

引用格式:李阳,赵泳林,张聪慧,等.熔池温度场对铝合金电弧增材修复性能影响研究进展[J].热加工工艺,2026,55(7):86-95.LI Yang, ZHAO Yonglin, ZHANG Conghui, et al. Research Progress on Influence of Molten Pool Temperature Field on Performance of Aluminum Alloy Arc Additive Repair[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(7):86-95.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.25090023

熔池温度场对铝合金电弧增材修复性能影响研究进展

李阳¹, 赵泳林^{2,3}, 张聪慧², 李函⁴, 杨军¹, 韩冰源^{3,4}

(1. 江苏理工学院 汽车与交通工程学院, 江苏 常州 213001; 2. 湖北汽车工业学院 设计学院, 湖北 十堰 442002; 3. 汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室, 湖北 十堰 442002; 4. 湖北汽车工业学院 汽车工程学院, 湖北 十堰 442002)

摘要:电弧增材修复技术作为一种基于电弧熔丝沉积的金属部件修复方法,凭借高材料利用率、高沉积效率及适用于大型构件修复等优点,应用于大型金属构件的快速成形与修复领域。其中,熔池温度场分布对铝合金部件修复质量具有重要影响。熔池温度场分布受热输入、流体动力学及材料热物性等多因素耦合影响,通过协调热输入与冷却速率的动态平衡,结合熔池多物理场耦合作用调控流动行为,并基于材料热物性差异可实施动态调节。焊接性能方面,熔池温度场分布主要从沉积层组织结构、缺陷形成以及力学性能三个方面影响铝合金修复质量稳定性,通过凝固动力学调控微观组织演变,避免局部温度异常诱发未熔合、气孔等缺陷,从而确保铝合金修复区域性能均匀性及界面结合质量。实时红外热成像技术通过发射率校正和分辨率优化,有效解决了熔池温度测量偏差的问题,实现了高精度的温度场监测。未来,电弧增材修复相关研究应重点关注预热焊丝等改进型工艺对熔池温度场分布的调控机理,深化红外热成像检测技术在实时温度监测中的应用,结合智能化监测与闭环控制技术,以满足先进制造领域对焊接质量稳定性和工艺可靠性的工程需求。

关键词:电弧增材修复;熔池;温度场;铝合金;红外热成像

中图分类号: TG402

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)07-0086-10

Research Progress on Influence of Molten Pool Temperature Field on Performance of Aluminum Alloy Arc Additive Repair

LI Yang¹, ZHAO Yonglin^{2,3}, ZHANG Conghui², LI Han⁴, YANG Jun¹, HAN Bingyuan^{3,4}

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. School of Design, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China; 3. Hubei Provincial Key Laboratory of Automotive Power Transmission and Electronic Control, Shiyan 442002, China; 4. College of Automotive Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: Arc additive repair technology, a method for restoring metal components through arc wire deposition, is extensively utilized in the rapid forming and repair of large-scale metal components due to its high material utilization rate, high deposition efficiency, and adaptability for large component restoration. The temperature field distribution within the molten pool plays a critical role in determining the repair quality of aluminum alloy components. This distribution is governed by the complex interplay of heat input, fluid dynamics, and material thermophysical properties. By achieving a dynamic equilibrium between heat input and cooling rate, and by modulating flow behavior through multi-physics coupling within the molten pool, precise adjustments can be made based on variations in material thermophysical properties. Regarding weldability, the molten pool temperature field distribution influences the stability of aluminum alloy repair quality through three primary aspects: the microstructure of the deposited layer, defect formation, and mechanical properties. Controlling

solidification dynamics to guide microstructural evolution can mitigate defects such as incomplete fusion and porosity induced by localized temperature anomalies, thereby enhancing the uniformity of performance and interfacial bonding quality in the repaired aluminum alloy region. Real-time infrared thermal imaging, enhanced by emissivity calibration and resolution optimization, effectively addresses measurement inaccuracies in molten pool temperature,

收稿日期: 2025-09-10 修回日期: 2025-10-15

基金项目: 国家级重点实验室再制造技术基金资助项目(61420052023 WD006)

作者简介: 李阳,男,硕士研究生,主要研究方向为报废汽车绿色拆解与零部件再制造; E-mail: liyang20250908@163.com

通讯作者: 韩冰源,女,博士,教授,主要研究方向为表面工程和再制造工程; E-mail: hanbingyuan@huat.edu.cn

enabling high-precision monitoring of the temperature field. Future research on arc additive repair should prioritize elucidating the control mechanisms of advanced processes, such as wire preheating, on molten pool temperature field distribution, while further refining the application of infrared thermal imaging for real-time temperature monitoring. Integration of intelligent monitoring and closed-loop control technologies is essential to meet the stringent engineering requirements for weld quality stability and process reliability in advanced manufacturing.

Key words: arc additive repair; molten pool; temperature field; aluminum alloy; infrared thermography

电弧增材修复技术采用电弧作为热源,通过熔化丝材,使用机器人或者其他执行机构按照设定路径逐层沉积成形,对受损零部件进行修复。与激光、等离子等增材修复技术相比,具有沉积效率高、制造成本低等特点,适用于尺寸较大、复杂程度较低金属零部件的快速修复^[1-4]。铝合金因其轻质高强、耐腐蚀等优点,广泛应用于航空航天、汽车及装备制造等领域。在服役过程中,铝合金构件易产生疲劳裂纹、磨损失效等缺陷。电弧增材修复技术作为一种兼具高成形效率和高材料利用率的再制造手段,已成为实现修复高性能铝合金构件的重要途径之一^[5]。然而,电弧增材修复的铝合金构件也存在高气孔率、粗大晶粒组织、较高的温度梯度以及热循环作用导致的晶粒粗化等问题,显著降低力学性能并限制其应用^[6]。研究表明,熔池温度场特性对铝合金的晶粒尺寸、组织性能以及成形件内部的残余应力、沉积层形貌和基板塑性变形具有显著影响。因此,分析与精确控制熔池温度场是优化电弧增材修复工艺、提升部件性能的重要途径之一^[7]。

目前,研究者主要通过实验监测与数值模拟预测两种方式研究熔池温度场演化规律。实验监测方法包括热电偶测温、红外热成像和光纤测温技术等^[8-12],能够实时捕捉熔池表面温度分布与动态演化。近年来,随着红外热成像系统分辨率和数据处理能力的提升,其已成为研究温度分布非均匀性和界面动态行为的重要工具。数值模拟预测则通过建立多物理场模型,对熔池内部传热传质行为进行理论分析。然而,模拟结果的准确性高度依赖于边界条件与本构模型的合理性,只可为实验观测提供辅助验证与机理解释^[13-14]。因此,本文重点关注以红外热成像视觉检测技术为主的实验监测方法。

