

二系铝合金电弧增材制造技术研究现状

朱安, 徐礼坤, 任可欣, 魏榆寒, 李春, 刘大双

合肥工业大学材料科学与工程学院 安徽合肥 230009

摘要: 电弧增材制造 (WAAM) 技术由于其在经济生产沉积率较高的大型金属组件方面的优势, 在当代制造业受到越来越多的关注。高强度铝合金尤其是二系铝合金因其高比强度和优良的加工能力, 而广泛应用于航空航天、军事和汽车工业。WAAM为生产大型高强度二系铝合金组件提供了一种有效的方法, 并且相关领域正在迅速发展。综述了WAAM高强度二系铝合金在组织和性能、缺陷和后处理等方面的研究进展。研究结果在WAAM高强度二系铝合金的微观结构和力学性能方面是积极的。最后, 在前人研究的基础上, 概述了WAAM高强度二系铝合金的发展前景。

关键词: 丝材-电弧增材制造; 2219铝合金; 组织和性能; 缺陷; 后处理

Research status of aluminum-copper alloy arc additive manufacturing technology

ZHU An, XU Likun, REN Kexin, WEI Yuhan, LI Chun, LIU Dashuang

School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract: Wire-arc Additive Manufacturing (WAAM) technology has received more and more attention in contemporary manufacturing due to its advantages in the economical production of large metal components with high deposition rates. High-strength aluminum-copper alloys are widely used in the aerospace, military, and automotive industries due to their high specific strength and excellent processing capabilities. WAAM provides an effective method for the production of large, high-strength aluminum-copper alloy components, and the field is rapidly evolving. In this paper, the research progress of WAAM high-strength aluminum-copper alloy in terms of microstructure and properties, defects and post-treatment is reviewed. The results are positive in terms of the microstructure and mechanical properties of WAAM's high-strength aluminum-copper alloys. Finally, on the basis of previous research, this paper summarizes the development prospects of WAAM high-strength aluminum-copper alloys.

Keywords: wire-arc additive manufacturing; 2219 aluminum alloy; microstructure and properties; flaw; post-processing

1 序言

金属材料制造领域是现代工业社会的重要组成部分, 也是国家创造力、竞争力和综合国力的体现^[1, 2]。

近年来, 增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 为金属材料制造领域提供了新的途径和机遇^[3, 4]。在增材制造过程中, 根据离散堆积原理, 利用三维数

基金项目: 国防基础研究计划 (61420052023WD009); 合肥工业大学大学生创新创业训练计划项目 (S202410359047)。

字模型逐层构建零件^[5, 6]。在众多增材制造技术中, 电弧增材制造 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) 因其材料成本低和沉积效率高的优势而脱颖而出^[7]。如今, 电弧增材制造正作为一种颇具前景的制造工艺, 用于制造大尺寸、低复杂度的金属部件, 并且已经使用了一系列工程材料, 如钛、铜、铝和钢^[8-11]。

2 × × 高强度铝合金 (以下简称二系铝合金) 因其高比强度、出色的加工性能, 而成为航空航天、军事和汽车工业中的关键轻质结构材料^[12, 13]。使用电弧增材制造工艺生产二系铝合金具有以下显著优势: ①将多个制造工序简化为一道工序, 实现材料的整体成形, 从而降低生产成本和生产周期。②可以将多个零件设计为一个整体, 为创新提供更多空间, 进而提高设计灵活性。据报道, 与传统的减材制造工艺相比, 电弧增材制造系统使生产周期大幅缩短了64%^[14]。因此, 将WAAM工艺应用于制造高强度二系铝合金已成为一个热门的研究课题。

在过去10年中, 已经开展了许多聚焦于通过电弧增材制造制备的二系铝合金的研究, 并且这些研究热情还在持续高涨。研究人员认为二系铝合金是最适合应用于电弧增材制造的材料之一。已经开展了大量研究: ①优化电弧增材制造工艺以提高效率和质量。②开发新型焊丝以改善微观结构。③设计后处理工艺以提高力学性能并减少缺陷。尽管已有大量研究证明了通过电弧增材制造制备二系铝合金的潜力, 但只有少数论文总结了铝合金电弧增材制造的发展情况, 而对二系铝合金电弧增材制造当前发展的总结还不够, 这也是撰写本文的主要动机。这非常有必要, 因为它可以为后续发展提供新思路。

首先, 本文综述了通过电弧增材制造制备的二系铝合金的当前发展情况, 包括增材制造铝合金组织与性能、常见缺陷以及后处理工艺。然后, 还讨论了提高质量和减少缺陷的有效方法。最后, 概述了通过电弧增材制造制备二系铝合金的未来研究前景。

2 电弧增材制造Al-Cu合金的组织及其成分影响因素

电弧增材制造Al-Cu合金的力学性能和抗裂性能与其凝固微观组织和第二相结构密切相关^[15]。本

节重点综述了WAAM制备Al-Cu合金的凝固组织特征及其第二相结构的研究进展。

2.1 第二相粒子

在二系铝合金的WAAM研究中, 众多学者通过添加不同纳米颗粒取得了显著成果。FAN等^[16]在AA2024铝合金中引入40~60nm的TiC纳米颗粒, 研究发现当TiC含量 (质量分数, 下同) 达到3%时, 合金的平均晶粒面积显著减小至 $1.02\mu\text{m}^2$, 有效细化了晶粒组织, 可抑制热撕裂。JIN等^[17]通过在2219铝合金中添加300~500nm的TiC颗粒, 使合金的抗拉强度提升至384MPa, 同时保持了18.3%的优异伸长率。进一步研究发现, REN等^[18]在ER2319铝合金中采用双尺度 (微米-纳米) TiC颗粒增强策略, 使合金的强度和伸长率分别提升了51.0%和118%, 展现出显著的协同增强效果。在第二相强化方面, JIN等^[19]采用平均粒径为 $7.12\mu\text{m}$ 的 TiB_2 颗粒增强2319铝合金, 使合金的横向强度和伸长率分别达到339.07MPa和21.3%, 较未增强合金分别提高了45%和60%。SONG等^[20]的研究表明, 在ER2319铝合金中添加16~20 μm 的 B_4C 颗粒可显著提升沉积合金的综合性能, 其中显微硬度、水平抗拉强度、水平伸长率、垂直抗拉强度和垂直伸长率分别提高了12.53%、23.98%、37.27%、26.44%和42.95%, 显示出优异的各向同性强化效果。这些研究表明, 通过合理选择增强相的种类、尺寸和添加量, 可有效调控电弧增材制造Al-Cu合金的凝固组织和第二相结构, 从而显著提升其力学性能和抗裂性。不同第二相粒子对二系铝合金的性能影响见表1。

