

引用格式: 蔺春发, 戴宇轩, 韩雨蔷, 等. 搅拌摩擦辅助电弧增材制造铝合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(10): 944-952.

LIN C F, DAI Y X, HAN Y Q, *et al.* Recent Progress in Wire Arc Additive Manufactured Aluminum Alloys Assisted by Friction Stir Processing[J]. Materials China, 2024, 43(10): 944-952.

搅拌摩擦辅助电弧增材制造铝合金研究进展

蔺春发¹, 戴宇轩¹, 韩雨蔷¹, 李响², 常宝平¹, 李远喜¹

(1. 常熟理工学院汽车工程学院, 江苏 常熟 215500)

(2. 西北有色金属研究院先进材料研究所, 陕西 西安 710016)

摘要: 高性能铝合金兼具轻质、高强、耐腐蚀等优点, 在航空航天和汽车制造等工业领域应用前景广阔。电弧增材制造技术集成效率高、原材料和设备成本低、环境适应性强等优点于一身, 在大尺寸铝合金构件制备方面具有显著优势。但复杂热循环导致的晶粒粗大、组织不均匀、残余应力和气孔缺陷等问题, 给电弧增材制造铝合金带来了挑战。搅拌摩擦加工技术具有良好的组织细化、均匀化和致密化效果, 已作为同步调控或后处理手段用于铝合金的增材制造中。针对近年来搅拌摩擦辅助电弧增材制造铝合金的装备系统、工艺参数、组织结构和力学性能等方面进行了综述, 并分析了搅拌摩擦辅助电弧增材制造技术的形性调控机理, 最后对复合增材制造技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 铝合金; 电弧增材制造; 搅拌摩擦加工; 晶粒细化; 气孔缺陷; 残余应力

中图分类号: TG146. 21; TG44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)10-0944-09

Recent Progress in Wire Arc Additive Manufactured Aluminum Alloys Assisted by Friction Stir Processing

LIN Chunfa¹, DAI Yuxuan¹, HAN Yuqiang¹, LI Xiang²,
CHANG Baoping¹, LI Yuanxi¹

(1. School of Automotive Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

(2. Advanced Materials Research Central, Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: High performance aluminum alloys have broad application prospects in aerospace and automotive fields due to its lightweight, high strength and outstanding corrosion resistance. Wire arc additive manufacturing (WAAM) technology, combining the advantages of high forming efficiency, low cost and excellent environmental adaptability, exhibits great potential in producing aluminum alloy components. However, coarse grains, nonuniform microstructure, residual tensile stress, and porosity defects are always formed in aluminum alloy components owing to the complex thermal cycles, which brings challenges for the WAAM of aluminum alloys. Recently, friction stir processing (FSP) has been used in the additive manufacturing of aluminum alloys to optimize its microstructure. In this review, the latest developments of WAAM aluminum alloys assisted by FSP are reviewed, including the equipment system, process parameters, microstructure, mechanical properties as well as the microstructure-performance controlling mechanisms. Finally, the possible development directions of the above metal additive manufacturing technologies are prospected.

Key words: aluminum alloy; wire arc additive manufacturing; friction stir processing; grain refinement; porosity defect; residual stress

收稿日期: 2024-05-07 修回日期: 2024-07-05

基金项目: 江苏省基础研究计划自然科学基金项目(BK20220690);
江苏省高等学校基础科学研究面上项目(23KJB430002);
陕西省重点研发计划(2024GX-YBXM-356)

第一作者: 蔺春发, 男, 1989 年生, 讲师,
Email: chunfalin1852@csit.edu.cn

通讯作者: 韩雨蔷, 女, 1990 年生, 讲师,
Email: hanyuqiang@csit.edu.cn
李响, 男, 1992 年生, 高级工程师,
Email: lixiang14@hrbeu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202405006

1 前言

增材制造技术(即 3D 打印)以计算机数字模型为基础, 运用离散-堆积原理, 在分层软件和数控成形系统控制下将材料熔化并逐层堆积来构造三维物体, 它集先进制造、数字制造和智能制造于一体, 是最具发展前景的

新兴制造技术之一, 已广泛应用于钛合金^[1]、铝合金^[2]、镁合金^[3]、不锈钢^[4]、高熵合金^[5]和高温合金^[6]等金属材料的制备。增材制造铝合金构件不仅能够满足高性能和轻量化的实际需求, 而且能应对低成本、高效率 and 集成化制造挑战, 在航空航天、船舶海洋和交通运输等领域具有广阔的应用前景。

根据热源和成形方式的不同, 用于铝合金增材制造的主流技术主要有激光粉末床熔合 (laser powder bed fusion, LPBF)^[7]、激光定向能量沉积 (laser-directed energy deposition, LDED)^[8]、线材电弧增材制造 (wire-arc additive manufacturing, WAAM)^[9] 等。其中, 电弧增材制造技术具有材料利用率高、生产周期短、原材料成本低、设备简单、环境适应性强等特点, 且不用考虑材料对高能束的大折射率问题, 在铝合金快速成形方面表现出较大优势。然而, 由于电弧增材制造过程热量输入高、加热和冷却速度快、温度梯度大, 导致现有铝合金在成形后主要由粗大柱状晶组成, 并存在气孔、不完全熔合、微裂纹等冶金缺陷和残余拉伸应力, 降低了构件的强度、塑性和疲劳性能, 限制了增材制造铝合金构件的实际应用^[10-12]。针对以上问题, 目前行之有效的解决方法之一是将轧制、超声冲击、激光冲击、机械冲击等塑性加工或表面强化技术融入到增材制造过程中, 如图 1 所示, 通过使合金晶粒细化、气孔缺陷闭合、残余拉伸应力大幅降低或转化为压应力状态, 从而改善增材件的力学性能^[13-17]。相比于以上技术, 搅拌摩擦加工 (friction stir processing, FSP) 具有更大的作用深度和金属塑性变形程度, 其组织细化、均匀化和致密化效果更加突出。同时, FSP 处理对于减弱应力集中也有非常显著的作用, 且其工艺简单、节能环保, 已广泛应用于铝合金等金属材料的形性调控^[18, 19]。鉴于此, 研究人员将 FSP 技术与金属增材制造相结合, 开发了搅拌摩擦辅助电弧/激光增材制造等方法^[20-24], 为金属增材制造形成性能的提升提供了新的技术方向。

