

● 专稿

搅拌摩擦焊接与加工技术进展

赵衍华¹ 张粟泓¹ 王非凡² 郝云飞¹ 宋建岭¹ 孙世烜¹ 王国庆^{3*}

(1. 首都航天机械有限公司, 北京 100076; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;

3. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048)

摘要: 搅拌摩擦焊接技术 (Friction Stir Welding) 自上世纪 90 年代发明以来, 迅速在航空、航天、船舶、轨道交通等领域得到了广泛关注和应用, 成为 21 世纪影响最为深远的焊接技术之一。近年来, 以搅拌摩擦加工/增材制造 (Friction Stir Processing/Additive Manufacturing) 为代表的一系列固相加工技术进一步丰富了搅拌摩擦的技术内涵。本文主要介绍了搅拌摩擦焊接和加工技术的研究进展, 结合近年国内取得的技术突破和装备发展现状, 探讨了理论和工程应用面临的技术挑战及其未来的发展方向。

关键词: 搅拌摩擦焊接; 搅拌摩擦加工; 搅拌摩擦增材制造; 自动化装备

中图分类号: V261 **文献标识码:** A

The Development of Friction Stir Welding and Processing Technologies

Zhao Yanhua¹ Zhang Suhong¹ Wang Feifan² Hao Yunfei¹ Song Jianling¹ Sun Shixuan¹ Wang Guoqing^{3*}

(1. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076; 2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076; 3. China Aerospace Science and Technology Corp., Beijing 100048)

Abstract: Friction stir welding (FSW) has been made one of the most impactful welding technologies in the 21st century with its application in fields such as aerospace, shipbuilding, rail transportation etc. Meanwhile, a series of solid state processing technologies, represented by friction stir processing (FSP) and friction stir additive manufacturing (FSAM), have further enriched the technical scope of friction stir technologies. These technologies surge with the demand for lightweight joining, solid-state surface processing, and sophisticated large-scale structure building. This article primarily introduces the domestical research progress of friction-stir-based technologies. The major technical challenges, recent breakthroughs, as well as the key future development directions in China are explored.

Key words: friction stir welding; friction stir processing; friction stir additive manufacturing; automated equipment

1 引言

搅拌摩擦焊接 (Friction Stir Welding, FSW) 被认为是焊接领域近三十年来最为重大的技术突破。由于其固相焊、低能耗、易于自动化等特性, 搅拌摩擦焊接被广泛用于铝、镁、铜等有色金属材料的高性能

焊接制造, 具有其他焊接方法无可比拟的优越性。如今搅拌摩擦已从单纯的焊接拓展到加工成形等制造领域。其中, 搅拌摩擦点连接技术^[1]、搅拌摩擦挤出^[2]、搅拌摩擦隧道成形^[3]、搅拌摩擦增材制造^[4]等一系列技术, 已成为近年来国内外制造技术的研究热点^[5-6]。国内对搅拌摩擦焊接的研究虽起步较晚, 但发展迅

速, 现已达到国际先进水平。2003年4月, 中国第一台FSW设备研制成功^[7]。2006年, 首台大型带筋壁板拼焊设备研制成功, 用于某型舰船壁板的批量化制造^[8]。2007年, 国产的铝合金型材FSW拼焊装备出口新加坡, 首次实现装备出口。2009年, 使用FSW焊接贮箱的运载火箭通过飞行考核^[9]; 同年, 使用FSW焊接的地板组件首次用于某大型军机^[10]。2010年, 采用FSW的地铁客车GZML3E下线, 是首次国内FSW的轨道交通应用^[11]。2015年, 首个国内汽车(比亚迪)铝合金电池托盘采用搅拌摩擦焊接^[12]。如今, 搅拌摩擦焊接已经形成了完整的产业链和国内市场, 装备/产线/产品等出口数十个国家, 经济和社会效益显著。

专利等知识产权申请量从侧面反映了国内搅拌摩擦焊接与加工技术的关注度, 如图1所示。1995~2005年, 萌芽阶段的中国搅拌摩擦焊技术的专利申请量、授权量均较少, 其中, 2004年国内研究单位申请了首件实用新型专利^[13]。随着被工程应用端逐步认可和新型衍生技术的不断创新, 2006年起专利申请量逐年增长, 2019年前后达到了高峰期。随着技术趋于成熟, 近年专利新增数量已明显减少。近5年的在华专利申请由国内申请者所主导, 表明国内技术积累日渐雄厚, 同时更加重视知识产权的建立和保护。

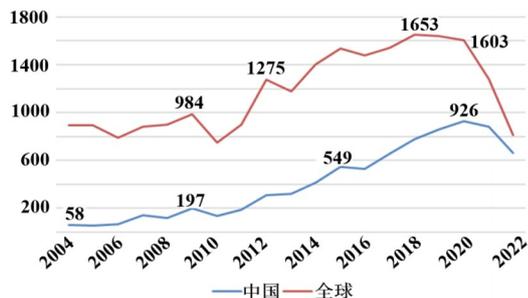
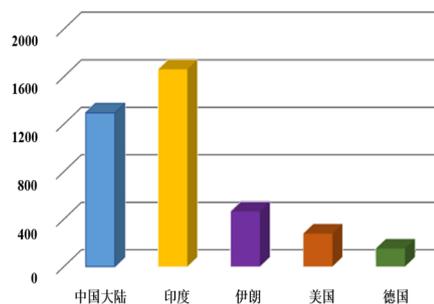


图1 2004~2022年我国搅拌摩擦焊技术专利的变化情况^[13]

论文成果方面, 近20年搅拌摩擦焊相关主题的论文近3000篇, 其增减趋势与专利曲线趋近, 论文权属涉及国内高校、企业、院所等超过80家单位, 形成了庞大的研究人员团队, 人才储备丰富。如图2所示, 从论文引用情况来看, 我国从2019~2023年在FSW和FSP等领域的SCI论文发表数量占世界第二, 引用数量位于世界第一, 说明研究成果质量较高、创新性强。目前在焊接工艺研究、异种材料焊接等研究领域处于引领地位, 总体处于世界前沿水平。

近年的热点研究方向逐渐转向焊接数智控制、搅拌摩擦增材制造等新领域。



a 2019~2023年SCI论文发表占比



b 2019~2023年SCI论文引用占比

图2 2019~2023年我国搅拌摩擦焊技术论文引用情况^[13]

本文试图从搅拌摩擦焊接技术的国内外发展历程出发, 总结近年来搅拌摩擦焊接和制造技术进展, 梳理搅拌摩擦焊接装备发展和技术应用现状, 并立足于未来国家重大工程和产业需求, 分析探讨技术的发展方向。主要内容包括: 国内在基础理论方面的研究进展、工程应用中材料和结构方面的焊接技术突破、基于搅拌摩擦原理的技术创新、装备研制现状, 以及未来技术的发展重点等^[10-13]。

2 搅拌摩擦焊接基础研究

搅拌摩擦焊接过程涉及复杂的力热多场耦合行为, 国内外研究团队采用试验和仿真技术等手段, 围绕焊具开发、产热传热、成形传质及其对材料组织和性能的影响等方面开展了广泛研究, 同时, 伴随工程需求的增长, 搅拌摩擦焊接无损检测基础研究关注度也迅速上升。

2.1 焊具设计

搅拌头是决定搅拌摩擦焊接质量的关键因素, 其外形对搅拌摩擦焊接的产热和流动过程产生重要影

响。FSW 焊具的发展主要聚焦结构设计、材料和辅助能场 3 个方向。焊接过程仿真、结构拓扑优化等方法的应用极大推动了焊具结构设计的进步；高温硬质搅拌头材料的研制推动了钢等高强材料 FSW 技术的发展和應用；超声、磁场、锤碾等辅助手段可以有效拓展 FSW 的工艺参数范围，其在主机上的适装性和经济性将成为能否实现产业化的关键。此外，充分利用 FSW 本身的热输入，在焊接设备上整合接头再强化功能有望成为焊具系统发展的重要方向之一。

搅拌针结构优化方面，Sun Zhen 等^[14]通过计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）方法量化分析了搅拌针螺纹对材料流动和产热的影响（见图 3a），可以准确解释试验过程相关测量数据，认为搅拌头螺纹结构对靠近焊核底部的材料流动影响最为关键。杨智勇等^[15]通过 CEL 有限元仿真模型解释了搅拌针平槽结构对无缺陷焊接工艺窗口的影响。卢晓红等^[16]建立了针对 18 mm 2219 铝合金 FSW 焊接过程

的 CEL 模型，揭示了搅拌头几何形貌对厚板搅拌摩擦焊接核心区温度场的影响，优化的搅拌头尺寸形状可减少焊核区温度差异，从而改善接头成形和性能。Chen Gaoqiang 等^[17]针对 7 系铝合金 FSW 建立了可模拟滑动-粘着复合接触状态的 CFD 过程模型，分析了搅拌针螺纹结构对材料应力分布的影响。仿真精度大幅度提升，可以准确预测焊接温度场和材料隧道缺陷的产生。

搅拌头的轴肩直径与搅拌针长的比例是接头成形的关键因素，中薄板搅拌摩擦焊接时，一般将搅拌针长与轴肩直径之比控制在 1:3 左右。更小的轴肩直径对于控制热输入、提升接头性能具有重要意义。Huang Yongxian 等^[18-19]基于仿真技术提出了大深宽比搅拌头设计理念，搅拌针长-轴肩直径比率达到 0.6，利用低热输入和高应变率降低 Al-Mg-Si 强化相粗化程度，接头强度系数达到 0.86、延伸率达到 8.1%、7075-T6 铝合金接头强度系数达到 0.86%（见图 3b）。

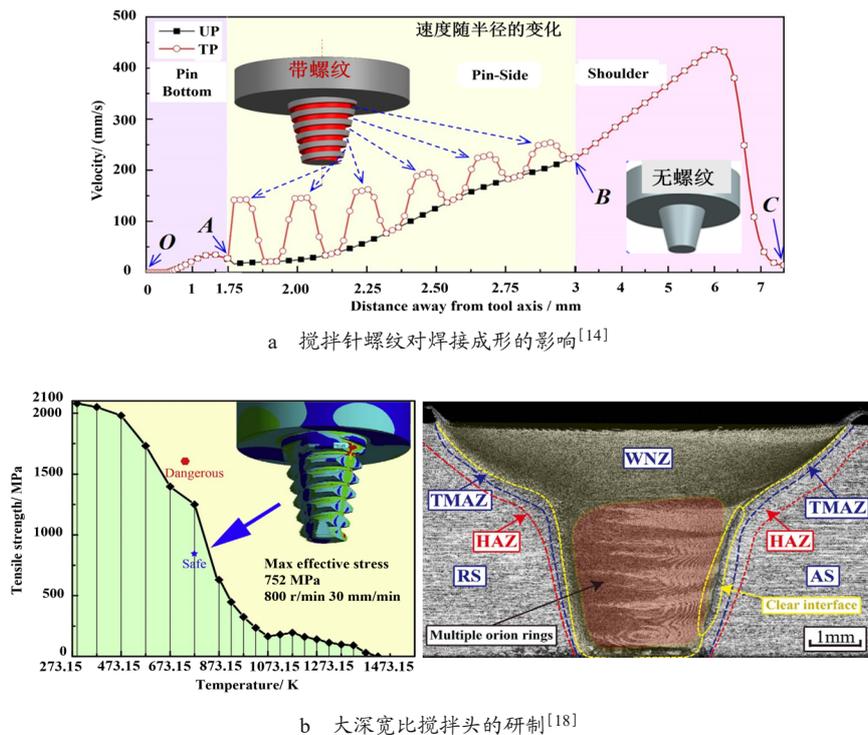


图3 数值仿真辅助的搅拌摩擦焊具研制

钢、钛、高温合金等材料搅拌摩擦焊接时焊接热输入和焊接抗力大幅度增加，搅拌头大量采用钼基和钨基等硬质合金以及 PCBN 材料^[19-20]。目前伴随复合强化、粉末冶金等技术的应用，搅拌头的寿命得到了长足发展。贾春雪等^[21]开发的纳米强化的钨铋合金已

实现双相不锈钢焊接长度 100 m 以上。PCBN 在钛、钢等难焊接材料方面应用广泛，其使用温度一般在 900 °C 以下，在焊具磨损后可以通过返修加工恢复表面形状，维持使用性能。随加工技术的进步，PCBN 搅拌头已经可以具备螺线等更加丰富的结构特征。

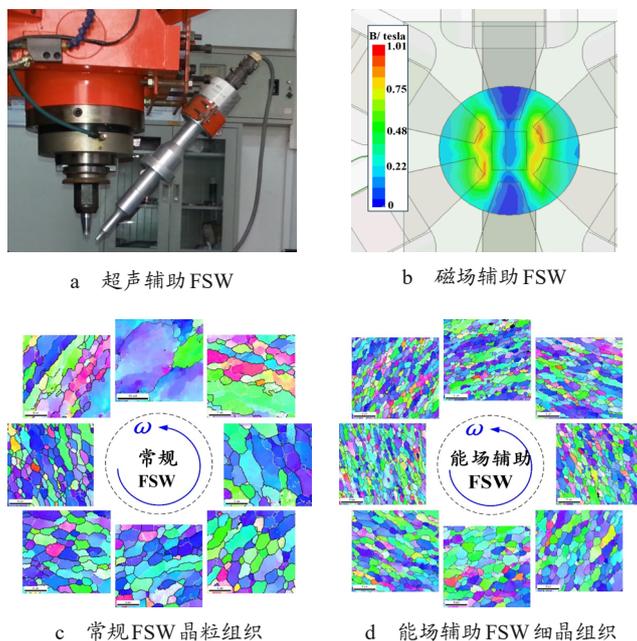


图4 能场辅助FSW

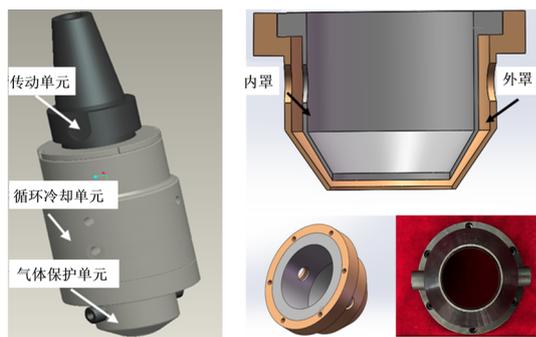


图5 冷却-气保护-高温耐磨一体化搅拌头

除搅拌头材料和结构加工进步之外,近年同时开展了水冷、气体保护、超声、磁场等辅助焊接技术研究^[22]。对于钛合金等易氧化材料,搅拌摩擦焊接的惰性气体保护成为必要环节。研究表明针对搅拌头冷却可以有效改善焊具工况,延长搅拌头使用寿命。如图4所示,Gao Fuyang等^[23]通过设计整合了高温耐磨Co基合金搅拌头,结合水冷、气保护机构的辅助,实现了钛合金、高强钢等高强度金属的长距离焊接。另一方面,对焊接区施加超声波场和磁场,可以改变热塑化材料的流变特性,降低搅拌头焊接抗力,延长搅拌头寿命,并且降低材料流动对热输入的需求,进一步提升接头性能(见图5)。Yu Mingrun等^[24]采用超声能场辅助铝钛异种金属搅拌摩擦焊接,超声能场的添加使搅拌头磨损降低80%以上,接头强度系数倍增。陈书锦等^[25-26]通过强磁场促进焊接区材料的流

