

引文格式: 李忠群, 范海路, 吴文镜, 等. 机器人搅拌摩擦焊技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2026, 69(16): 25020343.

LI Zhongqun, FAN Hailu, WU Wenjing, et al. Research progress on robotic friction stir welding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(16): 25020343.

机器人搅拌摩擦焊技术研究进展

李忠群¹, 范海路¹, 吴文镜², 沈群利¹

(1. 湖南工业大学, 株洲 412007;

2. 美的集团高端重载机器人全国重点实验室, 佛山 528311)

[摘要] 针对航空航天、新能源汽车等领域复杂构件的高性能加工需求, 机器人搅拌摩擦焊凭借柔性加工能力与高质量接头成形优势, 已成为先进焊接技术的核心发展方向。本文系统梳理了该技术的关键研究进展与技术突破: 首先, 系统总结串联、并联与混联 3 类机构的结构特性与应用场景; 其次, 综述力/位混合控制、路径补偿与姿态调控、轨迹平滑与离线编程及工艺参数动态优化等关键技术的最新研究进展, 概述常见传感器及多源信息融合方法在闭环调控中的应用, 系统归纳辅助加热、搅拌头材料/结构优化等工艺增强策略对低刚度平台焊接稳定性的增强效果; 最后结合当前技术瓶颈与行业实际需求, 明确发展趋势、核心科学问题及关键研究方向, 为其工业化应用提供理论支撑与技术路径参考。

关键词: 重载机器人; 搅拌摩擦焊(FSW); 力/位控制; 路径补偿; 智能传感

中图分类号: V261; TG439.8

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020343

Research Progress on Robotic Friction Stir Welding Technology

LI Zhongqun¹, FAN Hailu¹, WU Wenjing², SHEN Qunli¹

(1. Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. State Key Laboratory of High-End Heavy-Loads Robots, Midea Group, Foshan 528311, China)

[ABSTRACT] To address the high-performance processing requirements of complex components in fields such as aerospace and new energy vehicles, robotic friction stir welding (RFSW) has emerged as a core development direction of advanced welding technologies, owing to its advantages of flexible processing capability and high-quality joint formation. This paper systematically reviews the key research progress and technical breakthroughs of RFSW. First, it systematically summarizes the structural characteristics and application scenarios of three types of mechanisms, namely serial, parallel and hybrid mechanisms. Second, it reviews the latest research advances in key technologies including force/position hybrid control, path compensation and attitude adjustment, trajectory smoothing and offline programming, as well as dynamic optimization of process parameters; It also outlines the application of common sensors and multi-source information fusion methods in closed-loop control, and systematically summarizes the improvement effect of process enhancement strategies (e.g., auxiliary heating, and material/structure optimization of stirring tools) on the welding stability of low-stiffness platforms. Finally, combined with current technical bottlenecks and actual industrial demands, this paper clarifies the development trends, core scientific issues and key research directions, providing theoretical support and technical pathway reference for the industrial application of RFSW.

Keywords: Heavy-duty robot; Friction stir welding (FSW); Force/position control; Path compensation; Intelligent sensing

收稿日期: 2025-10-27; 退修日期: 2025-12-24; 录用日期: 2026-01-30

基金项目: 高端重载机器人全国重点实验室开放课题(HHR2025020106)

通信作者: 李忠群, 教授, 博士, 研究方向为高性能制造与智能化技术。

搅拌摩擦焊 (Friction stir welding, FSW) 是英国焊接研究所 (The welding institute, TWI) 于 1991 年发明的一种新型固相连接工艺^[1], 其核心原理是利用非消耗性搅拌工具 (含轴肩和搅拌针) 高速旋转并施加轴向压力, 将工具端部插入工件的待焊界面并沿焊接方向移动, 如图 1 所示^[2]。在此过程中, 界面材料受摩擦热与塑性变形热的共同作用, 达到热塑性状态。随后, 搅拌工具的机械搅拌作用与轴肩的锻压共同促使材料发生塑性流动、动态混合及再结晶, 最终冷却后形成致密的固相连接焊缝^[3]。

最初, FSW 工艺主要用于解决高强度铝合金熔焊过程中产生的气孔、热裂纹等冶金缺陷。随着研究的深入, 研究者对 FSW 的微观作用机理与能量传递机制有了更为深入的理解。凭借其低能量消耗、高质量接头成形特性及低残余应力等显著优势, 该技术已在航空航天、新能源汽车及船舶工业等领域实现规模化应用^[4-5]。然而, 目前国内主流的龙门式及台式搅拌摩擦焊接设备, 仅能实现对轻质合金的二维平面直线或简单曲线焊缝的焊接^[6], 且存在设备体积庞大、成本高昂、夹具依赖性强等局限性, 难以满足大型复杂构件柔性化制造与移动式作业要求^[7]。

传统多轴加工中心由于行程范围有限、柔性不足, 无法有效应对大型构件的精密加工挑战。工业机器人加工单元凭借其高柔性、高效率及作业范围的可扩展性, 逐步发展为大型构件一体化原位制造的核心装备^[8]。在工业机器人多元化应用场景中, 焊接占据了重要地位, 工业机器人焊接的优势体现在定位精度高、焊接质量稳定及生产效率显著提升^[9]。然而, 在高强度轻质合金 (如铝合金、钛合金) 及复合材料-金属异质接头的焊接中, 传统熔焊方法受制于热输入影响, 焊接过程中产生的焊接缺陷与变形问题仍难以完全规避。FSW 作为固态连接技术, 通过物理冶金机制的革新, 从根本上消除了熔焊缺陷的产生, 展现出接头性能优异、变形抑制效果显著等突出优势, 为突破上述技术瓶颈提供了创新解决方案。

针对复杂空间曲面轨迹的高精度焊接需求, 搅拌摩

擦焊接机器人 (Robotic friction stir welding, RFSW) 通过集成工业机器人本体的柔性运动与 FSW 技术的冶金优势, 形成高效自动化焊接方案, 被学术界公认为未来先进焊接技术的核心方向之一^[10]。然而, RFSW 技术仍存在两方面关键挑战: 其一, 工业机器人关节综合刚度仅为传统数控机床的 10% 左右, 导致焊接工艺稳定性显著受限^[11]; 其二, 受限于机器人本体有效载荷能力, RFSW 对厚重材料的焊接适配性不足^[12]。因此, 提升系统综合刚度与有效负载能力成为当前 RFSW 技术优化的核心研究方向。

1 RFSW 的系统构成、分类与应用

1.1 RFSW 的系统构成

RFSW 是实现复杂三维焊缝自动化固态连接的核心装备, 其核心组件包括传感器、执行器和控制器^[3]。执行器系统由工业机器人本体及末端执行机构组成, 后者的核心为集成于机器人末端的搅拌摩擦焊专用主轴单元 (图 2^[13])。该系统的关键技术为机器人本体与专用主轴单元的高度集成设计, 机器人本体负责精准的空间轨迹控制和运动速度调节, 专用主轴单元则承担动力输出及搅拌头夹持的核心功能。主轴单元内部集成高精度力/位混合控制系统 (通常基于伺服电动缸或液压伺服系统), 可实时调控搅拌头的角速度、轴向压力及插入深度等关键工艺参数, 实现搅拌头高速旋转与运动参数的精密调控。

在焊接作业过程中, 机器人引导主轴单元沿预设三维轨迹移动。与此同时, 主轴单元依据工艺需求动态调节搅拌头的角速度及轴向压力, 使焊缝区域材料均匀吸收摩擦热与塑性变形热, 达到热塑性状态。通过搅拌头的机械搅拌与轴肩的顶锻作用, 促使材料发生微观混合、动态再结晶及晶粒重排, 最终形成固相冶金结合接头。在驱动与控制层面, 机器人控制器与主轴控制单元通过高速工业通信总线 (如 EtherCAT 协议) 建立实时数据交互通道, 并在上位机协调控制下, 实现运动轨迹执行与工艺参数调控时序的精确同步。这一控制协同

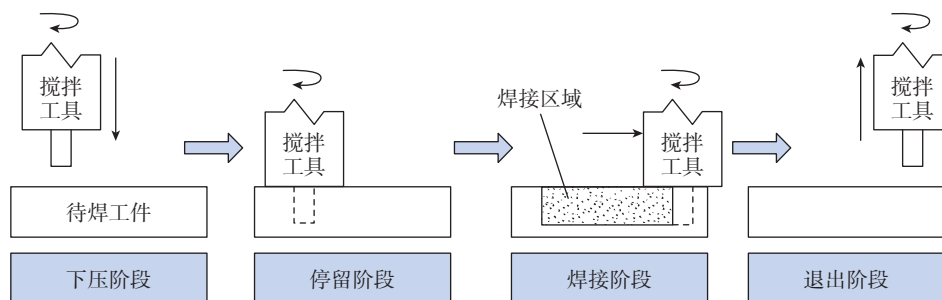


图 1 FSW 工艺步骤^[2]

Fig.1 Steps of FSW process^[2]

机制是保障焊接接头质量均匀性与工艺稳定性的关键技术支撑。

1.2 搅拌摩擦焊机器人的分类

按照支链的拓扑连接方式,搅拌摩擦焊机器人系统可以分为串联式、并联式和混联式3类^[14],如图3所示。串联式机器人由多支链依次串联构成,其关节单元包含旋转关节和/或移动关节,以实现空间多自由度运动,如图3(a)所示^[15];并联式机器人则采用多支链并联驱动并支撑末端执行器平台,利用多支链协同驱动实现优异的高刚度与负载能力,如图3(b)所示^[16];混联式机器人融合串联与并联架构的拓扑特性优势,通过混联拓扑结构实现高精度多自由度复合运动,如图3(c)所示^[17]。