本文围绕铝合金的搅拌摩擦辅助电弧增材制造 (WAAM assisted by FSP, FSP-WAAM) 方法, 对其工艺流程和装备系统、工艺参数、组织结构、力学性能等方面的研究进展进行介绍; 在此基础上, 对搅拌摩擦辅助电弧增材制造铝合金的形性调控机理进行了总结, 对其发展趋势进行了展望。

2 FSP-WAAM 工艺流程与装备系统

铝合金的电弧增材制造通常以商用或自主研发铝合金焊丝为原材料, 利用电弧将丝材加热至熔化状态, 并在计算机控制的机器人带动下沿程序设定路径逐层堆积, 从而快速制备铝合金零部件^[25-27]。依据增材制造标准

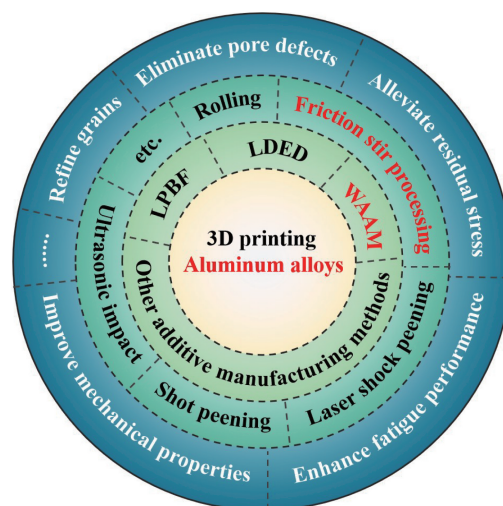


图 1 铝合金的塑性变形辅助增材制造技术概述

Fig. 1 An overview of the additive manufacturing of aluminum alloy components assisted by plastic deformation technologies

ASTM F3187—16, WAAM 技术分属于直接能量沉积方法 (directed energy deposition, DED), 其实质是将熔化极气体保护焊 (gas metal arc welding, GMAW)、钨极气体保护焊 (gas tungsten arc welding, GTAW)、等离子气体保护焊 (plasma arc welding, PAW) 等焊接方法应用于金属的增材制造中。电弧增材制造装备系统主要由电弧热源、自动供丝机构、计算机控制的机器人和附属机构等部分组成^[28], 不需要真空室或密闭空间, 设备简单, 这为搅拌摩擦辅助电弧增材制造实验平台的搭建带来了极大的便利, 推动了该技术的快速发展。

搅拌摩擦辅助电弧增材制造是近些年发展起来的一种新型复合增材成形方法, 它以电弧熔丝增材制造技术为基础, 辅以后续搅拌摩擦加工这一行之有效的组织性能调控手段, 可实现增材制造铝合金等金属材料的高质量可控制备。根据搅拌摩擦加工在增材制造过程中所处环节的不同, 可将其分为两类。一种是后期搅拌摩擦辅助电弧增材制造 (WAAM assisted by subsequent FSP, SFSP-WAAM) 方法^[29-32], 如图 2 所示, 在电弧增材制造完成后, 对成形件进行搅拌摩擦加工改性处理, 使粗大柱状晶向细等轴晶转变, 并消除气孔缺陷, 降低残余应力, 从而改善增材件的组织结构和综合性能。另一种是层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造 (WAAM assisted by interlayer FSP, IFSP-WAAM) 方法, 即在每一层或每几层电弧沉积区形成后均同步进行搅拌摩擦加工改性处理, 经过循环往复的沉积-加工过程, 实现增材构件的高质量可控成形^[33, 34]。图 3 为一种典型的 IFSP-WAAM 设备系统及制备工艺流程示意图^[35]。可以看到, 3 个独立控制的机器人上分别装配了电弧焊枪、切削加工工具和搅拌摩擦加

工工具。在三维模型绘制、软件切片和路径规划、程序生成、焊接工艺参数设定的基础上,依次进行电弧沉积、沉积层表面切削加工平整化和搅拌摩擦改性处理 3 个步骤,可以制取一定厚度的增材单元层。随着电弧沉积一切削加工—搅拌摩擦加工的交替反复进行,最终可以获得与三维 CAD 模型一致的、组织性能可控的层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造金属构件。显然, SFSP-WAAM 成形方法仅需要单独的电弧增材制造平台和搅拌摩擦加工设备即可完成合金构件的制备,无需进行设备改造和整合,增材成形和改性处理过程可分先后独立进行,具有工艺流程简单、易操控、适用性强等优势。相比之下,

IFSP-WAAM 成形方法的工艺流程十分紧凑,需要交替进行电弧增材和搅拌摩擦处理,因此对装备系统的要求相对较高,要将搅拌摩擦加工设备与电弧增材制造平台集成到一起才能充分发挥增材制造的高效率优势。但相比于 SFSP-WAAM 方法,搅拌摩擦改性处理贯穿整个 IFSP-WAAM 过程,可对合金的组织结构进行实时调控,改性效果突出。不过该过程需要考虑后续电弧沉积过程对已改性层的热影响,工艺控制难度更大。综上所述,虽然两种搅拌摩擦辅助电弧增材制造方法在设备系统、工艺流程、组织性能调控等方面存在区别且各有优劣,但其微观作用机理基本一致,都具有良好的应用潜力。