2.2 稀土

在电弧增材制造过程中, 合金元素的引入与调控是优化铝合金微观组织与力学性能的核心策略之一。研究表明, 通过合理设计合金元素成分并协同后续热处理工艺, 可显著提升沉积件的强度、塑性和耐蚀性等性能。而合金元素在电弧增材制造铝合金中的作用不仅体现于单一强化机制, 更需通过多元素协同与工艺优化实现组织-性能的均衡调控。例如, LI等^[21]在Al-Cu-Mn-Cd合金中引入Cd元素, 发现其通过抑制金属间化合物的粗化, 显著提高了材料的抗拉强度, 可达到 $>500\text{MPa}$, 同时合理添加0.3%~0.5%的Mn有效增强了耐热性与抗晶间腐蚀能力。类似地, ZHOU等^[22]在Al-Cu-Sc中添加0.1%

表1 不同第二相粒子对二系铝合金的性能影响

铝合金	第二相粒子	粒径	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	性能变化
AA2024	TiC	40~60nm	—		研究TiC纳米颗粒对AA2024铝合金热裂和晶粒细化的影响,抑制热裂 ^[16]
2219	TiC	300~500nm	水平: 384 垂直: 279		研究添加TiC颗粒对2219铝合金断裂强度和延展性协同增强的作用 ^[17]
2319	TiB ₂	7.12μm	339.07		研究添加微米级TiB ₂ 颗粒对Al-Cu合金微观结构和力学性能的影响 ^[18]
ER2319	MNDS-TiC	双尺寸微米/纳米	水平: 393.7 垂直: 391.4	水平: 23.5 垂直: 24.0	研究双尺寸TiC颗粒对电弧增材制造Al-Cu合金延展性-强度协同作用的贡献 ^[19]
ER2319	B ₄ C	16~20μm	水平: 285.84 垂直: 270.90	水平: 10.24 垂直: 6.29	研究B ₄ C粉末对WAAM2319Al合金性能的影响,细化晶粒,提高力学性能 ^[20]

~0.3%的Sc与Zr,发现Al₃(Sc,Zr)纳米析出相的形成不仅细化晶粒至5~20μm,还使其在300℃下强度保留率>80%,显著提升了高温稳定性,验证了微合金化元素在抑制晶粒粗化方面的独特优势。ZHOU等^[23]在Al-Zn-Mg-Cu合金中添加0.2%Sc和0.1%Zr可形成Al₃(Sc,Zr)复合析出相,这些纳米相不仅细化晶粒,使平均晶粒尺寸从50μm降至10μm,还通过钉扎位错和抑制再结晶提升强度。此外,LI等^[24]通过冷金属过渡电弧增材制造(CMT-WAAM)技术制备了Al-5.49Cu-0.4Mn-0.29Cd合金,研究了其微观组织演变和力学性能。研究发现,沉积态样品中存在明显的分层沉积结构,晶粒均为等轴晶,且在晶界处析出大量富铜共晶相。经过热处理后,大部分共晶相溶解,α-Al基体中均匀析出尺寸为100

~200nm的θ'相,显著提高了材料的力学性能,热处理后的试样抗拉强度和屈服强度分别达到483.7MPa和412.3MPa。DONG等^[25]利用含Cd和不含Cd的两种ER2319焊丝,基于冷金属过渡的电弧增材制造技术制备单壁墙结构,并进行T6热处理。研究发现,由于Cd具有较高的空位结合能,在时效阶段会形成大量Cd-空位团簇,这些团簇为θ'相提供了大量形核位置,降低了θ'相的形核能。同时,Cd-空位团簇的高扩散系数和θ'相的低界面能促使热处理态α(Al)中形成细密的θ'相。根据强化模型,在ER2319焊丝中添加Cd后,热处理态单壁墙增材方向的屈服强度提高了43MPa。不同稀土元素对二系铝合金的性能影响见表2。

表2 不同稀土元素对二系铝合金的性能影响

铝合金种类	所改变元素及含量	工艺	组织性能得到优化
Al-Cu-Mn-Cd	Cd: 0.1%~0.3%	冷金属过渡电弧增材制造	强度-塑性平衡,各向同性改善,降低气孔率和裂纹倾向 ^[21]
Al-Cu-Sc	Sc: 0.1%~0.5%	电弧增材制造 搅拌摩擦加工	塑性提升,晶粒细化,孔隙率降低,各向异性降低 ^[22]
Al-Zn-Mg-Cu	Sc: 0.1%~0.3% Zr: 0.1%~0.2%	电弧增材制造	热稳定性提升,强度硬度提升,晶粒细化 ^[23]
Al-Cu-Mn-Cd	Cd: 0.29%	冷金属过渡电弧增材制造	抑制裂纹倾向,强度提升,晶粒细化 ^[24]
Al-Cu-Cd	Cd	冷金属过渡电弧增材制造	塑性提升,晶粒细化 ^[25]

3 缺陷

WAAM过程中逐层沉积引发的剧烈热循环(峰值温度可达1000℃)、熔池动力学不稳定性和合金元素偏析,导致气孔、凝固裂纹、残余应力等缺陷频发。这些缺陷直接影响构件的力学性能(如疲劳寿命降低30%~50%)和服役可靠性,成为限制技术