1.2.1 串联式搅拌摩擦焊机器人

串联型机器人通过支链与旋转关节或移动关节依次串联形成开式运动链。这类机器人凭借结构简洁的优势,具备较大的可达工作空间和路径灵活性,可有效覆盖复杂空间位置。然而,其末端定位精度和绝对刚度会受到关节误差逐级传递与累积的影响^[18]。当前研究主要聚焦于结构优化设计及刚度建模与增强技术。

结构优化方面,Luo等^[19]以滑枕结构为优化对象,采用“变密度拓扑优化—克里金模型辅助尺寸优化”的两阶段设计流程,实现结构减重52.4%的同时,显著提升结构一阶固有频率。Balaji等^[20]通过机械臂本体的复合材料选型与几何拓扑优化,基于有限元分析方法设计出一款5自由度高刚度机械臂。宛敏红等^[21]针对重载工况下机械臂的变形问题,提出双电机消隙耦合机构及挠度主动补偿方法(图4),有效实现高精度轨迹控制。

在刚度建模与增强方面,Zhao等^[22]针对串联机器人刚度不足问题,提出了基于非线性sigmoid函数权重化的柔性刚度建模指标。经Ansys仿真验证表明,该指标可同步提升机器人末端刚度性能,并优化关节运动的连续性与平滑性。Kang等^[23]基于静态参数辨识构件的刚度模型,提出改进的刚度椭球算法与遗传算法协同

优化策略;该策略以最大化新型多维刚度参数为目标,结合轨迹精度控制,显著提升FSW过程中的刚度稳定性;值得注意的是,其内源式控制架构无需外部传感器。即可实现轨迹精度提升60%。肖聚亮等^[24]构建覆盖并联/串联机构的刚度特性数据库,提出并构建“刚度最优区间”理论框架。通过多约束算法对焊接工作位置进行全局优化,确保焊接过程中轴向刚度最优;仿真与试验验证表明,该方法使焊接刚度提升28%,焊缝质量指标改善显著。

上述结构优化方法多针对特定机型或工况实施,其普适性有待提高。基于模型的刚度增强与补偿方法,在实际应用中高度依赖模型准确性,在复杂焊接载荷及热力耦合工况下,其鲁棒性需深入验证。在机器人设计中,实现高刚性、高精度与轻量化、低成本的平衡仍是亟待攻克的难题。



(a) 串联式机器人^[15]



(b) 并联式机器人^[16]



(c) 混联式机器人^[17]

图3 搅拌摩擦焊机器人分类

Fig.3 Classification of friction stir welding robots

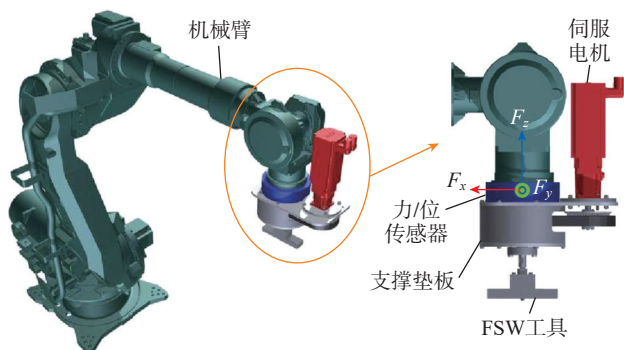


图2 串联RFSW结构示意图^[13]

Fig.2 Schematic diagram of the serial RFSW structure^[13]

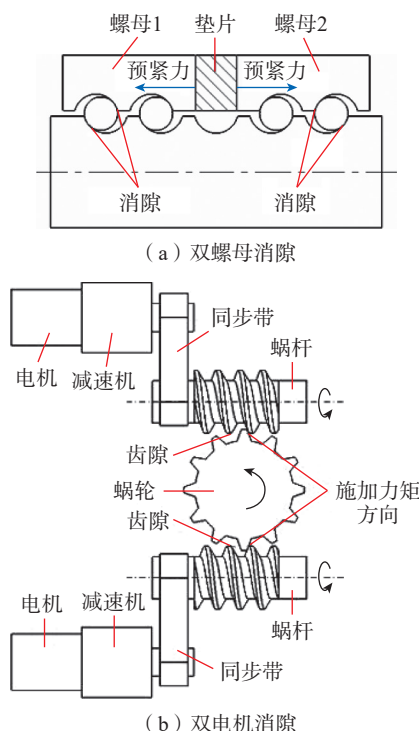


图4 消隙系统原理示意图^[21]
Fig.4 Schematic diagram of backlash elimination system^[21]

1.2.2 并联式搅拌摩擦焊机器人

并联型机器人的末端执行器由多根独立支链并联连接与协同驱动。这种闭环拓扑结构赋予该类机器人显著优势,具体包括高刚度、强承载能力、快速动态响应及较小累积误差等,对保障搅拌摩擦焊过程所需的巨大下压力与高精度位置控制至关重要。然而,并联机器人工作空间通常有限,空间形状复杂,且易面临奇异位形问题^[25]。近年来,研究人员主要从结构创新与优化设计、性能优化方法及动态特性分析3方面开展研究。为便于表述机器人空间机构的自由度与关节类型,常用“数字+字母”的符号表示方法,其中 U 为虎克铰, R 为转动副, P 为移动副, S 为球面副。

在结构创新设计领域,Chai等^[26]针对并联机器人抗干扰需求,提出冗余驱动2UPR-2RPU并联构型,基于水平集方法构建旋转/平移运动学灵敏度指标,经分层尺寸优化,获得对驱动器扰动鲁棒性较强的机构参数;Zou等^[27]基于旋量理论设计PP-PPa纯平移并联机构,创新设计了平行四边形关节以增强机构对称性,同时提出分离式误差敏感度指标;试验中采用比例/积分/微分(Proportion integration differentiation, PID)控制,实现0.048 mm的重复轨迹精度。Peng等^[28]针对2RPU-RPS机构构建了运动学性能多目标优化模型,结合遗传算法对几何参数进行协同优化,在扩大工作空间的同时增强机构的刚度与灵活性,为并联机构的尺寸设计提

供了高效方法。

在并联机器人性能优化研究方面,Marliana等^[29]基于性能图谱结合遗传算法对3-PUU并联机构进行参数优化,获得了综合性能指数为0.76的最优机构参数;随后,通过原型试验验证该机构的轨迹精度,结果表明该优化方案实现了大工作空间与高刚度的良好匹配特性;但该研究未考虑焊接过程中的热力耦合效应。Wu等^[30]创新性提出扭矩范围最小化全局优化方法,该方法将全轨迹动力学解映射为四维扭矩空间中的直线簇,通过求解能够容纳所有直线的最小轴向超长方体,生成平滑扭矩曲线;与传统最小二乘法相比,该方法显著减少了执行器的扭矩波动范围。

在并联机器人动态特性研究方面,Mo等^[31]构建了考虑球铰间隙与多阶段载荷的3UPS-UP并联机器人动力学模型,提出并定义关节反射惯量和关节空间惯量变异系数指标;研究表明,该机器人需在小伸缩量、小转角的工作区域,方可保证良好的动态性能;该成果为并联机器人的工作空间规划提供了坚实的理论依据。

目前,多数相关研究聚焦于理论建模、性能指标定义及优化方法探索,并通过仿真或部分原型试验验证了研究成效。然而,该领域的研究仍存在若干共性问题:其一,针对焊接全过程的热-力耦合效应开展的联合建模研究较为匮乏;其二,对于机器人全工作域内的鲁棒性分析尚不充分;其三,试验验证的覆盖范围有待拓宽,长期工况下的可靠性研究也亟待深化;此外,在控制策略与工程化集成技术方面,仍有大量工作亟待推进。

1.2.3 混联式搅拌摩擦焊机器人

混联型机器人融合了串联与并联两种构型的核心特点,其典型结构通常是在并联机构基础上串联单条或多条运动链,或在串联机构上增设并联结构以增强局部刚度。该设计理念的核心是充分整合并联机构高刚度、高精度及串联机构大工作空间、高灵活性的优势^[18],进而克服单一构型的性能局限,满足大型复杂构件搅拌摩擦焊对机器人综合性能的严苛要求。

在混联型机器人刚度建模研究领域,Yue等^[32]提出基于“运动等效”原理的刚度识别方法,该方法将混联系统等效为仅含6个位形相关柔度参数的虚拟串联机构,同时结合鲁棒主成分估计方法,有效解决了建模过程中的病态问题;通过严谨试验验证,该方法在变形预测方面的有效性得到充分验证。Sun等^[33]针对5自由度混联机器人构建了半解析刚度模型,并提出基于瞬时能量的刚度指标;深入研究表明,该模型与指标适用于高刚度需求的复杂曲面焊接工况,为相关工程应用提供坚实的理论支撑。

在混合型机器人结构创新方面,Dardouri等^[34]在

串联机器人末端集成 UPS 并联助力机构,通过对结构参数与推力分配实施联合优化,大幅降低了焊接过程中的位姿误差,提升焊接精度。赵慧慧等^[35]研发了五轴混联 FSW 系统,该系统集成激光环扫传感技术与多闭环控制技术,实现复杂空间曲线焊缝的高精度、高稳定性焊接。Li 等^[36]设计了一种基于 2-SPR-RPS 并联模块与双龙门导轨的 5 自由度混联机器人,基于旋量理论深入分析其运动学特性,并对构型参数开展优化,最终构建出兼具高刚度、大工作空间及奇点规避能力的 FSW 系统,适用于空间曲面焊接任务,拓展了混联机器人在复杂焊接场景中的应用范围。