变,实现对焊接区进一步软化,拓宽了焊接工艺窗口,使4 mm厚度7055铝合金接头拉伸强度和延伸率达到72.3%和13.1%。Huang Yongxian等^[27]通过设计搅拌头上的滚珠装置实现随焊碾压作用,形成表面压缩塑变层以改善接头力学性能,使3 mm 2219接头软化区硬度从55 HV提升至66 HV。Hu Yanying等^[28]通过超声辅助FSW扩大了2219铝合金的工艺窗口,有效抑制根部缺陷的产生,接头系数达到80%以上。

2.2 组织和性能

在搅拌头施加的摩擦热、材料变形热和塑性变形的共同作用下,材料发生回复、再结晶和相变是搅拌摩擦焊接组织演变的主要机制。学界对常见的铝合金、镁合金、钛合金、铜合金以及钢等金属材料的搅拌摩擦焊接组织演变已经建立了较为清晰的认识^[29-31]。

Zeng Xianghao等^[32]研究铝合金FSW的晶界形态、位错和氧化物分布的演变过程,发现了旋转动态再结晶的新机制,同时焊核最小晶粒尺寸与再结晶机制、Zener-Hollomon参数、冷却方式等密切相关。更高的应变速率和更短的高温停留时间是获得细晶焊核组织的有效策略。对于时效强化铝合金的FSW,接头热机影响区和热影响区的强化相溶解和粗化导致接头产生弱区,对接头力学行为产生决定性影响。Yang Chao等^[33]针对80 mm厚度的6系铝合金FSW提出了等温软化层模型,揭示了接头各区域析出相的演化

规律,提出了提高焊速、控制热输入从而抑制热影响区析出相粗化的性能调控策略。铝、钢等多种材料使用高焊速工艺获得的强度系数可能达到 90%^[34]。Jiang Jingyu 等^[35]开展 5 mm 厚度 Al-Mg-Sc-Zr 铝合金的搅拌摩擦焊接研究,指出 $Al_3(Sc, Zr)$ 弥散强化相界面的非共格转变导致焊核区的软化,接头强度达到 90%。对于镁合金、钛合金等各向异性较强的材料,焊核区、热机影响区的取向分布等组织特征对接头性能影响不可忽视^[36]。Li Gaohui 等^[37]研究双轴肩搅拌摩擦焊接 ZK60 镁合金的材料流动,指出接头拉伸强度的各向异性主要由强化相溶解和组织软化效应所导致,通过搅拌针螺纹结构的优化,使材料流动更加充分,接头的拉伸强度系数可以提升 83%。

在材料流动方面,除通过常规的金相和微组织表征结果分析材料流动之外,材料示踪法是研究搅拌摩擦焊接材料流动重要的实验手段。Zeng Xianghao 等^[38]通过在铝合金表面增厚氧化层作为示踪材料研究低转速下材料的流动,揭示了“S”线的形成机制,观察到了低转速下材料流动不充分导致未焊合根部缺陷的产生。Liu Fengchao 等^[39]研究发现,在特定工况下的钢和时效强化铝合金等材料的 FSW 中,材料流变区宽度与搅拌针直径差异不大,除粘附在搅拌头表面的材料之外,大多数搅拌区内材料绕搅拌针转动不

足一圈。

随着航空、航天、汽车、船舶等产业对焊接结构寿命要求的提高,焊接残余应力的研究进一步受到重视。根据材料和工艺的变化,FSW 焊缝残余应力可达到母材屈服强度的 20%~80% 不等,由于不对称的应变和热循环,前进侧残余应力一般大于后退侧^[40]。Zhang Xingxing 等^[41]采用双标样中子衍射法测量体积分数 17% 的 SiCp/2009Al-T4 铝基复材 FSW 的宏观和微观残余应力,并且建立了基于热错配和塑性错配残余应力模型,实现了对 FSW 接头残余应力的高精度数值模拟(见图 6)。研究表明,通过焊后热处理、激光喷丸等焊接后处理技术可以实现焊接接头残余应力调控。激光喷丸技术通过引入表面压应力可实现疲劳寿命和应力腐蚀抗性的提升^[42-43]。Zhang Hua 等^[44]对 7050FSW 接头表面进行冷喷涂处理,结果表明涂层防护通过改变接头硬度和应力分布,显著提升了应力腐蚀抗性,接头生存寿命超过了 30 d。Wang Bin 等^[45]研究不同焊接工艺对 Ti62A 合金残余应力的影响,发现静轴肩 FSW 可使各向应力峰值降低 30% 以上。可以预见,相关的处理技术在设备和工艺层面与搅拌摩擦焊接系统的整合是未来的热点研究方向之一。

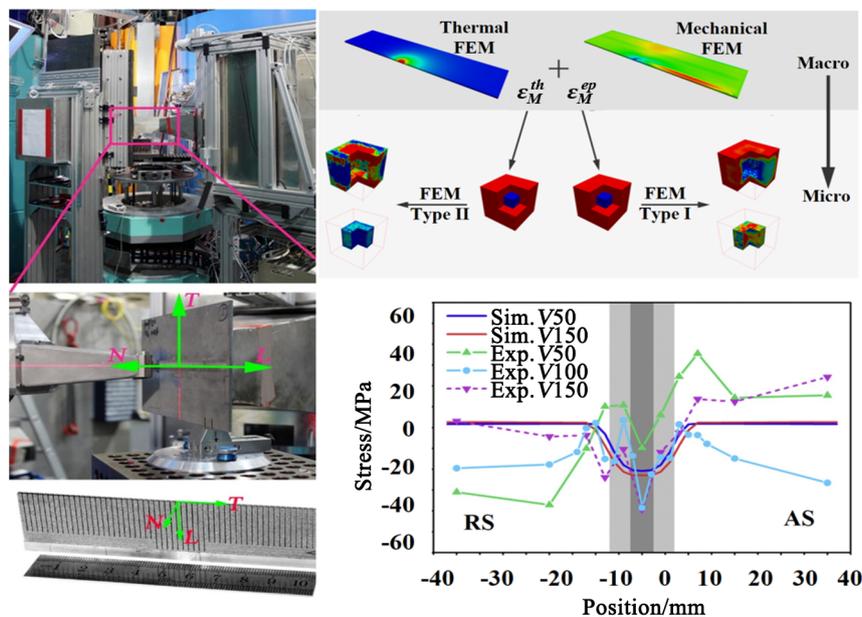


图 6 FSW 残余应力中子衍射测试和跨尺度模拟^[44]

数值仿真技术是焊缝成形机理研究和焊接工艺优化的重要手段。算力增长和算法进步使得 FSW 的力热全场耦合仿真模型得到普及^[46]。与此同时,基于对

焊接过程机理的认识和工艺经验积累,建立了融合先验知识的简易数值模型,指导工业领域实际应用。Chen Gaoqiang 等^[47]利用经过验证的 FSW 纯传热模型

对 2024 和 6061 铝合金的搅拌摩擦焊接进行实时仿真,利用试验测温作为输入,构建热源模型,模型获得的温度场分布对焊接区温度形成精确跟踪,准确度优于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该模型可以用于产品焊接过程的记录建档、回溯及工艺和焊具设计的迭代优化,也可以用于基于焊接温度的过程监测和实时控制。机器学习等新算法技术在 FSW 仿真中的应用已经成为热点方向,它进一步提升了模型建立、优化和数据处理等多个环节的效率,实现高通量、自动化的焊接过程仿真。Yu Fanqi 等^[48]通过 3 mm 厚度的 2195 铝合金 FSW 工艺试验数据训练 BPNN 神经网络,建立了工艺-组织-性能关联模型,数据预测准确性达到 92%。Guan Wei 等^[49]采用决策树算法,建立了焊接过程受力参量对焊接空洞型缺陷的预测模型,缺陷检测准确率达到 98%,经分析得知侧向受力平均值的异常升高是预测缺陷产生的主要力信号特征。Xie Yuming 等^[50-51]总结已有焊接数据,借助神经网络算法训练模型,建立了搅拌摩擦焊接的材料性能-焊接参数-接头性能的关系图,形成了可拓展的涵盖 1~7 系铝合金的搅拌摩擦焊接工艺数据库,在轨道交通车身结构的焊接上实现了工程应用。可见对焊接过程的仿真已经不再局限于为实验室层面的机理研究提供解释,随模型结果的准确性和计算效率的提升,使工程环境下预测焊接质量、指导工艺优化成为可能。仿真产生的知识和模型与焊接自动控制软件相结合,提供焊接过程检测和控制,加速工艺优化和迭代,成为实现焊接自动化、智能化的关键技术方向之一。

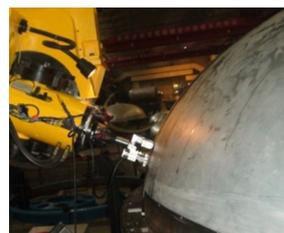
2.3 无损检测技术

无损检测是搅拌摩擦焊接应用的关键环节,射线、超声、涡流和渗透等无损检测技术是对搅拌摩擦焊接接头质量进行焊后检测的主要手段^[52-53],其中,超声检测是应用最为广泛的检测技术。随着超声衍射时差法^[54]、超声相控阵法^[55]、激光超声法和非线性超声法^[52]等超声检测技术的发展,超声检测成为搅拌摩擦焊缝无损检测的重点技术。缺陷信号的智能识别、快速处理和检测的自动化是当前的重点研究方向。

迟大钊等^[56]阐述了超声 C 扫描、超声 TOFD、超声相控阵、声发射等技术特点及其工程应用,表明相控阵技术在缺陷检出率、检测直观程度等方面优于常规超声波检测。郝云飞等^[57]利用射线检测技术和超声相控阵检测技术实现了搅拌摩擦焊锁底接头的缺陷检测。张丽娜等^[58]采用超声相控阵技术对铝合金搅拌摩擦焊缝缺陷进行了检测,准确检测出面积型缺陷及体

积型缺陷。孙屹博等^[59]分析了多种信号处理方式对声发射信号特征的捕捉能力,利用多层神经网络建立了多特征向量的焊接缺陷识别模型,使焊接缺陷平均识别率达到 97%。吴振成等^[60]进行了铝合金 FSW 焊缝涡流与渗透两种检测方法比对试验,结果表明两种方法的检测结果一致,但涡流阵列检测技术能更好地实现快速、精确的成像检测,且数字化程度更高。

超声相控阵检测技术的自动化和智能化成为未来重点发展方向。黄霞等^[61]研究了超声相控阵检测技术在航天领域的应用,实现了箱底焊缝中孔洞、未焊透、弱结合等缺陷的在位自动检测,如图 7a 所示。以机器人平台的国产自动化超声相控阵无损检测设备于 2019 年发明,实现了以 3 m/min 的速度对复杂路径 FSW 焊缝的无损检测,利用深度学习优化的自动检测软件实现对 0.2 mm 尺寸焊接缺陷的自动识别记录,准确率达到 99.3%^[62]。缺陷检测的自动化和数字化存储是实现焊缝质量建档和快速追溯的前提。数字化的无损检测数据也是开展产品质量监测和生产工艺优化的重要依据,成为未来发展方向。



a 大型曲面FSW焊缝自动检测



b 机器人自动化超声相控阵自动检测系统

图7 自动化超声相控阵无损检测装备及其应用

3 搅拌摩擦焊接的技术突破

随着新材料、新结构发展和应用,国内在搅拌摩擦焊接技术方面开展了若干技术创新和改进,一方面提升了钛合金、钢、镁合金、金属基复合材料的焊接工程应用水平,另一方面突破了焊接匙孔、减薄、异种结构、点连接等技术瓶颈。

3.1 面向材料的技术突破

近年来,航空、航天、新能源等产业对焊接质量的要求不断提升,这使得搅拌摩擦焊接的应用范围不再局限于传统的铝合金和镁合金材料。在针对材料特性进行优化之后,搅拌摩擦焊接低热输入、小变形等优势在其他材料上同样得到了发挥,提升了各类工程应用上焊接结构的性能和可靠性。

3.1.1 钢、钛、铜合金的焊接

钢和钛合金相比于铝合金具有更高的熔点和变形抗力,导致搅拌头磨损剧烈,寿命较低,同时焊接组织演变导致接头性能相比母材普遍弱化。需要从降低热输入、辅助热源等手段加以改进。水下焊接作为有效的热循环控制策略之一,可以促进钢焊接的组织细化和延长搅拌头的寿命,将1.8 mm厚度DP1180钢搭接点焊的拉剪强度提升200%^[63]。Cong Shuang等^[64]通过垫板150℃加热辅助Ti-6Al-4V合金焊接,使接头强度系数达到84.2%、延伸率达到16%、室温冲击韧性高于母材48%。Wang Zhiwei等^[65]利用小直径搅拌头和低转速的工艺组合实现了DP1180双相高强钢焊接与母材等强。焊合区马氏体组织的产生是等强焊接的关键^[66],接头软化区的硬度降低不到10HV。

铜合金热导率高,限制了搅拌摩擦焊接的热输入效率,导致工艺范围窄、大厚度焊接易产生缺陷等问题,其搅拌摩擦焊温度处于900~1000℃范围,同样造成了焊具的快速磨损。Wang Yandong等^[67]将中厚板Cu-Cr-Zr合金焊接温度降至时效温度附近,结合焊接后时效热处理使接头达到与母材等强,导电性能略有提升,达到88.9% IACS。Lai Ruilin等^[68]突破30 mm厚度Cu-Cr-Zr合金和90 mm厚度电工铜合金的无缺陷FSW焊接,焊接不同分区受到含Cr时效相强化和晶界强化的共同作用。上述技术突破有效解决了大功率电磁装备的高品质焊接问题。

铜合金、钛合金等材料的FSW在提升产品质量和可靠性方面取得了显著成效,在电力、航空、船舶等产业形成了具有代表意义的工程应用。通过FSW获得钛合金的超塑性将成为钛合金焊接的重要研究方向之一。钢等高温高强合金的FSW技术难度和成本均较高,主要的技术瓶颈在于焊具性能和寿命的提升,其工程应用范围相对较小。预计FSW在难熔焊的材料种类,如高氮钢、ODS钢和其他铁基复材的焊接方面更有应用前景。

