

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.04

生物发酵罐叶片电弧增材制造及性能强化 工艺研究

徐荣琪¹, 杨凤琦², 李长鑫³, 李以善², 霍玉双^{1*}

1. 山东建筑大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250101
2. 山东省特种设备检验研究院集团有限公司, 山东 济南 250101
3. 济南法瑞纳焊接器材股份有限公司, 山东 济南 251618

摘要: 生物发酵罐搅拌器可以快速的将罐内液体搅拌均匀, 目前工业生产主要通过铸造及后续焊接等工序完成。基于传统工艺生产叶片, 提出采用电弧增材制造(WAAM)的方式一体化沉积不锈钢叶片, 并利用激光重熔(RM)叶片表面减小表面粗糙度, 随后对 WAAM 和 RM 组织性能进行对比, 优化最后生物发酵罐搅拌器叶片工艺。结果表明: 与传统生产方式制造的叶片对比, WAAM 能一体化沉积出搅拌器叶片, 减少生产工序, 减小焊接会产生应力集中等问题, 加入 RM 不仅可以减小表面粗糙度, 还能够减小组织和性能的“各向异性”, RM 后各个区域的金相显微组织更为均匀, 维氏硬度值均在 200 HV_{0.5} 以上, 有效减小应力集中; 自腐蚀电位均在 -0.35~-0.2 V 间, 自腐蚀电流密度差值减小, 耐蚀性更均匀; 拉伸性能方面, 抗拉强度均在 450 MPa 以上, RM 的拉伸强度和断后伸长率更长, 沿沉积方向的断后伸长率大于垂直于沉积方向的断后伸长率, 总之 RM 让生物发酵罐搅拌器叶片的各个区域性能更均匀。

关键词: 搅拌器叶片; 电弧增材制造; 316L 不锈钢; 激光重熔

中图分类号: TG441 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0034-07

Research on Arc Additive Manufacturing and Performance Enhancement of Impeller Blades for Bioreactors

XU Rongqi¹, YANG Fengqi², LI Changxin³, LI Yishan², HUO Yushuang^{1*}

1. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China
2. Shandong Special Equipment Inspection Institute Group Company Limited, Ji'nan 250101, China
3. Jinan Farina Welding Equipment Company Limited, Ji'nan 251618, China

Abstract: The stirring device of the bioreactor could rapidly mix the liquid inside the tank evenly. At present, the industrial production of the stirring device is mainly completed through casting and subsequent welding processes. Based on the traditional manufacturing process of blades, a method of using wire arc additive manufacturing (WAAM) to deposit stainless steel blades in an integrated manner was proposed. Laser remelting (RM) was then applied to the surface of the blades to reduce surface roughness. Subsequently, the microstructure and properties of WAAM and RM were compared to optimize the final process of the bioreactor stirring device blades. The results showed that compared with the blades manufactured by the traditional method, WAAM could deposit the stirring device blades in an integrated manner, reducing production processes and stress concentration caused by welding. The addition of RM not only reduced surface roughness but also decreased the "anisotropy" of microstructure and properties. After RM, the metallographic microstructure in each area was more uniform, and the Vickers hardness value was above 200 HV_{0.5}, effectively reducing stress concentration. The self-corrosion potential

收稿日期: 2025-09-17 修回日期: 2025-10-13

基金项目: 山东省重点研发计划(2024TGC0066); 山东省重点研发计划(2022SFGC0105)

作者简介: 徐荣琪(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事电弧增材制造方向的研究。

通讯作者: 霍玉双(1973—), 女, 博士, 副教授, 主要从事焊接数值模拟等方面的研究。E-mail: hys6789@126.com。

was between -0.35 V and -0.2 V , and the difference in self-corrosion current density was reduced, resulting in more uniform corrosion resistance. In terms of tensile properties, the tensile strength was above 450 MPa for all samples. The tensile strength and elongation after fracture of RM were higher. The elongation after fracture along the deposition direction was greater than that perpendicular to the deposition direction. In summary, RM made the properties of different regions of the bioreactor agitator blades more uniform.

