

引文格式:王颢铭,方春娇,赖道贵,等. 磁场辅助电弧熔丝增材修复ZL114A薄壁件性能调控研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(8): 20250125.

WANG Haoming, FANG Chunjiao, LAI Daogui, et al. Research on properties regulation of thin-walled ZL114A parts repaired by magnetic field-assisted wire arc additive[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(8): 20250125.

磁场辅助电弧熔丝增材修复 ZL114A 薄壁件性能调控研究

王颢铭¹,方春娇²,赖道贵²,张宏凯¹,罗强²,李然²,方学伟¹,黄科¹

(1. 西安交通大学,西安 710049;

2. 中国航发南方工业有限公司,株洲 410000)

[摘要] 电弧熔丝增材制造技术是一种应用广泛的定向能量沉积增材制造技术,具有成形效率高、工作范围大等优势,适合大型零件的个性化修复。本文针对损伤薄壁铝合金构件提出了横向直流磁场辅助电弧熔丝增材修复新方法。自主搭建了横向直流磁场平台开展辅助 CMT-P 电弧熔丝增材单道试验,对比了不同励磁电流(0、2 A、4 A、6 A)对电弧行为、熔滴过渡以及熔池的影响,确定了最优磁场参数范围。分析了磁场对修复薄壁件微观组织、热影响区、力学性能的影响规律。结果表明,在 6 A 励磁电流内,磁场能够改变电弧及熔滴过渡的方向,有效抑制驼峰、颈缩现象的发生。引入 4 A 横向磁场后增材修复薄壁件的材料利用率达 84.8%,提高了 12.8%;修复交界面的共晶硅富集区宽度为 103 μm ,减小了 27%;增材区的二次枝晶间距为 $(12.7 \pm 3.6) \mu\text{m}$,细化了 43%;孔隙率为 0.672%,减少 32%;修复件的抗拉强度达 207 MPa,提升 6.7%。因此,横向直流磁场辅助 CMT-P 增材修复能够对 ZL114A 薄壁件起到良好的形性调控作用,为航空航天领域高性能薄壁构件快速修复提供了技术支撑。

关键词: 电弧熔丝增材; 修复; ZL114A; 磁场辅助; 形性调控

中图分类号: V261; TG47 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010125

Research on Properties Regulation of Thin-Walled ZL114A Parts Repaired by Magnetic Field-Assisted Wire Arc Additive

WANG Haoming¹, FANG Chunjiao², LAI Daogui², ZHANG Hongkai¹, LUO Qiang²,

LI Ran², FANG Xuewei¹, HUANG Ke¹

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. AECC South Industry Company Limited, Zhuzhou 410000, China)

[ABSTRACT] Wire arc additive manufacturing technology is a widely used directional energy deposition additive manufacturing technology with advantages of high forming efficiency and large working range, which is suitable for personalised repair of large parts. In this paper, a new method of transverse DC magnetic field-assisted wire arc additive repair is proposed for damaged thin-walled aluminium alloy components. A transverse DC magnetic field platform was built independently to carry out single-pass experiments of assisted CMT-P arc fuse material enhancement, comparing the effects of different excitation currents (0, 2 A, 4 A, 6 A) on the arc behaviour, the transition of the melt droplets, and the melt pool, and determining the optimal range of magnetic field parameters. The influence of magnetic field on the microstructure, heat-affected zone and mechanical properties of repaired thin-walled parts was analysed. The results show that in 6 A excitation current, the magnetic field can change the direction of the arc and the transition of the melt droplet, and effectively inhibit the occurrence of hump and necking phenomenon. The material utilisation of additively repaired

收稿日期: 2025-07-21; 退修日期: 2025-09-16; 录用日期: 2025-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(52275374)

通信作者: 黄科,教授,博士,研究方向为金属增材制造。

thin-walled parts after the introduction of 4 A transverse magnetic field reaches 84.8%, an increase of 12.8%; the width of the eutectic silicon enriched zone at the repair interface is 103 μm , a decrease of 27%; the secondary dendrite spacing in the additive zone is (12.7 \pm 3.6) μm , a refinement of 43%; the porosity is 0.672%, a decrease of 32%; the tensile strength of the repaired parts reaches 207 MPa, an increase of 6.7%. Therefore, the transverse DC magnetic field-assisted CMT-P additive repair can play a good role in the shape regulation of ZL114A thin-walled parts, which provides technical support for the rapid repair of high-performance thin-walled structures in the aerospace field.

Keywords: Wire arc additive manufacturing; Repair; ZL114A; Magnetic field assist; Morphological regulation

ZL114A 作为高性能 Al-Si-Mg 系铸造铝合金,因其良好的铸造性、较高的力学性能被广泛应用于航空领域铸造零件中^[1-2]。然而,在铸造零件服役过程中,受冲击、振动等恶劣工作环境的影响,相关部位易发生损伤,从而失去原有的功能,严重影响航空器的飞行安全^[3-5]。

电弧熔丝增材制造技术是一种应用广泛的定向能量沉积增材制造技术,以丝材为沉积材料,电弧为热源,通过将熔化的丝材按预定路径进行沉积。近年来,由于其良好的冶金结合特性、高沉积效率以及高自动化水平等特点,逐渐在增材修复领域崭露头角。相比于激光增材修复技术,电弧熔丝增材修复过程中的材料利用率高,沉积速度快。而相比于 TIG 补焊技术,基于冷金属过渡(Cold metal transfer)技术的电弧熔丝增材修复技术具有更低的热输入,因此对待修复件的热影响更小,修复质量更高^[6-7]。然而铝合金电弧熔丝增材制造仍然存在孔隙多、成型精度低等问题^[8],国内外学者尝试从不同的外场辅助进行提升,如激光搅拌、锤击、磁场、超声等^[9-12]。其中磁场辅助电弧熔丝增材制造技术因其清洁、高效、非接触、随行的特点被广泛关注。

目前,国内外关于增材修复的研究相对成熟。申发明等^[13]利用激光沉积技术对铸造 ZL114A 铝合金进行修复,结果表明激光沉积修复界面冶金结合良好,修复件变形较小,修复后零件抗拉强度满足要求。张震等^[14]针对铸造零件生产过程中的典型缺陷进行了 TIG 补焊修复及热处理研究,探究了不同工艺参数对焊接接头的性能影响,并揭示了热处理制度对修复零件组织及力学性能的影响规律。刘文慧等^[15]利用氩弧焊工艺对 ZL114A 合金砂型铸件进行修复,结果表明受热源影响修复后的零件力学性能有所下降。磁场辅助增材制造方面, Li 等^[16]利用横向交流磁场对 GTAW 进行焊接微观组织调控,研究表明,较小的外磁场(3~5 mT)引起的电弧振荡使熔池冷却速度较慢,不仅可以提高焊缝中的奥氏体百分比,而且细化了铁素体晶粒。Chang 等^[17]在 TIG 焊接中加入了横向直流磁场,结果表明横向磁场能够改善焊缝咬边、驼峰等缺陷,提高生产效率。Yue

