%。基板预热也可降低温

度梯度、延长凝固时间，促进气体逸出与应力释放^[15]。

光束整形与摆动策略通过重构能量场分布改善成形质量。圆形摆动光束可稳定匙孔动态、促进气泡逸出，同时搅拌作用打断柱状晶外延生长^[16]。Cui 等^[16]证实圆形摆动配合 50% 搭接率可获得最低气孔率与最平整表面。多能场复合技术进一步拓展了工艺窗口：磁场辅助通过洛伦兹力诱导熔池水平涡流，促进等轴晶形成并抑制 Si 元素偏析^[17]；激光-电弧复合制造结合高能量密度与低成本的优点，通过熔池流体模式调控减少未熔合缺陷^[18]；超声振动则利用空化效应破碎气孔、细化组织。

3.3 典型铝合金体系性能突破

Al-Si-Mg 系合金凭借优异的铸造性能成为商业化标杆材料。针对其高温性能不足问题，Lehmhus 等^[19]通过去应力退火抑制胞状结构分解，使合金适用于 250℃ 以上热端部件。Soyama^[20]采用水下激光喷丸复合工艺，在次表层引入高密度位错与压应力，将 AlSi10Mg 疲劳强度从 54 MPa 提升至 103 MPa，实现了性能的翻倍。

Al-Cu 系合金虽具有极高比强度潜力，但其宽凝固区间导致的热裂纹敏感性长期制约应用。贾增庆等^[21]通过添加 1.5% TiC 颗粒改性 2024 铝合金，TiC 作为异质形核核心细化组织，并引入 Cu 元素后经 T6 热处理后抗拉强度达 400 MPa。Xi 等^[22]提出 Ti 与 CcB₆ 协同微合金化策略，利用高生长限制因子与形核作用实现晶粒极度细化，在扫描速度高达 1200 mm/s 下仍无裂纹成形。

Al-Zn-Mg-Cu 系合金作为航空航天主力材料，面临热裂纹与元素烧损双重挑战。胡嘉颖^[23]针对 7075 合金提出固溶加双级时效工艺，通过控制析出序列使晶界析出相由连续网状转变为断续链状，在显微硬度提升至 160 HV 的同时显著改善耐蚀性。曹少霆^[7]通过机械混粉引入 Ti 颗粒，利用原位反应生成纳米 Al₃Ti 相使临界开裂应力从 63 MPa 激增至 1696 MPa，从根本上解决了高强铝合金的成形难题。

4 结论

激光增材制造为高性能铝合金复杂构件的成形提供了变革性技术路径，但在解决热裂纹敏感、气孔缺陷及组织各向异性等核心瓶颈方面仍有待突破。因此，基于目前面临的核心问题与国内外研究现状，未来需在以下方面进一步深入研究：

- (1) 探索如何综合考虑强韧性、耐热性及成本等多目标需求，建立基于机器学习辅助的合金成分设计方法，开发激光增材制造专用铝合金体系；
- (2) 构建多能场时空协同调控机制，将光束摆动、磁场辅助、超声振动等技术与实时监测相结合，实现熔池形态与凝固组织的精准控制；
- (3) 进一步研发原位热处理与智能化工艺装备，利用增材制造过程中的热循环诱导纳米相原位析出，减少后续热处理工序，建立工艺-组织-性能的全流程智能优化体系。

表 1 激光增材制造典型铝合金体系力学性能对比

合金体系	改性 / 工艺方法	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	延伸率 (%)	疲劳强度 (MPa)	其他指标 / 备注	参考文献
Al-Zn-Mg-Sc	Sc 微合金化 + 固溶时效	390		29.6			[9]
7075	引入 TC4 钛合金粉末 (Ti、V)	441					[10]
Al-Ni-Ti-Zr-Mn	Ni 共晶凝固 + 纳米 L1 ₂ 析出相		63.13			密度 0.77 g/cm ³	[12]
Al-Cu-Li-Sc-Zr	超低扩散系数元素 + 纳米析出相					300°C 下屈服强度保持常温 37%	[13]
AlSi10Mg	水下激光喷丸				103	原始疲劳强度 54 MPa	[20]
2024	1.5% TiC 颗粒 + T6 热处理	400					[21]
7075	机械混粉引入 Ti 颗粒					临界开裂应力 1696 MPa	[7]

参考文献

[1] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 32-55.

