

铝合金增材制造技术研究进展

苗秋玉¹, 刘妙然¹, 赵凯², 马广义¹, 吴东江¹

¹大连理工大学机械工程学院精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

²上海航天设备制造总厂, 上海 200240

摘要 介绍了铝合金增材制造的相关技术研究进展。着重阐述了选区激光熔化、电弧填丝增材制造、激光-电弧复合增材制造在铝合金增材制造领域的优势与发展前景。研究结果表明,选区激光熔化的研究主要集中在成形件致密度的改善、微观组织控制和力学性能提升等方面,现阶段的成形件的致密度已接近100%,微观组织和力学性能优于铸件的但差于锻件的;电弧填丝增材制造的研究主要集中在大型结构的尺寸控制,但较大的热输入量限制了成形结构的性能提升;激光-电弧复合铝合金增材制造的相关研究较少,完善相应的工艺技术及激光与电弧的耦合行为是其发展方向。

关键词 激光技术; 铝合金; 选区激光熔化; 电弧填丝增材制造; 激光-电弧复合增材制造

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011405

Research Progress on Technologies of Additive Manufacturing of Aluminum Alloys

Miao Qiuyu¹, Liu Miaoran¹, Zhao Kai², Ma Guangyi¹, Wu Dongjiang¹

¹Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

²Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200240, China

Abstract The research progress on the technologies related to the additive manufacturing of aluminum alloys is introduced. The advantages and development prospects of the selective laser melting, wire-arc additive manufacturing and laser-arc hybrid additive manufacturing in the field of additive manufacturing of aluminum alloys are focused. The results show that the study of selective laser melting is mainly focused on the improvement of the efficiency of space filling of formed parts, the control of microstructure and the improvement of mechanical properties. The present efficiency of space filling of formed parts is close to 100%, the microstructure and mechanical properties are better than those of the casting parts, but worse than those of the forging parts. The research on the wire arc additive manufacturing is mainly focused on the size control of large scale structures, but the improvement of performance is limited by the relatively large heat input. As for the laser-arc hybrid additive manufacturing, the related research is few, and it is the future prospect to improve the corresponding process technique and the laser-arc coupling behavior.

Key words laser technique; aluminum alloy; selective laser melting; wire-arc additive manufacturing; laser-arc hybrid additive manufacturing

OCIS codes 140.3300; 140.3390

收稿日期: 2017-08-11; 收到修改稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(51402037)、上海市引进技术的吸收与创新计划(XC-ZXSJ-02-2016-01)

作者简介: 苗秋玉(1994—),女,硕士研究生,主要从事激光增材制造技术方面的研究。E-mail: 1104858360@qq.com

导师简介: 马广义(1982—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事激光加工方面的研究。

Email: gyama@dlut.edu.cn(通信联系人)

1 引言

铝合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性强等优点,已被广泛应用于航空、航天、轨道交通、船舶、汽车等领域。目前,铝合金零部件呈现出结构轻量化、性能复合化的发展趋势,传统的技术(如铸造、锻造等)难以制造出满足这些要求的铝合金零部件。增材制造技术是一种自下而上的材料累加制造方法,能够实现具有轻量化结构、复合化性能的零部件的制造。目前,增材制造技术主要用于钛合金、高温合金、高强钢及铝合金等金属零部件的制造^[1-2],其代表性技术包括选区激光熔化(SLM)、激光近净成形(LENS)、电子束熔化成形(EBM)、电弧填丝增材制造(WAAM)、激光-电弧复合增材制造等^[3-4]。

本文主要介绍了铝合金增材制造技术的发展现状,包括 SLM、WAAM 和激光-电弧复合增材制造技术,对铝合金增材制造的工艺方法、成形质量等进行了分析和总结,展望了铝合金增材制造技术的发展趋势。

2 SLM

SLM 最早于 1995 年由德国 Fraunhofer 激光技术研究所提出,具有成形精度高、成形件内部质量好和力学性能好等优点。该技术采用的原材料以粉末为主,通过选择适当的工艺参数直接熔化金属粉末,获得高致密度的零部件。但铝合金极易氧化,对激光的反射率高,这给铝合金成形带来了较大的难度^[5-6]。目前,SLM 成形铝合金主要以 Al/Si、Al/Mg 系为主,可以实现复杂零件的增材制造。图 1 所示为 2017 年上海增材制造博览会上展出的 AlSi10Mg 铝合金 SLM 成形样件。

对于 SLM 工艺而言,由于存在铺粉粉末间隙不可避免,成形温度场复杂,结构各向异性等问题,国内外学者对铝合金 SLM 成形结构的致密度、微观组织,以及力学性能等方面进行了研究。

2.1 致密度

影响铝合金致密度的主要因素是气孔缺陷,其对成形结构的宏观性能有严重影响。气孔缺陷一般分为氢气孔和氧化夹杂形成的缩孔,目前通过优化工艺参数、表面重熔、粉末干燥、掺杂等方法,可在一定程度上抑制气孔的产生,提高铝合金结构致密度。