3.1.2 轻质合金的焊接

新型镁合金以其高比强度、良好的阻尼性能在航

空、航天等产业的用量逐年增加。而镁合金FSW尚存在温度场和材料流动梯度大、非均匀织构影响接头性能等挑战,且这种不均匀性会随着焊接厚度增加而进一步增加。Liu Qiang等^[69]发现镁合金取向界面诱导裂纹萌生和扩展的变形断裂机制,通过差速双轴肩FSW调控焊接温度场和流场,降低了焊接区晶粒尺寸的差异,实现20 mm厚度接头抗拉强度系数86.4%。Zhang Junlei等^[70]开展单面焊接和双面焊接AZ31和AM60镁合金的对比研究,表明镁合金FSW接头的均匀取向分布是导致拉伸失效应变集中的主要因素。双面焊接导致的接头组织对称分布改善了接头拉伸变形协调能力,使强度系数从79%提升至88%。Li Wenya等^[71]研究发现,低热输入的静轴肩FSW可以有效提升AZ31B镁合金的接头强度。镁锂合金具备更优异的力学性能,但镁锂合金焊接接头的自然时效软化限制了该材料的工程应用^[72]。Gao Shikang等^[73]通过随焊喷注液氮冷却的方式抑制析出相粗化,有效控制了3 mm厚度的Mg-9Li-3Al-3Zn镁锂合金FSW接头的时效软化,接头强度最大达到267 MPa。

低密度、高比刚度、高比强度的铝锂合金是下一代高强铝合金的重要研究方向,而锂元素易烧损、易氧化氮化、物相演变复杂,使得高质量熔焊难度高、工艺范围狭窄。搅拌摩擦焊接成为相关结构制造的主要焊接技术。Tao Yongqi等^[74]研究焊后时效热处理和随焊冷却对2195铝合金FSW接头的影响,表明由于焊接区不完全的固溶状态,简单的时效热处理不足以完全恢复力学性能,接头强度系数达到母材强度系数的约87%;随焊空气冷却将接头强度系数从77%提升至81%,随焊水冷可以有效降低热影响区宽度,但强度增加不明显,这可能归因于热循环导致的强化相演变,表明铝锂合金的微组织演变和工艺调控策略与传统高强铝铜合金的差异。Xie Yuming等^[75]指出2195-2219铝合金对接接头的析出相形态分布显著影响接头各分区的腐蚀性能,FSW导致的合金元素固溶和晶粒细化使耐腐蚀性能增加。

铝、镁等轻合金材料是FSW的传统优势领域。相比于传统熔焊,FSW更高的装配需求和设备工装刚性需求是限制其生产效率的主要瓶颈。填丝FSW、低抗力FSW、双轴肩FSW等技术有助于降低对工件装配需求,简化设备和工装,提升FSW的适用性和生产效率,将成为未来的重点发展方向。在材料方面,时效强化轻合金FSW的接头软化是阻碍性能提

升的主要问题。低热输入的FSW技术是改善接头软化的主要策略。由于对轻合金组织演变机理理解日渐透彻,可以发展包含FSW热输入的全流程热循环控制方法,突破传统的“固溶淬火+低温时效”制度时间长、成本高的局限,以更短的时间和能耗得到同等性能的焊接接头。同时,随着铝锂合金、镁锂合金、高强稀土镁合金、轻质高熵合金等新型轻合金快速发展,深化对新材料的FSW组织演变理解,进行对应的工艺开发仍是未来研究重点方向之一。

3.1.3 复合材料和异种材料的焊接

金属基复合材料的焊接是实现其工程应用的前提,但复合材料中的陶瓷或者高强金属增强相在实现性能增长的同时,也增加FSW过程中的焊接抗力和焊具磨损,FSW材料流动导致的增强相再分布也限制了接头性能提升。Zan Yuning等^[76]指出增强相颗粒的偏聚是陶瓷粉末增强复材FSW焊接区晶粒长大和软化的主要原因。Wang Chen等^[77]采用耐磨焊具进行3 mm厚度17%体积分数的Al/SiCp复材焊接,通过2 m/min高速焊接抑制热影响区接头软化,实现接头强度系数97%。Han Peng等^[78]对比分析了冷喷涂和FSP改性的高熵合金增强铝基复材,研究表明FSP改性的复材具有更强的抗腐蚀性能和耐磨性能。Miao Chang等^[79]对原位反应弥散强化的1%ZrB₂-7085增强复材进行FSW,接头强度较纯7085铝合金增加24%。

搅拌摩擦焊接因其固相焊接的特性和对材料的高适应性,成为异种材料焊接的理想方法之一。界面金属间化合物的调控在铝钢异种焊接性能上至关重要,金属化合物粗化导致界面脆性的产生。Zhang Min等^[80]通过铝一侧搅拌制造界面铝非晶层的方式,避免了金属间化合物的产生,实现500℃以下热稳定的铝钢接头,6系铝合金界面强度达到接近280 MPa。

Meng Yongsheng等^[81]研究搅拌头形状结构和界面Mg氧化物对AZ31B镁合金-Q235钢对接接头冶金结合质量的影响,在合理的热输入下实现镁合金接头强度达75.8%。异种金属焊接接头的电化学腐蚀特性因直接影响到结构的稳定可靠受到重点关注。Niu Pengliang等^[82]发现7075-2024对接接头焊核区和后退侧母材(7075一侧)的层状腐蚀行为相近,并研究了混合区材料极化阻抗与晶粒尺寸的对对应关系。

中间金属层是调控异种材料焊接接头性能的有效策略,Zhang Guifeng等^[83]通过添加Zn中间层实现10 mm厚度5083铝合金与16Mn钢板的搭接搅拌摩擦钎焊(FSB),Zn熔化层抑制Al-Fe金属间化合物的产生,接头强度达到50~55 MPa。Zheng Yang等^[84]采用Zr中间金属层抑制Al-Mg异种FSW接头有害金属间化合物的产生,抗盐水腐蚀性能提升约18%。Yao Haining等^[85]进行6061铝合金和FeCoNiCuMn高熵合金的搭接搅拌摩擦焊接,界面产生<250 nm的Al₁₃Fe₄金属间化合物层,Co、Ni、Cr、Mn合金元素发生了不同区位的共偏析行为,接头强度达到73%。

机械锁合是增加难互溶异种材料接头强度的另一方法,Huang Yongxian等^[86]采用自铆接FSW搭接焊接技术制造铝钢搭接接头。图8是铝合金与不锈钢板材搭接结构自铆接FSW的过程示意图。使用铝合金置于上侧而不锈钢置于下侧的搭接方式,采用常规的FSW搅拌头及焊接工艺参数,在下侧的不锈钢板材上沿着焊道的路径按照一定的间距开出小孔,FSW过程中既能通过热力作用实现界面连接又能通过塑性状态的铝合金材料挤入不锈钢板材上的孔中冷却形成类似铆钉的铆接作用,从而实现铝合金与不锈钢板材搭接结构的可靠连接。

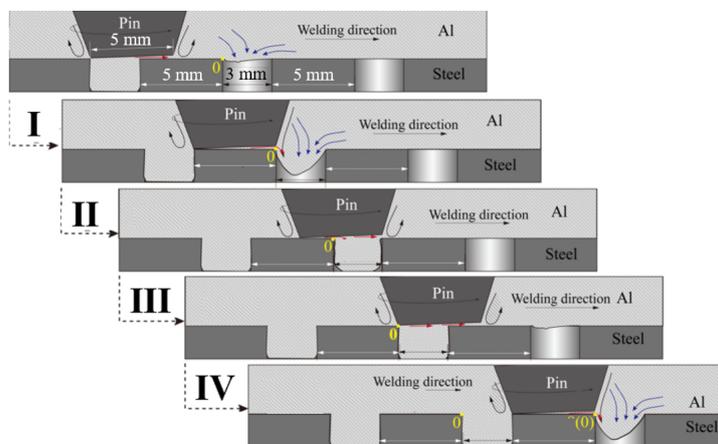


图8 铝合金与不锈钢板材搭接结构自铆接FSW的过程示意图^[86]

此外, 航空结构的轻量化催生了对金属-非金属复材的高性能连接技术需求, Wu Lihui 等^[87]使用激光毛化对金属侧表面预加工, 增加树脂材料和金属材料间的机械锁合作用, 连接效率达到 78%, 同时界面形成了 C-O-Al 共价键。Geng Peihao 等^[88]开展不同搅拌头形状设计对铝-CFRP 接头焊接性能的对比研究, 发现中心内凹的无针搅拌头界面微缺陷最少, 接头拉剪力达到约 8 kN。Liu Yuchun 等^[89]将 Al/CFRP 搭接焊的速度达到 3 m/min, 接头剪切强度达到 25 MPa。

由上可知, FSW 的应用明显拓展了复合材料以及多种异种材料组合的工程应用范围。在复合材料焊接方面, 轻合金基材且含有高组分的碳基和陶瓷基增强相等难以熔焊的复材将成为 FSW 的主要应用领域, 提升热稳定性、塑性和韧性是接头性能优化的主要方向。在异种金属材料焊接方面, FSW 在铝-钢、铝-铜、铝-镁等多种难相熔材料组合方面具有优势, 工程应用效果良好。同时 FSW 是金属-非金属材料连接的热点研究方向, 综合应用化学键合和机械锁合机理将成为实现高强异种材料连接的主要策略。

3.2 面向结构的技术突破

各类焊接结构向高承载、轻量化、复杂化的方向发展, 对搅拌摩擦焊接的适用范围、可靠性、可达性提出了更高的要求。搅拌摩擦焊接技术围绕着缺陷消除、焊接厚度范围的拓展、非对接结构焊接和点连接开发等新技术方向开展了大量研究工作。

3.2.1 传统焊接缺陷的消除

搅拌针长一般略短于工件厚度, 根部未焊合缺陷在传统 FSW 难以避免。刘会杰等^[90]开发的倾斜穿透搅拌摩擦焊接 (Tilt Penetration FSW, TPFWSW) 通过搅拌针完全穿透工件, 配合背面的轴肩封闭焊接区, 消除了根部未焊合界面。祁欣等^[91]利用神经网络构建根部缺陷的预测模型, 结合工件厚度检测实时调整搅拌头下压量, 实现对根部成形质量的控制和未焊合缺陷的预测。潘杏娥^[92]通过在搅拌头末端增加沟槽结构, 增加焊核区根部材料的流动, 抑制根部未焊合缺陷的发生。

传统 FSW 中旋转轴肩与焊接倾角的共同作用是导致飞边和表面减薄的主要因素, 静轴肩搅拌摩擦焊接技术 (Stationary Shoulder FSW, SSFSW) 仅通过搅拌针转动塑化加热待焊材料, 通过静止轴肩对表面锻压封闭, 制造光滑无弧纹、无飞边减薄的焊缝表面, 可避免飞边和表面减薄等问题, 有利于提升接头承载能力。Sun Tianzhu 等^[93]的研究表明, 相同尺寸的 SSFSW 转速需达到常规 FSW (Conventional FSW,

CFSW) 两倍以上, 峰值温度约为 CFSW 的 80%, 扭矩约为 CFSW 的 13%。方远方等^[94]实现了 6005A 铝合金型材的 SSFSW, 指出适当焊接倾角对良好成形是必要的。相比同规模的传统 FSW, SSFSW 的工艺区间一般更窄, 对焊接装配和轴肩压合的精度要求更高, 一定程度上限制了其工程应用, 但 SSFSW 在静止轴肩上集成其他装置更为便利, 如辅助冷源、热源、传感器、随动夹持装置等^[95-97], 可拓宽焊接的工艺区间或者提高自动化程度。TWI 发明的填丝静轴肩搅拌摩擦焊接技术 (AdStir)^[98], 实现了搅拌摩擦焊接的焊丝填充, 用于带间隙接头的焊接, 可拓展为固相填充修复和增材制造 (见图 9)。Ma Xiaotian 等^[99]开发带有阶梯状轴肩的搅拌头, 实现表面无飞边减薄的搅拌摩擦焊缝, 6 mm 厚度 2219-2195 铝合金对接接头减薄量控制在 0.05 mm 以内, 接头强度系数达到 2219 母材强度系数的 81.7% (见图 10)。

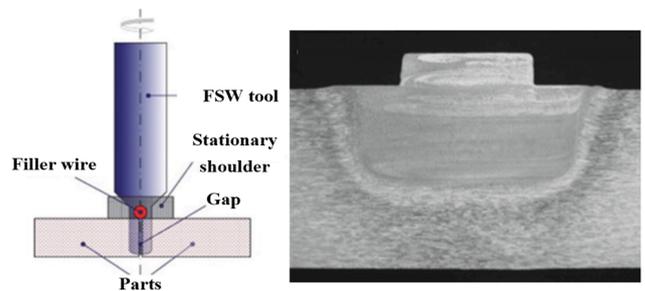


图9 填丝静轴肩 AdStir 技术^[99]

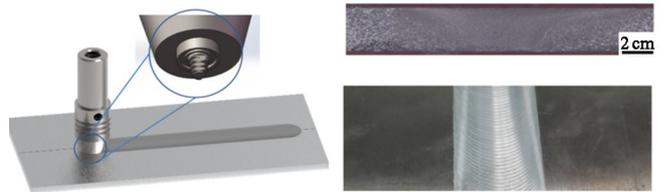


图10 阶梯轴肩无减薄 FSW

搅拌针在焊接终止处一般会产生匙孔, 匙孔的填充和消除对于封闭焊缝结构而言是必要环节^[100]。针对匙孔的消除存在多种可行的技术解决方案, Gong Peng 等^[101]通过在匙孔中填充同类材料, 再以搅拌摩擦焊接予以致密化的方式, 可以形成无匙孔的焊缝, 其接头组织和力学性能与常规的搅拌摩擦焊接接头无显著差异。工程应用程度最广的是搅拌针可回抽技术 (见图 11), 广泛应用于航天贮箱、汽车底盘等的焊接制造。随着焊接结构厚度的增加, 搅拌针回抽过程中材料回填更为困难, 导致焊缝内部体积形缺陷产生风险的增加。郝云飞等^[102]研究了回抽段焊接工艺对

