

搅拌针形貌与旋向对中空铝型材FSW接头成形的影响研究

鲁二敬¹, 杨鑫华², 钮旭晶¹, 侯振国¹, 郁志凯¹

1. 中车唐山机车车辆有限公司 河北唐山 064000

2. 大连交通大学 辽宁大连 116000

摘要: 采用左右旋螺纹搅拌针对6005A-T6铝合金型材进行搅拌摩擦焊接, 研究了搅拌针螺纹旋向及主轴旋转方向对焊接缺陷的影响。通过ABAQUS建立搅拌摩擦焊接多场耦合计算模型, 模拟并分析了搅拌摩擦焊接过程中焊核区塑性材料的流动与焊接缺陷的形成。结果表明: 仿真结果与试验结果数据吻合较好, 对于焊缝内部的孔洞类缺陷, 模拟的可靠度较高; 在轴肩螺纹保持不变的情况下, 右旋螺纹搅拌针可以获得无焊接缺陷的高质量焊接接头, 而左旋螺纹搅拌针焊接所得焊接接头在接头底部产生孔洞缺陷, 且在更换主轴旋转方向后, 位于焊核区底部的孔洞缺陷变大。通过数值计算预测左旋螺纹搅拌针在不同焊接工艺条件下均无法获得无孔洞缺陷的焊接接头。

关键词: 螺纹旋向; 旋转方向; 搅拌摩擦焊; 缺陷

Study on the influence of stirrer geometry and rotation direction on the formation of hollow aluminum extrusion FSW joints

LU Erjing¹, YANG Xinhua², NIU Xujing¹, HOU Zhenguo¹, YU Zhikai¹

1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 064000, Hebei, China

2. Dalian Jiaotong University, Dalian 116000, Liaoning, China

Abstract: The left and right thread stirring was used to carry out friction stir welding of 6005A-T6 aluminum alloy profiles, and the influence of the thread rotation direction of the stirring needle and the rotation direction of the spindle on the welding defects was studied. A multi-field coupling calculation model of friction stir welding was established by ABAQUS, and the flow of plastic materials in the weld nugget zone and the formation of welding defects in the friction stir welding process were simulated and analyzed. The results show that the simulation results are in good agreement with the test results, and the reliability of the simulation is high for the hole defects inside the weld. Under the condition that the shoulder thread remains unchanged, the right-handed thread stir pin can obtain

基金项目: 河北省科技重大专项: 轨道车辆关键部件增材与修复技术研究及应用示范(24292202Z)。

第一作者: 鲁二敬, 中车技术专家, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事轨道车辆搅拌摩擦焊及固相增材修复技术研究工作,

E-mail: 013600064402@crrecg.cc。

a high-quality welded joint without welding defects, while the welded joint welded by the left-hand thread stir pin produces a hole defect at the bottom of the joint, and the hole defect at the bottom of the nugget area becomes larger after changing the spindle rotation direction. Numerical calculations were used to predict that the left-handed threaded stirring needle could not obtain a welded joint without hole defects under different welding process conditions.

Keywords: thread rotation direction; direction of rotation; friction stir welding; defect

1 序言

搅拌摩擦焊（FSW）作为一种先进的绿色环保固态焊接方法，拥有焊接热输入量小、接头性能强度高、残余应力小、无需填充材料及焊接效率高等优点，已广泛应用于轻轨、地铁、城际列车及高速列车车体制造过程中^[1-3]。

搅拌针的结构设计是至关重要的环节，在焊接过程中，焊核一直处于高度波动状态，搅拌针的尺寸及轮廓会影响搅拌金属的搅拌能力及流动行为，从而影响焊缝的外观和接头的力学性能，其中螺纹的结构形貌是关键因素之一。

对于搅拌摩擦焊而言，影响焊缝形成的关键环节是焊接参数及工具的设计，焊接工艺不当或焊接工具设计不合理，均会直接或间接影响塑性金属的流动性，从而引起焊接缺陷的产生^[4]。因此，如何实现可靠预测和控制焊接缺陷，亟需深入开展搅拌摩擦焊过程中塑性金属的流动行为研究。欧拉-拉格朗日耦合（CEL）方法不仅可以解决大变形问题，而且可以精确描述物质边界等问题，是研究搅拌摩擦焊接材料流动较为理想的模拟方法^[5, 6]。

本研究采用左旋螺纹锥形搅拌针与右旋锥形螺纹搅拌针进行搅拌摩擦焊接试验，研究搅拌针螺纹旋向及主轴旋转方向对焊接缺陷的影响，并采用欧拉-拉格朗日耦合（CEL）方法建立搅拌摩擦焊接多场耦合计算模型，通过模型探索搅拌摩擦焊接过程中金属的流动及焊缝缺陷的产生过程。