2011 年,德国 Fraunhofer 激光技术研究所的 Buchbinder 等^[7]通过改变成形速率和激光功率,提高了 AlSi10Mg 成形件的致密度和成形效率,获得

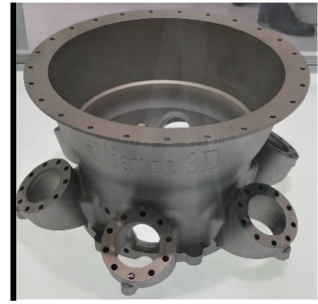


图 1 AlSi10Mg 铝合金 SLM 成形样件

Fig. 1 AlSi10Mg aluminum alloy samples fabricated by SLM 的 SLM 成形件的结构如图 2 所示。当激光功率为 500 W、成形速率为 $1300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,成形件的致密度为 99.8%;将成形速率提高到 $2100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,致密度降低至 95.3%,再提高激光功率至 900 W,成形件致密度增加至 99.5%,且该高功率激光成形方式把成形效率提高到 $21 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。德国汉堡工业大学的 Kaufmann 等^[8]采用提高激光功率、降低扫描速率的方式,获得的 7075 铝合金结构的致密度可以达到 99.83%;同时,发现预热和重熔均能有效减少成形过程中的裂纹,增大致密度。

国内学者同期也陆续开展了 SLM 成形铝合金结构的研究。上海交通大学的张晓丽等^[9]开展了 AlSi12 铝合金粉末 SLM 成形实验,研究了粉体特征和工艺参数对成形件致密度的影响,研究结果显示,粉末流动性差和激光对松装粉末的冲击制约了成形件致密度的提高;另一方面,工艺参数选用不当会造成某成形层的表面粗糙,进而导致成形件出现孔隙缺陷,成形件的致密度减小。华中科技大学袁学兵等^[10]通过重熔方式改善了 AlSi10Mg 成形件表面质量,发现同向重熔扫描可使多道扫描间的球化现象、搭接不均匀等问题得到解决,但无法去除搭接处的氧化物;而采用旋转 90° 重熔扫描的方式可以获得表面整洁、氧化物杂质较少的成形结构,成形结构的致密度增大。

2015 年,德国 Fraunhofer 激光技术研究所 Weingarten 等^[11]采用恒温炉和低功率激光扫描预置层粉末两种粉末干燥方法,研究了粉末氢气孔的形成和抑制机理。当采用 200°C 的恒温炉干燥粉末时,成形件气孔减少约 50%;采用 50 W 激光在成形前扫描预置粉末层,气孔率可降低约 90%,获得的 AlSi10Mg 成形结构致密度为 99.5%。2017 年,中南大学的 Shi 等^[12]开展了 Sc/Zr 掺杂的 Al/Mg 铝合金 SLM 实验,发现电导率与致密度呈线性关系,提出了一种通过掺杂改变电导率进而增大成形结构

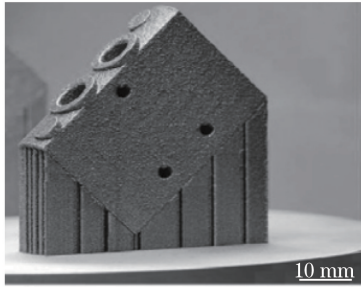


图2 通过调整成形速率和激光功率获得的 SLM 成形件
Fig. 2 Parts fabricated by SLM after adjusting forming rate and laser power

致密度的方法。

目前,国内外针对 SLM 成形件致密度的研究较多,得到的成形件致密度也接近 100%,但对于不同的铝合金体系和中大型铝合金结构而言,如何拓宽铝合金材料的种类,以及确保致密度的一致性已经成为 SLM 铝合金增材制造的研究方向之一。

2.2 微观组织

微观组织直接决定了成形结构的质量,而 SLM 具有非平衡的熔化/凝固特征,成形过程的物理机制复杂,获得的微观组织形态和分布形式多样,因此需要在成形前、中、后三个阶段采取相应措施,以提高微观组织的一致性。目前,主要采用掺杂、工艺优化、热处理等方式改善微观组织的一致性。

