

• 前沿进展 Research Progress •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.6131

航空航天用铝合金增材制造研究进展

周 泉¹, 仇生生², 姜文煌², 何先迪², 张思远¹, 张博伟¹

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094 2. 泸州翰飞航天科技发展有限公司, 四川 泸州 646000)

摘 要:随着航空航天装备向轻量化、整体化和高可靠性方向发展,传统铝合金制造工艺在复杂结构成形、材料利用率和制造周期等方面逐渐难以满足先进飞行器的需求。增材制造技术凭借设计自由度高、近净成形和结构一体化制造等优势,为航空航天铝合金构件制造提供了新的技术路径。本文围绕航空航天用铝合金增材制造研究进展,系统综述了激光粉末床熔融、电弧增材制造和定向能量沉积等主要增材制造工艺的特点,重点分析了 Al-Si、Al-Cu、Al-Mg、Al-Mg-Si 及 Al-Zn-Mg-Cu 等典型铝合金的成形行为、组织演化、缺陷控制和性能调控研究进展。同时,结合轻量化支架、通信卫星波导、空间光学组件和火箭贮箱等典型工程应用,归纳了增材制造铝合金在航空航天构件中的应用现状。最后,总结了当前航空航天铝合金增材制造面临的热裂纹、孔隙、残余应力、组织各向异性及服役可靠性等关键问题,并展望了增材制造专用铝合金设计、智能过程控制、后处理协同优化和标准化认证等未来发展方向。

关键词:航空航天铝合金;增材制造;激光粉末床熔融;电弧增材制造;定向能量沉积;工程应用

中图分类号: TG146.2+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)08-0827-16

Research Progress in the Additive Manufacturing of Aluminium Alloys for Aerospace Applications

ZHOU Quan¹, QIU Shengsheng², JIANG Wenhuang², HE Xiandi², ZHANG Siyuan¹, ZHANG Bowei¹

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China; 2. Luzhou Hanfei Aerospace Technology Development Co., Ltd., Luzhou 646000, China)

Abstract: With the development of aerospace equipment for lightweight, integrated, and highly reliable structures, conventional manufacturing processes for aluminium alloys are becoming increasingly unable to meet the requirements of advanced aircraft and spacecraft in terms of complex-structure fabrication, material utilization, and manufacturing cycles. Owing to its high design freedom, near-net-shaped forming capability, and advantages in integrated structural manufacturing, additive manufacturing provides a new technical route for the fabrication of aerospace aluminium alloy components. Focusing on recent progress in additive manufacturing of aluminium alloys for aerospace applications, this paper systematically reviews the characteristics of major additive manufacturing processes, including laser powder bed fusion, wire arc additive manufacturing, and directed energy deposition. The forming behavior, microstructural evolution, defect control, and property regulation of typical aluminium alloy systems, including Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, Al-Mg-Si, and Al-Zn-Mg-Cu alloys, are analysed in detail. In addition, representative engineering applications, such as lightweight brackets, communication satellite waveguides, space optical components, and rocket propellant tanks, are summarized to illustrate the current application status of additively manufactured aluminium alloys in aerospace components. Finally, key challenges in aerospace aluminium alloy additive manufacturing, including hot cracking, porosity, residual stress, microstructural anisotropy, and service reliability, are discussed, and future development directions are proposed, including the design of aluminium alloys specifically for additive manufacturing, intelligent process control, synergistic optimization of postprocessing, and standardization and certification.

Key words: aerospace aluminium alloys; additive manufacturing; laser powder bed fusion; wire arc additive manufacturing; directed energy deposition; engineering applications

收稿日期: 2026-07-10

作者简介: 周 泉, 1989 年生, 硕士, 高级工程师。主要从事航空宇航科学与技术精密制造领域研究工作。Email: zhouquan508@126.com

通信作者: 仇生生, 1985 年生, 硕士, 工程师。主要从事机械制造与材料方向相关研究工作。Email: 651881140@qq.com

引用格式: 周泉, 仇生生, 姜文煌, 何先迪, 张思远, 张博伟. 航空航天用铝合金增材制造研究进展[J]. 铸造技术, 2026, 47(8): 827-842.

ZHOU Q, QIU S S, JIANG W H, HE X D, ZHANG S Y, ZHANG B W. Research progress in the additive manufacturing of aluminium alloys for aerospace applications[J]. Foundry Technology, 2026, 47(8): 827-842.

随着航空航天装备向轻量化、长寿命、大型化和高可靠性方向发展,复杂结构轻量化、一体化已成为提升飞行器性能、降低燃料消耗和减少生产成本的重要发展方向,这不仅要求航空航天结构件具有较高的比强度、比刚度和耐腐蚀性能,还需要满足复杂结构一体化制造及服役可靠性的要求^[1-2]。铝合金因密度低、比强度高、加工性能优良、成本相对较低^[3],长期以来广泛应用于飞机蒙皮、机身框架、翼梁、卫星支架、运载火箭贮箱等关键承力结构^[4-7],是航空航天领域应用最广泛的轻质金属结构材料之一。然而,随着复杂拓扑结构、整体化构件及功能集成设计的不断发展,传统铸造、锻造及机械加工工艺逐渐暴露出材料利用率低、制造周期长、装配工序复杂及大型整体构件制造能力不足等问题,难以满足航空航天装备高性能、高效率 and 轻量化制造的发展需求^[8-9]。

增材制造(additive manufacturing, AM)技术通过材料逐层堆积实现复杂构件近净成形,为航空航天复杂结构的一体化制造提供了新的技术途径,在提高材料利用率、缩短制造周期及实现复杂构件快速制造等方面具有显著优势^[8-11]。近年来,国内外学者围绕航空航天用铝合金增材制造工艺、组织演化、性能调控及工程应用等方面开展了大量研究,研究重心已由早期的工艺可行性验证逐步转向高质量、高性能和高可靠性成形,更加关注工艺优化、组织调控、缺陷控制及服役性能提升,但不同航空航天铝合金体系增材制造“工艺-组织-性能”研究工作及其与航空航天服役需求之间的内在联系仍需要系统梳理。本文以航空航天应用需求为牵引,围绕典型航空航天用铝合金体系,系统综述其主要工艺及关键科学问题,总结不同材料体系的研究进展,并结合航空航天工程应用现状,对航空航天用铝合金增材制造未来的发展方向进行展望,以期为高性能航空航天铝合金的设计、制造及工程应用提供参考。

1 航空航天用铝合金的增材制造技术

在航空航天铝合金构件制造中应用较为广泛的增材制造技术主要有3种:激光粉末床熔融(laser powder bed fusion, LPBF)、电弧增材制造(wire arc additive manufacturing, WAAM)及定向能量沉积(directed energy deposition, DED)^[8-16]。

1.1 激光粉末床熔融

激光粉末床熔融是目前航空航天用铝合金复杂精密构件增材制造研究最广泛、技术成熟度较高

的工艺之一^[2,8,15]。图1为航空航天用铝合金主要增材制造技术示意图^[8,15,17]。如图1a所示,该工艺以金属粉末为原料,通过铺粉装置在成形平台上均匀铺设薄层粉末,随后利用高能激光束按照预设路径选择性熔化粉末材料,待单层熔化完成后,成形平台下降一个层厚,再进行新一层粉末铺设和激光扫描,最终实现零件逐层堆积成形^[15]。LPBF具有较高的成形精度和复杂结构制造能力,可实现复杂构件、薄壁结构、晶格结构及拓扑优化构件的一体化制造,是目前航空航天复杂铝合金构件近净成形的重要技术途径^[8-9]。

与传统制造工艺相比,LPBF具有显著的设计自由度和材料利用率。由于采用逐层熔化和快速凝固机制,其冷却速率通常可达 $10^3\sim 10^8$ K/s量级,远高于传统铸造过程,有利于获得细小晶粒、过饱和固溶体及亚稳组织,从而改善材料的力学性能^[8,16,18]。同时,LPBF能够实现复杂几何结构的一体化制造,显著减少焊接和装配工序。然而,由于铝合金具有高反射率、高导热性和易氧化等特点,LPBF成形过程中容易产生未熔合、气孔、热裂纹及残余应力等缺陷,影响构件的尺寸精度和服役性能。此外,受成形仓尺寸及逐点扫描方式限制,LPBF在大型构件制造方面仍面临成形效率较低和制造成本较高等问题^[19-20]。

目前,LPBF已在Al-Si系铝合金中形成较成熟的研究基础,并逐步拓展至Al-Cu、Al-Mg、Al-Zn-Mg-Cu及Al-Li等高性能航空航天铝合金体系^[12]。其中,AlSi10Mg因具有良好的流动性、较低的热裂纹敏感性及其较宽的工艺窗口,成为研究最为成熟和应用最广泛的增材制造铝合金^[19]。而高强铝合金由于凝固裂纹敏感性高、低熔点共晶相偏析严重及元素挥发等问题,其高质量成形仍面临较大挑战。近年来,以Martin^[21]为代表的一些研究学者发现可以通过微合金化设计、异质形核调控及工艺参数优化等方法显著提升高强铝合金的可打印性和综合性能。

1.2 电弧增材制造

电弧增材制造是一种以电弧为热源、金属丝材为原料的定向能量沉积增材制造技术,也是目前制造大型航空航天金属构件最具工程应用前景的增材制造工艺之一^[17,22-23]。如图1b所示,WAAM通过送丝系统将金属丝连续输送至电弧作用区域,电弧热源使丝材与基材局部熔化形成熔池,熔池凝固后形成单道沉积层,随后在数控系统控制下逐层堆积,最终实现三维构件制造^[22]。根据热源和电弧形式不同,WAAM主要包括熔化极惰性气体保护焊(melt inert-gas, MIG)、钨极惰性气体保护焊(tungsten inert gas, TIG)、冷金属过渡(cold metal transfer, CMT)及等

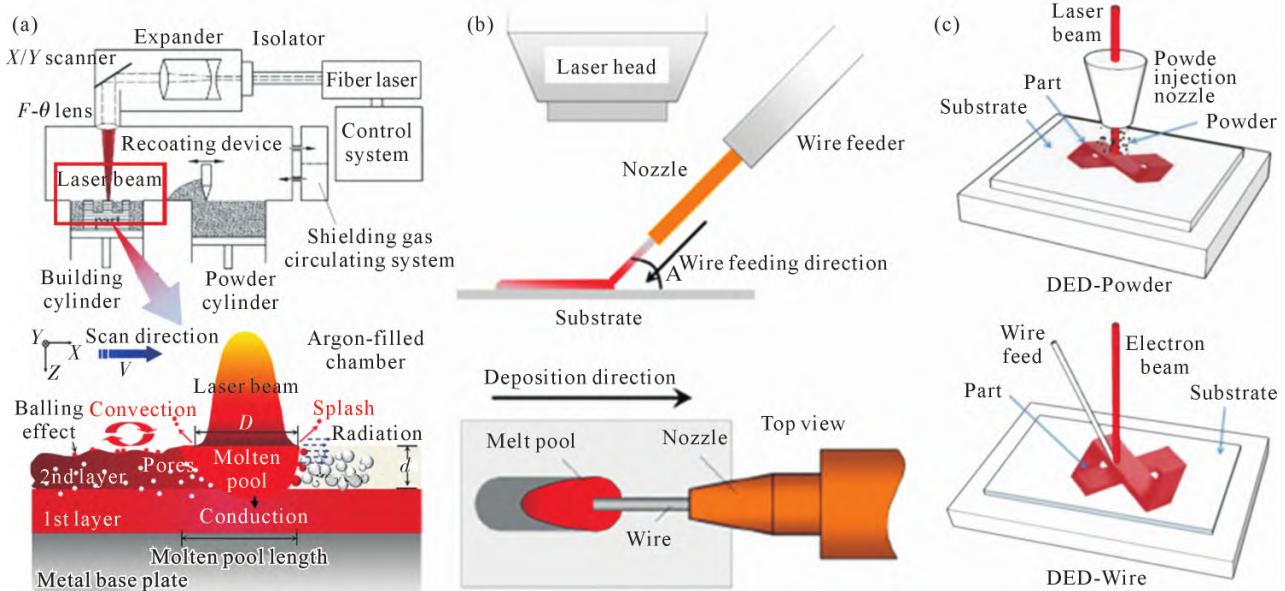


图1 航空航天用铝合金主要增材制造技术示意图:(a) 激光粉末床熔融;(b) 电弧增材制造;(c) 定向能量沉积^[8,15,17]