[2] MARTIN J H, YAHATA B D, HUNDLEY J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. Nature, 2017, 549(7672): 365-369.

[3] 郭成波, 邢伟越, 郭艳玲, 等. 激光增材制造金属基复合材料工艺研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(10): 15-21.

[4] 邹田春, 祝贺, 陈敏英, 等. 激光选区熔化成形铝合金的缺陷及控制方法研究进展[J]. 热加工工艺, 2023, 52(8): 1-6.

[5] 刘小辉, 刘允中. 激光选区熔化成形高强铝合金晶粒细化抑制裂纹研究现状[J]. 材料工程, 2022, 50(8): 68-78.

[6] 吴圣川, 胡雅楠, 杨冰, 等. 增材制造材料缺陷表征及结构完整性评定方法研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 3-29.

[7] 曹少霆. 难加工 7075 铝合金激光增材制造及改性调控研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.

[8] 奥妮, 何子昂, 吴圣川, 等. 激光增材制造 AlSi10Mg 合金的力学性能研究进展[J]. 焊接学报, 2023, 44(9): 92-102.

[9] LI R, ZHAO H, SHAO J, et al. Composition design of low hot-cracking susceptibility of Al-Zn-Mg-Sc alloy and its formability during laser additive manufacturing[J]. Materials Characterization, 2024, 207: 113552.

[10] LI G, RUAN G, HUANG Y, et al. Facile and cost-effective approach to additively manufacture crack-free 7075 aluminum alloy by laser powder bed fusion[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 976: 173003.

[11] 朱昌隆, 王洪泽, 郭利萍, 等. 铝基复合材料激光粉末床熔化增材制造研究现状[J]. 铸造技术, 2024, 45(1): 12-20.

[12] SINGH A K, AWASTHI P D, ROY A, et al. Novel high specific-strength multi-topology Al-Ni-Ti-Zr-Mn alloy using laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing Letters, 2024, 8: 100187.

[13] QI Y, ZHANG H, YANG X, et al. Achieving superior high-temperature mechanical properties in Al-Cu-Li-Sc-Zr alloy with nano-scale microstructure via laser additive manufacturing[J]. Materials Research Letters, 2024, 12(3): 189-197.

[14] 吴尚育, 吴集思, 侯俊峰, 等. 激光熔丝增材 205B 铝合金组织、气孔及力学性能研究[J]. 中国激光, 2024, 51(12): 1202305.

[15] 高转妮, 王磊磊, 李响, 等. 7075 铝合金激光熔丝增材制造热循环和温度梯度对熔池凝固组织的影响研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(10): 267-276.

[16] CUI X, QI E, SUN Z, et al. Wire oscillating laser additive manufacturing of 2319 aluminum alloy: optimization of process parameters, microstructure, and mechanical properties[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2024, 3(2): 100067.

[17] WANG R, WANG J, LEI L M, et al. Laser additive manufacturing of strong and ductile Al-12Si alloy under static magnetic field[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 178: 123-133.

[18] 靳佩昕. 2319 铝合金激光诱导电弧增材-轧制复合工艺的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.

[19] LEHMUS D, RAHN T, STRUSS A, et al. High-temperature mechanical properties of stress-relieved AlSi10Mg produced via laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Materials, 2024, 17(6): 1324.

[20] SOYAMA H. Improvement of fatigue strength in additively manufactured aluminum alloy AlSi10Mg via submerged laser peening[J]. Coatings, 2023, 13(5): 892.

[21] 贾增庆, 高通, 王桂龙, 等. 激光选区熔化 2024 改性 AlSi10Mg 合金[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(7): 2189-2199.

[22] XI L, HOU J, XU J, et al. Laser additive manufacturing of Ti and Ce co-modified 2195 difficult-to-process aluminum alloy: grain refinement, cracking suppression and enhanced mechanical properties[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(8): 421-433.

[23] 胡嘉颖. 激光增材制备 7075 铝合金热处理强化及组织性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.