2013 年,英国利兹大学的 Olakanmi^[13]开展了铝合金 SLM 成形实验,发现 Mg/Si 元素的添加会影响成形表面的形态,粉末颗粒的形态和氧含量会影响单层成形时熔池的流动和凝固行为,而表面氧化膜和颗粒形状的不规则加剧了团聚现象,会形成多孔表面。该研究结论为不同元素粉末成形中的凝固行为及表面质量分析提供了理论依据。荷兰增材制造创新中心的 Spierings 等^[14]开展了掺 Sc 铝合金的 SLM 成形实验,发现 Al_3Sc 金属间化合物具有细化晶粒的作用,对成形结构的微观组织有很好的调控作用。Sc 在 SLM 成形过程中的细晶效果如图 3 所示,其中白色颗粒为富 Sc 相。比利时鲁汶大学的 Li 等^[15]使用 SLM 成形纳米 TiB_2 掺杂的 $AlSi10Mg$,发现纳米 TiB_2 颗粒会抑制晶粒长大,成形件晶粒尺寸由 $10\ \mu m$ (Al/Si 合金成形件)减小到 $2\ \mu m$,且 TiB_2 颗粒分布在晶界和胞状结构边界,增加了变形位错。该研究表明,纳米颗粒掺杂是细化微观组织的有效手段之一。安徽工业大学的钱德宇等^[16]使用 SLM 技术成形 $AlSi12$ 多孔铝合金结构,研究了成形件微观组织的特征及形成机理。当激光功率为 130 W 时,多孔结

构微观组织呈等轴晶结构,晶粒细化,层间组织晶粒尺寸达纳米量级,约为 700 nm。

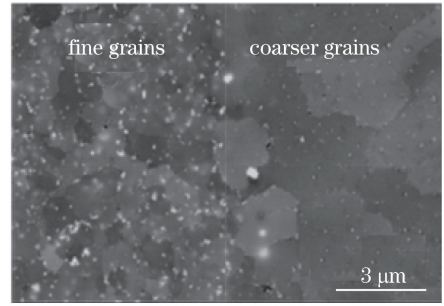


图3 Sc 在成形过程中的细晶效果

Fig. 3 Grain refinement effect of Sc in forming process

比利时鲁汶大学的 Thijs 等^[17]在 2013 年通过改变不同的 SLM 扫描策略,发现不同扫描路径下温度梯度和生长速率具有明显差异,影响了最终的微观组织;通过往复扫描的方式,得到的晶粒尺寸小于 $3\ \mu m$ 。该研究明确了特定晶面的织构形成机制,提出了基于路径规划的织构改善方法。

相对于上述掺杂和工艺优化方法,通过热处理来改善微观组织的研究起步相对较晚。2017 年,意大利国家研究会的 Fioocchi 等^[18]研究了不同退火条件下 $AlSi10Mg$ 成形结构微观组织的演变机制,发现在 $294\ ^\circ C$ 的温度下,退火 2 h 后网状 Si 组织破碎并均匀分布在铝基体上,可以有效改善成形结构的微观组织特征。

目前,增材制造的关键问题是成形结构微观组织的控制难度极大,因此需要深入研究如何有效地控制 SLM 铝合金成形件的微观组织。

2.3 力学性能

力学性能是评价成形质量的基础指标,决定了 SLM 工艺的可行性。目前对于铝合金 SLM 成形结构力学性能的研究主要集中在疲劳和拉伸性能两方面。

在疲劳性能评价方面,欧洲宇航防务集团德国创新中心的 Brandl 等^[19]通过比较有/无预热条件 ($300\ ^\circ C$ 预热温度)下 $AlSi10Mg$ 成形结构的高周疲劳及断裂行为,发现预热方式能够有效提高成形结构的高周疲劳性能,其主要原因是预热降低了成形过程中气孔的产生倾向。图 4 所示为预热对 SLM 样件疲劳性能的影响。美国卡内基梅隆大学的 Tang 等^[20]发现,氧化物诱导生成的气孔缺陷对 $AlSi10Mg$ 成形件的疲劳性能有很大影响,这些氧化物可能是由金属蒸气氧化形成的。

在拉伸性能评价方面,德国德累斯顿研究所的 Prashanth 等^[21]在 2014 年对铝合金 SLM 成形结构

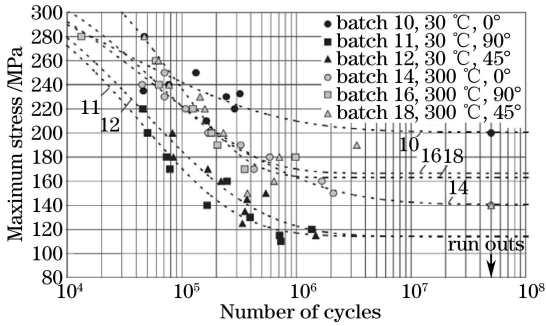


图4 预热对SLM样件疲劳性能的影响

Fig. 4 Effect of pre-heat on fatigue properties of SLM samples

进行了退火处理,发现随着退火温度的增加(473~723 K),屈服强度(260 MPa)和抗拉极限(380 MPa)分别为相同材料铸造结构的4倍和2倍,但延伸率仅为3%左右,分析认为这主要是与退火过程引起的晶粒粗大、Si材料的重新分布有关。图5所示为退火温度与屈服强度、抗拉强度、断裂应变的关系。奥地利科学院的Prashanth等^[22]发现,通过采用不同扫描策略,如单向扫描(SNM)、往复扫描(SMC)、双扫描(DM)和棋盘式扫描(CB),可以有效改善成形结构的拉伸性能,DM和CB两种扫描方式下所得成形件的拉伸性能较好,抗拉极限最高可达460 MPa,结果说明,采用不同的扫描方式可以对力学性能进行调控。图6所示为不同扫描策略对拉伸性能的影响。关于国内铝合金SLM成