Fig.1 Schematic diagrams of the main additive manufacturing technologies for aerospace aluminium alloys: (a) laser powder bed fusion; (b) wire arc additive manufacturing; (c) directed energy deposition^[8,15,17]

离子弧焊(plasma arc welding, PAW)等形式。其中, MIG/CMT-WAAM 具有沉积效率较高、设备成本较低和热输入可调等特点,在大型铝合金构件增材制造中应用较为广泛^[22]。

与 LPBF 相比,WAAM 具有沉积效率高、制造尺寸几乎不受成形仓限制、材料利用率高及制造成本低等优势,尤其适用于大型薄壁结构、整体框架、加强筋壁板及运载火箭贮箱等大型承力构件的近净成形制造^[22,24-25]。此外,WAAM 采用丝材作为原料,可有效避免粉末制备及回收过程带来的成本增加和安全隐患,具有较高的材料利用率和工业应用潜力。然而,由于 WAAM 具有较大的热输入和较低的冷却速率,其成形组织通常表现为粗大的柱状晶和明显的层间组织差异,容易产生晶粒粗化、元素偏析、残余应力及成形变形等问题,导致构件组织均匀性和综合力学性能下降^[23]。近年来,研究者围绕电弧模式优化、层间冷却、电磁搅拌及复合热源等工艺开展了大量研究,显著改善了 WAAM 构件的组织均匀性和综合力学性能,为大型航空航天铝合金构件高质量制造提供了新的技术途径^[24-27]。

目前,WAAM 技术已广泛应用于 Al-Mg 系和 Al-Cu 系航空航天铝合金的制造,并逐步拓展至 Al-Mg-Si 系及 Al-Zn-Mg-Cu 系等高强铝合金^[24-25]。其中 5183、5356 等 Al-Mg 系焊丝因焊接性能优良、热裂纹敏感性较低,是目前研究最成熟、工程应用最广泛的材料体系^[25]。2219 和 2319 等 Al-Cu 系铝合金因具有优异的高温性能和焊接性能,在增材制造制备运载火箭贮箱及大型航天结构件中受到广

泛关注,但仍存在晶粒粗化、气孔及各向异性等问题^[28]。近年来,热-力复合调控、微合金化设计及智能工艺控制等技术被用于优化 WAAM 成形件的性能^[26-30],WAAM 构件的组织均匀性、尺寸精度及服役性能得到明显提升,如 Cong 等^[29]研究了不同熔滴过渡模式对 WAAM 成形 Al-Cu 合金气孔缺陷的影响,显著减少了 2219 合金 WAAM 成形件的组织缺陷;Morais 等^[30]则针对 WAAM 工艺通过合金化设计出 Al-Mg-Zn-Cu 高强铝合金,用于制备高性能铝合金成形件。

1.3 定向能量沉积

定向能量沉积是一种利用高能热源同步熔化送入材料并实现逐层沉积成形的增材制造技术,也是制造大型复杂金属构件、实现构件修复及功能梯度制造的重要技术之一^[8,11]。从广义增材制造分类看,WAAM 同样可归入电弧定向能量沉积范畴,但在工程应用和工艺研究中,WAAM 通常作为独立工艺类别讨论。如图 1c 所示,DED 利用激光束、电子束或等离子弧作为热源,通过送粉或送丝系统将材料连续输送至熔池区域,在热源与送粉(丝材)系统同步运动下实现材料逐层沉积,最终完成三维构件制造^[8]。根据热源及送材方式的不同,DED 主要包括激光定向能量沉积、电子束定向能量沉积及电弧定向能量沉积等形式,其中激光定向能量沉积(laser directed energy deposition, L-DED)因能量密度高、成形精度较好及工艺稳定性高,在航空航天铝合金增材制造领域研究最为广泛。

与 LPBF 相比,DED 无需铺粉系统,具有沉积效

率高、成形尺寸不受成形仓限制、材料利用率高及多材料制造能力强等优势,特别适用于大型整体构件制造、局部增材修复及梯度材料制备,在航空航天大型承力构件制造与再制造领域具有广阔应用前景^[11,31]。此外,DED 可实现送粉速率、热输入及材料成分的实时调控,便于制备功能梯度材料及异种材料连接,为航空航天复杂构件的结构—功能一体化制造提供了新的技术途径^[8]。然而,由于 DED 热输入较大、熔池尺寸较宽、冷却速率低于 LPBF,其沉积组织通常表现为粗大的柱状晶和明显的层间热循环特征,容易产生晶粒粗化、元素偏析、残余应力及几何精度较低等问题^[32];同时,铝合金较高的激光反射率和导热率进一步降低了激光能量利用率,增加了成形稳定性控制难度^[12,15]。因此,熔池行为调控、组织细化及缺陷控制仍是当前 DED 制造航空航天铝合金的关键研究方向。

目前,DED 在 Al-Si 系和 Al-Cu 系航空航天铝合金增材制造方面已实现较广泛研究和部分工程应用,并针对 Al-Mg 系及 Al-Zn-Mg-Cu 系等高强铝合金已开展可打印性、组织调控与性能提升研究^[32]。其中,AlSi10Mg 及 4047 等 Al-Si 系铝合金因成形性能优良、热裂纹敏感性较低,是目前研究最成熟的材料体系;2219、2319 等 Al-Cu 系铝合金因具有优异的焊接性能及高温服役性能,在大型航天贮箱、运载火箭筒段及航空结构件修复中具有重要应

用价值,但仍面临组织粗化、各向异性及沉积稳定性不足等问题^[28-32]。近年来,通过激光功率与扫描策略优化、送粉同步控制、微合金化设计以及超声振动、电磁搅拌等辅助技术,可显著细化晶粒、降低气孔和热裂纹倾向,并改善构件组织均匀性和综合力学性能^[8]。

综上所述,LPBF、WAAM 和 DED 是当前航空航天用铝合金增材制造中最具代表性的三类工艺。三者在热源形式、原料状态、成形精度、沉积效率、适用尺寸及组织特征等方面存在明显差异:LPBF 更适用于复杂精密中小型构件制造,WAAM 在大型整体结构高效近净成形方面具有优势,而 DED 则在大型构件制造、局部修复及多材料/梯度材料制备方面展现出独特潜力。随着工艺优化、组织调控和智能制造技术的发展,航空航天用铝合金增材制造正由工艺可成形性验证逐步向高质量、高性能和高可靠性制造发展。3 种工艺的特点及适用范围如表 1 所示。

然而,铝合金自身高反射率、高导热性、易氧化及部分高强铝合金热裂纹敏感性高等特点,使其在增材制造过程中仍面临熔池稳定性不足、气孔与未熔合、热裂纹、残余应力、组织各向异性和服役可靠性不足等问题。因此,有必要结合典型增材制造用航空航天铝合金体系的研究进展,进一步总结增材制造铝合金研究过程中的关键科学问题与解决方案。

表1 航空航天用铝合金主要增材制造工艺特点比较

Tab.1 Comparison of the characteristics of major additive manufacturing processes for aluminium alloys used in the aerospace industry

AM processes	Heat source	Raw materials	Typical alloys	Forming accuracy	Deposition efficiency	Build sizes	Typical scenarios	Main limitations	Technology readiness
LPBF ^[8-9,12,15,19-21]	Laser	Powder	AlSi10Mg, AlSi12, Sc/Zr micro-alloyed aluminium alloys, Modified high-strength aluminium alloys ^[12,19-21]	High	Low	Small to medium	Lattice structures, scaffolds, and complex thin-walled parts ^[8-9,19]	Porosity, lack of fusion, hot cracking, residual stress ^[19-21]	High (Engineering applications) ^[19]
WAAM ^[17,22-30]	Arc	Welding wire	5183, 5356, 2219, 2319 ^[24-27]	Low	High	Large	Frame beams, wall panels, storage tanks ^[17,24-28]	Deformation, porosity, anisotropy, residual stress ^[23-24,28-29]	Medium (Verification for large-scale structural projects) ^[17,24-27]
DED ^[8,10,31-32]	Laser	Powder/wire	AlSi10Mg, 4047, 2219 ^[31-33]	Medium	Medium	Medium to large	Component repair, gradient structures, large and complex components ^[8,31-33]	Grain coarsening, segregation, and insufficient geometric accuracy ^[31-33]	Low (Applied research stage)

2 航空航天典型增材制造铝合金研究进展

根据化学成分及增材制造研究现状,目前航空航天用典型增材制造铝合金主要涉及 Al-Si 系(4xxx)、Al-Cu 系(2xxx)、Al-Mg 系(5xxx)、Al-Mg-Si 系(6xxx)、Al-Zn-Mg-Cu 系等^[2-3,12]。

2.1 Al-Si 系铝合金

Al-Si 系铝合金是目前增材制造研究最成熟、工程应用最广泛的航空航天用铝合金之一,其典型材料包括 AlSi10Mg、AlSi12 和 4047 等。其中,AlSi10Mg 因具有良好的熔体流动性、较窄的凝固温度区间、较低的热裂纹敏感性以及较宽的工艺窗口,在 LPBF 过程中表现出优异的成形稳定性,通常能够获得高致密度成形件,因此,AlSi10Mg 已广泛用于航空航天轻量化支架、薄壁结构、拓扑优化构件、热管理部件和精密光学镜体等复杂构件的增材制造^[12,19]。与 2xxx、6xxx 和 7xxx 系高强铝合金相比,Al-Si 系铝合金的增材制造适应性主要来源于 Si 元素对熔体流动性和凝固补缩能力的改善,同时较高 Si 含量有助于降低凝固裂纹敏感性,使其在 LPBF、DED 及复合增材制造中均具有较好的成形基础^[12,19,31]。