工业化应用的关键瓶颈。

3.1 气孔

孔隙缺陷同样是制约WAAM技术发展的关键因素之一。HAUSER等^[26]指出,氢气孔的形成机理源于液态铝的氢溶解度(0.69mL/100g)显著高于固态(0.036mL/100g)。在熔池凝固过程中,氢

原子从过饱和液态中析出形成气泡，若未能逸出则残留为气孔。氢的主要来源包括焊丝表面吸附的水分 ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H} + \text{O}$) 及保护气体中的杂质 (如 CO_2 分解)。随着保护气体流量增加，熔池内气体夹杂物难以逸出，导致孔隙增多。不同的保护气也会影响气孔率。例如，纯氩气 (Ar) 保护下气孔率较高 (5.8%)，而氦氩混合气体 (He 占比 67%) 因热导率高、熔池流动性增强，气孔率可降至 0.8%^[27]。RYAN 等^[28]进一步分析了不同批次焊丝表面粗糙度对孔隙分布的影响，证实了表面质量对孔隙生成的重要作用。此外，ZHOU 等^[29]还观察到了 T6 热处理后氢气微孔的沉淀现象，这表明热处理条件同样会影响孔隙形态的变化。综合来看，控制合适的工艺参数以及优化原材料品质是减少孔隙的有效途径。

3.2 裂纹

二系铝合金在增材制造过程中易出现裂纹现象。QI 等^[30]通过试验研究了不同成分比下的裂纹敏感性，结果显示 Cu 含量在 4.2%~6.3% 之间的合金组合最不易产生裂纹。HU 等^[31]提出了一种混合焊接策略，即结合激光束振荡和脉冲磁场，能够在细等轴区形成波状且间断的结构，有效减少了裂纹的发生概率。此外，SOKOLUK 等^[32]研究表明，纳米颗粒的引入也可以改变相变行为，降低裂纹敏感度。这些研究成果为解决铝合金增材制造中的裂纹问题提供了新的思路和技术手段。

3.3 残余应力与变形

残余应力是金属增材制造中最主要的挑战之一。HÖNNIGE 等^[33]利用中子衍射测量发现，未经处理的二系铝合金构件内部存在沿高度方向的拉伸残余应力，这种应力会导致构件脱模后的弯曲变形。为了控制残余应力和变形，研究人员提出了两种不同的滚压技术：垂直滚压和侧向滚压。其中，侧向滚压效果更为显著，不仅可以消除变形，还能反转变形趋势。

3.4 微观结构不均匀

在 WAAM 二系铝合金中，微观结构不均匀性表现为晶粒形态与元素分布的显著层间差异，导致力学性能各向异性。在晶粒结构演化方面，底部区域由于基板快速散热，形成细等轴晶 (平均尺寸 < 50 μm)，晶粒取向随机分布；而上部区域由于热积累导致温度梯度 (G) 与凝固速度 (V) 比值降低，

形成粗柱状晶 (长度 > 200 μm)，取向沿沉积方向择优生长^[34]。在元素偏析方面，Cu 在枝晶间富集 (浓度可达基体的 1.5 倍)，形成 θ - Al_2Cu 相，导致局部脆化。为调控元素偏析，可添加 Sc (0.4%) 与 Cu 形成 Al_3Sc 弥散相，抑制 Cu 扩散，使偏析系数从 1.5 降至 1.1^[25]。综上所述，通过调控晶粒结构和元素分布，可以有效改善 WAAM 二系铝合金的微观结构均匀性，从而提升其力学性能。

在 WAAM 二系铝合金的后处理过程中，可能会引发气孔聚集和氧化与变形等缺陷。在气孔聚集方面，T6 热处理中的固溶处理 (500~535 $^{\circ}\text{C}$) 会导致气孔长大 (平均直径从 10 μm 增至 30 μm)，并沿层间界面聚集，从而使疲劳寿命降低 30%^[35]。为解决这一问题，可采用层间冷轧 (变形量 > 40%) 闭合气孔后再进行时效处理 (150~190 $^{\circ}\text{C}$)，使气孔密度减少 70%^[36]。在氧化与变形方面，退火过程中表面氧化层厚度可达 10 μm ， Al_2O_3 硬脆相会引发应力集中。为减少氧化，可采用真空炉 (氧含量 < 50×10^{-6}) 进行热处理，使氧化层厚度降至 2 μm 以下^[37]。综上所述，通过层间冷轧和真空保护等后处理技术，可以有效减少 WAAM 二系铝合金在后处理过程中引发的缺陷。

4 后处理

4.1 热处理

近年来，铝合金热处理工艺的优化及其对力学性能的影响机制研究不断深入。禹润缙等^[38]针对 ER2319 铝合金的 T6 热处理工艺进行了系统研究，采用正交试验法对固溶温度、时效时间等关键参数进行了多因素优化。试验结果表明，在不同固溶温度下保持 42 min 时，其金相组织如图 1 所示。

随后在 185 $^{\circ}\text{C}$ 下进行 23 h 的时效处理时，材料的抗拉强度从原始状态的 274.1 MPa 提升至 406.8 MPa，强化效果达到 48.3%。微观结构分析表明，当固溶温度超过 540 $^{\circ}\text{C}$ 的临界值时， α -Al 基体晶粒会发生明显粗化，同时晶界区域出现局部过烧缺陷，导致材料韧性显著下降。而在时效处理阶段， θ' 相和 θ'' 强化相的弥散析出被证实是强度提升的主要机制，这些纳米级析出相通过阻碍位错运动有效增强了材料的承载能力。深圳大学的姜志成^[39]对 CMT-WAAM 成形的 2219 铝合金进行了系统的热处理试