等^[18]针对不同材料焊接过程中电弧向一侧偏移的问题引入横向磁场,结果表明磁控焊接可以显著提升异种合金的焊缝质量。总结来看,现有针对 ZL114A 合金的修复集中于小范围补焊,缺乏对航空薄壁件大面积修复的研究;同时由于电弧热源影响较大,极易导致修复件性能骤降。而大量磁场辅助焊接的研究表明,横向磁场能够对焊缝起到细化晶粒、提升性能、改善成形质量的作用,同时能够降低修复热输入以减小热影响区,特别适合用于提升增材修复零件性能。然而目前关于磁场辅助 ZL114A 电弧熔丝增材修复的研究少有报道。

综上所述,本文以服役态铸造 ZL114A 铝合金为修复对象,在电弧熔丝增材修复系统上增加横向直流磁场装置,以对增材修复薄壁件进行性能调控。研究分析了横向直流磁场对电弧行为、熔滴过渡以及熔池的影响,揭示了磁场辅助电弧熔丝增材修复对提升成型件精度和性能的原理,为后续磁场辅助电弧熔丝增材修复大型服役态铸造铝合金零件提供理论指导。

1 试验及方法

1.1 试验材料

试验选用的待增材修复对象为郑州轻研公司生产的服役态铸造 ZL114A 铝合金板材,试样尺寸为 250 mm \times 70 mm \times 20 mm。在试样待增材修复前,分别用 200#、800# 砂纸打磨试样表面,并用酒精擦拭干净以去除待修复表面油污及氧化膜。沉积材料采用抚顺东工生产的 ZL114A 丝材,直径为 1.2 mm,丝材与修复基板的化学成分相同,其中硅元素的质量分数为 6.5%~7.5%;镁元素的质量分数为 0.45%~0.75%;钛元素的质量分数为 0.08%~0.25%。

1.2 试验设备与方案

磁场辅助电弧熔丝增材修复系统如图 1(a)所示。增材修复系统包括机器人运动平台(型号 KR20 R1810-2, KUKA 公司)、焊接电源(型号 CMT Advanced 4000R, 伏能士公司)、磁控电源、磁场发生装置、高速 CCD 摄像机、电流电压传感器、预热装置和保护气体装置等,其

中机器人运动平台和焊接电源的详细信息请见参考文献 [19-21]。磁控电源选用可输出电流大小为 0~10 A 的直流电信号,如图 1 (b)所示。磁场发生装置为自主设计,如图 1 (c)所示,由磁芯与线圈构成,磁场装置的布置可产生垂直于沉积方向的磁场,使得电弧沿沉积方向发生偏吹。利用特斯拉计对磁场发生装置轴线下方 10 mm 处(P点)的电流-磁场强度进行实际测量,结果如图 1 (d)所示。高速 CCD 摄像机型号为 Phantom VEO410L,采集帧率高达 5200 fps,分辨率为 1280 × 800 pixels,用于观察电弧和熔滴的过渡方式。

根据前期试验结果,本研究选用冷金属过渡脉冲 (Cold metal transfer-pulse) 电弧模式作为沉积模式,增

材修复具体工艺参数如表 1 所示。在增材修复前,先进行单道沉积试验,利用高速 CCD 摄像机对沉积过程进行拍摄,探究横向直流磁场对 CMT-P 沉积模式中电弧与熔滴的作用机理,确定合适励磁电流大小范围;再对高速 CCD 摄像机拍摄的电弧特征进行逐帧提取,电弧特征定义如图 2 所示。电弧特征包括电弧峰值面积、峰值弧宽以及偏移距离,其中电弧偏移距离定义为焊丝中心到电弧形心的横向垂直距离。利用合适的励磁电流进行磁场辅助增材修复,沉积策略为首尾交替沉积,以防止沉积边缘塌陷和热应力过大。增材修复前对基板预热至 150 °C,以减少修复后的变形。

增材修复后利用线切割设备进行取样,用于微

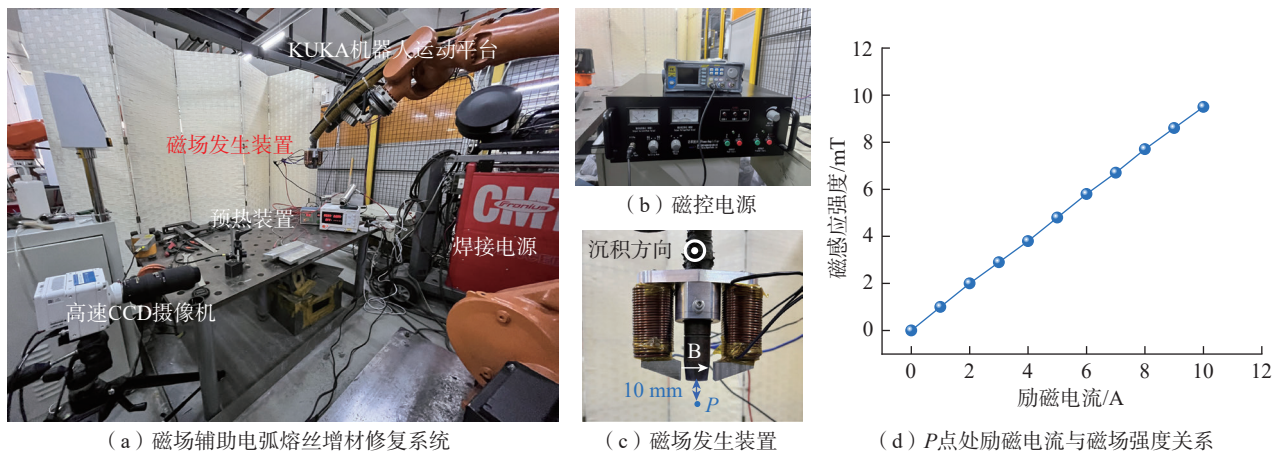


图 1 磁场辅助电弧熔丝增材修复系统

Fig.1 Magnetic field assisted wire arc additive remanufacturing system

表 1 增材修复工艺参数

Table 1 Additive remanufacturing process parameters

层数	送丝速度/(m · min ⁻¹)	增材速度/(m · min ⁻¹)	气流量/(L · min ⁻¹)	层间等待时间/s	干伸长/mm
1~2	7.5	1	20	150	12
3~4	6.5	1			
>4	6.5	1.2			