LPBF 是 AlSi10Mg 增材制造研究中最主要的工艺路线。由于 LPBF 具有高冷却速率和复杂层间热循环,成形 AlSi10Mg 合金通常呈现典型的快速凝固非平衡组织特征,主要由细小 α -Al 基体、胞状晶结构以及连续或半连续的共晶 Si 网络组成^[14,19]。这种细化组织能够提高合金的强度和硬度,同时也会形成明显的熔池边界、扫描道特征和晶体学织构,使成形件呈现出组织和性能各向异性。Thijs 等^[14]较早

对其开展研究,发现 LPBF 成形 AlSi10Mg 可获得细小组织并形成可调控织构,并认为扫描策略和热流方向对组织取向具有重要影响。近年来,相关研究进一步关注熔池模式和热历史对其组织与性能的影响。Patel 等^[34]研究了激光束聚焦状态等多种工艺参数对 LPBF 成形 AlSi10Mg 的影响,如图 2 所示,认为离焦形成的发散光束更易形成传导模式熔池,有助于避免匙孔缺陷,获得了接近 99.98% 的高致密度成形件,为高反射率铝合金的 LPBF 工艺窗口设计提供了参考。

缺陷控制是 AlSi10Mg 增材制造研究的核心问题之一。LPBF 成形过程中,激光功率、扫描速度、扫描间距、层厚、粉末状态和保护气氛共同影响熔池稳定性与致密化行为。能量输入不足时,容易形成未熔合孔;能量输入过高时,可能会形成匙孔气孔等缺陷^[18,20]。Read 等^[16]和 Aboulkhair 等^[18]分别从工艺参数优化和气孔含量降低的角度表明,合理控制能量输入是获得高致密度 AlSi10Mg 成形件的关键。Wenger 等^[35]则研究了不同层厚对其结构完整性和疲劳性能的影响,认为单道次层厚的增加在提高制备效率的同时也会增加 AlSi10Mg 成形件的缺陷,在实际工艺优化过程中应综合考虑两者的影响。

面向航空航天精密构件应用,除静态力学性能外,还需重点关注疲劳性能、尺寸稳定性和服役可靠性。因此,热处理及其他后处理是提升 LPBF 成形 AlSi10Mg 综合性能的重要途径。沉积态 AlSi10Mg 通常具有较高强度,但塑性、疲劳性能和尺寸稳定性易受残余应力、气孔、表面粗糙度以及脆性 Si 网络影响。应力消除、退火、固溶时效和热等静压(hot isostatic pressing, HIP)等后处理能够改变 Si 网络形貌、

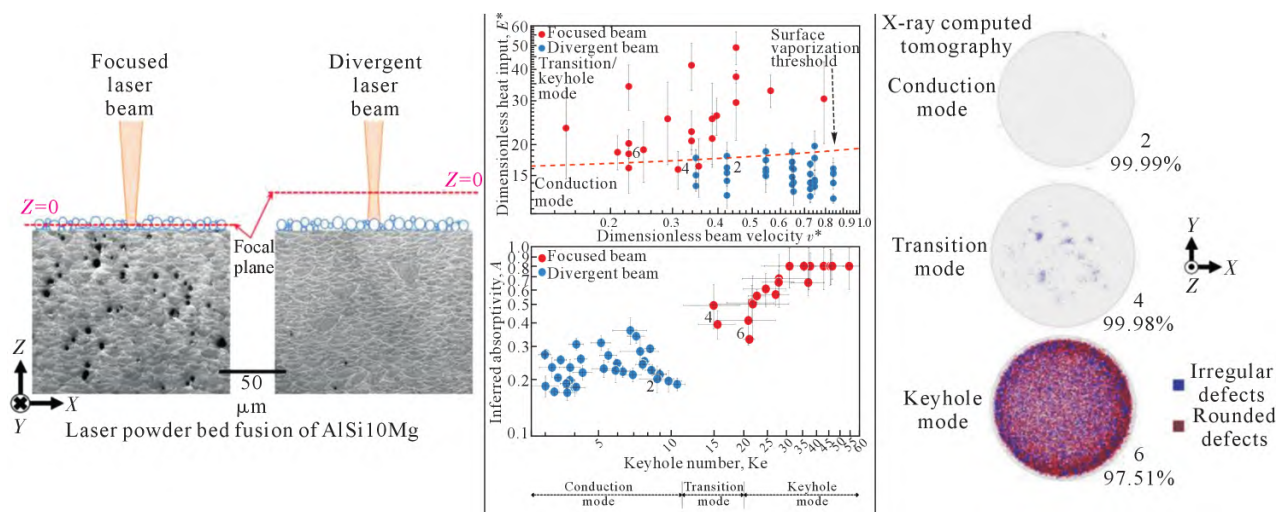


图2 激光束聚焦状态、功率、光斑直径等多种工艺参数对 LPBF 成形 AlSi10Mg 的影响^[34]

Fig.2 Effects of various process parameters on LPBF-formed AlSi10Mg alloys, including laser beam focusing conditions, power, and spot diameter^[34]

析出行为和残余应力状态,从而调控强塑性匹配与服役可靠性^[19-20]。Fetni 等^[36]基于 CALPHAD 和扩展 KKS 相场模型研究了 LPBF 成形 AlSi10Mg 在非等温热处理过程中的组织演化,如图 3 所示,相关研究指出快速凝固形成的非平衡组织在后续热处理过程中会发生 Si 相长大、聚并以及 Al 基体脱饱和等变化,该研究为模型预测指导合金热处理制度优化提供了参考依据。Cabrini 等^[37]研究了热处理对 LPBF 成形 AlSi10Mg 腐蚀行为的影响,发现热处理引起的 Si 相形貌变化会影响腐蚀敏感性。Bagherifard 等^[38]则从表面强化角度研究了喷丸等后处理对 LPBF 成形 AlSi10Mg 疲劳性能的影响,认为表面完整性改善和表层残余压应力引入有助于提高其疲劳寿命。

除 LPBF 外,Al-Si 系铝合金也被用于 DED 或 LPBF/DED 复合增材制造研究。与 LPBF 相比,DED 具有更高沉积效率和更大的成形尺寸,适用于大型构件制造、局部增材修复和复合制造,但由于热输入较大、冷却速率相对较低,成形组织通常较 LPBF 更粗大,且易出现层间组织差异、几何精度不足和热影响累积等问题。Gong 等^[31]研究了 LPBF/DED 复合激光增材制造 AlSi10Mg 合金的组织 and 力学性能,表明不同增材制造工艺之间的热历史差异会导致组织特征和性能响应发生变化。Javidani 等^[33]采用激光定向能量沉积制备 AlSi10Mg 合金,并分析了沉积过程中的组织和硬度特征,进一步说明 Al-Si 系铝合

金在大尺寸沉积和修复制造中具有一定应用潜力,但其组织均匀性和沉积稳定性仍需进一步提升。

总体而言,Al-Si 系合金已形成工艺优化、热处理、热等静压和表面强化相结合的调控体系。工艺优化便于实施,但参数窗口受设备、粉末和层厚影响较大。热处理可降低残余应力并改善塑性,却可能因 Si 相粗化而降低强度;热等静压有利于闭合孔隙,但难以消除未熔合界面;而表面强化主要用于改善疲劳裂纹萌生,对内部缺陷作用有限。当前研究方向主要由致密度转向疲劳、腐蚀和尺寸稳定性,并探索如何在保留细化 Si 网络与促进 Si 相球化之间完成性能的最佳提升。

2.2 Al-Cu 系铝合金

Al-Cu 系铝合金是航空航天领域重要的可热处理强化的铝合金体系,其典型牌号包括 2024、2219、2319、2195 等。该类合金主要依靠 Cu 元素形成 θ'' 、 θ' 和 θ -Al₂Cu 等析出相实现沉淀强化,具有较高的比强度、较好的耐热性能和较成熟的航空航天应用基础。其中,2024 合金广泛用于飞机蒙皮、机身和翼梁等承力结构,2219、2319 合金因焊接适应性较好,在大型贮箱、壁板和复杂框架类构件中具有应用潜力,2195 等 Al-Cu-Li 合金则兼具低密度和高比强度优势,是轻量化航天结构的重要候选材料^[12,19]。

目前,Al-Cu 系铝合金的增材制造主要包括 LPBF、DED 等方法。LPBF 适合制备尺寸较小、几何复杂度高的精密构件,但传统 Al-Cu 系铝合金凝固

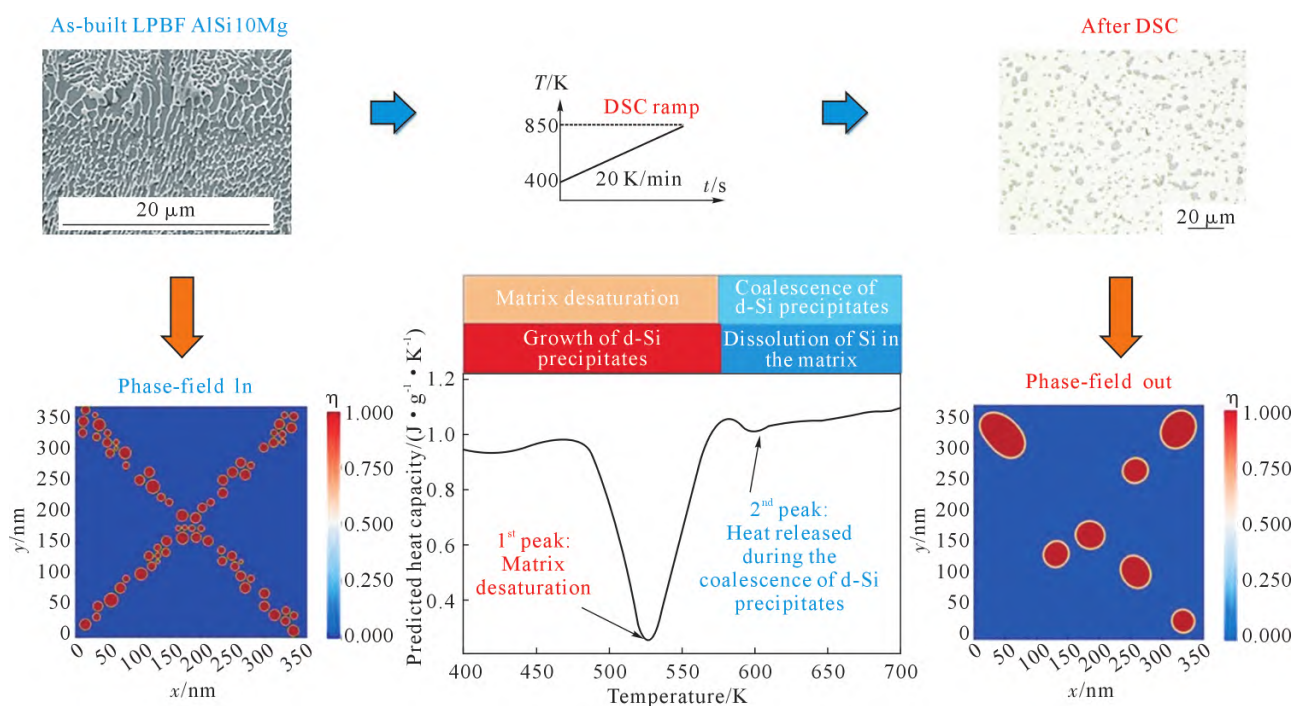


图3 相场法指导 LPBF 成形 AlSi10Mg 铝合金构件的热处理工艺优化^[36]