8 mm 厚高强铝合金焊接质量的影响, 指出增加回抽距离有助于提升焊缝质量可靠性, 但制造效率受限。业内针对 4~20 mm 高强铝合金的回抽焊接材料回填

机制开展了研究, 并已经建立了合适的工艺区间^[103-104]。

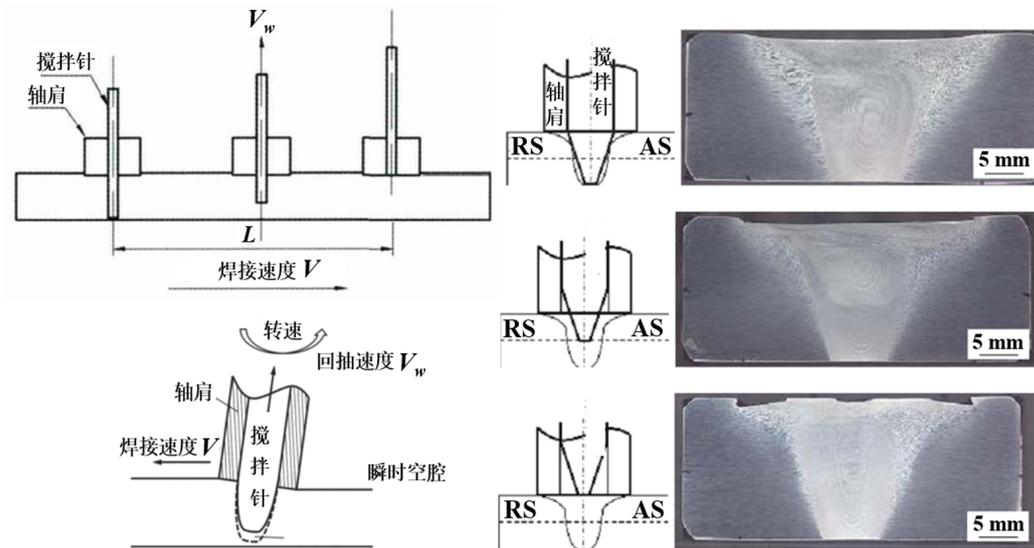


图 11 可回抽搅拌摩擦焊接技术

改变焊具结构设计是抑制减薄和根部未焊合等搅拌摩擦焊接缺陷的主要方式, 侧面证明现有的搅拌头外形设计在拓展工艺空间方面有充分挖潜优化的空间。搅拌针回抽技术作为匙孔消除的主要方法已经成为 FSW 焊接主机的标配功能之一, 结合对工件厚度的实时监测和搅拌针长的自主调整, 可以实现变厚度工件的焊接, 从而拓展 FSW 的结构适用范围。

3.2.2 焊接厚度的突破

在厚板方面, 通过双锥面设计的搅拌针可以调整大厚度材料流动从而促进焊核成形, 也可通过板材正反双面焊接, 控制焊接厚度方向热输入均匀性, 实现超大厚度板材的焊接, 目前最大焊接厚度已经达到

120~150 mm^[104-106], 相关厚度焊接结构用于大型水冷基板等产品 (见图 12)。宫文彪等^[107]开展了 84 mm 厚度 6082 铝合金焊接并分析了接头微组织和力学性能, 研究发现热机影响区位错密集, 接头抗拉强度从表面向厚度中心逐渐降低。目前, 超大厚度材料的 FSW 焊接主要依赖设备能力的提升, 但焊接抗力增大会导致设备自由度降低, 焊接路径较为简单。对于有相应焊接厚度需求的轻合金结构, 复合能场 FSW、低前进抗力焊具的开发可以简化设备性能需求, 是值得关注的方向。另一方面, 开发多层多道 FSW 可以使较小的焊接设备具备超大厚度工件的焊接能力, 也是该领域的主要研究方向。



图 12 大厚度铝合金双面 FSW 焊接及其应用

针对超薄板焊接存在过程稳定性和焊接减薄控制等挑战,高转速、高行走速度是实现良好焊接成型的主要方法。张聃等^[108]研究了 0.8 mm 厚度铝合金无倾角搅拌摩擦焊工艺参数对接头力学性能的影响,焊接接头强度系数达到 70% 以上。王春桂等^[109]采用 2 500 r/min 转速和 600~1 000 mm/min 焊接速度进行 0.5 mm 厚度 2A14 板材焊接,接头强度可达母材强度的 90%。高转速高焊速工艺在解决超薄板焊接成型问题的同时,也有利于提升焊接效率。超薄板 FSW 对于焊接下压量敏感,对高焊速下的焊接工况调节能力提出了较高要求,预计采用恒压力控制方式的机器人焊接工艺是超薄板 FSW 的理想手段。

3.2.3 搭接、对搭接结构的焊接

搭接接头已经成为 FSW 重要的焊接形式之一,界面钩状和冷搭接缺陷是限制搭接接头承载性能的主要技术挑战,而抑制搭接界面缺陷的方法聚焦于焊具结构设计。赵华夏等^[110]通过阶梯形正反螺纹搅拌针调整材料厚度方向流动,抑制钩状缺陷产生,2 mm 厚度 2A14 搭接接头的拉断力达到 10.9 kN。Ji Shude 等^[111]通过 CFD 建模研究了凸起螺线的无针搅拌头设计对 1.5 mm 2A14 搭接接头的性能影响,拉剪力达到了 16~20 kN 水平。Meng Xiangchen 等^[112]通过搅拌针宽度等工艺调整,实现 1.2~1.5 mm 厚度 2024 铝合金桁架-蒙皮搭接,强度为 482 MPa,与母材等强。压力容器、舱体等产品结构对搭接和对搭接接头有失效模式的需求,一般要求接头失效时不得撕裂较厚的

底板以避免破坏主结构,所以界面缺陷对接头破坏模式的影响同样重要。刘洋等^[113]研究了不同偏移量对 6005A 铝合金对搭接接头质量的影响,疲劳断裂位置在应力集中较大的热影响区和熔合线结合处。宋建岭等^[114]研究了搅拌针长对钩状缺陷形态和接头断裂模式的影响,当搅拌针长覆盖锁底结构母材时,接头呈现韧性断裂。Huang Yongxian 等^[115]通过末端膨大搅拌头增加搭接界面的有效连接面积,抑制钩状缺陷,实现 6082-2A14 搭接接头 85% 的强度系数。FSW 搭接技术的进步使得搭接、对搭接结构得以广泛用于轨道交通、航空等产品的承载结构。

3.2.4 角接结构焊接

在角接接头方面,静轴肩 FSW 通过使用异形轴肩成为 T 型、L 型等角接接头焊接的有效方法,拓宽了搅拌摩擦焊接的适用范围。郝云飞等^[116]通过静轴肩和工装设计,实现了 5 mm T 形接头角焊缝的静轴肩焊接,接头强度系数达到 73.2%。与 TWI 等单位从拐角内侧进行角焊不同,夏佩云等^[117]选择从 L 形接头外侧施焊(见图 13),实现了 7A52 和 7B52 异种牌号铝合金的焊接,在 0.05 mm 压入量下获得无缺陷接头。SSFSW 角焊的难点在于焊接质量的稳定性依赖静轴肩对拐角形面的紧密贴合,焊接过程的不贴合易导致焊接缺陷产生,因此对装配精度和搅拌头控制能力的要求更高。采用基于传感器闭环控制的 SSFSW 焊接是解决上述装配和控制难题的主要手段。



图 13 静止轴肩外角焊^[117]

T 型接头另一种焊接方法是使用传统 FSW 以搭接方式从基板背面穿透焊接基板与立板。Su Yu 等^[118]开展了单道和双道传统 FSW 焊接制造钛合金 T 型接头的对比研究,焊核区的 α 细晶组织及形貌不对称造成了两种接头变形过程中应变分布的差异。T 型接头焊接相关技术已经用于翅片式散热结构等工程应用^[119]。

角接结构对装配质量要求更高,异形轴肩与焊道

上表面通常难以保证稳定贴合,因而采用恒压力控制的焊接自动调控有利于保证焊接成形质量,焊接工况的传感和自动调控是该领域重点研究方向。

3.2.5 中空难支撑结构焊接

双轴肩搅拌摩擦焊(Bobbin Tool FSW, BT-FSW),利用下轴肩的支撑作用,可有效简化封闭结构焊接工装,是中空难支撑结构的理想焊接技术(见图 14)^[120]。同时该技术具备以下优势:a. 避免焊缝

根部未焊接缺陷；b. 焊接热输入均匀，接头组织更均匀，残余应力和变形更小；c. 焊接效率高。随着航天、高铁、船舶等领域高端制造需求的加速，BT-FSW 技术得到了快速发展，在铝合金、铝锂合金、镁合金等材料的焊接中取得了相关突破^[121]，2023 年首次在大型运载火箭贮箱中经过了飞行考核验证^[122]。目前，关于 BT-FSW 焊接研究主要集中在铝合金方

面，包括：Al-Si-Mg 系、Al-Cu 系、Al-Cu-Li 系等，少量涉及镁合金、铜合金的研究。BT-FSW 接头成形缺陷是目前研究的热点之一，搅拌头转速、焊接速度、上下轴肩形貌、轴肩间隙等参数均对焊缝成形产生重要影响^[123-124]（见图 15）。其中，由于金属塑性流动特征造成的焊缝前进侧孔洞缺陷是最常见的缺陷之一。

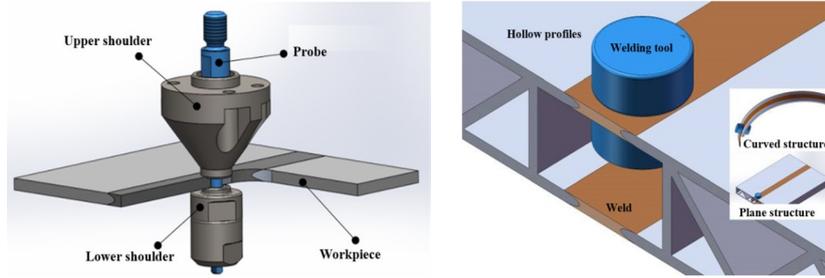
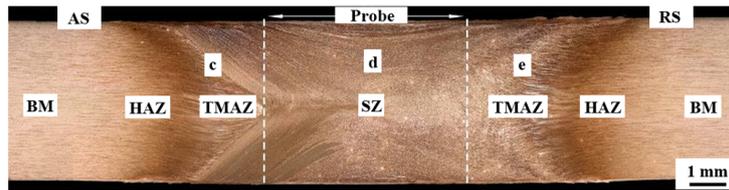
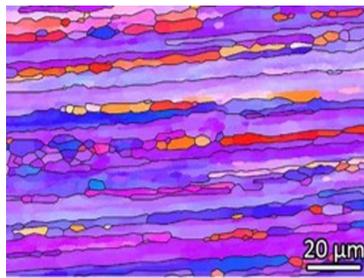


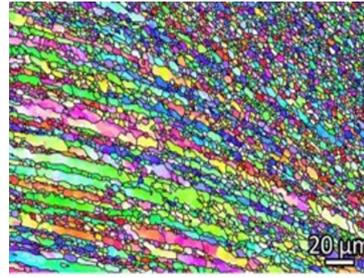
图 14 双轴肩搅拌摩擦焊接原理及适用焊接形式^[120]



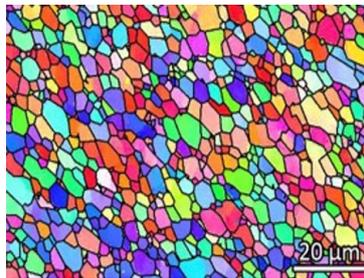
a 截面宏观形貌



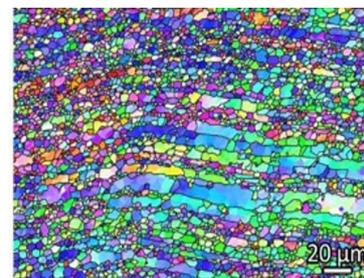
b 母材



c 前进侧 TMAZ



d 焊核区



e 后退侧 TMAZ

图 15 典型 BT-FSW 接头组织特征及 EBSD 晶粒特征^[123]

围绕接头力学性能的优化提升同样是 BT-FSW 基础工艺研究的热点，表 1 给出了目前大部分研究报道的接头拉伸力学性能数据。现有研究主要集中在调整

焊接转速和焊速，通过降低焊接热输入从而降低材料的热损伤，少量研究采用焊后时效热处理并取得了部分效果。张颖川等^[125]通过焊具和工艺优化，实现

2.5 mm 厚度 6061-T6 铝合金薄板接头抗拉强度系数 77%。Shao Minghao 等^[126]研究发现 2219-T8 铝合金 BT-FSW 焊接强度可以达到母材强度的 79.5%，同时与常规 FSW 接头相似，接头分区的非均匀析出相数量和分布情况直接决定了抗腐蚀性能的差异性。Zhang Zhenlin 等^[127]研究发现，得益于双轴肩彻底消除了根部缺陷，2219-T87 高周疲劳性能优异。王非凡等^[120]深入研究了 2198-T8 铝锂合金焊接特点，发现

了轴肩作用下接头宏观流变、微观组织及织构的对称演变规律，并开发了非对称成形机制的差速 BTFSW 新工艺，有效提升了接头成形质量并拓宽了焊接窗口，实现了接头强度达到母材强度的 85%。总体来看，当前研究仍然偏于基础工艺方面，围绕走向工程应用的残余应力、疲劳、腐蚀、寿命预测等研究还有待进一步深化。

表 1 BT-FSW 和常规 FSW 铝合金接头力学性能

材料	厚度/mm	抗拉强度/MPa			接头强度系数/%		延伸率/%		
		BM	FSW	BT-FSW	FSW	BT-FSW	BM	FSW	BT-FSW
6061-T4 ^[125]	6.35	—	—	—	93.00	91.00	—	—	—
2219-T87 ^[126]	6.00	440.00	—	351.00	—	79.50	12.00	—	7.20
2219-T87 ^[127]	6.00	447.00	—	311.00	—	69.50	10.70	—	7.00
2198-T851 ^[120]	3.20	475.00	—	380.00	—	80.00	—	—	—

3.3 搅拌摩擦点焊和点连接

基于搅拌摩擦焊接，一系列点连接技术被开发出来，点连接技术相比传统电阻点焊和铆接具有接头结合强度高、工作环境清洁等优点，在汽车和航空等点连接场景下实现了工程应用。目前，搅拌摩擦点连接主要集中在铝合金等轻合金，特别适用于高强铝合金^[128]。为了避免常规 FSW 搅拌点焊遗留凹坑问题，目前研究的重点集中在无针搅拌摩擦点焊和回填式搅拌摩擦点焊方面。

3.3.1 无针搅拌摩擦点焊技术

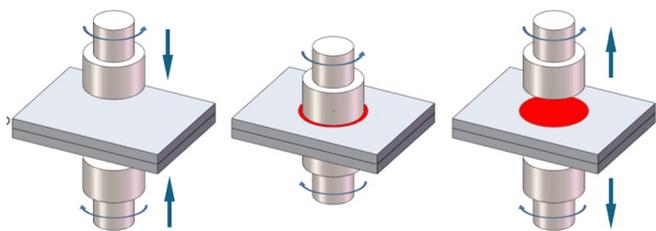


图 16 双面协同无针点焊的焊接过程^[129]