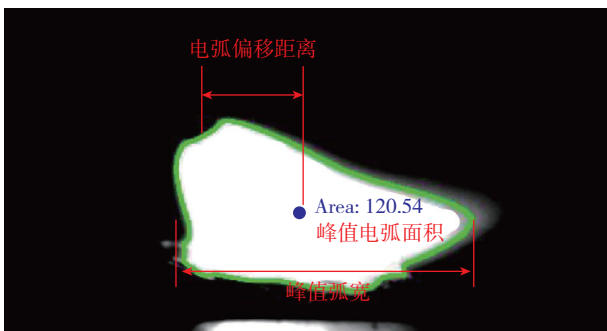


图 2 电弧特征参数定义

Fig.2 Definition of arc characteristic parameters

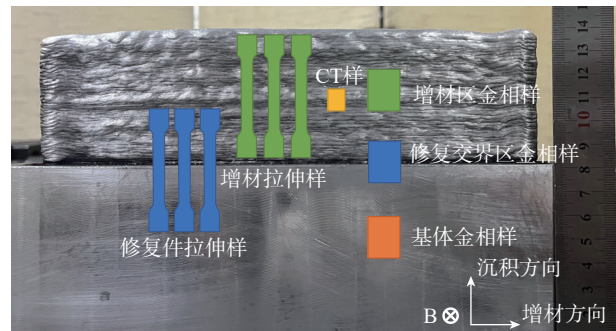


图 3 表征样品选取位置

Fig.3 Location of characterisation sample

观组织、拉伸性能、CT表征的样品取样位置如图3所示。依次使用200#~2000#砂纸打磨金相样、显微硬度测试样品,并进行抛光处理,使用Keller试剂($2.5 \text{ HNO}_3 : 1.5 \text{ HCL} : 1 \text{ HF} : 95 \text{ H}_2\text{O}$)腐蚀10~20 s,随后用酒精清洗并干燥处理。利用金相显微镜对增材修复样品微观组织进行观察。为了分析磁场辅助电弧熔丝增材修复样品孔隙缺陷分布,采用X射线计算机断层扫描技术统计内部孔隙缺陷,所使用的分辨率为 $8 \mu\text{m}$ 。根据GB/T 228.1—2010标准,利用电子万能试验机(型号CMT 5504, SANS公司)进行拉伸试验,在室温下对每种拉伸试样以 1 mm/min 的应变速率各进行3次拉伸,得到各拉伸试样的应力-应变曲线。

2 结果与讨论

2.1 磁场作用下电弧行为与熔滴过渡分析

CMT-P电弧模式下的熔滴过渡过程如图4所示。其中,1个CMT-P模式周期包括两个阶段,分别是脉冲阶段和CMT阶段。在送丝速度为 7 m/min 下,脉冲阶段由33个脉冲组成,实现射滴过渡,1脉1滴。CMT阶段又包括CMT基值阶段和短路阶段,在基值阶段电弧十分微弱,焊丝逐渐前伸,焊丝前端逐渐融化但未形成熔滴滴落;在短路阶段焊丝触碰熔池然后回抽,电弧

消失。

图5为一个电弧脉冲周期下不同励磁电流大小对电弧行为的影响,可以看出,未引入横向直流磁场时,电弧沿焊丝呈对称分布,呈钟罩形。引入横向直流磁场后,由于电弧可以看作等离子放电,产生从焊丝到基板的电流,电流穿过横向磁场产生外部洛伦兹力,使得电弧沿沉积方向偏移,电弧被拉长,电弧背部区域由光滑曲线逐渐变坚挺,单位能量密度下降。随着励磁电流逐渐增大,所受洛伦兹力增大,电弧偏移距离增大,弧宽增加,对前部基板预热更加有效。当励磁电流为 6 A 时,电弧偏吹严重,在CMT-P脉冲电流基值附近电弧的不稳定性更为明显。因此合适的励磁电流参数应当在 6 A 以内。

图6为电弧特征参数的定量分析结果。图6(a)统计了增材过程中电弧形心的实时偏移距离。未引入横向直流磁场时,电弧形心主要沿焊丝轴线左右小范围摆动,未发生电弧偏移。引入横向磁场后,电弧发生前向偏移,励磁电流 2 A 时电弧平均前向偏移 0.88 mm ; 4 A 时平均偏移 2.18 mm ; 6 A 时平均偏移 3.12 mm 。图6(b)为不同励磁电流下电弧峰值弧宽的变化,峰值弧宽随励磁电流的增大呈现增加趋势。图6(c)统计了峰值电弧面积和电弧偏移距离的变化情况,随励磁电流增大,峰值电弧面积和偏移距离均增加。各电弧特征参数的