Keywords: impeller blade; wire-arc additive manufacturing; 316L stainless steel; laser remelting

引用格式:徐荣琪,杨凤琦,李长鑫,等.生物发酵罐叶片电弧增材制造及性能强化工艺研究[J].电焊机,2026,56(5):34–40.
Citation:XU Rongqi, YANG Fengqi, LI Changxin, et al. Research on Arc Additive Manufacturing and Performance Enhancement of Impeller Blades for Bioreactors[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 34–40.

0 引言

电弧增材制造(WAAM)作为制造业可持续智能发展的一个方向,能够逐层高效地沉积零件^[1]。相较于激光增材制造(LAM)和电子束增材制造(EBAM),WAAM在效率、成本和设计灵活性方面更具优势,尤其适合大型复杂构件的制造^[2–4]。WAAM中存在尺寸精度低、表面质量差的问题主要通过优化工艺参数解决,如:沉积速度、沉积电流和电流模式等,这些参数通过改变熔宽和熔深影响焊缝宏观形貌和成形质量^[5–8]。但WAAM存在表面粗糙度大、内部晶粒粗大问题,制约其高精度应用。激光重熔工艺具有能量密度高、热输入可控的优势,能够有效改善WAAM表层粗糙度并细化晶粒,为提升构件性能提供方案^[9–10]。生物发酵罐用于微生物培养和生物发酵过程,其搅拌器叶片通过铸造、焊接等多道工序生产,在罐内起到搅拌混合、促进溶解、传质传热等关键作用,确保发酵过程高效稳定^[11–12]。从实际生产数据来看,通过传统工艺制备的叶片显微硬度在 $140\sim190\text{ HV}_{0.5}$,抗拉强度在 $480\sim620\text{ MPa}$,电化学测试的自腐蚀电流密度在 $1\times10^{-7}\sim9\times10^{-7}\text{ A}\cdot\text{cm}^2$ 间,工作中易产生腐蚀失效、断裂失效、磨损失效等^[13–16]。

基于以上研究现状,本研究计划利用WAAM的方式沉积生物发酵罐搅拌器叶片,设计沉积路径,旨在沉积出表面形貌良好的一体化316L生物发酵罐搅拌器三叶片,简化生产工序。后续设计强化工艺,利用激光清洗表面并对其进行重熔,对比传统工艺制造叶片的性能,以期达到与其性能相符甚至更优的叶片。

1 试验方法

研究中的主要设备包括MAG-360Pro弧焊焊机、变位机、机器人机械臂、控制箱,实验中保护气体为 $98\%\text{Ar}+2\%\text{CO}_2$ 。使用碳钢板材作为基板,直径为 1.2 mm 的316L不锈钢焊丝作为填充材料,进行电弧MAG增材生物发酵罐搅拌器叶片。为保证每次起弧熄弧沉积两层以保证叶片与轴之间性能良好,起弧和熄弧选择在生物发酵罐搅拌器叶片端部,每两层的沉积路径如图1所示。通过预实验确定的沉积和性能强化工艺参数如表1、表2所示。拉伸试验按照GB/T 228.1—2021标准,取垂直于沉积

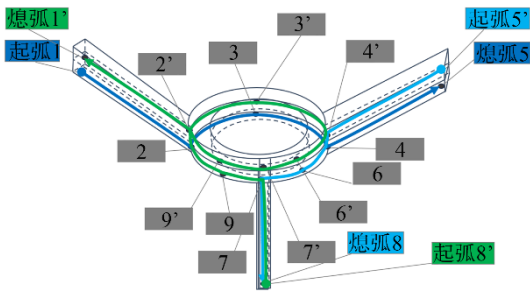


图 1 沉积路径
Fig. 1 Deposition path

表 1 沉积工艺参数

Table 1 Deposition process parameters				
起弧电流	熄弧电流	沉积电压	沉积速度	停留时间
/A	/A	/V	/(mm·s ⁻¹)	/s
90	100	19	7	120

表 2 激光工艺参数

Table 2 Laser process parameters				
工艺	激光功率	摆动振幅	扫描速度	摆动频率
	/W	/mm	/(mm·s ⁻¹)	/Hz
激光清洗	400	30	10	60
激光重熔	900	7	10	30

