

# 铝合金连续进给搅拌摩擦增材制造技术

陈会子<sup>1</sup>, 孟祥晨<sup>1</sup>, 陈佳霖<sup>1</sup>, 谢聿铭<sup>1</sup>, 赵耀邦<sup>2</sup>, 黄永宽<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 上海航天精密机械研究所, 上海, 201600)

**摘要:** 为解决固相增材制造过程送料不连续及层间界面弱连接的难题, 提出了连续进给搅拌摩擦增材制造的方法, 设计了一个带孔的储料腔和一个可对丝材进行热塑化并连续挤压的螺杆拓扑结构搅拌头。结果表明, Al-Si 合金丝材经由送丝孔进入储料腔, 搅拌头连续热塑化并向下挤压材料, 搅拌针在堆积层间的搅拌作用有效地提高了堆积层间的界面结合能力, 成功实现了铝合金连续进给搅拌摩擦增材制造成形并解决了层间界面弱连接的难题。单层增材制造堆积层厚度平均为 1.2 mm, Al-Si 合金增材制造成形件沿堆积方向的抗拉强度和断后伸长率分别为 207.1 MPa  $\pm$  3.2 MPa 和 19.6 %  $\pm$  5.3%, 该技术为实现大型铝合金构件全固相增材制造提供了一种可行性方案。

**创新点:** (1) 提出了连续进给搅拌摩擦增材制造的方法。

(2) 开展了铝合金增材制造成形工艺研究。

**关键词:** 搅拌摩擦增材制造; 固相增材制造; 铝合金; 工艺特性; 力学性能

中图分类号: TG 453.9 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20220710002

## 0 序言

增材制造 (additive manufacturing, AM) 是一种实现复杂结构精密“控形”和高性能“控性”相结合的高端制造方式<sup>[1-4]</sup>。对于轻质铝合金高性能增材制造成形构件, 传统的熔化增材制造工艺在制造过程中存在构件热损伤严重, 易产生气孔和裂纹缺陷等难题<sup>[5-6]</sup>。

搅拌摩擦增材制造技术<sup>[7]</sup>衍生于搅拌摩擦焊<sup>[8-9]</sup>, 是一种固相增材制造技术, 以低热输入和大塑性变形为主要特征, 在高性能的轻质合金构件制造成形方面具有独特的优势。搅拌摩擦增材制造过程中, 材料并未达到熔点而一直保持热塑化态, 热塑化的材料经过增材制造工具的“锻造”作用制造成形, 避免了熔化增材制造工艺中的热损伤或气孔裂纹等缺陷, 可获得性能良好的细晶组织, 从而提高铝合金构件的性能。根据制造工艺过程特点, 将搅拌摩擦增材制造分为 3 种典型模式, 即摩擦堆焊沉积式、板材叠加式及中空棒料摩擦沉积式。最初, 学者们研究的摩擦堆焊沉积式主要通过耗材与基

板之间的摩擦形成冶金结合实现沉积成形<sup>[10]</sup>, 沉积层间存在界面弱连接且在外在成形控制方面和大型构件连续送料成形方面的研究仍缺少实质性的进展; He 等人<sup>[11]</sup>采用板材叠加式对 Al-Zn-Mg 合金成形进行了研究, 采用板材叠加的方式将多块板材向上堆叠, 增材成形件仅焊核无缺陷的区域可有效使用, 且在 FSAM 过程中各道次间需反复装夹; 美国 Meld 公司开发了搅拌摩擦沉积增材技术<sup>[12]</sup>, 方形棒料受轴向推力作用, 通过中空模具腔内与基板摩擦塑化成形, 制造过程中方形棒料需多次换料装夹并重启, 送料过程不连续。综上, 目前已开发的搅拌摩擦固相增材制造技术在送料方面具有不连续性<sup>[13-14]</sup>, 致使增材制造过程中的多次非稳定性过程, 大型结构件制造时间较长, 且堆积层间界面存在弱连接等技术瓶颈。

拟突破搅拌摩擦增材制造技术送料不连续和界面弱连接的难题, 原创性地开发基于丝材的连续进给搅拌摩擦增材制造技术<sup>[15]</sup>, 研究增材制造工艺成形过程, 揭示多层堆积层的结合界面成形特性, 分析堆积层组织与性能, 为铝合金搅拌摩擦增材制造高性能大型构件提供技术方案。

