

本文引用格式: 王楚晗, 齐超琪. 颗粒增强铝基复合材料激光增材制造研究现状[J]. 自动化与信息工程, 2024, 45(6): 12-19; 35.
WANG Chuhan, QI Chaoqi. Research status of laser additive manufacturing of particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Automation & Information Engineering, 2024, 45(6): 12-19; 35.

颗粒增强铝基复合材料激光增材制造研究现状*

王楚晗¹ 齐超琪²

(1. 华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

2. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

摘要: 首先, 介绍激光增材制造技术; 然后, 重点论述颗粒增强铝基复合材料(PAMCs)的研究现状, 并分析不同类型的强化相颗粒对复合材料性能的影响; 接着, 探讨 PAMCs 制备过程中存在的问题; 最后, 展望 PAMCs 未来的研究方向。

关键词: 激光增材制造; 铝基复合材料; 颗粒增强

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)06-0002-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.06.002

开放获取

Research Status of Laser Additive Manufacturing of Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites

WANG Chuhan¹ QI Chaoqi²

(1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: In this paper, the main principles of laser additive technology are briefly introduced, and the main characteristics of each method are introduced. Secondly, the research status of particle reinforced aluminum matrix composites (PAMCs) in recent years is discussed, and different particle types of reinforcement phase are analyzed. On this basis, the existing difficulties in the research and preparation of particle-reinforced aluminum matrix composites are discussed, including the influence of brittle phase formation on mechanical properties, the difficulty of regulating interfacial reaction, and the high laser reflectivity of aluminum alloy. Finally, the shortcomings of the current research on particle reinforced aluminum matrix composites are summarized, and the future research direction is predicted, that is, further optimization of process parameters and powder ratio, expansion of more process methods, and research and verification in actual production.

Keywords: laser additive manufacturing; aluminum matrix composites; particle reinforced

0 引言

铝合金作为一种重要的有色金属材料, 被广泛应用于航空航天、船舶、汽车、电力等领域^[1-2]。鉴于铝合金构件常在极端条件下服役, 需要其具备高承载力、高可靠性、高精度、轻量化等性能^[3]。因此, 进一步改善铝基材料的组成成分和内部组织, 提高铝合

金的性能, 对铝合金产业的发展至关重要。相关研究证明, 在合金中添加强化相颗粒是一种有效提升合金性能的方法^[4]。

激光增材制造是近年来兴起的一种先进制造技术, 具有热影响区小、制造成型周期短、工件变形小、组织致密、粒度及含量变化大等特点, 可控性好, 能

够实现高质量的三维自动加工^[5]。近年来,相关学者对不同种类的铝合金激光增材制造开展了大量的研究,使相关技术及工艺得到了进一步的发展。

本文主要介绍颗粒增强铝基复合材料 (particle reinforced aluminum matrix composites, PAMCs) 的研究进展,并针对不同种类的强化相颗粒进行对比分析;探讨铝基复合材料激光增材制造过程中存在的不足,并对其未来发展方向进行展望。

1 激光增材制造

1.1 激光增材制造原理

增材制造是 20 世纪 80 年代后发展起来的一种新型加工方法,其通过自下而上的方式逐层堆叠材料,可得到近净成型的零部件^[6],提高了材料的利用率,缩短了产品的制造周期。激光增材制造是将激光作为能量源进行增材制造的方法,相较于电子束增材制造,避免了对环境真空度的要求,可加工大尺寸零件;相较于电弧增材制造,热输入量小、熔池稳定、应力裂纹少,可获得更加细小的微观组织,从而得到组织紧密的高性能零部件^[7]。

1.2 激光增材制造技术

激光增材制造技术主要分为选区激光熔化 (selective laser melting, SLM) 和激光金属沉积 (laser metal deposition, LMD) 2 种。其中,SLM 技术按三维 CAD 切片模型规划的路径在金属粉末床层进行逐层扫描,金属粉末通过熔化、凝固达到冶金结合的效果,最终得到金属零部件;LMD 技术将粉末或金属丝输送到聚焦激光束的基板上,形成一个小熔池并逐层连续沉积材料,最终得到成型的零部件。

目前,激光增材制造技术的研究主要集中在工艺参数、成型样件性能测试等方面。其中,工艺参数包括基材与强化相的类型及其比例、填料送入速度、激光功率和扫描参数等;成型样件性能测试包括样件的拉伸强度、表面硬度、耐磨损性能、热膨胀系数等。