方向和沿沉积方向的拉伸样,拉伸样尺寸如图2所示,拉伸完成后对试样进行清洗干燥后利用扫描电镜观察断口形貌,使用ImageJ软件测量并计算平均韧窝直径。

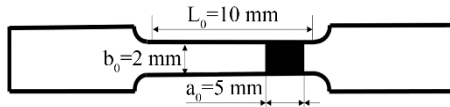


图2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Dimensions of the tensile test specimen

2 试验结果及分析

2.1 宏观形貌和金相显微分析

WAAM沉积后的生物发酵罐搅拌器叶片宏观形貌见图3,叶片高度 $h=47.5$ mm,厚度 $\delta=5.5$ mm,直径 $D=286.0$ mm;沉积件表面成形质量良好,有较少的飞溅颗粒产生附着在叶片侧壁,而叶片端部飞溅较多。后续选择进行激光清洗和激光重熔工艺性能强化,激光器行走策略、试样选取如图4所示,激光清洗后,叶片表面附着的氧化物和黑色灰尘均被清理,露出光亮的金属光泽和被灰尘覆盖黏着在叶片侧壁表面的细小飞溅,而飞溅和沉积层连接处由每层焊缝重熔补充,表面形貌明显改善。

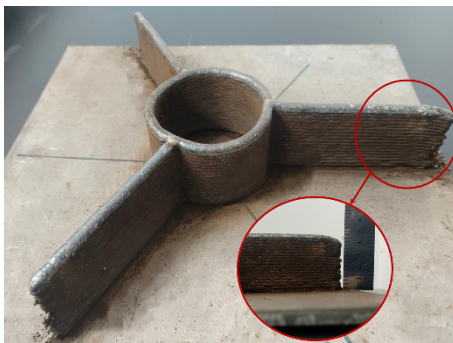


图3 WAAM三叶片宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of the WAAM three-blade

WAAM和RM后放大200倍金相显微组织如图5所示,三个区域的组织均呈现为典型的等轴状晶和柱状晶组织,且无裂纹、气孔等缺陷,组织中白色基体均为奥氏体A,伴有少量的铁素体F和珠光体P。相对其他区域,Right中铁素体较多,易使沉积件的强度和硬度降低。Left区域的RM态组织相对于WAAM态柱状晶相对较多,晶粒也相对粗大。

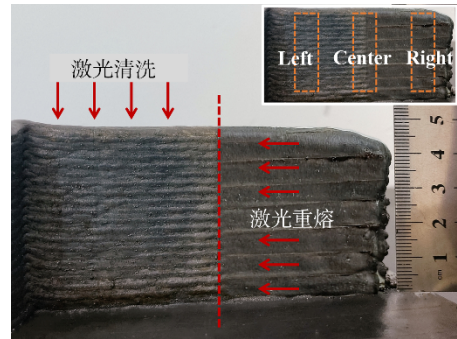
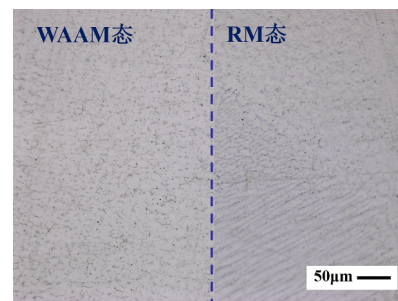
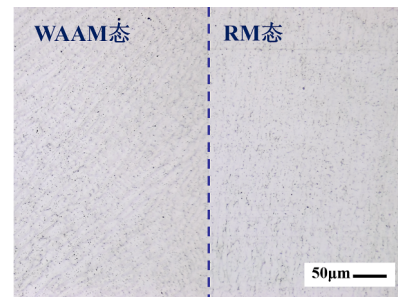


图4 性能强化后叶片侧壁表面形貌

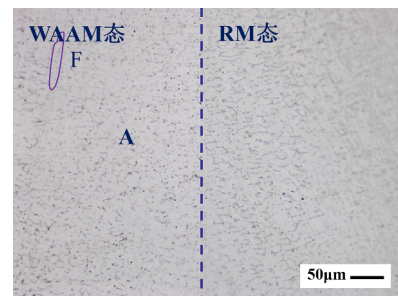
Fig. 4 Surface morphology of blade sidewall after performance enhancement