## 1 试验方法

连续进给搅拌摩擦增材制造系统主要包括万

收稿日期: 2022-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175301); 中国航天科技集团公司第八研究院产学研合作基金资助项目 (SAST2020-108)。

洲焊接公司生产的 WWW-LM3324-2D-3T 龙门式数控搅拌摩擦焊机和自主研发的搅拌摩擦增材制造系统, 该系统包括设有进料孔的储料腔、用于热塑化丝材并连续挤压与搅拌处理的搅拌头和实现连续送料的送丝机。其中, 送丝机的送丝轮采用 V 形槽和滚花结构设计以防止焊丝打滑, 增大送丝力。试验所用丝材为 Al-Si 合金丝材, 直径为 2.4 mm, 基板采用 6061-T4 铝合金, 尺寸为 300 mm × 100 mm × 6 mm。Al-Si 丝材及 6061-T4 铝合金基板的化学成分见表 1。图 1 为连续进给搅拌摩擦增材制造示意图, 在增材制造过程中, 增材制造过程主要分为三个阶段, 即: 丝材输送段、材料热塑化段和

增材成形段; 丝材原料是从送丝通孔进入螺槽中, 螺杆上的矩形螺纹会将丝材剪切成多个金属颗粒段, 金属颗粒段以非塞流的形式沿螺槽向下运动; 随塑化材料的连续积累, 储料腔内的压力逐渐增高, 颗粒状材料逐渐被压实并达到塑化状态; 此时, 非塞流输送转变成塞流输送, 塑化态金属材料经过底部的搅拌针连续的搅拌处理, 材料组织与成分更加均匀, 最终经储料腔底部的轴肩端面与基板之间的间隙增材制造成形。增材制造过程中采用的转速为 1 100 r/min, 行进速度为 600 mm/min, 送丝速度为 3 000 mm/min, 且搅拌针压入前一堆积层 0.6 mm 进行搅拌。

表 1 Al-Si 合金和 6061-T4 板材化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical compositions of Al-Si alloy and 6061-T4 sheet

材料	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Cr	Al
Al-Si 丝材	0.23	0.05 ~ 0.08	4.5 ~ 6.0	0.18	0.10	0.008	0.07	0.0001	余量
6061-T4 板材	0.25	1.08	0.60	0.32	0.04	0.001	0.045	0.189	余量

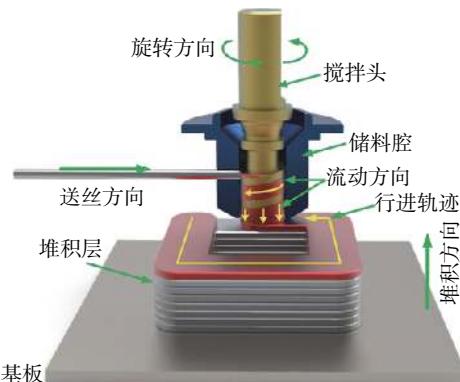


图 1 连续进给搅拌摩擦增材制造示意图

Fig. 1 Schematic of continuous feeding friction stir additive manufacturing process

增材制造完成后, 采用线切割沿垂直行进方向选取单侧成形壁样件进行分析, 切取 5 mm 厚的金相样品进行金相宏观形貌分析, 腐蚀液为 5% (体积分数) 的氢氟酸水溶液, 腐蚀时间为 10 ~ 20 s; 采用 Keyence VHX-1000E 超景深显微镜观察增材构件截面宏观形貌及各个区域的层间结合界面和堆积层不同区域的微观组织; 在增材制造截面上采用 HXD-1000TM 数字式显微硬度仪进行硬度测试, 加载载荷为 0.98 N, 保载时间为 10 s, 显微硬度测试点分布如图 2 所示, 相邻测试点之间的距离为 0.5 mm; 沿堆积方向并排切取拉伸试样进行测试, 拉试件尺寸如图 3 所示, 采用 SHIMADZUEHF-UV200K2 型力学性能试验机进行拉伸性能测试,