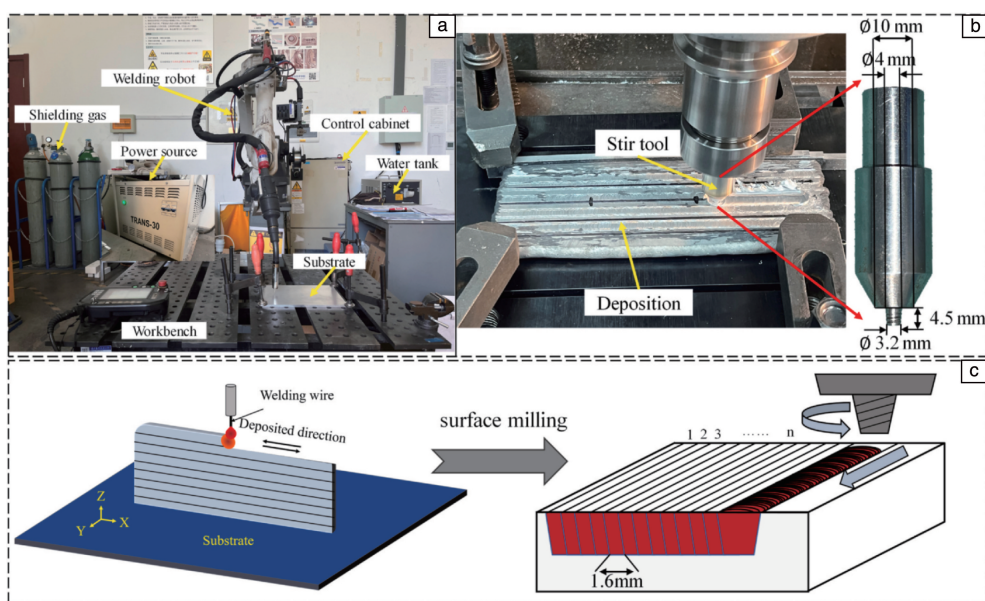


图 2 铝合金的电弧熔丝增材制造与搅拌摩擦后处理^[30]: (a) 电弧增材设备平台, (b) 搅拌摩擦设备系统, (c) 工艺流程图

Fig. 2 Fabrication process of aluminum alloy components via the WAAM and subsequent FSP treatment^[30]: (a) WAAM system, (b) FSP system, (c) experiment procedure

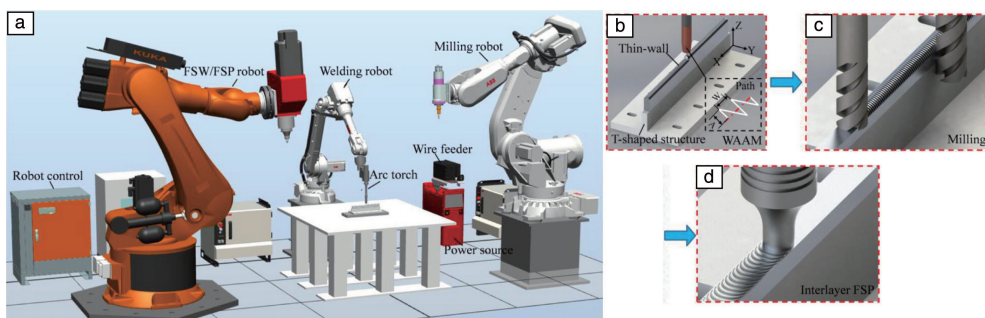


图 3 层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造过程示意图^[35]: (a) 设备系统, (b) 电弧增材, (c) 铣削加工, (d) IFSP 处理

Fig. 3 Schematic diagram of IFSP-WAAM process^[35]: (a) experimental platform, (b) WAAM, (c) milling, (d) IFSP

3 FSP-WAAM 铝合金的组织结构与力学性能

目前,研究人员采用后期/层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造方法制备了众多体系的铝合金构件,并对成形

工艺和材料的组织结构、力学性能进行了系统的研究。表 1 列出了部分采用 SFSP-WAAM 和 IFSP-WAAM 方法制备的常见铝合金的力学性能,涉及 Al-Cu 合金(如 2219^[36]、2319^[30, 33, 37])、Al-Si 合金(如 4043^[24, 35])、

Al-Mg 合金 (如 5183^[24]、5356^[38]、AlN_p/5356^[31])、Al-Mg-Si 合金 (如 6061^[32, 34])、Al-Zn-Mg-Cu 合金 (如 7075^[39])、Al-Mg-Sc 合金^[29] 以及 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr^[40] 合金等。从中不难发现, 搅拌摩擦处理对电弧增材制造铝

合金的力学性能具有显著的提升作用。为了阐明其强化机理, 本文对一些典型结果进行了总结和论述, 从而为铝合金的搅拌摩擦辅助电弧增材制造及其在汽车制造、航空航天等领域的应用提供新的技术方向和理论依据。

表 1 搅拌摩擦辅助电弧增材制造铝合金构件的拉伸性能 (包括极限抗拉强度、屈服强度和延伸率)

Table 1 Ultimate tensile strength (UTS), yield strength (YS) and elongation (EL) of the aluminum alloy fabricated by FSP assisted WAAM

Processing	Materials	Tensile properties along vertical (V) and horizontal (H) direction	Property with FSP	Property without FSP	Property improvement	References
IFSP	2219	UTS (H)	277 MPa	255 MPa	8.6%	[36]
		YS (H)	143 MPa	118 MPa	21.2%	
		EL (H)	18.5%	13.8%	34.1%	
SFSP	2319	UTS (H)	243.2 MPa	219.8 MPa	10.6%	[30]
		EL (H)	18.1%	7.0%	158.6%	
IFSP	2319	UTS (H)	377.7 MPa	297 MPa	27.3%	[33]
		EL (H)	30.6%	16.2%	88.9%	
IFSP	2319	UTS (H)	289.6 MPa	264.3 MPa	8.75%	[37]
		YS (H)	162.9 MPa	110 MPa	32.2%	
		EL (H)	15%	13%	20.0%	
IFSP	4043	UTS (Average)	148 MPa	164 MPa	-9.8%	[35]
		YS (Average)	88 MPa	82 MPa	7.3%	
		EL (Average)	33.2%	13.8%	140.2%	
SFSP	Al-Mg-Sc	UTS (H)	387 MPa	245 MPa	57.9%	[29]
		YS (H)	263 MPa	170 MPa	54.7%	
		EL (H)	26.0%	8.5%	205.9%	
IFSP	5356	UTS (V)	264.8 MPa	242.5 MPa	9.2%	[38]
		YS (V)	134.1 MPa	110.3 MPa	21.8%	
		EL (V)	22.4%	17.8%	25.8%	
SFSP	AlN _p /5356	UTS (H)	349 MPa	231 MPa	51.1%	[31]
		YS (H)	178 MPa	146 MPa	21.9%	
		EL (H)	19.9%	5.5%	261.8%	
SFSP	6061	UTS (H)	257 MPa	243 MPa	6.0%	[32]
		YS (H)	142 MPa	124 MPa	23.3%	
		EL (H)	16.8%	18.1%	-4.5%	
IFSP	6061	UTS (V)	156 MPa	119 MPa	31.1%	[34]
		YS (V)	92 MPa	90 MPa	2.2%	
		EL (V)	19%	3%	533%	
IFSP	7075	UTS (V)	348 MPa	278 MPa	25%	[39]
		YS (V)	204 MPa	167 MPa	22%	
		EL (V)	18.8%	5.4%	250%	
IFSP	Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr	UTS (H)	511 MPa	332 MPa	53.9%	[40]
		YS (H)	387 MPa	257 MPa	50.6%	
		EL (H)	14.6%	3.7%	294.6%	

