

# 搅拌摩擦固相修复技术研究现状及发展方向

刘亚凡<sup>1</sup>, 史程程<sup>1</sup>, 赵菲菲<sup>2</sup>, 王文宇<sup>3a</sup>, 任智强<sup>3a</sup>, 秦智勇<sup>3b</sup>,  
王鸿琪<sup>1</sup>, 鲁克锋<sup>1</sup>, 樊世冲<sup>1</sup>, 殷凤仕<sup>1</sup>, 赵阳<sup>3a</sup>

(1. 山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 陆军边海防学院 电子工程教研室, 西安 710108; 3. 陆军装甲兵学院 a. 装备再制造技术国防科技重点实验室  
b. 陆军装备部信息保障室, 北京 100072)

**摘要:** 金属结构件在生产和使用过程中易出现裂纹、孔洞和沟槽等缺陷, 搅拌摩擦焊具有热输入量小、焊接变形小和焊接效率高等优点, 在金属材料修复领域具有巨大的发展潜力。首先总结了搅拌摩擦焊修复的修复性能和特点。由于搅拌摩擦焊修复仅能修复裂纹及体积较小的沟槽等缺陷, 对于其他类型缺陷难以有效修复。针对搅拌摩擦焊修复的局限性, 介绍了基于搅拌摩擦焊原理的搅拌摩擦点焊修复和搅拌摩擦增材修复。搅拌摩擦点焊修复分为回填式搅拌摩擦点焊修复、填充搅拌摩擦焊修复和摩擦塞焊修复, 主要用于匙孔等孔洞类缺陷的修复。阐述了各类搅拌摩擦点焊修复的工作原理、修复接头性能和强化方式, 并对比分析了各类工艺的不足之处。搅拌摩擦增材修复分为复合增材修复和增材搅拌摩擦沉积修复, 主要用于大面积、大体积类表面缺陷的修复, 论述了各类搅拌摩擦增材修复的作用机制、沉积层性能和工艺特点。最后对搅拌摩擦点焊修复和搅拌摩擦增材修复存在的问题及未来发展方向进行了展望。

**关键词:** 缺陷修复; 搅拌摩擦焊; 搅拌摩擦点焊; 搅拌摩擦增材; 工艺参数; 力学性能

**中图分类号:** TG453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)04-0047-20

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.04.004

## Research Status and Development Direction of Friction Stir Solid Phase Repair Technology

LIU Ya-fan<sup>1</sup>, SHI Cheng-cheng<sup>1</sup>, ZHAO Fei-fei<sup>2</sup>, WANG Wen-yu<sup>3a</sup>, REN Zhi-qiang<sup>3a</sup>, QIN Zhi-yong<sup>3b</sup>,  
WANG Hong-qi<sup>1</sup>, LU Ke-feng<sup>1</sup>, FAN Shi-chong<sup>1</sup>, YIN Feng-shi<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>3a</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Shandong Zibo 255000, China;  
2. Department of Electronic Engineering, Army Academy of Border and Coastal Defence, Xi'an 710108, China;  
3. a. National Key Laboratory for Remanufacturing, b. Armament Department of the Army Information Assurance Room, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

收稿日期: 2021-12-29; 修订日期: 2022-04-25

Received: 2021-12-29; Revised: 2022-04-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1105800); 基础加强计划 (2019-JCJQ-ZD-126)

Fund: National key R&D plan (2018YFB1105800); Basic Strengthening Plan (2019-JCJQ-ZD-126)

作者简介: 刘亚凡 (1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为搅拌摩擦加工。

Biography: LIU Ya-fan (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: friction stir processing.

通讯作者: 赵阳 (1983—), 男, 博士。

Corresponding author: ZHAO Yang (1983-), Male, Doctor.

通讯作者: 殷凤仕 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高温金属组织和性能。

Corresponding author: YIN Feng-shi (1967-), Male, Doctor, Professor, Research focus: study on Microstructure and properties of high temperature metals.

引文格式: 刘亚凡, 史程程, 赵菲菲, 等. 搅拌摩擦固相修复技术研究现状及发展方向[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 47-66.

LIU Ya-fan, SHI Cheng-cheng, ZHAO Fei-fei, et al. Research Status and Development Direction of Friction Stir Solid Phase Repair Technology[J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 47-66.

**ABSTRACT:** For a large number of metal structural parts used in the manufacturing industry today, cracks, holes and grooves and other defects are inevitable in the production and use process, affecting the use of metal structural parts, and in serious cases even lead to structural scrap. Therefore, in order to ensure the reliability of the use of metal structural parts, the welding repair technology for defects in metal structural parts has practical engineering significance. Compared with traditional fusion welding, friction stir welding has the advantages of low heat input, small welding deformation, high welding efficiency, low welding temperature, small grain size and no obvious defects. In addition, its weld has excellent morphology and performance, so it has great potential for development in the field of metal material repair. However, friction stir welding can only be used to repair cracks, small grooves, so other defects and other types of defects are difficult to be repaired effectively.

In view of the limitations of friction stir welding repair, friction stir spot welding repair and friction stir additive repair based on the principle of friction stir welding are introduced. Friction stir spot welding repair was mainly divided into refilled friction stir spot welding repair, filling friction stir welding repair and friction plug welding repair, mainly used for keyhole and other hole type defect repair. By controlling the process parameters such as tool speed, welding time and welding force, the grain size can be refined and the repaired joints with excellent mechanical properties can be obtained. However, it is also found that the refilled friction stir spot welding repair process is complex and the repair area is limited by the size of the welding tool. For filling friction stir welding repair and friction plug welding repair, suitable consumable welding tool materials need to be selected. The working principle, joint performance and strengthening methods of various kinds of friction stir spot welding repair are expounded, and the shortcomings of various processes are compared and analyzed. Friction stir additive repair is mainly divided into composite additive repair and additive friction stir deposition repair, mainly used for large area and large volume surface defect repair. Composite additive repair is a repair technology that combines cold spraying and friction stir processing, and has great potential for development in the field of repairing large defects on the surface of parts. Additive friction stir deposition repair is a combination of friction stir welding and raw material addition, using the heat generated by the friction of a high-speed rotating non-self-consuming deposition tool to deposit solid or metal powder raw materials, layer by layer, at a high deposition rate, so as to complete the repair. However, due to the poor bonding strength of the deposited material to the substrate for composite additive repair and additive friction stir deposition repair, the performance of the repaired area does not meet the requirements for industrial use, and further exploration and research is needed.

The current research status of three stir friction solid phase repair technologies are summarized: friction stir welding repair, friction stir spot welding repair and friction stir additive repair, and the mechanism, properties and technological characteristics of various kinds of friction stir additive repair are discussed in detail, pointing out the repair area performance, current problems and development trends of the three technologies.

**KEY WORDS:** defect repair; friction stir welding; friction stir spot welding; friction stir additive; process parameters; mechanical property

搅拌摩擦焊技术 (Friction stir welding, FSW) 是 1991 年由英国焊接研究所发明的固相连接技术, 其原理为焊接工具与工件剧烈摩擦, 产生大量摩擦热, 使其周围金属软化并发生塑性变形, 塑化的金属在搅拌头旋转的作用下填充搅拌针后方所形成的空腔, 并在搅拌轴肩的顶锻作用下实现工件间的固相连接<sup>[1-2]</sup>。FSW 技术的主要优势: 在焊接工具的搅拌作用下, 避免了裂纹、气孔等缺陷的产生, 并且形成了细小的等轴晶, 具有优良的力学性能; 焊接温度比其他焊接工艺低, 不会造成合金元素的烧损, 能够保证焊接头的性能; 焊接时的热输入量小, 焊后焊接头不会发生较大的变形, 无需进行焊后调整; 根据金属的厚度可以选择不同焊接工具的尺寸和形状, 因此比熔化焊的焊接效率高; 焊接头组织不会与杂质反应, 因而焊前对工件待焊区的清理要求较低; 无需保护气体

和焊接材料, 能够在复杂环境下进行焊接, 适应性较强<sup>[3-4]</sup>。

FSW 技术的快速发展为其在金属材料修复领域打下了坚实的基础。目前, FSW 技术已实现了对零件表面裂纹、沟槽和隧道等缺陷的修复, 修复区域组织的晶粒细小, 具有良好的力学性能。相较于传统的熔化焊修复技术, FSW 修复技术在很多方面都得到显著提高。FSW 修复技术的焊接温度较低, 可以避免组织晶粒的粗化; 在焊接工具的搅拌作用下, 能够避免二次缺陷的产生<sup>[5-6]</sup>。目前, FSW 修复技术对匙孔等孔洞类缺陷, 以及大面积、大体积类表面缺陷难以进行有效修复。针对 FSW 修复技术的局限性, 相关人员发现搅拌摩擦点焊修复和搅拌摩擦增材修复在修复大面积、大体积类表面缺陷方面具有巨大的应用前景。文中分析了不同搅拌摩擦修复方法对于各种

缺陷的适用性, 并对国内外的相关研究进行了介绍。

## 1 搅拌摩擦焊修复技术

FSW 作为一种新颖的固相焊接技术, 可对铝合金、镁合金等金属材料的缺陷进行修复<sup>[7]</sup>。基于 FSW 的表面裂纹修复技术称为搅拌摩擦裂纹修复 (Friction stir crack repairing, FSCR), 其修复工艺过程如图 1 所示<sup>[8]</sup>。高速旋转的圆柱形焊接修复工具沿着裂纹路径移动, 在搅拌和锻造作用下促使金属发生塑性变形, 并在此动态再结晶过程中导致裂纹愈合和修复区域的晶粒细化。整个裂纹修复过程是一个固相连接过程, 与熔化焊相比, 试样的变形更小, 残余应力水平更低, 对基体材料的影响更小, 因而广泛用于工程结构零件的开裂修复<sup>[9]</sup>。Ren 等<sup>[9]</sup>对通过 FSCR 技术修复的 2024 铝合金进行了分析, 研究发现, 塑性金属倾向于向肩部中心流动, 从而修复裂纹。同时, 修复区的粗晶组织得到细化, 而热机械影响区和热影响区的晶粒受热长大, 如图 2 所示。与基材相比, 修复后试件的强度和延展性得以恢复, 并且经热处理后, 修复后试件的拉伸性能进一步提高。Wang 等<sup>[10]</sup>使用 FSCR 技术对 2024 铝合金表面裂纹进行了修复, 研究发现, 转速和焊接速度对修复区域的质量和疲劳寿命的影响较大, 随着转速的增加, 焊接速度减小, 能够避免表面弧纹的产生, 获得了光滑的修复表面; 随着

焊接速度或转速的增加, 疲劳寿命呈现先下降后上升的趋势, 如图 3 所示。当采用不当的焊接速度和转速时, 修复层与基体金属的界面会形成脱层缺陷。

对于沟槽、隧道等缺陷, 可通过 FSW 进行修复, 修复接头的拉伸性能显著提高, 并且随着塑性变形产生热量的减弱和传热效率的降低, 修复接头的显微硬度与初始接头的显微硬度相比得到显著提高。Zhang 等<sup>[11]</sup>使用 FSW 搭焊修复了 7B04-T74 铝合金的 V 型沟槽缺陷, 其修复工艺过程如图 4 所示。为了形成搭接结构, 将无缺陷的预制板材放在带有 V 型沟槽缺陷板材的顶部, 2 个薄板完全重叠。然后, 从顶部薄板插入 FSW 焊接工具进行搅拌修复。结果表明, 修复接头的承载能力得到提高, 并且因塑性变形产生的热量减弱、传热效率降低, 修复接头的显微硬度与传统 FSW 接头相比得到显著提高, 如图 5 所示。Liu 等<sup>[12]</sup>使用 FSW 对初次 FSW 焊接所残留的坡口缺陷进

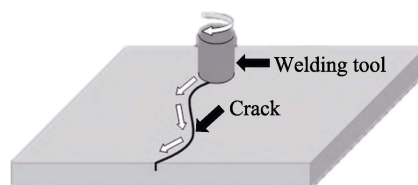


图 1 搅拌摩擦裂纹工艺原理<sup>[8]</sup>  
Fig.1 Technological principle of friction stir cracking<sup>[8]</sup>

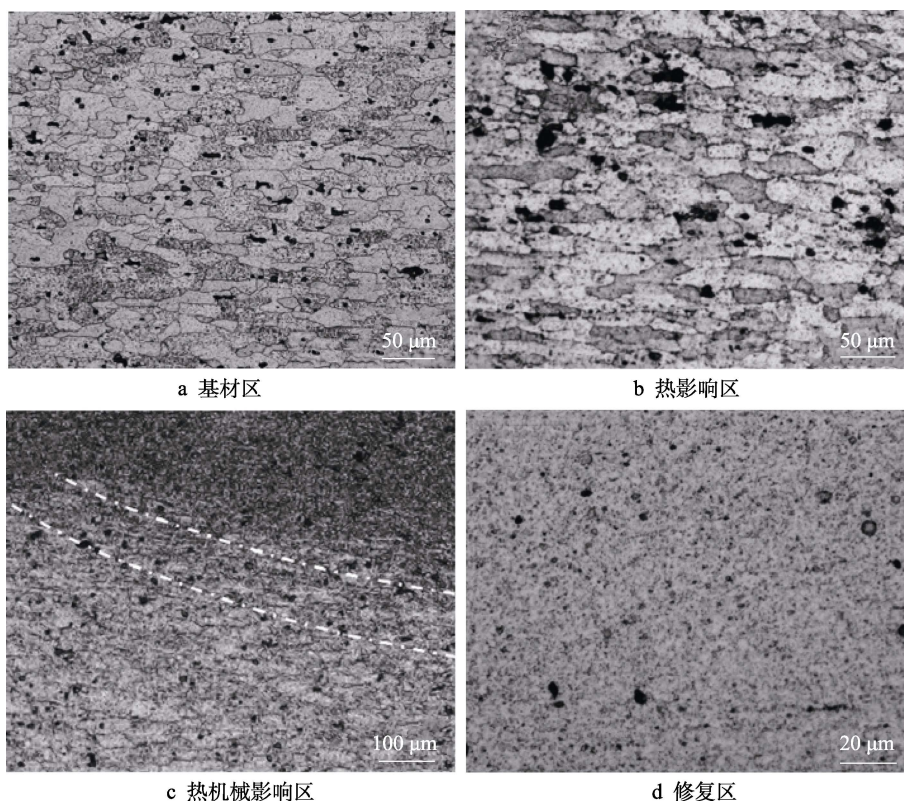


图 2 2024 铝合金修复接头各区显微组织<sup>[9]</sup>

Fig.2 Microstructure of each zone of 2024 aluminum alloy repair joint: a) substrate zone; b) heat affected zone; c) thermo-mechanically affected zone; d) repair zone<sup>[9]</sup>