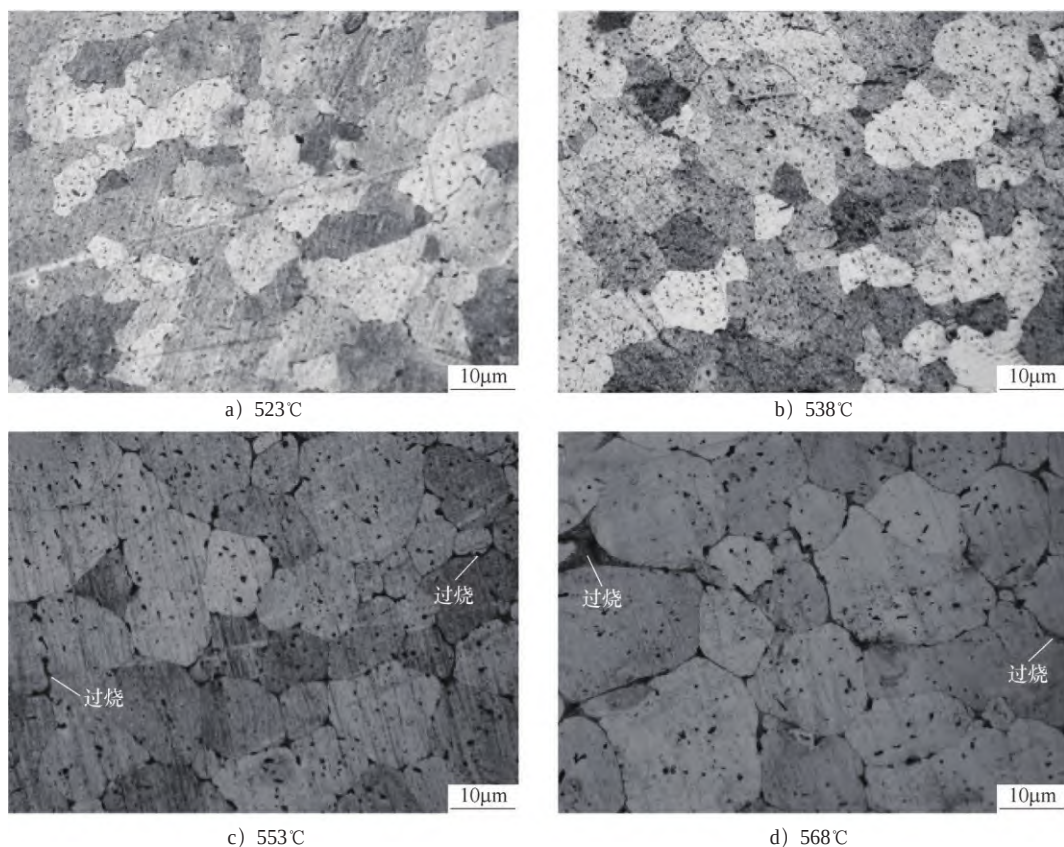


图1 不同固溶温度下堆积金属的金相组织

验,包括均匀化处理、固溶处理和人工时效处理。通过对比不同热处理工艺下的合金组织和力学性能,确定了最佳热处理制度,此时合金的综合力学性能达到最佳,全面优于传统铸造成形的2219铝合金。ZHOU等^[40]对电弧增材制造205A高强铝合金的热处理工艺进行了深入研究,重点探讨了T6热处理对微观组织和力学性能的影响。研究表明,T6热处理后,合金的抗拉强度显著提升,水平方向和垂直方向的抗拉强度分别达到510.2MPa和510.6MPa,屈服强度也分别提升至459.5MPa和463.6MPa。微观结构分析表明,T6热处理过程中,Cd元素的添加促进了Cu-Cd-空位团簇的形成,降低了 θ' 相析出的激活能,从而显著提高了析出相的密度和分布均匀性。此外,在热处理过程中 Al_3Ti 和 Al_3Zr 等异质形核颗粒的存在有效抑制了晶粒长大,使合金在热处理后仍保持细小的等轴晶组织。这些研究结果为电弧增材制造铝合金的热处理工艺优化提供了重要参考。DAI等^[41]对CMT-WAAM成形的Al-5.55Cu合金进行了系统的热处理研究,重点分析了T6热处理对微观组织和力学性能的影响。研究表明,经过

T6热处理后,合金的抗拉强度显著提升,水平方向和垂直方向的抗拉强度分别达到 (508.0 ± 18.9) MPa和 (503.8 ± 6.2) MPa,屈服强度也分别提升至 (444.1 ± 7.6) MPa和 (430.9 ± 22.6) MPa。微观结构分析表明,热处理后,原分布在晶界处的硬脆Al-Cu共晶相充分固溶,并以更小的尺寸弥散分布在晶粒内部,形成了大量的 θ' 相和 θ'' 相。这些纳米级析出相通过阻碍位错运动,显著提高了材料的强度。此外,研究还发现,热处理后Cu元素的分布更加均匀,进一步增强了材料的各向同性。然而,热处理后材料的伸长率有所下降,水平方向和垂直方向的伸长率分别为 $5.4\% \pm 1.9\%$ 和 $3.76\% \pm 0.4\%$,这可能是由于热处理过程中孔隙的扩大和二次孔隙的形成所致。

4.2 机械加工

基板振动技术作为调控铝合金熔池动态行为的关键手段,能够通过改变熔体流动模式显著优化凝固组织与缺陷分布。ZHANG等^[42]在冷金属过渡(CMT)电弧增材制造Al-6Mg合金时,施加了高频机械振动(频率15kHz、振幅5 μ m)。通过高速摄