无针 FSSW 技术是利用仅有轴肩而没有搅拌针的搅拌头进行，可通过轴肩端面加工出凹槽结构增强材料焊接流动性（见图 16）^[130]，金属流动行为主要受到轴肩端面形貌及尺寸影响。无针 FSSW 的搅拌头结构简单，不存在断针问题，没有匙孔缺陷困扰，但焊接过程材料的流动性对接头性能影响较敏感。为了增加焊点的熔合从而提高点焊接头的性能，轴肩端面辅助凹槽结构设计已成为增强焊接材料流动的重要研究

方向。Wang Zhiwei 等^[131]开展了带有凹槽设计的无针 FSSW 点焊研究，利用水下焊接方式显著缩小了点焊热影响区，实现 1.2 mm 厚度 DP1180 高强钢接头拉剪力 17.9 kN。Chu Qiang 等^[129]通过协同双面无针搅拌摩擦点焊，制造搭接板材两侧对称分布的接头，抑制 Hook 缺陷的产生，实现 1.8 mm 厚度 2198 铝锂合金接头 12.6 kN 剪切力。

3.3.2 回填式搅拌摩擦点焊技术

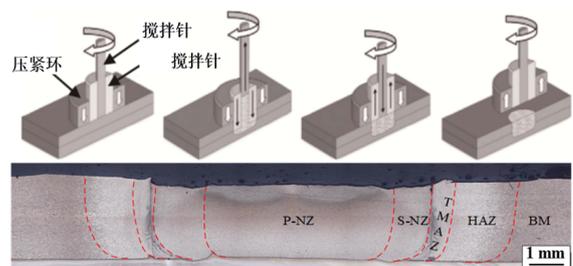


图 17 回填式 FSSW 的焊接过程和典型接头截面^[132]

回填式搅拌摩擦点焊（RFSSW）技术通过搅拌套和搅拌针工具的匹配运动实现板材金属固相可靠性连接，并消除焊点中心因搅拌针而留下的匙孔。图 17 是 RFSSW 焊接过程示意图。目前 RFSSW 技术已在各种材料点连接研究中被广泛报道^[133]。已有研究表明 RFSSW 在 Al-Cu 异种材料的焊接^[134]、Mg-Fe 异种材料的焊接以及多层 Al 箔^[135]中均获得了良好的焊缝成形，焊点金属熔合良好，接头性能得到了显著提升，因而在航空、航天和汽车等领域都获得了广泛的关注和一定的应用^[136]。周灿丰等^[137]开展了铝合金

RFSSW 缺陷的超声波检测及信号识别研究, 验证了超声 C 扫描可以对 RFSSW 内部质量进行有效检测。RFSSW 技术工程应用的常见问题是材料回填不充分而形成孔洞、侧面弱连接甚至环形沟槽缺陷等, 目前, 焊点质量的有效检测是进一步推进 RFSSW 工程化应用的有效保障。

3.3.3 顶锻式摩擦塞补焊技术

同为固相压力焊的摩擦塞补焊, 具有补焊热影响区窄、焊接效率高等优点^[138-139]。顶锻式摩擦塞补焊原理如图 18 所示。顶锻式摩擦塞补焊是目前研究和

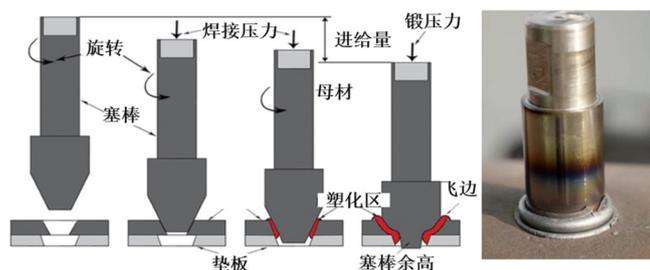


图 18 顶锻式摩擦塞补焊的焊接过程和实物图(WeldCore®)^[142]

在顶锻式摩擦塞补焊过程中, 焊机和背部支撑机构位于被焊接工件的两侧, 在封闭式的容器结构内难以设置对应支撑机构, 所以当前顶锻式塞补焊的应用主要集中于高刚性结构的补焊。

3.3.4 拉拔式摩擦塞补焊

拉拔式摩擦塞补焊 (Friction Pull Plug Welding, FPPW) 的工作原理如图 19 所示。与顶锻式塞补焊相比, 拉拔式塞补焊的焊接稳定性相对较差。焊接工艺参数多且焊接时间短, 焊接过程稳定性和焊点质量稳定性控制是其技术难点。

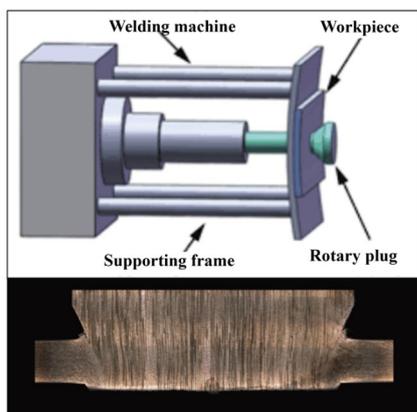


图 19 拉拔式摩擦塞补焊的焊接过程^[143]

拉拔式摩擦塞补焊的焊接主机和工装位于焊接工件同一侧, 工装设计和部署相对简单, 并且适用于封

应用最为成熟的塞补焊, 在 2219 高强铝合金压力容器中的补焊厚度达到了 38 mm。国内对于顶锻式摩擦塞补焊的研究主要集中在中薄壁结构。孙转平等^[140]实现了 8 mm 厚 2024-T3 和 7075-T3 两种材料 FSW 缺陷的顶锻式摩擦塞补焊以及 10 mm 厚 2219 铝合金 FSW 缺陷的顶锻式摩擦塞补焊, 补焊接头强度能够达到母材强度的 72% 以上。高彦军等^[141]开展 2060-T8 铝锂合金的顶锻式塞补焊研究, 接头强度系数达到 74.6%。

闭结构、复杂结构等产品的 FSW 缺陷补焊, 成为薄壁压力容器补焊的重点发展方向。目前国内拉拔式摩擦塞补焊突破了大功率液压焊接主机的研制等关键技术, 可实现 20 mm 厚度高强铝合金塞补焊。卢鹏等^[144]实现了 6~8 mm 厚 2219-T87 铝合金的拉拔式摩擦塞补焊工艺研究, 通过塞棒结构和焊接工艺参数的优化, 焊接接头的抗拉强度达到了母材抗拉强度的 80% 以上。邓越等^[145]采用数值模拟的方法对 2219 铝合金拉拔式摩擦塞补焊的界面行为开展了研究, 分析了界面处材料的流动方式以及缺陷形成的机理。Shao Zhen 等^[143]研究了 6 mm 厚度 2219-T87 铝合金 TIG 焊缝上 FPPW 接头的组织演变和断裂行为, 补焊接头强度系数达到 89.2%。

3.3.5 自冲摩擦铆接技术

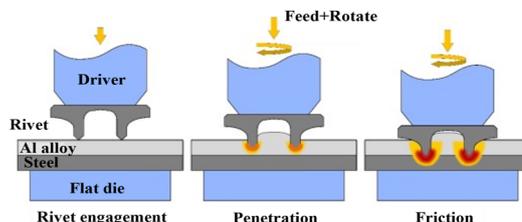


图 20 自冲摩擦铆接技术

自冲摩擦铆接技术是一种新型的铆接技术, 综合了铆接技术和摩擦焊接技术的优点, 见图 20。机械锁

合与固相冶金相结合使其接头强度高，材料适用范围广，可用于同种材料和异种材料的连接。

Shan He 等^[146]开展了自冲摩擦铆接技术的研究，开发了适用于不同材料类型的夹具和铆钉，由于固相连接和加工硬化作用，在 AA6061-T6 与 Al-Si7Mg 的搭接结构以及 AA7075-T6 搭接结构中铆接区域的性能及显微硬度均高于母材，提高幅度接近 30%。自冲摩擦铆接技术需要在背面增加垫板结构，对于部分中空结构难以实现，为了解决中空结构的摩擦铆接问题，Liu Yunpeng 等^[147]开展了自冲螺柱铆接技术研究，在传统铆钉的基础上增加螺纹结构，通过螺纹与下板的摩擦产热以及对材料的搅拌作用，实现上下板材搭接机构的可靠连接。目前自冲摩擦铆接技术已经逐步投入工程应用，相比于其他点连接技术，其更侧重于钻铆结构的技术替代，近期的研究重点在于接头的质量稳定性控制。

4 基于搅拌摩擦原理的制造技术

搅拌摩擦焊接天然带有热成形与机加工性质，很快被用于线性焊接以外的应用场景，如表面改性、复合材料制造、增材制造、结构固相修复等，从而产生一系列新型固相加工技术，同时催生了结构设计和制造装备的革新。

4.1 搅拌摩擦加工技术

搅拌摩擦加工（Friction Stir Processing, FSP）是基于搅拌摩擦焊接原理开发的材料加工技术，用于制备复合材料、细化晶粒、表面改性等场景。FSP 对材料引入剧烈塑性应变，形成致密的锻造细晶组织。另外，FSP 可以将多种增强相引入基体内，尤其适用于相容性差的材料组合。

研究表明 FSP 改性可以有效改善铸件和熔化增材制造材料的组织和性能。Wang Jian 等^[148]对 2A14 铸件进行两道 FSP，研究晶粒和织构的变化规律，FSP 组织的强度和延伸率较铸件分别提升 120.9% 和 232.1%。Zhang Xujing 等^[149]对 ER2319 铝合金电弧增材体进行 FSP 改性，基本消除了增材体内气夹和组织疏松缺陷，在强度略有提升情况下，延伸率从 5% 显著提升至 16%。Guo Xinpeng 等^[150]通过电弧填丝增材制造技术和层间 FSP 加工相结合的方法制造 7B55-Sc 增材结构，实现锻材组织的增材体制造，横向拉伸强度和延伸率分别达到 511 MPa、14.6%、疲劳强度较电弧填丝增材体提升了 81%。

利用 FSP 可诱导固相冶金反应提升材料合成的潜力。Li Ning 等^[151]利用 FSP 原位冶金制造 CoCrFeNiCu 高熵合金，成功抑制了 Cu 元素的偏析，同时将材料的硬度与屈服强度提升至母材的 1.5 倍以上，分别达到 380 HV、1 150 MPa。Xie Yuming 等^[152]对 80Al-5Li-5Mg-5Zn-5Cu 轻质高熵合金进行了搅拌摩擦加工处理，克服了材料本身脆性金属间化合物易粗化的特性，使晶粒细化和组织均匀化，通过工艺调控，产生强化效应更好的均布 T1 相，将强度和延伸率分别提升到 674 MPa 和 7.5%。

多道 FSP 热循环下材料增强相的演变是影响加工材料性能提升的关键。Zhang Zhen 等^[153]采用搅拌摩擦加工（FSP）与表面摩擦加工（SMAT）相结合的方式加工 AZ31 镁合金，控制表面飞边导致材料损失。Wang Yandong 等^[154]开展了 FSP 强化和冷轧强化的 CuCrZr 合金组织热稳定性对比研究，受时效相阻碍晶粒长大的影响，在 400 °C 下两种工艺强化的组织热稳定性无明显差异，晶粒粗化激活能相同。

4.2 搅拌摩擦增材制造技术

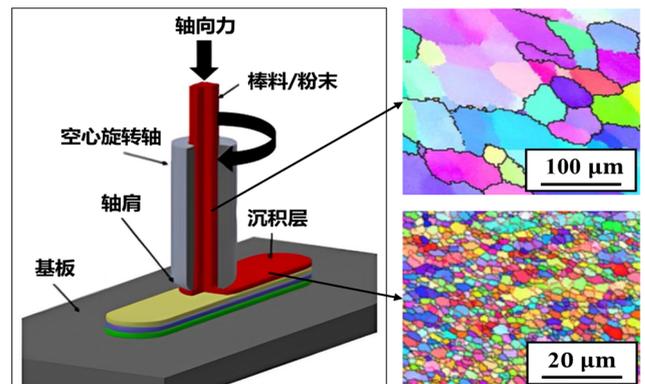


图 21 搅拌摩擦增材原理示意、典型组织、加工效率和其他增材技术对比^[155]

增材制造技术在缩短加工周期、提升材料利用率等多方面存在优势。同时，通过结构仿真和拓扑优化等手段，将制造工艺和结构设计相结合，增材技术可制造传统方法难以实现的具有复杂形状/功能的零件，拓展了制造技术的能力范围。阿拉巴马大学和 Aeroprope 公司^[155]提出搅拌摩擦增材技术（Additive Friction Stir Deposition, AFSD，见图 21），迅速成为美国航天和国防工业领域的重点发展技术之一，已在航天器、装甲车车身、航空结构的制造和损伤填充修复等多种场景中进行应用演示（见图 22）。



图22 MELD商业化搅拌增材设备和典型应用

使 AFSD 技术实现商业化的关键在于摩擦增材装备的机电结构设计，需要在不停机情况下具备连续装填棒材功能，实现增材过程的连续、稳定控制。黄永宪等^[156]在夹持上料口设置一种可装载多枚有限长棒材的离合机构，使待填入棒材可以与搅拌头形成输送通道。

除增材效率高和材料性能好的优势之外（见图23），AFSD同时存在以下特点：a. 增材过程层间锻压力较大，与同规模FSW相当，使得薄壁弱刚性、倾斜曲面等堆积面下方缺乏有效支撑，结构的制造受到

一定限制，需要确保堆积面下方具有足够的支撑；b. 打印结构层间存在毫米级材料挤出和层间弱结合区，需要通过机加工去除，这使得AFSD成为一种高效率的毛坯成形技术，而难以像激光选区熔化等增材技术一样做到近净成形；c. 堆焊累积热输入和循环导致目前时效强化铝合金等材料的打印态力学性能受限，如果想要提升性能，免除增材后热处理工序，增材过程的热输入控制和伴随冷却等手段将成为重要发展方向。