在铝基复合材料的激光增材制造过程中,强化相不仅影响成型样件性能,还影响工艺选择,因此强化

相的种类成为近年来研究的热点。合理添加强化相颗粒,能够有效改善铝合金的硬度、比强度、比刚度^[8]。

2 铝基复合材料激光增材制造的强化相颗粒

传统的铝合金材料已经发展多年,其部分性能已趋于极限,需要添加强化相颗粒来进一步提升其性能,由此产生了 PAMCs。目前,研究较为广泛的强化相颗粒主要有 TiC PAMCs、SiC PAMCs、TiB₂ PAMCs、纳米碳 PAMCs、混杂 PAMCs 等 5 种。

2.1 TiC PAMCs

TiC 具有较高的硬度、耐磨性、化学稳定性和耐腐蚀性能,被广泛应用于航空航天、医疗器械、电子设备等领域^[9]。在铝基复合材料中添加 TiC 颗粒能够细化组织,提高复合材料的室温拉伸强度、断裂应变比等^[10]。

文献[11]在采用 SLM 技术加工 TiC 纳米颗粒改性的 Al-Mg-Li 合金过程中,发现添加的 TiC 纳米颗粒降低了熔池内流体的粘性,减少了金属汽化和液体飞溅的现象;TiC 纳米颗粒有助于柱状晶向等轴晶转变^[12],所得复合材料的平均晶粒细化到 1.5 μm 左右;TiC 纳米颗粒表面发生了从 TiC 到 Al₃Ti 的梯度转变反应,原位形成的 Al₃Ti 相减少了与 Al 基体的晶格失配,从而获得了较好的力学性能。

文献[13]在采用 SLM 技术制备 TiC/AlSi₁₀Mg 复合材料的过程中,发现激光源扫描移动使熔池表面产生张力差,从而引发 Marangoni 流。在 Marangoni 效应下熔池不同方向的瞬间熔体速度矢量图如图 1 所示。

由图 1 可知:熔池内的 Marangoni 流促进了流体的流动,加快了熔池内的热量传递,改变了熔池的三维型貌;随着激光功率的增大,熔池内的最大温度梯度也逐渐增大;但当激光扫描速度增大时,熔池内的最大温度梯度仅略微增大^[14]。

文献[15]采用 SLM 技术制备了 TiC 纳米颗粒增强的 AA2024 铝基复合材料,并发现添加 TiC 纳米颗粒能够有效抑制裂纹生长,同时改善了铝合金基体的晶粒组织,如图 2 所示。

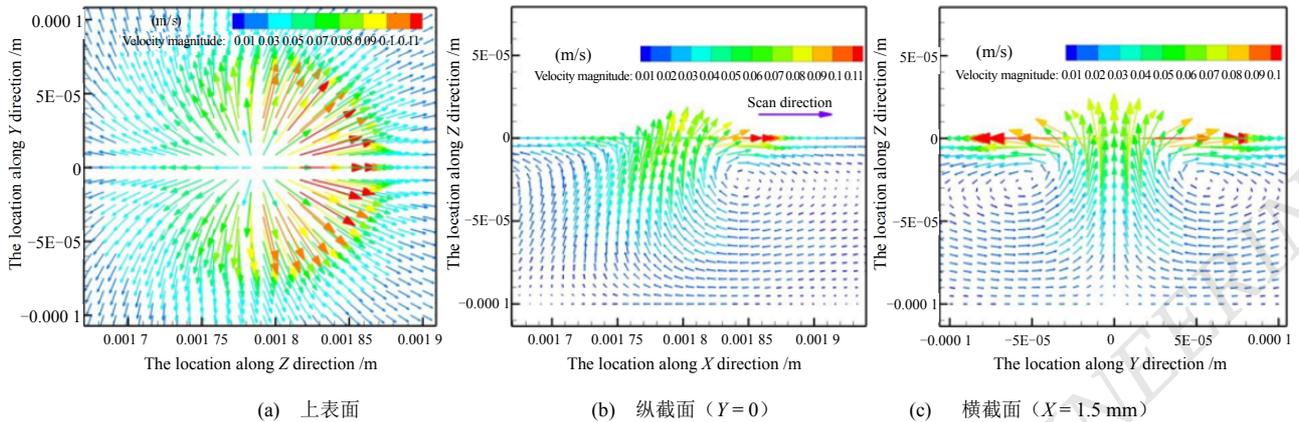


图1 Marangoni 效应下熔池不同方向瞬间熔体速度矢量图^[14]