(a) 试样 Left



(b) 试样 Center



(c) 试样 Right

图5 不同区域的显微组织

Fig. 5 Microstructure of different regions at 200× magnification

2.2 显微硬度测试

本显微维氏硬度测试实验设置500 gf的加载力,15 s的保荷时间,在每个试样上均匀选取80个点,分别测量硬度分布区间如图6所示,WAAM态

和RM态硬度均分布在205~228 HV_{0.5},通过传统工艺制备的叶片显微硬度在140~190 HV_{0.5},相对于传统制造工艺,维氏显微硬度有所提高^[14]。在WAAM态下硬度随着叶片内侧向外侧逐渐变小,而RM态下硬度相对均匀,推测由于沉积时反复经过Left附近,将冷却的熔池反复熔化,引起马氏体相变,同时抑制晶粒长大,而完全冷却后激光器沿水平方向重熔,将Left区域“回火”软化,导致晶粒粗大,硬度下降;沉积时经过Right区和Center区,靠近叶片端部冷却速度较快,部分奥氏体转变为珠光体,硬度较低,重熔后金属再次熔化,原组织再次奥氏体化,硬度升高。总之,WAAM新工艺制造生物发酵罐搅拌器叶片硬度比传统工艺制造的生物发酵罐搅拌器叶片硬度大,通过RM使WAAM硬度分布更均匀。

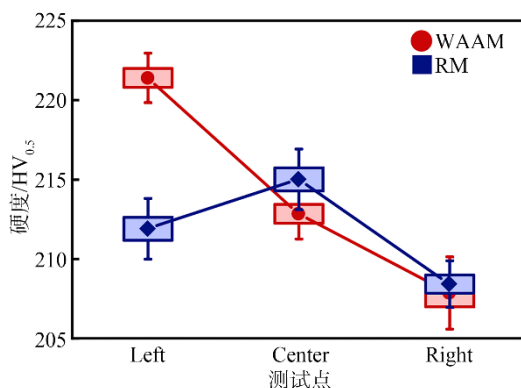
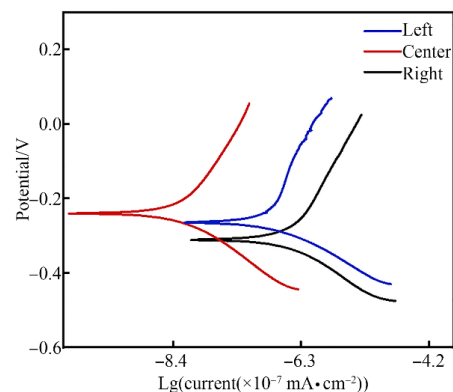


图6 激光清洗和激光重熔硬度分布区间

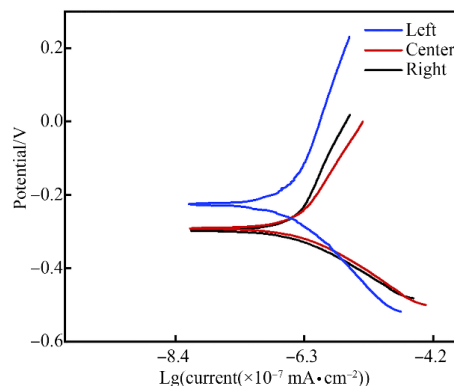
Fig. 6 Hardness distribution range of laser cleaning and laser remelting

2.3 耐蚀性测试

利用热电偶将试样与电线进行电焊连接,再先后用绝缘胶带和环氧树脂AB胶进行密封,制备裸露面积为10 mm×10 mm的电化学腐蚀试样,测试中采用L型工作电极摆放方式,甘汞电极做参比电极,汞电极做对比电极,选用3.5 wt.%的NaCl溶液作为腐蚀介质。由于不同的生物发酵罐搅拌器有不同工作温度,选择分别在常温26℃和高温70℃下进行耐蚀测试,加热时使用恒温磁力搅拌器,各区域测得的Tafel如图7、图8所示。与“铸造+焊接”的制造工艺相比,“WAAM”和“WAAM+RM”制造工艺测得的自腐蚀电流密度大致相同,耐蚀性也趋于一致^[16]。同在WAAM下,叶片中心区域Center区常温下自腐蚀电位(Corrosion Potential, E_{corr})最高,腐