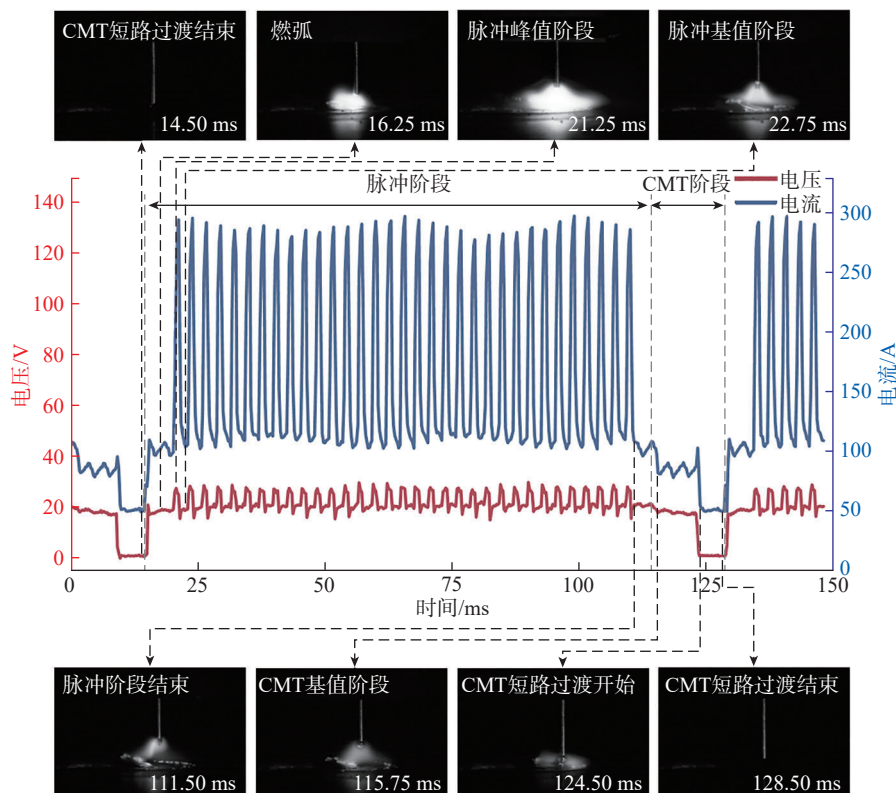


图4 CMT-P电弧模式下熔滴过渡过程

Fig.4 Melt drop transition process in CMT-P arc mode

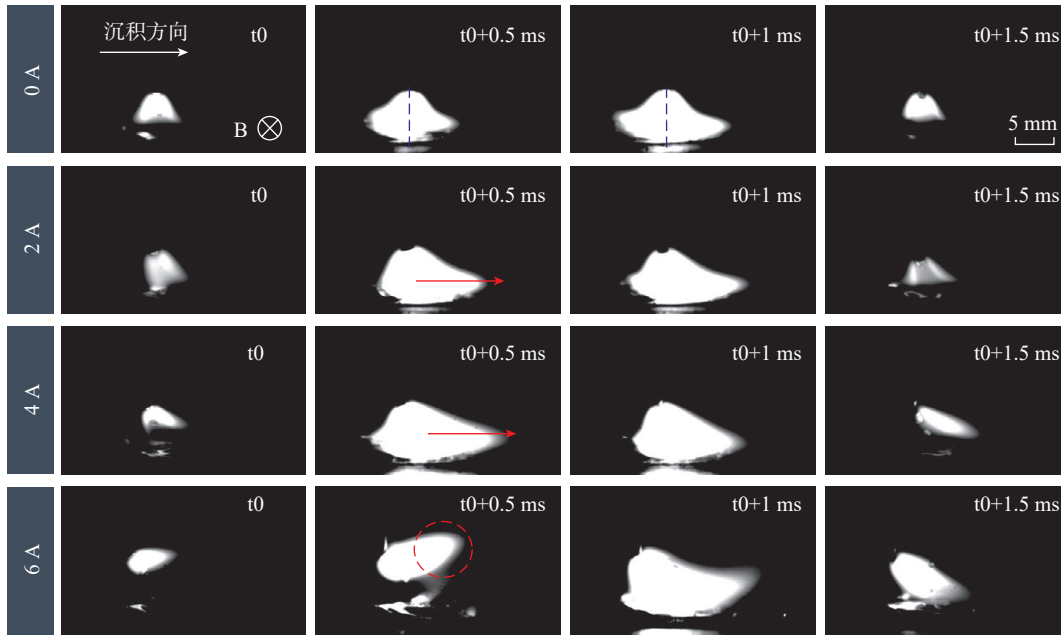
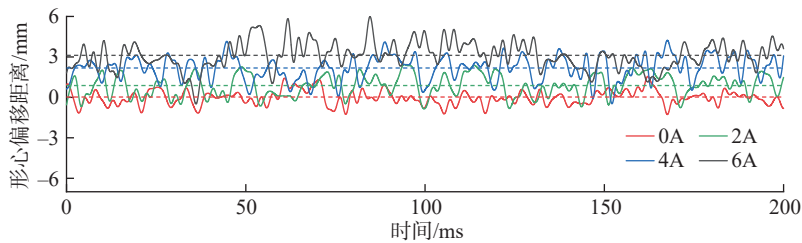
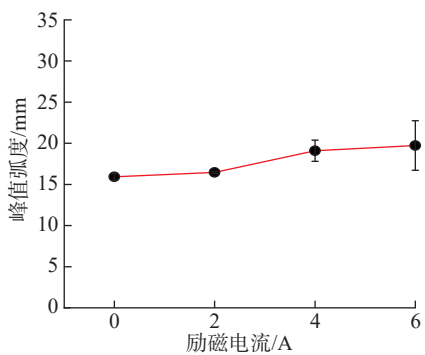


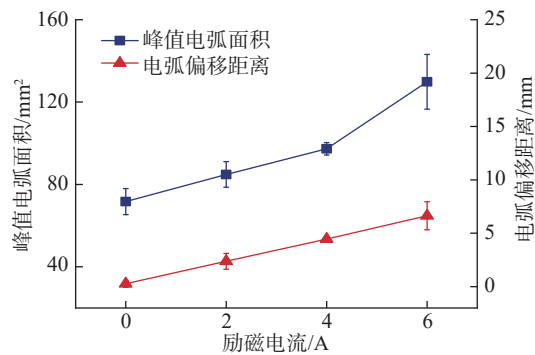
图5 励磁电流对电弧行为的影响
Fig.5 Effect of excitation current on arc behaviour



(a) 电弧形心偏移实时距离



(b) 峰值弧宽



(c) 峰值电弧面积与电弧偏移距离

图6 励磁电流与电弧特征参数关系

Fig.6 Relationship between excitation current and arc characteristic parameters

增加说明随着横向磁场的引入,电弧的能量密度减少,热量单位作用面积增加。从图6可以看出,随着励磁电流的增大,电弧各特征参数的波动性增大,特别是励磁电流为6A时,电弧特征参数波动异常,也进一步表明了6A时电弧不稳定的现象。

图7为不同励磁电流大小对熔滴过渡及熔池的影响。当未引入横向直流磁场时,熔滴仅受重力、表面张

力、电磁收缩力等力的综合作用,呈现竖直向下运动,熔滴在下降过程中为椭球状。引入横向磁场后,熔滴受到外部洛伦兹力的影响,当带电液滴穿过横向磁场时,切割磁感线从而产生前向的洛伦兹力,打破原有的过渡平衡,使得熔滴沿前进方向的右下方滴落。在熔滴下降过程中,形状由竖直椭球状变为圆球状,有的甚至被横向打碎,形成多个熔滴。当励磁电流持续增大到6A后,

此时横向洛伦兹力大于熔滴下降时的综合受力,熔滴沿前方飘走,不能较好实现熔滴过渡。

受到电弧、熔滴的综合作用,引入横向磁场后熔池也发生变化。未施加磁场时,熔池长 8.04 mm,沿焊丝对称分布;施加横向磁场后,熔池发生前移,且熔池长度随励磁电流增大而增大;当励磁电流为 2 A 时,熔池长度为 9.07 mm;励磁电流 4 A 时,熔池长度达到 9.21 mm。但是当励磁电流增加到 6 A 时,此时电弧偏吹严重,熔滴过渡不稳定,电弧产生的绝大部分热量没有作用于基板和熔池,因此熔池长度显著减小。

从上述对电弧、熔滴的分析中可以看出,横向磁场主要作用于脉冲阶段的电弧与熔滴过渡中,通过作用改变电弧行为以及熔滴过渡来进一步改变熔池的状态,而磁场本身对熔池的搅拌作用微乎其微。这是因为电弧以及熔滴对磁场的敏感程度要远高于熔池,当磁场强度到达可以对熔池产生影响时,此时的电弧和熔滴过渡将极其不稳定,甚至无法成形。因此,在本文研究的电弧熔丝增材工艺中引入磁场辅助综合考虑磁场对电弧、熔滴以及熔池的作用,确定最佳磁场参数范围为 0~6 A,对应磁场强度为 0~6.2 mT。

2.2 磁场对单道成形形貌影响

在分析完磁场对熔滴过渡及熔池行为的影响后,图 8 展示了不同励磁电流下的 CMT-P 成形单道形貌,可以看出,未施加磁场时,单道起始端存在明显颈缩。随着磁场的引入,单道逐渐均匀,颈缩现象有所缓解。当励磁电流为 6 A 时,单道成形不稳定,出现了严重的飞溅和球化现象,这是因为此时电弧对基板和熔池的热

输入极剧减小,以及熔滴无法稳定过渡到熔池综合导致的。

图 9 (a) 为单道宽度和高度的整体变化情况。可以看出,随着励磁电流的增大,单道起始段宽度更加平整均匀,颈缩现象减少;同样单道高度也变得更加均匀,起始段的驼峰消失。图 9 (b) 可以看出,从 0 到 4 A,单道宽度和高度的标准偏差均明显下降,其中励磁电流为 4 A 时单道成形精度最高;励磁电流为 6 A 时,成形不稳定,导致其高度及宽度标准偏差不降反升。因此后续增材修复时,将主要选用励磁电流 4 A 作为磁场辅助修复时的参数。