1.3 搅拌摩擦焊机器人的应用

1.3.1 多材料焊接能力与挑战

RFSW 融合 FSW 的固相连接机理与工业机器人的高柔性自动化控制能力,在多材料焊接中展现显著优势。FSW 尤其适用于传统熔焊难以实现的异种金属连接,如铝合金-铜、铝-镁和铝-钛等组合^[37];其固相焊接特性可显著降低了熔点差异对焊接过程稳定性的制约,使接头界面更致密、力学性能更优异。在 RFSW 中,工业机器人的多自由度运动能力与可编程轨迹规划能力进一步强化这一优势,使其可稳定执行复杂空间路径及多段焊缝焊接任务;相较于传统焊接方法和固定式 FSW 设备,显著提升了多材料焊接的可重复性、自动化水平及工业适用性。

尽管 RFSW 在多材料焊接中具备突出优势,但其工程应用仍受多方面因素制约:其一,异种材料在物理性能和塑性流动行为上的显著差异,易在搅拌过程中形成脆性金属间化合物或引起材料分布不均,进而降低接头力学性能并诱发界面脆断缺陷^[38];其二,FSW 过程中存在较大轴向力和扭矩,而传统串联式工业机器人的整体刚度有限,易在焊接载荷作用下产生末端位姿偏差,影响焊缝成形质量与一致性;其三,多材料焊接对搅拌工具的耐磨性和几何设计提出更高要求,不同材料组合下工具磨损机制复杂,工艺参数窗口较窄,进一步制约工艺稳定性。

1.3.2 典型复杂构件焊接

随着航空航天、轨道交通及汽车轻量化结构向大型化、一体化和复杂化演进,焊接构件普遍具有曲面特征显著、焊缝路径复杂、空间可达性要求高等特点,传统固定式搅拌摩擦焊设备在焊接灵活性方面寻找显著局限性。RFSW 依托工业机器人多自由度运动能力和优异的空间适应性,可实现复杂三维焊接路径的精准执行,已在曲面铝合金壁板^[39]、多层叠加结构^[40],以及箱体、薄壁构件等场景中得到应用。在飞机蒙皮^[41]、汽车电池托盘^[5]、轨道车辆铝合金型材^[42]等构件的连接中,RFSW 能够在保证焊缝成形质量和接头力学性能的前提下,大幅提升

焊接一致性和自动化水平。通过引入力/位混合控制、焊接路径规划及过程监测技术,RFSW 能够有效应对复杂结构焊接过程中焊接姿态变化和载荷波动问题,展现出广阔的工程应用潜力。因此,RFSW 已成为实现复杂构件高质量、柔性化连接的重要发展方向之一。

2 RFSW 关键技术

2.1 力/位控制技术

FSW 过程中产生的力按方向可分解为下压力、前进抗力与侧向力。其中,下压力的精确控制尤为关键:一方面,合适的下压力能确保轴肩与工件充分接触,为摩擦生热提供保障;另一方面,可有效约束塑性金属外溢。当下压力不足时,轴肩与工件界面热输入减少,被焊金属难以达到理想的塑性软化状态,进而影响焊接过程稳定性与焊缝质量;反之,下压力过大,会造成表层金属过热、焊道外观出现缺陷,还会使塑性金属在后退侧溢出形成飞边,严重影响焊缝成形质量。因此,保持“恰到好处”的下压力是获得优质焊缝的关键。然而,RFSW 系统具有弱刚性结构特点,这使得单纯依靠位置控制,难以实现下压力的高精度调控。

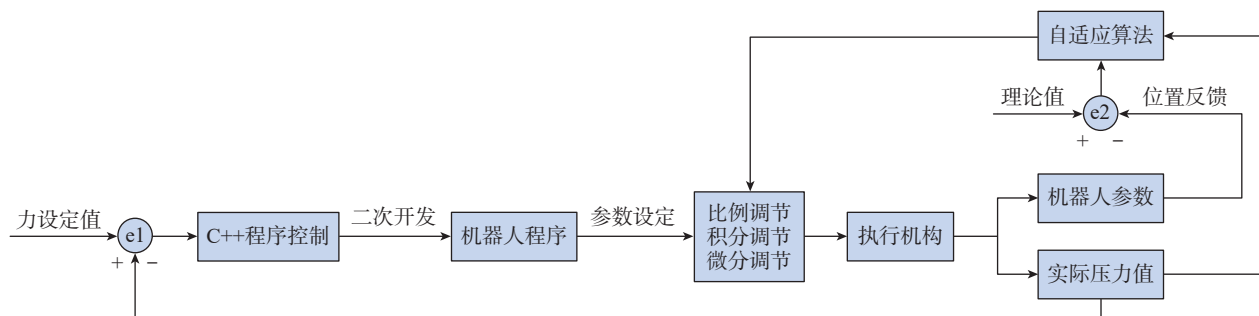
辛杨桂等^[43]开展了结合 PID 和自适应算法的力/位控制技术研究,该技术原理如图 5 所示;该研究基于 KUKA 机器人传感器接口进行 C++ 二次开发,构建了力/位混合控制系统;该系统采用自适应 PID 算法,并融合焊缝跟踪技术,有效抑制了焊接过程中的抖动现象,显著提高了焊缝质量。

于占良^[44]构建了融合关节与连杆刚度的机器人刚度模型,研发出变形误差补偿方法,该方法大幅降低了 RFSW 焊接过程中的下压误差和侧向偏移。Mendes 等^[45]利用模糊-PI 控制器调节机器人下压力,在聚合物的 FSW 焊接中实现了接触力的稳定控制,有效解决了机械臂刚度不足引发的焊接缺陷问题。Kamm 等^[46]采用开放式控制架构与导纳控制策略,将 RFSW 的力控带宽提升至 15 Hz,使下压力跟踪误差降低了 78%,并将下压阶段耗时缩短 32%,显著提升了高梯度力工况下的控制性能。Meyer 等^[47]开发了基于系统辨识的模型预测控制器,可显著抑制摩擦压焊过程中轴向力的波动,且在材料/工具变更场景下表现出较强的鲁棒性。

2.2 路径补偿与姿态控制技术

2.2.1 路径补偿技术

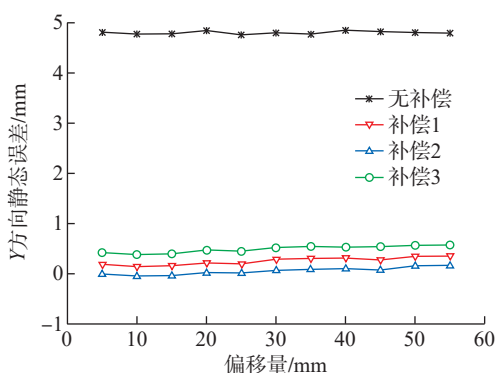
路径补偿技术是指:在焊接过程中,末端执行器受顶锻力、前进抗力和侧向力等多维力作用时,搅拌头会偏离预定轨迹;此时可实时检测或预测轨迹偏差,并动态调整机器人位姿或运动参数,以确保搅拌头精确跟踪理想焊缝轨迹。路径补偿效果直接影响其焊接质量^[48]。

图5 PID和自适应算法结合的力/位控制原理图^[43]Fig.5 Schematic diagram of force/position control combined with PID and adaptive algorithms^[43]

目前,路径补偿主要分为在线补偿和离线补偿两类:在线补偿基于反馈控制原理,利用传感器或变形模型在焊接过程中实时修正路径;离线补偿技术基于焊接前对预期变形的先验认知,先通过首次试验测量实际偏差,再据此修正后续焊接路径。

在线补偿领域,Karlsson等^[49]采用激光焊缝跟踪技术实现了RFSW挠曲的实时补偿,将路径跟踪误差控制在0.5 mm以内;通过多种铝合金接头的焊接试验验证了该补偿方法的有效性,且所获焊接接头具备优异的力学性能。Guillo等^[50]通过嵌入式算法实时计算并修正轨迹,将RFSW的横向工具偏差从7 mm降至 ± 1 mm,成功消除未焊透缺陷,使焊缝质量达到与高刚度数控机床系统相当的水平。Qin等^[51]提出基于非线性状态估计器的实时轨迹补偿方法,该方法通过离散观测器在线估算工业机器人柔性变形,结合KUKA控制器的路径修正功能实现轨迹偏差补偿,补偿前后Y方向静态误差(图6)从4.8 mm降至近零。Xiao等^[52]提出了一种基于在线轨迹生成的加加速度约束路径补偿方法,通过实时生成满足速度、加速度和加加速度约束的平滑轨迹,实现 ± 0.05 mm精度的恒下压深度控制。