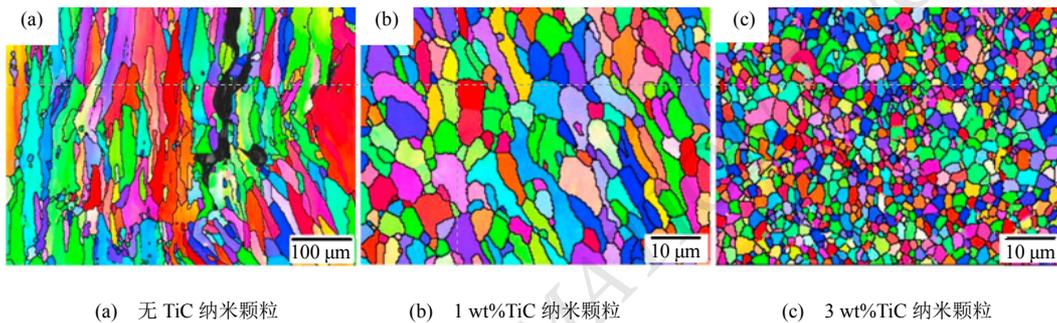


图2 不同 TiC 纳米颗粒添加下铝基复合材料样品的 EBSD 取向图^[15]

由图 2 可知，随着添加的 TiC 纳米颗粒增多，晶粒组织明显细化，同时晶粒从柱状晶逐渐转变为等轴晶。这是因为添加的 TiC 纳米颗粒和原位形成的 Al_3Ti 颗粒与周围的金属基体具有一定的取向关系。但 TiC 纳米颗粒添加到一定程度时，颗粒在熔池内难以均匀分布，易产生颗粒团聚现象，导致复合材料的性能下降。

文献[16]采用外加振动场辅助激光增材制造过程，并发现高频微振动能够加速熔池内熔体的流动，产生类似搅拌的效果，使熔池内的气体和炉渣更快地漂浮到熔池表面，熔池下部更加致密，从而减少合金中的气孔，获得更精细、均匀的组织。

文献[17]采用同轴送粉 LMD 技术制备了 TiC/AA5024 铝基复合材料，并发现添加 TiC 颗粒并未增强和硬化 AA5024，但能够均匀化显微组织。添加 TiC 颗粒使复合材料内层区的柱状晶转变为等轴晶，降低了铝基体的自由能，促进了晶核在 TiC 基体上生长^[18]。

文献[19]采用同轴送粉 LMD 技术制备了 TiC 纳米颗粒增强的 7075 铝基复合材料，并发现随着 TiC 纳米颗粒含量的增加，复合材料裂纹的尺寸、密度和表面孔隙率均有所降低；晶粒面积逐渐减小，拉伸强度逐渐提高。在熔池凝固过程中，TiC 纳米颗粒作为形核位点促进了非均相形核，减小了晶粒尺寸。此外，TiC 纳米颗粒在凝固后的组织中存在钉扎效应，可提升复合材料的力学性能。添加 TiC 纳米颗粒后，其与熔池内的元素发生反应，通过调整工艺参数，可以控制反应的生成相。

综上所述，TiC PAMCs 具有更细化的晶粒和更致密的组织，这是因为在熔池凝固过程中，添加的 TiC 颗粒阻碍了熔池内部晶粒的自由生长。晶粒的细化、TiC 颗粒的固溶强化和承载强化效应增强了复合材料的力学性能。然而，当 TiC 颗粒添加较多时，易产生颗粒团聚现象，影响复合材料的性能。未来研究可以聚焦于解决颗粒团聚现象，尝试通过工艺优化、外加

能场等方式,影响熔池内部的微运动,以调整强化相颗粒的分布。

2.2 SiC PAMCs

SiC PAMCs 是一种新型轻质材料,具备高强度、高刚度、耐磨损、耐腐蚀、耐高温等性能^[20]。目前已有大量传统方法制备的 SiC PAMCs 进入应用阶段^[21]。

文献[22]采用 SLM 技术制备了 SiC PAMCs,并发现在高温下反应界面处的 SiC 颗粒与 Al 基体发生冶金反应,生成 Al_4SiC_4 。 Al_4SiC_4 为长针状脆性相,会降低组织性能。

文献[23]以 SiC 纳米颗粒为强化相制备了 SiC PAMCs,发现复合材料样件的微观组织由柱状晶转变为等轴晶,如图 3 所示。

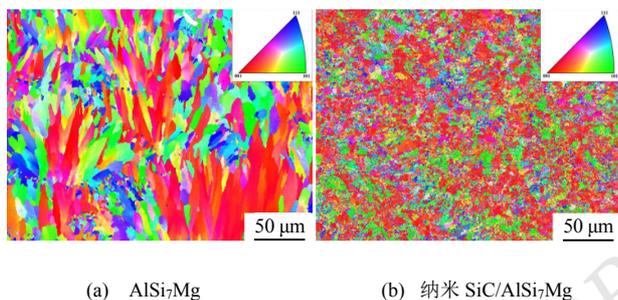


图 3 AlSi₇Mg 和 SiC/AlSi₇Mg 的 XOY 截面 EBSD 图^[23]