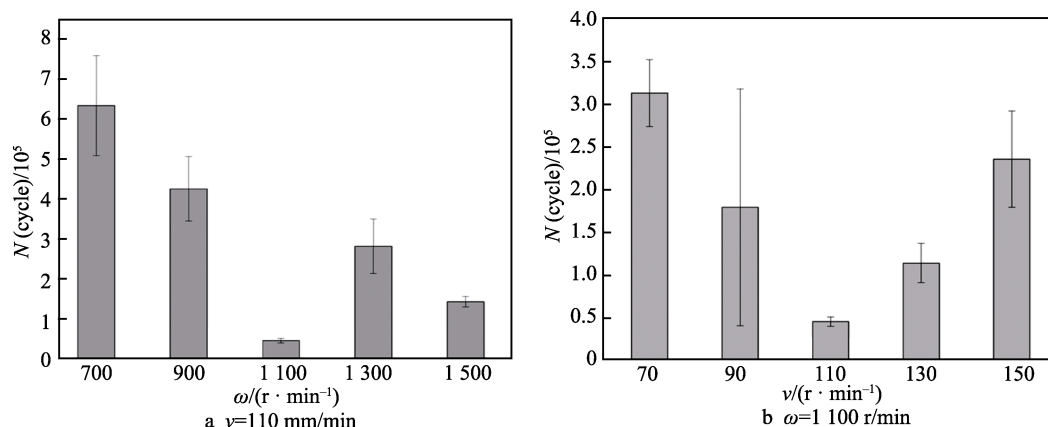


图3 修复后试样的疲劳寿命<sup>[10]</sup>  
Fig.3 Fatigue life of repaired specimen<sup>[10]</sup>

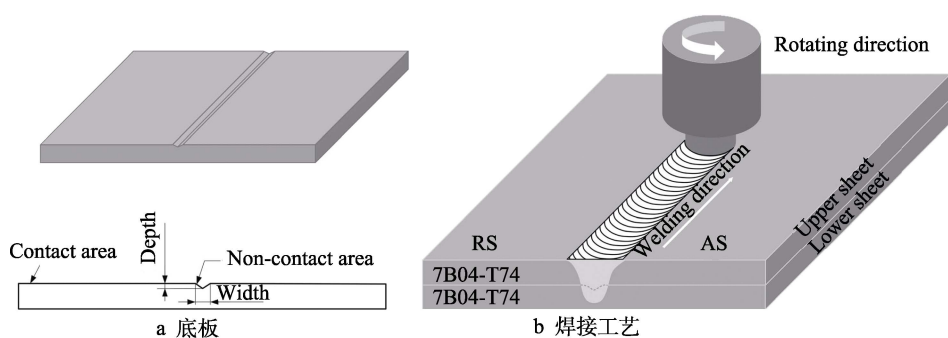


图4 FSW 搭焊示意图<sup>[11]</sup>  
Fig.4 Schematic diagram of FSW lap welding<sup>[11]</sup>: a) base plate; b) welding process

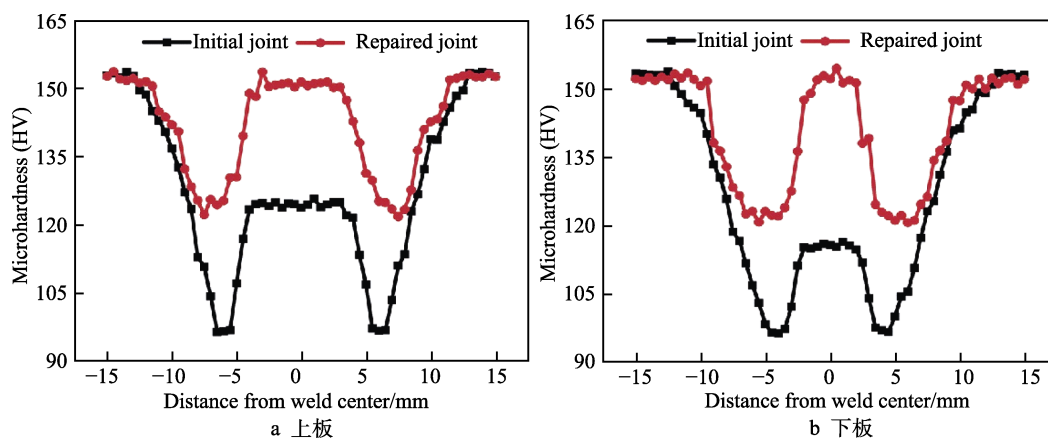


图5 焊接速度为 100 mm/min 时获得的接头显微硬度分布<sup>[11]</sup>  
Fig.5 Microhardness distribution of joint obtained at welding speed of 100 mm/min:  
a) upper plate; b) lower plate<sup>[11]</sup>

行了修复,发现偏置修复方式优于对称修复方式,其修复工艺如图6所示,其修复焊接头的抗拉强度与优质FSW接头相当,达到了基材的78%。Li等<sup>[13]</sup>使用FSW修复了7N01-T4铝合金在焊接中形成的隧道缺陷。结果表明,经修复焊接后搅拌区晶粒的尺寸略有下降,促进了后退侧热机影响区晶粒再结晶,与缺陷接头相比,拉伸性能显著提高。

对于较大体积的缺陷,仅使用FSW无法进行有效修复,需在缺陷处填充材料,并进行FSW。修复

接头具有优异的拉伸性能,并且相较于熔化焊修复,其修复成本较低,修复接头的性能更好。Wu等<sup>[14]</sup>采用一种基于搅拌摩擦加工(Friction stir processing, FSP)的新方法,以块体为填充材料,并进行FSW,成功地修复了34CrNiMo6钢,其修复工艺过程如图7所示。填充块相较于传统熔化焊修复耗材更便宜,并且避免了熔融修复的冶金问题。由于显微组织主要为板条马氏体,所以修复接头具有优异的拉伸性能,其最大极限强度为900 MPa,达到了基材强度的91.8%。



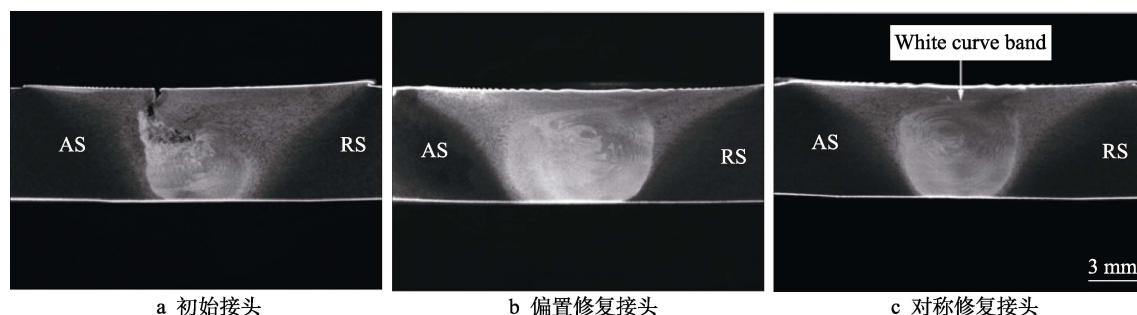
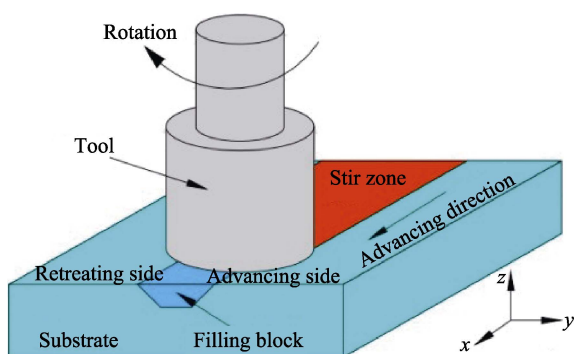
图 6 有沟槽缺陷的初始接头及其修复接头的横截面形态<sup>[12]</sup>

Fig.6 Cross-sectional morphologies of initial joint with groove defect and repair joints:

a) initial joint; b) offset repair joint; c) symmetrical repair joint<sup>[12]</sup>图 7 FSP 修复示意图<sup>[14]</sup>Fig.7 Schematic diagram of FSP repair<sup>[14]</sup>

虽然 FSW 能够起到修复作用, 但有时修复后仍存在缺陷, 需要进行多次 FSW 修复。由于在多次修复过程中热输入会导致晶粒的粗化, 因此会降低修复区域的抗拉强度和硬度<sup>[15]</sup>。Li 等<sup>[7]</sup>使用搭焊 FSW 技术对 2219-T6 铝合金 FSW 焊缝进行了修复, 研究发现, FSW 成功修复了裂纹, 但二次焊接热输入量使得 Cu 原子向  $Al_2Cu$  颗粒偏聚, 促进了  $Al_2Cu$  颗粒的生长, 导致热影响区晶粒粗化, 降低了抗拉强度和硬度。Brown 等<sup>[15]</sup>对 7050-T7451 铝合金进行了 5 次 FSW 修复, 研究发现, 由于焊接温度接近固溶处理温度, 因此在 5 次焊接的累加作用下降低了热影响区的硬度和抗拉强度。

综上所述, 目前 FSW 修复技术广泛应用于裂纹、隧道和沟槽等较小体积缺陷的修复, 在焊接工具的搅拌作用下促进了修复区域的晶粒细化, 并且焊缝变形小, 残余应力水平低, 使得修复区域具有良好的形貌和优异的力学性能。对于较大体积缺陷修复, FSW 的修复过程较复杂, 难以实现有效修复, 且多次修复会导致晶粒粗化, 降低其力学性能。为了克服 FSW 修复技术的局限, 国内外学者对搅拌摩擦点焊修复和搅拌摩擦增材修复做了相关研究, 并取得了一定成果。

## 2 搅拌摩擦点焊修复技术

在使用过程中, 金属结构件长时间受到环境的侵蚀作用, 会形成孔洞类缺陷, 并且在 FSW 及搅拌摩

擦点焊 (Friction stir spot welding, FSSW) 焊接完成后, 在焊点中心会残留匙孔缺陷<sup>[16]</sup>。近年来, 国内外学者提出了回填式搅拌摩擦点焊修复、填充搅拌摩擦焊修复和摩擦塞焊修复等技术, 以消除匙孔等孔洞类缺陷的发生。

### 2.1 回填式搅拌摩擦点焊修复技术

回填式搅拌摩擦点焊 (Refilled friction stir spot welding, RFSSW) 是 1999 年由德国 GKSS 中心发明的一项固态连接技术<sup>[17]</sup>。RFSSW 的焊接工具由压紧环、搅拌套和搅拌针 3 个部分组成, 该技术通过精确控制搅拌针和搅拌套的相对运动, 将摩擦过程中产生的热塑性材料重新挤入焊点, 其工艺流程如图 8 所示<sup>[18]</sup>。回填式搅拌摩擦点焊工艺流程大致分为 4 个阶段: 焊接工具借助压紧环夹紧焊接件, 搅拌套和搅拌针高速旋转, 产生摩擦热, 使得材料软化; 搅拌套和搅拌针分别向下和向上运动, 塑性化材料在搅拌套的挤压下转移到搅拌针向上运动形成的空腔中; 搅拌套和搅拌针同时改变移动方向, 使塑化材料填充到形成的空腔中; 将焊接工具完全从焊接区取出, 形成无表面缺陷的平坦表面。该技术能够修复搅拌摩擦焊的匙孔、空隙等体积缺陷, 增大接头的有效承载面积, 从而提高接头的力学性能<sup>[18-19]</sup>。该项技术广泛应用于航空航天、高速铁路等领域构件的连接和修复<sup>[20]</sup>。

通过控制 RFSSW 焊接工具的转速、搅拌套的插入深度等工艺参数, 可获得优异的修复接头。Xu 等<sup>[21]</sup>采用 RFSSW 焊接厚度为 2 mm 的 5083-O 合金, 结果表明, 在无表面压痕的情况下焊接时, 可以观察到空隙和不完全再填充等缺陷, 而搅拌针和搅拌套形成的 0.3 mm 的接合面压痕可以消除焊接缺陷。在搅拌作用下, 晶粒得到细化, 搅拌区的显微硬度高于基材的显微硬度, 且随着焊接热输入的增加而降低。Shen 等<sup>[22]</sup>采用 RFSSW 焊接 7075-T6 铝合金, 成功修复了匙孔缺陷, 焊缝的微观结构受到钩状缺陷、空隙等的影响较大, 焊缝横截面的硬度分布呈现 W 形, 在搅拌套与压紧环的边界处达到最小值, 并且在较低转速下可以获得较好的硬度。Li 等<sup>[23]</sup>采用 RFSSW 成功地连接了 2A12-T4 铝合金, 研究发现, 随着转速的增

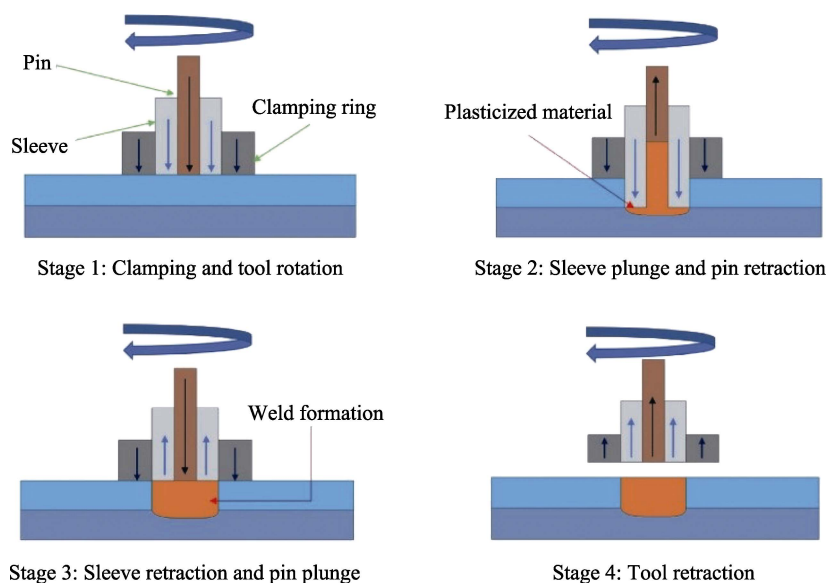


图8 RFSSW 工艺流程<sup>[18]</sup>  
Fig.8 RFSSW process flow<sup>[18]</sup>

加, 钩状缺陷的弯曲程度增大, 焊缝边缘的连接韧带更加分散, 如图9所示。搅拌区的硬度降低, 接头的硬度分布在宏观上由W形变为U形, 如图10所示。拉伸剪切破坏载荷呈现先增大后减小的趋势, 在转速为1300 r/min时达到最大值(10030 N), 获得了优化的RFSSW接头。Xiong等<sup>[24]</sup>对2524-T3铝合金的RFSSW进行研究发现, 在低转速下产生的热量较少, 这会限制金属的流动能力和再填充能力, 导致接头处残留的空隙较多。然而, 高转速所产生的高热量导致熔融态金属与周围金属发生分层, 减少了由搅拌工具对金属的搅拌作用, 导致变形热减少, 并且所引起的金属飞溅导致填充空隙金属减少。Sun<sup>[25]</sup>采用RFSSW对6061-T6铝合金进行了焊接, 研究发现, 在搅拌套插入深度为1.75 mm的接头中未观察到明显的钩状缺陷。随着搅拌套插入深度的增加, 钩状缺陷弯曲程度增大, 其破坏载荷呈现先增大后减小的趋势。当套管插入深度为2.0 mm, 相应的破坏载荷为8673.4 N时, 得到了最佳接头。Irene等<sup>[26]</sup>采用RFSSW对EN AW-7475-T761铝合金进行了焊接, 研究发现, 随着