在离线补偿方面,Kolegain等^[53]提出了基于B样条

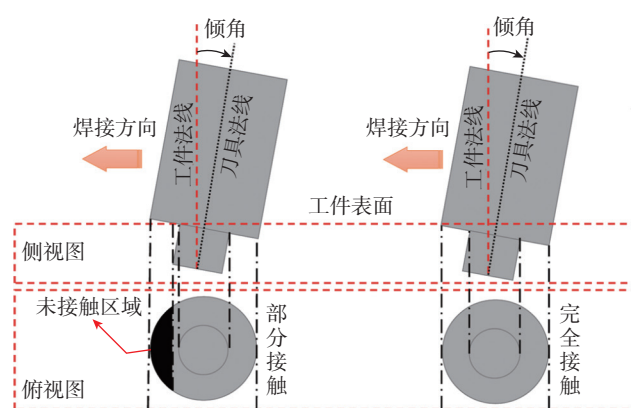
图6 补偿前后Y方向静态误差对比^[51]Fig.6 Comparison of static error in the Y direction before and after compensation^[51]

与刚度模型的离线路径补偿方法,该方法通过预变形叠加,将RFSW的横向工具偏差从2.32 mm降至0.27 mm,实现复杂曲面的高质量无缺陷焊接。Sun等^[54]提出基于自适应遗传算法优化反向传播神经网络的无传感器变形预测方法,利用有限元仿真数据训练网络,实现对5-DOF混联机器人在FSW中受轴向力变形作用下的实时高精度补偿。De Backer等^[55]借助视觉/激光双传感系统,量化了FSW过程中机器人路径偏移量,首次揭示了偏移量与焊接强度呈负相关的规律,并提出基于“编程偏移+偏转偏移”模型的离线补偿策略,为高强合金焊接的路径精度控制提供了理论与技术依据。

2.2.2 姿态控制技术

姿态控制技术是保障搅拌摩擦焊接质量与工艺稳定性的核心要素,尤其在空间复杂曲面焊接过程中,需要精确调控搅拌工具的倾角。如图7所示^[56],倾角偏差会直接影响搅拌工具与工件表面的接触状况,进而引发焊接界面热输入不均、材料流动异常等缺陷。

机器人动态参数识别是实现其位姿稳定控制的基础,Tang等^[57]提出了加权最小二乘法和随机加权粒子群优化的混合算法,通过加权最小二乘初始化与随机权重粒子群优化,实现协作机器人动态参数的高精度辨

图7 FSW工具倾角示意图^[56]Fig.7 Schematic diagram of the inclination angle of the FSW tool^[56]

识,可提高关节力矩预测精度并加快收敛速度。Liu 等^[58]提出基于加权最小二乘法的动态参数识别算法,该算法可提高焊接机器人动力学参数识别精度,有效增强末端执行器的稳定性。

Xiao 等^[59]结合机器人焊接试验与有限元模拟,揭示 5083-H111 铝合金“S”形曲面搭接焊中曲率方向对实际轴向压力的调控机制:沿 Z 轴正曲率会加剧界面缺陷、降低接头强度,沿 Z 轴负曲率可抑制焊接变形、提升接头强度;沿 Y 轴曲率通过改变轴向力(F)方向消除界面缺陷,但会导致前进侧 AS/后退侧 RS 应力分布不均;在双曲率协同作用下,“Z 负+Y 负”的曲率组合可使焊接接头强度最优。Cheng 等^[60]通过试验量化 RFSW 插入阶段轴向力的四阶段演变规律,明确揭示插入深度与轴向力的线性关系,且插入速度对力突变的影响显著,为抑制末端扰动的高精度力控制策略提供参数优化依据。Yue 等^[61]提出轴向平移刚度指标 k_t ,开发离散搜索算法优化 6 自由度混联机器人的位姿,使工具轴向刚度提升超过 50%,有效减少焊接下压深度损失,并在空间曲线焊缝焊接中验证,该优化位姿可改善飞边均匀性。Tsarkov 等^[62]结合流体动力学模型对 AA5083-H111 铝合金开展试验,发现当搅拌头倾斜角为 2° 时,可显著提升前进侧温度与锻造力,同时填充已有缺陷并抑制新缺陷产生。

2.3 轨迹平滑与离线编程技术

2.3.1 轨迹平滑技术

大多数焊接路径的 CNC 编程遵循 ISO/6983 标准(G 代码)。然而,在 G 代码路径的接合点处,切线和曲率可能存在不连续性,这种潜在的不连续性会对焊接稳定性产生不利影响。因此,采用平滑技术生成具备高阶连续性的路径具有重要意义。

全局平滑适用于路径段较短、轨迹变化复杂的焊接任务。该方法通常基于曲线拟合或插值技术对整个轨迹进行重构,以提升轨迹连续性与运动执行稳定性。Li 等^[63]提出了一种基于 G^3 连续 B 样条与多项式同步的路径规划方法,通过构建刀具位置、方向路径弧长参数间的 B 样条映射(图 8)实现统一的运动规划,进而优化路径平滑性及冗余轴的协同运动性能;研究结果表明,该方法可显著降低工具轴的角加速度和角加速度,有效提升焊缝成形质量。

He 等^[64]提出基于样条曲线与智能优化算法协同的焊接机器人路径规划方法,可显著提升路径平滑性、焊接效率与焊接质量。Zhou 等^[65]提出了一种基于改进麻雀算法的焊接机器人能耗优化方法,该方法结合七次 B 样条轨迹与精英反向学习-高斯柯西变异策略,在 UR5 机器人上实现了能耗降低 26.3%,且满足严格的运动约束条件。Ma 等^[66]提出多策略改进麻雀算法,结合二维

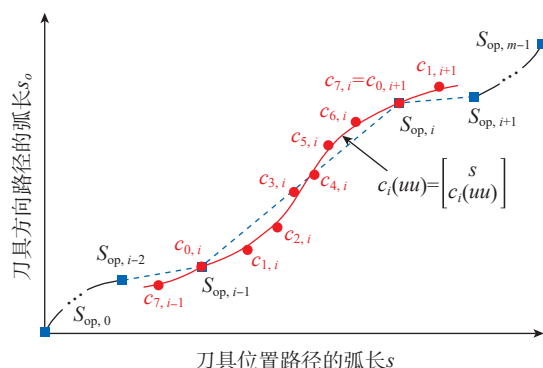


图 8 刀具位置路径与方向路径的弧长参数映射关系^[63]

Fig.8 Arc-length parameter mapping between tool position path and tool orientation path^[63]

Logistic 混沌初始化与 Levy 飞行策略对 3-5-3 混合多项式轨迹进行优化;试验结果表明,该方法使 6 轴工业机器人运行时间缩短了 47%,收敛速度提升 80%,显著提高轨迹平滑性与运行效率。Yin 等^[67]提出工作角与行走角进行双自由度优化方案,结合遗传算法进行全局搜索;研究结果表明,该方法使机器人焊接轨迹的加权加速度峰值降低 70.75%,有效抑制关节突变和末端抖动现象。

拐角平滑主要针对路径中存在突变的角点区域。通过引入参数曲线替代原始直线段的交点,实现局部轨迹平滑处理。Shi 等^[68]提出基于机床坐标系的五次 B 样条局部路径平滑方法,该方法综合考量轨迹连续性与姿态稳定性,可有效抑制拐角处的姿态振荡现象,提升焊接运动平稳性。Zhang 等^[69]提出基于改进拐角平滑策略的 C^3 连续 B 样条曲线轨迹优化与弧长同步方法;研究结果表明,该方法显著降低轨迹曲率与关节加速度,提高五轴混联机器人的焊接效率与运动平稳性。

2.3.2 离线编程技术

目前,面向复杂曲线焊接的离线编程方法主要有 3 类。

(1) 直接采用成熟的商用软件进行离线编程。该商业软件可依据工件模型自动生成高精度的机器人程序,但普遍存在价格昂贵、技术开放性差的问题。

(2) 基于通用三维 CAD 建模软件提供的应用程序编程接口进行二次开发。Kolegain 等^[70]从 CAD 模型中提取理论焊接路径,采用贝塞尔曲线拟合补偿后的路径,生成光滑的空间焊接轨迹;Tran 等^[71]将 CAD 拓扑分析与工艺规则约束相结合,开发出铝合金焊接机器人程序自动生成系统,在船体复杂节点焊接场景中实现 76%~83% 的合规程序生成率。

(3) 自主研发以 OpenGL 为代表的开放式交互模拟环境。Hong 等^[72]基于开源可视化工具包开发了全自主的空间曲线焊接离线编程系统,该系统融合曲面几何特

征生成焊枪姿态,采用双插值轨迹规划,实现了不依赖第三方 CAD 软件的复杂焊缝编程,同时支持多格式模型与开放式功能扩展;姚宇等^[73]自主研发开放式交互环境,提出基于 NURBS 光顺与多轴协同运动学的离线编程系统,该系统在复杂空间曲面焊接任务中,可在 6.82 s 内快速生成作业文件,轨迹精度达 ± 0.41 mm; Bedaka 等^[74]基于 Open Cascade 开源库开发支持 6 自由度机器人协同作业的焊接离线编程平台,该平台可通过 CAD 特征自动生成均匀分布的无碰撞焊接路径。

2.4 工艺参数优化技术

在复杂曲面焊接过程中,轴向压力、旋转速度及焊接速度等关键工艺参数需结合焊接动态状态实时调节。轴向压力直接受机器人刚度变化与曲面法向变化的耦合影响,是维持稳定摩擦生热与顶锻过程的核心参数;旋转速度决定单位时间内的热输入水平,其合理取值需与实际接触条件及下压力动态匹配;焊接速度影响局部

热积累特征,在曲率变化或姿态调整区域对焊接质量尤为敏感。因此,复杂曲面 RFSW 过程中各工艺参数间通常呈现显著耦合特性,需通过协同调节维持稳定的焊接热-力状态。