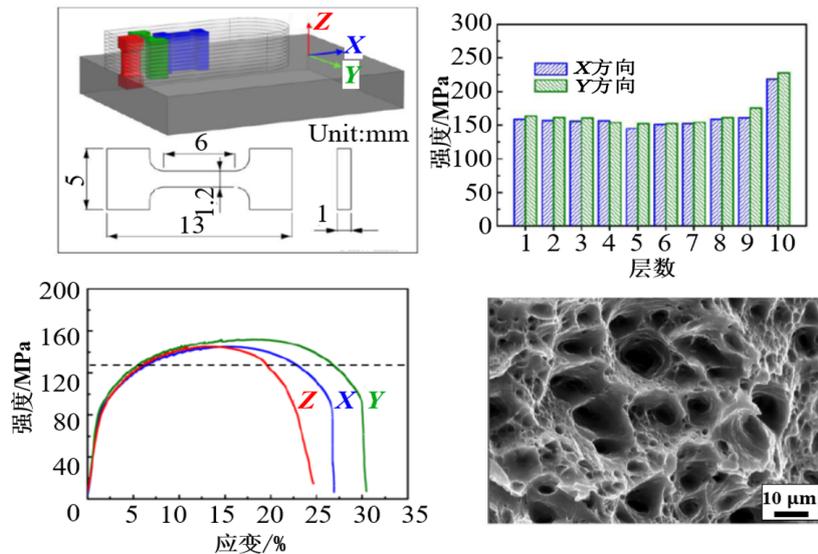


图23 FSAM增材体力学性能^[156]

国内多家单位在 AFSD 技术发展和设备研制上紧密跟进，目前包括万字科技、哈尔滨工业大学、天津大学等多家单位已经初步掌握搅拌摩擦增材技术并推出相关设备，标志着我国搅拌摩擦增材制造技术的工程化和商业化进程较快（见图 24）。国内已开发出了丝材、带材、棒材等多种技术路线，目前是 FSW 技术研究的前沿和热点^[155-160]。



图 24 搅拌摩擦增材工程验证环件/剖面致密组织

4.2.1 连续送丝增材制造技术

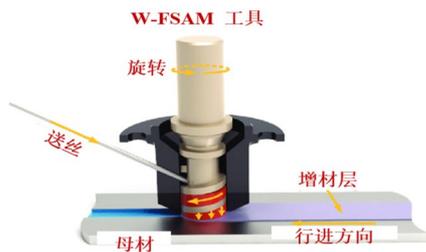


图 25 填丝搅拌摩擦增材制造技术

黄永宪团队利用静轴肩搅拌摩擦焊接原理^[157, 161]（见图 25），发展出“连续进给搅拌摩擦增材制造”技术（W-FSAM）；在静轴肩部分设置送丝口，送入丝材被搅拌针上螺纹状结构切割破碎为颗粒状，并在搅拌针作用下受旋转搅拌针的螺旋结构卷带向下输送、挤压，在出口处受搅拌挤出作用达到热塑化态形成致密的增材结构，理论上运用丝材为原料的材料沉积速率低于棒材，但目前经过工艺开发，其沉积速率也可达到 5 kg/h 以上，达到与电弧熔丝增材技术相当的水平，其增材的结构形位精度与 MELD 路线相当。但其原料连续装填功能的实现难度低于 AFSD，可通过商业送丝盘实现连续长距离增材工作，且设备柔性良好，适用于复杂曲面带有精细尺寸结构的增材制造。此外，通过对增材结构进行撒水冷却可缓解热软化作用，采用该技术制造的 6061 铝合金结构强度系数可以达到 90% 以上。

4.2.2 软接触增材制造技术

Liu Fengchao 提出软接触增材制造（Softouch AM）技术^[159, 162]，将搅拌摩擦挤出概念与增材移动主机结构融合，非旋转的棒料先行与旋转中空工具内壁接触达到热塑化态，并从中央孔道挤出，堆焊形成增材结构（见图 26）。该技术的特点在于热塑化过程在主机结构内部发生，不依赖于工作面间的锻压作用，对增材结构的压力需求大幅降低，与材料热塑态的调控在一定程度上实现了剥离，有利于降低层间锻压作用，提升结构灵活性和加工柔性。另外，原料棒材不需要转动，简化了送料系统实现难度，有利于增材主机的轻量化。目前已完成设备原理样机研制，6061 铝合金增材样件的性能与 AFSD 相近，经过热处理可恢复至时效态。

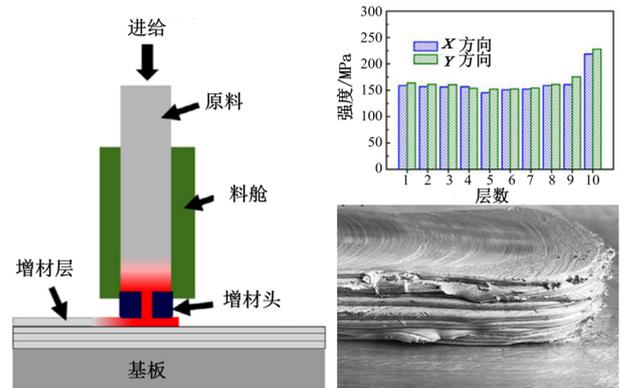


图 26 软接触增材制造原理和性能^[162]

4.2.3 连续辊压增材制造技术

连续辊压增材（Friction Rolling Additive Manufacturing, FRAM）技术^[160]由北京工业大学刘海滨团队开发，利用转轴侧面摩擦和辊压作用使丝材或带材塑性化并逐层堆积形成增材结构（见图 27），6061 和 5A09 铝合金的热处理后力学性能达到锻件水平，延伸率分别达到 12% 和 10%，高于锻材标准。与 AFSD 技术不同，连续辊压增材技术通过形变冶金和机械互锁的共同作用实现层间结合，该路线更适于大尺度的连续路径和旋转体壁板结构的增材制造。

目前看来，AFSD 和连续送丝增材已接近实现商业化。可以预见未来一段时间将是增材技术在国内研究和投入应用的爆发期，对于提供大型结构新型加工制造手段和进一步拓展搅拌摩擦加工技术体系具有重要意义。

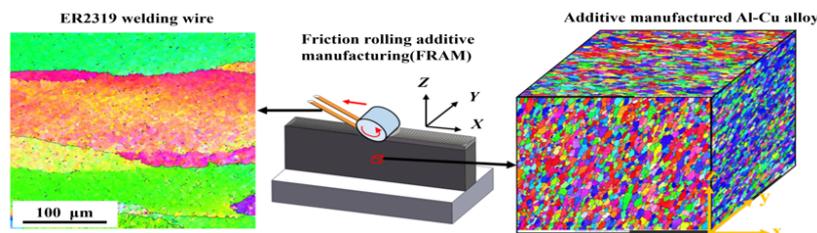


图27 FRAM技术和增材组织

5 装备和自动化

控制系统和焊接装备的优化对于生产效率和质量的提升具有重要意义，是FSW焊接技术成果真正转化为工程应用的关键。近年来国内在设备研制和相关控制技术研究上不乏创新和突破。苏海龙等^[163]进行构建两种FSW数控系统的对比研究，指出PLC+伺服控制具有更高的灵活性，重点对管材FSW焊机各主轴的运动控制算法进行了优化，实现了各主要运动副的闭环控制。周虎等^[164]通过粒子群算法对FSW拐点轨迹进行多轴协同规划，优化后的拐点程序完成效率提升67%，搅拌针运行稳定性也有所提升。

在焊接控制方面，搅拌针恒压力控制相比于传统的位移控制自动化程度更高，焊接质量和可靠性更好，已开始在焊接设备上普及。同时，对于静轴肩焊接、超薄板焊接等应用场景，恒压力控制是保障焊接质量和效率的必要手段。钱璐楠等^[165]通过在焊接产线上采用恒压力控制模式实现对焊接深度的自主调节，结合激光自动焊缝对中，建立自动化产线，使轨道列车车体型材的焊接合格率从87%提升至95%，生产效率提升约50%。王春桂等^[166]运用串联式机器人和恒压力方式实现0.5 mm 2024铝合金超薄板的无缺陷焊接，指出压力控制方式和传感器精度对于焊接质量稳定性具有决定性影响。

将工业机器人与搅拌摩擦焊主轴系统集成的智能化焊接系统柔性好、生产效率高，可以满足产品零部件复杂化、多样化，产线智能化等需求，能够实现产品的空间全位置和批量化制造，在我国汽车、船舶、轨道交通、航空、航天等产业的应用日渐普及。基于成熟的重载机器人平台开发的国内首台机器人FSW系统完成了飞机薄壁曲面结构（如机翼、机身）搅拌摩擦焊接的工程验证^[167]。倪雁冰等^[168]搭建了双机镜像搅拌摩擦焊机器人平台，验证了双机镜像搅拌摩擦焊工艺可以减小焊接顶锻力，从而简化装备需求。高焊接抗力和搅拌针-工件相互作用带来的不稳定交变

载荷是机器人FSW的主要技术挑战，单纯增加主机刚性的策略对于机器人不再适用，并联机器人相对串联多关节机器人具有更高刚性，从而使其在承担FSW等高承载任务时具有优势。符书豪等^[169]提出了基于并联机构且顶锻力达10 t的FSW主机设计，但并联机器人具有运动空间受限等技术挑战亟待解决。可以预见混联机器人等技术概念在FSW机器人系统中的应用仍有探索价值。

国内厂商于2021年研制了搅拌摩擦焊机器人工作站，配备视觉引导、焊接过程控制与记录系统，突破了12 mm厚铝合金机器人FSW技术（见图28），实现了复杂结构的装配-焊接-检测自动化^[170]，并于2022年实现了机器人焊接产线出口，在电动汽车轮毂结构制造上获得了广泛的应用。目前集成于机器人系统或龙门结构的智能相控阵超声自动检测系统，大幅提升了产品制造效率，一台设备每小时检测30~50件，准确率可达99.3%以上，相继已为宝马、奔驰、比亚迪、华为、大众等多家新能源汽车品牌提供检测服务^[171]。



图28 搅拌摩擦焊机器人工作站

6 结束语

搅拌摩擦焊接和加工技术已经成为固相制造技术的主要研究方向。对搅拌摩擦加工原理的应用在点连接、材料加工成形和增材制造方面产生了大量技术创新，尤其是搅拌摩擦增材制造技术的应用给大尺寸轻

金属结构的制造方式带来了重大变革。

国内近几年在机理研究方面进展迅速。对焊接接头强度和工艺研究已较为成熟,比肩国际水平,并形成了自己的特色。面向日益增长的焊接结构寿命和可靠性需求,FSW接头的疲劳、腐蚀等性能研究成为了新的关注点。发展焊接缺陷智能检测技术和焊接结构的寿命预测技术,建立相关的评价方法和技术标准,将是未来的研究重点方向。

焊接仿真已经成为机理研究的必要环节,随着GPU加速计算、人工智能等新计算方法的开发和应用,对搅拌摩擦焊接/加工过程机理的理解有望进一步深化。推进数字孪生等技术在FSW各环节中的应用,有助于发挥理论研究积累对FSW工程应用的指导作用,提升对焊接过程控制和质量预测的水平。

在焊接装备的发展方面,在可重复使用航天器、新型航空器、船舶等前沿工程应用的需求牵引之下,面向大尺寸、复杂结构制造的非标FSW装备研制仍将是关键发展方向。另一方面,新能源汽车、轨道列车等产品对质量稳定性和效率的需求不断提升,具备更高数字化、智能化水平的通用FSW设备和产线将是装备市场的主力产品,焊具和制造装备的通用化、标准化将是重要趋势,相关行业技术标准的建立和细化将有助于降低搅拌摩擦制造技术研发和应用的成本,这对于推进FSW技术普及、占领国际市场具有关键意义,因此推动建立相关技术标准刻不容缓。

广大科研工作者亟待发扬业内人士的创造力和行动力,在载人航天、深空探测、海洋开发等国家重大工程的需求牵引下,加速推进摩擦钻铆、搅拌摩擦加工和增材制造等新技术的工程应用,响应发展新质生产力的号召,更好地满足国民经济建设需求。

参考文献

- [1] Pan T Y. SAE international 2007 transactions journal of materials and manufacturing-V116-5[C/OL]. Ann Arbor, Michigan: SAE, 2007 [2024-08-01]. <https://doi.org/10.4271/2007-01-1702>.
- [2] Feng Zhili, Stan A D, Venkata K M, et al. Friction extrusion: solid-state metal synthesis and recycling in sustainable manufacturing[J]. JOM, 2023, 75(8): 2962-2973.
- [3] Balasubramanian N, Mishra R S, Krishnamurthy K. Friction stir channeling: Characterization of the channels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3696-3704.
- [4] Schultz J P, Creehan K. Self-reacting friction stir welding tool with the ability to add filler material: US8397974B2[P]. 2013-03-19.
- [5] Shah S, Tosunoglu S. 16th World multi-conference on systemics, cybernetics and informatics[C/OL]. Orlando, Florida: International Institute of Informatics and Systemics, 2012[2024-08-01]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Friction-Stir-Welding%3A-Current-State-of-the-Art-and-Shah-Tosunoglu/be3d521b796f9bce7edf3ebe98ead9d78172fd34>.
- [6] 于海静, 白志富, 王国庆, 等. 铝合金搅拌摩擦焊在 NASA 的研究与应用[J]. 航天制造技术, 2019(1): 1-6.
- [7] 付瑞东, 李艺君. 我国搅拌摩擦焊技术的发展及展望[J]. 金属加工(热加工), 2020(6): 14-18.
- [8] 秦国红. 中国搅拌摩擦焊船舶制造已经扬帆启航[J]. 热加工, 2007(2): 17-21.
- [9] Wang Guoqing, Zhao Yanhua, Hao Yunfei. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1): 73-91.
- [10] 任晓华. 航空制造技术发展趋势[J]. 航空科学技术, 2010(3): 2-5.
- [11] 南车成功试制整车铝合金搅拌摩擦焊地铁车辆[EB/OL].(2013-02-27) [2024-08-01]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c3914518/content.html>.
- [12] “智”造引领新生活——新能源汽车电池托盘产品制造[EB/OL].(2017-10-17) [2024-08-01]. https://www.sohu.com/a/198584022_816745.
- [13] 李洋, 罗震, 郑博方, 等. 基于大数据的全球焊接研究进展(2014~2018年)[J]. 电焊机, 2021, 51(1): 1-17.
- [14] Sun Zhen, Wu Chuangsong. A numerical model of pin thread effect on material flow and heat generation in shear layer during friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 10-21.
- [15] 杨智勇, 李武鹏, 张宇, 等. 搅拌头结构对搅拌摩擦焊缺陷形成机制的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(2): 374-384.
- [16] 卢晓红, 孙旭东, 滕乐, 等. 2219 铝合金厚板搅拌摩擦焊搅拌头结构参数优化[J]. 焊接, 2022(10): 1-7
- [17] Chen Gaoqiang, Li Han, Wang Guoqing, et al. Effects of pin thread on the in-process material flow behavior during friction stir welding: A computational fluid dynamics study[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 124: 12-21.
- [18] Huang Yongxian, Xie Yuming, Meng Xiangchen, et al. Joint formation mechanism of high depth-to-width ratio friction stir welding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35: 1261-1269.
- [19] Gao Yihan, Liu Jinglin, Wen Qi, et al. Large depth to width ratio friction stir welding joint obtained by novel designed tool with