(a) 26 °C 下不同区域 Tafel 曲线

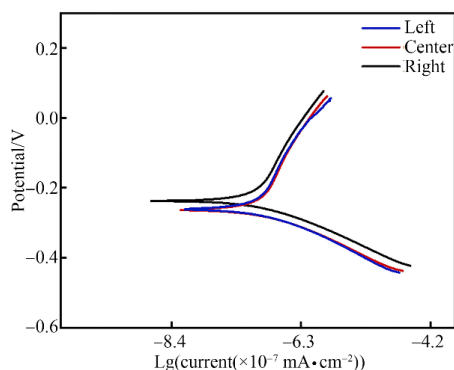


(b) 70 °C 下不同区域 Tafel 曲线

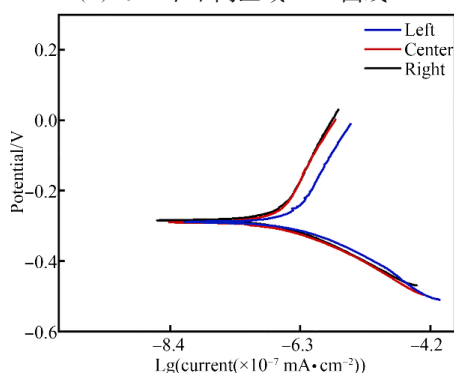
图7 WAAM态不同温度 Tafel 曲线

Fig. 7 Tafel curves of the as-WAAM state at different temperatures

蚀电流密度偏小,耐腐蚀能力更强,左侧Left区和右侧Right区的自腐蚀电流密度(Corrosion current density, I_{corr})相近,但左侧 E_{corr} 更高,左侧的耐腐蚀能力也更好,三者耐蚀能力排序大概为:Center_{WAAM 常温}>Left_{WAAM 常温}>Right_{WAAM 常温};进行高温耐腐蚀测试发现,中心区耐蚀能力下降,左侧和右侧耐蚀能力有所增强,耐腐蚀能力排序大概为:Left_{WAAM 高温}>Center_{WAAM 高温}≈Right_{WAAM 高温};说明在高温环境下耐腐蚀情况相近,叶片不易在高温工作时发生局部腐蚀。图8为在WAAM基础上重熔后不同温度下各区域耐腐蚀情况,对比WAAM各温度下的Tafel发现,各个温度下不同区域的 E_{corr} 和自腐蚀电流密度差距减小了,常温下耐腐蚀能力排序大概为:Right_{RM 常温}>Center_{RM 常温}≈Left_{RM 常温},高温下耐腐蚀能力排序大概为:Right_{RM 高温}≈Center_{RM 高温}>Left_{RM 高温};相对于常温时,高温环境下耐腐蚀能力基本不变,三个区域的耐腐蚀能力趋向均匀,说明RM下,高温工作环境也不易发生局部腐蚀。对常温、高温下WAAM和RM



(a) 26 °C下不同区域 Tafel 曲线



(b) 70 °C下不同区域 Tafel 曲线

图8 RM态不同温度 Tafel 曲线

Fig8 Tafel curves of the RM state at different temperatures

不同区域的数据进行拟合处理,计算所得 E_{corr} 如表3所示, E_{corr} 均在 $-0.2\sim-0.35$ V间,各区域和温度的变化对 E_{corr} 影响不大。

各个参数下的 I_{corr} 值如图9所示,可以看出,相对于WAAM, RM各个测试点 I_{corr} 较为均匀,随着温度上升,WAAM测试点 I_{corr} 均下降、RM测试点 I_{corr} 均有升降, I_{corr} 最大的测试点为R-26 °C, $I_{\text{corr R-26}^{\circ}\text{C}}=5.3\times 10^{-7} \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,动载状态下电荷转移快,腐蚀速率快,耐蚀性差; I_{corr} 最小测试点为C-26 °C, $I_{\text{corr C-26}^{\circ}\text{C}}=6.8\times 10^{-9} \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,动载状态下电荷转移慢,腐蚀速率慢,耐蚀性最好。因此,26 °C、70 °C下RM耐腐蚀性能更好,高温工作对叶片耐腐蚀情况影响不大。