2 试验方法

本试验在FSW-LM-AM16搅拌摩擦焊接设备上。进行。试验所用母材为4mm厚的6005A-T6铝合金型材。搅拌针采用三螺旋轴肩形貌，右旋螺纹搅拌针如图1所示。同时，制作了左旋搅拌针（轴肩形貌不变，搅拌针螺纹相反）。试验用焊接参数见表1。



图1 右旋螺纹搅拌针

焊后选取不同焊接参数下的焊接接头制成金相试样，对金相进行腐蚀处理后，观察焊接接头成形情况，重点观察界面缺陷形态并进行分析。

表1 试验用焊接参数

编号 /	焊接速度 / (mm/min)	旋转速度 / (r/min)	压入量 /mm	前倾角 / (°)	主轴旋转方向	搅拌针螺纹旋向
1	1100	1500	0.3	1.5	逆时针	右旋
2	1100	1500	0.3	1.5	逆时针	左旋
3	1100	1500	0.3	1.5	顺时针	右旋

3 多场耦合的有限元模型

3.1 几何模型

本文根据焊接过程中使用的单轴肩搅拌针进行建模，搅拌针轴肩直径为20mm，内凹轴肩，搅拌针长4.8mm。为方便体现搅拌针螺纹细节对铝合金型材进行简化处理，尺寸为长度300mm、宽度150mm。模型中搅拌针设定为拉格朗日体，工件选取为欧拉体，工件与搅拌针的几何模型如图2所示。

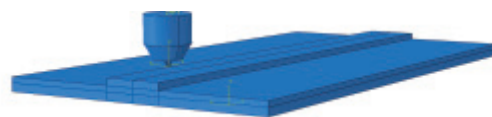


图2 工件与搅拌针的几何模型

3.2 材料模型

本研究的材料为6005A-T6铝合金型材，搅拌针为H13钢。由于搅拌针所使用的材料强度远大于工件强度，因此在模型中将搅拌针定义为刚体。对于焊接材料，本文基于Johnson-Cook本构模型来表征6005A-T6铝合金的流变应力与应变、应变速率与温度之间的函数关系，即

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right]$$

式中 σ ——等效应力 (MPa) ;
 ε ——等效塑性应变;
 $\dot{\varepsilon}$ ——等效塑性应变速率 (s^{-1}) ;
 $\dot{\varepsilon}_0$ ——参考应变速率 (通常取 1s^{-1}) ;
 A 、 B 、 C ——材料常数;
 n ——硬化指数;
 m ——材料温度指数;
 T ——环境温度 ($^{\circ}\text{C}$) ;
 T_{room} ——参考温度 ($^{\circ}\text{C}$) ;
 T_{melt} ——材料的熔点温度 ($^{\circ}\text{C}$) [7]。

对于6005A-T6铝合金而言，J-C模型中的材料参数见表2。

表2 6005A-T6铝合金J-C模型中的材料常数

A /MPa	B /MPa	C	m	n	T_{room} / $^{\circ}\text{C}$	T_{melt} / $^{\circ}\text{C}$
234	130	0.002	1.34	0.42	24	600

3.3 边界条件

(1) 热边界条件 搅拌摩擦焊接过程中工件的热传递形式主要有热传导、热对流和热辐射。其中，自然对流和表面对环境辐射均从板上带走了热量，因此需添加散热边界条件。经多次调试，选用 $20\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 作为工件和空气间总换热系数。在实际焊接过程中，垫板起刚性支撑作用，直接与工件接触，也发生接触换热。而接触换热是一个受温度差异、压力、表面粗糙度和导热性能等多因素影响的复杂过程。本文对接触换热进行简化，以对流换热为参考，通过多次测试，选用 $500\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 作为换热系数。

(2) 载荷及边界条件 为避免工件在焊接过程中发生偏转位移等，通常采用夹具固定工件。在有限元模型中对夹具进行简化，采用边界条件对工件底部和侧面的自由度进行约束，防止焊接过程中工

件发生移动。本文中参考点定义为搅拌针的上端面与轴线的相交点，通过控制参考点来控制搅拌针的旋转和运动，模拟焊接过程中的下扎和焊接过程。

3.4 网格划分

依据工件和搅拌针几何结构特点，选取八节点六面体欧拉单元 (EC3D8RT) 对工件实行网格划分。在确保模拟计算精度的基础上，对焊缝附近网格进行加密，而远离焊缝区域则保持稀疏网格。同时，选取四节点刚体单元 (C3D4) 对搅拌针网格展开划分。