由图 3 可知,添加了 SiC 纳米颗粒后,复合材料样件的晶粒明显细化,柱状晶基本转变为等轴晶。在细晶强化作用下,提高了复合材料样件的硬度、抗拉强度、屈服强度,降低了延伸率,断裂模式主要为脆性断裂。

文献[22-23]研究表明,在熔池凝固时, SiC 作为非均相形核的中心可抑制晶粒生长,提高了复合材料样件的硬度和拉伸强度。因为 SiC 纳米颗粒的界面反应面积加大,在熔池内更易形成各类脆性相,所以 SiC 纳米颗粒的增强效果弱于 SiC 微米颗粒。

文献[24]采用 SLM 技术制备了含有不同质量分数的 SiC/AlSi₁₀Mg 复合材料,并发现当 SiC 颗粒含量为 5% 时,复合材料的晶粒明显细化。这是由于 SiC 颗粒及其反应生成物可作为非均相形核的位点,能够促进熔池内的 α -Al 形核。力学测试结果表明,应力集中和脆性析出相是导致复合材料韧性下降的主要原因。

文献[25]制备了 SiC 微米颗粒增强的 AlSi₁₀Mg 合金,并发现添加 SiC 微米颗粒能提升合金的硬度和耐磨性能,且 SiC 质量分数越高,增强效果越好。当添加的 SiC 微米颗粒质量分数达 5% 时,反应体系中过量的 C 元素开始与 Al 元素反应,产生 Al_4C_3 (常见的针状脆性相^[26]),会导致复合材料的韧性下降。

文献[27]采用 SLM 技术成型了 SiC/AlSi₁₀Mg 复合材料,并发现随着 SiC 颗粒质量分数的增加,复合材料的激光吸收率也逐渐增加、热导率逐渐下降,且提高了熔池温度,延长了液相的存在时间。增加输入的激光能量,可进一步提高熔池温度,延长液相的存在时间,促进熔池的流动铺展,减少未熔合孔洞。但激光能量过高时,剧烈的温度梯度易导致熔池卷入环境气体,形成气孔,降低了复合材料的致密度;同时,温度过高,冶金反应加剧,会生成更多的脆性相。

文献[28]提出一种 SLM 技术与真空压力渗透相结合的方法,利用 4 种不同粒径的 SiC 粉末和 3 种粒径组合,制备不同堆积密度的 SiC/AA6063 复合材料,并发现随着 SiC 的体积百分比从 36.7 vol% 增加到 50.1 vol%,复合材料样件的密度逐渐增加,热膨胀系数逐渐减小。

文献[29]提出一种超声振动辅助同轴送粉 LMD 技术,并发现在振动作用下,熔池内的空化泡急剧膨胀和收缩,诱发空化效应^[30],有助于熔池内溶解气体的快速上浮排出,从而减少气孔,提高了复合材料样件的致密度。当 SiC 的重量百分比在 5~10 wt% 时,能有效抑制发生界面反应;若继续添加 SiC 颗粒,会出现长针状脆性相 Al_4SiC_4 。

综上所述, SiC PAMCs 能减小晶粒尺寸,产生细晶强化效应,提高复合材料的力学性能。但添加 SiC 颗粒会向熔池内引入 C 元素,过量的 C 元素易与 Al 基体反应生成针状脆性相 Al_4C_3 ,降低了复合材料的韧性。在 SiC PAMCs 制备过程中,如何有效控制 Al_4C_3 的生成,是当前研究的关键,也是确保复合材料整体性能的重要环节。对此,可以从冶金动力学的角度出发,通过对熔池内元素的组成和熔池环境的调控,包括控制粉末配比、热输入量来调整熔池内部的冶金反

应过程，减少 Al_4C_3 的生成。

2.3 TiB_2 PAMCs

TiB_2 为典型的六方结构，大 Π 键和 Ti 原子的外层电子使其具有较好的导电性能，原子间的 Ti-B 离子键使其具有较大的硬度^[31]。采用 TiB_2 PAMCs 能够增强其抗拉性能和硬度^[32]。

文献[33]采用 SLM 技术得到一种 TiB_2 增强的 Al-Cu-Mg 复合材料，打印后的样件为双峰结构，晶粒相细化明显，细化后的晶粒平均尺寸约为 4.63 μm 。固溶处理后的样件具有良好的强度和延展性。

文献[34]优化了 SLM 技术的主要参数，得到了 2 wt% $\text{TiB}_2/\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ 复合材料，并发现激光功率增加或激光扫描速率降低，会使样件中共晶 Si 的网络变薄、尺寸减小、连续性降低。