3.1 SFSP-WAAM 铝合金

采用常规 WAAM 方法制备铝合金时, 常常产生组织粗大、气孔和裂纹等冶金缺陷, 而且由于后续增材热循环会对先沉积层产生一定范围的加热重熔和热影响作用, 两道沉积层中间区域的合金往往与沉积层内部在组织形貌上存在明显不同, 造成各向异性^[9]。为了改善金属增材件的综合性能, 通常会利用后期热处理或热等静压处理来进行组织调控^[41, 42]。搅拌摩擦加工在晶粒细化、组织均匀化、消除孔隙、微裂纹和残余应力等方面同样具有良好效果, 逐渐被用于增材制造铝合金的后期改性处理, 并取得了一些有价值的研究成果。

Zhang 等^[30]通过微结构表征发现, 采用 WAAM 方法制备的 2319 铝合金主要由层间的等轴晶和层内的柱状晶组成, 平均晶粒尺寸约为 $21.32\ \mu\text{m}$, 在晶界上还存在着连续分布的析出相(图 4a), 且合金中存在许多孔隙缺陷。该团队尝试对 2319 铝合金 WAAM 成形件进行连续多道次 FSP 处理, 结果发现, 合金中的孔隙明显消除, 其晶粒均转变为细小的等轴晶, 平均晶粒尺寸减小到 $1.28\ \mu\text{m}$, 同时高角度取向差角含量增加。另外, 经 FSP 处理后, 沿晶界分布的网状析出相被搅拌破碎并均匀分布在基体中(图 4b), 合金的组织均匀性得到明显提升。从表 1 中可以看到, 2319 铝合金电弧增材件的拉伸强度和延伸率分别提高了 10.6% 和 158.6%。He 等^[32]深入研究了多道次 FSP 处理对电弧增材制造 6061 铝合金组织形貌和拉伸性能的影响。在该工作中, 作者首先利用优化的 WAAM 工艺参数(焊接速度 6 mm/s, 供丝速度 6 m/min, 氩气流速 15 L/min 等)进行了 6061 铝合金的电弧沉积, 随后在表面铣削平整化的基础上, 对其进行了 FSP 处理(搅拌头旋转速度 1000 r/min, 行进速度 100 mm/min, 倾角 2.5° , 下压量 0.2 mm 等)。通过电子背散射衍射和金相分析发现, WAAM 成形铝合金试样的晶粒较粗大, 晶粒平均尺寸为 $128\ \mu\text{m}$ (图 5a), 经 FSP 处理后, 晶粒尺寸大幅度下降, 达到了 $5\ \mu\text{m}$ 左右(图 5b), 而且材料的孔隙率显著降低。基于上述组织优化作用, 电弧增材制造 6061 铝合金的平均显微硬度、屈服强度和极限抗拉强度分别提高了 31.5%、23.3% 和 6.0%。同时, FSP 处理还削弱了 WAAM 成形铝合金分层结构引起的性能各向异性, 使该合金构件在水平和竖直方向的延伸率的差异从 4.5% 减小至 1.4%。上述研究结果有效证明了搅拌摩擦后处理在改善电弧增材制造铝合金微观组织和力学性能方面的作用效果。

Cui 等^[29]研究了“FSP+高温时效”处理对电弧增材制造 Al-Mg-Sc 合金组织形貌和力学性能的影响规律。其增材成形工艺参数如下: 焊接电流 105 A、电弧电压 22 V、行进速度 9 mm/s、氩气流速 18 L/min。FSP 工艺参数为:

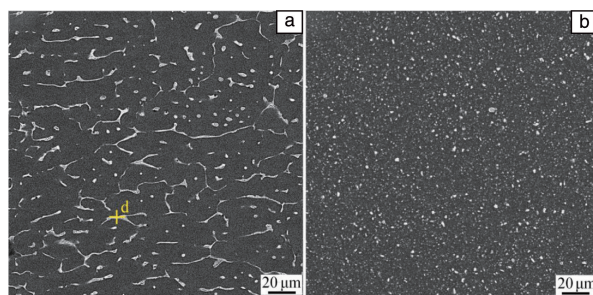


图 4 增材制造 2319 铝合金的组织形貌^[30]: (a) WAAM 件, (b) IFSP-WAAM 件

Fig. 4 Microstructure of 2319 aluminum alloys^[30]: (a) WAAM sample, (b) IFSP-WAAM sample

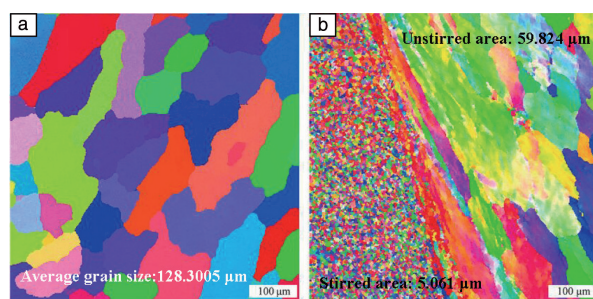


图 5 搅拌摩擦处理前后电弧增材制造 6061 铝合金的组织形貌和晶粒特征^[32]: (a) 电弧沉积态, (b) 搅拌摩擦处理态

Fig. 5 Microstructure and grain size of 6061 aluminum alloy components^[32]: (a) as-deposited, (b) FSP treated