形结构力学性能的研究鲜有报道,华中科技大学的张虎等^[23]使用SLM技术成形Al-Cu-Mg合金,在细晶强化和固溶强化的作用下,成形件抗拉强度可达401 MPa,经T4(固溶处理和自然时效处理)处理后,抗拉强度提升至532 MPa,甚至超过2024-T4锻件的(470 MPa)。力学性能各向异性常见于SLM成形件,可通过严格使用最优工艺参数来大幅削弱成形质量差异引起的各向异性^[24]。西安铂力特激光成形技术有限公司的赵晓明等^[25]开展了AlSi10Mg铝合金SLM成形实验,发现成形结构晶粒细小,力学性能优于传统铸造结构的,且横向性能(抗拉强度为348 MPa)与纵向性能(抗拉强度约为336 MPa)相当。

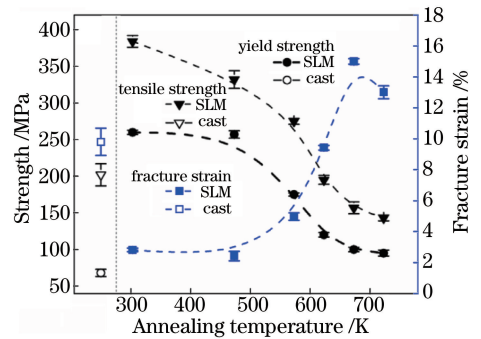


图5 退火温度与屈服强度、抗拉强度、断裂应变的关系

Fig. 5 Annealing temperature versus yield strength, tensile strength and fracture strain

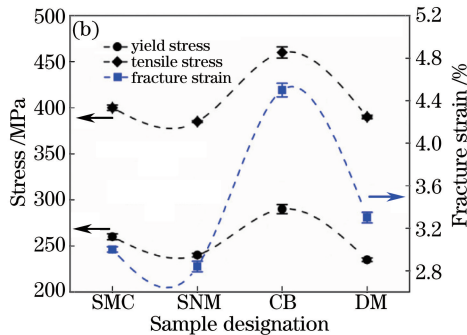
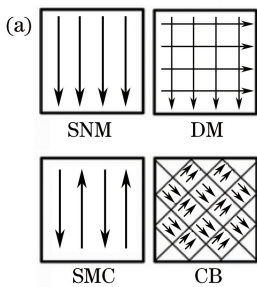


图6 扫描策略对拉伸性能的影响。(a)扫描路径示意图;(b)拉伸结果

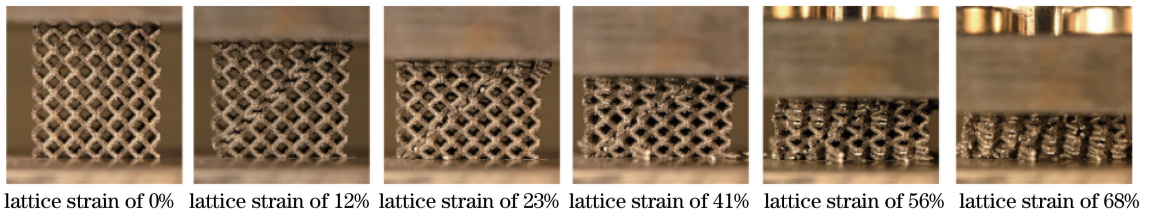
Fig. 6 Effect of scanning strategy on tensile properties. (a) Schematic of scanning paths; (b) tensile results

此外,英国诺丁汉大学的Msdkery等^[26]使用SLM技术成形了晶格铝合金结构,有效提高了铝合金的抗挤压能力,并讨论了其力学性能提升的原因,即功能梯度可实现晶格结构在外载作用下的逐层坍塌,热处理可提高晶格结构的延展性和吸收能量的能力;发现晶格结构经过拓扑优化后,可以构建晶格结构与性能之间的联系,这为性能可控的成形件结构提供了一种有效的设计思路。图7所示为晶格结构的抗挤压实验。

疲劳性能和拉伸性能是零件使役性能中的重要指标,目前虽然通过预热、退火等工艺可以有效提升SLM结构的两种性能,但与锻件材料相比还有一定差距,这也限制了铝合金增材制造的应用范围,是未来急需解决的问题之一。

3 WAAM

WAAM是以电弧为热源,以丝材为送进材料的增材制造技术,具有成形效率高、材料利用率高、



lattice strain of 0% lattice strain of 12% lattice strain of 23% lattice strain of 41% lattice strain of 56% lattice strain of 68%