2.3 增材修复薄壁件成形形貌

在上述基础上,对待增材修复样件进行增材制造修复,分别进行无磁场辅助(励磁电流为 0)增材修复以及横向磁场辅助(励磁电流为 4A)增材修复。图 10 (a) 为增材修复后的薄壁件样品,样品的成形形貌较好,增材修复薄壁件特征参数见表 2,各特征参数定义如图 10 (b) 所示。其中材料利用率为薄壁件最大内接矩形面积与薄壁件实际面积的比值,利用 ImageJ 软件进行相关统计计算。图 10 (c) 为增材修复部分的截面,励磁电流为 0 时层间重熔带(银白色带)呈现之字形分布,每一层的熔池左右交替塌陷溢流,造成增材修复薄壁件成形精度差,出现较大波浪形状,使得材料利用率下降。4 A 时熔池向两侧的流动减少,薄壁件成形更加均匀,成形精度高,且层间重熔带平行分布,之字形分布消失。从表 2 可以看出,引入横向磁场后,薄壁件的有效宽度系数为 0.76,较励磁电流为 0 时增加了 0.08;材料利用率

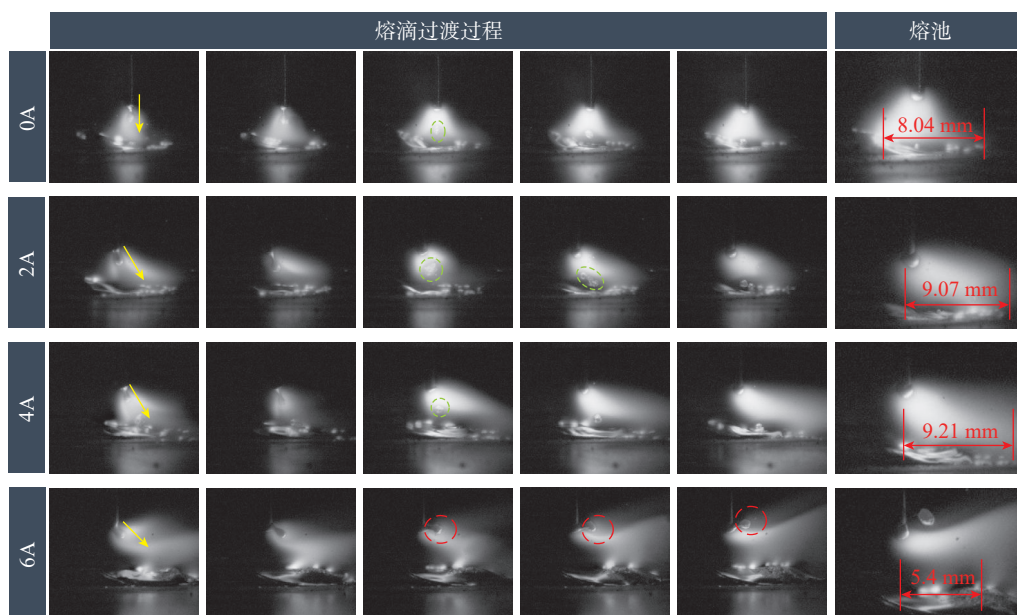


图 7 励磁电流对熔滴过渡及熔池的影响

Fig.7 Effect of excitation current on melt drop transition and melt pool

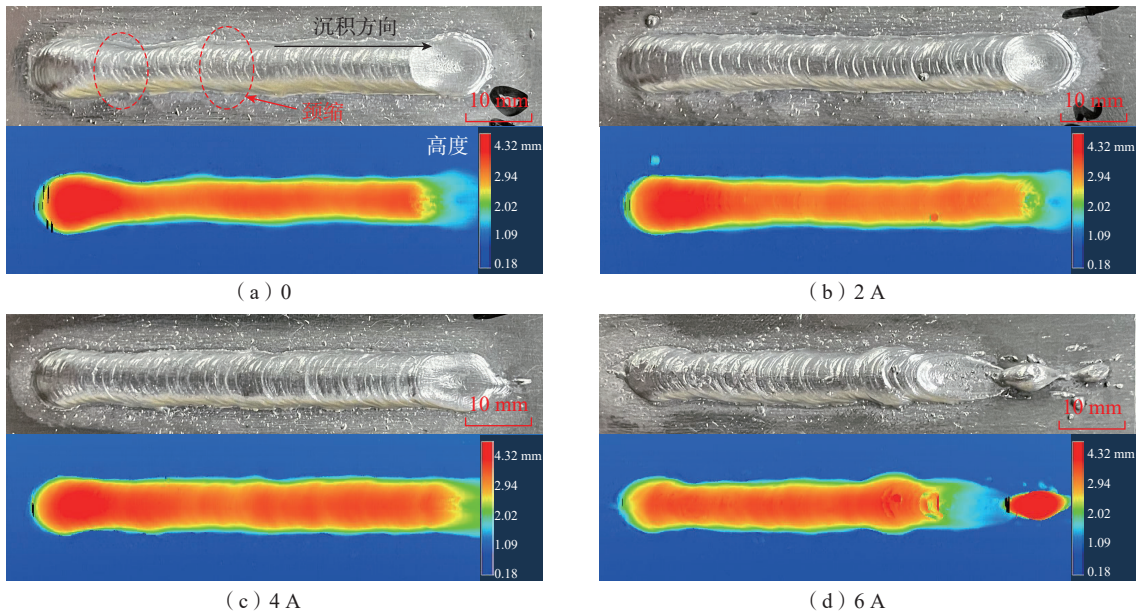


图 8 不同励磁电流下单道成形形貌

Fig.8 Single path forming morphology under different excitation currents

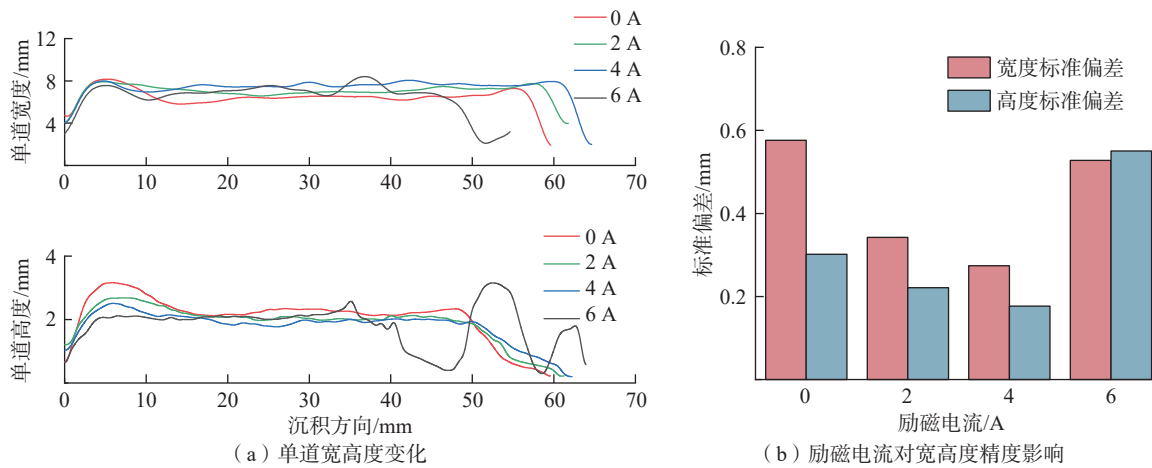


图 9 不同励磁电流下单道宽高度及标准偏差

Fig.9 Width and height and standard deviation of single path at different excitation currents