搅拌头旋转速度 800 r/min, 行进速度 200 mm/min, 倾角 2° , 下压量 0.15 mm。高温时效处理工艺参数: $300\ ^\circ\text{C}/2\ \text{h}$, 水冷。部分实验结果如图 6 所示, 可以看到经过 FSP 处理后, Al-Mg-Sc 合金中的孔隙缺陷基本被消除, 搅拌区平均晶粒尺寸达到 $2.4\ \mu\text{m}$, 比沉积态合金降低了 59.3%。可见, 搅拌摩擦处理充分发挥了组织细化和均匀化作用。另外, 经过高温时效处理后, 合金中析出了许多细小的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相, 基体晶粒尺寸保持在 $2.7\ \mu\text{m}$ 左右。与 WAAM 样品相比, 经过“FSP+高温时效”处理后, 合金的极限抗拉强度、屈服强度和延伸率分别提高了 57.9%、54.7% 和 205.9% (见表 1)。可见, 在搅拌摩擦处理的基础上结合适当的热处理还能够进一步调控铝合金的组织结构, 对于提升其综合性能具有更为显著的效果。

此外, 研究者在搅拌摩擦辅助激光增材制造的 Al-Cu-Mg 合金^[22]、AlSi10Mg 合金^[23] 和 WE43 镁合金^[21] 中也发现了上述现象。其根本原因在于搅拌摩擦处理能够借助机械搅拌和摩擦热的耦合作用, 诱导铝合金发生动态再结晶和组织破碎、再分布, 最终形成均匀细小的晶粒组织以及弥散分布的第二相粒子, 进而诱导细晶强化、第二相强化、弥散强化等强化机制发挥作用, 从而有效提高增材制造铝合金材料的力学性能。

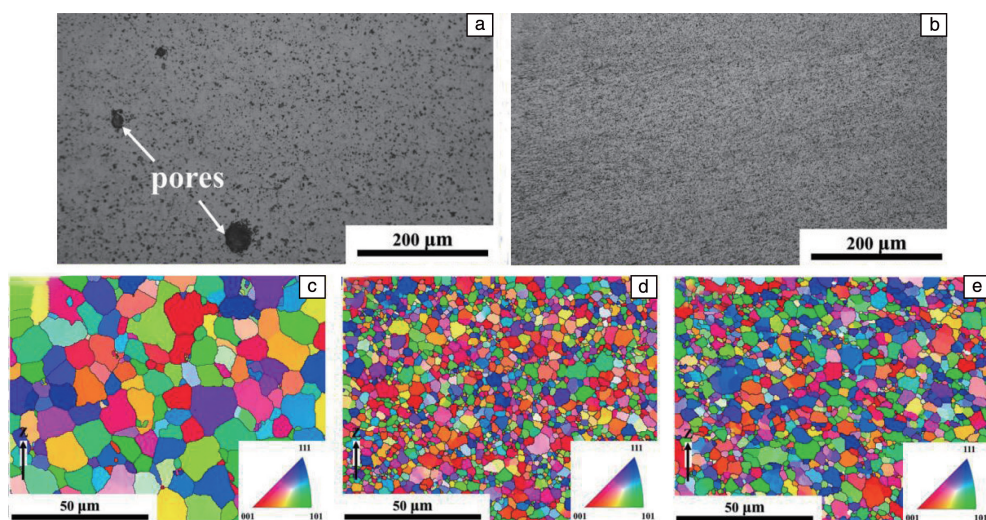


图 6 电弧增材制造 Al-Mg-Sc 合金的组织形貌与晶粒尺寸^[29]：(a, c) 沉积态，(b, d) 搅拌摩擦处理态，(e) 搅拌摩擦+时效处理态

Fig. 6 Microstructure and grain size of WAAM Al-Mg-Sc components^[29]：(a, c) as-deposited, (b, d) FSP treated, (e) FSP+aging treated

3.2 IFSP-WAAM 铝合金

铝合金在层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造过程中会经历循环往复的电弧加热和搅拌摩擦作用，已成形区的组织结构特征同时受到 IFSP 处理和后续增材热循环的影响，最终形成的铝合金组织将比 SFSP-WAAM 件更为复杂多变。因此，有必要对 IFSP-WAAM 成形铝合金的工艺参数、组织形貌和力学性能进行系统研究。Liu 等^[38]采用 IFSP-WAAM 方法成功制备了 5356 铝合金直壁件。其成形过程如下：利用电弧熔丝增材制造设备在铝合金基板上逐层沉积 5356 铝合金，具体工艺包括焊接电流 135 A、电压 19.4 V、送丝速度 7.8 m/min、行进速度 60 mm/min、氩气流速 15 L/min 等；同时，在每一个铝合金层沉积过程中，在焊枪后方约 20 mm 处同步进行 FSP 处理，搅拌头行进方向与焊枪相同，FSP 工艺参数主要包括搅拌头旋转速度 500 r/min，行进速度 60 mm/min，倾角 2.5°等。研究表明，IFSP 处理对电弧增材制造 Al-Mg 合金具有良好的第二相细化和孔隙愈合作用(图 7)。最终，合金构件的屈服强度、抗拉强度和伸长率在垂直方向上分别增加了 23.8 MPa、22.3 MPa 和 4.6%，在水平方向上分别提高了 11.9 MPa、14.4 MPa 和 6.7%，证明 IFSP-WAAM 方法具有良好的成形能力。

He 等^[34-36, 39]系统表征了层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造 2219、4043、6061 及 7075 铝合金构件的组织形貌和力学性能，部分典型结果如图 8 所示。可以观察到经过 IFSP 处理后，存在于原始沉积层中的孔隙缺陷基本被消除，粗大的柱状晶和树枝晶在搅拌及动态再结晶作用下转化为细等轴晶，其平均晶粒尺寸降低至 10 μm 以下，沿晶界成连续网状分布的粗大共晶相被破碎细化并部分

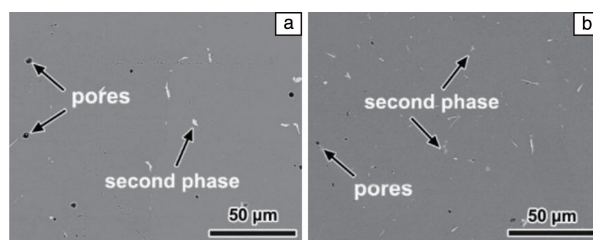


图 7 增材制造 5356 铝合金的组织形貌^[38]：(a) WAAM 件，(b) IFSP-WAAM 件

Fig. 7 Microstructure of the additive manufactured 5356 aluminum alloys^[38]：(a) WAAM sample, (b) IFSP-WAAM sample