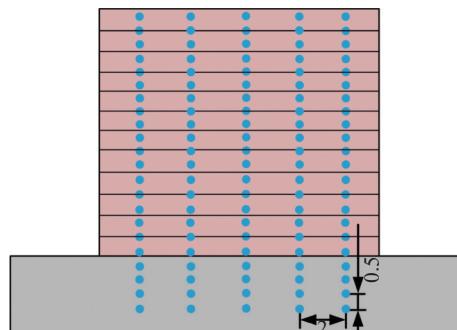


图 2 显微硬度测试点分布图 (mm)  
Fig. 2 Distribution of microhardness test spots

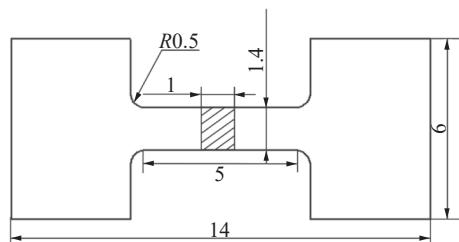


图 3 拉伸件尺寸 (mm)  
Fig. 3 Size of the tensile sample

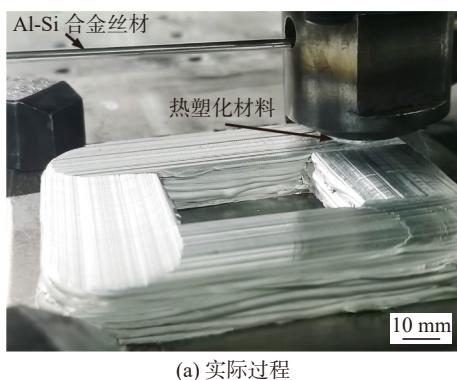
拉伸速率为 0.5 mm/min, 采用扫描电子显微镜 (SEM, Merlin Compact) 分析拉伸断口形貌。

## 2 试验结果与讨论

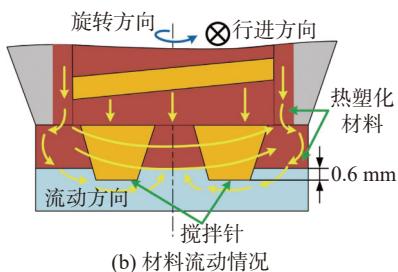
### 2.1 过程分析

增材制造制备的多层闭环成形实际工艺过程

及材料流动情况如图 4 所示。在增材制造实际工艺过程中(图 4a),热塑化材料的流动行为决定了增材制造构件的成形,如图 4b 所示,丝材经由增材制造搅拌头的剪切热塑化处理流入储料腔内,随着热塑化金属材料连续积累,储料腔内的压力升高,热塑化态的铝合金沿搅拌头上的螺槽向下流动,储料腔底部的静止端面对热塑化材料有一定的径向限位



(a) 实际过程



(b) 材料流动情况

图 4 增材制造实际过程及内部热塑化材料流动情况

Fig. 4 Actual process of additive manufacturing and the schematic of thermo-plasticized material flow. (a) actual process; (b) flow behavior of materials

与锻造挤压作用,而搅拌头底部的搅拌针设计提高了塑化材料的动态流动性和均质性,搅拌针的搅拌处理作用避免了搅拌摩擦增材制造层间界面弱连接缺陷,提高了堆积层与层之间的结合致密性,最终组织及均匀态的铝合金材料经储料腔底部端面与前一堆积层之间的间隙增材制造成形。选取铝合金搅拌摩擦增材制造特征成形构件单侧成形壁样件进行分析,如图 5 所示。宏观形貌显示各堆积层成形良好且均匀一致,堆积层厚平均为 1.2 mm,层宽为 24 mm,证明了增材制造技术成形过程稳定。



图 5 铝合金特征件单侧成形壁

Fig. 5 Individual side formed wall of Al alloy featured specimen

增材制造成形件截面及特征区域层间界面形貌与微观组织形貌如图 6 所示。堆积层与基板、堆积层与堆积层之间界面结合致密,无沟槽和弱连接等缺陷(图 6a),表明在增材制造过程中搅拌针的搅拌处理作用可显著提高热塑化材料与基板之间的结合效果。在增材制造过程中,储料腔底部的端面