焊接时间和插入深度的增加, 搅拌区面积增大, 中心粗晶带的宽度减小, 晶粒尺寸得到细化, 从而减少了缺陷, 提高了搭接剪切强度。随着转速的提高, 搅拌区面积减小, 中心粗晶带宽度增大, 导致材料的硬度下降。

为了进一步提高RFSSW技术修复接头的性能, 可通过搅拌针强化预处理, 适当的热处理和时效处理, 添加强化相等方法来促进接头的冶金结合, 提高接头的力学性能。Cao等<sup>[27]</sup>为了解决RFSSW存在的中心空洞缺陷, 引入了搅拌针插入强化RFSSW技术。在RFSSW的基础上增加了初始搅拌针插入阶段, 从而促进了焊接中心的塑性变形, 消除了中心空洞缺陷, 促进了焊缝的冶金结合。与RFSSW相比, 焊接强度得到提高。Reimann等<sup>[28]</sup>采用RFSSW对6061-T6铝合金轧制板材中直径为7.5 mm的键孔进行了填充修复。实验结果表明, 形成了具有良好表面外观的无缺陷接头, 焊缝具有较高的抗拉强度和硬度, 并通过固溶和时效热处理产生了良好的强化相分布, 使得焊缝的抗拉强度由213 MPa提高至331 MPa。Reimann

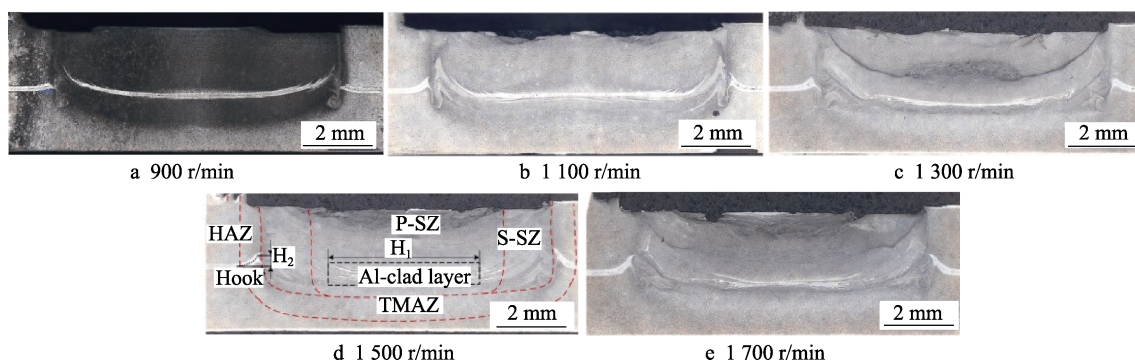
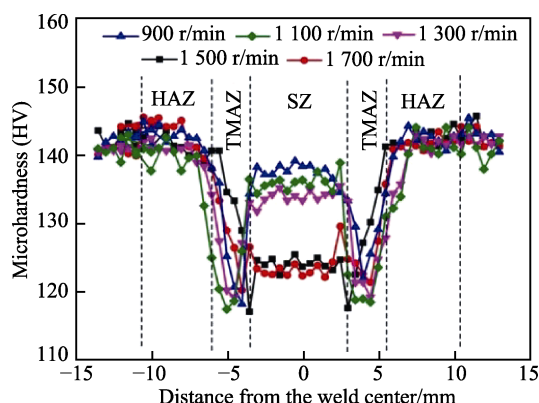


图9 不同转速下接头的横截面<sup>[23]</sup>

Fig.9 Cross section of joints at different rotating speed<sup>[23]</sup>

图 10 不同转速下接头的显微硬度分布<sup>[23]</sup>Fig.10 Microhardness distribution of joints at different rotating speed<sup>[23]</sup>

等<sup>[29]</sup>使用 RFSSW 对厚度为 6 mm 的 AA7075-T651 板中通孔进行了补焊, 实现了无缺陷且高效的焊接。焊后自然时效对焊缝的力学性能非常重要, 在时效期间, 热影响区硬度可由基材硬度的 58% 增加到 70%, 并且屈服强度从基材屈服强度的 46% 增加到 55%, 自然时效作用在 4 周后趋于稳定。Wang 等<sup>[30]</sup>采用 RFSSW 制备了质量分数为 0.6% 的石墨烯纳米片的 AA2014 铝合金接头, 结果表明, 石墨烯纳米片引起的晶粒细化、载荷传递、位错强化和裂纹桥接等协同效应, 导致石墨烯纳米片在钉扎区发生硬化行为, 石墨烯纳米片使接头的剪切强度提高了 31%, 断裂韧性也提高了近 20%, 石墨烯纳米片接头的疲劳寿命得到延长, 大大提高了接头的强度和韧性。

通过进一步对 RFSSW 进行研究发现, RFSSW 技术对异种材料的匙孔等孔洞类缺陷也具有较好的修复效果。Chen 等<sup>[31]</sup>通过 RFSSW 工艺有效修复了铝合金和钢传统搅拌摩擦点焊的匙孔缺陷, 并且铝合金与钢之间的接触面无裂纹。与传统搅拌摩擦点焊接头相比, RFSSW 接头的剪切力增加了 56.33%, 接头的伸长率提高了 81.25%。Shen 等<sup>[32]</sup>使用 RFSSW 对 Mg 和 DP600 钢异种材料进行了点焊, 结果表明, 钢表面的镀锌层有利于促进 Mg/DP600 钢点焊时的结合程度, 其有效结合面积大于 Mg/Mg 点焊时的有效结合面积, 可以获得更高的焊接强度和疲劳性能。Dong 等<sup>[33]</sup>采用 RFSSW 成功地对铝镁合金进行了异种焊

接, 结果表明, 通过搅拌工具的搅拌作用, 铝镁合金实现了液态共晶相连接, 焊接后在接头中心形成了明显的金属间化合物。随着焊接时间的增加, 金属间化合物增厚, 并且接头的搭接剪切破坏载荷呈现先增大后减小的趋势, 在 2 s 时获得了 3.6 kN 的最大破坏载荷。Ding 等<sup>[34]</sup>通过 RFSSW 对 AA5754 铝合金和共晶 Al-Si 涂层钢进行了焊接, 研究发现, 涂层钢中的 AlSi 涂层由 AlSi 共晶相和 2 个主要金属间相 ( $\text{Al}_7\text{Fe}_2\text{Si}$ 、 $\text{Al}_5\text{Fe}_2(\text{Si})$ ) 组成, 前者在异种焊接中起着关键作用, 后者有效地抑制了焊接过程中金属化合物的形成和现有金属化合物的生长, 从而使得搭接剪切强度随着插入深度的增加而增加。

综上所述, RFSSW 技术对修复匙孔等孔洞类缺陷具有良好的修复效果, 通过焊接工具的搅拌作用, 细化了修复区域的晶粒尺寸。随着转速的提高, 热输入量随之增加, 导致硬度下降, 拉伸剪切破坏载荷呈现先增大后减小的趋势, 而低转速会导致较多的空隙。随着搅拌套插入深度的增加, 破坏载荷呈现先增大后减小的趋势。为了获得优异的修复接头, 需要合理选择转速和插入深度。目前, 采用搅拌针强化预处理, 有利于焊缝的冶金结合, 达到了提高强度的目的。通过对 RFSSW 焊缝进行适当的热处理和自然时效处理, 有利于强化相的合理分布, 对焊缝的强度和硬度起到了强化作用。通过添加强化相, 可对焊缝起到细化晶粒、位错强化等效果, 进而提高了焊缝的力学性能。RFSSW 在异种材料的匙孔等孔洞类缺陷修复方面也具有巨大的发展前景。在修复期间生成的金属化合物起到了强化作用, 通过控制焊接时间、选择合适的板材涂层等方法来控制金属化合物的厚度, 从而获得了优异的修复接头。由于修复孔洞的大小受到焊接工具尺寸的影响, 并且焊接过程较复杂, 对焊接工具的控制要求较高, 因此有待进一步改进焊接工具。

## 2.2 填充搅拌摩擦焊修复技术

填充搅拌摩擦焊技术 (Filling friction stir welding, FFSW) 利用合金钢轴肩和可消耗金属搅拌针组成的焊接工具实现对传统搅拌摩擦焊匙孔的修复, 其修复过程如图 11 所示, 分为扎入、补焊、提起 3 个阶段。

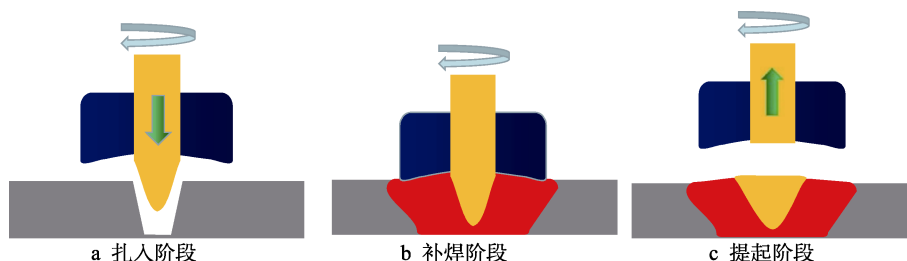


图 11 FFSW 修复示意图

Fig.11 Schematic diagram of FFSW repair: a) threading stage; b) repair welding stage; c) lifting stage



1) 扎入阶段, 即搅拌针高速旋转并扎入待补焊匙孔内的过程。

2) 补焊阶段, 即合金钢肩部与工件上表面接触, 导致搅拌针与匙孔的界面发生摩擦加热, 材料发生塑性变形和流动, 从而对匙孔进行填充补焊的过程。

3) 提起阶段, 即焊接工具提起过程。将搅拌针锥体部分填充于匙孔内, 界面及轴肩作用区域材料发生严重的塑性变形和流动现象, 实现了对焊缝匙孔的修复。

利用可消耗金属搅拌针和孔洞壁的复合塑性变形和流动, FFSW 工艺能够修复具有冶金和机械结合特性的孔洞, 从而形成无缺陷的修复区域, 并且具有优异的力学性能, 在工业构件修复领域具有巨大的发展前景<sup>[35-36]</sup>。

FFSW 技术能够成功地修复匙孔等孔洞类缺陷, 对修复区晶粒起到了细化作用, 但是对修复区域的极限抗拉强度和伸长率的提高作用不明显, 有时达不到基材的极限抗拉强度和伸长率, 可通过控制焊接转速、插入速度和插入深度等工艺参数进行改善。Behmand 等<sup>[37]</sup>采用 FFSW 对 AA5456 铝合金板材的搅拌摩擦焊接匙孔进行了修复, 结果表明, 使用该技术获得的接头强度比修复前提高了 7%, 并且无明显缺陷, 具有较好的修复质量。Zhou 等<sup>[38]</sup>采用 FFSW 修复了 316L 不锈钢孔洞缺陷, 结果表明, 通过严重的塑性变形诱导的动态再结晶, 界面组织显著细化。相对较短的高

温停留时间在再填充孔洞的界面上未形成  $\sigma$  相, 只有析出了少量的 Cr 碳化物, 这不会引起明显的 Cr 贫化, 从而保持了 316L 不锈钢的耐蚀性, 但修复后界面的拉伸强度和伸长率明显低于基材的拉伸强度和伸长率。Huang 等<sup>[39]</sup>使用由合金钢轴肩和 AA2219 铝合金可消耗搅拌针组成的焊接工具成功修复了匙孔缺陷, 结果表明, AA2219 搅拌头与匙孔的结合界面无明显缺陷。对于 FFSW 接头, 极限抗拉强度和伸长率的平均值分别为 172 MPa 和 11.2%, 分别相当于基础搅拌摩擦焊缝的 90%和 82%, 其修复接头具有良好的黏接界面和力学性能。Malik 等<sup>[40]</sup>对 AA2024 铝合金的 FFSW 进行了模拟, 研究发现, 影响修复质量的主要因素有焊接转速、插入速度和插入深度。Ghavimi 等<sup>[41]</sup>在转速为 800 r/min、插入速度为 50 mm/min 的最佳工艺参数条件下, 使用 FFSW 成功修复了搅拌摩擦焊后匙孔缺陷, 发现在 FFSW 修复区域的抗拉强度和伸长率为基础搅拌摩擦焊缝的 77%和 82%。Han 等<sup>[42]</sup>使用 FFSW 成功修复了 AA2219 板材的匙孔缺陷, 发现在较低的插入速度下可形成质量良好的接头。随着插入速度的增加, 其极限抗拉强度和伸长率降低, 并且接头的最大极限抗拉强度和伸长率分别为 179.6 MPa 和 13.7%, 相当于初始无缺陷焊缝值的 96.6%和 99%。