回溶到基体中；由于晶粒细化、 θ -Al₂Cu 和 η -MgZn₂ 等细小析出相的弥散分布及 Si 等元素的回溶，合金的强度相比于沉积态明显提高；由于冶金缺陷的消除、连续共晶相的破碎和回溶，应力集中被大幅削弱，合金的塑性和疲劳性能明显提升；值得注意的是，后续沉积过程带来了新的热输入，使先成形的合金层中发生第二相强化粒子粗化及晶界析出相增加，造成先成形区材料强度降低，因而成形件不同区域存在一定的性能差异。与此类似，Guo 等^[40]在层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造的 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr 合金中观察到，相比于沉积态组织，FSP 区的孔隙率明显降低，晶界上的共晶相破碎并分散分布，晶粒尺寸细化至 ~1 μm，合金的强度、塑性和疲劳性能均得到明显提升，但由于后续增材热循环和摩擦热的重熔作用，层间界面重叠区发生晶粒和析出相的长大，使该区域的性能稍有下降。Wei 等^[20]在层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造 Mg-Y-Nd 合金构件中也发现了相同的现象。由此可见，尽管 IFSP 处理对电弧增材制造铝合金具有良好的组织调控和性能优化效果，但后续沉积过程会对已

改性区产生复杂的热影响,造成部分晶粒和析出相长大及局部性能降低。因此,有必要针对这一问题进行系统研究,提出可行的调控方法。

Dai 等^[37]采用层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造方法制备了 2319 铝合金构件,结果发现由于 IFSP 处理的搅拌和摩擦热作用,沉积区的粗大组织基本被消除,晶粒细化率达到 87.1%,且动态再结晶含量提高至 62%,最终形成了一种由细等轴晶和柱状晶组成的梯度结构,如图 9 所示,这种异构组织能够有效协调合金的强度和塑性,使合金的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别提升了 8.75%、32.2%和 20%。Yuan 等^[33]指出 IFSP 处理不仅能够降低 2319 铝合金的晶粒尺寸和织构强度,还会提高其位错密度。由于大量位错的滑移、攀移和缠结等行为,

铝合金中形成了新的亚晶界(图 10a~10c);同时,位错的切割和绕过行为会导致位错增殖,使沉淀相与 Al 基体的界面失配度增加(图 10d)。这几种微观行为均会提升材料的变形抗力,从而使铝合金增材件的强度提高。而在后续层沉积过程中,再结晶区受热发生重熔,最终形成了一种由周期性排列双峰晶区和柱状晶区组成的非均质结构,合金构件的极限抗拉强度和延伸率显著提升,其最大值分别达到了 378 MPa 和 30.6%。相比于采用 SFSP-WAAM 方法制备的 2319 铝合金,IFSP-WAAM 方法能够在铝合金成形过程中实现原位/同步控形控性,从而获得具有异构组织特征的合金构件,有效协调其强韧性,使 2319 铝合金获得更加突出的综合力学性能,提升其应用潜力^[30, 33, 37]。

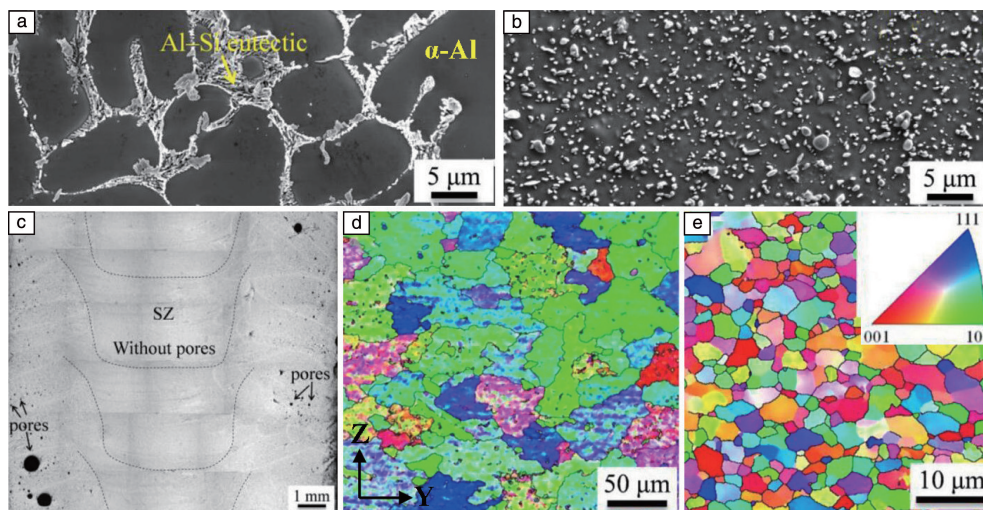


图 8 增材制造铝-硅合金的组织形貌^[35]: (a, d) WAAM 件, (b, c, e) IFSP-WAAM 件

Fig. 8 Microstructures of the additive manufactured Al-Si alloy walls^[35]: (a, d) WAAM sample, (b, c, e) IFSP-WAAM sample