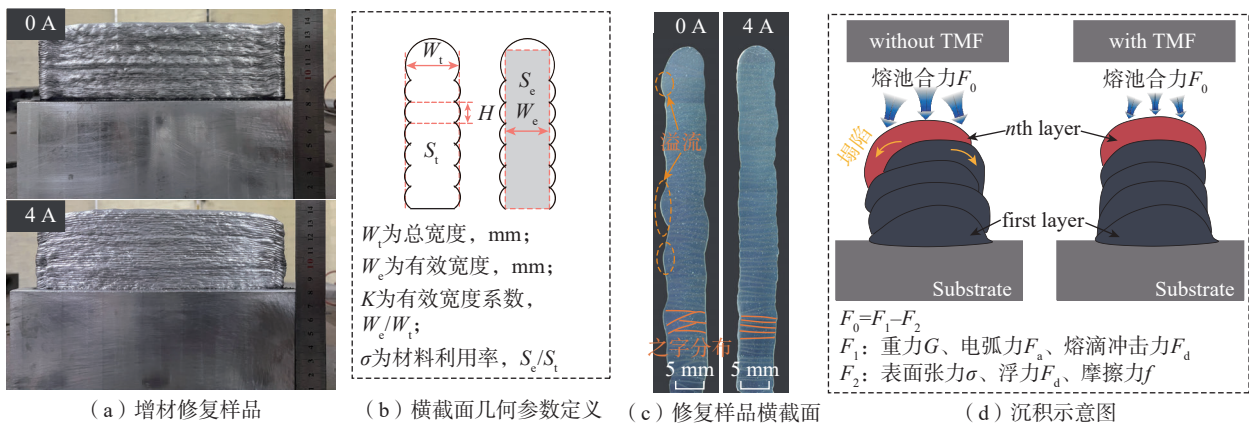


图 10 增材修复薄壁件成形形貌

Fig.10 Formation of additive remanufacturing

表2 增材修复截面特征参数
Table 2 Characteristic parameters of additive remanufacturing cross-section

励磁电流 / A	有效宽度 / mm	总宽度 / mm	有效宽度系数	材料利用率 / %
0	6.03	8.84	0.68	71.9
4	5.81	7.66	0.76	84.7

为84.7%，较励磁电流为0时提高了12.8%。横向磁场提升薄壁件成形精度的机理如图10(d)所示。一方面，由于ZL114A为Al-Si合金，Si的存在使得该合金的流动性大大增强，因此在成形薄壁件时出现熔池的溢流现象。加入外部磁场后，外部洛伦兹力的作用使得电弧、熔滴对熔池的冲刷作用减弱，使得熔池成形更加稳定，溢流现象减少，薄壁件成形更加均匀。另一方面，电弧在洛伦兹力下被拉长，单位热输入减少，熔池凝固速率更快，熔池来不及塌陷就已经成形。

2.4 增材修复显微组织

图11为增材修复薄壁件的光镜显微组织图，包括增材修复区、界面及基体区，可以看出，未引入横向磁场时，增材交界区附近存在大量孔隙，部分孔隙直径超过500 μm。在4 A磁场下增材交界区孔隙明显减少，孔隙直径均在50 μm以下。基体部分显微组织由α-Al基体以及球化的共晶硅构成，同时α-Al基体中弥散分布着Mg₂Si等强化相。从交界面可以看出，0 A和4 A条件下，交界面均存在共晶硅的聚集，这是由于电弧作用基体重熔造成的。0 A时热输入作用较大，共晶硅的富集带较宽，达到140.6 μm；4 A时由于热输入的减少，热影响区相应减小，共晶硅富集带宽度有明显减小，

为103 μm。此外4 A时共晶硅富集带内的硅颗粒更为集中，呈现片状分布。从增材区可以看出，电弧熔丝增材修复样件的微观组织由α-Al基体以及树枝连续状的共晶硅组成，且晶粒大小要远小于基体，这是由于电弧熔丝增材成形是速冷的过程，因此晶粒来不及长大就发生凝固。对比0 A和4 A增材区组织，发现4 A时片状共晶硅更加细密。利用ImageJ软件在增材区随机选取10个区域，每个区域随机选取10个枝晶进行二次枝晶间距统计，统计发现，0 A时其二次枝晶间距为(22.2 ± 4.1) μm；4 A时二次枝晶间距明显减小，为(12.7 ± 3.6) μm，减小了43%。

2.5 增材修复孔隙分析

图12展示了增材修复区孔隙分布图，可以看出，0 A时，孔隙分布呈现之字形，这与层间带分布一致，表明孔隙主要分布在层间区域。4 A时孔隙同样集中分布在层间，并且平行分布，孔隙数量相比未加入磁场时有所减少，但小孔数量增多。表3对比了有无磁场下的孔隙(40 μm以上)变化，4 A时孔隙数量为12556个，较未引入磁场时减少23%；孔隙率为0.672%，减少32%。结果表明引入横向磁场后，薄壁件孔隙数量减少，孔隙率明显下降，大孔缺陷基本消失，而孔隙的减少将进一步提升薄壁件的性能。

2.6 增材修复力学性能

图13为不同增材修复薄壁件力学性能，取样位置见图3。引入横向磁场后，增材件的屈服强度达到96 MPa，抗拉强度达到201 MPa，分别较未引入横向磁场提升7%、9.8%，同时延伸率能保持相同水平。修复件的屈服强度达到120 MPa，抗拉强度达207 MPa，较未引入横向磁场提升6%、6.7%，延伸率没有明显下降。引入横向