2.4 拉伸性能测试

拉伸过程的加载速率为1 N/s,各个拉伸件抗拉强度和断后伸长率如图10所示,WAAM、WAAM+RM、铸造+焊接工艺的抗拉强度分别为456.872~482.9 MPa、631.529~706.009 MPa、480~620 MPa^[15]。相比于“铸造+焊接”工艺,通过“WAAM”工艺制造的叶片抗拉强度较低,但“WAAM+RM”制造的叶片

表3 WAAM和RM各区域电化学腐蚀数据

Table 3 Electrochemical corrosion data for each zone in WAAM and RM

工艺	R-26°C	C-26°C	L-26°C	R-70°C	C-70°C	L-70°C
WAAM- E_{corr} /V	-0.311	-0.239	-0.265	-0.297	-0.291	-0.250
RM- E_{corr} /V	-0.237	-0.263	-0.261	-0.284	-0.290	-0.289
WAAM- I_{corr} /($\times 10^{-7} \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	5.3	0.068	1.8	2.53	3.7	1.43
RM- I_{corr} /($\times 10^{-7} \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0.985	1.25	1.03	1.01	4.96	0.705

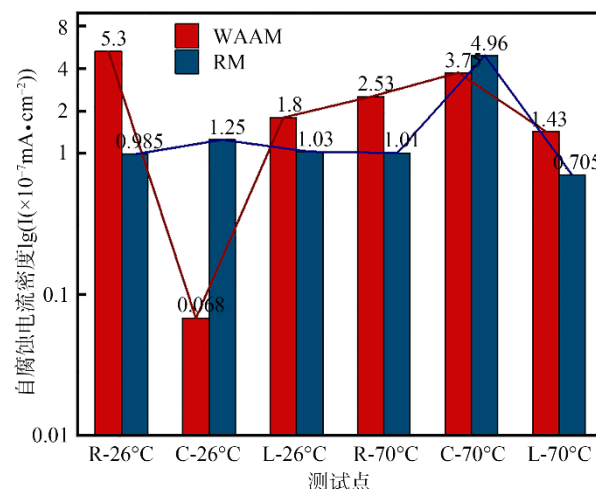


图9 WAAM和RM在不同温度下各区域自腐蚀电流密度

Fig. 9 Autogenous corrosion current densities in each zone for WAAM and RM at various temperatures

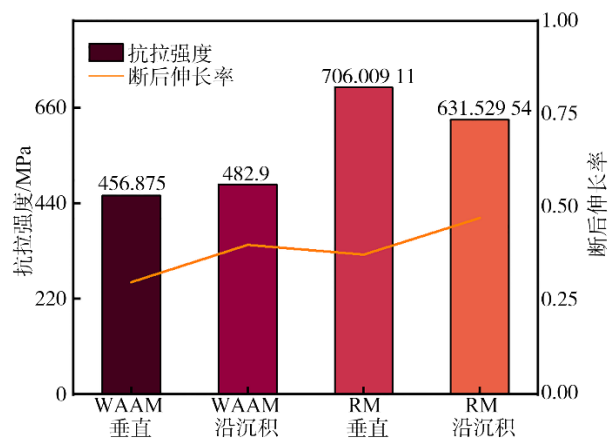


图10 各个拉伸件抗拉强度和断后伸长率

Fig. 10 Tensile strength and elongation after fracture of each tensile sample

抗拉强度较传统工艺制造的抗拉强度明显提高。通过对比“WAAM”和“WAAM+RM”可以直观地观察到,WAAM的抗拉强度均低于RM的抗拉强度, RM使叶片的抗拉强度显著提升,断后伸长率也有

所增加,且WAAM态和RM态沿沉积方向的断后伸长率均高于垂直于沉积方向的断后伸长率。综上, RM会提高生物发酵罐搅拌器叶片的抗拉强度和断后伸长率,且RM后垂直于沉积方向的抗拉强度显著提高,改善了WAAM态垂直方向易断的风险。