影观测发现,熔池振荡幅度提升了63%,熔体对流速度加快了1.8倍。这种强化传质效应促使柱状晶向等轴晶转变的比例达到78%,平均晶粒尺寸从 $82\mu\text{m}$ 细化至 $63.5\mu\text{m}$ (降幅22.5%),同时气孔率从原始的2.3%显著降低至0.8%,有效抑制了层间未熔合缺陷的形成。针对大尺寸构件振动均匀性问题,河北科技大学的王松涛^[43]创新设计了一种低频振动耦合系统(频率80Hz、振幅 12° 、转速4800r/min),并在Al-Cu合金多道次焊接中实现了全域能量输入。振动引发的周期性剪切应力促使粗晶区 α -Al枝晶发生动态再结晶,平均晶粒尺寸从 $154\mu\text{m}$ 降至 $124.6\mu\text{m}$ (减少19.1%)。横向拉伸试样的断后伸长率从11.4%提升至15.8%(增幅38.2%),证实了振动参数可通过调控位错密度梯度(从 $4.2 \times 10^{14}\text{m}^{-2}$ 降至 $2.7 \times 10^{14}\text{m}^{-2}$),实现了强度-塑性的解耦优化。

4.3 复合工艺创新

哈尔滨工业大学的李炳尘^[44]针对TiC颗粒增强2219铝合金熔丝增材制造中因颗粒引入导致的成形困难与气孔率激增问题,提出了一种摆动激光-电弧复合增材(OLHAM)创新工艺。通过系统优化激光功率(1500W)、沉积电流(90A)、沉积速度(0.6m/min)及摆动参数(圆形模式、250Hz频率、1.5mm幅度),揭示了摆动激光通过提升熔池能量密度与流动性,使沉积体表面粗糙度降低46.0%,气孔率降至0.027%。微观表征表明,TiC颗粒显著促进异质形核{平均晶粒(14.4 ± 5.0) μm }},抑制晶界Cu偏析并诱导 θ'/θ'' 相析出,结合细晶强化、Orowan强化与沉淀强化的协同作用,使显微硬度达到(91.5 ± 3.3)HV,抗拉强度提升至305MPa。研究证实,OLHAM工艺可突破颗粒增强铝合金增材的“成形-性能”矛盾,为高强韧复合材料制造提供了工艺-组织协同调控的新路径。华中科技大学张开诚^[45]采用多场复合增材制造试验平台,对比了有无纵向磁场作用下的铝合金电弧增材制造过程。将普通熔积和纵向磁场辅助熔积的试块切开,并从试块中分别取样进行拉伸试验。结果表明,纵向磁场辅助电弧增材制造可获得更平整的焊道表面,减少气孔数量,提高铝合金试样的抗拉强度,平均抗拉强度提高了21%。WANG等^[46]通过试验和数值模拟相结合的方法,系统研究了双脉冲电弧增材制造技术在晶粒细化方面的潜力。研究发现,双脉冲电弧通

过熔池的膨胀和收缩行为,显著提高了冷却速度和凝固生长速度,从而实现了晶粒的细化。试验结果表明,在相同的热输入条件下,双脉冲电弧能够产生更细小的晶粒,并且通过调整脉冲参数可以有效调控晶粒尺寸。

4.4 热等静压强化

增材制造铝合金常采用热等静压(HIP)消除孔隙和未熔合缺陷,但热处理可能引发相变问题,需结合固溶时效处理优化性能。针对HIP后常规热处理是否引发闭合孔隙再扩展的争议,MCLEAN等^[47]研究发现,Al2319合金经HIP后热处理虽使 $35\mu\text{m}$ 微孔隙数量增加近3倍,但宏观孔隙保持闭合,整体孔隙率较原始态降低95%,验证了“HIP+热处理”在控制缺陷与调控组织协同优化的可行性,为工业应用提供了关键数据支撑。此外,ZHANG等^[48]研究发现,液态搅拌铸造法制备的 $\text{Mg}_2\text{Si-SiC/AlSi}_7\text{Cu}_2\text{Mg}$ 混杂铝基复合材料易产生孔隙缺陷,热等静压(HIP)处理通过高压致密化与组织优化协同作用可显著改善性能。研究表明,HIP促使Si片层球化、粗大初生 Mg_2Si 细化,并重构AlSiCuMg相分布,有效消除孔隙(尤其是SiC颗粒团聚间隙孔)。经不同压力参数HIP处理后,材料密度与抗拉强度均大幅提升,证实该工艺通过微观组织调控与缺陷消除的协同机制。

4.5 激光冲击强化

激光冲击强化(LSP)与电弧增材制造复合技术可显著提升2319铝合金性能。SUN等^[49]研究发现,LSP使WAAM构件晶粒尺寸由 $68.86\mu\text{m}$ 细化至 $34.32\mu\text{m}$,显微硬度提升48%($67.8\text{HV} \rightarrow 100.6\text{HV}$),并在0.65mm深度内形成90MPa残余压应力,通过动态再结晶优化组织与应力分布,为增材制造强韧化提供了创新工艺路径。XIAO等^[50]则采用不同能量参数的LSP对WAAM2319铝合金进行后处理研究,其微观金相组织如图2所示。

研究表明,LSP可改善WAAM制造组件的微观结构,消除近表面孔隙,硬化表层并诱导残余压应力层,且随激光能量增大,改善效果增强。经喷丸处理后,试件屈服强度提升60.73%,极限抗拉强度提高16.03%,喷丸试样在激光能量为5J和10J时孔疲劳寿命分别增加179.8%和261.7%,这进一步