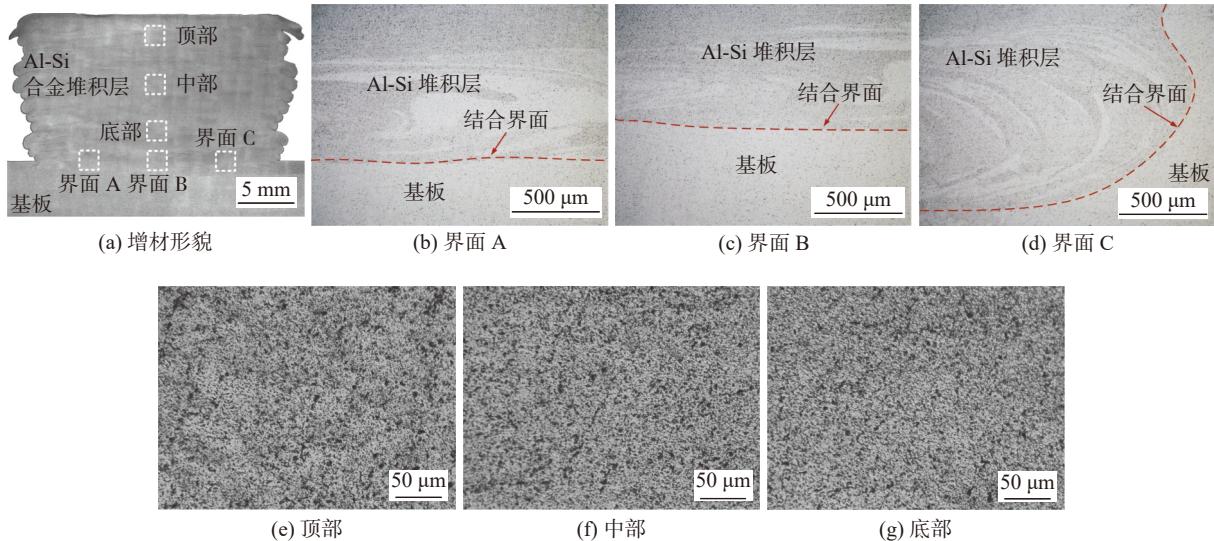


图 6 增材制造样件横截面及特征区域层间界面形貌与微观组织形貌

Fig. 6 The cross-section of the additive manufacturing specimen and its interfacial morphology and microstructures from the featured areas. (a) additive morphology; (b) interface A; (c) interface B; (d) interface C; (e) top section; (f) middle section; (g) bottom section

对热塑化状态材料的径向限位作用,使堆积层成形宽度保持在 24 mm,与储料腔底部端面尺寸相一致,同时该端面也会对热塑化材料有一定的锻造挤压作用,使堆积层间及内部结合良好。

堆积层间界面结合是确保增材制造成形的关键,因此进一步表征了堆积层与基板之间的界面,图 6b~图 6d 为未腐蚀的初始堆积层与基板的界面形貌。在增材制造过程中,搅拌针侧面与热塑化材料之间发生相对剪切滑动,热塑化材料被连续不断地剪切挤压。同时在搅拌针的侧向挤压与锻造挤压的共同作用下,初始堆积层与基板形成良好的界面。进一步地,分析了增材制造成形件不同增材位置的微观组织形貌,图 6e~图 6g 依次为成形件沿堆积方向顶部、中部及底部的微观组织形貌。在增材制造的连续制备成形过程中,热塑化态的铝合金材料在热力耦合作用下,发生严重的塑性变形,晶粒组织以动态再结晶的形式形成细小的等轴晶粒;堆积层的底部和中部区域受多次摩擦热输入的影响,晶粒尺寸略大于堆积层顶部。

## 2.2 显微硬度分布

沿堆积方向不同区域的显微硬度分布情况如图 7 所示,沿堆积方向,硬度值的波动较小,由于在增材制造过程中,铝合金材料一直维持热塑化态,摩擦热输入较小;通过显微硬度云图得出,增材制造成形件顶部堆积层的显微硬度平均值为  $44.8 \text{ HV} \pm 2.7 \text{ HV}$ ,中部堆积层的显微硬度平均值为  $42.8 \text{ HV} \pm 1.8 \text{ HV}$ ,底部堆积层的平均硬度值为  $41.6 \text{ HV} \pm 0.5 \text{ HV}$ 。中部和底部堆积层在增材制造过程中经历了多次摩擦热输入的影响,堆积层中部和底部硬度的平均值要略低于顶部堆积层,整体堆积层的显微硬度分布较均匀。由于搅拌头底部搅拌针对热塑化材料的搅拌处理作用,同一堆积层内部的晶粒尺寸分布具有一定的均匀性,证明热塑化材料得到了充分且均匀化的搅拌处理。