目前, 随着 FFSW 技术的发展, 衍生出多种填充搅拌摩擦焊技术, 见表 1。主被动填充搅拌摩擦修复、自填充搅拌摩擦修复和钻-填充搅拌摩擦修复 3 种修复

表 1 不同填充搅拌摩擦焊技术的对比

Tab.1 Comparison of different filling friction stir welding technologies

Technical type	Repair defects	Material	Performance	Reference
Active-passive filling friction stir repairing	Keyhole, tunnel and cavity	7N01-T4 aluminum alloy	The tensile strength and elongation of the repaired joint reached 311.1 MPa and 7.6% respectively, equivalent to 82.1% and 95.8% of the defect free FSW joint	[43]
		ZL210 aluminum alloy	The maximum tensile strength of the repaired joint is equivalent to that of the substrate, which can be as high as 250 MPa, so as to effectively repair the defects of the substrate.	[44]
		AZ31B magnesium alloy	The tensile strength and elongation of the repaired joint reached 189.7 MPa and 7.6% respectively, which was equivalent to 96.3% and 98% of the defect free FSW joint	[45]
Ultrasonic-assisted passive filling friction stir repairing	Keyhole and cavity	AZ31B magnesium alloy	The maximum tensile strength of the joint is 182.9 MPa, which is 38% higher than that of the joint without ultrasonic repair	[46]
Self-refilling friction stir repairing	Keyhole and cavity	316L stainless steel	The relative tensile strength and elongation are 112% and 82% of the substrate respectively, and the microhardness is increased from 215HV to 225HV	[47]
Drilling-filling friction stir repairing	Keyhole and cavity	AZ31B magnesium alloy	The tensile strength and elongation of the repaired joint reached 217 MPa and 8% respectively, which was equivalent to that of the flawless FSW joint	[48]
Vertical compensation friction stir repairing	Tunnel and groove	7N01-T4 aluminum alloy	The tensile strength and elongation of the repaired joint are 295.7 MPa and 6.7% respectively, which are equivalent to 66% and 39.4% of base material	[49]
		6061-T6 aluminum alloy	The tensile strength and elongation of the repaired joint reached 214 MPa and 5.7% respectively, equivalent to 75.1% and 58.8% of base material	[50]



技术可对匙孔等孔洞缺陷实现有效修复。其中, 主被动填充搅拌摩擦修复和钻-填搅拌摩擦修复的修复接头具有与无缺陷 FSW 接头相当的力学性能, 自填充搅拌摩擦修复的修复接头具有高于基板的拉伸强度, 并且主被动填充搅拌摩擦修复可通过超声辅助进一步提高接头强度。与以上修复技术相比, 垂直补偿搅拌摩擦修复技术对较大体积的隧道和沟槽缺陷具有良好的修复效果, 但力学性能远低于基板。

## 2.3 摩擦塞焊修复技术

摩擦塞焊 (Friction plug welding, FPW) 是一种新型固态焊接和修复技术, 其原理如图 12 所示<sup>[51]</sup>。将与基体材料相同的焊接塞棒以较高的转速推入锥形孔, 然后在摩擦热、材料流动和强应力的组合下实现良好的焊接。在顶锻力的作用下, 细化连接处材料组织, 从而有效保证了焊接接头的质量。根据焊接压力加载方式的不同, 将 FPW 分为顶锻式和拉锻式 2 种, 其原理如图 13 所示<sup>[52]</sup>。其中, 顶锻式 FPW 焊接工具和支撑板位于被焊工件的两侧, 而拉锻式 FPW 焊接工具和支撑板位于被焊工件的一侧。对于结构简单、方便设置支撑构件的零件, 2 种加载方式的差别不大, 但对于结构复杂、体积庞大、工件背部无法设置支撑构件的零件, 通常采用拉锻式 FPW。实践证明, FPW 接头的质量高、焊接变形小、残余应力低, 接头强度比传统电弧焊补焊接头提高了 20% 以上。目前, FPW 在航空航天外贮箱的焊缝修补方面得到了广泛应用, 并且在搅拌摩擦焊匙孔等孔洞缺陷修复方面具有广阔的发展前景<sup>[53-54]</sup>。

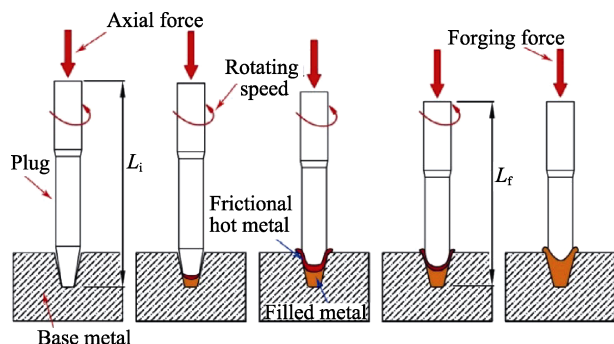


图 12 FPW 工艺示意图<sup>[51]</sup>

Fig.12 Schematic diagram of FPW process<sup>[51]</sup>

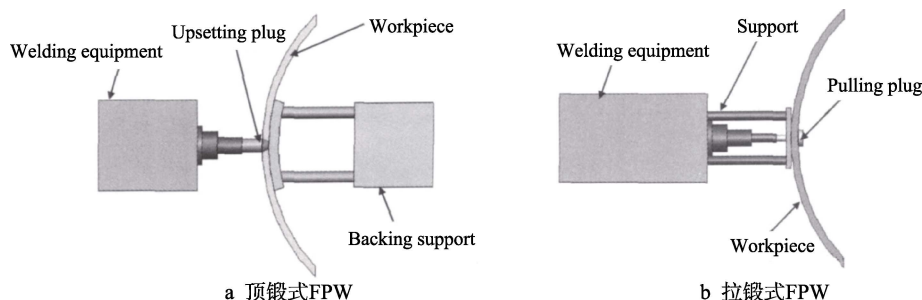


图 13 FPW 的主要类型<sup>[52]</sup>

Fig.13 Main types of FPW<sup>[52]</sup>: a) top forging FPW; b) pull forging FPW

通过控制 FPW 的转速、镦粗速度和焊接力等工艺参数, 从而获得质量良好的接头。Zhang 等<sup>[55]</sup>系统研究了不同参数对 6082 铝合金 FPW 接头抗拉强度的影响。结果表明, 合理调整转速和镦粗速度可以提高接头处塑性金属的流动性, 提高接头的力学性能。当转速为 2 254 r/min、镦粗速度为 2 mm/s、焊接时间为 25 s 时, 获得了最佳的 FPW 接头, 抗拉强度可达到 262.34 MPa。摩擦界面处的相互作用力在 FPW 接头根部不强, 因此根部往往成为 FPW 接头的薄弱区域。Du 等<sup>[56]</sup>对 AA2219 铝合金 FPW 过程的热力耦合模型进行了分析, 发现较高的焊接力和转速可以提高界面法向力, 促进材料的流动, 有利于获得优异的焊接接头。

近年来, FPW 工艺在修复水下金属结构、管道和厚截面材料方面具有巨大的潜力。在焊接过程中无金属熔化和凝固过程, 很容易获得良好的焊缝, 无任何冶金缺陷 (如热裂纹、夹渣和气孔等)<sup>[51]</sup>。Yin 等<sup>[57]</sup>在水下对 X65 管线钢进行 FPW, 通过提高焊接力促进了材料的流动, 获得了更高的焊接功率和热输入量, 并进一步提高了焊缝的黏结质量。焊缝区和热影响区的显微组织主要由板条贝氏体组成, 焊缝具有与基材相同的拉伸性能和冲击性能。随着焊接力的增加, 导致焊接接头的硬化效果加剧, 最大硬度可达 306HV。Cui 等<sup>[58]</sup>在水下对 HSLA S355 钢进行了 FPW, 成功获得了无缺陷焊缝。观察到大量板条贝氏体, 以及少量针状铁素体、多边形铁素体和马氏体。然而, 焊缝的微观结构呈现不均匀特征, 在热影响区和焊接接头下部区域的显微组织包含大量板条贝氏体, 只有少量针状铁素体、多边形铁素体和马氏体; 在焊接接头上部区域, 显微组织主要为板条马氏体, 如图 14 所示。极限抗拉强度和冲击性能的最佳结果分别为 500 MPa 和 39.5 J, 焊缝金属的硬度显著增加。Xiong 等<sup>[59]</sup>对 X52 管线钢进行了水下 FPW, 结果表明, 焊接接头的微观结构明显不均匀, 与传统的固态摩擦焊接工艺相比, FPW 无法获得晶粒细小、等轴、相对均匀的组织。由于显微组织的不均匀性, 因此在焊接接头横截面上测得硬度分布不均匀, 如图 15 所示。焊接接头的冲击吸收功显著低于基材, 约占基材的 20%。

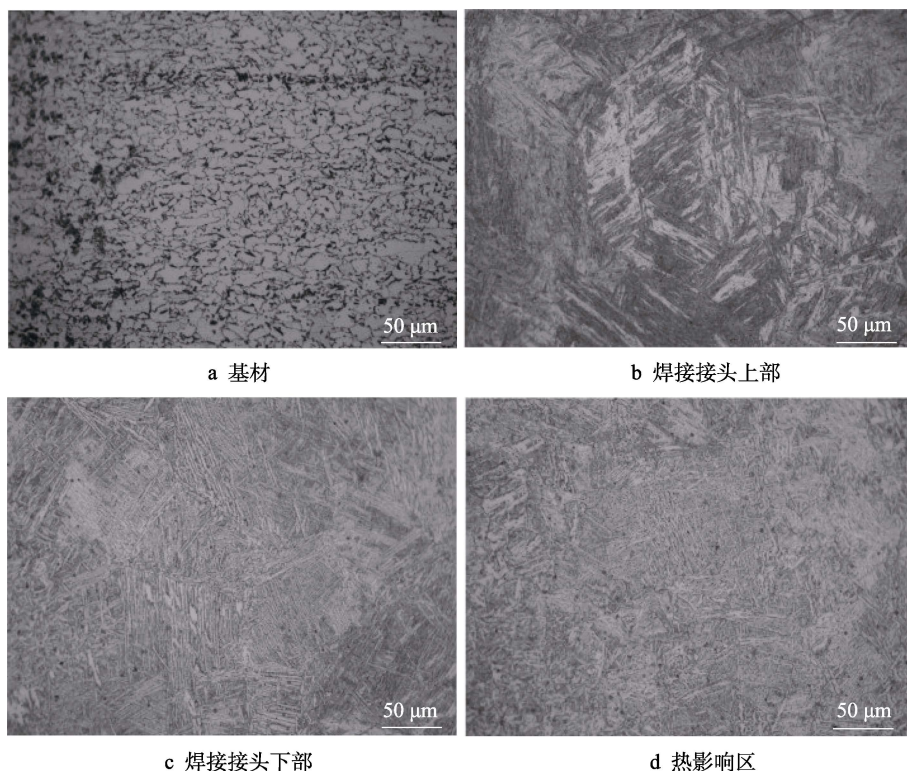
图 14 焊接区域显微组织<sup>[58]</sup>

Fig.14 Microstructure of welding zone<sup>[58]</sup>: a) substrate; b) upper part of welded joint; c) lower part of welded joint; d) heat affected zone

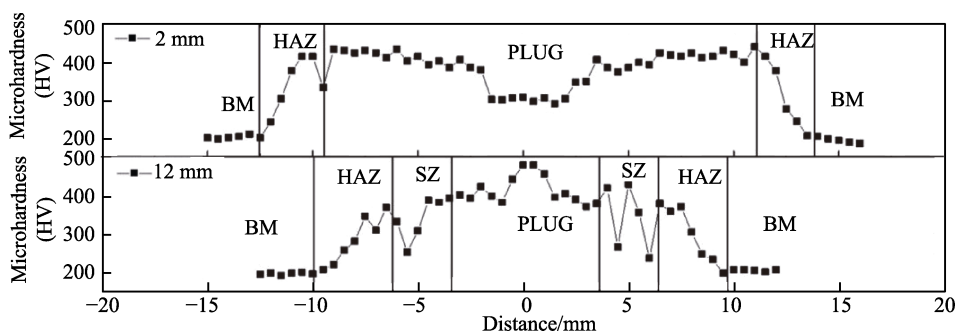
图 15 焊接接头在不同深度下的硬度分布<sup>[59]</sup>

Fig.15 Hardness distribution of welded joints at different depth<sup>[59]</sup>

综上所述,在FPW的过程中通过控制转速、镢粗速度和焊接力等工艺参数,可获得优异的焊接接头,从而保证孔洞类缺陷的修复质量,并且通过拉镢式FPW可修复结构复杂、体积庞大的零件,但是具体工艺参数对力学性能影响方面的研究较少。FPW也能在水下进行修复焊接,所得焊缝无明显缺陷,具有优异的抗拉强度和冲击性能,但也存在修复区域微观结构不均匀,导致其力学性能分布不均,从而影响修复质量,这有待于进一步研究。

回填式搅拌摩擦点焊修复、填充搅拌摩擦焊修复和摩擦塞焊修复3种修复技术对匙孔等孔洞类缺陷能够实现有效修复。目前,针对回填式搅拌摩擦点焊修复和填充搅拌摩擦焊修复的研究较多,其修复接头的力学性能与无缺陷接头的性能相当。虽然摩擦塞焊

修复接头无明显缺陷,但针对其力学性能的研究较少。回填式搅拌摩擦点焊修复不需要填充材料,但其焊接步骤复杂,难以获得合理的焊接参数。填充搅拌摩擦焊修复和摩擦塞焊修复需要选择适当的可消耗搅拌工具,对于焊接工具材料具有较高的要求,2种修复技术的焊接步骤简单,容易得到质量良好的修复接头。

### 3 搅拌摩擦增材修复技术

搅拌摩擦增材制造(Friction Stir Additive Manufacturing, FSAM)是在FSW基础上发展起来的新型固相增材技术<sup>[60]</sup>。FSAM的本质是利用焊接工具采用搅拌摩擦的方法,达到多层薄板累积焊接成型的目的



的, 最终实现特定构型的增材制造。FSAM 技术不仅能够充分利用材料、降低成本, 而且其增材成型的块体具有优异的性能, 整个工艺过程环保, 不产生有害气体。与熔融增材制造技术相比, 基于固相连接的搅拌摩擦增材制造在铝、镁等轻合金的应用中具有特殊优势, 它不存在金属的熔化和凝固, 避免了冶金缺陷的产生, 能够适应大型构件对热变形的控制等。综上所述, FSAM 在缺陷修复方面具有巨大的应用潜力, 可以广泛应用于医疗、汽车、航空航天等领域<sup>[61-63]</sup>。

### 3.1 复合增材修复技术

搅拌摩擦加工作为一种有效的固态表面改性技术, 已被广泛用于热喷涂、电沉积、表面黏合和冷喷涂等工艺产生沉积物的后处理。由于冷喷涂 (Cold spray, CS) 适合于金属材料及其复合材料的大规模生产, 从而备受关注。然而, 材料固有的延展性和塑性缺陷限制了 CS 的应用。通过与搅拌摩擦加工相复合, 在搅拌作用下沉积物发生了严重的塑性变形, 从而产生了具有细小等轴晶粒的微观结构, 达到了提高材料力学性能的目的。在此复合加工过程中, 在高轴向力作用下将高转速搅拌摩擦加工工具插入金属板中, 然后沿着冷喷涂的方向移动工具, 其工艺原理如图 16 所示<sup>[64]</sup>。在 CS 沉积物上使用搅拌摩擦加工具有以下优点: 消除孔隙和层间边界等缺陷, 形成完全致密的结构和强大的冶金结合; 通过材料的严重塑性变形, 形成均匀混合相; 在 CS 后热固结, 形成完全致密的固体沉积层。基于上述优点, CS 适用于大多数金属材料 (例如 Ti、CuZn 合金、AA7075 铝合金、NiTi 合金和金属基复合材料), 在部件制造和修复方面具有巨大的应用潜力<sup>[65-66]</sup>。