- double pin[J]. *Materials Characterization*, 2023, 196: 112497.
- [20] Liu F C, Hovanski Y, Miles M P, et al. A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(1): 39-57.
- [21] 贾重雪, 赵运强, 董春林, 等. 2205 双相不锈钢搅拌摩擦焊接头组织和性能[J]. *焊接学报*, 2019, 40(3): 97-101.
- [22] Yang Xiawei, Yao Mingxuan, Su Yu, et al. Forming control and the relationship between microstructure and mechanical property in TIG-assisted friction stir welded joint of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo titanium alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 6196-6206.
- [23] Gao Fuyang, Guo Yufan, Yu Wei, et al. Microstructure evolution of friction stir welding of Ti6321 titanium alloy based on the weld temperature below microstructure transformation temperature[J]. *Materials Characterization*, 2021, 177: 111121.
- [24] Yu Mingrun, Zhao Hongyun, Xu Fei, et al. Influence of ultrasonic vibrations on the microstructure and mechanical properties of Al/Ti friction stir lap welds[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 282: 116676.
- [25] 陈书锦, 仇清风, 芦笙, 等. 一种磁化程度可调磁耳嵌磁式搅拌摩擦焊接装置: CN113953650B[P]. 2021-11-18.
- [26] Chen Xinyi, Chen Shujin, Duan Ruihai, et al. Study on the microstructure and properties of spray formed 7055-T76 aluminum alloy joints by rotating magnetic field assisted friction stir welding[J]. *Materials Characterization*, 2024, 214: 114080.
- [27] Huang Yongxian, Wan Long, Lv Shixiong, et al. In situ rolling friction stir welding for joining AA2219[J]. *Materials & Design*, 2013, 50: 810-816.
- [28] Hu Yanying, Liu Huijie, Du Shuaishuai. Achievement of high-strength 2219 aluminum alloy joint in a broad process window by ultrasonic enhanced friction stir welding[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 804: 140587.
- [29] Liu F C, Hovanski Y, Miles M P, et al. A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34: 39-57.
- [30] 马宗义, 商乔, 倪丁瑞, 等. 镁合金搅拌摩擦焊接的研究现状与展望[J]. *金属学报 (中文版)*, 2018, 54(11): 1597-1617.
- [31] Chen Gaoqiang, Wang Guoqing, Shi Qingyu, et al. Three-dimensional thermal-mechanical analysis of retractable pin tool friction stir welding process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 41: 1-9.
- [32] Zeng Xiaohua, Xue Peng, Wang Dong, et al. Effect of processing parameters on plastic flow and defect formation in friction-stir-welded aluminum alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49: 2673-2683.
- [33] Yang Chao, Zhang Junfan, Ma Guonan, et al. Microstructure and mechanical properties of double-side friction stir welded 6082Al ultra-thick plates[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 41: 105-116.
- [34] Wang Zhiwei, Zhang Junfan, Xie Guangming, et al. Evolution mechanisms of microstructure and mechanical properties in a friction stir welded ultrahigh-strength quenching and partitioning steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 102: 213-223.
- [35] Jiang Jingyu, Jiang Feng, Zhang Menghan. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-Mg-Sc-Zr alloy sheet after friction stir welding[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33(6): 1687-1700.
- [36] Wang Wen, Han Peng, Peng Pai, et al. Friction stir processing of magnesium alloys: A review[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(1): 43-57.
- [37] Li Gaohui, Zhou Li, Luo Sanfeng, et al. Quality improvement of bobbin tool friction stir welds in Mg-Zn-Zr alloy by adjusting tool geometry[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 282: 116685.
- [38] Zeng Xianghao, Xue Peng, Wang Dong, et al. Material flow and void defect formation in friction stir welding of aluminium alloys[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, 23(8): 677-686.
- [39] Liu F C, Nelson T W. In-situ material flow pattern around probe during friction stir welding of austenitic stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2016, 110: 354-364.
- [40] Zhang Xiushuo, Ma Yu' E, Li Wenya, et al. A review of residual stress effects on fatigue properties of friction stir welds[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2023, 48(6): 775-813.
- [41] Zhang Xingxing, Wu Lihui, Andrae H, et al. Effects of welding speed on the multiscale residual stresses in friction stir welded metal matrix composites[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35 (5): 824-832.
- [42] Gong Ziyang, Zhang Timing, Chen Yuhua, et al. Effect of laser shock peening on stress corrosion cracking of TC4/2A14 dissimilar metal friction stir welding joints[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 1716-1725.
- [43] Liu Peng, Sun Siyu, Xu Shubo, et al. Microstructure and properties in the weld surface of friction stir welded 7050-T7451 aluminium alloys by laser shock peening[J]. *Vacuum*, 2018, 152: 25-29.
- [44] Zhang Hua, Zhao Changyu, Guo Qilong, et al. Microstructure and corrosion behavior of friction stir welded Al alloy coated by in situ shot-peening-assisted cold spray[J]. *Acta Metallurgica Sinica*

- (English Letters), 2020, 33(1): 172-182.
- [45] Wang Bin, Zhu Peng, Cao Yunshuo, et al. Effects of different friction stir welding processes on residual stress and deformation of Ti62Al alloy joints[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 6096-6107.
- [46] Xue Wei, Xiao Liyang, Huang Changqing, et al. Asymmetric study on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints: Finite element simulation and experiment[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2024, 55: 108-128.
- [47] Chen Gaoqiang, Liu Huijie, Shi Qingyu. Development of computational approach for analyzing in-process thermal-mechanical condition during friction stir welding for prediction of material bonding defect[J]. Materials, 2023, 16(23): 7473.
- [48] Yu Fanqi, Zhao Yunqiang, Lin Zhicheng, 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.
- [49] Guan Wei, Zhao Yanhua, Liu Yongchang, et al. Force data-driven machine learning for defects in friction stir welding[J]. Scripta Materialia, 2022, 217: 114765.
- [50] Xie Yuming, Meng Xiangchen, Huang Yongxian. Entire-process simulation of friction stir welding Part 2: Implementation of neural networks[J]. Welding Journal, 2022, 101(6):172S-177S.
- [51] Xie Yuming, Meng Xiangchen, Huang Yongxian. Entire-process simulation of friction stir welding Part 1: Experiments and simulation [J]. Welding Journal, 2022,101(5): 144-159.
- [52] 金士杰, 田鑫, 林莉. 铝合金搅拌摩擦焊超声检测研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(8): 45-59.
- [53] 李杨, 李根, 周云方. 搅拌摩擦焊缺陷无损检测技术研究进展 [J]. 焊接技术, 2020, 49(2): 1-4.
- [54] 马天天, 林莉, 张东辉, 等. 基于 TOFD 周向扫查的厚壁管道倾斜裂纹精准定量[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 23-29.
- [55] 肖湖, 高晓聂, 彭元吉. 铝型材薄板搅拌摩擦焊焊缝相控阵超声波检测研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2024, 47(1): 102-105.
- [56] 迟大钊, 齐聪成. 国内焊接缺陷声学无损检测研究综述[J]. 精密成形工程, 2018, 10(1): 74-81.
- [57] 郝云飞, 王国庆, 历晓笑, 等. 焊透深度和前进侧位置对 FSW 贮箱锁底接头性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(6): 14-19.
- [58] 张丽娜, 赵衍华, 朱瑞灿, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊焊缝相控阵超声波无损检测[J]. 焊接, 2016(7): 44-47+70.
- [59] 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.
- [60] 吴振成, 李来平, 涂俊, 等. 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头的涡流阵列检测[J]. 无损检测, 2018, 40(1): 25-28
- [61] 黄霞, 胡文刚, 袁维佳, 等. 先进检测技术在航天结构制造中的应用与实践[J]. 中国航天, 2018(10): 14-21.
- [62] 万洲焊接推出新一代铝合金搅拌摩擦焊焊缝无损检测机器人[EB/OL].[2024-08-01]. <http://www.fsw.net.cn/fsw/post/196.html>.
- [63] Wang Zhiwei, Ma Guonan, Yu Baohai, et al. Improving mechanical properties of friction-stir-spot-welded advanced ultra-high-strength steel with additional water cooling[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020, 25(4): 336-344.
- [64] Cong Shuang, Li Nan, Zhu Zhi, et al. A comparative study of conventional, dynamic rotation and heat-assisted friction stir welding of Ti-6Al-4V plates to reduce welding defects[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 323: 118217.
- [65] Wang Zhiwei, Zhang Junfan, Xie Guangming, et al. Evolution mechanisms of microstructure and mechanical properties in a friction stir welded ultrahigh-strength quenching and partitioning steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 102: 213-223.
- [66] Wang Zhiwei, Zhang Min, Li Cong, et al. Achieving a high-strength dissimilar joint of T91 heat-resistant steel to 316L stainless steel via friction stir welding[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(1):166-176.
- [67] Wang Yandong, Zhu Shize, Xie Guangming, et al. Realising equal-strength welding with good conductivity in Cu - Cr - Zr alloy via friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2021, 26(6): 448-454.
- [68] Lai Ruilin, Li Xiaoqian, He Diqu, et al. Microstructures evolution and localized properties variation of a thick friction stir welded CuCrZr alloy plate[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 510: 70-79.
- [69] Liu Qiang, Ni Dingrui, Wang Wen, et al. Improved mechanical properties of magnesium alloy thick plate joint via uniform microstructure by differential double-shoulder friction stir welding [J]. Materials Letters, 2023, 338: 134045.
- [70] Zhang Junlei, Zhang Yingxing, Chen Xiang, et al. Improving joint performance of friction stir welded AZ31/AM60 dissimilar Mg alloys by double-sided welding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 882: 145444.
- [71] Li Wenya, Niu Pengliang, Yan S R, et al. Improving microstructural and tensile properties of AZ31B magnesium alloy joints by stationary shoulder friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 159-167.
- [72] Gao Shikang, Zhao Hongyun, Li Gaohui, et al. Strengthening mechanism and corrosion behavior of friction stir welded LAZ933

- magnesium-lithium alloy[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, 12(12): 4909-4922.
- [73] Gao Shikang, Zhao Hongyun, Li Gaohui, et al. Microstructure, properties and natural ageing behavior of friction stir welded dual-phase Mg-Li alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 324: 118252.
- [74] Tao Yongqi, Zhang Zhen, Xue Peng, et al. Effect of post weld artificial aging and water cooling on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2198-T8 Al-Li joints[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 123: 92-112.
- [75] Xie Yuming, Meng Xiangchen, Wang Feifan, et al. Insight on corrosion behavior of friction stir welded AA2219/AA2195 joints in astronautical engineering[J]. *Corrosion Science*, 2021, 192: 109800.
- [76] Zan YuNing, Wang BeiBei, Zhou YangTao, et al. Microstructure and mechanical property evolution of friction stir welded ($B_4C+Al_2O_3$)/Al composites designed for neutron absorbing materials[J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, 63(7): 1256-1264.
- [77] Wang Chen, Wang Beibei, Wang Dong, et al. High-speed friction stir welding of SiC p/Al-Mg-Si-Cu composite[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2019, 32: 677-683.
- [78] Han Peng, Lin Jia, Wang Wen, et al. Friction stir processing of cold-sprayed high-entropy alloy particles reinforced aluminum matrix composites: corrosion and wear properties[J]. *Metals and Materials International*, 2023, 29(3): 845-860.
- [79] Miao Chang, Du Chengchao, Kai Xizhou, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welding joint of in-situ ZrB₂/AA7085 composites[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 586: 152740.
- [80] Zhang Min, Liu F C, Liu Zhenyu, et al. Highly stable nanoscale amorphous microstructure at steel-aluminum interface enabled by a new solid-state additive manufacturing method[J]. *Scripta Materialia*, 2023, 227: 115300.
- [81] Meng Yongsheng, Ma Yuan, Chen Shuhai, et al. Friction stir butt welding of magnesium alloy to steel by truncated cone-shaped stirring pin with threads[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 291: 117038.
- [82] Niu Pengliang, Li Wenya, Li Na, et al. Exfoliation corrosion of friction stir welded dissimilar 2024-to-7075 aluminum alloys[J]. *Materials Characterization*, 2019, 147: 93-100.
- [83] Zhang Guifeng, Yang Xiaohui, Zhu Daheng, et al. Cladding thick Al plate onto strong steel substrate using a novel process of multilayer-friction stir brazing (ML-FSB)[J]. *Materials & Design*, 2020, 185: 108232.
- [84] Zheng Yang, Liu Wei, Su Zhenyu, et al. Effects of Zr interlayer on microstructure, mechanical property and corrosion behavior of Al/Mg dissimilar friction stir welding lap joints[J]. *Materials Characterization*, 2023, 199: 112826.
- [85] Yao Haining, Chen Ke, Kondoh K, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir lap welds between FeCoCrNiMn high entropy alloy and 6061 Al alloy[J]. *Materials & Design*, 2022, 224: 111411.
- [86] Huang Yongxian, Huang Tifang, Wan Long, et al. Material flow and mechanical properties of aluminum-to-steel self-riveting friction stir lap joints[J]. *Journal of Manufacturing Process*, 2019, 263: 129-137.
- [87] Wu Lihui, Xiao Bolv, Nagatsuka K, et al. Achieving strong friction lap joints of carbon-fiber reinforced plastic and metals by modifying metal surface structure via laser-processing pretreatment[J]. *Composite Structures*, 2020, 242: 112167.
- [88] Geng Peihao, Ma Hong, Li Weihao, et al. Improving bonding strength of Al/CFRP hybrid joint through modifying friction spot joining tools[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 254: 110588.
- [89] Liu Yuchun, Wang Xinbo, Zhou Li, et al. Achievement of high-strength Al/CFRP hybrid joint via high-speed friction stir lap joining and laser texturing pretreatment parameters variation[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 199: 111762.
- [90] 刘会杰, 胡琰莹, 王欢, 等. 一种静止轴肩辅助支撑倾斜穿透搅拌摩擦焊接装置及方法: CN 105382405 B[P]. 2016-03-09.
- [91] 祁欣, 张芷晴, 马琳, 等. 搅拌摩擦焊根部未焊透缺陷在线检测与评估的系统及方法: CN117830248A[P]. 2023-12-28.
- [92] 潘杏娥. 一种减少焊缝根部缺陷的搅拌头装置: CN217799560U [P]. 2022-06-13.
- [93] Sun Tianzhu, Roy M J, Stronga D, et al. Comparison of residual stress distributions in conventional and stationary shoulder high-strength aluminum alloy friction stir welds[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 242: 92-100.
- [94] 方远方, 张华. 铝合金型材的静轴肩倾斜搅拌摩擦焊接头性能[J]. *中国机械工程*, 2021(7): 2021, 32(7): 815-820.
- [95] He Weiliang, Li Mingshen, Song Qi, et al. Efficacy of external stationary shoulder for controlling residual stress and distortion in friction stir welding[J]. *The Indian Institute of Metals*, 2019, 72: 1349-1359.
- [96] Bai Yafeng, Jiang Xiaoqing, Chen Shujun, et al. Microstructure and properties of electrically assisted stationary shoulder friction stir welded Ti6Al4V[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2021, 26(5): 377-388.
- [97] Liu Zhenlei, Meng Xiangchen, Ji Shude, et al. Improving tensile properties of Al/Mg joint by smashing intermetallic compounds via ultrasonic-assisted stationary shoulder friction stir welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 552-559.