图7 晶格结构的抗挤压实验

Fig. 7 Crush test of lattice structure

设备成本低、成形结构大等优势,但热输入量较大,成形精度相对较差。

2001年,Wang等^[27-28]采用非熔化极稀有气体钨极保护焊(TIG)第一次实现了铝合金结构增材制造,获得了表面质量较好的铝合金圆环类结构,并分析了微观组织的分布特征,即沉积层顶部为细小枝晶,中下部为粗大枝晶,枝晶间和边界处存在析出相,但对成形机制、性能指标等未作研究。

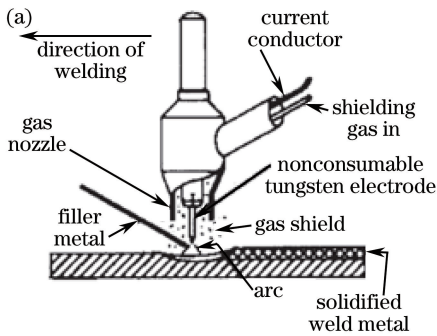


图8所示为TIG WAAM的示意图及其制造的铝合金圆环类结构。澳大利亚伍伦岗大学的Shen等^[29-32]在WAAM增材制造方面也开展了大量研究,建立了增材制造模型,提出了一种用于增材制造的自适应扫描路径规划方法,并开展了基于Al基的WAAM增材制造Fe/Al、Cu/Al/Ni合金的研究,为铝合金的WAAM提供了理论依据和技术支撑。

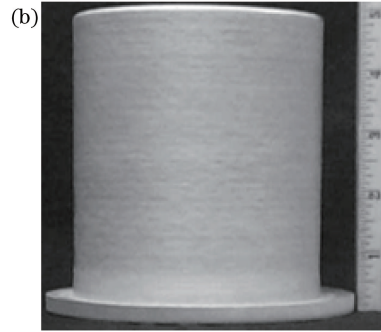


图8 (a) TIG WAAM的示意图;(b)利用TIG WAAM制造的样件

Fig. 8 (a) Schematic of TIG WAAM; (b) sample fabricated by TIG WAAM

国内关于WAAM的研究,哈尔滨工业大学、西北工业大学、北京航空航天大学报道较多。哈尔滨工业大学的柏久阳等^[33-34]在2015年开展了TIG成形2319铝合金、4043铝合金实验,发现焊接电流和层间温度对焊道宽度的影响存在交互作用,当电流大于95 A时,电流对焊道宽度的影响大于层间温度的,层间温度对焊道宽度的影响大于焊接速率的,而当电流小于95 A时,电流的影响最大,焊接速率的影响次之,层间温度的影响最小;并采用二次回归方法准确预测了成形试样的焊道宽度,实现了铝合金的增材制造。图9(a)所示为WAAM制造的铝合金圆环结构。西北工业大学的Geng等^[35-36]采用TIG方法成形5A06铝合金,提出了TIG增材制造过程的精度控制策略,当起弧处温度达到100℃时,成形表面质量好,并采用逐层减小电流的方式减少热输入,在第8层之后,沉积层高度稳定在1.7 mm。图9(b)所示为WAAM制造的铝合金薄壁结构。

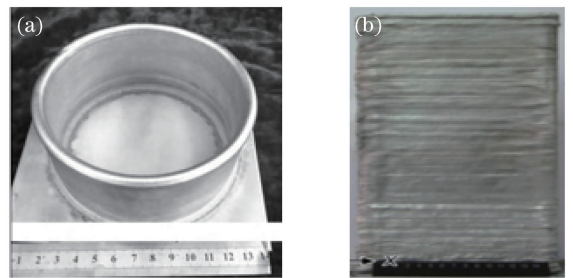


图9 利用WAAM技术制造的铝合金结构。(a)圆环;(b)薄壁
Fig. 9 Aluminum alloy structures fabricated by WAAM.

(a) Ring; (b) thin wall

2014年,北京航空航天大学的从保强等^[37]减小WAAM热输入量,运用冷金属过渡(CMT)WAAM方式开展了Al/Cu系铝合金的增材制造,发现通过控制热输入及电弧能量可减少甚至消除成形过程中产生的气孔,相对于WAAM,CMT与WAAM结合的技术因其热输入量小,在气孔控制和微观组织调控方面具有一定的优势。随后又提出了一种利用复合超

高频脉冲方波变极性钨极氩弧焊实现铝合金增材制造的方法,发现采用高频脉冲能够细化晶粒,有效改善微观组织形态,层中部晶粒大部分为尺寸介于 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 之间的等轴晶,提高了成形结构的宏观性能,通过该方法制造的铝合金样件如图 10 所示^[38-39]。