基于上述特性,RFSW 的工艺参数优化正由传统离线试验驱动模式,逐步向融合多源传感信息反馈的在线动态优化模式演进。典型技术思路是以各类传感器读取轴向力、位移、温度及功率等过程信号作为过程状态表征,通过控制算法动态实时修正转速、焊接速度及下压力,实现对复杂曲面焊接过程中热输入与材料流动状态的自适应调控,其机理过程如图 9 所示。

面向 RFSW 工艺参数优化需求,常见技术主要分为以下 3 类^[75],各方法的优缺点对比详见表 1。

(1)统计建模方法:包括田口方法(Taguchi method, TM)、响应面方法(Response surface methodology, RSM)和因子设计(Factorial design, FD)等。此类方法的核

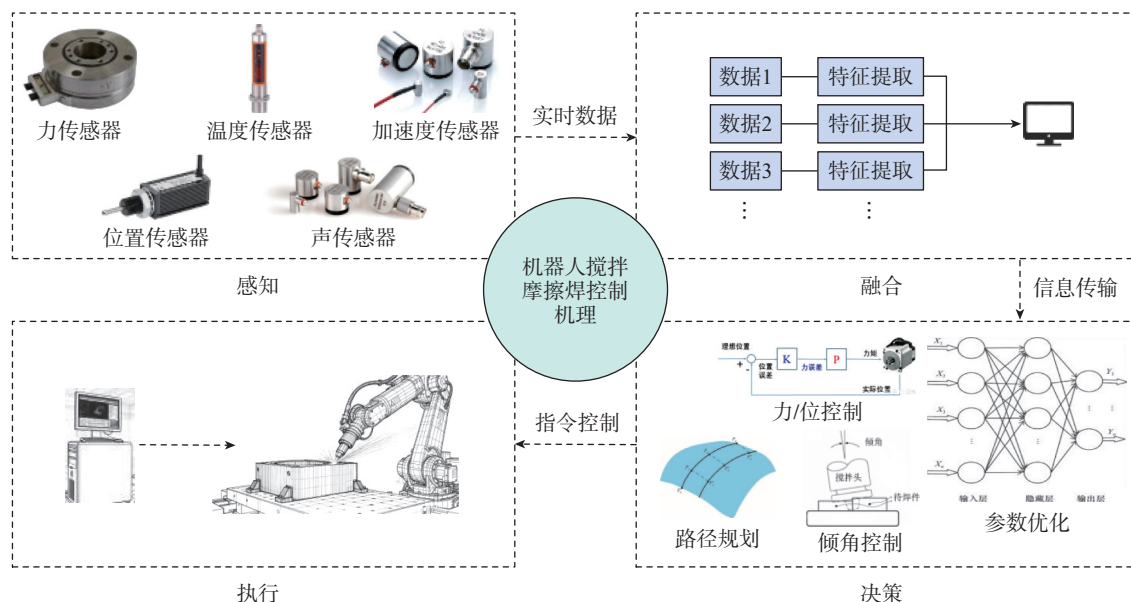


图 9 RFSW 控制机理

Fig.9 Control mechanism of RFSW

表 1 常用工艺参数优化方法及其优缺点

Table 1 Common methods for optimizing process parameters and their advantages and disadvantages

优化方法类别	常见方法	优点	缺点	适用场景
统计方法	田口法 (TM)、响应面法 (RSM)、全/部分因子试验设计	试验次数少、分析方便、快速筛选关键参数	一般只能优化单一响应 容易陷入局部最优 可能忽略因素间交互作用	初步参数筛选、试验条件受限、响应数量较少时
人工智能方法	人工神经网络 (ANN)、支持向量机 (SVM)、遗传算法 (GA)、粒子群优 (PSO)、模糊逻辑 (FL)	适用于复杂非线性、多变量系统、可实施多目标优化	需大量训练数据和计算资源、结果难以解释	数据量大、精度要求高、多目标优化时
混合方法	Taguchi-AN、RSM-AN、RSM-PSO 等	兼顾统计方法和 AI 方法优点、可同步优化多个响应	模型结构与实现复杂 对试验设计和算法参数要求高	焊缝性能要求严格、需同时优化多项指标时

心思路是通过试验设计与试验数据分析,建立工艺参数与焊接质量指标之间的统计模型,为焊接参数优化提供量化指导。

(2) 人工智能方法: 涵盖人工神经网络 (Artificial neural network, ANN)、机器学习 (Machine learning, ML) 与模糊逻辑 (Fuzzy logic, FL) 等。这些方法具备强非线性关系处理能力,常用于精准预测焊接结果并筛选最优焊接参数组合。

(3) 混合优化方法: 融合统计建模与人工智能的核心优势,典型组合包括田口方法-人工神经网络 (Taguchi-ANN)、响应面方法-粒子群优化 (Response surface methodology-particle swarm optimization, RSM-PSO)、响应面方法-人工神经网络 (RSM-ANN) 等,可兼顾试验可靠性与非线性寻优效率。

合理设置工艺参数对 RFSW 至关重要。这些参数直接影响焊接过程中的材料塑性流动行为与热输入量,进而显著影响焊缝的微观组织、缺陷形成情况及最终力学性能。

围绕 RFSW 接头性能对热/力耦合输入高度敏感这一特点,工艺参数优化研究总体从“单指标试错”转向“多目标、数据驱动与智能寻优”的集成框架。一方面,田口法-灰关联分析、响应面法及熵权等被用于在转速、焊速、轴肩/搅拌针几何与偏移量等多因素耦合作用下,实现强度、硬度等指标的综合最优,并普遍指出转速/热输入相关因子常为主导变量、工具几何参数对材料流动与成形稳定性具有关键作用^[76-78];在此基础上,结合熵权赋权的 RSM-GRA 等混合模型进一步提升了异种铝合金工况下的参数优选可靠性与强度响应水平^[79]。另一方面, BP 神经网络、ANN-GA 及优化神经网络等方法通过建立“参数-过程-性能”映射关系,可实现

对抗拉强度/接头效率的高精度预测与全局寻优,尤其在异种材料 (如 Al/Cu、AA2024/AA6061) 与厚板工况中可显著提升接头效率并给出可操作的最优参数组合。总体而言,现有方法已从经验型参数窗口确定,发展为面向工程应用的多目标评价+智能算法联合优化路径,为机器人平台下抑制刚度不足导致的热输入波动、提升焊缝一致性提供了有效支撑^[80-82]。

现有关于搅拌摩擦焊工艺参数优化的研究多以平板或简单几何构型为对象,主要集中于离线条件下焊接参数与接头性能之间关系的建模与优化,这些研究为 RFSW 参数初始设定及优化方法选取提供了重要参考。

3 智能传感与工艺增强技术

3.1 智能传感技术

3.1.1 在线过程传感技术

在 RFSW 作业中,焊接质量与工艺稳定性在很大程度上取决于对焊接状态的实时感知与反馈控制。为此,研究者们致力于开发各类在线传感技术,用以采集多维度的过程参数和状态信号,为工艺监控、缺陷预测及智能控制策略的构建提供数据支撑。依据传感原理、监测信号类型及安装方式,这些传感器主要分为力传感器、温度传感器、加速度传感器和声发射传感器等。表 2 总结了常用于 RFSW 在线监测的传感器类型、监测参数、典型应用及优缺点,可为不同应用场景下的传感器选型与系统集成提供参考。

3.1.2 多传感器信息融合技术

多传感器信息融合技术是指对来自多种监测设备的信号进行集成与处理,生成单一且连贯的输出,从而提升复杂工况下的检测精度与鲁棒性^[92]。信息融合通常在 3 个层次实现,分别为传感器级 (原始信号对齐与直接联

表 2 RFSW 常用传感器类型及优缺点对比

Table 2 Comparison of common sensor types in RFSW and their advantages/disadvantages

传感器类型	监测参数	功能	优点	缺点
力传感器 ^[83-84]	轴向力、横向力、扭矩	材料流动监测、缺陷预测	响应速度快,信号直接反映工艺状态;适合在线监控	易受机床/机器人刚度影响;对噪声敏感,需要滤波
温度传感器 ^[85-86]	温度场分布	热输入控制、组织演变分析	测量精度高 (热电偶);非接触测量方便 (红外)	热电偶安装复杂;红外易受表面辐射率变化影响
加速度传感器 ^[87-88]	振动信号	工具磨损、材料不均检测	能捕捉高频瞬态信号;体积小、安装灵活	信号与缺陷关系需复杂分析;对安装位置敏感
声发射传感器 ^[89-90]	高频声波信号	裂纹产生、塑性流动异常检测	对早期缺陷高度敏感;实时性好	易受环境噪声干扰;需要专业特征提取与模式识别
视觉传感器 ^[55]	表面形貌、焊缝几何	表面质量检测、尺寸测量	非接触测量,直观可视化;适合机器人集成	对光照、反射率敏感;仅限检测表面缺陷
位置传感器 ^[91]	工具位移、倾角、旋转速度	路径与姿态监控	精度高;与机器人控制系统易集成	仅提供运动数据,需与其他传感器结合判断质量

合)、特征级(各通道特征提取后联合建模)与决策级(各传感器独立判定后结果融合)。常用的信号处理与融合方法包括滤波与时序同步、时域/频域/时频特征提取、统计特征提取与图像纹理分析;在建模方面,可运用卡尔曼滤波及其变体、贝叶斯与置信理论、传统机器学习及深度学习等方法,以实现焊接过程的在线判别或回归预测。