Fig.3 Optimization of the heat treatment process for AlSi10Mg aluminium alloy components formed by LPBF using the phase field method^[36]

温度区间宽,液膜补缩能力差,易在 LPBF 制备过程中快速凝固和高热应力条件下产生热裂纹、孔隙和 Cu 元素偏析。Xi 等^[39]针对 LPBF 成形 Al-Cu 合金的凝固裂纹问题开展研究,发现通过优化激光功率和扫描速率可获得相对致密、裂纹显著减少的 2024 合金,为传统变形 Al-Cu 合金适配 LPBF 提供了工艺窗口参考。然而,该类工艺仍面临组织稳定性和塑性不足等问题,需要进一步结合粉末成分调控、预热、扫描策略优化和后续热处理实现性能提升。

相比之下,电弧增材制造具有沉积效率高、成本低,适合大型航空航天结构件制造等优势,因此 2219/2319 等 Al-Cu 焊丝合金是当前研究较多的对象。Wang 等^[40]研究了 WAAM 成形 2219 合金的组织演化,发现其沉积态组织存在明显的层带特征和取向差异,不同热循环区域中等轴晶、柱状晶和 Al_2Cu 相分布不均,导致力学性能呈现各向异性。为改善这一问题,研究者通常采用层间塑性变形、超声冲击、层间搅拌摩擦加工、重熔以及后续时效热处理等方法调控组织^[41-43]。Wang 等^[43]将超声冲击处理引入 2219 合金 WAAM 过程,结果表明该方法能够细化晶粒、降低孔隙率、改善残余应力状态,并促进析出相分布均匀化,从而提高构件综合力学性能。Wei 等^[44]则采用层间搅拌摩擦加工辅助 WAAM 制备 2219 合金,显著消除了孔隙缺陷,破碎并溶解粗大的晶界共晶组织,使强度和疲劳性能得到同步提升(图 4)。

对于更易开裂且缺乏成熟商用焊丝的 2024 合金,复合增材制造路线展示出其应用潜力。Wei 等^[45]

报道了层间搅拌摩擦加工辅助 WAAM 制备 2024 合金的方法,层间强塑性变形不仅可以细化晶粒、降低孔隙率,还能削弱粗大 Al_2Cu 等脆性相在晶界的连续分布;经 T6 热处理后,合金强度和塑性明显提高,力学性能接近传统变形 2024 合金水平。这说明,对于高强 Al-Cu 系合金,仅依靠热源参数优化往往难以彻底解决裂纹和偏析问题,热-力复合调控是实现高性能成形的重要方向。

除缺陷控制外,析出相调控也是 Al-Cu 系增材制造合金性能提升的关键。Gong 等^[46]研究了 WAAM 成形 2219 合金中的相析出行为,指出增材制造过程中引入的位错可作为 θ' 、 θ'' 等强化相的异质形核位置,合理的固溶和时效制度能够充分发挥析出强化作用。Zhu 等^[47]则提出层间重熔策略,通过二次熔化促进孔隙逸出、提高 Cu 固溶度并细化晶粒,结合 T6 热处理后获得了更均衡的强塑性匹配和较低的性能各向异性。对于 Al-Cu-Li 系合金,Xi 等^[48]对 2195 合金添加 Ti/Ce 进行改性,利用溶质生长限制效应及原位异质形核颗粒促使粗大柱状晶向细小等轴晶转变,实现 LPBF 成形 2195 合金的裂纹抑制和晶粒细化,并展示了铝合金复杂点阵支架构件的制造可行性。

Al-Cu 系合金的裂纹、Cu 偏析、孔隙及各向异性通常难以通过单一工艺参数优化同时解决。目前可以通过集成超声或激光冲击改善其表层组织和残余应力,但作用深度有限;层间锤击、轧制和搅拌摩擦加工等方法可显著细化晶粒、压实孔隙,但设备复

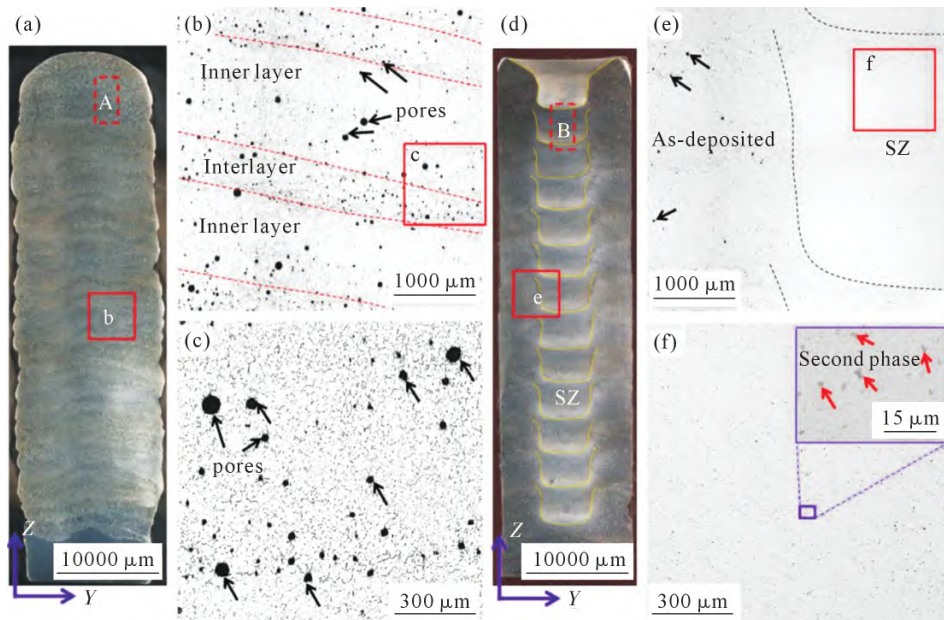


图 4 层间搅拌摩擦加工辅助 WAAM 制备 2219 合金的宏观组织对比:(a~c) WAAM 成形;(d~f) 层间搅拌摩擦加工辅助 WAAM 成形^[44]

Fig.4 Comparison of the macrostructure of 2219 alloy prepared by WAAM assisted by interlayer friction stirring: (a~c) WAAM; (d~f) WAAM assisted by interlayer friction stir processing^[44]

杂,且受构件尺寸和几何可达性限制。层间重熔可与其他方法一同使用,但可能引起重复热影响和元素烧损。当前的研究方向是通过合金设计、热-力复合调控和热处理协同解决上述问题,另一重要研究方向是开发增材制造专用 Al-Cu 合金解决上述难题。

2.3 Al-Mg 系与 Al-Mg-Si 系铝合金

Al-Mg 系与 Al-Mg-Si 系铝合金兼具低密度、良好的耐蚀性、焊接性和中高强度,是航空航天轻量化结构的重要材料。其中,5xxx 系 Al-Mg 合金主要依靠 Mg 固溶强化,适用于大型焊接结构、贮箱及舱段等构件;6xxx 系 Al-Mg-Si 合金则通过 Mg-Si 析出相实现时效强化,具有较好的综合力学性能和加工性能,典型代表包括 6061 和 6082^[12]。此外,以 Airbus/AP-Works 开发的 Scalmalloy[®] 合金(Al-Mg-Sc-Zr)为代表的新型 Al-Mg 基合金通过引入 $Al_3(Sc, Zr)$ 相,同时发挥晶粒细化、沉淀强化和热稳定化作用,成为激光粉末床熔融制备高性能航空航天铝合金构件的重要研究对象^[11]。目前,航空航天用 Al-Mg 系与 Al-Mg-Si 系铝合金构件主要采用 LPBF 和 WAAM 制备。LPBF 适用于复杂轻量化构件,但 Mg 元素易挥发,易引起成分偏析、孔隙及氧化夹杂,并且 6061 等传统 Al-Mg-Si 合金凝固裂纹敏感性较高,限制了 LPBF 的应用。WAAM 具有沉积效率高、成本低和适合大型整体构件制造等优势,但目前仍存在层间组织不均匀、孔隙较多及性能各向异性等问题。

近年来,针对上述问题,学者们围绕合金设计和组织调控开展了大量研究。针对 LPBF 过程中 Mg 挥发问题,Deillon 等^[49]通过微量添加 Ca 元素改善了 Al-Mg-Sc 合金的成形稳定性,有效降低了 Mg 元素的烧损。对于 Scalmalloy[®] 合金,Cabrera-Correa 等^[50]发现合理时效可促进 $Al_3(Sc, Zr)$ 纳米析出相形成,在保持细晶组织的同时显著提高强度;Raab 等^[51]

进一步指出,机械加工等表面后处理能够有效改善 LPBF 构件的疲劳性能,如图 5 所示。针对内部缺陷,van der Rest 等^[52]采用搅拌摩擦加工对 LPBF 成形的 Scalmalloy[®] 进行后处理,显著降低孔隙率并提高疲劳寿命。

对于 WAAM 成形 Al-Mg 系合金,研究重点集中于组织均匀化及综合性能提升。Ren 等^[53]采用双丝 WAAM 制备 Al-Mg-Sc 合金,实现了晶粒细化和组织优化。Huang 等^[54]通过引入层间热轧工艺,显著减少孔隙、细化晶粒并提高构件致密度。Zeng 等^[55]研究发现,Al-Mg-Sc-Zr 合金虽然具有细小等轴晶和纳米析出相,但沉积构件仍存在一定的性能各向异性,需要进一步优化热循环工艺对其进行调控。

对于 Al-Mg-Si 系合金,近年来主要通过成分改性提高 LPBF 成形能力^[56-60]。Mehta 等^[56]利用 Zr 改性实现了 6061 合金的无裂纹致密成形,并借助异质形核促进合金由柱状晶向等轴晶转变。Rosito 等^[57]采用原位晶粒细化剂进一步改善了 A6061 的成形质量,Luo 等^[58]则通过 Ni 合金化优化了 LPBF 成形 Al-Mg-Si 合金的组织 and 力学性能,进一步证明微合金化是提升 6xxx 系合金增材制造性能的重要途径。

目前 Al-Mg 系合金主要受 Mg 挥发、氧化夹杂和孔隙制约,Al-Mg-Si 系合金则更易产生凝固裂纹。Sc、Zr 和 Ca 微合金化可促进异质形核、减少烧损并提高强度,但会增加成本,并可能改变其耐蚀性和热处理响应。机械加工和搅拌摩擦加工有利于改善疲劳和内部缺陷,却增加工序并受构件形状限制;层间轧制可细化晶粒、降低孔隙,但设备集成难度较高。现有研究普遍认可微合金化的有效性,当前研究主要沿两条路径展开:一是在传统成分体系基础上进行改性;二是开发面向增材制造的专用合金牌号。