CS 和搅拌摩擦加工复合工艺起到了细化晶粒的作用, 提高了基板和 CS 沉积层的结合强度, 但表

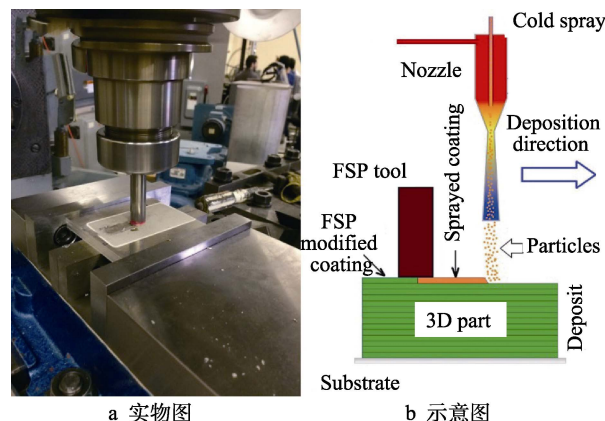


图 16 复合增材修复技术工艺原理<sup>[64]</sup>

Fig.16 Schematic diagram of composite additive repair technology<sup>[64]</sup>: a) physical image; b) schematic diagram

面残余应力随之提高, 影响了表面质量。Wang 等<sup>[67]</sup>采用 CS 和搅拌摩擦加工复合工艺制备了纯铝块体样品, 其微观结构由均匀细小的等轴再结晶晶粒组成, 平均晶粒尺寸为  $4.4\ \mu\text{m}$ , 高角度晶界百分比为 62%, 晶粒取向为随机分布, 极限抗拉强度和伸长率分别为 87 MPa 和 60.3%。与 CS 样品相比, 复合工艺样品的孔隙减少了 64%, 而屈服强度、极限抗拉强度和伸长率分别增加了 38%、45%和 1 336%。将细晶粒强化、位错强化和晶粒取向强化 3 种强化机制结合, 提高了复合工艺样品的质量。Ji 等<sup>[68]</sup>在钛基板上冷喷涂铝涂层, 并进行搅拌摩擦点处理。在转速为 2 400 r/min 时, 搅拌区内的孔隙和颗粒间界面完全消失, 并观察到低位错密度的等轴晶粒, 获得了良好且致密的涂层, 如图 17 所示。与沉积态涂层相比, 搅拌区的显微硬度显著增加。此外, 经搅拌摩擦点处理后, 在涂层与基板的界面处生成了  $\text{TiAl}_3$  层, 进一步提高了涂层的黏附强度。Khodabakhshi 等<sup>[69]</sup>采用 CS 和搅拌摩擦工艺复合工艺在铝基板上制备了钛涂层, 强调了搅

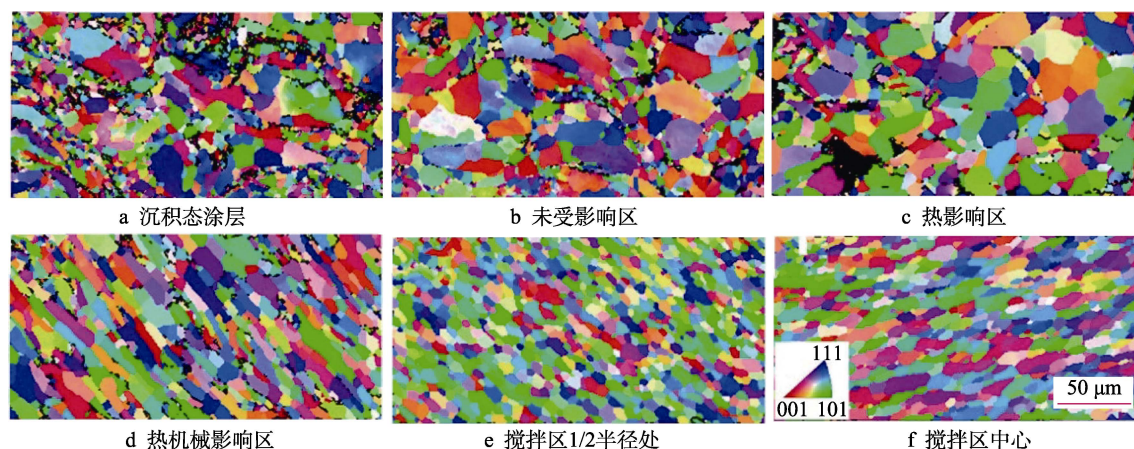


图 17 在 2 400 r/min 下搅拌摩擦点焊前后冷喷涂铝涂层的晶粒取向<sup>[68]</sup>

Fig.17 Grain orientation maps of the cold-sprayed Al coatings before and after friction stir spot processing at 2 400 r/min<sup>[68]</sup>: a) as-deposited coating; b) un-affected zone; c) heat-affected zone; d) thermo-mechanically affected zone; e) 1/2 radius of stir zone; f) center of stir zone

拌摩擦工艺对冷喷涂涂层性能的作用,通过促进界面冶金结合,在处理过程中形成了均匀致密的涂层。Khodabakhshi等<sup>[70]</sup>采用CS在AZ31B镁合金表面上喷涂均匀致密的AA7075铝合金涂层,随后进行搅拌摩擦处理。结果表明,由于在搅拌摩擦处理过程发生了严重的塑性变形,促使晶粒细化,并提高了基板和涂层的结合强度,因此基板和涂层硬度分别显著提高了约80%和30%。Khodabakhshi等<sup>[71]</sup>通过CS和搅拌摩擦加工复合工艺,制备了致密的钛表面涂层,该涂层具有高完整性和优异的力学性能,沉积了晶粒结构细化( $<1\ \mu\text{m}$ )且硬度增大(提高7倍)的涂层,同时提高了表面残余应力。残余应力及其分布在很大程度上取决于搅拌摩擦加工工具的插入深度,随着工具插入深度的增加,残余应力增大,最大残余应力可达400 MPa。

在CS和搅拌摩擦加工复合工艺的沉积材料中加入强化颗粒,能够对沉积材料起到强化作用。Hodder等<sup>[72]</sup>通过搅拌摩擦加工对CS所喷涂的Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合材料进行了处理,在转速为894 r/min条件下,由于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒重新分布和尺寸细化,使涂层的硬度从85HV增加到137HV。Xie等<sup>[73]</sup>使用CS制备了TiB<sub>2</sub>/AlSi10Mg复合材料,然后进行搅拌摩擦加工处理后发现,喷涂态纯AlSi10Mg和TiB<sub>2</sub>/AlSi10Mg复合镀层都具有较高的抗拉强度,受到有限的冶金结合和加工硬化效应的影响,几乎无延展性。通过搅拌摩擦加工处理促进了基板与镀层的结合,并且重新分布和细化了TiB<sub>2</sub>纳米颗粒,从而实现了TiB<sub>2</sub>/AlSi10Mg复合镀层拉伸强度和延展性的提高。Huang等<sup>[74]</sup>通过CS,将SiC颗粒强化的Al5056复合涂层沉积在纯铝基板上,然后用搅拌摩擦工具对复合涂层进行搅拌摩擦改性。在转速1400 r/min下,剧烈的搅拌作用促使复合涂层中的强化颗粒尺寸从12.2  $\mu\text{m}$ 细化至4.4  $\mu\text{m}$ ,并在复合涂层中均匀分布,涂层硬度从92.5HV增至185.7HV。Peat等<sup>[75]</sup>采用双粉末进料系统,将碳化钨(WC-CoCr)和氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)粉末与AISI316进

行共同CS沉积,随后对沉积涂层进行搅拌摩擦处理,在搅拌作用下使得沉积态WC-CoCr团聚体呈弥散分布,并细化了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒,与沉积态涂层相比,冲蚀所造成的涂层损失降低了77%,起到了改善冲蚀性能的作用。Yang等<sup>[76]</sup>采用搅拌摩擦加工提高了CS所沉积AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>金属基复合材料的耐腐蚀性。结果表明,进行1次或2次搅拌摩擦加工后,AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层的表面状况得到改善,提高了耐腐蚀性;增加到4次时,导致内部涂层界面恶化,耐腐蚀性降低,如图18所示。Yang等<sup>[77]</sup>采用搅拌摩擦加工对CS所沉积的AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>金属基复合材料进行了改性。经过搅拌摩擦加工,喷涂沉积物Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒显著细化,改善了颗粒分布。在转速1500 r/min下,最大极限拉伸强度增加了25.9%,伸长率增加了27.4%,并且有效提高了硬度。在较高转速下,增强水平可以进一步提高。由于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒的破碎,因此降低了沉积层的耐磨性,如图19所示。

搅拌摩擦加工相较于热处理、电脉冲处理等CS后处理,更有利于促进晶粒的细化和金属化合物的形成,具有更加优异的力学性能。Huang等<sup>[78]</sup>使用高温真空退火和搅拌摩擦加工,对CS所喷涂的Ni-Ti涂层进行了改性。通过改变热处理条件,获得了均匀的金属间化合物,但Kirkendall效应导致涂层的孔隙率增大。经过搅拌摩擦处理后,涂层中形成了多种Ni-Ti金属间化合物,未发现明显缺陷,其硬度比喷涂涂层提高了4.5倍,耐磨性比喷涂涂层提高了约2倍。与高温真空退火相比,搅拌摩擦处理在改性金属-金属复合涂层和合成涂层中的金属间化合物方面表现出巨大潜力。Li等<sup>[79]</sup>使用CS喷涂纯铜,然后用常规热处理、电脉冲处理和搅拌摩擦加工,改善了沉积物的微观结构和力学性能。结果表明,3种工艺都对沉积物起到了强化作用,其中电脉冲处理和搅拌摩擦加工明显优于热处理。界面处的再结晶细晶粒和拉长晶粒经电脉冲处理和热处理后转变为粗晶粒,而搅拌摩擦加工完全消除了颗粒界面和晶粒细化的负面影响。力

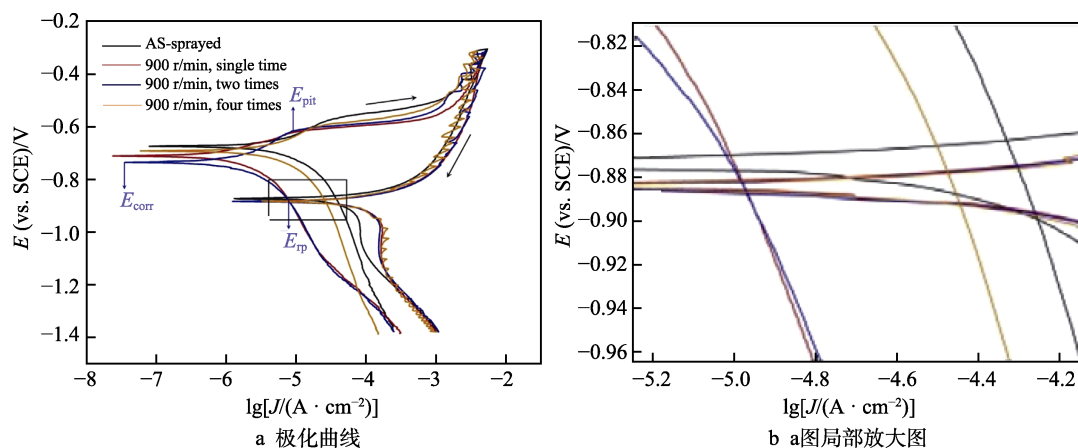


图18 冷喷涂和搅拌摩擦加工后的AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层的循环极化曲线<sup>[76]</sup>  
Fig.18 Cyclic polarization curves of the CSed and FSPed AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings<sup>[76]</sup>



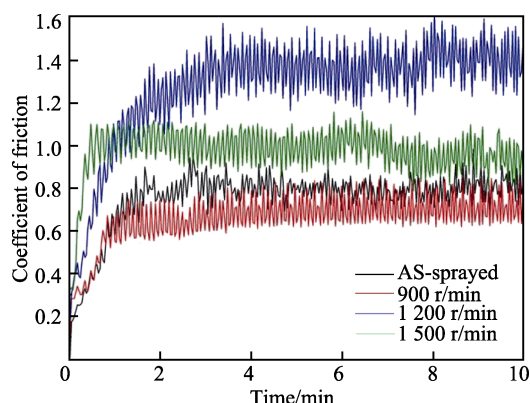


图 19 经冷喷涂和搅拌摩擦加工后 AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的摩擦因数随滑动时间的变化情况<sup>[77]</sup>

Fig.19 Variation of friction coefficient with sliding time for CSed and FSPed AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings<sup>[77]</sup>

学试验表明,经搅拌摩擦加工后达到了 310 MPa 的极限抗拉强度和 40% 的伸长率,界面结合的改善、超细晶粒及应变硬化效应是主要的强化机制。经电脉冲处理达到了 209 MPa 的极限抗拉强度和 19% 的伸长率,主要强化机制为界面结合的改善及大角度晶界和孪晶,如图 20 所示。

综上所述,CS 和搅拌摩擦加工复合工艺起到了细化晶粒的作用,有利于涂层与基板间金属化合物的形成,促进了涂层与基板的冶金结合,沉积层的硬度、抗拉强度和伸长率得到大幅度提高。在加入强化颗粒后,搅拌摩擦加工对强化颗粒进行细化,并弥散分布于沉积层中,进一步提高了材料的拉伸强度和硬度,并且提高了沉积层的耐蚀性,在零件表面大面积修复和强化领域具有巨大的发展前景。由于经搅拌摩擦加工后残余应力较大,且强化颗粒破碎后会降低沉积层

的耐磨性,因此严重影响了沉积层的质量,这有待于进一步研究解决。搅拌摩擦加工相较于热处理和电脉冲处理,更有利于晶粒的细化和金属化合物的形成,促进了界面结合的改善,沉积层的抗拉强度和硬度得到显著提高。