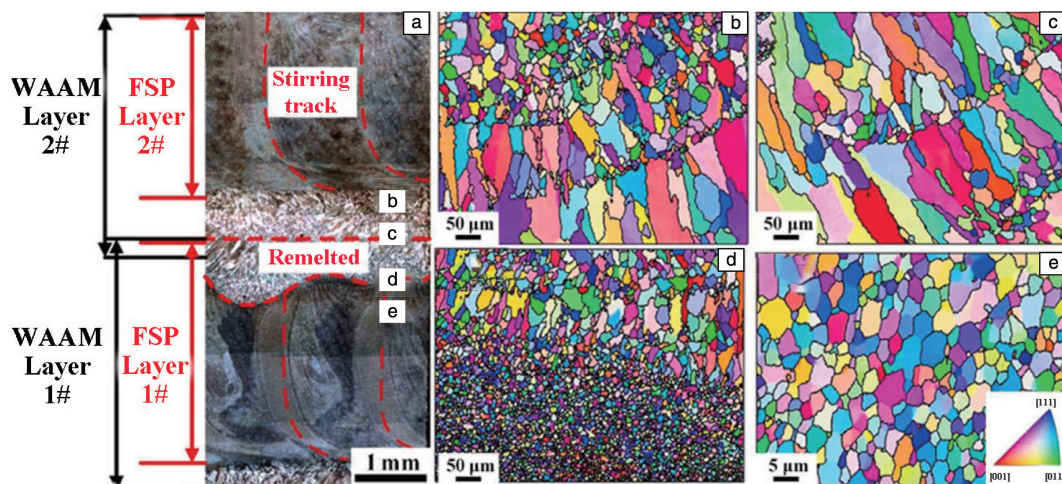


图 9 层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造 2319 铝合金梯度组织形貌^[37]: (a) 宏观形貌, (b~e) 不同区域的反极图

Fig. 9 The IFSP-WAAM 2319 Al alloys with gradient structure^[37]: (a) macrostructure image, (b~e) inverse pole figure maps for different locations

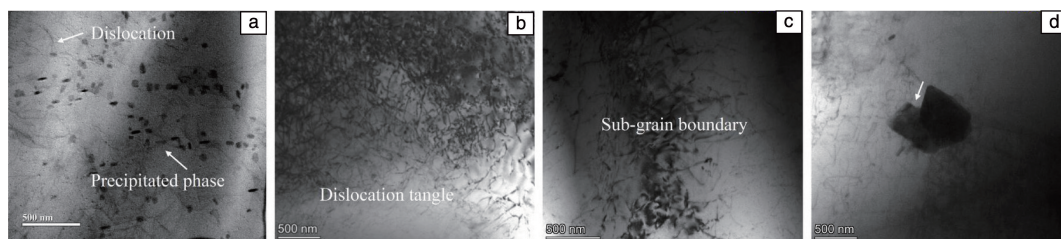


图 10 增材制造 2319 铝合金的 TEM 照片^[33]: (a) WAAM 件, (b~d) IFSP-WAAM 件

Fig. 10 TEM images of the additive manufactured 2319 Al alloys^[33]: (a) WAAM sample, (b~d) IFSP-WAAM sample

事实上, 搅拌摩擦后处理和层间处理方法对改善铝合金的组织特性和综合性能均具有一定效果, 有必要对两种成形工艺及其组织性能调控机理进行系统研究。另外, 在 Al-Mg 合金^[29, 38]及 Al-Zn-Mg-Cu 合金^[39, 40]中添加 Sc, Zr 等合金元素能够使铝合金在电弧沉积和搅拌摩擦处理过程中形成细小且均匀分布的强化相粒子, 从而改善铝合金增材件的综合性能。因此, 有必要对这些增强相在成形过程中的演变规律进行深入探究, 为搅拌摩擦辅助电弧增材制造技术的发展提供理论基础。

4 铝合金的 FSP-WAAM 成形成性机理

相比于传统的铝合金 WAAM 成形件, 采用搅拌摩擦辅助电弧增材制造方法制备的铝合金构件具有更加优异的微观组织结构和更加突出的强度、塑性和疲劳性能, 应用前景更加广阔。可见, 搅拌摩擦辅助电弧增材制造铝合金的成形成性能力十分优异, 其微观机理在于搅拌摩擦加工过程伴随着摩擦热和机械搅拌的耦合作用, 可以使电弧增材成形的铝合金中发生动态再结晶和组织破碎细化, 进而得到更加细小的等轴晶组织及分布更加均匀、尺寸更小的第二相强化粒子, 同时合金中的气孔和微裂纹等冶金缺陷发生愈合, 材料的致密度显著增加。最终, 由于晶粒细化、细小析出相的弥散分布、共晶元素的回溶, 细晶强化、弥散强化和固溶强化等机制发挥作用, 合金的强度相比于沉积态明显提高。由于冶金缺陷的消除、连续共晶相的破碎和回溶, 应力集中被大幅削弱, 合金的塑性和疲劳性能明显提升。因此, 经过搅拌摩擦加工处理的电弧增材制造铝合金构件的综合性能得以显著提升。除了搅拌摩擦辅助电弧增材制造方法外, 基于层间塑性变形改性处理的其他金属增材制造复合技术也受到越来越多的关注^[43-50], 逐渐成为增材制造领域的重要研究方向之一, 为增材制造关键金属结构件的实际应用提供新的技术支持。

5 结 语

搅拌摩擦辅助电弧增材制造复合技术应用潜力优异, 正在被越来越多的研究人员关注。其中, 层间搅拌摩擦

辅助电弧增材制造方法可以实现同步/原位改性, 具有更广阔的应用前景, 但该方法面临着工艺参数复杂、制造工艺和装备不成熟等问题, 未来应着重对其工艺参数和理论模型等方面进行完善和发展。

(1) 层间搅拌摩擦辅助电弧增材制造过程涉及了不同工艺的集成和多物理场的耦合作用, 除了要考虑不同工艺的稳定性 and 可重复性外, 还需重点关注其相互影响, 即搅拌摩擦加工处理不会导致增材件严重变形和开裂, 而电弧增材制造的热影响区应尽可能浅、搅拌摩擦加工影响区应尽可能深, 以保证在后续沉积过程中能够有效保留已改性区的组织性能; 另外, 目前的研究主要集中在搅拌摩擦加工处理对电弧增材制造材料的增强作用, 但少有研究关注后续沉积工艺对先前搅拌摩擦加工处理区组织结构和力学性能的影响, 这是待澄清的基础理论之一。

(2) 电弧沉积和搅拌摩擦加工工艺参数对铝合金构件的宏观尺寸、微观组织和力学性能具有重要影响, 有必要明确其影响规律, 建立复合工艺参数与合金组织性能、构件形状尺寸对应关系的数据库, 并建立准确的理论模型, 为大尺寸复杂结构铝合金零部件的形性协同调控提供理论基础和定量分析模型。

参考文献 References

- [1] WU B, SHAO Z, SHAO D, *et al.* Additive Manufacturing[J], 2023, 66: 103465.
- [2] HE P, WEBSTER R F, YAKUBOV V, *et al.* Acta Materialia[J], 2021, 220: 117312.
- [3] YUAN X, LIU M, WEI K, *et al.* Materials Science and Engineering A[J], 2022, 850: 143572.
- [4] DAI H, ZHANG S, LI Y, *et al.* Journal of Materials Science and Technology[J], 2024, 191: 33-48.
- [5] RAMAKRISHNA M, SURESH K, GURURAJ T, *et al.* Materials Characterization[J], 2021, 172: 110868.
- [6] YAN S, HE X, KRUGER M, *et al.* Materials and Design[J], 2024, 238: 112676.
- [7] GAIROLA S, JAYAGANTHAN R, AJAY J. Materials Science and Engineering A[J], 2024, 896: 146296.