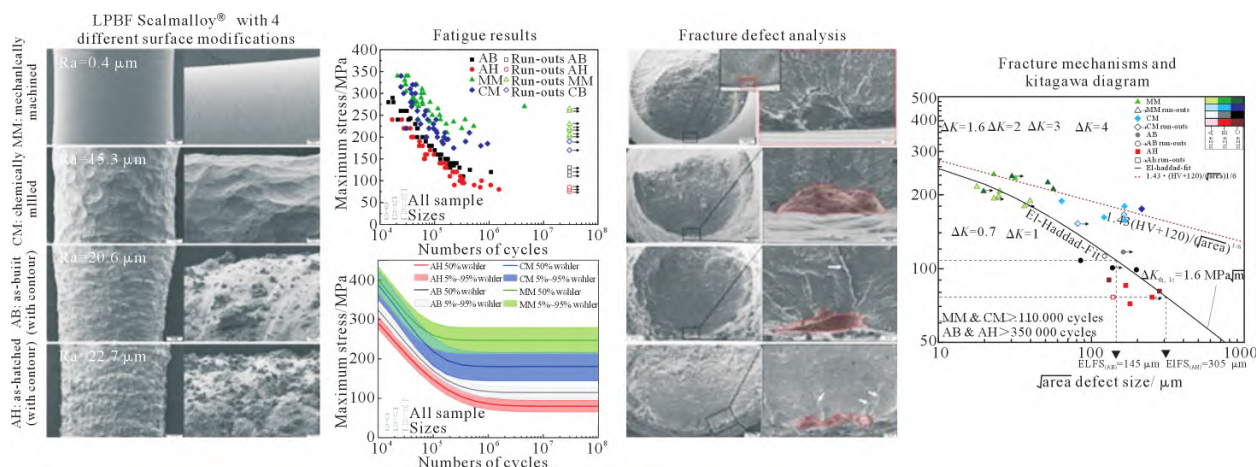


图5 表面后处理有效改善 LPBF-Scalmalloy[®] 合金构件的疲劳性能^[51]

Fig.5 Surface postprocessing effectively improves the fatigue properties of LPBF-Scalmalloy[®] alloy components^[51]

2.4 Al-Zn-Mg-Cu 系

Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金,也称为 7xxx 系铝合金,是航空航天领域典型超高强铝合金体系,主要依靠 η'/η -MgZn₂ 等析出相实现强化,典型牌号包括 7075、7050、7055 和 7068 等,广泛用于机翼、框梁、蒙皮和承力接头等高载荷结构。然而,该体系 Zn、Mg 含量高,凝固温度区间宽,增材制造过程中易发生热裂纹、元素烧损、孔隙和组织各向异性。因此,其研究重点已由传统牌号直接成形逐渐转向成分改性、晶粒细化、复合增材及增材制造专用合金设计。

在 LPBF 方面,传统 7075 等 7xxx 系合金因柱状晶生长和凝固裂纹严重,直接成形难度较大。Yu 等^[61]通过 Zr 改性 7075 合金,借助 Al₃Zr 异质形核促进细小等轴晶形成,显著抑制了裂纹。Zhu 等^[62]设计出 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr 合金用于增材制造,并通过可调控层级组织和双纳米析出相,使合金获得优异强塑性匹配。Xiao 等^[63]进一步提出 Al-Zn-Mg-Cu-Nb 合金设计,通过层级组织和纳米析出相协同调控,实现强度与塑性的同步提升。Li 等^[64]开发 Al-Zn-Mg-Cu-Si-Zr-Er 合金,通过 Si、Zr 和 Er 复合改性,提高了合金的 LPBF 成形性并抑制了裂纹,使所制备合金获得了优异的力学性能,如图 6 所示,体现了多元微合金化在 7xxx 系增材制造中的应用潜力。Huang 等^[65]则结合实验与模拟分析了 LPBF 过程中工艺参

数对孔隙和裂纹形成的影响,说明合理能量输入仍是获得高致密构件的基础。

在 WAAM 和 DED 方面,Al-Zn-Mg-Cu 系合金适合大型航空航天承力结构的近净成形,但热输入高、热循环复杂,易导致 Zn/Mg 挥发、粗大晶粒和性能各向异性。Chi 等^[66]采用含纳米颗粒的 7075 丝材进行电弧定向能量沉积,实现了无裂纹沉积,表明纳米颗粒诱导形核是抑制热裂纹的重要策略。Guo 等^[67]开发 7A55-Sc 专用丝材,通过 Sc 微合金化改善热裂纹敏感性并获得超高强度 WAAM 构件。Klein 等^[68]则以 Al-Zn5.5-Mg-Cu 合金为对象,通过成分和工艺协同优化突破了 7xxx 系合金电弧增材难成形的限制。

Al-Zn-Mg-Cu 系合金强度潜力高,但裂纹敏感性、Zn/Mg 挥发和偏析问题最为突出,仅依靠能量输入优化通常难以稳定成形。Zr、Sc、Nb 及纳米颗粒可促进异质形核并抑制裂纹,但面临成本、颗粒均匀分散和批次稳定性问题。通过 Si、Er 等元素复合改性可改善其成形性和析出强化,但同样影响其耐蚀性,并同步引起热处理制度的不再适用。当前学者们致力于在原有合金体系基础上或重新设计面向增材制造的专用合金成分,并验证实验室尺度获得的优异性能能否在大型构件中得到保持。

综上所述,不同体系航空航天铝合金在增材制造中的组织演化规律、缺陷形成机制及性能调控策略

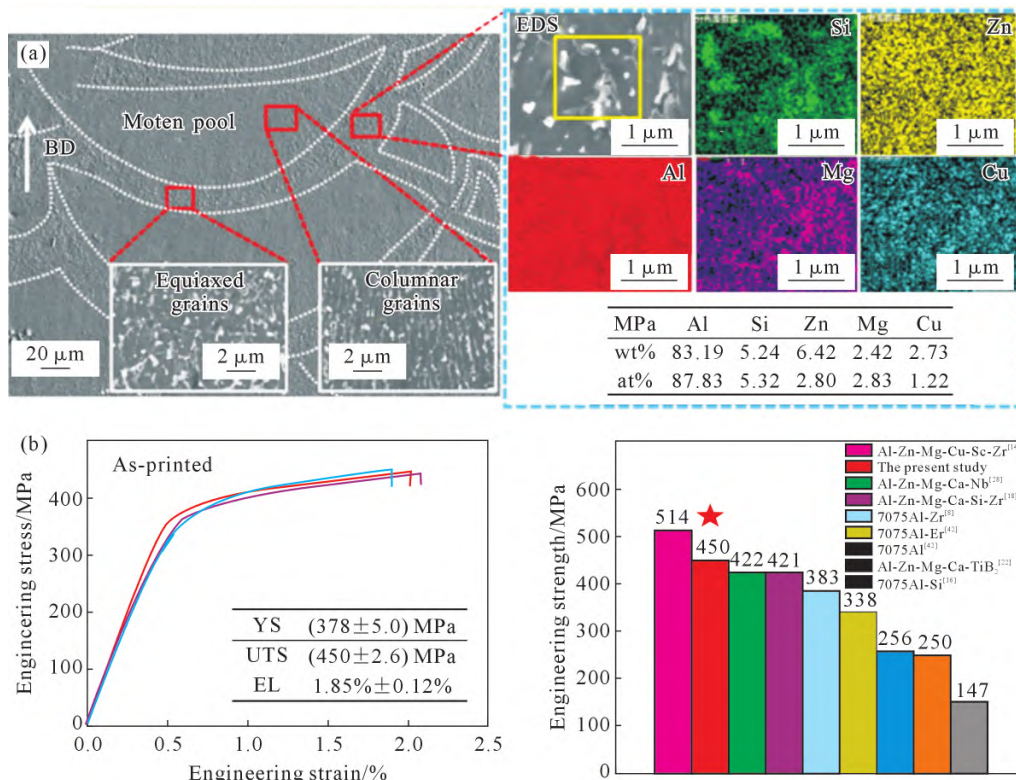


图 6 LPBF 制备 Al-Zn-Mg-Cu-Si-Zr-Er 合金组织及性能:(a) 合金组织与元素组成;(b) 室温拉伸性能^[64]

Fig.6 Microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu-Si-Zr-Er alloys prepared by LPBF: (a) microstructure and elemental composition; (b) tensile properties at room temperature^[64]

存在明显差异。Al-Si 系铝合金凭借优异的成形性和成熟的工艺窗口,已成为目前工程应用最成熟的增材制造铝合金体系;Al-Cu 系铝合金在高温性能和焊接性能方面具有优势,但仍需进一步解决热裂纹、孔隙及组织各向异性等问题;Al-Mg 系与 Al-Mg-Si 系铝合金主要面临 Mg 元素挥发、裂纹敏感性及析出强化调控等挑战,而 Sc、Zr 等微合金化和组织调控技术为其性能提升提供了有效途径;Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金及增材制造专用铝合金则代表了高性能铝合金增材制造的发展方向,通过专用合金设计、异质形核调控及复合增材工艺显著改善了可打印性和综合力学性能。总体来看,航空航天铝合金增材制造研究已由早期工艺可成形性验证逐步发展为以“合金设计-工艺优化-组织调控-性能提升”为核心的协同研究模式。未来仍需进一步加强材料体系与增材制造工艺的协同设计,深入揭示复杂热循环条件下组织演化与服役性能之间的内在联系,推动高性能增材制造铝合金向大型化、整体化和工程化应用发展,为航空航天复杂轻量化构件制造提供材料与技术支持。

3 增材制造航空航天用铝合金构件应用

随着增材制造技术逐渐成熟,其在航空航天领域的研究重点已由材料和工艺开发逐步转向复杂构件的工程应用。如图 7 所示,依托 LPBF、WAAM 及 DED 等技术,增材制造铝合金已在航空器轻量化支

架、卫星载荷结构、波导组件、空间光学组件等构件中实现工程应用,并在火箭贮箱、大型整体壁板及筒段结构中开展工程验证和应用示范,有力推动了航空航天飞行器结构轻量化、零件集成化及制造周期缩短的进程^[69-72]。其中,LPBF 凭借高成形精度,主要应用于中小尺寸复杂构件的制备,WAAM 和 DED 则因沉积效率高,更适用于大型整体结构制造和修复^[4-9]。

在航空航天领域,波导组件和轻量化支架是增材制造铝合金最成熟的应用方向。早在 2016 年,德国 Tesat-Spacecom 公司便提出将增材制造技术用于铝合金射频部件(图 7d),用来支持欧洲航天事业^[71]。根据空客(Airbus)官网显示的数据^[73]* MERGEFORMAT,空客已将 LPBF 制备的 AlSi10Mg 构件批量应用于 A350XWB 商用飞机和 Eurostar Neo 卫星等航空航天飞行器,从 2021 年开始,空客公司首次尝试在发射的两颗 Eurostar Neo 通信卫星上大规模部署增材制造生产的射频产品,共计搭载了约 500 个 LPBF 制备的 AlSi10Mg 部件,涉及 100 多种波导模块和网络组件设计,组件尺寸约 100~300 mm,主要通过拓扑优化与结构集成,平均每个优化后的 LPBF-Al-Si10Mg 部件可替代原先 5 个独立的组件,最终实现数百个铝合金波导和安装支架的工程应用,在保证功能的同时显著降低构件重量和零件数量,且显著缩短了制造周期,在降低通讯卫星构件质量、减少零件数量和缩短制造周期方面表现出明显优势。Gökdağ 等^[74]随后也在 2022 年以卫星铝合金支架为对