近年来,相关研究进一步利用热输入可控的优势改善熔合特性、提升润湿铺展能力,从而优化沉积层成形质量^[15]。尽管已有研究取得一定进展,但现有研究多聚焦于不同工艺方式或特定合金体系(如7系铝合金),针对熔池温度场分布规律及其对铝合金

电弧增材修复后组织与性能影响的系统分析仍显不足。针对上述问题,本文综述了近年来熔池温度场影响因素与过程红外监测技术的研究进展,总结了基于TIG焊热源的电弧增材修复熔池温度场分布对铝合金修复质量的影响机理,包括温度场分布对沉积层微观组织结构演变和力学性能的影响作用。展望了电弧增材修复技术未来在温度场智能控制与修复质量一致性提升方面的应用前景。

1 熔池温度场分布的影响因素

1.1 热输入参数对温度场分布的影响

实现电弧增材修复熔池温度场的精确调控,首先必须明晰其影响因素及主次关系。本节旨在鉴别主导因素,以确立对温度场形成起决定性作用的主导变量。近几年相关研究表明,熔池温度场分布的影响因素主要包括:热输入参数、熔池流体动力学、材料的热物性参数以及热丝TIG工艺等。

图1为电弧增材修复成形原理示意图。熔池是因为弧焊热而在焊件表面熔化形成的具有特定几何形貌的液态金属部分^[16]。TIG电弧熔丝增材修复过程中热量的输入使焊料和焊件产生局部熔化从而形成熔池^[17]。在熔池中,通常会存在对流、传导和辐射3种主要的传热方式,当温度降低时,熔池里的熔融液态金属经凝固相变形成沉积层。熔池的稳定性与形态直接影响沉积层的尺寸精度和内部质量,而不同电弧工艺对熔池行为有决定性影响。表1为不同电弧熔丝增材修复工艺的对比总结。分别展示各工

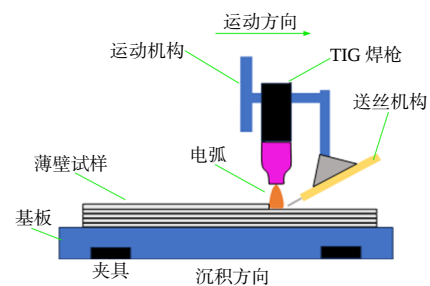


图1 电弧增材修复成形原理示意图^[16]
Fig.1 Schematic diagram of arc additive repair forming principle^[16]

表 1 不同电弧熔丝增材修复工艺
Tab.1 Different arc fuse additive repair processes

工艺类型	技术特征	应用场景	参考文献
冷金属过渡 (CMT)	低热输入;减少飞溅;焊缝均匀,变形小;焊接速度快;适合单层多道成形	适用于薄板焊接、油气管道、异种金属材料连接等	[18]、[19]、[20]
熔化电极气体保护焊 (MIG/MAG)	焊接效率高;焊接质量好;应用范围广;易于自动化	应用范围广,可用于铝合金、不锈钢等中厚板材	[21]、[22]
脉冲冷金属过渡 (CMT+P)	热输入较高,孔隙缺陷少;熔化效率高;飞溅较少;熔深和熔宽大,连接效果好	应用范围广	[23]
气体保护电弧焊 (TIG)	飞溅少,焊缝成形美观;交流 TIG 焊接具有去除焊件表面氧化膜的作用,适用于焊接化学活性有色金属;具有“冷-热丝”、双丝等工艺特点	应用于航空航天及其他对材料性能和冶金质量有极高要求的专门领域	[24]、[25]
激光-电弧混合增材修复	尽管激光具有高精度和电弧具备高效率,然而在多热源协同控制、熔池稳定性以及材料本构关系方面仍存在技术瓶颈	对性能、效率和精度有极高要求的高端领域	[26]、[27]

艺在成形精度、组织控制和缺陷抑制方面的显著优势。

热输入是指在焊接或增材过程中,由热源传递给工件或者沉积金属的单位长度上的能量。关键参数包括电弧电压 U 、焊接电流 I 及扫描速度 v ,通过调控热输入,可改变熔池形貌与热循环过程,进而有效优化沉积层的成形特性^[28-29]。

焊接电流主要决定单道熔深,电弧电压则显著作用于熔宽,而扫描速度可协调电流与电压对成形

尺寸的耦合作用机制^[30]。研究表明:扫描速度对熔池热力学行为呈现梯度影响特征,其对熔池中心温度场的调控效应显著高于熔池边缘区域^[31]。数值模拟研究进一步揭示,扫描速度对熔池温度场低温区的热循环曲线与等温线分布的影响程度较高温区显著提升^[32-33]。提高扫描速度将导致热影响区的熔深及熔宽相应减小,如图 2 所示,随着扫描速度增加,熔池温度场峰值、温度梯度以及熔池宽度、体积随之减小^[34]。

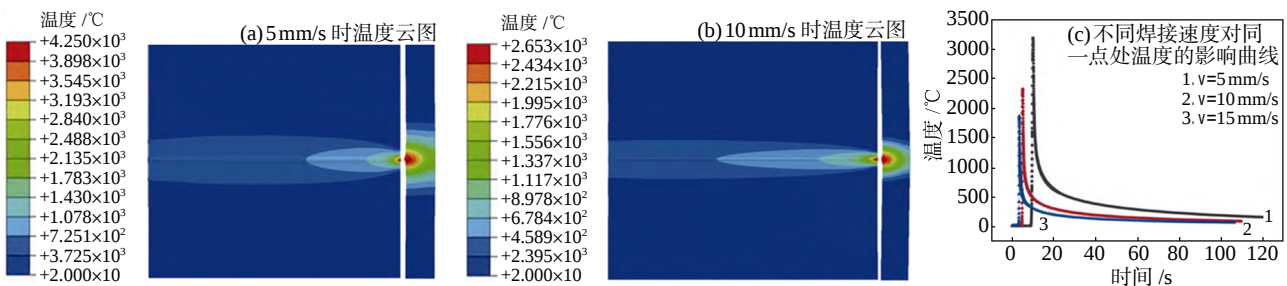


图 2 扫描速度对熔池温度场的影响^[34]
Fig.2 Effect of scanning speed on the temperature field of the molten pool^[34]

另外,焊接电流与电弧电压是决定热输入强度的主要参数,显著影响熔池热力学行为及沉积层综合性能,通过改变熔池温度场与流体动力学特征,主导沉积层成形演变及微观组织重构。Farzadi 等^[35]通过数值模拟与实验验证发现,增加焊接电流 I 和电弧电压 U 会导致熔池中的平均温度和峰值温度显著升高。图 3 为不同焊接电流的模拟结果和实验结果,由图可知,随着热输入量的增加,沉积层宽度与界面层厚度呈正向增长,而余高则呈现负相关。