- [98] Martin J P. Stationary shoulder friction stir welding. Proceedings of the 1st international joint symposium on joining and welding[M]. TWI Technology Center (Yorkshire), UK: Elsevier, 2013: 477-482.
- [99] Ma Xiaotian, Xie Yuming, Meng Xiangchen, et al. Stepped-shoulder friction stir welding to alleviate weld thinning for dissimilar AA2195-T8/AA2219-T6 alloys[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2021, 26(8): 599-605.
- [100] 王国庆, 赵刚, 郝云飞, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊缝匙孔形缺陷修补技术[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(3): 24-28.
- [101] Gong Peng, Zuo Yingying, Ji Shude, et al. A novel non-keyhole friction stir welding process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 17-25.
- [102] 郝云飞, 李延民, 周庆, 等. 铝合金可回抽搅拌摩擦焊接头组织和性能[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(2): 42-48.
- [103] 计鹏飞, 刘西伟, 张玉常, 等. 20 mm 厚 2219 铝合金可回抽搅拌摩擦焊接及接头组织和性能分析[J]. 焊接学报, 2021, 42(2): 86-91.
- [104] 张俊林, 李冬晓, 张斌, 等. 铝合金厚板 FSW 接头组织特征与金属流动行为[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(11): 95-101.
- [105] 上海航天设备制造总厂研制成功国内首台超大厚板搅拌摩擦焊接设备[EB/OL]. [2024-08-01]. <https://zhuzao.com/news/show.php?itemid=41052>, 2020.09.01.
- [106] Qiao Qi, Su Yishi, Cao He, et al. Effect of post-weld heat treatment on double-sided friction stir welded joint of 120 mm ultra-thick SiCp/Al composite plates[J]. Materials Characterization, 2020, 169: 110668.
- [107] 宫文彪, 朱芮, 郗新哲, 等. 6082 铝合金超厚板搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2): 512-519.
- [108] 张聃, 夏佩云, 崔凡, 等. 6061-T6 铝合金微搅拌摩擦焊工艺[J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 102-106.
- [109] 王春桂, 赵运强, 邓军, 等. 2024-T4 超薄铝合金机器人搅拌摩擦焊接头组织及力学性能[J]. 焊接学报, 2021, 42(10): 49-54.
- [110] 赵华夏, 李若青, 李浩然. 阶梯形正反螺纹搅拌针对 2A12-T4 铝合金 FSLW 接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 108-112.
- [111] Ji Shude, Wen Qi, Li Zhengwei, et al. A novel friction stir diffusion bonding process using convex-vortex pin tools[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 48: 23-30.
- [112] Meng Xiangchen, Cao Bingqi, Qiu Yang, et al. Equal-load-bearing joining of alclad AA2024-T4 alloy stringers and skins in aviation via friction stir lap welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 1295-1302.
- [113] 刘洋, 许鸿吉, 秦志恒. 不同偏移量对 6005A-T6 对搭接搅拌摩擦焊接头力学性能及疲劳性能的影响[J]. 电焊机, 2022, 52(8): 95-100.
- [114] 宋建岭, 赵英杰, 孙广达, 等. 搅拌针长度对 2A14 铝合金锁底结构搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2020, 44(12): 18-23+46.
- [115] Huang Yongxian, Wan Long, Meng Xiangchen, et al. Probe shape design for eliminating the defects of friction stir lap welded dissimilar materials[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 420-427.
- [116] 郝云飞, 马建波, 毕煌圣, 等. 铝合金 T 形接头静止轴肩搅拌摩擦焊接及组织性能分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 48-54.
- [117] 夏佩云, 尹玉环, 董吉义, 等. 轴肩型面对角接头静止轴肩搅拌摩擦焊缝成形的影响[J]. 航空制造技术, 2021, 64(13): 96-101.
- [118] Su Yu, Li Wenya, Patel V, et al. Formability of an AA5083 aluminum alloy T-joint using SSFSW on both corners[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(15): 1737-1744.
- [119] 邓清洪. 6063-T5 铝合金散热器厚板搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 电焊机, 2024, 54(5): 85-91.
- [120] 王非凡. Al-Li 合金双轴肩搅拌摩擦焊成形机制及性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [121] 李超, 马康, 郝云飞, 等. 2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊工艺及工程应用[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2022(4): 30-35+44.
- [122] Hao Yunfei, Bi Huangsheng, Dan Ting, et al. Influence of pin tool offset on the unconsumed interface and mechanical properties of the self-reacting friction stir welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 30-35.
- [123] Wen Qi, Li Wenya, Gao Yanjun, et al. Numerical simulation and experimental investigation of band patterns in bobbin tool friction stir welding of aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100: 2679-2687.
- [124] Wang Feifan, Li Wenya, Shen Junjun, et al. Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al-Li alloy[J]. Materials & Design, 2015, 86: 933-940.
- [125] 张颖川, 马国栋, 代鹏, 等. 6061-T6 铝合金中空薄壁型材双轴肩搅拌摩擦焊工具设计与工艺分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 88-95.
- [126] Shao Minghao, Wang Caimei, Zhang Hua, et al. Microstructure and corrosion behavior of bobbin tool friction stir welded 2219 aluminum alloy[J]. Materials Characterization, 2022, 192: 112178.
- [127] Zhang Zhenlin, Wang Beibei, Zhang Zhen, et al. Enhanced fatigue properties of 2219 Al alloy joints via bobbin tool friction stir welding[J]. Acta Metallurgica Sinica (English letter), 2022, 36: 586-596.

- [128] 赵衍华, 张丽娜, 刘景铎, 等. 搅拌摩擦点焊技术简介[J]. 航天制造技术, 2009(4): 1-5.
- [129] Chu Qiang, Li Wenya, Hou Hongliang, et al. On the double-side probeless friction stir spot welding of AA2198 Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(5): 784-789.
- [130] 傅田, 李文亚, 杨夏炜, 等. 搅拌摩擦点焊技术及其研究现状[J]. 材料工程, 2015, 43(4): 102-114.
- [131] Wang Zhiwei, Ma Guangnan, Yu Baohai, et al. Improving mechanical properties of friction-stir-spot-welded advanced ultra-high-strength steel with additional water cooling[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020, 25(4): 336-344.
- [132] 李送斌, 封小松, 王瑾, 等. 基于非圆形搅拌杆下压的 5A06/2219-T6 回填式摩擦点焊接头组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1552-1558.
- [133] Boldsaikhan E, Fukada S, Fujimoto M, et al. Refill friction stir spot welding of surface-treated aerospace aluminum alloys with faying-surface sealant[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42: 113-120.
- [134] Nasiri A M, Shen Zhikang, Hou J S C, et al. Failure analysis of tool used in refill friction stir spot welding of Al 2099 alloy [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 84: 25-33.
- [135] Shen Zhikang, Ding Yuquan, Guo Wei, et al. Refill friction stir spot welding Al alloy to copper via pure metallurgical joining mechanism [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34: 75-82.
- [136] Fu Banglong, Shen Junjun, Suhuddin Uceu F H R, et al. Revealing joining mechanism in refill friction stir spot welding of AZ31 magnesium alloy to galvanized DP600 steel[J]. Materials & Design, 2021, 209: 1-18.
- [137] 周灿丰, 焦向东, 高辉. 回填式搅拌摩擦点焊技术研究新进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(12): 48-54.
- [138] 王国庆, 张丽娜, 朱瑞灿, 等. 摩擦塞补焊技术研究现状及展望[J]. 电焊机, 2017, 47(1): 17-25.
- [139] Du Bo, Yang Xinqi, Liu Kaixuan, et al. Effects of supporting plate hole and welding force on weld formation and mechanical property of friction plug joints for AA2219-T87 friction stir welds[J]. Welding in the World, 2019, 63(4): 989-1000.
- [140] 孙转平, 杨新岐, 刘凯旋, 等. 异种铝合金摩擦塞补焊工艺与组织性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 145-150.
- [141] 高彦军, 刘西伟, 刘旭升, 等. 2060-T8 铝锂合金顶锻式摩擦塞补焊接头组织性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(7): 69-75.
- [142] Wang Guoqing, Zhao Yanhua, and Tang Yingying. Research progress of bobbin tool friction stir welding of aluminum alloys: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020, 33(1): 13-29.
- [143] Shao Zhen, Cui Lei, Yang Lijun, et al. Microstructure and mechanical properties of friction pull plug welding for 2219-T87 aluminum alloy with tungsten inert gas weld[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(6): 1216-1224.
- [144] 卢鹏, 崔雷, 王惠苗, 等. 2219 铝合金拉锻式摩擦塞补焊工艺研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(12): 55-64.
- [145] 邓越, 刘正武, 浦岩昊, 等. 2219 铝合金拉拔式摩擦塞补焊接头界面缺陷研究[J]. 航天制造技术, 2023(4): 30-35.
- [146] Shan He, Ma Yunwu, Niu Sizhe, et al. Friction stir riveting (FSR) of AA6061-T6 aluminum alloy and DP600 steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 295: 1-13.
- [147] Liu Yunpeng, Ma Yunwu, Lou Ming, et al. Flow drill screw (FDS) technique: A state of art review[J]. Journal of Manufacturing Process, 2023, 103: 23-52.
- [148] Wang Jian, Zhou Dongshuai, Xie Li, et al. Effect of multi-pass friction stir processing on microstructures and mechanical behaviors of as-cast 2A14 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30: 3033-3043.
- [149] Zhang Xujing, He Yanru, Wei Yanhong. Adopting continuous multi-pass friction stir processing to enhance the wire-arc additive manufactured ER2319 thin-walled part[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2023, 46: 230-241.
- [150] Guo Xinpeng, Ni Dingrui, Li Huijun, et al. Enhancing strength, ductility, and fatigue performance of Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr alloy using a hybrid approach: Wire-arc directed energy deposition and interlayer friction stir processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 322: 118173.
- [151] Li Ning, Jia Cunlei, Wang Zhiwei, et al. Achieving a high-strength CoCrFeNiCu high-entropy alloy with an ultrafine-grained structure via friction stir processing[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020, 33: 947-956.
- [152] Xie Yuming, Meng Xiangchen, Zang Ranzhuo, et al. Deformation-driven modification towards strength-ductility enhancement in Al - Li - Mg - Zn - Cu lightweight high-entropy alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2022, 830: 142332.
- [153] Zhang Zhen, Li Yaozu, Peng Jinhua, et al. Combining surface mechanical attrition treatment with friction stir processing to optimize the mechanical properties of a magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 756: 184-189.
- [154] Wang Yandong, Liu Fengchao, Xue Peng, et al. Thermal stability behaviors of ultrafine-grained Cu-Cr-Zr alloy processed by friction stir processing and rolling methods[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 950: 169957.

- [155] Dong Hongrui, Li Xiaoqiang, Xu Ke, et al. A review on solid-state-based additive friction stir deposition[J]. *Aerospace*, 2022, 9(10): 565.
- [156] 黄永宪, 谢聿铭, 孟祥晨. 一种连续进给送料搅拌摩擦增材制造装置及增材制造方法: 202110411108 .X[P]. 2021-04-16.
- [157] 黄永宪, 陈会子, 孟祥晨, 等. 一种同步不间断送丝全固相搅拌摩擦增材制造方法与装置: CN 114799480 A[P]. 2022-07-29.
- [158] Chen Gang, Wu Kai, Wang Yu, et al. Effect of rotational speed and feed rate on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy manufactured by additive friction stir deposition[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127, (3): 1165-1176.
- [159] Liu Fengchao, Dong Pingsha, Khan A S, et al. 3D printing of fine-grained aluminum alloys through extrusion-based additive manufacturing: Microstructure and property characterization[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 139: 126-136.
- [160] Xie Ruishan, Liang Tongshuai, Shi Yanchao, et al. Revealing the bonding mechanisms between deposit and substrate of the friction rolling additive manufactured hybrid aluminum alloys[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 56: 102942.
- [161] Chen Huizi, Chen Jialin, Meng Xiangchen, et al. Wire-based friction stir additive manufacturing toward field repairing[J]. *Welding Journal*, 2022, 9: 249-252.
- [162] Liu Fengchao, Dong Pingsha. Solid state manufacturing system and process suitable for extrusion, additive manufacturing, coating, repair, welding, forging and material fabrication: US20210053283A 1[P]. 2021-02-25.
- [163] 苏海龙, 骆宗安, 谢广明. 管材搅拌摩擦焊机控制系统的设计及应用[J]. *钢管*, 2021, 50(1): 57-91.
- [164] 周虎, 付祖超, 鄢兆辰, 等. 搅拌摩擦焊接机床轨迹时间优化及其拐点切向跟随方法研究[J]. *制造业自动化*, 2024, 46(7): 89-94.
- [165] 钱璐楠, 李春生. 轨道车体自动化搅拌摩擦焊接技术研究[J]. *电焊机*, 2023, 53(6): 42-47.
- [166] 王春桂, 赵运强, 邓军, 等. 2024-T4 超薄铝合金机器人搅拌摩擦焊接接头组织及力学性能[J]. *焊接学报*, 2021, 42(10): 49-54.
- [167] 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(4): 1-4.
- [168] 倪雁冰, 刘武, 高康歌, 等. 双机镜像搅拌摩擦焊顶锻力变化规律与影响因素研究[J]. *航空制造技术*, 2024, 67(10): 24-33.
- [169] Zhang Zeyu, Meng Xiangchen, Xie Yuming, et al. Robotic friction stir additive manufacturing[DB/OL]. (2024-02-07) [2024-08-01]. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4719347>.
- [170] 符书豪, 戈军委, 谢吉林, 等. 高刚性三维并联搅拌摩擦焊机头机构设计[J]. *电焊机*, 2023, 53(8): 131-137.
- [171] 司福建. 搅拌摩擦焊在汽车工业中的应用[J]. *金属加工 (热加工)*, 2021(4): 6-12.