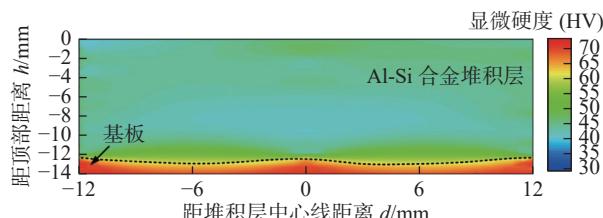


图 7 不同区域的显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution in different areas

## 2.3 拉伸性能评价

图 8 为增材方向的拉伸性能测试结果,增材制造

沿堆积方向的抗拉强度可达  $207.1 \text{ MPa} \pm 3.2 \text{ MPa}$ ,断后伸长率为  $19.6\% \pm 5.3\%$ 。搅拌针对热塑化材料的搅拌摩擦处理,提高了堆积层与层之间界面结合的致密性。在  $3000 \text{ mm/min}$  的送丝速度下,冷金属过渡增材制造铝合金成形件沿堆积方向的抗拉强度为  $156 \text{ MPa}$ ,延伸率为  $13.9\%$ <sup>[16]</sup>,增材制造工艺成形件中铝合金沿堆积层方向的抗拉强度相比于冷金属过渡增材制造技术提高 34%,断后伸长率提高 41%。连续进给搅拌摩擦增材制造铝合金优质性能成形较冷金属过渡增材制造工艺具有显著的优势。

图 9 为沿堆积方向选区 A 的拉伸断口形貌,从

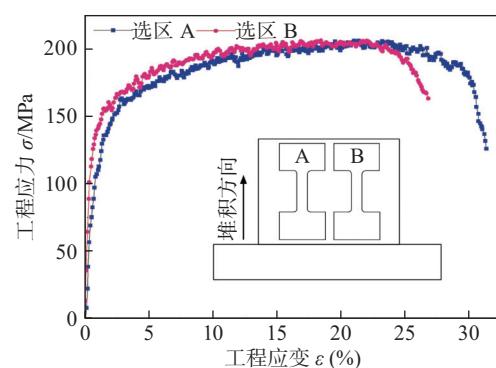
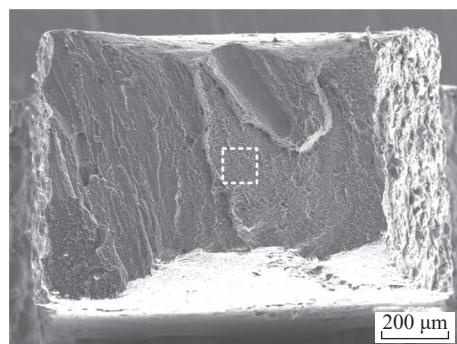
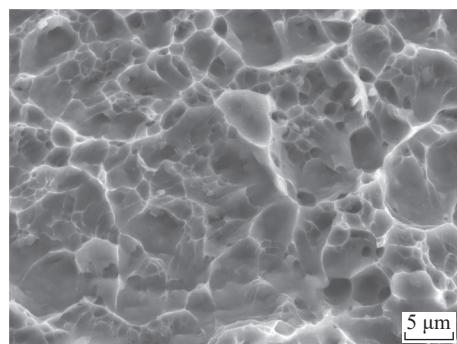


图 8 沿堆积方向的拉伸性能测试结果

Fig. 8 Tensile properties along the stacking direction



(a) 堆积层整体断口形貌



(b) 选区断口形貌

图 9 拉伸断口形貌

Fig. 9 Tensile fracture morphologies. (a) overall fracture morphology of additive layers; (b) fracture morphology of the selected area

沿堆积方向的整体的 SEM 断口形貌来看 (图 9a), 断口表面形貌具有大量的均匀分布的韧窝和局部的撕裂棱组成, 选区断口形貌 (图 9b) 中不存在气孔及裂纹等缺陷, 塑性较好, 表现为典型的韧性断裂模式. 底部的堆积层在多次热循环的影响下, 晶粒组织尺寸较大, 因此会在底部堆积层优先开裂.

### 3 结论

(1) 提出了连续进给搅拌摩擦增材制造方法, 铝合金丝材经由送丝孔进入储料腔, 搅拌头连续热塑化并向下挤压铝合金材料, 搅拌针在堆积层间的搅拌作用有效地提高了堆积层间的界面结合, 成功制备了成形良好的铝合金多层闭环结构件, 各堆积层成形厚度平均为 1.2 mm, 证明了增材制造过程的连续性和稳定性.