文献[35]分别采用 SLM 技术与同轴送粉 LMD 技术制备了 TiB_2 颗粒增强的 Al-Si 合金。LMD 技术制备的样件由于热量积累导致 Si 呈块状析出，同时有针状 Al_3Ti 脆性相生成；SLM 技术制备的样件中没有明显的颗粒团聚现象，其样件密度比 LMD 技术制备的样件密度大约 2.8%。

文献[36]分别采用 LMD、SLM 技术研究了 TiB_2 亚微米颗粒对 $\text{TiB}_2/2024\text{Al}$ 复合材料晶粒形态演变的作用。LMD 技术制备的样件显微组织由等轴晶组成；SLM 技术制备的样件只观察到柱状晶粒的细化。根据热模拟结果和 Hunt 准则可知，LMD 过程的熔池凝固条件有利于 TiB_2 和 Al 基体之间 Al-Ti 层的形成，通过提高核密度促进 α -Al 晶粒从柱状向等轴转变^[37]。

对比 LMD、SLM 技术，LMD 技术更易产生热量积累，导致颗粒团聚；而 SLM 技术制备的复合材料晶粒细化程度略低。但两种技术制备的复合材料均因晶粒细化而增强了复合材料的强度和塑性。

综上所述，由于 TiB_2 PAMCs 不向熔池内引入额外的 Si 或 C 元素，有效避免了脆性相 Al_4C_3 的生成； TiB_2 颗粒相较于 Al 基体具有更高的激光吸收率，打乱了熔池内部自上而下的正向温度梯度，促进了熔池流动，减少了颗粒团聚现象； TiB_2 颗粒起到钉扎作用，进一步阻碍了晶粒沿热流方向生长^[38]； TiB_2 颗粒分散

在基材中，产生了晶界强化、固溶强化、承载强化和 Orowan 强化等效果。目前， TiB_2 PAMCs 的主要问题在于易产生颗粒团聚和 Al_3Ti 脆性相。下一步可以围绕这两个问题展开研究，通过控制熔池微环境，避免产生上述问题。为此，从工艺角度出发，可通过控制添加强化相颗粒和增材制造参数对增材制造过程中的冶金反应过程进行调控，也可外加第三方能场对熔池施加影响。

2.4 纳米碳 PAMCs

碳纳米管 (carbon nano tube, CNT)、石墨烯 (graphene, GR) 等是近年来兴起的新型纳米碳材料。CNT 和 GR 为 sp^2 杂化结构^[39]，其独特的化学键及空间结构，使它们具有良好的物理、力学性能。尽管金刚石不具有 sp^2 杂化结构，但作为典型的硬质相颗粒也被用于纳米碳 PAMCs 的制备。相较于传统的金属陶瓷颗粒，纳米碳颗粒具有较高的强度、模量、导热系数，较低的密度、热膨胀系数。采用纳米碳作为铝基复合材料的强化相颗粒，可以保持铝合金高模量、高导热、高导电的性能优势。

文献[40]采用 SLM 技术研究添加 CNT 对 Al-Mg-Sc-Zr 基材的显微组织和力学性能的影响，发现复合材料样件的各项性能相较于基材均有所提高；样件中 $\text{Al}_3(\text{Sc},\text{Zr})$ 纳米析出相在晶粒组织中均匀分布，部分 CNT 与基体中的 Al 元素发生原位反应，生成沿轴向生长的 Al_4C_3 脆性相，如图 4 所示。

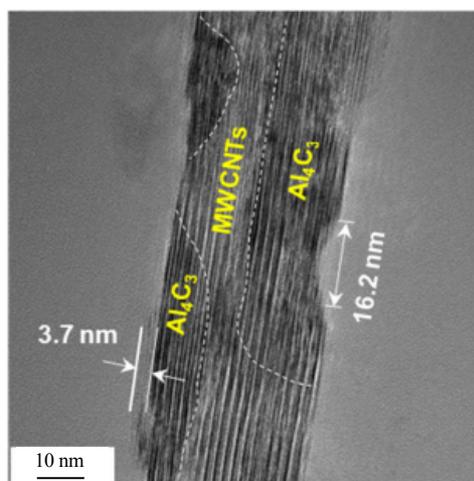


图 4 CNT 非晶碳层缺陷处生成的 Al_4C_3 ^[40]

由图 4 可知：生成的 Al_4C_3 主要沿 CNT 边缘分布；且生成区域因反应产生缺陷，破坏了 CNT 的完整性，导致其强化能力下降，不利于复合材料的性能优化。

文献[41]采用 SLM 技术制备了 CNT PAMCs 样件，并发现提高能量密度能够增加熔池的尺寸和温度，降低熔池内液相的粘性，提高润湿性，增强熔池间的搭接程度，减少孔洞等缺陷。