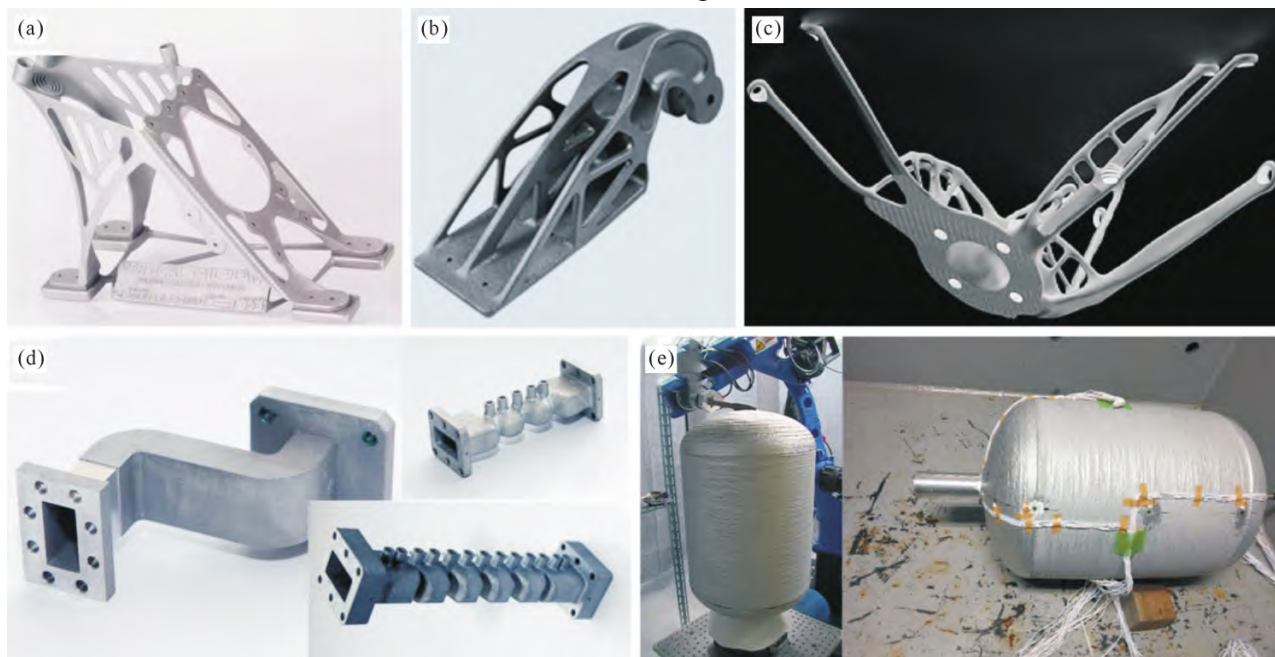


图 7 航空航天增材制造铝合金典型工程构件:(a) 飞机垂直尾翼线束支架;(b) 机舱铰链支架;(c) 卫星反作用轮支架;(d) 通信卫星波导射频元件;(e) 火箭液体燃料箱样件^[69-72]

Fig.7 Typical additively manufactured aluminium alloy components for aerospace applications: (a) aircraft vertical-stabilizer cable-routing bracket; (b) cabin hinge bracket; (c) satellite reaction wheel bracket; (d) communication satellite waveguide RF component; (e) rocket liquid fuel tank demonstrator^[69-72]

象,建立了“拓扑优化—LPBF 制造—试验验证”完整流程,如图 8 所示,实现了卫星铝合金支架的轻量化设计与结构性能协同优化。Satheesh 等^[70]综述了增材制造卫星支架的发展现状,认为铝合金支架已成为目前航天器增材制造最具代表性的应用部件之一。国内近年来也围绕航空航天轻量化构件开展了大量研究,中南大学、华中科技大学等单位针对面向探月、空间站等航天任务的轻量化构件制造需求,围绕高强铝合金激光增材制造开展了相关研究,探索增材制造铝合金在卫星和航天器构件中的应用潜力。

除轻量化支架外,增材制造铝合金在航空航天空间功能结构应用领域也展现出重要潜力。针对传统空间光学镜面结构质量大、制造周期长以及复杂轻量化设计难以实现等问题,英国天文技术中心联合其他各国多个团队围绕增材制造铝合金空间光学组件开展了系统研究^[75-76]。该团队以小型卫星光学载荷轻量化需求为背景,针对 CubeSat 平台主镜结构质量优化和制造可靠性问题,提出利用激光粉末床熔融技术制备 AlSi10Mg 轻量化镜体的方法,设计

并制造了一种面向 3U CubeSat 平台的环形主镜结构,研究中通过晶格结构优化实现内部轻量化设计,并通过热等静压、精密加工和金刚石车削获得了满足空间光学要求的镜面质量,相较于传统实体镜体实现约 60%的质量降低,证明增材制造 AlSi10Mg 镜体能够满足空间光学组件对轻量化和结构完整性的需求,不仅为小型卫星平台提供轻量化解决方案,也为未来空间望远镜、大型轨道光学系统及深空探测装备中的高性能结构设计提供了新的技术路径。

在航天领域,大型整体构件是增材制造的重要发展方向。依托 WAAM 和 DED 技术,铝合金火箭贮箱、筒段及大型薄壁结构已进入工程化应用阶段。日本清水建设与 JAXA 合作开展了 WAAM 金属增材制造火箭液体燃料箱技术验证,用于探索大型铝合金液体燃料箱等结构的低成本、短周期制造,已完成小型样件制备及耐压试验,如图 7e 所示,并面向未来大型铝合金液体燃料箱开展低成本、短周期制造技术研究^[72]。Relativity Space 公司利用大型金属增材制造装备开发 Terran 系列火箭,其 Terran R 项

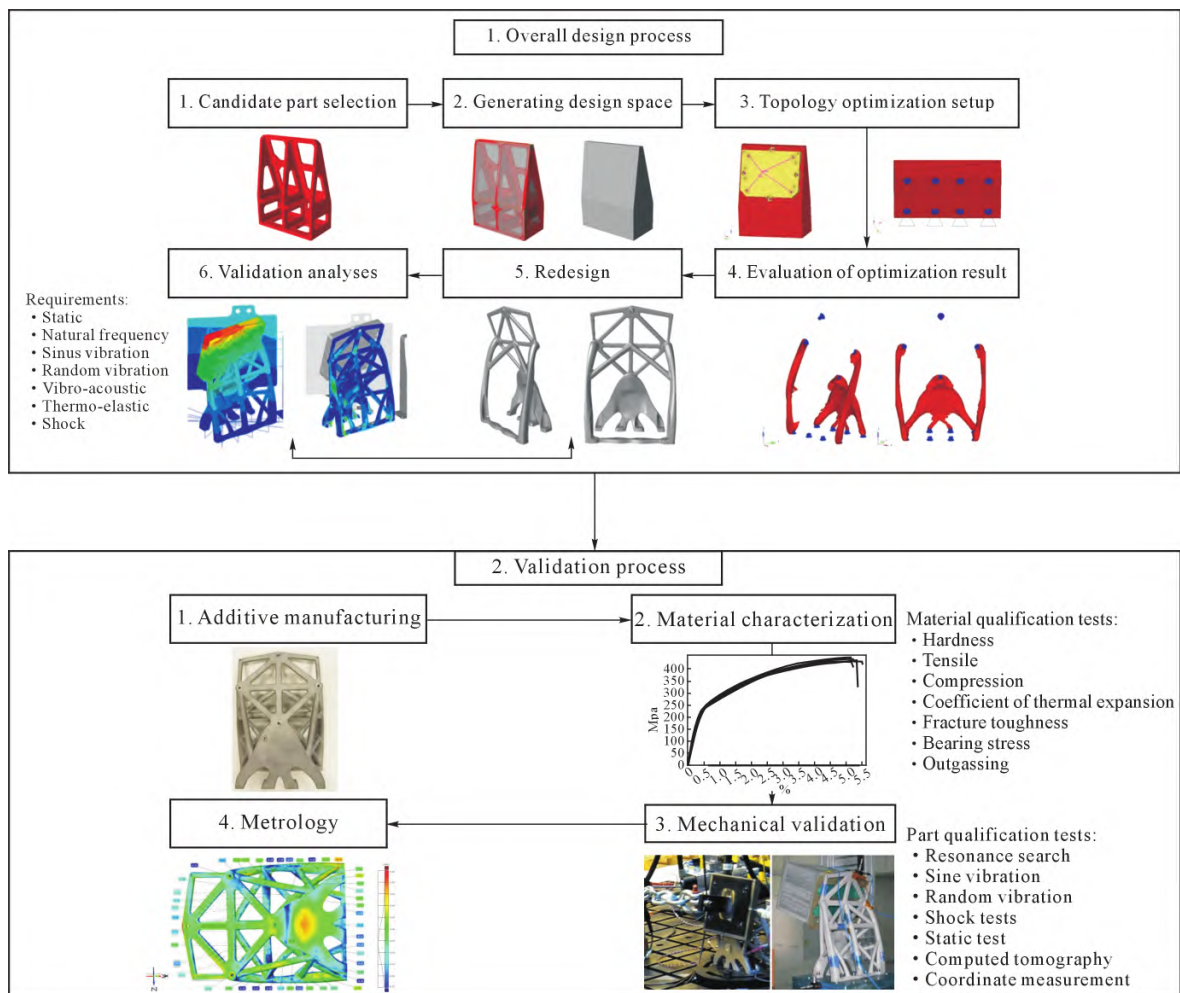


图 8 对卫星铝合金支架提出的“拓扑优化—LPBF 制造—试验验证”流程图^[74]

Fig.8 Flowchart of the “topology optimization—LPBF manufacturing—experimental validation” process for satellite aluminium alloy brackets^[74]

目采用增材制造铝合金贮箱直段筒体,并通过大规模增材制造降低制造复杂度和装配数量。Relativity Space 公司公布的中重型轨道运载火箭 Terran R 计划显示,在通过 Terran 1 验证了增材制造火箭的可行性后,重点关注其在 Terran R 系列制备过程中的应用潜力,并在制造初期采用增材制造与传统制造相结合的混合制造路线,其中初始版本涉及铝合金贮箱直段筒体等结构,并计划进一步开发面向可重复使用运载火箭的第三代增材制造铝合金,加速增材制造大型铝合金贮箱的规模化生产^[77]。

近年来,北京航空航天大学、西北工业大学、中国航天科技集团等围绕 2219、2319 及 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的 WAAM/DED 制造开展研究,通过低热输入电弧模式、层间塑性变形和热处理等方法改善大型构件组织均匀性和性能,为未来火箭贮箱和大型航天结构制造提供技术储备。2025 年初,中国融通科技利用自主研发的电弧送丝 3D 打印平台,通过精确控制电弧过程中的金属熔滴过渡与沉积行为,优化打印路径和结构设计,提高了构件成形质量和制造稳定性,实现了国内首件铝合金火箭贮箱箱底结构的增材制备,表明国内在大型铝合金火箭贮箱构件增材制造方面取得了新的工程进展^[78]。