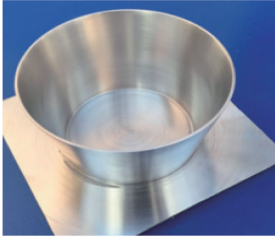


图 10 铝合金样件

Fig. 10 Aluminum alloy sample

电弧增材制造过程与电弧堆焊过程较为相似,而现阶段的研究也主要依托于成熟的电弧焊接工艺,通过模拟与实验相结合的手段,可以获得宏观形貌较好的成形结构,但由于电弧的热输入量较大,成形过程稳定性不高,成形结构的微观组织、力学性能等指标难以提高。因此,未来针对铝合金 WAAM 而言,如何减小热输入量,保证成形过程稳定,进而改善成形结构的微观组织、力学性能是主要的研究方向之一。

4 铝合金激光-电弧复合增材制造

激光-电弧复合增材制造是基于激光-电弧复合焊接的一种全新高效的增材制造技术,以激光、电弧为复合热源,可以有效减小热输入量,改善铝合金成形过程中形成气孔的倾向。澳大利亚伍伦岗大学虽然已经开展了大量的基于电弧的 Fe/Al、Cu/Al/Ni 合金的增材制造研究,但对铝合金的复合增材制造

研究极少。而国内关于激光-电弧复合增材制造铝合金的研究,目前大连理工大学的报道较多。

2013 年起,庄忠良等^[40-42]对激光-熔化极稀有气体保护焊(MIG)复合增材制造技术进行了研究,目前已经实现了 5356 铝合金薄壁结构的增材制造。图 11 所示为激光-MIG 复合成形薄壁结构。与 WAAM 对比发现,激光-MIG 复合成形制造的薄壁结构微观组织分布更加均匀,晶粒尺寸大小为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$,力学性能更好。此外,大连理工大学的吴东江等也在 2016 年开展了 4043 铝合金激光-TIG 复合增材制造技术的研究,探索了预热温度和层间电流对宏观形貌和微观组织的影响,经过工艺优化,获得了气孔率低、晶粒较细的薄壁结构,证实了激光-TIG 复合增材制造铝合金结构的可行性,但发现微观组织形态对成形位置具有很强的依赖性。图 12 所示为激光-TIG 复合成形铝合金不同区域的微观组织形态,可以看出,成形件顶部为细小均匀的等轴晶,中下部为柱状晶。研究结果为后续的热处理工艺提供了设计依据。

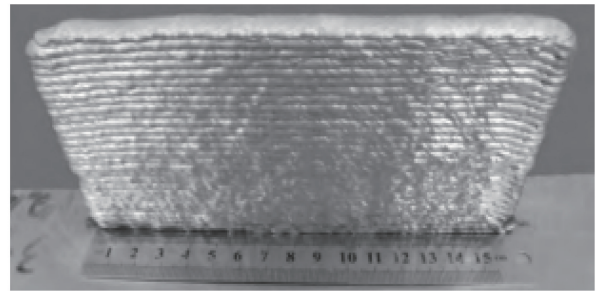


图 11 激光-MIG 复合成形薄壁结构

Fig. 11 Thin wall structure fabricated by laser-MIG hybrid forming

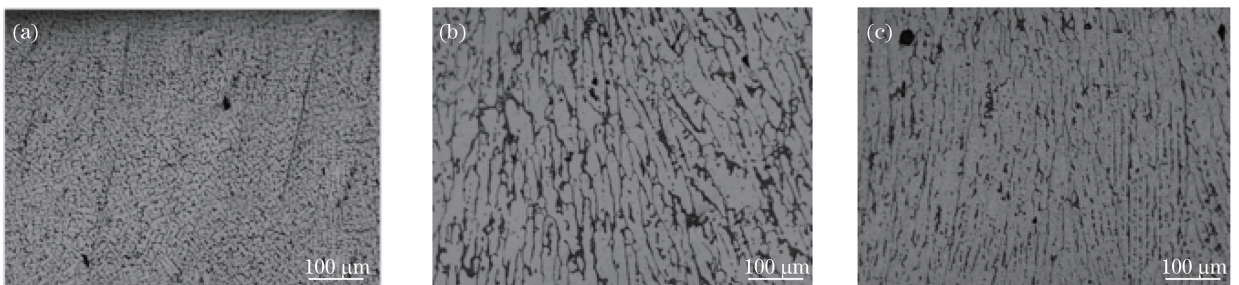


图 12 激光-TIG 复合成形铝合金不同区域的微观组织形态。(a)顶部;(b)中部;(c)底部

Fig. 12 Micro-morphologies of different areas of aluminum alloy fabricated by laser-TIG hybrid forming.