Rajasheka 等^[93]通过机器视觉相机和声发射传感器,首次融合图像纹理参数与 AE 特征值,建立了针对 AA6082-T4 铝合金的 FSW 质量分级模型,可有效区分高强焊缝、低强焊缝及缺陷区域。Sahu 等^[94]通过轴向力与扭矩传感器的实时监测,结合榫卯结构开槽基板与螺纹搅拌针策略,实现了 6063 铝-聚丙烯异种材料的搅拌摩擦焊,接头效率最高达 23.33%。Liao 等^[95]通过蚁群优化特征选择与 K 近邻分类器,基于多信号的离散小波特征,实现了 AA2219-T87 搅拌摩擦焊焊缝质量的高精度三分类,准确率达 98.85%。Mishra 等^[96]融合力、扭矩和功率传感器的多源监测数据,结合离散小波变换与人工神经网络,开发了基于云的搅拌摩擦焊实时控制系统,成功将焊缝强度预测误差降至 4.44%,并实现焊接工艺参数的动态优化。叶赵伟^[97]通过融合红外测温、振动加速度与声发射传感器,构建了基于 LabVIEW 平台的多传感在线监测系统,实现了 SiC_p/Al 复合材料搅拌摩擦焊过程中搅拌头磨损状态的实时识别,识别准确率达 83.9%。Das 等^[98]采用力/转速传感器的两级融合策略,结合支持向量机回归模型,实现了 AA1100 铝合金搅拌摩擦焊接头强度的高精度预测,预测准确度达 99.16%。

多传感器融合技术可显著提升焊接过程监测的鲁棒性与判定结果的置信度,也会导致系统复杂度增加与多源信号同步难度提升;深度学习算法虽能有效增强焊缝质量识别性能,但其对高质量标注数据和高性能计算资源的依赖性较强,且模型可解释性不足。

3.2 工艺增强技术

3.2.1 辅助热源技术

对于碳钢、不锈钢等高熔点金属材料,因其熔点高、硬度大,仅依靠传统搅拌摩擦焊所产生的机械搅拌作用与摩擦热输入,往往难以达成充分的塑性软化与连续稳定的材料流动,进而限制了高质量焊接接头的制备。针对上述问题,近年来研究者逐步提出将搅拌摩擦焊与其他能量形式相结合的技术思路,相继开展了电阻热辅助搅拌摩擦焊、激光辅助搅拌摩擦焊、电弧辅助搅拌摩擦焊和超声辅助搅拌摩擦焊等复合焊接工艺的相关研究。

Luo 等^[99]通过引入直流电构成电阻-摩擦复合热源,实现了 AZ31B 镁合金的电阻热辅助搅拌摩擦焊;结果表明,该工艺有效细化了焊核区与热机械影响区的晶

粒,改善了焊缝表面成形质量;研究证实,电阻热辅助搅拌摩擦焊可通过提高热输入与增强材料塑性,显著改善焊缝表面成形质量。Fei 等^[100]建立了激光辅助搅拌摩擦焊的热-流耦合模型并开展试验验证,实现了 Q235 钢板的激光预热辅助搅拌摩擦焊接;研究表明,激光辅助 FSW 不仅可改善 Q235 钢焊接接头质量,还能显著降低搅拌头磨损、延长搅拌头寿命。Li 等^[101]采用气体钨极电弧偏置预热辅助搅拌摩擦焊,改善了 2219-T87 铝合金焊接过程中前进侧的材料流动性,减少了组织过渡梯度,显著提升了接头拉伸强度,同时降低了硬度不均匀性。Thomä 等^[102]采用超声增强搅拌摩擦焊技术,在 AA6061/SAE1006 异种接头中实现了焊核区细化与 FeAl₃ 金属间化合物层减薄,使接头抗拉强度提升约 15%。

复合搅拌摩擦焊通过引入外部辅助热源或能量场,有效克服了传统单一热源在焊接高熔点、高硬度金属材料时存在的热输入不足、材料流动不均等技术局限。上述研究结果表明,电阻热辅助、激光预热辅助、电弧偏置辅助及超声振动辅助等复合工艺手段,均在不同程度上改善了焊接区的塑性流动状态与界面结合质量,促进了晶粒细化,提升了接头力学性能,同时有效抑制了焊接缺陷的形成与金属间化合物的过度生长。

3.2.2 搅拌头创新与智能设计

搅拌头作为搅拌摩擦焊的核心组件,其材料性能、几何构型与尺寸参数直接决定焊缝成形质量与接头力学性能。由于搅拌针在焊接过程中同时承受高温、大载荷及剧烈摩擦,其材质须具备显著高于母材的熔点、红硬性、高温强度及动态力学性能。经过二十余年的研究与发展,搅拌头的选材与结构设计已逐步呈现标准化、系列化与多样化趋势。在材料选择方面,针对钢、铜、钛等高熔点金属的焊接,常采用钨钼合金、聚晶立方氮化硼及金属陶瓷等高性能材料;而焊接铝、镁等低熔点合金时,则多选用工具钢与模具钢^[103]。在结构设计方面,面向低刚度平台,优先采用能够平衡轴向反力或降低过程力的工具构型:一是自反力/双肩搅拌头,通过上下肩协同作用实现热输入与约束的对称化,可显著降低对设备与夹具刚度的要求,还有利于抑制根部缺陷与厚度方向不均匀成形;二是定肩/静止肩搅拌头,通过减弱肩面对材料排挤与扰动的参与,具备降低过程力、改善表面成形的潜力,但对工艺窗口与控制一致性的要求更高^[4]。

4 结论与展望

4.1 结论

机器人搅拌摩擦焊技术持续向高性能、智能化方向演进,主要体现在系统构型、控制策略和感知监控 3 方面。

(1) RFSW 的系统构成。现有 RFSW 由串联、并联

向混联架构发展。串联构型工作空间大、轨迹灵活,但刚度与负载能力有限;并联构型刚度高、承载能力强,却受限于工作空间与运动学复杂性。混联构型融合二者优势,在保持较大可达范围的同时显著提升刚度,更好适应航空航天等领域大型复杂曲面的焊接需求。

(2) 协同控制技术。控制策略已由早期开环预编程逐步转向以力/位混合为核心的闭环调控框架,并结合焊缝跟踪、路径补偿与姿态约束以应对曲面法向变化与机器人柔顺性带来的力/位误差;轨迹平滑与离线编程则用于提升复杂三维焊缝的运动连续性与可执行性,从而降低扰动对成形质量的影响。

(3) 智能传感技术。多源传感与智能监控技术推动了工艺稳定性和质量可追溯性的提升。系统集成力/力矩、激光测距等传感器,实现关键工艺参数实时闭环调控。结合超声相控阵、声发射等在线检测手段,可在焊接过程中同步识别缺陷。通过多源数据融合与智能分析,构建了涵盖过程调控、缺陷识别与质量溯源的数字化监控体系,逐步实现从“经验驱动”到“数据驱动”的转变。

4.2 展望

未来 RFSW 技术将围绕核心优先级任务与长期探索方向双线推进。核心优先级聚焦 3~5 年关键突破,一是高刚度-轻量化协同设计,通过碳纤维与金属混合臂体结构、压电作动器主动调控及数字孪生仿真,解决重载工况下变形与惯性扰动问题;二是复杂曲面高速焊接稳定性控制,依托超高速总线驱动、 G^4 连续轨迹规划及 AI 大模型优化,抑制振动与轨迹偏差;三是智能闭环控制体系,构建“力-热-声-视觉”多模态传感网络,结合 Transformer 模型实现缺陷早期识别与实时补偿。

长期探索方向聚焦 5~10 年前瞻布局,包括极端环境适配技术、异种材料与超厚板焊接工艺创新,以及模块化移动式装备研发。该方向全程深度融合数字孪生、工业互联网与 AI 大模型,通过虚拟仿真优化、海量数据协同及智能决策调度,推动 RFSW 从“程序化操作”向“认知型制造”转型,精准匹配航空航天、新能源汽车等领域的高端制造需求,最终实现技术工业化与规模化应用。

参考文献

- [1] MAGALHÃES V M, LEITÃO C, RODRIGUES D M. Friction stir welding industrialisation and research status[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(5): 400-409.
- [2] SEN M, PURI A B. Automation in friction stir welding: A new era of fabrication techniques[M]//KUMAR A, KUMAR P, AZIZI A. Advances in Mechatronics Systems: Principles, Elements and Applications. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 83-106.
- [3] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J].

Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005, 50(1-2): 1-78.

- [4] WANG G Q, ZHAO Y H, TANG Y Y. Research progress of bobbin tool friction stir welding of aluminum alloys: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020, 33(1): 13-29.

- [5] RICHTER B. Robot-based friction stir welding for E-mobility and general applications[J]. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2017, 2017(5): 103-110.

- [6] 王月, 王海瑞, 郭晓娟, 等. 搅拌摩擦焊接机器人的研究现状与发展趋势[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(4): 1-8.

WANG Yue, WANG Hairui, GUO Xiaojuan, et al. Research status and development trend of friction stir welding robot[J]. Techniques of Automation and Applications, 2021, 40(4): 1-8.

- [7] LI P, ZHONG W, GUO L J, et al. Development of portable friction stir welding equipment for in-space manufacturing[C]//Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering 2021. Singapore: Springer, 2023: 663-679.

- [8] 田威, 焦嘉琛, 李波, 等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 341-352.

TIAN Wei, JIAO Jiachen, LI Bo, et al. High precision robot operation equipment and technology in aerospace manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 341-352.