- [8] ZHANG W, HA K, JIN Q, *et al.* Materials Today Communications [J], 2023, 37: 106979.
- [9] JORGE V L, TEIXEIRA F R, SCOTTI A, *et al.* Journal of Manufacturing Processes[J], 2023, 106: 520–536.
- [10] LIU H, CAI Z, FENG Y, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2023, 26: 5321–5336.
- [11] XU M, CHEN S, YUAN T, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2022, 928: 167172.
- [12] 方学伟, 杨健楠, 陈瑞凯, 等. 电焊机[J], 2023, 53(2): 52–67.
FANG X W, YANG J N, CHEN R K, *et al.* Electric Welding Machine[J], 2023, 53(2): 52–67.
- [13] LIAO Z, YANG B, XIAO S, *et al.* International Journal of Fatigue [J], 2021, 151: 106382.
- [14] WANG C, LI Y, TIAN W, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2022, 21: 781–797.
- [15] TANC, LI R, SU J, *et al.* International Journal of Machine Tools and Manufacture[J], 2023, 189: 104032.
- [16] CHEN Y, ZHANG X, DING D, *et al.* Journal of Materials Science and Technology[J], 2023, 165: 94–122.
- [17] 武永, 吴汝波, 邓威, 等. 航空科学技术[J], 2022, 33(9): 109–126.
WU Y, WU R B, DENG W, *et al.* Aeronautical Science and Technology[J], 2022, 33(9): 109–126.
- [18] YUE S, HUANG J, NI Y, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2024, 29: 1441–1452.
- [19] BAGHDADCHI A, PATEL V, LI W, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2023, 27: 5360–5367.
- [20] WEI J, HE C, QIE M, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2023, 311: 117809.
- [21] YANG G, ZHANG W, ZHANG J, *et al.* Materials Letters[J], 2023, 330: 133218.
- [22] DAI G, YAN Q, NIU F, *et al.* Journal of Manufacturing Processes [J], 2024, 112: 248–262.
- [23] HEIDARZADEH A, KHAJEH R, JAFARIAN H R, *et al.* Materials Science and Engineering A[J], 2024, 906: 146367.
- [24] 苗玉刚, 刘吉, 赵羽杨, 等. 焊接学报[J], 2023, 44(10): 41–48.
MIAO Y G, LIU J, ZHAO Y Y, *et al.* Transactions of the China Welding Institution[J], 2023, 44(10): 41–48.
- [25] ZHU Z, HU Z, SEET H L, *et al.* International Journal of Machine Tools and Manufacture[J], 2023, 190: 104047.
- [26] ZHU K, WANG J, ZHANG W, *et al.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J], 2024, 34(2): 423–434.
- [27] WEI Y, LIU F, LIU F, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2023, 24: 3477–3490.
- [28] 余圣甫, 禹润缜, 何天英, 等. 中国材料进展[J], 2021, 40(3): 198–209.
YU S F, YU R Z, HE T Y, *et al.* Materials China[J], 2021, 40(3): 198–209.
- [29] CUI J, GUO X, HAO S, *et al.* Materials Letters [J], 2023, 350: 134913.
- [30] ZHANG X, HE Y, WEI Y, *et al.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology[J], 2023, 46: 230–241.
- [31] LI S, ZHANG L, ZHANG G, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2024, 30: 1687–1695.
- [32] HE P, BAI X, ZHANG H, *et al.* Materials Letters [J], 2023, 330: 133365.
- [33] YUAN T, XU D, JIANG X, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2023, 321: 118146.
- [34] WANG F, WEI J, WU G, *et al.* Materials Letters [J], 2023, 342: 134312.
- [35] HE C, WEI J, LI Y, *et al.* Journal of Materials Science and Technology[J], 2023, 133: 183–194.
- [36] WEI J, HE C, ZHAO Y, *et al.* Materials Science and Engineering A [J], 2023, 868: 144794.
- [37] DAI G, XUE M, GUO Y, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2023, 968: 171781.
- [38] LIU L, XU W, ZHAO Y, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2023, 25: 1055–1068.
- [39] QIE M, WEI J, HE C. Journal of Materials Research and Technology [J], 2023, 24: 2891–2906.
- [40] GUO X, NI D, LI H, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2023, 322: 118173.
- [41] ZHOU Y, CHANG T, FANG X, *et al.* Materials and Design [J], 2023, 233: 112287.
- [42] LIU M, WANG J, HU T, *et al.* Advanced Powder Materials [J], 2024, 3(1): 100152.
- [43] ZHOU S, WU H, LI X, *et al.* Materials and Design [J], 2024, 238: 112721.
- [44] NIU F, WANG Q, SHAN B, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2023, 965: 171345.
- [45] GU J, WANG X, BAI J, *et al.* Materials Science and Engineering A [J], 2018, 712: 292–301.
- [46] CHEN C, FENG T, ZHANG Y, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2023, 27: 1428–1445.
- [47] LIANG J, WU D, LIU S, *et al.* Journal of Manufacturing Processes [J], 2024, 110: 331–349.
- [48] XU N, SHEN J, HU S, *et al.* Materials Letters [J], 2022, 308: 131179.
- [49] DIAO M, GUO C, SUN Q, *et al.* Materials Science and Engineering A [J], 2022, 857: 144044.
- [50] GU J, YANG S, GAO M, *et al.* Materials and Design [J], 2020, 186: 108288.

(编辑 吴 锐)