(a) Top; (b) middle; (c) bottom

激光-电弧复合增材制造以复合焊接为背景,相关研究起步较晚,对成形件致密度、微观组织和力学性能还未有深入的研究。但由于该技术具有

热输入量小、成形过程相对稳定的特征,成形件组织分布较 WAAM 更加均匀,晶粒尺寸有所减小,在中大型铝合金结构成形方面具有一定优势。激

光-电弧复合增材制造是极具前景的铝合金增材制造技术之一。

5 结束语

SLM、WAAM、激光-电弧复合增材制造等技术均已证明了铝合金增材制造技术的可行性,并表现出各自的技术优势,逐渐得到了国内外学者的广泛关注,而且在缺陷产生机制、微观组织演变规律、性能评价方法等方面取得了一定的研究成果,主要发展趋势如下。

1) SLM 可以成形复杂结构,特别是在网状、晶格、悬臂类结构成形方面具有明显优势,但目前适用的铝合金粉末依然较少;同时,SLM 工艺也难以实现对大、中型铝合金结构的增材制造。因此,拓展可适用的铝合金粉末种类,开发大、中型铝合金结构增材制造技术已经成为其主要的发展趋势。

2) WAAM 以电弧焊接为基础,目前已经可以成形较大的铝合金结构,且成本低廉,可应用的工业领域广泛,是非常有发展前景的铝合金增材制造技术之一。但热输入量大,电弧稳定性低等问题会严重影响成形结构的组织和性能稳定性。因此,如何减小热输入量和控制成形过程稳定性已经成为 WAAM 在铝合金成形领域需要解决的问题。

3) 激光-电弧复合增材制造以复合焊接为基础,相关研究起步较晚,但由于具有热输入量小,成形过程相对稳定的特征,在大、中型铝合金结构成形方面具有一定优势,也是极具前景的铝合金增材制造技术之一。完善相应的工艺技术,控制成形过程中激光与电弧的耦合行为是其主要的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Yang Q, Lu Z L, Huang F X, *et al.* Research on status and development trend of laser additive manufacturing [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 507(12): 26-31.
杨强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. *航空制造技术*, 2016, 507(12): 26-31.
- [2] Wang H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698.
王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.

- [3] Li D C, He J K, Tian X Y, *et al.* Additive manufacturing: Integrated fabrication of macro/microstructures [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 129-135.
李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏观结构一体化制造[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 129-135.
- [4] Lin X, Huang W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components [J]. *Science China: Information Science*, 2015, 45(9): 1111-1126.
林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [5] Bremen S, Meiners W, Diatlov A. Selective laser melting[J]. *Laser Technik Journal*, 2012, 9(2): 33-38.
- [6] Olakanmi E O, Cochrane R F, Dalgarno K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties [J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 74: 401-477.
- [7] Buchbinder D, Schleifenbaum H, Heidrich S, *et al.* High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1): 271-278.
- [8] Kaufmann N, Imran M, Wischeropp T M, *et al.* Influence of process parameters on the quality of aluminium alloy EN AW 7075 using selective laser melting(SLM)[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 918-926.
- [9] Zhang X L, Qi H, Wei Q S. Experimental study of selective laser melted AlSi12[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(4): 391-397.
张晓丽, 齐欢, 魏青松. 铝合金粉末选择性激光熔化成形工艺优化试验研究[J]. *应用激光*, 2013, 33(4): 391-397.
- [10] Yuan X B, Wei Q S, Wen S F, *et al.* Research on selective laser melting AlSi10Mg alloy powder [J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(4): 91-94.
袁学兵, 魏青松, 文世峰, 等. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末研究[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(4): 91-94.
- [11] Weingarten C, Buchbinder D, Pirch N, *et al.* Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 221: 112-120.
- [12] Shi Y J, Rometsch P, Yang K, *et al.*