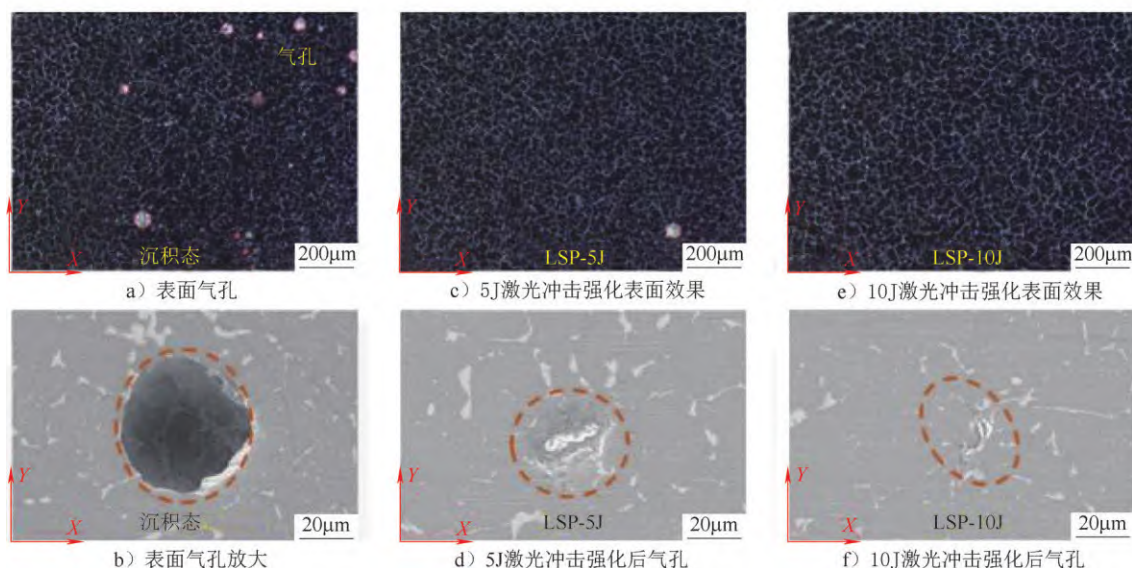


图2 WAAM 2319 合金的微观金相组织

印证了LSP与WAAM技术结合对工程行业的潜在益处。

4.6 复合场辅助

除了上述一些工艺参数的优化,同时,也有大量研究者对于CMT电弧增材制造技术复合场辅助手段进行研究。王敏等^[51]采用纵向直流磁场来辅助电弧增材制造铝合金,纵向直流磁场可以降低增材制造铝合金成形件的孔隙率,改变熔合线的形貌,细化铝合金内部的微观组织,横向和纵向极限抗拉强度相比于无磁场条件下提升了9.3%和14.4%。张骥俊^[52]等研究了超声振动对CMT电弧增材制造铝合金组织与性能的影响。研究发现,在超声波振动的作用下,晶粒细化。与未使用超声波振动辅助的试样相比,平均晶粒尺寸减小了22.5%,同时试样中气孔尺寸以及数量减少。研究同时指出,超声波振幅过大将破坏焊缝的结构完整性,导致晶粒粗大、焊缝内部出现孔洞。莫春立等^[53]研究了固溶处理对CMT电弧增材制造2319铝合金组织与性能的影响。研究确定了2319铝合金最佳的固溶处理条件:固溶温度为540℃,固溶时间为5h。在此条件下,经时效(175℃/6h)后2319合金的抗拉强度为499MPa,伸长率为17.52%,实现了强度和塑性良好匹配。此外,值得一提的是,张瑞等^[54]研究了氩氦混合气对铝合金CMT电弧增材制造过程成形质量的影响。当氦气比例增加到75%后,不仅可以有效消除0.2mm以上的宏观气孔,也可以消除显微气

孔。力学性能显示抗拉强度同样随氦气比例的增加先增大后减小,70%Ar+30%He时抗拉强度达到最大值252.5MPa。李洋等^[55]在GMAW电弧增材制造中发现,采用Al-Zn-Mg-Cu合金焊丝,加入SiC颗粒可以使构件微观组织分布均匀、晶粒平均尺寸显著下降,强度、硬度与韧性均有所提高。早期的钛合金电弧增材制造研究主要基于TIG或MIG焊接技术。除此之外,不同的后处理手段会影响铝合金电弧增材的组织与性能。如康士豪等^[56]通过一系列研究发现,热等静压(HIP)后处理能显著降低电弧增材制造AlCuMnZr合金的气孔率,并提升其力学性能,其中气孔率由1.29%降至0.45%,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别提升至(270±18)MPa、(150±8)MPa和(9±1)%。值得一提的是,XUE等^[57]通过电子束定向能量沉积修复工程结构中的铝合金部件。电子束定向能量沉积修复后,底层和HAZ的显微硬度和强度得到显著改善。

研究者们通过采用不同的辅助手段如纵向直流磁场、超声波振动、固溶处理及氩氦混合气等,显著改善了CMT电弧增材制造铝合金的组织与性能。这些方法能够细化晶粒、降低孔隙率、提高力学性能,且适当的后处理如T6热处理和热等静压也能进一步提升合金的性能。这些研究为优化电弧增材制造工艺提供了重要参考。

4.7 其他强化方法

WANG等^[58]则采用超声波冲击处理,使平均晶

粒尺寸由59.7 μm 减小至46.7 μm ,并产生了大量的位错和机械孪晶,显著提升了显微硬度值。而SUN等^[59]则证明了层间冷作硬化配合后续热处理可以在极大程度上改善材料强度。上述研究表明,适当的表面改性和热处理工艺可以有效增强WAAM产品的综合性能。

铝合金增材制造后处理技术通过多工艺协同实现性能优化。热处理调控强化相析出,显著提升力学性能;机械振动技术细化晶粒并抑制气孔产生,缓解力学各向异性;激光-电弧复合工艺结合熔池动态调控,实现颗粒增强材料低缺陷与高强韧协同;热等静压消除宏观孔隙,激光冲击强化形成残余压应力层并细化组织。研究表明,跨工艺协同在缺陷控制与组织调控中优势显著,但需进一步优化参数匹配与规模化应用路径,为工程化应用提供理论支撑。

5 结束语

综合目前研究进展而言,电弧增材制造铝合金技术在多方面具有优势,但研究者们大多从改进增材制造的工艺手段出发,研究侧重于电弧增材制造的技术、工艺以及工艺辅助手段,以提高铝合金焊接质量,且对于设计电弧增材制造专用铝丝材方面研究者们大都采用实芯焊丝进行研究。现有文献对于设计电弧增材制造专用药芯铝丝材方面存在空白,研究者们可以进一步探讨通过调整粉芯粒径和成分配比进行成分设计,如 TiB_2+Sc 复合粉芯,研究此类铝合金金属粉芯焊丝对铝合金件组织与性能的影响。

参考文献:

[1] Long W M. Design guidelines for composition of brazing filler metals and evolution mechanisms of typical microstructures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2025, 54 (4) : 837-853.