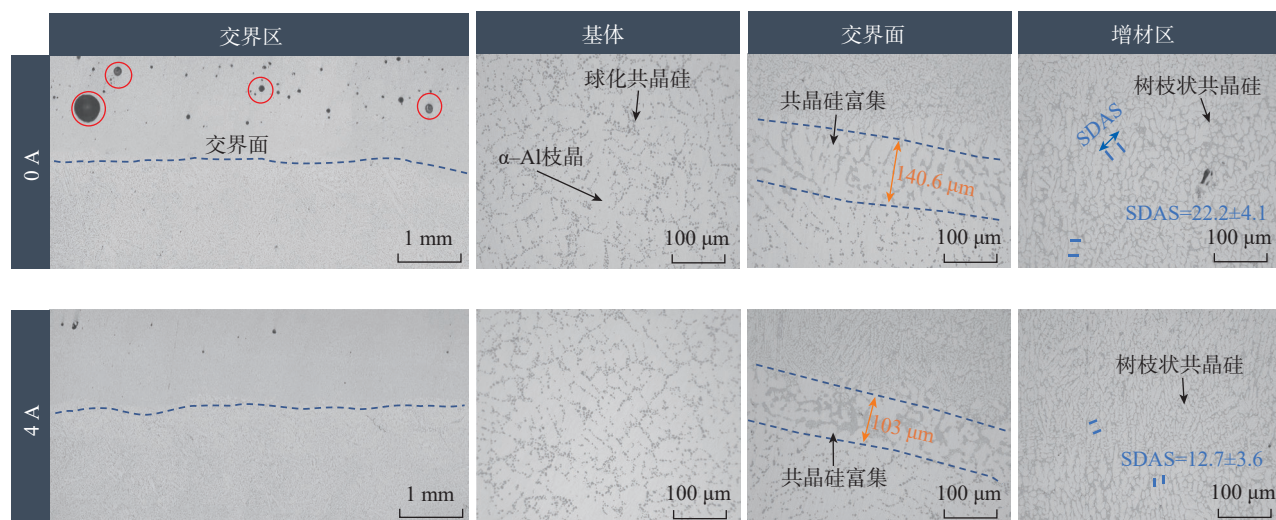


图11 增材修复薄壁件显微组织

Fig.11 Microstructure of additively remanufactured thin-walled parts

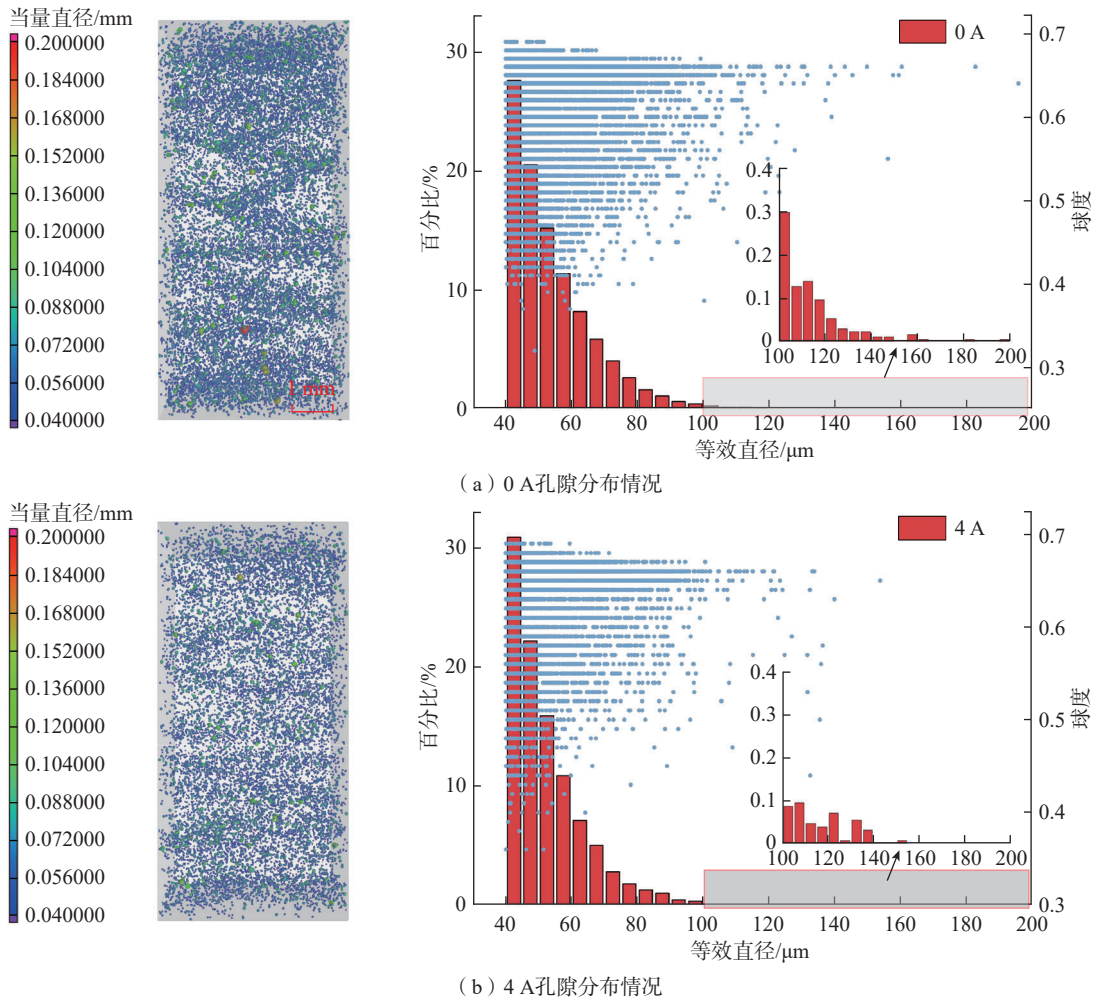


图 12 增材修复薄壁件孔隙分布
Fig.12 Pore distribution in additively remanufactured thin-walled parts

表 3 增材修复薄壁件孔隙对比

Table 3 Comparison of pores in additively remanufactured thin-walled parts

励磁电流 / A	孔隙数量 / 个	孔隙率 / %	等效直径 / μm
0	16371	0.986	54.1
4	12556	0.672	52.4

磁场后薄壁修复件性能提升的主要原因有两个。一方面,磁场产生的洛伦兹力对电弧、熔滴、熔池均有影响。洛伦兹力改变了电弧的方向,拉长了弧宽(图 7),使得单位热输入减小。熔滴沿前下方滴落,减轻了对熔池的冲击作用。电弧和熔滴的综合作用使得凝固方向发生变化,促进更细小晶粒的形成。另一方面,较小的温度梯度促使凝固速率加快,使得熔池凝固过程中小孔来不及形成、小孔来不及变成大孔就发生凝固,孔隙率减少(图 12)增大了受力面积,因此提升了薄壁件的力学性能。

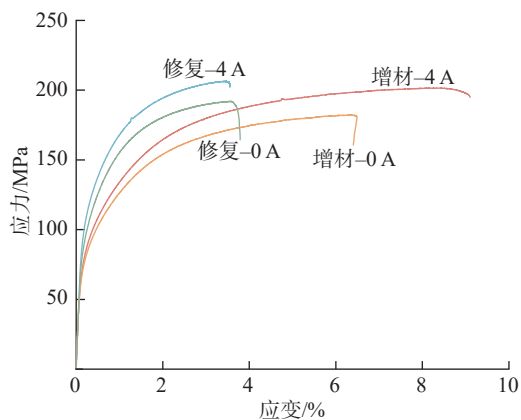
3 结论

(1)在 CMT-P 电弧模式的电弧熔丝增材工艺中成功引入了横向磁场。横向磁场产生的洛伦兹力可以促使电弧和熔滴沿前进方向偏移,以减少对熔池的冲击作用,同时优化散热方向,降低热输入。