- Characterisation of a novel Sc and Zr modified Al-Mg alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Materials Letters*, 2017, 196: 347-350.
- [13] Olakanmi E O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al-Mg, and Al-Si powders: Effect of processing conditions and powder properties [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(8): 1387-1405.
- [14] Spierings A B, Dawson K, Voegtlin M, *et al.* Microstructure and mechanical properties of as-processed scandium-modified aluminium using selective laser melting [J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(1): 213-216.
- [15] Li X P, Ji G, Chen Z, *et al.* Selective laser melting of nano-TiB₂ decorated AlSi10Mg alloy with high fracture strength and ductility [J]. *Acta Materialia*, 2017, 129: 183-193.
- [16] Qian D Y, Chen C J, Zhang M, *et al.* Study on microstructure and micro-mechanical properties of porous aluminium alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0403002.
钱德宇, 陈长军, 张敏, 等. 选区激光熔化成形多孔铝合金的显微组织及微观力学性能研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403002.
- [17] Thijs L, Kempen K, Kruth J P, *et al.* Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(5): 1809-1819.
- [18] Fiocchi J, Tuissi A, Bassani P, *et al.* Low temperature annealing dedicated to AlSi10Mg selective laser melting products [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 3402-3409.
- [19] Brandl E, Heckenberger U, Holzinger V, *et al.* Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior [J]. *Materials and Design*, 2012, 34: 159-169.
- [20] Tang M, Pistorius P C. Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94: 192-201.
- [21] Prashanth K G, Scudino S, Klauss H J, *et al.* Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment [J]. *Materials Science & Engineering*, 2014, 590(2): 153-160.
- [22] Prashanth K G, Scudino S, Eckert J. Defining the tensile properties of Al-12Si parts produced by selective laser melting [J]. *Acta Materialia*, 2017, 126: 25-35.
- [23] Zhang H, Nie X J, Zhu H H, *et al.* Study on high strength Al-Cu-Mg alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0503007.
张虎, 聂小佳, 朱海红, 等. 激光选区熔化成形高强 Al-Cu-Mg 合金研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0503007.
- [24] Zhang B, Cao Y, Wang L, *et al.* Anisotropy of body-centered-cubic porous structures by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0802005.
张博, 曹毅, 王玲, 等. 选区激光熔化体心立方多孔结构的各向异性 [J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0802005.
- [25] Zhao X M, Qi Y H, Yu Q C, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy produced by 3D printing [J]. *Foundry Technology*, 2016, 37(11): 2402-2404.
赵晓明, 齐元昊, 于成全, 等. AlSi10Mg 铝合金 3D 打印组织与性能研究 [J]. *铸造技术*, 2016, 37(11): 2402-2404.
- [26] Maskery I, Aboulkhair N T, Aremu A O, *et al.* A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting [J]. *Materials Science & Engineering*, 2016, 670: 264-274.
- [27] Wang H, Kovacevic R. Rapid prototyping based on variable polarity gas tungsten arc welding for a 5356 aluminium alloy [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2001, 215(11): 1519-1527.
- [28] Wang H J, Jiang W H, Ouyang J H, *et al.* Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(1): 93-102.
- [29] Shen C, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* In-depth study of the mechanical properties for Fe₃ Al based iron aluminide fabricated using the wire-arc additive manufacturing process [J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, 669: 118-126.
- [30] Ding D H, Pan Z X, van Duin S, *et al.* Fabricating superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing [J]. *Materials*, 2016, 9(8): 652.
- [31] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* A multi-bead

- overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, 31: 101-110.
- [32] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133: 942-952.
- [33] Bai J Y, Wang J H, Lin S B, *et al.* Width prediction of aluminum alloy weld additively manufactured by TIG arc [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(9): 87-90.
柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测 [J]. *焊接学报*, 2015, 36(9): 87-90.
- [34] Bai J Y, Wang J H, Shi J H, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 4043-Al alloy thin-walled components produced by additive manufacturing with TIG welding [J]. *Welding&Joining*, 2015(10): 23-26.
柏久阳, 王计辉, 师建行, 等. TIG 增材制造 4043 铝合金薄壁零件组织及力学性能 [J]. *焊接*, 2015(10): 23-26.
- [35] Geng H B, Li J L, Xiong J T, *et al.* Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 243: 40-47.
- [36] Huang D, Zhu Z H, Geng H B, *et al.* TIG wire and arc additive manufacturing of 5A06 aluminium alloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(3): 66-72.
黄丹, 朱志华, 耿海滨, 等. 5A06 铝合金 TIG 丝材-电弧增材制造工艺 [J]. *材料工程*, 2017, 45(3): 66-72.
- [37] Cong B Q, Ding J L. Influence of CMT process on porosity of wire arc additive manufactured Al-Cu alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(12): 3149-3153.
从保强, 丁佳洛. CMT 工艺对 Al-Cu 合金电弧增材制造气孔的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(12): 3149-3153.
- [38] Sun H Y, Cong B Q, Su Y, *et al.* Geometry, microstructure and properties of wire + arc additive manufacturing Al-6.3 Cu alloy deposits [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(14): 72-76.
孙红叶, 从保强, 苏勇, 等. Al-6.3Cu 铝合金电弧增材制造成形与组织性能 [J]. *航空制造技术*, 2017(14): 72-76.
- [39] Cong B Q, Su Y, Qi B J, *et al.* Wire+arc additive manufacturing for aluminium alloy deposits [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016 (3): 29-37.
从保强, 苏勇, 齐铂金, 等. 铝合金电弧填丝增材制造技术研究 [J]. *航天制造技术*, 2016(3): 29-37.
- [40] Zhuang Z L, Song G, Zhu M L, *et al.* Rapid prototyping aluminum alloy with vertical deposition by laser-arc hybrid heat source [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(5): 71-74.
庄忠良, 宋刚, 祝美丽, 等. 激光-MIG 复合热源铝合金层间堆积快速成形 [J]. *焊接学报*, 2013, 34(5): 71-74.
- [41] 王鹏, 张兆栋, 宋刚, 等. 铝合金激光-电弧复合增材制造工艺分析 [J]. *焊接技术*, 2016, 45(10): 10-13.
- [42] 孙承帅, 张兆栋, 刘黎明. 激光诱导 MIG 电弧增材制造 5356 铝合金薄壁零件组织及力学性能 [J]. *焊接技术*, 2017, 46(5): 47-50.