### 3.2 增材搅拌摩擦沉积修复技术

增材搅拌摩擦沉积 (Additive friction stir deposition, AFSD) 是一种效率高、可扩展的固态材料沉积工艺,由美国航空探针 (Aeroprobe) 公司经 10 余年发明创造,又称 MELD 技术。AFSD 工艺是一种热机械过程,将搅拌摩擦焊与原料添加相结合,利用高速旋转的非自耗沉积工具摩擦产生热量,将固体或金属粉末原料加热至热塑性,然后沿着沉积方向,通过沉积工具将热塑性原料压到基板上,从而形成沉积层,之后提高沉积工具高度,将原料压到前一层,并进行逐层叠加,从而形成部件,其修复工艺过程及其增材部件如图 21 所示<sup>[80-81]</sup>。在沉积过程中发生了剧烈的塑性变形和动态再结晶,促使各层间紧密结合,并得到了高度细化的晶粒,避免了孔隙、热裂纹等问题的出现,因此所沉积部件或修复区域具有优异的力学性能,可沉积各种固体或粉末金属、金属基复合材料,适用材料范围较广,原料形态选择灵活,如表 2 所示<sup>[82]</sup>,广泛应用于航空航天、国防、汽车、通信等领域<sup>[83]</sup>。

AFSD 工艺可以起到细化晶粒的作用,并且 AFSD 工艺的峰值温度低于熔点 (足以溶解初始强化相),导致沉积材料疲劳性能降低,在纵向方向表现出比沉积方向稍高的疲劳性能。为了获得高沉积速率和优异性能的沉积部件,需要调整工艺参数。Jordon 等<sup>[84]</sup>使用 AFSD 工艺沉积 AA5083 铝合金,结果表明,

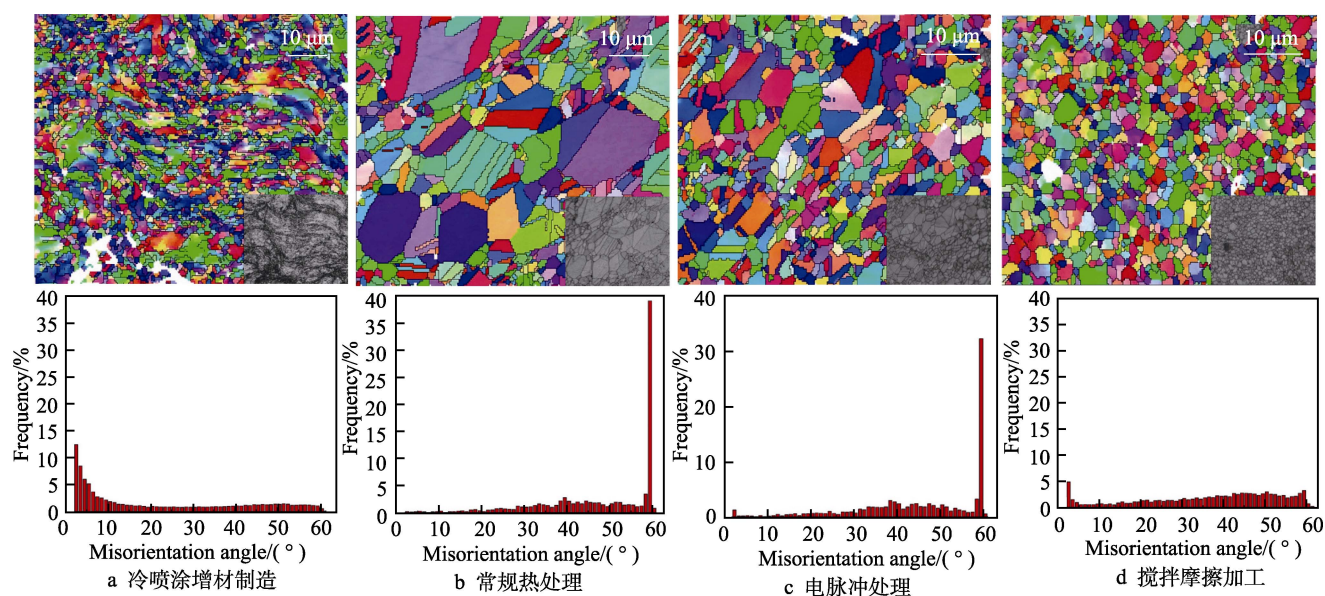


图 20 不同情况 EBSD 图和晶界角分布<sup>[79]</sup>

Fig.20 EBSD map and misorientation angle distribution in different cases<sup>[79]</sup>: a) cold spray additive manufacturing; b) conventional heat treatment; c) electric pulse processing; d) friction stir processing

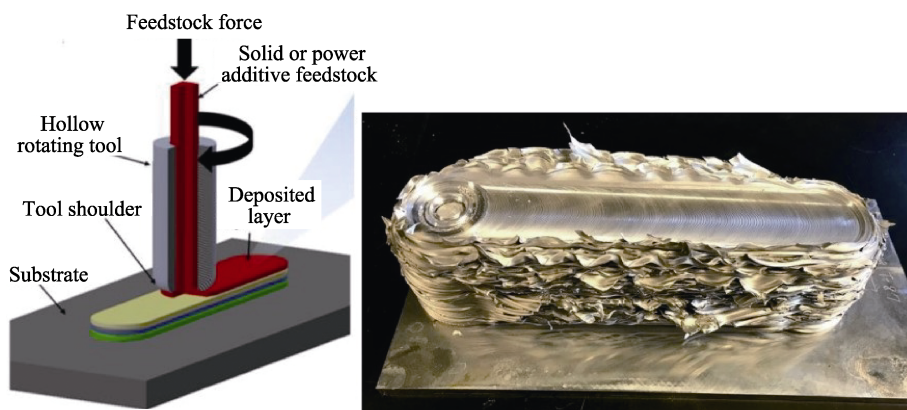


图 21 AFSD 工艺原理 (左)<sup>[80]</sup>及其增材部件 (右)<sup>[81]</sup>  
Fig.21 AFSD process diagram (left)<sup>[80]</sup>and additive parts (right)<sup>[81]</sup>

表 2 不同固态增材工艺的比较<sup>[82]</sup>  
Tab.2 Comparison of different solid additive processes<sup>[82]</sup>

Process	Ultrasonic additive manufacturing	Friction stir additive manufacturing	Additive friction stir deposition
ASTM classification	Sheet lamination	Sheet lamination	N/A
Hybrid process	Yes	Yes	No
Temperature	Relatively low	Relatively high	Relatively high
Microstructure	Similar to pre-processed	Refined, equiaxed in the stir zone only	Refined, equiaxed

剧烈塑性变形引起的动态再结晶产生了细晶、等轴晶粒结构,同时表现出与锻造材料类似的力学性能。Anderson-wedge 等<sup>[81]</sup>使用 AFSD 工艺沉积 AA2219 铝合金,研究发现,转速 200 r/min 和移动速度 101.6 mm/min 是最佳的工艺参数。相较于锻造材料,AFSD 沉积材料具有更致密的细小晶粒,无  $\theta'$  和  $\theta''$  强化相。虽然 AFSD 沉积材料的累积损伤率低于锻造材料,但该材料的早期损伤会降低其疲劳寿命。Avery 等<sup>[85]</sup>使用 AFSD 工艺沉积 AA7075 铝合金,沉积态 AA7075 微观结构中成分颗粒和晶粒得到细化。与热处理原料相比,由于强化沉淀  $\eta'$  和  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) 的粗化,不再有效阻止位错移动,造成屈服应力、极限拉伸应力和断裂伸长率降低,从而使得疲劳寿命降低。AFSD 工艺所沉积材料的疲劳性能在纵向上一般优于沉积方

向上。Rutherford 等<sup>[86]</sup>使用 AFSD 工艺沉积 AA6061 铝合金,结果表明,沉积态 AA6061 的微观组织得到动态再结晶和晶粒细化(如图 22 所示),并且金属间化合物颗粒显著减少。纵向表现出比沉积方向稍高的失效循环次数,尤其是在较低的应变振幅条件下,具有与锻造 AA6061 相似的疲劳性能,如图 23 所示。

对于 AFSD 工艺,不同金属的发热机制不同。纯金属沉积部件的晶粒细密,导致沉积部件的硬度下降,可以通过添加强化颗粒来增强沉积部件的强度。Garcia 等<sup>[87]</sup>对铜和 AA6061 铝合金的 AFSD 工艺产热形式进行了比较。在铜的 AFSD 过程中,沉积工具与沉积材料之间的界面处于完全滑动状态,界面摩擦是沉积区的主要发热机制;对于 AA6061 铝合金,其界面接触处于黏着状态,界面摩擦和体积能量耗散都有

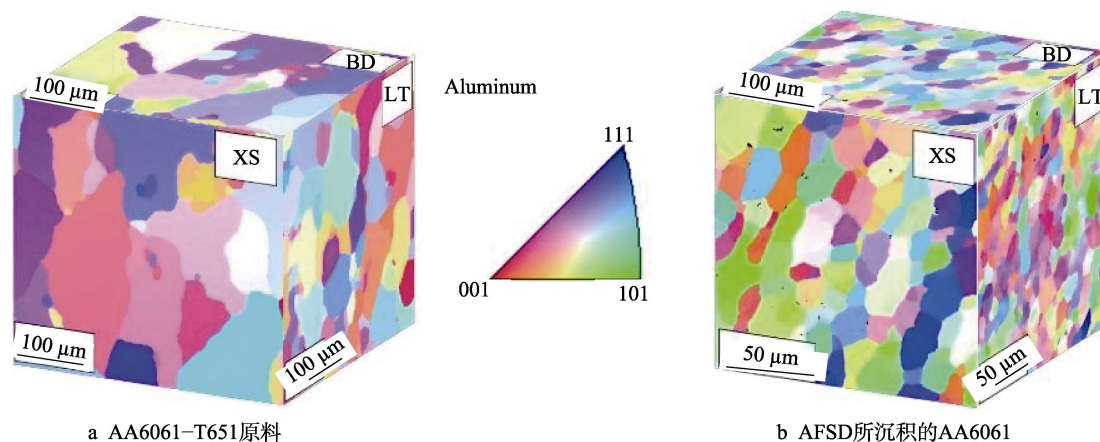


图 22 EBSD 等距图<sup>[86]</sup>  
Fig.22 Isometric view of EBSD maps<sup>[86]</sup>: a) AA6061-T651 feedstock; b) AA6061 deposited by AFSD



助于沉积区的发热。由于材料流动行为和界面接触状态的不同,使得铜与 AA6061 铝合金之间的发热机制存在差异。Priedeman 等<sup>[88]</sup>对铜使用 AFSD 工艺进行加工后发现,在沉积部件表面形成了保护性氧化物,内部组织均匀致密,但晶粒的细化降低了 AFSD 工艺加工硬化的效果,导致沉积部件硬度的下降。由于初始沉积温度较低,在加工过程中发生了严重的塑性变形,以及基底表面准备不足,造成初始沉积层与基板之间存在孔隙。Griffiths 等<sup>[89]</sup>对铝基复合材料使用 AFSD 工艺进行加工,如 Al-SiC、Al6061-Mo 和 Al6061-W 等。与纯金属 AFSD 工艺相比,强化颗粒具有强度高的特点,并且会阻碍基体金属的流动,从而影响热流和塑性变形,对沉积部件起到了强化作用。除铝合金外,AFSD 工艺还成功地沉积了钛基和钴镍基等复合材料。

为了实现 AFSD 工艺更加灵活的修复,学者们对 AFSD 工艺的重叠平行增材沉积和单层沉积进行了研

究。Phillips 等<sup>[90]</sup>使用 AFSD 工艺进行重叠平行增材沉积(如图 24 所示),重叠沉积区域冶金结合程度较高,由于多次搅拌作用,其晶粒得到进一步细化,重叠沉积区具有与单道沉积区相当的拉伸强度。不过重复热循环会显著降低重叠沉积区的硬度(如图 25 所示),并且氧化物颗粒的偏聚容易导致沉积层的断裂。目前,针对氧化物对重叠沉积区域性能的影响研究较少,只能通过沉积工具的搅拌作用和预沉积表面处理最大限度地减少沉积过程中混合的表面氧化物。Hartley 等<sup>[91]</sup>使用 AFSD 工艺将 AA6061 铝合金沉积在基板上,对于薄基板,其沉积质量在很大程度上取决于沉积工具结构,而扁平沉积工具可得到优异的沉积质量。显微硬度测量结果表明,在沉积层和基板的横截面上,硬度基本一致,但剧烈的材料混合所产生的摩擦热,使得界面处的硬度显著降低(如图 26 所示),熔覆后保持了整体塑性,其伸长率为 30%,极限抗拉强度为 250 MPa。即使沉积后的基板发生了较

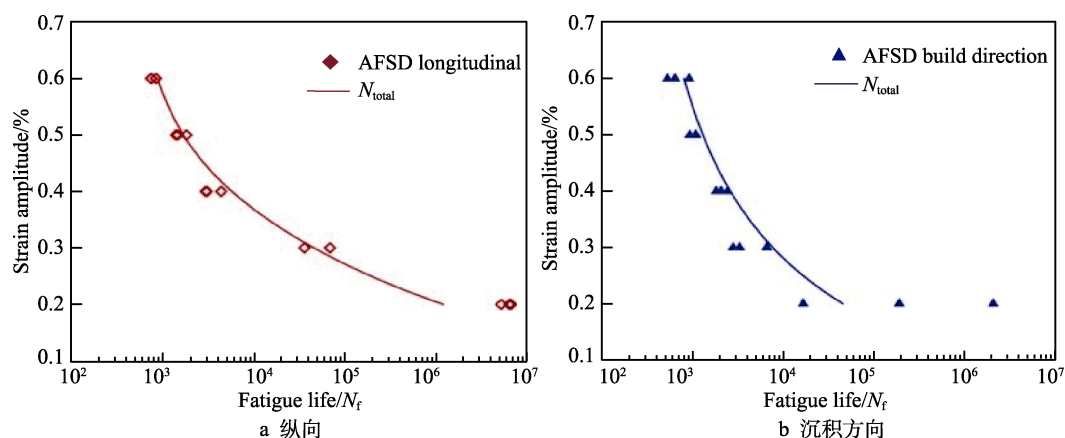


图 23 微结构敏感疲劳 (MSF) 模型<sup>[86]</sup>

Fig.23 Microstructure sensitive fatigue (MSF) model<sup>[86]</sup>: a) longitudinal direction; b) deposition direction