热输入还影响电弧增材修复的工艺稳定性。Gao 等^[36]研究表明,电弧稳定性与电信号的特征波动及熔滴过渡行为密切相关,稳定的周期性信号是形成均匀熔覆层的关键。马品奎等^[37]研究表明:电弧、电流与沉积速度有一定的匹配性进而影响热输

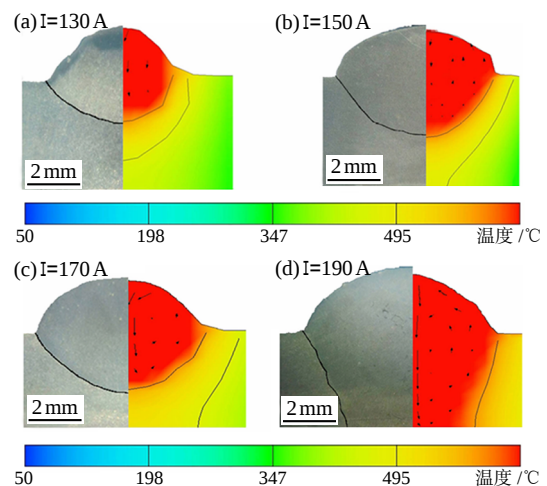


图 3 不同焊接电流的模拟结果和实验结果^[35]
Fig.3 Comparison of simulated and experimental results under varying welding currents^[35]

入,热输入过大或过小都会影响成形质量。Guo 等^[38]系统性地探讨了热输入对铝合金 TIG 焊接质量的影响,采用了理论分析与实验验证相结合的方法,表明热输入和接头性能之间明显的非单调关系:当在最佳热输入范围时,热输入的逐渐增加可使熔合特性和力学性能得到相应改善。相反,超过最佳热输入范围会导致关键机械性能退化。综上所述,焊接电流、电弧电压和扫描速度通过改变熔池温度场分布与流体动力学特征,进而影响沉积层的几何成形与组织性能。合理调控热输入是实现修复过程稳定性和修复质量一致性的关键步骤。

1.2 熔池流体动力学状态对温度场分布的影响

熔池表面及内部区域的热传输与流体运动主要受到表面张力梯度力、电磁力以及浮力等多物理场力的综合作用^[39]。熔池流动失稳现象(如湍流扰动、涡旋生成等)易诱发焊缝宏观形貌畸变,并显著增加热裂纹和气孔等缺陷的萌生概率。上述作用力通过协同效应调控熔池内部的热-流耦合行为,进而影响其温度场分布特征。图 4 为 TIG 电弧增材修复熔池传热过程的多物理场耦合作用机理示意图^[40]。

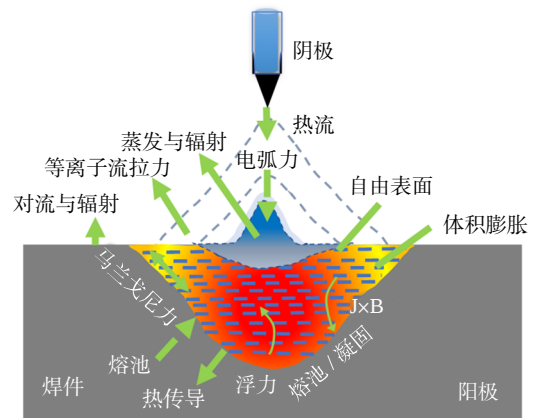


图 4 熔池传热的物理作用机制图^[40]

Fig.4 Diagram of the physical mechanisms of heat transfer in the molten pool^[40]

其中,表面张力梯度力是熔池表面热量传输的主导驱动力,主导了熔池表面的流动模式和焊缝的宏观形貌。当熔池表面存在温度梯度时,液态金属由高表面张力区域向低表面张力区域流动,从而将中心热量向外缘传递,显著降低熔池峰值温度并削弱温度梯度,如图 5 所示。这一机制对熔池温度场的均匀化及热稳定性具有关键调控作用^[41]。

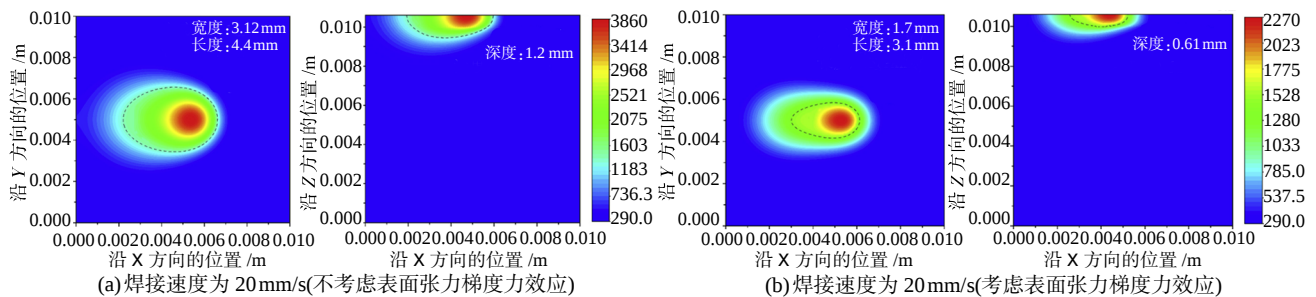


图 5 熔池的热分布轮廓和尺寸图^[41]

Fig.5 Thermal distribution profile and size diagram of the molten pool^[41]

电磁力是影响电弧增材修复过程中熔滴-熔池耦合行为的关键驱动力,在熔滴颈缩、脱落、撞击及熔池流动中起主导作用^[42]。李静等^[43]研究表明熔滴过渡过程中,电磁力是导致熔滴缩窄的主要因素,在熔滴撞击前,熔池中心的金属受向上的电磁力,在电弧中心两侧形成涡流。云泽等^[44]通过数值模拟与试验相结合的方法研究电弧增材修复,图 6 展示了沉积层在 TIG 焊过程中电弧激发及熔池演化行为的试验过程,在重力与电弧力等共同作用下,熔滴过渡至基板表面并迅速与其熔合形成高温熔池。

重力场影响在特定修复位置条件下显著增强。Chen 等^[45]通过研究重力场对熔池温度分布的影响规律,发现立焊条件下重力作用促使熔融金属产生

定向流动集聚效应,如图 7 所示,该流动模式有助于维持锁孔结构的动态稳定性,横向静磁场诱导的洛伦兹力能够抑制熔池表面流速。Liu 等^[46]研究表明:重力通过改变熔池尺寸与涡流模式调控焊缝性能。平焊位置时熔融金属在小孔出口侧堆积形成粗晶区,立焊位置则因定向流动获得细晶强化。