拉伸后各个状态和方向的SEM显微形貌组织如图11所示。WAAM工艺下,沿沉积方向加载的试样(见图11b)呈现等轴韧窝(平均韧窝直径 $\bar{d}_b=6.8\text{ }\mu\text{m}$);而沿垂直于沉积方向加载的试样(见图11a)则形成长轴比约为3的拉长韧窝,这一现象表明存在方向诱导的塑性各向异性。RM处理后,两种方向间的差异几乎消失:两类试样均呈现等轴韧窝,但由于晶粒细化作用,垂直于沉积方向的平均韧窝尺寸(见图11c, $\bar{d}_c=4.9\text{ }\mu\text{m}$)略小于沿沉积方向的平均韧窝尺寸(见图11d, $\bar{d}_d=5.7\text{ }\mu\text{m}$)。对比相同方向的试样可知,RM使韧窝尺寸减小约30%,并消除了解理面,这一结果证明叶片的韧性和组织均匀性得到了提升。

3 结论

研究主要利用WAAM的方式沉积生物发酵罐叶片,相对于传统“铸造+焊接”的方式生产零件,此工艺可以简化生产工序,可以增大生物发酵罐搅拌器叶片的硬度,且保持耐蚀性基本不变,抗拉强度也有小幅度的提升。对于小批量大零件的搅拌器叶片,可以减小生产成本。

(1)采用WAAM有效简化了传统“铸造+焊接”制造的生物发酵罐搅拌器的工艺流程,节约了制造成本。

(2)通过加入激光清洗和激光重熔的性能强化工艺,对增材制造的搅拌器叶片进行了扫描,有效降低了成型叶片的表面粗糙度,显微组织和显微硬度值更均匀。

(3)在常温26℃和高温70℃下,RM态下的耐蚀性会有所下降,但各区域的耐腐蚀情况偏向均匀,高温不会对叶片的耐蚀性有很大的影响,叶片端部和内部的耐蚀性均较好。

(4)RM态使生物发酵罐搅拌器叶片抗拉强度显著增大,断后伸长率也有所增加,垂直于沉积方

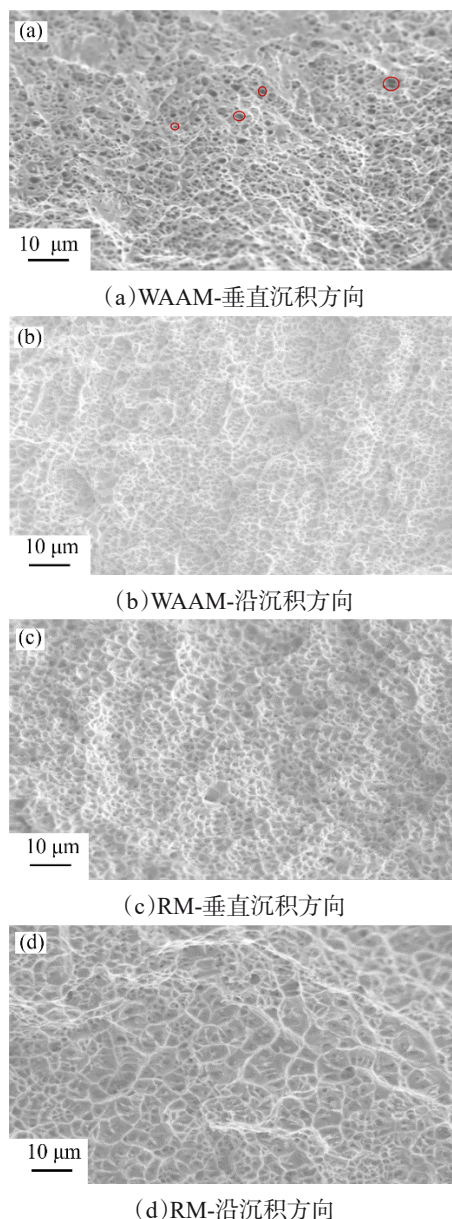


图11 各个状态和方向拉伸后SEM微观形貌

Fig. 11 SEM micro-morphologies after tensile testing of specimens in different conditions and orientations

向的叶片更不易断裂,叶片的韧性和组织均匀性也得到了提升,解决了利用传统工艺制造叶片中叶片内侧垂直与沉积方向易断裂的情况。

参考文献:

- [1] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
ZHOU J. Intelligent Manufacturing——Main Direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.