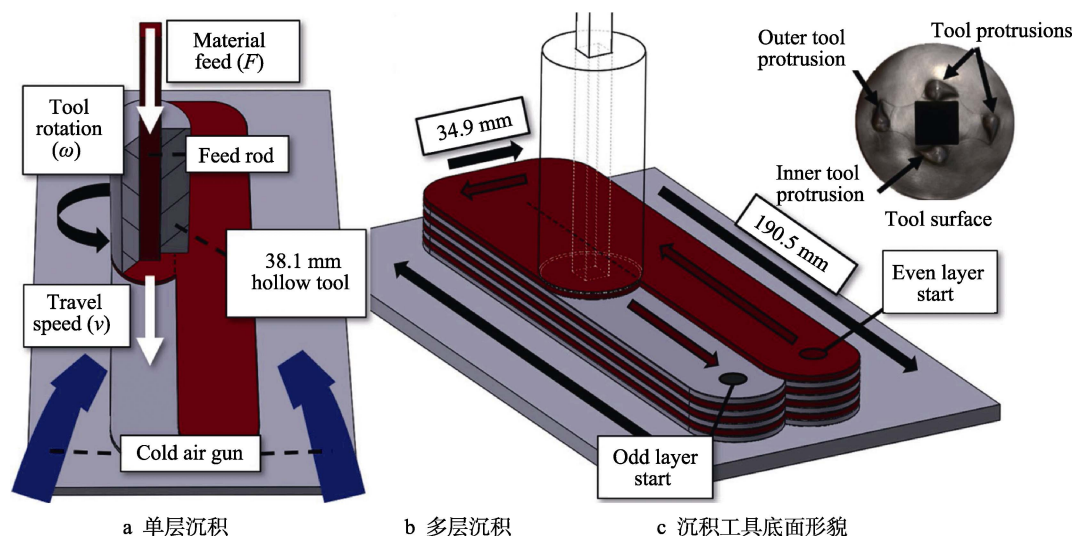
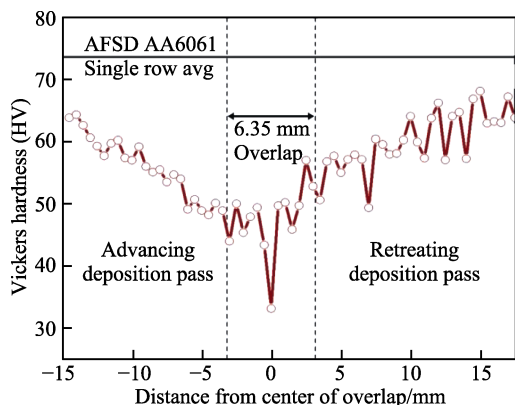
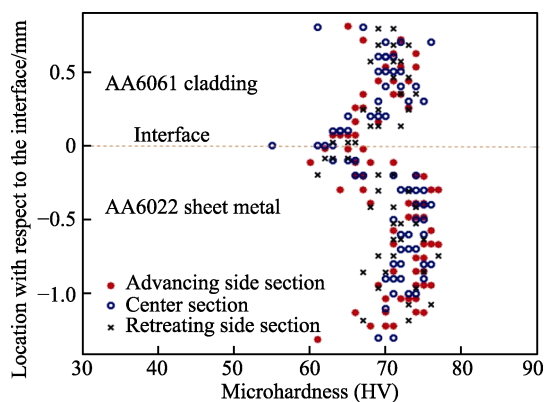


图 24 AFSD 工艺示意图及其沉积工具<sup>[90]</sup>

Fig.24 Schematic diagram of AFSD process and its deposition tool<sup>[90]</sup>: a) monolayer deposition; b) multilayer deposition; c) morphology of the bottom surface of the deposition tool

图 25 沉积层横截面的维氏硬度<sup>[90]</sup>Fig.25 Vickers hardness value of cross section of sedimentary layer<sup>[90]</sup>图 26 沉积后基板横截面的显微硬度分布<sup>[91]</sup>Fig.26 Microhardness distribution of substrate cross section after deposition<sup>[91]</sup>

大程度的弯曲变形,也未发现界面出现分层迹象。沉积层与基板之间的热梯度会影响冷却期间的整体变形,从而降低表面质量。

综上所述,AFSD工艺能够修复体积较大的缺陷,对晶粒可以起到细化作用。由于强化相的溶解或粗化,降低了沉积部件的硬度和疲劳性能。采用AFSD工艺沉积纯金属时,由于晶粒的细化作用,降低了沉积部件的硬度,并且受到沉积过程温度较低、塑性变形严重等因素的影响,导致沉积层与基板界面间存在孔隙,这会严重影响沉积质量。目前,可通过添加强化颗粒,以及改变热流和塑性变形,从而对沉积部件起到强化作用。对于重叠平行增材沉积,重叠沉积区晶粒更加细化,具有优异的拉伸性能,但氧化物的偏聚易导致断裂,氧化物对沉积层的影响还需进一步研究。对于单层沉积,基板和沉积层能够更好地结合,不易分层,但容易受到温度的影响,产生塑性变形,从而降低其表面质量。在修复时,沉积材料与侧壁的结合程度较差。Griffiths等<sup>[92]</sup>成功使用AFSD工艺对AA7075铝合金零件进行了修复,特别是通孔和凹槽等较大体积缺陷。在修复过程中可以观察到沉积材料与修复侧壁之间充分混合,但也存在混合程度较差和

修复质量不足等状况。目前可以通过沉积后热处理和固溶时效处理等方法来改善AFSD工艺沉积部件的强度和硬度<sup>[93-94]</sup>,而沉积材料与侧壁的充分结合还需进一步研究,有望实现该工艺高质量和高灵活的修复。

复合增材修复和增材搅拌摩擦沉积修复都能对沉积层起到细化晶粒的作用,并通过添加强化颗粒进行强化。相较于增材搅拌摩擦沉积修复,复合增材修复更有利于涂层与基板间金属化合物的形成和冶金结合,沉积层的硬度、强度等力学性能得到大幅度提高。不过复合增材修复仅能修复零件表面,不能对较大体积的沟槽等缺陷进行填充修复。增材搅拌摩擦沉积修复不仅可对大体积缺陷进行填充修复,也可通过多次重叠平行增材沉积对表面进行修复。

## 4 结语

搅拌摩擦焊修复技术能够成功对裂纹、隧道、沟槽等较大体积型缺陷进行修复,通过焊接工具的搅拌作用,使得接头晶粒细化,其拉伸性能得到显著提高,并且随着塑性变形产生热量的减弱和传热效率的降低,修复接头的显微硬度与初始接头的显微硬度相比得到显著提高。相较于熔化焊,搅拌摩擦焊修复技术具有优异的力学性能,焊接1次有时不能完全消除缺陷,需要进行多次焊接。这会导致热影响区晶粒的粗化,降低抗拉强度和硬度,因此需要采用限制焊接次数、焊后热处理等方法进行改善。

搅拌摩擦点焊修复技术可分为回填式搅拌摩擦点焊、填充搅拌摩擦焊和摩擦塞焊3种技术,3种焊接技术都能成功地修复搅拌摩擦焊匙孔等孔洞类缺陷。通过控制焊接工具转速、焊接时间和焊接力等工艺参数,起到细化晶粒的作用,获得力学性能优异的修复接头。3种焊接技术既有各自的优势,又有各自的局限。回填式搅拌摩擦点焊不需要填充材料,节省了修复成本,但其焊接修复过程较复杂、不容易操作,且修复接头的大小受到焊接工具的限制。填充搅拌摩擦焊的焊接修复过程简单快捷、可扩展性强,但需要选择合适的消耗型搅拌针材料。摩擦塞焊适用于结构复杂、体积庞大的零件,其灵活性较强,并且可用于水下焊接修复,但水下焊接修复还不成熟,其组织和性能分布不均。

搅拌摩擦增材修复技术可分为复合增材修复技术和增材搅拌摩擦沉积修复技术。复合增材修复技术是将冷喷涂和搅拌摩擦加工进行复合,从而起到细化晶粒的作用,提高基板和冷喷涂沉积层的结合强度,并且加入强化颗粒能够提高沉积层的耐蚀性,在零件表面大面积修复和强化领域具有巨大的发展前景。不过,经搅拌摩擦加工后残余应力较高,且强化颗粒破碎会降低沉积层的耐磨性,严重影响沉积层的质量。增材搅拌摩擦沉积修复技术能够修复体积较大的缺



陷,能够对晶粒起到细化作用,但会溶解沉积部件中的强化相,降低沉积部件的硬度和疲劳性能,并且在修复时沉积材料与侧壁的结合程度较差,这会降低修复质量。

目前,关于搅拌摩擦点焊修复技术和搅拌摩擦增材修复技术的相关研究仍处于起步阶段,随着金属结构件的快速发展,对 2 种修复技术有着广泛需求。对于搅拌摩擦点焊修复技术,回填式搅拌摩擦点焊修复应对焊接工具进行优化,尽可能减少焊接步骤,易于调控修复接头的力学性能。对于填充搅拌摩擦焊修复,可研究添加强化颗粒的复合型可消耗搅拌针,根据不同基板的情况,选择不同的强化颗粒,促进修复接头的冶金结合,进而提高接头的力学性能。对于摩擦塞焊修复,应深入研究焊接参数对力学性能的影响,并解决水下焊接接头组织力学性能分布不均的问题。对于搅拌摩擦增材修复技术,应研究合适的加工后处理,以消除沉积层的残余应力,改善修复表面的质量。增材搅拌摩擦沉积修复沉积层的硬度、疲劳强度等力学性能较差,并且沉积材料与基体的结合程度不高,所以需深入研究沉积材料与基体的结合机理及控制措施,这有助于构建增材修复可靠性评价体系。

#### 参考文献:

- [1] 栾国红, 柴鹏. 搅拌摩擦焊技术应用现状和发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2008(24): 19-22.  
LUAN Guo-hong, CHAI Peng. Application Status and Development Trend of Friction Stir Welding Technology[J]. MW Metal Forming, 2008(24): 19-22.
- [2] 王鑫, 孟松, 康旭, 等. 镁合金铸件缺陷搅拌摩擦修复工艺方法[J]. 航天器工程, 2010, 19(1): 89-93.  
WANG Xin, MENG Song, KANG Xu, et al. Technological Feasibility of Friction Stir Processing for Magnesium Alloy Casting Defects Repair[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(1): 89-93.
- [3] 谭锦红, 赵运强, 王春桂, 等. 机器人搅拌摩擦焊应用发展现状[J]. 金属加工(热加工), 2020(1): 8-12.  
TAN Jin-hong, ZHAO Yun-qiang, WANG Chun-gui, et al.. Development Status of the Robotic Friction Stir Welding[J]. MW Metal Forming, 2020(1): 8-12.
- [4] 武凯, 贾贺鹏, 孙宇, 等. 搅拌摩擦焊技术的研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(6): 1-9.  
WU Kai, JIA He-peng, SUN Yu, et al. Research Progress of Friction Stir Welding Technology[J]. Machine Building & Automation, 2020, 49(6): 1-9.
- [5] MADDELA N, ALURI M, JAKIRAHMED M D. Study on Defects Repairing Using Friction Stir Technologies[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44(P1): 2373-2379.
- [6] 杨素媛, 刘冬冬. 镁合金搅拌摩擦焊的研究现状与展望[J]. 稀有金属, 2014, 38(5): 896-904.  
YANG Su-yuan, LIU Dong-dong. Status and Prospect of Friction Stir Welding of Magnesium Alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(5): 896-904.
- [7] LI B, SHEN Y F. The Investigation of Abnormal Particle-coarsening Phenomena in Friction Stir Repair Weld of 2219-T6 Aluminum Alloy[J]. Materials and Design, 2011, 32(7): 3796-3802.
- [8] 王磊, 单勇峰, 回丽, 等. 裂纹位置对搅拌摩擦修复铝合金疲劳性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(1): 162-164.  
WANG Lei, SHAN Yong-feng, HUI Li, et al. Influence of Crack Location on the Fatigue Properties of AL2A12 by Friction Stir Repairing[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(1): 162-164.
- [9] REN J G, WANG L, XU D K, et al. Analysis and Modeling of Friction Stir Processing-based Crack Repairing in 2024 Aluminum Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 30(3): 228-237.
- [10] WANG Lei, CONG Jia-hui, REN Jun-gang, et al. Effect of Parameters on Fatigue Properties and Crack Propagation Behavior of Friction Stir Crack Repaired Al2024[J]. Metals, 2020, 10(8): 1026.
- [11] ZHANG Hui-jie, LIU Xu, LIU Hui-jie, et al. Interfacial Feature and Mechanical Property of Friction Stir Lap Repair Welded 7B04 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(10): 6890-6897.
- [12] LIU Hui-jie, ZHANG Hui-jie. Repair Welding Process of Friction Stir Welding Groove Defect[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(3): 563-567.
- [13] LI Wei-po, LIANG Zhi-min, CAI Cong-wei, et al. Repair Welding of the Tunnel Defect in Friction Stir Weld[J]. High Temperature Materials and Processes, 2018, 37(7): 675-681.
- [14] WU Zhong-wen, HUANG Chun-ping, LIU Fen-cheng, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 34CrNiMo6 Steel Repaired by Friction Stir Processing[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(2): 279.
- [15] BROWN R, TANG Wei, REYNOLDS A P. Multi-Pass Friction Stir Welding in Alloy 7050-T7451: Effects on Weld Response Variables and on Weld Properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 513/514: 115-121.
- [16] ZHANG Zhong-ke, WANG Xi-jing, WANG P C, et al. Friction Stir Keyholeless Spot Welding of AZ31 Mg Alloy-Mild Steel[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(6): 1709-1716.
- [17] 王玉, 熊江涛, 李京龙, 等. 铝合金回填式搅拌摩擦点焊研究现状[J]. 精密成形工程, 2019, 11(6): 89-100.  
WANG Yu, XIONG Jiang-tao, LI Jing-long, et al. Research Situation on Refill Friction Stir Spot Welding of Aluminium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(6): 89-100.
- [18] SURYANARAYANAN R, SRIDHAR V G. Studies on the Influence of Process Parameters in Friction Stir Spot