外加磁场可通过洛伦兹力调控熔池流动特征。杨未柱等^[47]通过施加纵向磁场,利用其产生的洛伦兹力驱动熔池环向流动,有效抑制了电弧增材修复边缘焊道的熔池外溢与流淌现象,可使焊道成形得到显著改善。郑忆称等^[48]数值模拟研究进一步揭示了电弧增材修复过程中熔池的热-流耦合机制,阐明了由电弧力与马兰戈尼效应驱动的环境流及其与热状态

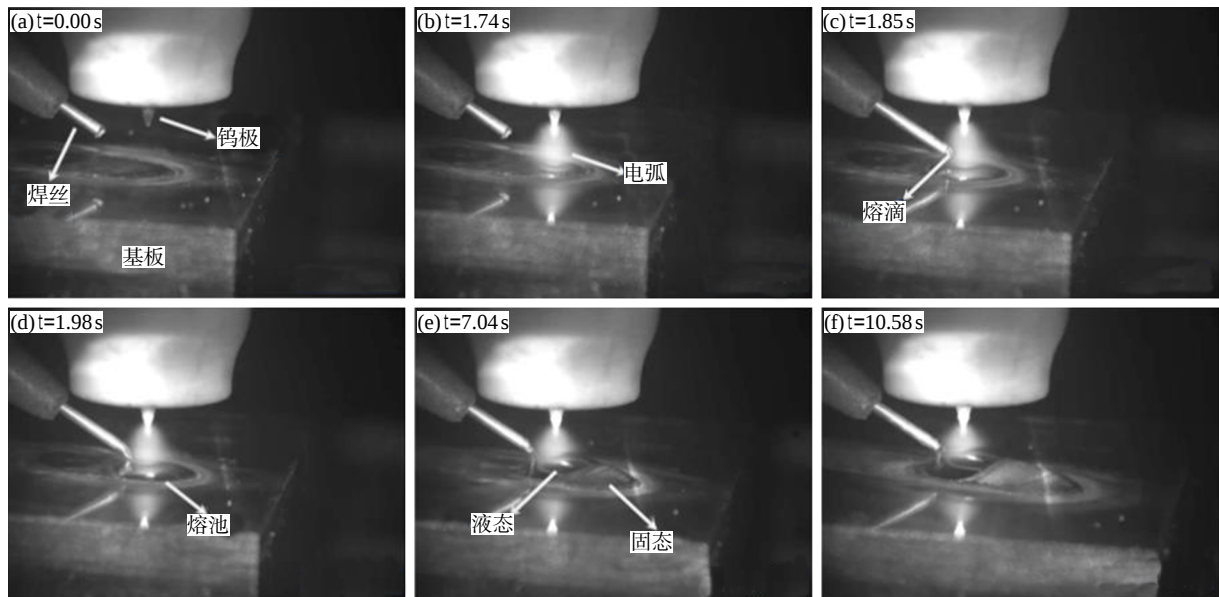


图6 不同时刻的焊道沉积过程以及熔滴过渡行为^[44]
Fig.6 Bead deposition process and droplet transfer behavior at different times^[44]

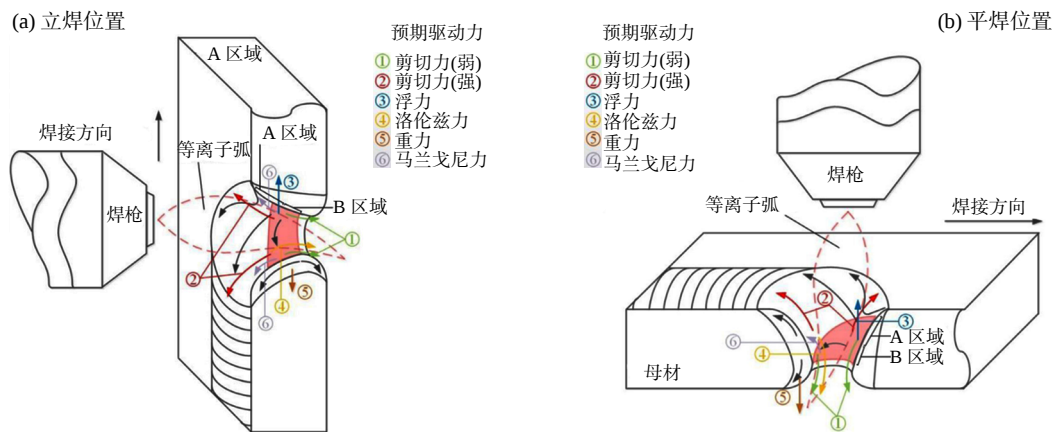


图7 绕流模式简化图示及关键流动区域示意图^[45]

Fig.7 Simplified illustrations of winding patterns, and schematic diagrams of key flow regions^[45]

的相互作用是控制熔池成形尺寸与稳定性的关键。

1.3 材料的热物性参数对熔池温度场分布的影响

常见热物性参数,如比热容、热导率和密度等基础物理量,为修复方法的选择及工艺参数匹配提供关键理论依据。研究表明,热物理性质的变化并未显著影响元素的分布、析出相的类型和位错密度,但通过影响熔合状况与沉积层的晶粒形貌对拉伸强度产生显著影响^[49]。

材料热物理参数对熔池热力学行为的调控机制已通过多尺度数值模型与实验方法获得系统解析^[50]。研究表明,密度、热导率及比热容对构成熔池几何形貌具有重要影响:高热导率材料因强化热扩散效应显著降低熔池体积,而低比热容体系因热惯性作用引发熔池尺度扩展^[51]。Junaid 等^[52]的研究进一步定量

揭示了不同热物性假设对数值精度的影响。图8为不同情况下的熔池轮廓图,数值模拟研究证实,恒定热物性假设将引发系统性误差:固定比热容假设会低估温度场峰值强度,恒定热导率设定则限制热流扩散路径,最终导致熔池形貌预测偏差显著增大。具体表现为:恒定热导率或比热容参数均会引起熔池深度及宽度的计算值增大,而密度恒定假设对瞬态温度分布特征未产生显著影响。Qin 等^[53]的数值模拟结果显示:热导率差异导致熔池温度场呈现显著空间非对称特征,该现象与实验观测结果具有良好的一致性。