- [2] 余圣甫,禹润缜,何天英,等. 电弧增材制造技术及其应用的研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(03): 198–209.
- YU S F, YU R Z, HE T Y, et al. Wire Arc Additive Manufacturing and Its Application: Research Progress [J]. Materials China, 2021, 40(03): 198–209.
- [3] 赵淘,闫朝阳,蒋凡,等. 电弧增材制造轨迹及工艺规划研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53(02): 12–23.
- ZHAO T, YAN C Y, JIANG F, et al. Research Progress of Trajectory and Process Planning in Wire Arc Additive Manufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(02): 12–23.
- [4] 范剑超,霍玉双,樊海卫. 工艺参数对电弧增材制造成形质量的影响[J]. 山东建筑大学学报, 2022, 37(05): 105–111.
- FAN J C, HUO Y S, FAN H W. Influence of process parameters on forming quality of Wire and Arc Additive Manufacturing [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2022, 37(05): 105–111.
- [5] 尹凡. 不锈钢电弧增材制造成形工艺研究及尺寸精度控制[D]. 南京:南京理工大学, 2017.
- YIN F. The research on process parameters and size control of arc additive manufacturing for stainless steel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [6] 姜淑馨,李峰光. 工艺参数对H13钢电弧增材制造成形品质的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(5): 642–646.
- JIANG S X, LI F G. Influence of Process Parameters on Forming Quality of H13 Steel by WAAM [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5): 642–646.
- [7] 赵孝祥,孙策,叶福兴,等. MIG焊参数及路径对增材制造熔敷层尺寸的影响[J]. 焊接, 2016(04): 33–36.
- ZHAO X X, SUN C, YE F X, et al. Effect of MIG welding parameters and trajectory on layer geometry shape in additive manufacturing [J]. Welding & Joining, 2016(04): 33–36.
- [8] 林泓延,黄舒薇,姚屏,等. 工艺参数对机器人电弧增材制造成形的影响研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(04): 100–106.
- LIN H Y, HUANG S W, YAO P, et al. Influence of Process Parameters on Robot Wire and Arc Additive Manufacturing Forming [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(04): 100–106.
- [9] 王静. 重熔工艺对电弧增材成形件性能的影响研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2024.
- WANG J. Study on the effect of remelting process on the properties of arc additive molded parts [D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2024.
- [10] 李强,刘送永,王庆阳. 选择性激光熔化成形(SLM)增材制造重熔次数对316L构件表面粗糙度及磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2024, 37(02): 170–181.
- LI Q, LIU S Y, WANG Q Y. Effect of Number of Remelting Times on Surface Quality and Wear Performance of 316L Produced by Selective Laser Melting [J]. China Surface Engineering, 2024, 37(02): 170–181.
- [11] 陈晨,陈鸿飞. 生物发酵罐关键参数及质量控制方法研究[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(12): 85–87.
- CHEN C, CHEN H F. Study on Key Parameters and Quality Control Methods of Biological Fermentation Tank [J]. Metrology & Measurement Technique, 2021, 48(12): 85–87.
- [12] Gaikwad V, Panghal A, Jadhav S, et al. Design Schematics, Operational Characteristics and Process Applications of Bioreactors [J]. Microbes in the Food Industry, 2023: 217–247.
- [13] Chmelko V, Margetin M, Zetková I, et al. Analysis of Static and Cyclic Properties of 316L and AlSi10Mg in Conventional Casting and Additive Manufacturing [J]. Materials, 2024, 17(23): 5861–5861.
- [14] 赵媛,刘恩泽,谭政,等. 不同碳含量铸态316L不锈钢的组织性能研究[J]. 有色矿冶, 2024, 40(1): 35–37.
- ZHAO Y, LIU E Z, TAN Z, et al. Study on Microstructure and Properties of Cast 316 L Stainless Steel with Different Carbon Contents [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 35–37.
- [15] Sumanariu A C, Amza G C, Baciú F, et al. Comparative Analysis of Mechanical Properties: Conventional vs. Additive Manufacturing for Stainless Steel 316L [J]. Materials, 2024, 17(19): 4808–4808.
- [16] 邹泽坤. 316L不锈钢腐蚀行为电化学研究及腐蚀演化数值模拟[D]. 银川:宁夏大学, 2022.
- ZOU Z K. Electrochemical research on corrosion behavior of 316 stainless steel and numerical simulation of corrosion evolution [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.