(2) 连续进给搅拌摩擦增材制造过程中, 热塑化材料被搅拌头连续剪切并向下挤压, 搅拌针与热塑化材料之间发生相对剪切滑动, 堆积层间界面结合良好, 无沟槽和弱连接等缺陷, 搅拌摩擦增材制造的堆积层各区域均为细小的等轴晶粒.

(3) 增材制造成形件整体的硬度值波动较小, 增材方向的抗拉强度可达  $207.1 \text{ MPa} \pm 3.2 \text{ MPa}$ , 断后伸长率为  $19.6\% \pm 5.3\%$ , 拉伸断口表面中存在大量致密的韧窝, 表现为典型的韧性断裂特征.

### 参考文献

- [1] Liu Z, Zhao D, Wang P, et al. Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 100: 224–236.
- [2] Yang T, Liu T, Liao W, et al. The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 266: 26–36.
- [3] Brice C, Shenoy R, Kral M, et al. Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 648: 9–14.
- [4] 何鹏, 柏兴旺, 周祥曼, 等. MIG 电弧增材制造 6061 铝合金的组织和性能 [J]. 焊接学报, 2021, 43(2): 50–54, 60.  
He Peng, Bai Xingwang, Zhou Xiangman, et al. Microstructure and properties of 6061 aluminum alloy by MIG wire and arc additive manufacturing[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2021, 43(2): 50–54, 60.
- [5] 王帅, 付立铭, 袁勇, 等. NiFe 基合金激光增材制造热裂纹形成机理及调控 [J]. 焊接学报, 2022, 43(5): 8–13.  
Wang Shuai, Fu Liming, Yuan Yong, et al. Mechanism and elimi-  
nation of hot cracks in laser additive manufacturing of NiFe based superalloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(5): 8–13.
- [6] 夏玉峰, 张雪, 廖海龙, 等. 电弧熔丝增材制造钛/铝复合材料的组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2021, 42(8): 18–24.  
Xia Yufeng, Zhang Xue, Liao Hailong, et al. Microstructure and properties of Ti/Al composites materials fabricated by wire and arc additive manufacturing[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2021, 42(8): 18–24.
- [7] Srivastava M, Rathee S, Maheshwari S, et al. A review on recent progress in solid state friction based metal additive manufacturing: friction stir additive techniques[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2019, 44(5): 345–377.
- [8] Meng X, Huang Y, Cao J, et al. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding[J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 115: 100706.
- [9] Zhu H, Dong S, Zhao Y, et al. Strength mismatch mechanism on friction stir welding joint of 7075 aluminum alloy[J]. *China Welding*, 2021, 30(1): 30–36.
- [10] Bararpour S M, Jamshidi A H, Jamaati R. Effect of non-isothermal aging on microstructure and mechanical properties of friction surfaced AA5083-15wt%Zn composites[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 384: 125307.
- [11] He C, Li Y, Zhang Z, et al. Investigation on microstructural evolution and property variation along building direction in friction stir additive manufactured Al-Zn-Mg alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 777: 139035.
- [12] Agrawal P, Haridas R S, Yadav S, et al. Processing-structure-property correlation in additive friction stir deposited Ti-6Al-4V alloy from recycled metal chips[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102259.
- [13] Phillips B J, Mason C J T, Beck S C, et al. Effect of parallel deposition path and interface material flow on resulting microstructure and tensile behavior of Al-Mg-Si alloy fabricated by additive friction stir deposition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 295: 117169.
- [14] Gotawala N, Kumar Mishra N, Shrivastava A. Solid-state depositions of multilayer SS304 by friction stir metal deposition[J]. *Materials Letters*, 2022, 314: 131881.
- [15] Chen H, Chen J, Xu S, et al. Wire-based friction stir additive manufacturing toward field repairing[J]. *Welding Journal*, 2022, 101(9): 249s–252s.
- [16] 王立伟, 武子琴, 胡虎安, 等. 工艺参数对 Al-Si 合金 CMT 增材制造组织和力学性能的影响 [J]. 沈阳大学学报, 2021, 33(1): 1–9.  
Wang Liwei, Wu Ziqin, Hu Hu'an, et al. Effects of process parameters on microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy CMT additive manufacturing[J]. *Journal of Shenyang University*, 2021, 33(1): 1–9.

**第一作者:** 陈会子, 博士研究生; 主要从事搅拌摩擦增材制造研究; Email: chen\_huiz@163.com.

**通信作者:** 黄永宪, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: yxhuang@hit.edu.cn.