1.4 热丝 TIG 工艺对熔池温度场分布的影响

热丝 TIG 工艺是一种通过预热焊丝加快熔化速度的工艺方法。预热焊丝工艺在保留电弧稳定性高、熔覆道成形均匀等优势的同时,有助于抑制气孔

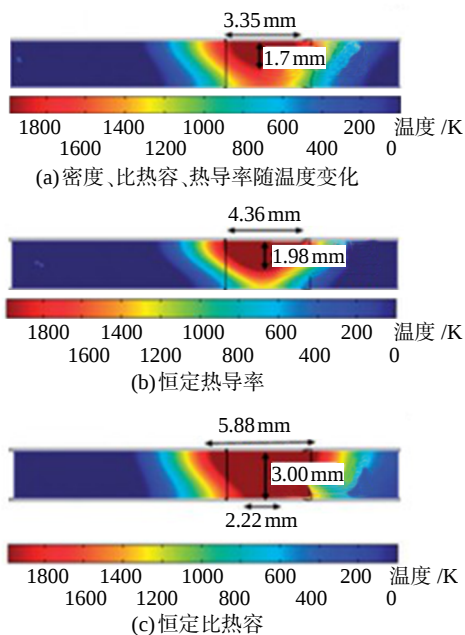


图 8 6 mm/s 扫描速度下不同情况的熔池轮廓图^[52]
Fig.8 Melt pool profile for different cases at 6 mm/s scanning speed^[52]

与未熔合等典型缺陷,为优化修复后的构件组织与性能提供了工艺参考。近年来,其应用已从不锈钢拓展至钛合金、铝合金及其复合材料等高性能金属构件的修复领域,工艺形式也日趋多元化,发展出了单丝与双丝等多种工艺方法。图 9 为模拟的电弧增材修复过程中使用热丝工艺情况下熔池温度分布情况^[54]。

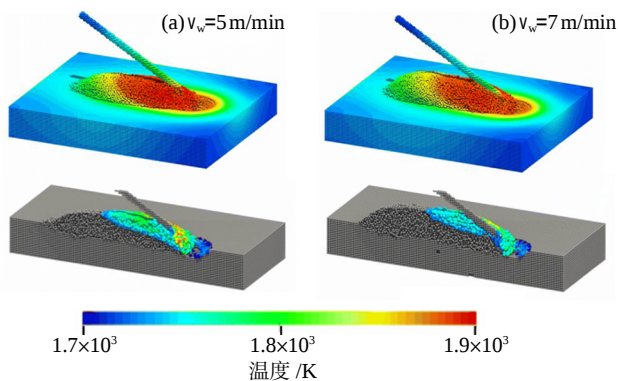


图 9 GTAW 热丝电弧增材制造过程中的温度分布^[54]
Fig.9 Temperature distribution during GTAW hot-wire arc additive manufacturing process^[54]

在 TIG 电弧增材修复过程中,熔池温度场的精确调控是实现高质量电弧增材修复的关键。高频感应热丝技术通过电磁感应原理对焊丝进行预热,与传统电阻热丝法相比,高频感应技术可以有效避免了磁偏吹现象对温度场均匀性的干扰,可以利用热电偶测量焊丝温度,实现更加精确的热输入控制。周海武等^[55]研究发现:与冷丝工艺相比,采用热丝工艺

的单道堆积体的成形均匀性得到有效改善,气孔数量大幅减小,硬度增加了 25%至 35%。张云舒等^[56]的研究进一步表明,层间强制冷却工艺能显著改善 WAAM 钛合金沉积的热耗散条件,通过降低熔池预热温度与流体流动速度来抑制热积累,从而实现对熔池尺寸与成形质量的有效控制。Wang 等^[57]研究表明,热丝电弧增材制备 Inconel 625 合金薄壁件时,微观组织自下而上呈等轴晶-胞状晶-等轴晶非均质特征,整体硬度一致性良好;拉伸性能各向异性明显,沉积方向塑性更优,水平方向强度更高。

2 红外热成像视觉检测技术

实时传感技术可连续获取 TIG 电弧增材修复熔池温度场的瞬态信息,用于电弧增材修复质量评价、缺陷追溯与工艺优化指导。通过实时监控熔池尺寸、金属流动状态和相变特征,并对焊接参数进行动态调控以减少缺陷产生。熔池视觉传感因其非接触性与信息丰富性备受关注,其中红外热成像技术在温度测量与缺陷检测中应用广泛^[58]。

铝合金表面发射率变化导致红外热成像测温与实际温度存在偏差,研究者针对此问题开展了深入研究。Li 等^[59]则应用高频感应预热钛/铝丝至 350℃ 的双丝热丝 TIG 焊,实现了钛/铝丝的同步熔化,获得了成分均匀、组织致密的钛铝合金。Ni 等^[60]提出结合黑体点校准的红外辐射测温方法,精确测量铝合金温度场,最大误差仅 1.5K。焊接过程中常见的气孔、夹渣及未熔合等缺陷,可以通过熔池成形的温度场信息得以反映,为缺陷检测提供可能。Santoro 等^[61]采用红外热成像实时无损检测技术,通过信号处理与热图像解析判断 TIG 电弧增材沉积层的缺陷类型与位置。Lambiasi 等^[62]使用高分辨率红外热成像技术实时追踪电弧增材制造过程中的温度分布与峰值温度演化规律,分析了多层沉积时首层区域的热循环特征及其对微观组织与力学性能的影响。

3 熔池温度场分布对铝合金电弧增材修复质量的影响

为实现铝合金构件高性能修复的稳定制备,需要系统阐明熔池温度场分布对修复质量的作用机制。本节通过解析温度场对沉积层组织结构、缺陷形成及力学性能的调控规律,建立“温度场-组织-性能”之间的内在联系,为工艺参数的定向优化提供理论依据。

3.1 熔池温度场分布对沉积层组织结构的影响

工艺参数与热源模式的差异性通过调控熔池温度场分布,实现晶粒生长行为的定向调控。高速 TIG 串联焊接技术通过 Marangoni 对流效应与电弧剪切应力场的协同作用,有效降低熔池峰值温度并增强液态金属紊流强度,从而诱导晶粒细化并促进溶质元素均匀化分布^[63]。王勇超等^[64]研究表明沉积层的完整结构由熔池边界处的等轴晶和中心的柱状晶共同组成,如图 10 所示,温度梯度、异质形核、凝固速率及冷却速度等关键因素共同调控了晶粒形态的周期性分布特征。

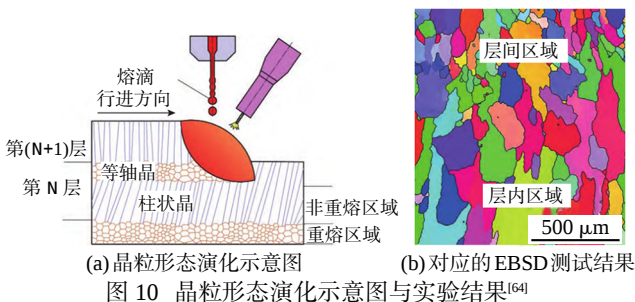


图 10 晶粒形态演化示意图与实验结果^[64]
Fig.10 Schematic illustration of grain morphology evolution and corresponding experimental results^[64]