文献[42]选用膨胀的 GR 纳米片作为强化相颗粒制备了 GR 增强的 ScAlloy 复合材料样件，并发现随着膨胀的 GR 纳米片含量增加，作为等轴晶形核质点的 Al_4C_3 也逐渐增加，复合材料的机械性能也有所提升^[43]。当 GR 纳米片的质量分数为 0.1% 时，复合材料的硬度为 138.1 HV，相较于基材提升了 24.6%，且抗拉强度与屈服强度也有较大提升。

文献[44]采用 SLM 技术制备了不同质量分数的金刚石/ $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ 复合材料样件，并发现当金刚石含量提升时，样件的导热性能得到提高；金刚石含量超过 15% 时，对导热系数的影响较小，这是因为金刚石含量的增加，导致样件的整体致密度降低，抵消了导热性能增加的效果。

综上所述，纳米碳 PAMCs 不仅改善了铝合金在激光增材制造过程中激光反射率高的问题，还提高了复合材料的力学性能。目前，纳米碳 PAMCs 面临的主要问题是 C 元素增加，导致的 Al_4C_3 脆性相生成，以及颗粒团聚现象。进一步研究的主要方向聚焦于减少有害脆性相的析出。对此，可通过调整工艺参数或引入其他元素对冶金反应过程进行调控，抑制有害反应。颗粒团聚控制可以考虑通过调整热输入量（激光功率和激光扫描速度），或结合其他方法（外加振动等），对熔池进行搅拌。

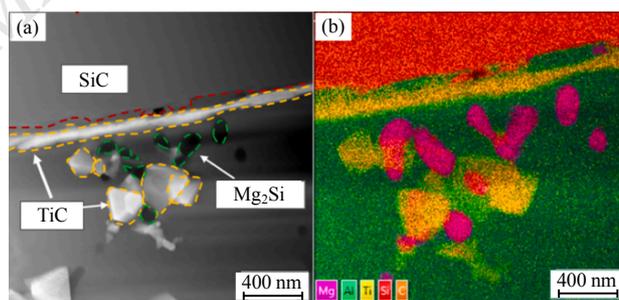
2.5 混杂 PAMCs

单一类型的强化相颗粒各有优势，但也有局限性。相较于单一 PAMCs，混杂 PAMCs 因其具有更致密的组织结构和较好的机械性能，在工业应用中展现出更广阔的前景^[45]。为此，许多学者尝试将多种强化相颗

粒进行组合，以进一步发挥各种强化相颗粒的优势。

文献[46]采用 SLM 技术制备了 $(\text{TiB}_2+\text{SiC})/\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ 复合材料，并探究相关成型工艺参数对样件性能的影响。研究表明：能量密度增大，有助于形成 Marangoni 流，从而减少颗粒团聚现象。相较于基材，复合材料具有更细化的晶粒，这是因为 TiB_2 纳米颗粒作为异质形核位点，限制了晶粒生长空间。载荷传递、细晶强化和弥散强化均提高了复合材料的强度，而晶粒细化提高了复合材料的塑性。

文献[47]采用丝粉 LMD 技术与钛合金化相结合的方法制备了 $(\text{SiC}+\text{Ti})/\text{Al}$ 复合样件。通过添加适量的 Ti ($\text{Ti}:\text{SiC}=3:10$) 包裹 SiC 颗粒，可防止 Al_4C_3 形成大片状结构，避免产生过量的 Al_3Ti 。如图 5 所示，在 SiC 颗粒周围引入 Ti 后，熔池中的 Ti 原子向 SiC 表面迁移，并与 SiC 溶解的 C 原子反应，生成 TiC；TiC 将 SiC 颗粒包裹，阻止了 SiC 的进一步溶解，从而抑制了 Al_4C_3 的生成。



(a) SiC 颗粒与 Al 界面 TEM 图 (b) SiC 颗粒与 Al 界面 EDS 图

图 5 SiC 颗粒与 Al 界面的 TEM 与 EDS 图^[47]

综上所述，混杂 PAMCs 能够结合不同强化相颗粒的优点，有效减少单一颗粒增强时生成脆性相的问题，且不同强化相颗粒之间的相互作用也能进一步优化复合材料的性能。由于混杂 PAMCs 存在强化相颗粒种类多、熔池成分复杂、冶金反应难以预测等问题，目前开展的相关研究相对较少，大量的强化相颗粒组合亟待实验验证。进一步的研究可从强化相颗粒分布与冶金反应分析入手，通过对组织形貌、元素组成分布进行研究，并与性能测试相结合，建立组织与性能

之间的联系。

3 存在的问题

铝合金具备良好的性能,而激光增材制造不仅能够实现一体化的近净成型,还为添加强化相颗粒提供了新途径。目前,在 PAMCs 的激光增材制造领域存在以下问题:

1) 基材大多选择 Al/Si 系合金,强化相颗粒大多集中于 SiC、TiC、TiB₂ 等,对于其他基材与强化相颗粒组合的研究相对较少;

2) 大部分研究集中于 SLM 技术和送粉 LMD 技术,其他技术研究相对较少;

3) 研究局限于块体复合材料的增材制造,距离直接成型结构件仍有较大差距。

4 展望

未来针对 PAMCs 激光增材制造的研究可关注以下几个方面:

1) 改良颗粒,包括对颗粒粒径、强化相颗粒与基材配比等方面的改良,旨在进一步降低颗粒团聚现象,减少冶金反应中脆性相的生成;

2) 拓展新的强化相颗粒种类,对当前研究较少的强化相颗粒种类开展实验,研究不同强化相颗粒对铝基复合材料内部体系产生的影响;同时,尝试多种强化相颗粒的共同作用,对激光增材制造过程中的冶金反应进行控制,进一步抑制脆性相的生成;

3) 开发新工艺,研究不同工艺对相同材料性能的影响;同时,在现有工艺基础上开发特种成型件,如超大件、复杂件、变组分器件等的相关工艺,以拓展激光增材制造的适用范围。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] MOURITZ A. Introduction to aerospace materials[M]. Sawston: Woodhead Publishing Limited, 2012: 394-400.
[2] 郑凛,张铭洋,熊凌达,等.SiCp/Al 复合材料焊接综述[J].精密

成形工程,2024,16(3):32-43.

- [3] 张新明,邓运来,张勇.高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J].金属学报,2015,51(3):257-271.
[4] 史义明,陈铁军,刘佳利,等.陶瓷颗粒增强 BTMcr26 复合材料制备及热处理工艺研究[J].电站系统工程,2024,40(5):63-66.
[5] 张坚,吴文妮,赵龙志.激光熔覆研究现状及发展趋势[J].热加工工艺,2013,42(6):131-134;139.
[6] TANG H P, QIAN M, LIU N, et al. Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti-6Al-4V by selective electron beam melting[J]. JOM, 2015,67(3):555-563.
[7] KRUTH J P, FROYEN L, VAN VAERENBERGH J, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004,149(1-3):616-622.
[8] KADOLKAR P B, WATKINS T R, DE HOSSON J T M, et al. State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys[J]. Acta Materialia, 2007,55(4): 1203-1214.
[9] 代海静.TiC/Ti 微叠层复合材料的制备与力学性能的研究[D].长春:长春工业大学,2024.
[10] 罗宇.纳米 TiC/IN718 复合材料选区激光熔化成形工艺及力学性能研究[D].长春:吉林大学,2024.
[11] WEN Y, WANG Z, ZHANG J, et al. Effect of lithium anti-ablation and grain refinement introduced by TiC nanoparticles in LPBF Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023,27:3473-3486.
[12] ZENG Caiyou, CAI Xinyi, QI Zewu, et al. Effect of in-situ synthesized TiC particles on microstructure and mechanical properties of directed energy deposited AA2219 Al-Cu alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023,964:171331.
[13] 袁鹏鹏.选区激光熔化纳米 TiC 增强 Al 基复合材料数值模拟及实验研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
[14] XU Y L, DONG Z B, WEI Y H, et al. Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007,48(2):178-186.
[15] FAN Zhaojin, LI Chun, YANG Hailin, et al. Effects of TiC nanoparticle inoculation on the hot-tearing cracks and grain refinement of additively-manufactured AA2024 Al alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022,19:194-207.
[16] LI Chonggui, SUN Shuai, LIU Chuanming, et al. Microstructure and mechanical properties of TiC/AlSi10Mg alloy fabricated by laser additive manufacturing under high-frequency micro-vibration[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 794:236-246.