总体来看,增材制造航空航天铝合金构件已从实验验证逐步向工程应用发展。目前较成熟的应用包括卫星支架、通信波导和空间光学部件等小型部件,大型火箭贮箱及筒段结构则正由工程验证向应用示范阶段发展。未来,随着增材制造专用铝合金、智能制造和结构优化设计的发展,增材制造将在航空航天大型整体化、轻量化和低成本制造中发挥更加重要的作用。

4 总结

增材制造技术为航空航天铝合金复杂构件的一体化、轻量化和高效制造提供了新的技术路径。近年来,LPBF、WAAM 和 DED 等工艺在航空航天铝合金制造中均取得了显著进展。本文对航空航天用铝合金增材制造的主要研究进展总结如下。

(1) LPBF、WAAM 和 DED 是当前航空航天铝合金增材制造的主要技术路线。LPBF 具有成形精度高、复杂结构制造能力强等特点,适用于轻量化支架、波导组件和空间光学结构等中小型精密构件;WAAM 和 DED 具有沉积效率高、成形尺寸大等优势,更适用于大型壁板、筒段、火箭贮箱及构件修复。

(2) 不同铝合金体系的增材制造适应性存在明显差异。Al-Si 系合金工艺窗口较宽、裂纹敏感性较

低,是目前工程应用最成熟的体系;Al-Cu、Al-Mg、Al-Mg-Si 和 Al-Zn-Mg-Cu 等高强铝合金则主要面临热裂纹、元素烧损、孔隙和组织各向异性等问题。

(3) 微合金化、异质形核、工艺参数优化、热/力复合调控及后处理是改善增材制造铝合金成形质量和综合性能的主要方法。研究重点正由可成形性验证转向合金设计、组织调控和服役性能的协同优化。

(4) 增材制造铝合金已在航空航天轻量化支架、卫星波导和空间光学组件等领域实现应用,大型火箭贮箱、筒段及整体壁板则处于工程验证和应用示范阶段。

(5) 航空航天铝合金增材制造仍面临诸多挑战。铝合金高反射率、高导热性和易氧化等特性使其在成形过程中易产生未熔合、气孔、热裂纹和残余应力,高强铝合金还存在元素烧损、偏析、组织各向异性及热处理响应复杂等问题。对于工程应用而言,疲劳性能、腐蚀行为、损伤容限、尺寸稳定性和长期服役可靠性仍是制约其大规模应用的关键因素。

5 展望

随着材料设计、工艺控制和工程验证的不断完善,增材制造铝合金有望在未来航空航天大型化、整体化和高可靠性构件制造中发挥更加重要的作用。未来,航空航天铝合金增材制造应重点向以下方向发展。

(1) 加强面向增材制造的专用铝合金成分设计,提高传统高强铝合金的可打印性,并兼顾强度、塑性、耐蚀性和疲劳性能。

(2) 发展多尺度数值模拟、熔池在线监测和智能闭环控制技术,实现气孔、未熔合和热裂纹等缺陷的实时识别、预测与调控。

(3) 推进增材制造与热处理、热等静压、机加工、搅拌摩擦加工及表面强化等后处理工艺的协同优化,改善构件表面完整性、组织均匀性和服役可靠性。

(4) 完善航空航天增材制造铝合金的性能数据库、无损检测方法、质量评价标准和适航认证体系,推动增材制造铝合金构件由样件验证向大型整体构件的批量化工程应用发展。

参考文献:

- [1] WILLIAMS J C, STARKE E A J. Progress in structural materials for aerospace systems[J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5775-5799.
- [2] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.
- [3] LI S S, YUE X, LI Q Y, PENG H L, DONG B X, LIU T S, YANG H Y, FAN J, SHU S L, QIU F, JIANG Q C. Development and ap-

- plications of aluminum alloys for aerospace industry[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 944-983.
- [4] XU X X, CHEN H B, TANG L Z, WANG L, FU X X, RAN H W, WU D X, ZHOU H, YOU G Q. A review on ultra-high-strength aluminum alloys for aerospace applications: Forming, microstructure, and mechanical properties[J]. Materials, 2026, 19(9): 1809.
 - [5] ZHOU B, LIU B, ZHANG S G. The advancement of 7XXX series aluminum alloys for aircraft structures: A review[J]. Metals, 2021, 11: 718.
 - [6] STARKE E A, STALEY J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1996, 32(2-3): 131-172.
 - [7] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, WITTEBROOD A J, DE SMET P, HASZLER A, VIEREGGE A. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry [J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 280(1): 37-49.
 - [8] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, MUKHERJEE T, ELMER J W, MILEWSKI J O, BEESE A M, WILSON-HEID A, DE A, ZHANG W. Additive manufacturing of metallic components—Process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.
 - [9] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, EMMELMANN C. Additive manufacturing of metals[J]. Acta Materialia, 2016, 117: 371-392.
 - [10] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
 - [11] GOH G D, AGARWALA S, GOH G L, DIKSHIT V, SING S L, YEONG W Y. Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential[J]. Aerospace Science & Technology, 2017, 63: 140-151.
 - [12] ZHU Z G, HU Z H, SEET H L, LIU T T, LIAO W H, RAMAMURTY U, NAI S M L. Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 190: 104047.
 - [13] 高建宝,李志诚,刘佳,张金良,宋波,张利军. 计算辅助高性能增材制造铝合金开发的研究现状与展望[J]. 金属学报, 2023, 59(1): 87-105.
GAO J B, LI Z C, LIU J, ZHANG J L, SONG B, ZHANG L J. Current situation and prospect of computationally assisted design in high-performance additive manufactured aluminum alloys: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(1): 87-105.
 - [14] THIJSS L, KEMPEN K, KRUTH J P, VAN HUMBEECK J. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder[J]. Acta Materialia, 2013, 61(5): 1809-1819.
 - [15] ZHANG J L, SONG B, WEI Q S, BOURELL D, SHI Y S. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(2): 270-284.
 - [16] READ N, WANG W, ESSA K, ATTALLAH M M. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimization and mechanical properties development[J]. Materials & Design, 2015, 65: 417-424.
 - [17] DING D H, PAN Z X, CUIURI D, LI H J. Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 465-481.
 - [18] ABOULKHAIR N T, EVERITT N M, ASHCROFT I, TUCK C. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2014, 1-4: 77-86.
 - [19] KOTADIA H R, GIBBONS G, DAS A, HOWES P D. A review of laser powder bed fusion additive manufacturing of aluminium alloys: Microstructure and properties[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102155.
 - [20] YANG H R, SHA J W, ZHAO D D, HE F, MA Z Q, HE C N, SHI C S, ZHAO N Q. Defects control of aluminum alloys and their composites fabricated via laser powder bed fusion: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 319: 118064.
 - [21] MARTIN J H, YAHATA B D, HUNDLEY J M, MAYER J A, SCHAEGLER T A, POLLOCK T M. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. Nature, 2017, 549: 365-369.
 - [22] WILLIAMS S W, MARTINA F, ADDISON A C, DING J, PARDAL G, COLEGROVE P. Wire + arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(7): 641-647.
 - [23] WU B T, PAN Z X, DING D H, CUIURI D, LI H J, XU J, NORRISH J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 127-139.
 - [24] LANGELANDSVIK G, AKSELSEN O M, FURU T, ROVEN H J. Review of aluminum alloy development for wire arc additive manufacturing[J]. Materials, 2021, 14: 5370.
 - [25] VIMAL K E K, NAVEEN SRINIVAS M, RAJAK S. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 41: 1139-1145.
 - [26] 韩启飞,符瑞,胡锦涛,郭跃岭,韩亚峰,王俊升,纪涛,卢继平,刘长猛. 电弧熔丝增材制造铝合金研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(4): 62-73.
HAN Q F, FU R, HU J L, GUO Y L, HAN Y F, WANG J S, JI T, LU J P, LIU C M. Research progress in wire arc additive manufacturing of aluminum alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(4): 62-73.
 - [27] 齐铂金,蔡琳薇. 铝合金电弧增材制造调控手段的研究现状[J]. 焊接学报, 2025, 46(8): 1-15.
QI B J, CAI L W. Research status of control methods for wire arc additive manufacturing of aluminum alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(8): 1-15.
 - [28] GU J L, DING J L, WILLIAMS S W, GU H M, BAI J, ZHAI Y C, MA P H. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 651: 18-26.
 - [29] CONG B Q, DING J L, WILLIAMS S. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9-12): 1593-1606.
 - [30] MORAIS P J, GOMES B, SANTOS P, GOMES M, GRADINGER R, SCHNALL M, BOZORGI S, KLEIN T, FLEISCHHACKER D, WARCZOK P, FALAHTI A, KOZESCHNIK E. Characterization