铝合金沉积层含两类柱状晶,分别起源于层底融合线与层顶起始处。后续沉积的热循环使顶部区域部分重熔而底部保留,从而形成周期性晶粒结构,并且影响析出相转变和元素扩散的过程^[65]。苏珩等^[66]采用热压缩方法研究了铝合金的热变形行为,结果表明:2219 铝合金电弧增材修复热压缩峰值应力随温度的升高和应变速率的降低而逐渐降低。研究表明,热循环温度梯度引发析出相演变动力学分化:160~240℃温区主要发生 β'' 相析出,当温度升至 240~380℃时, β'' 相聚集长大并转变 β' 相,导致熔合区共格关系被破坏,引发过时效软化,强度和硬度降低^[67]。

3.2 熔池温度场分布对沉积层缺陷的影响

熔池温度场超限将引发液态金属流动特性失稳,高温条件下熔体黏度降低导致流动性增强,致使沉积层宽度异常增大且成形可控性下降。熔池过热易引发沉积层及热影响区晶粒粗化现象,而温度不足则导致熔池凝固动力学过程加速,显著提高气孔与夹渣缺陷的形核概率^[68]。Zhu 等^[69]通过数值模拟研究,局部温度梯度畸变可诱导熔池流动方向突变(上涌流与下沉流的非稳态交替),进而引发未熔合缺陷并在熔合线附近形成气孔形核位点。

朱凯等^[70]研究发现,在 5356 铝合金电弧增材修

复过程中,垂直扫描(VS)策略相较于往复扫描(RS)与振荡扫描(OS),更能实现均匀的热量分布,形成以等轴晶为主的组织,显著提高显微硬度。卓帅等^[71]阐述了电弧增材修复过程中铝合金中气孔缺陷的两种形成机理(氢溶解度差异与凝固收缩),总结了工艺参数对气孔率的影响规律。

材料热物理性能差异引起的温度场非均匀分布是电弧增材修复过程缺陷形成的主要因素之一。研究表明,不同种类的铝合金在凝固温度区间、热导率及相变特性等方面的差异将导致熔池热-流耦合行为呈现显著差异性:AA7075-T6 合金因较宽的凝固温度区间诱发部分熔化区(partially melted zone, PMZ)形成粗大柱状晶并伴随晶界液化现象,而 AA6061-T6 合金 PMZ 则表现出外延生长柱状晶与等轴晶的竞争形核机制^[72]。焊接缺陷的存在导致应力集中效应增强,降低接头疲劳寿命,并促使多数试样在缺陷区域发生断裂失效^[73]。

3.3 熔池温度场分布对沉积层力学性能的影响

目前,领域内相关研究通过构建工艺参数、孔隙率与抗拉强度间的空间曲面模型,揭示了铝合金电弧增材修复过程中“工艺-组织-性能”的定量映射关系^[74]。吴东江等^[75]研究表明,电弧增材修复过程中存在非平衡凝固过程,导致 2024 铝合金沉积态中强化相析出不足,使其抗拉强度、屈服强度及硬度高于铸造退火态(2024-O),但仍低于固溶+时效态(2024-T6)锻造板材。沉积方向上,多道沉积层总体呈现显著的硬度分布各向异性;对单道沉积层,层中硬度要高于层间硬度。研究表明:适宜的熔池过冷度可增强界面冶金结合强度,而精确控制热循环过程可有效抑制晶界脆性相的析出,进而实现接头强韧性协同优化^[76]。

沉积层的力学性能受焊接工艺方法、材料体系及热循环特性的协同调控作用。郭一鸣等^[77]研究表明,沉积态的 2319 铝合金表现出明显的应变速率强化效应,应变速率硬化与绝热温升诱发热软化之间的竞争机制,导致随应变速率增大,试样屈服强度与最大流动应力虽总体提高但其增幅逐渐减小,同时应变速率硬化率下降。杨芙等^[78]研究表明:沿取样方向,材料的显微组织从上部至下部细化程度逐渐降低,其硬度也呈一致的下降趋势。

4 结语与展望

熔池温度场是决定电弧增材修复冶金行为与沉

积层性能核心物理场之一。熔池温度场对铝合金电弧增材修复性能影响的主要研究进展以及有待进一步研究的方面可归纳如下:

(1) 主要的热输入参数包括焊接电流、电弧电压和扫描速度。焊接电流与热输入量呈线性正相关,电流提升显著增加熔池峰值温度并降低熔池温度梯度;电弧电压是影响焊缝质量的关键参数之一,具有选择性调控作用,其对沉积层厚度和宽度有显著影响;扫描速度通过调节单位长度热输入,反向调控熔池冷却速率。熔池内部表面张力梯度力、浮力的协同作用主导流动模式,可以通过外部的方式(如磁场干预、电弧调控等)进行调控。基于材料的热性能参数结合数值模拟方法可重构熔池三维形貌,从而有利于研究熔池温度场。

(2) 在明确热输入对熔池温度场影响规律的基础上,应进一步关注温度梯度分布对凝固组织演化的主导作用。温度梯度及其分布特征直接控制凝固过程中晶粒的形核与生长行为,适中的温度梯度能够促进等轴晶形成并抑制柱状晶过度生长,进而实现沉积层区晶粒细化与尺寸均匀化,最终提升沉积层疲劳寿命。温度场分布通过调控热循环参数(如加热速率、峰值温度及冷却速率)作用于固态相变动力学过程,具体表现为对析出相类型、尺寸及分布的精确调控,以及对合金元素扩散速率和偏析程度的显著影响,从而影响微观组织均匀性。热物理性能差异导致温度场分布不均匀,易诱发气孔等缺陷形成风险,并进一步劣化沉积层的力学性能。

(3) 未来研究应聚焦于熔池温度场的实时感知与智能调控。一方面,可利用红外热成像结合机器学习算法实现熔池动态行为的高精度重建与数字孪生建模;另一方面,借助深度学习技术揭示温度场与组织演变、缺陷生成的多尺度映射关系,从而实现基于实时反馈的自适应调控,推动铝合金电弧增材修复向智能化与高可靠性方向发展。

参考文献:

- [1] 郭阳阳,李嘉诚,任凌宝,等. 镁合金电弧增材制造研究进展及展望[J]. 热加工工艺,2024,53(20):9-17.
- [2] 焦坤,赵磊,杜行. 基于电弧增材的外场快速修复成形技术研究[J]. 热加工工艺,2023,52(13):109-113.
- [3] 宾浩宇,梁洁,李然,等. ZL114A 合金电弧熔丝增材修复组织性能分析[J]. 精密成形工程,2025,17(8):161-168.
- [4] 谭振,汪殿龙,梁志敏,等. 多丝电弧增材制造研究进展[J]. 热加工工艺,2024,53(17):1-7.
- [5] 淡婷,李晓光,佟玮,等. 2A14 铝合金人孔法兰环焊缝接头断裂失效分析[J]. 热加工工艺,2024,53(23):48-51.
- [6] 刘莉,徐望辉,刘锐哲,等. 层间搅拌摩擦加工对电弧增材制造铝合金温度场与应力场影响研究[J]. 精密成形工程,2025,17(6):177-186.
- [7] 郭立祥,李小平,陈阳,等. 基于 TIG 焊的电弧增材制造工艺研究现状及展望[J]. 热加工工艺,2023,52(5):7-12.
- [8] 萧鹏,台泓冰,向茂林,等. 基于红外辐射测温法的焊头动态高速真温测量系统研制[J]. 光谱学与光谱分析,2024,44(3):836-842.
- [9] 张珊珊,宋英豪,王飞,等. 铝合金裂纹的脉冲调频超声红外热像检测方法[J]. 红外与激光工程,2025,54(1):166-176.
- [10] Naksuk N, Nakgoonthong J, Printragoon W, et al. Real-time temperature measurement using infrared thermography camera and effects on tensile strength and microhardness of hot wire plasma arc welding[J]. Metals,2020,10(8):1046.
- [11] Yu R, Guo S, Huang Y, et al. Prediction of variable-groove weld penetration using texture features of infrared thermal images and machine learning methods [J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,23:1039-1051.
- [12] Yu R, Huang Y, Peng Y, et al. Monitoring of butt weld penetration based on infrared sensing and improved histograms of oriented gradients [J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,22:3280-3293.
- [13] 沈莹吉,姜梦,冯杰才. 焊接熔池图像采集及边缘几何形态研究[J]. 兵器材料科学与工程,2024,47(3):69-73.
- [14] Yi T, Li C, Wang X, et al. Experimental and numerical simulation of plastic flow behavior in friction stir welding of 2519 aluminum alloy via TIG arc [J]. Materials Today Communications,2025,47:113246.
- [15] 张佳,邵沛泽,王新鑫,等. 双 TIG 活性电弧增材制造方法与工艺[J]. 焊接学报,2024,45(8):62-69.
- [16] Xu B, Zhang C, Zhang G, et al. Metal flow mechanisms during alternating current arc welding and additive manufacturing of aluminium alloy [J]. Communications Materials,2025,6(1):1-10.
- [17] 陈超,张梦莹,李文龙,等. 钛合金熔丝增材制造的研究现状与应用领域[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(1):1-19.
- [18] 张永弟,陈佳兴,戴璐钰,等. CMT 电弧增材制造修复 X70 管道缺陷技术研究[J]. 电加工与模具,2025(4):57-64.
- [19] 单琪,张超,谢鹏,等. 铝合金与镀铜钢 CMT 熔钎焊技术研究[J]. 热加工工艺,2024,53(1):48-52.
- [20] 周陆琪,朱晓磊,陆晓峰,等. CMT 电弧增材制造的 5356 铝合金薄壁件力学性能及其强化机理研究[J]. 热加工工艺,2024,53(3):33-38.
- [21] 杨东青,王小伟,彭勇,等. 超声冲击辅助熔化极电弧增材制造 316L 不锈钢的组织 and 性能研究[J]. 材料导报,2022,36(1):126-129.

- [22] 李昱宏,尹辉俊,刘赟,等. 基于 PSO-BP 模型的 GMAW 角焊接接头几何形貌参数预测[J]. 热加工工艺,2025,54(21):29-35.
- [23] 蒋旗,张培磊,刘志强,等. 冷金属过渡加脉冲电弧增材制造 4043 铝合金薄壁件的组织与拉伸性能[J]. 机械工程材料,2020,44(1):57-61.
- [24] 高震,王颖,杨蔚然,等. 热输入对脉冲 TIG 电弧增材制造 Ti6Al4V 钛合金微观组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2024,34(10):3366-3381.
- [25] 任泽良,王刚,李娟,等. TA5 钛合金窄间隙 TIG 焊接头组织和性能的研究[J]. 热加工工艺,2024,53(21):158-161.
- [26] 黄佳建,马金军,李红菊,等. 船舶激光-电弧复合焊接技术的研究进展[J]. 热加工工艺,2025,54(21):23-28.
- [27] 巩江涛,吴正涛,肖翔,等. 激光-电弧复合增材制造技术研究进展[J]. 中国表面工程,2025,38(5):1-21.
- [28] Shukla P, Chitral S, Kumar T, et al. The influence of GMAW correction parameters on stabilizing the deposition characteristics for wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes,2023,90:54-68.
- [29] 姜玉清,朱杰,王加友,等. 焊接热输入对 Q370qE 桥梁钢双丝埋弧焊接头组织及性能的影响[J]. 热加工工艺,2025,54(16):135-141.
- [30] 王德军. 焊接工艺参数对焊接质量的影响研究[J]. 时代汽车,2025(2):154-156.
- [31] Tawfik M M, Nemat-alla M M, Dewidar M M. Effect of travel speed on the properties of Al-Mg aluminum alloy fabricated by wire arc additive manufacturing [J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2021,30(10):7762-7769.
- [32] 戴玲,姜永正,杨国平,等. 焊接工艺参数对 Q345 厚板 L 形接头焊接温度场的影响[J]. 电焊机,2023,53(6):62-69.
- [33] 聂志坚,秦颐鸣,龙金海,等. 纳米 TiC 复合焊丝和 7075 铝合金的脉冲 TIG 焊组织和性能及工艺优化[J]. 焊接,2023(4):29-36.
- [34] 席凯凯,葛鹏,成培鑫,等. 焊接参数对 TC4 薄板焊接过程的影响[J]. 精密成形工程,2023,15(12):86-94.
- [35] Farzadi A, Morakabiyan M, Alavi zaree S R. Theoretical and experimental investigation of gas metal arc weld pool in commercially pure aluminum;Effect of welding current on geometry [J]. Journal of Central South University,2017,24(11):2556-2564.
- [36] Gao Q, Lyu F, Wang L, et al. Investigation of arc stability in wire arc additive manufacturing of 2319 aluminum alloy [J]. Materials,2024,17(21):5160.
- [37] 马品奎,王臻,贾海龙,等. 电弧熔丝增材 AZ31 镁合金组织和力学性能[J]. 有色金属工程,2024,14(12):11-18.
- [38] Guo W, Zhao X, Zhao Y, et al. Research on optimal heat input parameter for TIG welding of thin plate 5083 aluminum alloy[J]. Scientific Reports,2025,15(1):1-10.
- [39] Tashiro S. Interaction mechanism of arc, keyhole, and weld pool in keyhole plasma arc welding: a review [J]. Materials,2024,17(6):1348.
- [40] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京:机械工业出版社,2007:5-6.
- [41] Jiang Y, Cheng Y, Zhang X, et al. Simulation and experimental investigations on the effect of Marangoni convection on thermal field during laser cladding process [J]. Optik,2020,203:164044.
- [42] 姜佳佳. 间接电弧焊技术的热量传输机制及研究现状[J]. 热加工工艺,2024,53(1):17-22.
- [43] 李静,许燕,周建平,等. 电弧增材制造中传热与流体流动的三维数值模拟[J]. 热加工工艺,2025,54(22):1-5.
- [44] 云泽,李岩,朱琪,等. 航空发动机叶片电弧熔丝增材制造的熔池演化建模与验证[J]. 金属加工(热加工),2025(20):1-9.
- [45] Chen S, Liu J, Jiang F, et al. Gravity effects on temperature distribution and material flow in the keyhole pool of VPPA Al welding [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2022,191:122823.
- [46] Liu J, Jiang F, Chen S, et al. Mechanisms of gravitational influence on weld pool behavior and weld bead performance in variable polarity plasma arc welding across different welding position[J]. Materials,2023,16(19):6457.
- [47] 杨末柱,牛启超,樊哲铭,等. 磁场辅助增材制造金属的微观组织及力学性能研究进展 [J]. 热加工工艺,2025,54(14):20-35.
- [48] 郑忆称,刘景城,林明皇,等. 电弧增材熔池流动特性和稳定性数值模拟[J]. 福州大学学报(自然科学版),2024,52(4):445-453.
- [49] Wu Z, Luo S, Wang D, et al. Effect of thermophysical properties on porosity and microstructure of laser welded cast and wrought aluminum alloy dissimilar lap joints [J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,26:1833-1849.
- [50] Parvez S, El rayes M, Al-bahkali E, et al. Numerical investigation of the influence of pulse frequency on the weld pool size in pulsed current TIG welding [J]. AIP Advances,2025,15(1):015102.
- [51] Jin Q Y, Jung J, Cheon J, et al. Melt Pool Simulation of dual laser beam-arc hybrid welding of aluminum alloy using finite element method[J]. Materials,2024,18(1):135.
- [52] Junaid M, Cheema T A, Haleem H, et al. Effects of thermal material properties on precision of transient temperatures in pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,2018,233(9):3170-3181.
- [53] Qin B, Qu R, Xie Y, et al. Numerical simulation and experimental study on the TIG (A-TIG) welding of dissimilar magnesium alloys[J]. Materials,2022,15(14):4922.
- [54] Spaniol E, Ungethüm T, Trautmann M, et al. Development of a novel TIG hot-wire process for wire and arc additive manufacturing[J]. Welding in the World,2020,64(8):1329-1340.