- [9] WAHIDI S I, OTERKUS S, OTERKUS E. Robotic welding techniques in marine structures and production processes: A systematic literature review[J]. Marine Structures, 2024, 95: 103608.

- [10] 张昊, 黄永德, 郭跃, 等. 适用于机器人焊接的搅拌摩擦焊技术及工艺研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(1): 128-134.

ZHANG Hao, HUANG Yongde, GUO Yue, et al. Technological and process advances in robotic friction stir welding[J]. Materials Reports, 2018, 32(1): 128-134.

- [11] CHEN C, PENG F Y, YAN R, et al. Stiffness performance index based posture and feed orientation optimization in robotic milling process[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 29-40.

- [12] 刘永宁. 薄壁金属零件机器人搅拌摩擦焊接工艺参数优化与控制方法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.

LIU Yongning. Research on optimization and control method of FSW process parameters for thin-walled metal parts robot[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023.

- [13] MENDES N, NETO P, SIMÃO M A, et al. A novel friction stir welding robotic platform: Welding polymeric materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4): 37-46.

- [14] 王子德. 机器人搅拌摩擦焊系统集成及焊缝自动跟踪研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

WANG Zide. Research on robotic friction stir welding system integration and seam tracking[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

- [15] DE BACKER J. Robotic friction stir welding for flexible production[J]. Quim Nova, 2012, 33(2): 263-268.

- [16] SMITH C B, HINRICHS J F, CRUSAN W A. Robotic friction stir welding: State of the art[J]. Materials Science, 2003: 10-21.

- [17] 李志伟. 混联机器人搅拌摩擦焊力-位复合控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.

LI Zhiwei. Research on combined force-position control system in hybrid robotic friction stir welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

- [18] ANTONOV A. Parallel-serial robotic manipulators: A review of architectures, applications, and methods of design and analysis[J]. *Machines*, 2024, 12(11): 811.
- [19] LUO H T, FU J, WANG P, et al. Design optimization of the ram structure of friction stir welding robot[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2020, 27(2): 108–118.
- [20] BALAJI V A, AJAY G, DOSS A S A, et al. Analysis of robotic arm for friction stir welding application[M]//Recent Advances in Materials Technologies. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 371–386.
- [21] 宛敏红, 周维佳, 骆海涛, 等. 高精度重载搅拌摩擦焊机器人设计与运动控制[J]. *机器人*, 2018, 40(6): 817–824, 834.
- WAN Minhong, ZHOU Weijia, LUO Haitao, et al. Design and motion control of the high precision heavy load friction stir welding robot[J]. *Robot*, 2018, 40(6): 817–824, 834.
- [22] ZHAO J, DUAN Y X, XIE B Y, et al. FSW robot system dimensional optimization and trajectory planning based on soft stiffness indices[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 63: 88–97.
- [23] KANG C F, JIA H N, ZHAO E Y, et al. Development of an improved stiffness ellipsoid method for precise robot-positioner collaborative control in friction stir welding[J]. *Materials*, 2025, 18(8): 1852.
- [24] 肖聚亮, 王能, 刘海涛, 等. 基于刚度最优区间的机器人搅拌摩擦焊工件位置优化方法[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(11): 22–31.
- XIAO Juliang, WANG Neng, LIU Haitao, et al. Optimization method of position of robot friction stir welding parts based on optimal stiffness interval[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(11): 22–31.
- [25] ZHANG Z K, MENG Q Z, CUI Z W, et al. Machine learning applications in parallel robots: A brief review[J]. *Machines*, 2025, 13(7): 565.
- [26] CHAI X X, ZHANG N B, HE L Y, et al. Kinematic sensitivity analysis and dimensional synthesis of a redundantly actuated parallel robot for friction stir welding[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33: 1.
- [27] ZOU Q, YI B J, ZHANG D, et al. Design and kinematic analysis of a novel planar parallel robot with pure translations[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 9792–9809.
- [28] PENG S Y, DU L, CHE L X, et al. Dimensional multi-objective optimization design for 2RPU-RPS parallel mechanism[J]. *Robotica*, 2025, 43(3): 1087–1109.
- [29] MARLIANA E, NURAHMI L, WAHJUDI A, et al. Design optimization of a 3-PUU parallel machine for friction stir welding robots[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 23888–23901.
- [30] WU J, QIU J H, YE H. Torque optimization method of a 3-DOF redundant parallel manipulator based on actuator torque range[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2023, 15(2): 021005.
- [31] MO S, HU Y J, HUANG T J, et al. Dynamic modeling and performance analysis of a new friction stir welding parallel robot[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2025, 210: 106030.
- [32] YUE W, LIU H T, HUANG T. An approach for predicting stiffness of a 5-DOF hybrid robot for friction stir welding[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 175: 104941.
- [33] SUN T, WU H, LIAN B B, et al. Stiffness modeling, analysis and evaluation of a 5 degree of freedom hybrid manipulator for friction stir welding[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(23): 4441–4456.
- [34] DARDOURI F, ABBA G, SEEMANN W. Parallel robot structure optimizations for a friction stir welding application[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Madrid: Science and Technology Publications, 2017: 372–381.
- [35] 赵慧慧, 李志伟, 王子德, 等. 混联机器人搅拌摩擦焊接系统集成研究[J]. *电焊机*, 2022, 52(1): 1–6.
- ZHAO Huihui, LI Zhiwei, WANG Zide, et al. Research on integration of hybrid robot friction stir welding system[J]. *Electric Welding Machine*, 2022, 52(1): 1–6.
- [36] LI Q C, WU W F, XIANG J N, et al. A hybrid robot for friction stir welding[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015, 229(14): 2639–2650.
- [37] PRATAP KUMAR J, RAJ A, ARUL K, et al. A literature review on friction stir welding of dissimilar materials[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47: 286–291.
- [38] ABD ELNABI M M, OSMAN T A E, EL MOKADEM A E, et al. Mechanical properties and microstructure of dissimilar friction stir welding of pure aluminum to low carbon steel[J]. *Advanced Journal of Graduate Research*, 2018, 4(1): 47–58.
- [39] ZAEH M F, VOELLNER G. Three-dimensional friction stir welding using a high payload industrial robot[J]. *Production Engineering*, 2010, 4(2–3): 127–133.
- [40] DAS H, SHUKLA S, UPADHYAY P. High-speed robotic friction stir lap welding of three stack aluminum alloy assembly for automotive applications[J]. *Manufacturing Letters*, 2025, 45: 36–40.
- [41] THOMAS W M, NICHOLAS E D. Friction stir welding for the transportation industries[J]. *Materials & Design*, 1997, 18(4–6): 269–273.
- [42] DE BACKER J D B, SORON J, SORON M, et al. Friction stir welding with robot for light weight vehicle design[C]//Proceedings of the 8th International Friction Stir Welding Symposium Timmendorfer Strand: TWI, 2010.
- [43] 辛杨桂, 高世一, 赵运强, 等. 机器人搅拌摩擦焊接力-位混合控制的应用研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(8): 91–98.
- XIN Yanggui, GAO Shiyi, ZHAO Yunqiang, et al. Research and application of force-position mixed-control of robotic friction stir welding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(8): 91–98.
- [44] 于占良. 搅拌摩擦焊机器人刚度分析及误差补偿模型研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
- YU Zhanliang. Research on stiffness and error compensation model of friction stir welding robot[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [45] MENDES N, NETO P, LOUREIRO A. Robotic friction stir welding aided by hybrid force/motion control[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA). Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1–4.
- [46] KAMM V, LECHLER A, VERL A. High bandwidth force control for robotic friction stir welding[C]//2024 7th Iberian Robotics Conference (ROBOT). Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 1–7.
- [47] MEYER S P, BERNAUER C J, GRABMANN S, et al. Design, evaluation, and implementation of a model-predictive control approach for a force control in friction stir welding processes: Validation of different force-control approaches for friction press joining of aluminum with thermoplastics[J]. *Production Engineering*, 2020, 14(4): 473–489.
- [48] QI R L, ZHOU W J, ZHANG H J, et al. Trace generation of friction stir welding robot for space weld joint on large thin-walled parts[J].

Industrial Robot, 2016, 43(6): 617–627.

[49] KARLSSON M, BAGGE CARLSON F, HOLMSTRAND M, et al. Robotic friction stir welding–seam-tracking control, force control and process supervision[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2023, 50(5): 722–730.

[50] GUILLO M, DUBOURG L. Impact & improvement of tool deviation in friction stir welding: Weld quality & real-time compensation on an industrial robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 39: 22–31.

[51] QIN J N, LÉONARD F, ABBA G. Real-time trajectory compensation in robotic friction stir welding using state estimators[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(6): 2207–2214.

[52] XIAO J L, WANG M L, LIU H T, et al. A constant plunge depth control strategy for robotic FSW based on online trajectory generation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 80: 102479.

[53] KOLEGAIN K, LÉONARD F, CHEVRET S, et al. Robotic friction stir welding path planning with deflection compensation using B-splines[M]//ROMANSY 22–Robot Design, Dynamics and Control. Cham: Springer International Publishing, 2018: 264–271.

[54] SUN Y B, XIAO J L, LIU H T, et al. Deformation prediction based on an adaptive GA-BPNN and the online compensation of a 5-DOF hybrid robot[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2020, 47(6): 915–928.