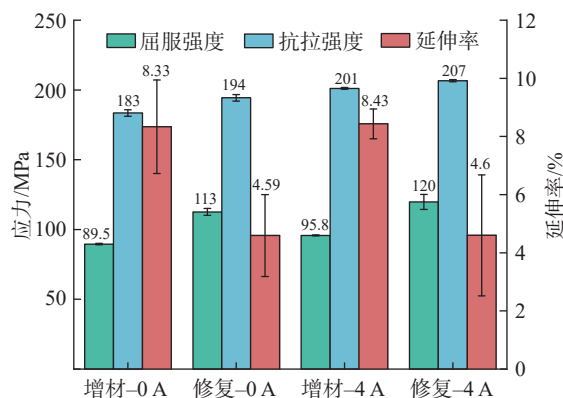
(2)横向磁场辅助 CMT2P 增材制造可以改善沉积精度。对于单道沉积,磁场辅助可以减少驼峰、颈缩现象的发生。对于增材薄壁件,引入磁场后可以有效消除熔池塌陷问题。4 A 的励磁电流下薄壁件的材料利用率为 84.8%,较未加入磁场沉积的薄壁件提高了 12.8%。

(3)横向磁场辅助 CMT-P 增材修复可以改善沉积区域微观组织,减小热影响区。引入 4 A 磁场后,修复交界处的部分融化区宽度由未引入磁场的 140.6 μm 减小到 103 μm。增材区的枝晶更加细小,二次枝晶间距减小了 43%。

(4)横向磁场辅助 CMT-P 增材修复可以减少孔隙缺陷,提升修复件性能。引入 4 A 磁场后修复区域的孔



(a) 拉伸样应力-应变曲线



(b) 薄壁修复件力学性能

图 13 增材修复薄壁件力学性能

Fig.13 Mechanical properties of additively remanufactured thin-walled parts

隙率达 0.672%，减少了 32%；修复件的屈服强度达到 120 MPa，抗拉强度达到 207 MPa，分别提升 6%、6.7%，同时延伸率未有下降。

参考文献

- [1] YI H, YANG L, JIA L, et al. Porosity in wire-arc directed energy deposition of aluminum alloys: Formation mechanisms, influencing factors and inhibition strategies[J]. Additive Manufacturing, 2024, 84: 104108.
- [2] FANG X W, LI H, LI X G, et al. Effect of post heat treatment on the microstructure and mechanical properties of wire-arc additively manufactured A357 alloy components[J]. Materials Letters, 2020, 269: 127674.
- [3] 周永江, 熊艳才, 洪润洲, 等. ZL114A 合金疲劳行为研究[J]. 航空材料学报, 2007, 27(4): 10-13.
- [4] ZHOU Yongjiang, XIONG Yancai, HONG Runzhou, et al. Study on fatigue behaviors of ZL114A alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(4): 10-13.
- [5] 张永泽. 激光增材修复铝合金机匣技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- [6] ZHANG Yongze. Study on the technology of laser additive and subtractive repairing aluminium alloy casin[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019.
- [7] 张鑫. 2A12 铝合金 CMT 增材修复件组织及性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
- [8] ZHANG Xin. Study on microstructure and properties of cmt additive repair of 2a12 aluminum alloy[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022.
- [9] JIAO G H, FANG X W, ZHANG M G, et al. Synergistic improvement of mechanical property and thermal expansion of wire-arc DED invar alloy enabled by a novel deposition strategy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 121: 121-135.
- [10] 周祥曼, 田启华, 杜义贤, 等. 外加横向磁场作用电弧增材成形过程中的传热传质仿真[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 193-206.
- [11] ZHOU Xiangman, TIAN Qihua, DU Yixian, et al. Simulation of heat and mass transfer in arc welding based additive forming process with external transverse magnetic field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 193-206.
- [12] JIAO G H, FANG X W, LI X Z, et al. High performance ultrasonic vibration assisted wire-arc directed energy deposition of Invar alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 332: 118534.
- [13] GU J L, DING J L, WILLIAMS S W, et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230: 26-34.
- [14] JI F L, QIN X P, HU Z Q, et al. Influence of ultrasonic vibration on molten pool behavior and deposition layer forming morphology for wire and arc additive manufacturing[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 130: 105789.
- [15] HE C S, WEI J X, LI Y, et al. Improvement of microstructure and fatigue performance of wire-arc additive manufactured 4043 aluminum alloy assisted by interlayer friction stir processing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 133: 183-194.
- [16] XIONG X C, HU Z Q, QIN X P, et al. In-situ fabrication of repairing layers for large structures using follow-up hot-hammering-assisted wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94: 387-402.
- [17] 申发明, 崔岩峰, 邵童阁, 等. 激光沉积修复铸造铝合金 ZL114A 变形与性能调控[J]. 焊接学报, 2024, 45(8): 121-128.
- [18] SHEN Faming, CUI Yanfeng, SHAO Tongge, et al. Tailored deformation and properties of cast aluminum alloy ZL114A repaired by laser deposition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(8): 121-128.
- [19] 张震. 热处理与补焊工艺对 ZL114A 机匣组织性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [20] ZHANG Zhen. Effect of heat treatment and repair welding process on microstructure and properties of zll14a gearbox[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [21] 刘文慧, 李天文, 梁春霞, 等. 补焊对铝合金砂型铸件性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(1): 93-96.

LIU Wenhui, LI Tianwen, LIANG Chunxia, et al. Effects of welding repair on performance of sand mmold casting aluminum alloy castings[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2018, 38(1): 93–96.

[16] LI F X, LIU Y B, JIN P, et al. Appreciable-tuned ferrite/austenite phase balance in the fusion zone of GTAW welds via an assisted magnetic field[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 885: 160851.

[17] 常云龙, 杨殿臣, 魏来, 等. 外加横向磁场对高速 TIG 焊缝成形的影响[J]. *焊接学报*, 2011, 32(3): 49–52, 115.

CHANG Yunlong, YANG Dianchen, WEI Lai, et al. Influence of magnetic controlled technology on formation of high-speed TIG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(3): 49–52, 115.

[18] YUE J F, ZHOU H, XIE C, et al. Temperature field simulation and asymmetric heat transfer distribution of dissimilar steel welded with external transverse magnetic field[J]. *Materials Today Communications*,

2023, 37: 107141.

[19] CHANG T X, FANG X W, ZHOU Y, et al. Heterogeneous interfaces of aluminum bronze/Inconel 718 dissimilar alloys under different wire arc directed energy deposition sequences[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2025, 7(1): 015003.

[20] CHANG T X, FANG X W, LIU G, et al. Wire and arc additive manufacturing of dissimilar 2319 and 5B06 aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 124: 65–75.

[21] LI X Z, FANG X W, ZHANG M G, et al. Enhanced strength-ductility synergy of magnesium alloy fabricated by ultrasound assisted directed energy deposition[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 178: 247–261.

(责编 晓月)