- [55] 周海武,李泽,闫帅,等. 丝材感应预热对电弧增材制造铝合金薄壁构件组织和性能的影响 [J]. 电焊机,2024,54(1): 80-85.
- [56] 张云舒,郑登勇,邵丹丹,等. 层间强制冷却对电弧熔丝增材制造钛合金温度场和流场的影响 [J]. 西北工程技术学报, 2024,23(3):199-205.
- [57] Wang X, Hu Q, Li T, et al. Microstructure and fracture performance of wire arc additively manufactured inconel 625 alloy by hot-wire GTAW[J]. Metals,2022,12(3):510.
- [58] 丁东红,黄荣,张显程,等. 电弧增材制造研究进展:多源信息传感[J]. 焊接技术,2022,51(10):1-20.
- [59] Li Z, Ren J. Fabrication of titanium aluminide alloys by twin-wire tungsten inert gas welding applied with high frequency induction heating wire technology:processing, microstructure,and properties [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024,34(4):2944-2960.
- [60] Ni N, Zhang K, Hu J, et al. Combined use of blackbody and infrared radiation for accurate measurement of temperature field of aluminum alloys[J]. Optik,2022,268:169763.
- [61] Santoro L, Sesana R, Molica nardo R, et al. Infrared in-line monitoring of flaws in steel welded joints;a preliminary approach with SMAW and GMAW processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2023,128 (5/6):2655-2670.
- [62] Lambiasi F, Yanala P B, Paoletti A. Thermal,microstructural,and mechanical characterization of early-stage deposition in wire arc additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2025,138(3/4):953-970.
- [63] Wu D, Huang J, Kong L, et al. Coupled mechanisms of arc, weld pool and weld microstructures in high speed tandem TIG welding [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020,154:119641.
- [64] 王勇超,魏正英,贺鹏飞. 熔滴复合电弧增材制造 2219 铝合金组织与性能[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(8):1585-1595.
- [65] 唐作富,陈国瑞,吴广辉. CMT 电弧增材制造 5087 铝合金组织与拉伸性能研究[J]. 金属加工(热加工),2024(1):105-109.
- [66] 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(08):107-116.
- [67] Gou W, Wang L. Microstructure and performance test of aluminum alloy K-TIG welding joint[J]. Advances in Engineering Technology Research,2022,1(2):368.
- [68] Karthick K, Sravanthi K, Jani S P, et al. Optimization of TIG welding parameters and filler rod material selection for dissimilar aluminum alloy joints[J]. Journal of Materials Science;Materials in Engineering,2025,20(1):1-12.
- [69] Zhu C, Cheon J, Tang X, et al. Molten pool behaviors and their influences on welding defects in narrow gap GMAW of 5083 Al-alloy [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,126:1206-1221.
- [70] 朱凯,王健,张炜辰,等. 沉积策略对电弧增材制造 5356 铝合金显微组织、缺陷和力学性能的影响 (英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2024,34(2):423-434.
- [71] 卓帅,路学成,张志强,等. 增材制造铝合金气孔缺陷形成机理及仿真分析进展[J]. 热加工工艺,2025,54(17):11-17.
- [72] Reyaz M S B, Sinha A N, Mehdi H, et al. Effect of pulsed TIG welding parameters on the microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar AA6061-T6 and AA7075-T6 weldments [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2024,49(8):10891-10911.
- [73] Xu X, Xie L, Zhou S, et al. Effect of welding defects on fatigue properties of SWA490BW steel cruciform welded joints [J]. Materials,2023,16(13):4751
- [74] 吕飞阅,王磊磊,窦志威,等. 2319 铝合金电弧增材制造归一化评价[J]. 材料工程,2024,52(3):137-148.
- [75] 吴东江,刘德华,张子傲,等. 电弧增材制造 2024 铝合金的微观组织与力学性能[J]. 金属学报,2023,59(6):767-776.
- [76] 耿汝伟,朱聪聪,魏正英,等. 铝合金熔滴复合电弧增材组织转变数值模拟及试验研究[J]. 机械工程学报,2025,61(17):1-11.
- [77] 郭一鸣,宋世达,钱美霞,等. 电弧增材制造 2319 铝合金的动态力学性能[J]. 电焊机,2025,55(4):1-7.
- [78] 杨芙,李美,范玉磅,等. 电弧增材制造 6061 铝合金的组织调控与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(7):1099-1103. 