[2] 龙伟民, 秦建, 吕贤明, 等. 基于智能制造的焊接材料新特征[J]. 材料导报, 2023, 37 (11) : 128-134.

[3] SRIVASTAVA M, RATHEE S, PATEL V, et al. A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 2612-2641.

[4] 龙伟民, 孙徕博, 黄陆军, 等. 超声冲击对增材制造组织改善及强化机理影响的研究进展[J]. 金属学报, 2024, 60 (3) : 273-286.

[5] CHEN C, HE H, ZHOU J, et al. A profile transformation based recursive multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84: 886-901.

[6] WANG Y Q, WANG Y C Z, CHEN K H, et al. A systematic literature review for alternative 3D printing techniques from a perspective of the minimum accumulation geometric elements[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025: 1-27.

[7] CARVALHO G H, CAMPATELLI G. Control of interpass temperature and arc oscillation for improved mechanical properties and geometrical uniformity in $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy deposition using wire arc additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025: 1-17.

[8] LIU D, LI C, WEI P, et al. Effect of laser power on microstructure and mechanical properties of W/Ni/Cu laser welded joints[J]. Welding in the World, 2025, 69 (3) : 1-15.

[9] RODRIGUES T A, BAIRRÃO N, FARIAS F W C, et al. Steel-copper functionally graded material produced by twin-wire and arc additive manufacturing (T-WAAM)[J]. Materials & Design, 2022, 213: 110270.

[10] 林清成, 郭纯, 李文清, 等. 铝合金电弧增材制造研究现状[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (9) : 20-26.

[11] RODRIGUES T A, DUARTE V R, TOMÁS D, et al. In-situ strengthening of a high strength low alloy steel during wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Additive manufacturing, 2020, 34: 101200.

[12] FAN S, GUO X, LI Z, et al. A review of high-strength aluminum-copper alloys fabricated by wire arc additive manufacturing: microstructure, properties, defects, and post-processing[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32

- (19) : 8517-8540.
- [13] 苏珩, 邵斌, 刘佳斌, 等. 电弧增材制造2219铝合金热变形组织演变及本构方程[J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (8) : 107-116.
- [14] 邓威, 武永, 吴汝波, 等. 脉冲电流强度对TIG增材制造2219铝合金显微组织与拉伸性能的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47 (9) : 6-13.
- [15] WANG Z, LIN X, WANG L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of the wire+ arc additive manufacturing Al-Cu alloy[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47: 102298.
- [16] FAN Z, LI C, YANG H, 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.
- [17] JIN P, LIU Y, LI F, et al. Realization of synergistic enhancement for fracture strength and ductility by adding TiC particles in wire and arc additive manufacturing 2219 aluminium alloy[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 219: 108921.
- [18] REN H, LIU Y, KONG H, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Cu alloy during wire and arc additive manufacturing by adding micron TiB₂ particles[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2024, 19 (1) : e2351170.
- [19] JIN P, ZHOU J, ZHOU J, et al. Contribution made by double-sized TiC particles addition to the ductility-strength synergy in wire and arc additively manufactured Al-Cu alloys[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 268: 111078.
- [20] SONG X, NIU J, HUANG J, et al. The effect of B₄C powder on properties of the WAAM 2319 Al alloy[J]. Materials, 2023, 16 (1) : 436.
- [21] LI K, YANG T, HOU X, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-Cu-Mn-Cd alloy fabricated by CMT-wire arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 898: 146395.
- [22] ZHOU G, HUANG T, SU L, et al. The microstructure and mechanical properties of deposited AlCuSc alloy wall structures fabricated by WAAM with FSP assistance[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 209: 112954.
- [23] ZHOU Y, QI Z, CONG B, et al. Influence of in-situ precipitation on corrosion behaviors of wire arc directed energy deposited Al-Mg (-Sc-Zr)[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 128 (5) : 123-135.
- [24] LI K, YANG T, HOU X, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-Cu-Mn-Cd alloy fabricated by CMT-wire arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 898: 146395.
- [25] DONG M, YUE Z, QUAN L I, et al. Effects of Cd addition in welding wires on microstructure and mechanical property of wire and arc additively manufactured Al-Cu alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32 (3) : 750-764.
- [26] HAUSER T, REISCH R T, BREESE P P, et al. Porosity in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys[J]. Additive manufacturing, 2021, 41: 101993.
- [27] KANG B Y, PRASAD Y K D V, KANG M J, et al. Characteristics of alternate supply of shielding gases in aluminum GMA welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (10) : 4716-4721.
- [28] RYAN E M, SABIN T J, WATTS J F, et al. The influence of build parameters and wire batch on porosity of Wire and Arc Additive Manufactured aluminium alloy 2319[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 577-584.
- [29] ZHOU Y, LIN X, KANG N, et al. Mechanical properties and precipitation behavior of the heat-treated wire+ arc additively manufactured 2219 aluminum alloy[J]. Materials Characterization, 2021, 171: 110735.
- [30] QI Z, CONG B, QI B, et al. Microstructure and mechanical properties of double-wire+ arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255:

- 347-353.
- [31] HU Y, WU S, GUO Y, et al. Inhibiting weld cracking in high-strength aluminium alloys[J]. Nature Communications, 2022, 13 (1) : 5816.
- [32] SOKOLUK M, CAO C, PAN S, et al. Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075[J]. Nature Communications, 2019, 10 (1) : 98.
- [33] HÖNNIGE J R, COLEGROVE P A, GANGULY S, et al. Control of residual stress and distortion in aluminium wire+ arc additive manufacture with rolling[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 775-783.
- [34] GENG R, DU J, WEI Z, et al. Multiscale modelling of microstructure, micro-segregation, and local mechanical properties of Al-Cu alloys in wire and arc additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101735.
- [35] WANG Z, GAO Y, HUANG J, et al. Precipitation phenomena and strengthening mechanism of Al-Cu alloys deposited by in-situ rolled wire-arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 855: 143770.
- [36] FANG X, ZHANG L, CHEN G, et al. Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 800: 140168.
- [37] BRICE C, SHENOY R, KRAL M, et al. Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 648: 9-14.
- [38] 禹润镇, 赵峰, 余圣甫, 等. 电弧熔丝增材制造 ER2319 铝堆积金属的组织性能及 T6 热处理工艺优化[J]. 金属热处理, 2021, 46 (4) : 49-59.
- [39] 姜志成. 热处理对冷金属过渡电弧熔丝增材制造 2219 铝合金组织与性能的影响[D]. 深圳: 深圳大学, 2023.
- [40] ZHOU S, WU K, YANG G, et al. Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 205A high strength aluminum alloy: The comparison of as-deposited and T6 heat-treated samples[J]. Materials Characterization, 2022, 189: 111990.
- [41] DAI H, LIU F, XIA Y, et al. Wire arc additive manufacturing of the Al-5.55Cu alloy: Insight the effect of intrinsic heat treatment on microstructure and mechanical properties[J]. Materials Characterization, 2024, 211: 113859.
- [42] ZHANG C, GAO M, ZENG X. Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 85-92.
- [43] 王松涛. 铝合金振动辅助电弧增材制造工艺研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023.
- [44] 李炳尘. TiC 颗粒增强 2219 铝合金摆动激光-电弧复合增材制造工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [45] 张开诚. 磁场辅助铝合金电弧增材制造数值模拟与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [46] WANG L, ZHANG Z, XU D, et al. Numerical simulation and mechanism study of grain refinement during double pulsed wire arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40 (4) : 137-140.
- [47] MCLEAN N, BERMINGHAM M J, COLEGROVE P, et al. Effect of hot isostatic pressing and heat treatments on porosity of wire arc additive manufactured Al 2319[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 310: 117769.
- [48] ZHANG W D, WANG Z H, XU H. Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and properties of magnesium silicide-silicon carbide/aluminum alloy (AlSi₇Cu₂Mg) composites[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5 (3) : 2611-2619.
- [49] SUN R J, ZHANG Y, LI L H, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and residual stress of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (1) : 011413.
- [50] XIAO J, GUO W, ZHANG H, et al.
- (下转第41页)

2) 搅拌针螺纹旋向改为左旋, 易在焊核区底部获得较小的焊接孔洞缺陷, 且更换主轴旋转方向会使位于底部的孔洞缺陷变大。

3) 模型预测表明, 右旋螺纹搅拌针塑性应变区无焊接缺陷生成, 而左旋螺纹搅拌针在不同的焊接参数下不能获得无缺陷的焊接接头。

参考文献:

- [1] 翟明, 宋宏图, 石磊, 等. 搅拌摩擦焊在轨道交通领域的应用现状与发展前景[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (1): 1-7.
- [2] 侯振国, 钮旭晶, 李充, 等. 搅拌摩擦焊技术在高速列车制造中的应用[J]. 电焊机, 2018, 48 (3): 32-36.
- [3] XIE G, THOMPSON D J, JONES C J C. A modelling approach for the vibroacoustic behaviour of aluminium extrusions used in railway vehicles[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293 (3-5): 921-932.

- [4] 柯黎明, 潘际奎, 邢丽, 等. 搅拌摩擦焊焊缝金属塑性流动的抽吸-挤压理论[J]. 机械工程学报, 2009, 45 (4): 89-94.
- [5] 朱智, 王敏, 张会杰, 等. 基于CEL方法搅拌摩擦焊材料流动及缺陷的模拟[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28 (2): 294-299.
- [6] CHOUDHARY A K, JAIN R. Numerical prediction of various defects and their formation mechanism during friction stir welding using coupled Eulerian-Lagrangian technique[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2023, 30 (12): 2371-2384.
- [7] 武晓燕, 罗巍, 王怡嵩, 等. 基于CEL模型的搅拌摩擦焊7055铝合金仿真模拟[J]. 焊接学报, 2021, 42 (7): 44-50, 59, 100-101.

(收稿日期: 20250219)

(上接第23页)

Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured 2319 aluminum alloy treated by laser shock peening[J]. Materials Characterization, 2024, 217: 114354.

- [51] 王敏, 邢彦锋, 曹菊勇, 等. 磁场约束对CMT增材制造铝合金微观组织及力学性能的影响[J]. 轻工机械, 2022, 40 (6): 27-32.
- [52] 张骥俊, 邢彦锋, 曹菊勇. 超声振动对CMT电弧增材制造铝合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47 (4): 159-164.
- [53] 莫春立, 刘春宇, 赵磊, 等. 固溶处理对CMT电弧增材制造2319铝合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (16): 153-156.
- [54] 张瑞, 王克鸿. 氩氮混合气对铝合金CMT电弧增材制造过程成形质量的影响[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47 (1): 36-39.
- [55] 李洋, 袁涛, 张元彬, 等. 孕育剂SiC对Al-Zn-Mg-Cu合金GMAW电弧增材制造构件微观组织及力学性能的影响[J]. 焊接技术, 2022, 51 (4): 6-12.
- [56] 康士豪, 孟杰, 杨代婷, 等. 基于三维CT图像的

电弧增材制造高强AlCuMnZr合金的气孔缺陷及其控制研究[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (10): 82-88.

- [57] XUE S, DU D, TANG Y, et al. Studies on the microstructure and mechanical properties of AlCu₄MgSi aluminum alloy repaired via electron beam directed energy deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1004: 175971.
- [58] WANG C, LI Y, TIAN W, et al. 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.
- [59] SUN R, LI L, ZHU Y, et al. Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 255-265.

(收稿日期: 20250407)