[55] DE BACKER J, CHRISTIANSSON A K, OQUEKA J, et al. Investigation of path compensation methods for robotic friction stir welding[J]. Industrial Robot, 2012, 39(6): 601–608.

[56] ABDULLAH M E, ROHIM M N M, MOHAMMED M M, et al. Effects of partial-contact tool tilt angle on friction stir welded AA1050 aluminum joint properties[J]. Materials, 2023, 16(11): 4091.

[57] TANG M N, YAN Y G, AN B, et al. Dynamic parameter identification of collaborative robot based on WLS-RWPSO algorithm[J]. Machines, 2023, 11(2): 316.

[58] LIU L J, ZHANG Y K, WEI B, et al. Identification algorithm for stability improvement of welding robot end-effector[J]. Actuators, 2024, 13(5): 175.

[59] XIAO X, MAO Y, WANG X C, et al. Effects of curvature direction on friction stir welding lap joint of aluminum alloy “S” curved surface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(9–10): 4693–4705.

[60] CHENG B, DONG B L, CHEN S J, et al. The effect of process parameters during the insertion phase of robotic friction stir welding on axial force[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 137(1–2): 951–963.

[61] YUE W, LIU H T, LI G X. An approach for optimizing the posture of a friction stir welding robotized equipment[M]//Advances in Mechanism, Machine Science and Engineering in China. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 1611–1631.

[62] TSARKOV A, TRUKHANOV K, ZYBIN I, et al. Tilt angle effect on friction stir welding conditions[J]. Key Engineering Materials, 2022, 910: 115–122.

[63] LI G X, REN Z Z, YUE W, et al. An effective path planning approach for robot welding considering redundant kinematics[J]. Precision Engineering, 2024, 91: 462–475.

[64] HE G, TEO H H, MOEY L K. Review of path planning of

welding robot based on spline curve[J]. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 2024: 9928–9948.

[65] ZHOU Y S, HAN G R, WEI Z A, et al. Optimal trajectory planning of robot energy consumption based on improved sparrow search algorithm[J]. Measurement and Control, 2024, 57(7): 1014–1021.

[66] MA F, SUN W W, JIANG Z X, et al. Industrial robot trajectory optimization based on improved sparrow search algorithm[J]. Machines, 2024, 12(7): 490.

[67] YIN Y, LUO J X, LI Y C. Robot welding posture optimization method based on genetic algorithm[C]//2024 4th International Symposium on Artificial Intelligence and Intelligent Manufacturing (AIIM). Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 192–198.

[68] SHI Z K, ZHANG W J, DING Y. A local toolpath smoothing method for a five-axis hybrid machining robot[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66(3): 721–742.

[69] ZHANG S Q, SHI Z K, DING Y. Toolpath smoothing with reduced curvature and synchronized motion for hybrid robots[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 109: 181–197.

[70] KOLEGAIN K, LEONARD F, CHEVRET S, et al. Off-line path programming for three-dimensional robotic friction stir welding based on Bézier curves[J]. Industrial Robot, 2018, 45(5): 669–678.

[71] TRAN T A, NJÅSTAD E B, MIDLING O T, et al. Generation of rule-adhering robot programs for aluminium welding automatically from CAD[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(3–4): 1175–1187.

[72] HONG L, WANG B S, XU Z Q, et al. Research on off-line programming method of spatial intersection curve welding based on VTK[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5–6): 1587–1599.

[73] 姚宇, 张秋菊, 陈宵燕, 等. 复杂空间曲面焊接机器人自动编程系统[J]. 焊接学报, 2023, 44(5): 122–128.

YAO Yu, ZHANG Qiuju, CHEN Xiaoyan, et al. Automatic programming system of complex space trajectory welding robot[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(5): 122–128.

[74] BEDAKA A K, LIN C Y. CAD-based offline programming platform for welding applications using 6-DOF and 2-DOF robots[C]//2020 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS). Taipei, 2020: 1–4.

[75] PRABHAKAR D A P, KORGAL A, SHETTIGAR A K, et al. A review of optimization and measurement techniques of the friction stir welding (FSW) process[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2023, 7(5): 181.

[76] SABRY I, ELWAKIL M, HEWIDY A M. Multi-weld quality optimization of friction stir welding for aluminium flange using the grey-based taguchi method[J]. Management and Production Engineering Review, 2024, 15: 42–56.

[77] HERAMO W T, WORKNEH H Z. Optimization of process parameters in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys (AA6061–T6 and AA5052–H32)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(9–10): 4473–4489.

[78] AY M, SARSILMAZ F. Optimization of friction stir welding process parameters using multi-criteria decision making approach[J]. Materials Testing, 2023, 65(4): 603–615.

[79] VIJAYAN D, RAO V S. A parametric optimization of FSW

process using RSM based grey relational analysis approach[J]. International Review of Mechanical Engineering IREME, 2014, 8(2): 328–337.

[80] YU F Q, ZHAO Y Q, LIN Z C, et al. Prediction of mechanical properties and optimization of friction stir welded 2195 aluminum alloy based on BP neural network[J]. Metals, 2023, 13(2): 267.

[81] YANG B H, LU X H, SUN S X, et al. Tensile strength prediction and process parameters optimization of FSW thick AA2219–T8 based on ANN-GA[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(7): 388.

[82] ALI GUVENC M, EREN B, BASAR G, et al. A new hybrid meta-heuristic optimization method for predicting UTS for FSW of Al/Cu dissimilar materials[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237(20): 4726–4738.

[83] GUAN W, LI D X, CUI L, et al. Detection of tunnel defects in friction stir welded aluminum alloy joints based on the in-situ force signal[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 71: 1–11.

[84] ESLAMI S, MOURÃO L, VIRIATO N, et al. Multi-axis force measurements of polymer friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 256: 51–56.

[85] SHAO Y, SUN Y J, GUO P Y, et al. Thermomechanical behavior and microstructural characteristics of 7055 aluminum alloy during friction stirring welding[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107703.

[86] GIM J, CHO M, KIM J, et al. Design and application of wireless tool temperature measurement of friction stir welding (FSW) for process monitoring and control[J]. Measurement, 2025, 252: 117395.

[87] BALACHANDAR K, JEGADEESHWARAN R. Friction stir welding tool condition monitoring using vibration signals and Random forest algorithm—A Machine learning approach[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 1174–1180.

[88] KRISHNAMURTHY B, RAKKIANNAN J, JAKKAMPATTI L, et al. Condition monitoring of FSW tool using statistical approach[J]. Proceedings of the TIM20–21 Physics Conference, 2023, 2843: 050006.

[89] AMBROSIO D, DESSEIN G, WAGNER V, et al. On the potential applications of acoustic emission in friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 75: 461–475.

[90] 孙屹博, 龙海威, 邹丽, 等. 基于声发射多特征融合的搅拌摩擦焊缺陷监测[J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 96–101, I0008, I0009.

SUN Yibo, LONG Haiwei, ZOU Li, et al. Defecting monitored of friction stir welding based on acoustic emission multi-feature fusion[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(6): 96–101, I0008, I0009.

[91] LI Z W, ZHAO H H, ZHANG X C, et al. Multi-parameter sensing of robotic friction stir welding based on laser circular scanning[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 89: 92–104.

[92] AKBARI M, HASSANZADEH E, SAVARIPOUR H. Real-time monitoring of friction stir welding: A review of current practices[J]. Welding in the World, 2026, 70(3): 969–1010.

[93] RAJASHEKAR R, RAJAPRAKASH B M. Development of a model for friction stir weld quality assessment using machine vision and acoustic emission techniques[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 265–274.

[94] SAHU S K, PAL K, MAHTO R P, et al. Monitoring of friction stir welding for dissimilar Al6063 alloy to polypropylene using sensor signals[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1–4): 159–177.

[95] LIAO T W, ROBERTS J, WAHAB M A, et al. Building a multi-signal based defect prediction system for a friction stir welding process[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 38: 1775–1791.

[96] MISHRA D, GUPTA A, RAJ P, et al. Real time monitoring and control of friction stir welding process using multiple sensors[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 30: 1–11.

[97] 叶赵伟. SiC_p/Al复合材料FSJ在线监测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

YE Zhaowei. Research on on-line monitoring technology for FSJ of SiC_p/Al composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[98] DAS B, RAMON J. Sensor fusion model for weld quality monitoring in friction stir welding process using machine learning technique[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2023, 237(6): 2547–2556.

[99] LUO J, LI F, CHEN W. Experimental researches on resistance heat aided friction stir welding of Mg alloy[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2013, 31(4): 65s–68s.

[100] FEI X J, WU Z F. Research of temperature and microstructure in friction stir welding of Q235 steel with laser-assisted heating[J]. Results in Physics, 2018, 11: 1048–1051.

[101] LI X X, CHEN S J, YUAN T, et al. Improving the properties of friction stir welded 2219–T87 aluminum alloy with GTA offset preheating[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 51: 10–18.

[102] THOMÄ M, WAGNER G, STRAB B, et al. Ultrasound enhanced friction stir welding (USE-FSW) of hybrid aluminum/steel joints[M]//Friction Stir Welding and Processing X. Cham: Springer International Publishing, 2019: 23–32.

[103] 杨坤玉, 袁朝桥, 彭彬, 等. 搅拌摩擦焊近20年研究与发展情况概述[J]. 焊接, 2020(1): 21–28.

YANG Kunyu, YUAN Zhaoqiao, PENG Bin, et al. Overview of research and development of friction stir welding in the past 20 years[J]. Welding & Joining, 2020(1): 21–28.

(责编 阳光)