- Welded Joints—a review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 37(P2): 2695-2702.
- [19] 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.
- ZHOU Can-feng, JIAO Xiang-dong, GAO Hui. New Research Progress of Refill Friction Stir Spot Welding[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(12): 48-54.
- [20] 乔凤斌, 朱小刚, 王联凤, 等. 填充式搅拌摩擦点焊研究进展[J]. *电焊机*, 2013, 43(10): 1-5.
- QIAO Feng-bin, ZHU Xiao-gang, WANG Lian-feng, et al. Review of Process in Refill Friction Stir Spot Welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2013, 43(10): 1-5.
- [21] XU Zhi-wu, LI Zheng-wei, JI Shu-de, et al. Refill Friction Stir Spot Welding of 5083-O Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(5): 878-885.
- [22] SHEN Zhi-kang, YANG Xin-qi, ZHANG Zhao-hua, et al. Microstructure and Failure Mechanisms of Refill Friction Stir Spot Welded 7075-T6 Aluminum Alloy Joints[J]. *Materials & Design*, 2013, 44: 476-486.
- [23] LI Gao-hui, ZHOU Li, LUO Ling-yun, et al. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welded Alclad 2A12-T4 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5): 4115-4129.
- [24] XIONG Jiang-tao, PENG Xuan, SHI Jun-miao, et al. Numerical Simulation of Thermal Cycle and Void Closing during Friction Stir Spot Welding of AA-2524 at Different Rotational Speeds[J]. *Materials Characterization*, 2021, 174: 110984.
- [25] SUN Guang-da, ZHOU Li, ZHANG Ren-xiao, et al. Effect of Sleeve Plunge Depth on Interface/Mechanical Characteristics in Refill Friction Stir Spot Welded Joint[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(4): 551-560.
- [26] IRENE K, WIM W, KOEN F. Weldability of High-strength Aluminium Alloy EN AW-7475-T761 Sheets for Aerospace Applications, Using Refill Friction Stir Spot Welding[J]. *Welding in the World*, 2019, 63(4): 1001-1011.
- [27] CAO J Y, ZHANG C C, XING Y F, et al. Pin Plunging Reinforced Refill Friction Stir Spot Welding of Alclad 2219 to 7075 Alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 284: 116760.
- [28] REIMANN M, GARTNER T, SUHUDDIN U, et al. Keyhole Closure Using Friction Spot Welding in Aluminum Alloy 6061-T6[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237: 12-18.
- [29] REIMANN M, GOEBEL J, DOS SANTOS J F. Microstructure and Mechanical Properties of Keyhole Repair Welds in AA 7075-T651 Using Refill Friction Stir Spot Welding[J]. *Materials & Design*, 2017, 132: 283-294.
- [30] WANG Shuai, WEI Xiao, XU Ji-jin, et al. Strengthening and Toughening Mechanisms in Refilled Friction Stir Spot Welding of AA2014 Aluminum Alloy Reinforced by Graphene Nanosheets[J]. *Materials & Design*, 2020, 186: 108212.
- [31] CHEN Kai, LIU Xun, NI Jun. Keyhole Refilled Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy to Advanced High Strength Steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 452-462.
- [32] SHEN Z, DING Y, CHEN J, et al. Comparison of Fatigue Behavior in Mg/Mg Similar and Mg/Steel Dissimilar Refill Friction Stir Spot Welds[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 92: 78-86.
- [33] DONG Zhi-bo, SONG Qi, AI Xin-xin, et al. Effect of Joining Time on Intermetallic Compound Thickness and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welded Dissimilar Al/Mg Alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 42: 106-112.
- [34] DING Y, SHEN Z, GERLICH A P. Refill Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Aluminum Alloy and AlSi Coated Steel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 353-360.
- [35] HUANG Y X, HAN B, TIAN Y, et al. New Technique of Filling Friction Stir Welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(6): 497-501.
- [36] 黄永宪, 韩冰, 吕世雄, 等. 基于固态连接原理的填充式搅拌摩擦焊匙孔修复技术[J]. *焊接学报*, 2012, 33(3): 5-8.
- HUANG Yong-xian, HAN Bing, LYU Shi-xiong, et al. Filling Friction Stir Welding for Repairing Keyhole Based on Principle of Solid State Joining[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(3): 5-8.
- [37] BEHMAND S A, MIRSALEHI S E, OMIDVAR H, et al. Filling Exit Holes of Friction Stir Welding Lap Joints Using Consumable Pin Tools[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(4): 330-336.
- [38] ZHOU L, ZHOU W L, HUANG Y X, et al. Interface Behavior and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Filling Friction Stir Welded Joints[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(1): 577-583.
- [39] HUANG Y X, HAN B, LV S X, et al. Interface Behaviours and Mechanical Properties of Filling Friction Stir Weld Joining AA 2219[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(3): 225-230.
- [40] MALIK V, SANJEEV N K, HEBBAR H S, et al. Finite Element Simulation of Exit Hole Filling for Friction Stir Spot Welding—a Modified Technique to Apply Practically[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 97: 1265-1273.
- [41] GHAVIMI A H, ABOUTALEBI M R, SEYEDEIN S H. Exit-Hole Repairing in Friction Stir Welding of AA5456 Pipe Using Consumable Pin[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, 35(11): 1240-1250.
- [42] HAN Bing, HUANG Yong-xian, LV Shi-xiong, et al. AA7075 Bit for Repairing AA2219 Keyhole by Filling

- Friction Stir Welding[J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 25-33.
- [43] JI S D, MENG X C, HUANG R F, et al. Microstructures and Mechanical Properties of 7N01-T4 Aluminum Alloy Joints by Active-Passive Filling Friction Stir Repairing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 664: 94-102.
- [44] LYU Zan, HAN Song, HU Wei, et al. Solid-State Repair of Casting Defects in ZL210 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29(9): 5886-5893.
- [45] JI Shu-de, MENG Xiang-chen, ZENG Ya-ming, et al. New Technique for Eliminating Keyhole by Active-Passive Filling Friction Stir Repairing[J]. *Materials & Design*, 2016, 97: 175-182.
- [46] ZHAO Hua-xia, WANG Yong, DONG Ji-hong, et al. Eliminating Keyhole by Ultrasonic-Assisted Passive Filling Friction Stir Repairing Process[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2021, 74(6): 1501-1508.
- [47] ZHOU L, LIU D, NAKATA K, et al. New Technique of Self-Refilling Friction Stir Welding to Repair Keyhole[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(8): 649-655.
- [48] HUANG Ruo-fei, JI Shu-de, MENG Xiang-chen, et al. Drilling-Filling Friction Stir Repairing of AZ31B Magnesium Alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 765-772.
- [49] JI S D, MENG X C, LI Z W, et al. Investigation of Vertical Compensation Friction Stir-Welded 7N01-T4 Aluminum Alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(9): 2391-2399.
- [50] JI Shu-de, MENG Xiang-chen, MA Lin, et al. Vertical Compensation Friction Stir Welding Assisted by External Stationary Shoulder[J]. *Materials & Design*, 2015, 68: 72-79.
- [51] CUI Lei, YANG Xin-qi, WANG Dong-po, et al. Experimental Study of Friction Taper Plug Welding for Low Alloy Structure Steel: Welding Process, Defects, Microstructures and Mechanical Properties[J]. *Materials & Design*, 2014, 62: 271-281.
- [52] 赵衍华, 刘景铎, 张丽娜, 等. 2014 铝合金搅拌摩擦焊缝的拉锻式摩擦塞补焊[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(1): 41-46.
- ZHAO Yan-hua, LIU Jing-duo, ZHANG Li-na, et al. Study on Friction Plug Welding of 2014 Aluminum Alloy FSW Joint[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(1): 41-46.
- [53] DU Bo, SUN Zhuan-ping, YANG Xin-qi, et al. Characteristics of Friction Plug Welding to 10mm Thick AA2219-T87 Sheet: Weld Formation, Microstructure and Mechanical Property[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 654: 21-29.
- [54] 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.
- WANG Guo-qing, ZHANG Li-na, ZHU Rui-can, et al. Present State and Perspective on Friction Plug Welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(1): 17-25.
- [55] ZHANG Zhong-ke, LI Xuan-bai, ZHAO Zao-long, et al. Process Optimization and Formation Analysis of Friction Plug Welding of 6082 Aluminum Alloy[J]. *Metals*, 2020, 10(11): 1454.
- [56] DU Bo, YANG Xin-qi, TANG Wen-shen, et al. Numerical Analyses of Material Flows and Thermal Processes during Friction Plug Welding for AA2219 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 278: 116466.
- [57] YIN Ya-yun, YANG Xin-qi, CUI Lei, et al. Material Flow Influence on the Weld Formation and Mechanical Performance in Underwater Friction Taper Plug Welds for Pipeline Steel[J]. *Materials & Design*, 2015, 88: 990-998.
- [58] CUI Lei, YANG Xin-qi, WANG Dong-po, et al. Friction Taper Plug Welding for S355 Steel in Underwater Wet Conditions: Welding Performance, Microstructures and Mechanical Properties[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 611: 15-28.
- [59] XIONG Jun-zhen, YANG Xin-qi, LIN Wei, et al. Microstructural Characteristics and Mechanical Heterogeneity of Underwater Wet Friction Taper Plug Welded Joints for Low-Alloy Pipeline Steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 695: 279-290.
- [60] 李如琦, 吴奇, 龙连春. 焊接参数对镁合金搅拌摩擦增材成型影响研究[C]// 中国力学大会论文集, 2019: 1639-1650.
- LI Ru-qi, WU Qi, LONG Lian-chun. Influence of Welding Parameters on Friction Stir Additive Process of Magnesium Alloy[C]// *The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2019: 1639-1650.
- [61] 李如琦, 吴奇, 龙连春. 搅拌摩擦增材成型过程仿真与显微性能预测[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(8): 1846-1854.
- LI Ru-qi, WU Qi, LONG Lian-chun. Simulation of Friction Stir Additive Process and Its Micro-Properties Prediction[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(8): 1846-1854.
- [62] 孙朝伟, 朱海, 赵华夏, 等. 铝合金侧向搅拌摩擦增材制造工艺参数对增材区成形的影响[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(4): 122-127.
- SUN Chao-wei, ZHU Hai, ZHAO Hua-xia, et al. Influence of Technological Parameters of Aluminum Alloy Side Friction Stir Additive Manufacturing on Forming of Additive Zone[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(4): 122-127.
- [63] 薛凤桐, 刘海滨. 摩擦搅拌增材制造发展概述[J]. *现代制造工程*, 2019(4): 33-40.
- XUE Feng-tong, LIU Hai-bin. The Overview of Friction

- Stir Additive Manufacturing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(4): 33-40.
- [64] KHODABAKHSHI F, GERLICH A P. Potentials and Strategies of Solid-State Additive Friction-Stir Manufacturing Technology: A Critical Review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 77-92.
- [65] LI Wen-ya, CAO Cong-cong, WANG Guo-qing, et al. 'Cold Spray' as a New Hybrid Additive Manufacturing Technology: A Literature Review[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(5): 420-445.
- [66] XIE Xin-liang, YIN Shuo, RAO ELISON R N, et al. Al Matrix Composites Fabricated by Solid-State Cold Spray Deposition: A Critical Review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 86: 20-55.
- [67] WANG Wen, HAN Peng, WANG Ying-hui, et al. High-Performance Bulk Pure Al Prepared through Cold Spray-Friction Stir Processing Composite Additive Manufacturing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 9073-9079.
- [68] JI Gang, LIU Hong, YANG Guan-jun, et al. Effect of Friction Stir Spot Processing on Microstructure and Mechanical Properties of Cold-Sprayed Al Coating on Ti Substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421: 127352.
- [69] KHODABAKHSHI F, MARZBANRAD B, JAHED H, et al. Interfacial Bonding Mechanisms between Aluminum and Titanium during Cold Gas Spraying Followed by Friction-Stir Modification[J]. Applied Surface Science, 2018, 462: 739-752.
- [70] KHODABAKHSHI F, MARZBANRAD B, SHAH L H, et al. Friction-Stir Processing of a Cold Sprayed AA7075 Coating Layer on the AZ31B Substrate: Structural Homogeneity, Microstructures and Hardness[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 331: 116-128.
- [71] KHODABAKHSHI F, MARZBANRAD B, YAZDANMEHR A, et al. Tailoring the Residual Stress during Two-Step Cold Gas Spraying and Friction-Stir Surface Integration of Titanium Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 380: 125008.
- [72] HODDER K J, IZADI H, MCDONALD A G, et al. Fabrication of Aluminum-Alumina Metal Matrix Composites via Cold Gas Dynamic Spraying at Low Pressure Followed by Friction Stir Processing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 556: 114-121.
- [73] XIE Xin-liang, CHEN Chao-yue, CHEN Zhe, et al. Achieving Simultaneously Improved Tensile Strength and Ductility of a Nano-TiB<sub>2</sub>/AlSi10Mg Composite Produced by Cold Spray Additive Manufacturing[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 202: 108404.
- [74] HUANG Chun-jie, LI Wen-ya, ZHANG Zhi-han, et al. Modification of a Cold Sprayed SiCp/Al5056 Composite Coating by Friction Stir Processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 296: 69-75.
- [75] PEAT T, GALLOWAY A, TOUMPIS A, et al. Enhanced Erosion Performance of Cold Spray Co-Deposited AISI316 MMCS Modified by Friction Stir Processing[J]. Materials & Design, 2017, 120: 22-35.
- [76] YANG Kang, LI Wen-ya, XU Ya-xin, et al. Using Friction Stir Processing to Augment Corrosion Resistance of Cold Sprayed AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 774: 1223-1232.
- [77] YANG Kang, LI Wen-ya, HUANG Chun-jie, et al. Optimization of Cold-Sprayed AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal Matrix Composites via Friction Stir Processing: Effect of Rotation Speeds[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(11): 2167-2177.
- [78] HUANG C J, YAN X C, LI W Y, et al. Post-Spray Modification of Cold-Sprayed Ni-Ti Coatings by High-Temperature Vacuum Annealing and Friction Stir Processing[J]. Applied Surface Science, 2018, 451: 56-66.
- [79] LI Wen-ya, WU Dong, HU Kai-wei, et al. A Comparative Study on the Employment of Heat Treatment, Electric Pulse Processing and Friction Stir Processing to Enhance Mechanical Properties of Cold-Spray-Additive-Manufactured Copper[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 409: 126887.
- [80] AVERY D Z, RIVERA O G, MASON C J T, et al. Fatigue Behavior of Solid-State Additive Manufactured Inconel 625[J]. JOM, 2018, 70(11): 2475-2484.
- [81] ANDERSON-WEDGE K, AVERY D Z, DANIEWICZ S R, et al. Characterization of the Fatigue Behavior of Additive Friction Stir-Deposition AA2219[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 142: 105951.
- [82] YU H Z, JONES M E, BRADY G W, et al. Non-Beam-Based Metal Additive Manufacturing Enabled by Additive Friction Stir Deposition[J]. Scripta Materialia, 2018, 153: 122-130.
- [83] 苟桂枝. 新型固态金属沉积工艺及军事应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(2): 122-126.
- GOU Gui-zhi. Novel Solid-State Metal Deposition Technology and Military Application[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(2): 122-126.
- [84] JORDON J B, ALLISON P G, PHILLIPS B J, et al. Direct Recycling of Machine Chips through a Novel Solid-State Additive Manufacturing Process[J]. Materials & Design, 2020, 193: 108850.
- [85] AVERY D Z, PHILLIPS B J, MASON C J T, et al. Influence of Grain Refinement and Microstructure on Fatigue Behavior for Solid-State Additively Manufactured Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(6): 2778-2795.
- [86] RUTHERFORD B A, AVERY D Z, PHILLIPS B J, et al. Effect of Thermomechanical Processing on Fatigue Behavior in Solid-State Additive Manufacturing of Al-Mg-Si Alloy[J]. Metals, 2020, 10(7): 947.

(下转第 137 页)