- [17] ZHAO Tong, Marius Dahmena, CAI Wangcan, et al. Laser metal deposition for additive manufacturing of AA5024 and nanoparticulate TiC modified AA5024 alloy composites prepared with balling milling process[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020,131:106438.
- [18] JIN Peng, LIU Yibo, LI Fuxiang, et al. Realization of synergistic enhancement for fracture strength and ductility by adding TiC particles in wire and arc additive manufacturing 2219 aluminum alloy[J]. *Composites Part B*, 2021,219:108921.
- [19] KARIMI J, TEKIN M, SEEFELD T. Laser metal deposition of Al 7075: Effects of TiC nanoparticles[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024,32:3135-3146.
- [20] JAWALKAR C S, VERMA A S, SURI N M. Fabrication of aluminum metal matrix composites with particulate reinforcement: a review[J]. *Materials Today Proceedings*, 2017,4(2): 2927-2936.
- [21] 周岩,张冬云,王卫东,等.选区激光熔化成形碳化硅颗粒增强铝基复合材料研究现状及航空航天应用[J].*航空制造技术*,2018,61(10):68-73.
- [22] 周岩.选区激光熔化成形 SiC 颗粒增强铝基复合材料工艺优化与组织分析[D].北京:北京工业大学,2018.
- [23] 陈敏英.激光选区熔化纳米 SiC 颗粒增强铝基复合材料硬度、拉伸性能及强化机制研究[D].天津:中国民航大学,2022.
- [24] 宋香宜.选区激光熔化制备 SiC/AlSi₁₀Mg 复合材料微观组织及力学性能[D].长春:吉林大学,2024.
- [25] 李信洋.选区激光熔化制备 SiC/AlSi₁₀Mg 复合材料组织与性能调控[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [26] 柯林达,薛刚,朱海红,等.选区激光熔化成形 SiC_P/AlSi₁₀Mg 复合材料工艺及性能研究[J].*上海航天*, 2019, 36(2):122-128.
- [27] 庞静希.激光粉末床熔化成形 SiC 颗粒增强铝基复合材料的凝固行为及性能研究[D].武汉:华中科技大学,2022.
- [28] LIU Guizhou, ZHOU Shixiang, WANG Changshun, et al. Fabrication and characterization of SiC/Al composites prepared by laser powder bed fusion (LPBF) combined with vacuum pressure infiltration[J]. *Materials & Design*, 2023,236:112495.
- [29] 陈妍.超声辅助激光熔化沉积 SiCp/Al 复合材料组织及性能调控[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022.
- [30] RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. *Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1917,34(200):94-98.
- [31] 王显赫,谢兴铖,杨剑,等.TiB₂ 陶瓷研究进展与应用[J].*粉末冶金技术*,2024,42(4):427-436.
- [32] 党阳.原位 TiB₂ 颗粒对 Al₁₂Si_{4.5}Cu 合金的组织与力学性能研究[D].西安:西安工业大学,2024.
- [33] SUN Tengting, CHEN Jian, WU Yi, et al. Achieving excellent strength of the LPBF additively manufactured Al-Cu-Mg composite via in-situ mixing TiB₂ and solution treatment[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2022,850,143531.
- [34] 丁青.选区激光熔化成形 TiB₂/AlSi₁₀Mg 复合材料的组织与力学性能[D].长春:长春工业大学,2024.
- [35] 廉清,吴一,王浩伟,等.TiB₂ 增强 Al-Si 复合材料激光增材制造工艺及性能研究[J].*热加工工艺*,2017,46(22):113-117.
- [36] WANG Q Z, LIN X, KANG N, et al. Effect of laser additive manufacturing on the microstructure and mechanical properties of TiB₂ reinforced Al-Cu matrix composite[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2022,840:142950.
- [37] SCHAFFER P L, MILLER D N, DAHLE A K, Crystallography of engulfed and pushed TiB₂ particles in aluminium[J]. *Scripta Materialia*, 2007,57(12):1129-1132.
- [38] 廉清.原位自生 TiB₂/Al 复合材料激光增材制造及其性能研究[D].上海:上海交通大学,2017.
- [39] LI Z, LIU Z, SUN H, et al. Superstructured assembly of nanocarbons: Fullerenes, nanotubes, and graphene[J]. *Chemical Reviews*, 2015,115(15):7046-7117.
- [40] 丁凯.激光粉末床熔融碳纳米管改性高强 Al-Mg 合金工艺及性能研究[D].南京:航空航天大学,2022.
- [41] 饶项炜,顾冬冬,席丽霞.选区激光熔化成形碳纳米管增强铝基复合材料成形机制及力学性能研究[J].*机械工程学报*,2019,55(15):1-9.
- [42] 杨玄依.激光沉积制造石墨烯-铝基复材工艺与性能研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2022.
- [43] 靳杨.石墨烯对选择性激光熔化成形铝合金组织性能的影响[D].太原:中北大学,2020.
- [44] 王雨萱.SLM 成形金刚石/AlSi₁₀Mg 复合试样的组织与导热性能研究[D].南京:东南大学,2023.
- [45] 刘长根.选区激光熔化成形 (Al₂O₃+SiC) 颗粒混杂增强铝基复合材料的数值模拟与组织性能研究[D].西安:西安理工大学,2024.
- [46] 沈君剑.激光选区熔化成形 (TiB₂+SiC) 颗粒混杂增强铝基复合材料显微组织与力学性能[D].广州:华南理工大学, 2020.
- [47] HUA Zhijia, XIANG Yi, WANG Chunming, et al. Investigation of Ti alloying for microstructural evolution and strengthening mechanism: Avoiding Al₄C₃ formation in SiCp/Al composites via laser directed energy deposition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024,970:172371.

(下转第 35 页)