- of a high-Performance Al-Zn-Mg-Cu alloy designed for wire arc additive manufacturing[J]. *Materials*, 2020, 13(7): 1610.
- [31] GONG J Q, WEI K W, LIU M N, SONG W J, LI X Y, ZENG X Y. Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy built by laser powder bed fusion/direct energy deposition hybrid laser additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59: 103160.
- [32] SVETLIZKY D, DAS M, ZHENG B L, VYATSKIKH A L, BOSE S, BANDYOPADHYAY A, SCHOENUNG J M, LAVERNIA E J, ELIAZ N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications [J]. *Materials Today*, 2021, 49: 271-295.
- [33] JAVIDANI M, ARREGUIN-ZAVALA J, DANOVIATCH J, TIAN Y, BROCHU M. Additive manufacturing of AlSi10Mg alloy using direct energy deposition: Microstructure and hardness characterization[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(4): 587-597.
- [34] PATEL S, CHEN H X, VLASEA M, ZOU Y. The influence of beam focus during laser powder bed fusion of a high reflectivity aluminium alloy—AlSi10Mg [J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59: 103112.
- [35] WEGENER T, ZEISBERG J, ENGELHARDT A, NIENDORF T. On the influence of increased layer thicknesses on the structural integrity of AlSi10Mg alloy processed by laser-based powder bed fusion[J]. *International Journal of Fatigue*, 2026, 213: 109836.
- [36] FETNI S, DELAHAYE J, SEPÚLVEDA H, DUCHÊNE L, HABRAKEN A M, MERTENS A. Extension of a phase-field KKS model to predict the microstructure evolution in LPBF AlSi10Mg alloy submitted to non-isothermal processes[J]. *Computational Materials Science*, 2024, 244: 113197.
- [37] CABRINI M, LORENZI S, PASTORE T, PELLEGRINI S, AMBROSIO E P, CALIGNANO F, MANFREDI D, PAVESE M, FINO P. Effect of heat treatment on corrosion resistance of DMLS AlSi10Mg alloy[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 206: 346-355.
- [38] BAGHERIFARD S, BERETTA N, MONTI S, RICCIO M, BANDINI M, GUAGLIANO M. On the fatigue strength enhancement of additive manufactured AlSi10Mg parts by mechanical and thermal post-processing[J]. *Materials & Design*, 2018, 145: 28-41.
- [39] XI L X, LU Q Y, GU D D, CAO S T, ZHANG H, KABAN I, SARAC B, PRASHANTH K G, ECKERT J. Circumventing solidification cracking susceptibility in Al-Cu alloys prepared by laser powder bed fusion [J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2024, 11(2): 731-742.
- [40] WANG Z N, LIN X, WANG L L, CAO Y, ZHOU Y H, HUANG W D. Microstructure evolution and mechanical properties of the wire + arc additive manufacturing Al-Cu alloy[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102298.
- [41] XIAO J, GUO W, ZHANG H Q, DAI W, ZHU Y, CONG B Q, QI Z W, ZHU H B, REN X, LI M G. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured 2319 aluminum alloy treated by laser shock peening[J]. *Materials Characterization*, 2024, 217: 114354.
- [42] FANG X, ZHANG L, CHEN G, HUANG K, XUE F, WANG L, ZHAO J, LU B. Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 800: 140168.
- [43] WANG C R, LI Y P, TIAN W, HU J S, LI B, LI P C, LIAO W H. Influence of ultrasonic impact treatment and working current on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminium alloy wire arc additive manufacturing parts[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 781-797.
- [44] WEI J X, HE C S, ZHAO Y, QIE M F, QIN G W, ZUO L. Evolution of microstructure and properties in 2219 aluminum alloy produced by wire arc additive manufacturing assisted by interlayer friction stir processing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 868: 144794.
- [45] WEI J X, HE C S, DONG R F, TIAN N, QIN G W. Enhancing mechanical properties and defects elimination in 2024 aluminum alloy through interlayer friction stir processing in wire arc additive manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 901: 146582.
- [46] GONG X P, CHENG X, ZHANG D Y, CHEN H Y, NIE B H, LI Z, ZHANG J K, TANG H B. Precipitation behaviors and the related strengthening mechanism in 2219 Al alloy fabricated by wire arc additive manufacturing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1002: 175243.
- [47] ZHU S, KE L F, CHEN Y, XIAO C W, SHAO Z B, LI Z Y, YU S F, SHI Y S. An inter-layer remelting strategy to tailor microstructure and mechanical properties of 2219 Al-Cu alloy during wire arc additive manufacturing process and post-T6 heat treatment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 924: 147771.
- [48] XI L X, HOU J X, XU J C, LIU H, SHI K Y, GU D D. 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*, 2025, 38(8): 103262.
- [49] DEILLON L, JENSCH F, PALM F, BAMBACH M. A new high strength Al-Mg-Sc alloy for laser powder bed fusion with calcium addition to effectively prevent magnesium evaporation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 300: 117416.
- [50] CABRERA-CORREA L, GONZÁLEZ-ROVIRA L, LÓPEZ-CASTRO J D D, CASTILLO-RODRÍGUEZ M, BOTANA F J. Effect of the heat treatment on the mechanical properties and microstructure of Scalmetal[®] manufactured by selective laser melting (SLM) under certified conditions[J]. *Materials Characterization*, 2023, 196: 112549.
- [51] RAAB M, BAMBACH M. Fatigue properties of Scalmetal[®] processed by laser powder bed fusion in as-built, chemically and conventionally machined surface condition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 311: 117811.
- [52] VAN DER REST C, DE RAEDEMACKER S, AVETTAND-FENOËL M N, PYKA G, COCLE R, SIMAR A. Improving the fatigue life of laser powder bed fusion Scalmetal by friction stir processing[J]. *Materials & Design*, 2024, 244: 113193.
- [53] REN L L, GU H M, WANG W, WANG S, LI C D, WANG Z B, ZHAI Y C, MA P H. Microstructure and properties of Al-60Mg-0.3Sc alloy deposited by double-wire arc additive manufacturing [J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2022, 9(4): 301-310.

- [54] HUANG J, FU Y, ZHAI W, LI R, ZHAO X, LIN H, ZHANG H, WANG G. Hybrid interlayer hot rolling and wire arc additive manufacturing of Al-Mg alloy: Microstructure, mechanical properties and strengthening mechanism [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 7037-7050.
- [55] ZENG L P, CHEN J Q, LI T, TUO Z L, ZHENG Z M, WU H L. Microstructure, mechanical properties, and fatigue resistance of an Al-Mg-Sc-Zr alloy fabricated by wire arc additive manufacturing [J]. Metals, 2025, 15(1): 31.
- [56] MEHTA A, ZHOU L, HUYNH T, PARK S, HYER H, SONG S T, BAI Y L, IMHOLTE D D, WOOLSTENHULME N E, WACHS D M, SOHN Y. Additive manufacturing and mechanical properties of the dense and crack free Zr-modified aluminum alloy 6061 fabricated by the laser-powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2021, 41: 101966.
- [57] ROSITO M, VANZETTI M, PADOVANO E, GILI F, SAMPIERI R, BONDIOLI F, BADINI C F. Processability of A6061 aluminum alloy using laser powder bed fusion by in situ synthesis of grain refiners[J]. Metals, 2023, 13(6): 1128.
- [58] LUO Y M, WANG J Y, WEN T, YANG F P, ZHU M Z, HE N, ZHENG J M, SHAN L, YANG H L. Effect of Ni on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si alloy for laser powder bed fusion[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34: 3625-3636.
- [59] KLEIN T, ARNOLDT A R, LAHNSTEINER R, SCHNALL M. Microstructure and mechanical properties of a structurally refined Al-Mg-Si alloy for wire-arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 830: 142318.
- [60] WINTERKORN R, PITTLNER A, RETHMEIER M. Wire arc additive manufacturing with novel Al-Mg-Si filler wire—assessment of weld quality and mechanical properties [J]. Metals, 2021, 11(8): 1243.
- [61] YU W H, XIAO Z, ZHANG X H, SUN Y T, XUE P, TAN S, WU Y L, ZHENG H Y. Processing and characterization of crack-free 7075 aluminum alloys with elemental Zr modification by laser powder bed fusion[J]. Materials Science in Additive Manufacturing, 2022, 1(1): 4.
- [62] ZHU Z G, NG F L, SEET H L, LU W J, LIEBSCHER C H, RAO Z Y, RAABE D, NAI S M L. Superior mechanical properties of a selective-laser-melted AlZnMgCuScZr alloy enabled by a tunable hierarchical microstructure and dual-nanoprecipitation[J]. Materials Today, 2022, 52: 90-101.
- [63] XIAO F, SHU D, WANG Y X, SUN Q Y, WANG D H, YANG C, WANG S B, SUN B D, MI J W, STJOHN D H. Tailoring hierarchical microstructures and nanoprecipitates in additive-manufactured Al-Zn-Mg-Cu-Nb alloys for simultaneously enhancing strength and ductility [J]. Communications Materials, 2024, 5: 1-11.
- [64] LI D H, LI S C, CHEN J Q, ZHANG Z Q, TANG H. A novel Al-Zn-Mg-Cu-Si-Zr-Er alloy fabricated by laser powder bed fusion [J]. Materials Characterization, 2024, 214: 114129.
- [65] HUANG B, TANG H Q, HUANG J C, JIA Y X, LIAO L H, PANG S H, ZHENG X, CHEN Z D. Influence of laser-based powder bed fusion of metals process parameters on the formation of defects in Al-Zn-Mg-Cu alloy using path analysis[J]. Micromachines, 2024, 15(9): 1121.
- [66] CHI Y T, PAN S H, LIESE M, LIU J K, MURALI N, SOE-MARDY E, LI X C. Wire-arc directed energy deposition of aluminum alloy 7075 with dispersed nanoparticles [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2023, 145(3): 031010.
- [67] GUO X P, LI H J, PAN Z X, ZHOU S Y. Microstructure and mechanical properties of ultra-high strength Al-Zn-Mg-Cu-Sc aluminum alloy fabricated by wire + arc additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 576-586.
- [68] KLEIN T, REITER L, SCHNALL M. Wire-arc additive manufacturing of Al-Zn5.5-Mg-Cu (ML7075): Shifting paradigms of additive manufacture-ability[J]. Materials Letters, 2022, 313: 131841.
- [69] STRATASYS. 3D 打印助力空客, 两周时间完成从设计到成品制造 -Stratasys3D 打印机 [EB/OL]. (2020-06-17)[2026-07-09]. <https://www.stratasys-china.com/3d-da-yin-zhu-li-kong-ke>. STRATASYS. 3D printing assists Airbus in completing the process from design to finished-product manufacturing within two weeks [EB/OL]. (2020-06-17) [2026-07-09]. <https://www.stratasys-china.com/3d-da-yin-zhu-li-kong-ke>.
- [70] SAMAL S K, VISHWANATHA H M, SAXENA K K, BEHERA A, NGUYEN T A, BEHERA A, PRAKASH C, DIXIT S, MOHAMMED K A. 3D-Printed satellite brackets: Materials, manufacturing and applications[J]. Crystals, 2022, 12(8): 1148.
- [71] TESAT. Pioneering 3D Printing for RF components [EB/OL]. (2016-04-19) [2026-07-09]. <https://www.tesat.de/news/blog/information/83-news/230-tesat-pioneers-3d-printing-for-rf-components>.
- [72] SHIMIZU CORPORATION, JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. Shimizu Corporation and JAXA accelerate joint research on rocket liquid-fuel tank manufacturing technology using metal additive manufacturing [EB/OL]. (2024-01-10)[2026-07-09]. <https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2024/2023057.html>.
- [73] Airbus. Large-scale 3D printing goes to space on Airbus' Eurostar Neo satellites [EB/OL]. (2021-02-09) [2026-07-09]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-02-large-scale-3d-printing-goes-to-space-on-airbus-eurostar-neo-satellites>.
- [74] GÖKDAĞ İ, İZGÜ O, DAĞKOLU A, TANRIKULU A A, ACAR E. Design optimization and validation for additive manufacturing: A satellite bracket application[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2022, 65: 237.
- [75] AZIZ I, CHAHID Y, KEOGH J, CARRUTHERS J, MORRIS K, HARMAN J, MCPHEE S, FRASER E, MILLAN L, BOURGENOT C, WHITE P, DAVIES S, VIDAL F P, SUN W J, SINICO M, LAIDLAW F, TAN W J, MAJHI A, ATKINS C. Additive manufacturing in aluminium of a primary mirror for a CubeSat application: Manufacture, testing and evaluation [EB/OL]. (2025-08-12) [2026-07-09]. <https://arxiv.org/abs/2508.08839>.
- [76] ATKINS C, WESTWOOD D, AZIZ I, CHAHID Y, LAIDLAW F H J, MCPHEE S, SNELL R M, TAMMAS-WILLIAMS S. Mirror fabrication using metal additive manufacturing in AlSi10Mg: Powder contamination and mitigation methods[J]. Engineering Research Express, 2026, 8: 075403.
- [77] Relativity Space. Relativity space shares updated go-to-market

approach for terran R, taking aim at medium to heavy payload category with next-generation rocket[EB/OL]. (2023-04-12)[2026-07-09]. <https://www.relativityspace.com/press-release/2023/4/12/terran-r>.

- [78] 3D 打印技术参考. 铝合金火箭贮箱箱底 3D 打印! 融速科技助力九天行歌国内首件突破[EB/OL]. (2025-02-27)[2026-07-09]. <https://amreference.com/?p=29835>.

AM REFERENCE. 3D printing of an aluminum alloy rocket-tank dome! Rongsu Technology assists Jiutian Xingge in achieving a first domestic breakthrough [EB/OL]. (2025-02-27) [2026-07-09]. <https://amreference.com/?p=29835>.

(责任编辑:杨浩雪)