4 结果与讨论

4.1 模型准确性评估

在金属成形中，大部分内能是由塑性变形引起的，当系统中的动能和内能比率 < 0.05 时，认为成形过程是准静态的。为确认是否已获得可信赖的模型方案，本文采用将动能和内能进行比较的方法。模型模拟的动能与内能比率特征曲线如图3所示。由图3可见，曲线在始焊阶段，动能和内能比率较大，这可能是由于搅拌针与工件初期创建连接关系导致的。但在建立起稳定的接触关系之后，动能和内能比率无限接近于0，表明数据分析过程满足准静态，即本文所建立的模型具有一定可靠性。

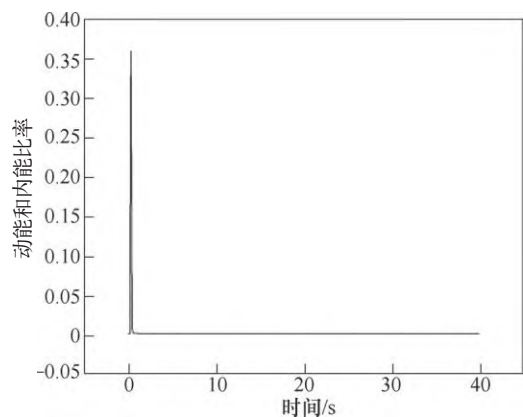
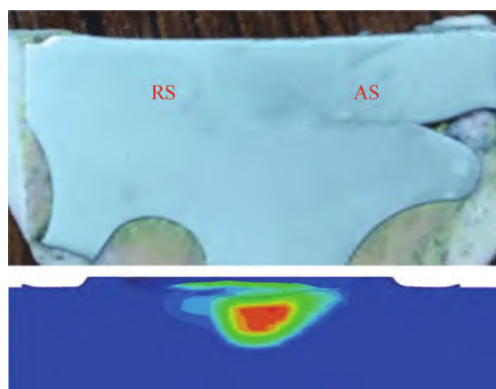


图3 模拟过程材料的动能与内能比率

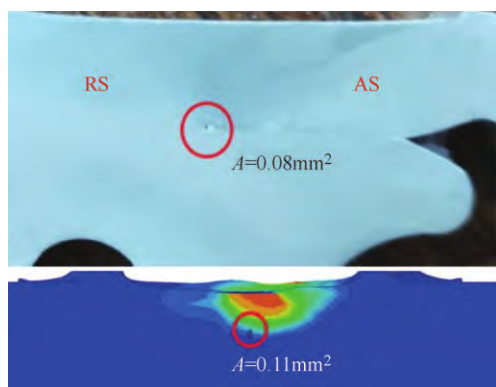
4.2 搅拌针螺纹旋向对焊接缺陷的影响

焊接参数保持不变，采用不同的搅拌针螺纹旋向，研究搅拌针螺纹旋向对焊接缺陷的影响，并得到不同螺纹旋向搅拌针焊缝区域的等效塑性应变仿真结果，如图4所示。由图4可知，采用右旋螺纹搅拌针所得焊接接头无焊接缺陷产生；而采用左旋螺纹搅拌针所得焊接接头前进侧底部出现较小的孔洞

缺陷。图4下部分为焊缝区域等效塑性应变仿真结果，由此得出该模型可以实现塑性应变区缺陷形貌较为准确的预测。在右旋螺纹搅拌针模拟所得结果中，塑性应变区无焊接缺陷生成；而在使用左旋螺纹搅拌针模拟所得结果中，塑性应变中搅拌针端部附近产生孔洞缺陷，且该缺陷位置与试验所得缺陷位置相吻合。从搅拌针结构来说，搅拌针轴肩处的螺线会在逆时针旋转过程中驱动表层塑性金属材料向搅拌针运动。而搅拌针表面螺线会驱动焊核区塑性金属沿板厚方向流动，螺线方向会改变塑性金属的受力状态与流动状态，进而影响焊核区的最终成形质量。右旋螺纹（逆时针旋转）使焊接过程中搅拌针周边塑性金属向下流动，迫使搅拌针端部充满塑性金属，因此不会形成焊接缺陷。左旋螺纹（逆时针旋转）使搅拌针周边塑性金属向上流动，迫使轴肩附近塑性金属发生挤压而向下流动，但塑性金属在厚度方向流动不充分，因此在焊核区底部形成孔洞缺陷。



a) 右旋螺纹搅拌针



b) 左旋螺纹搅拌针

图4 螺纹旋向对焊接缺陷的影响及焊缝区域的等效塑性应变仿真结果

图5所示为焊接孔洞缺陷的形成过程。从图5a

可看出，在焊接缺陷形成之前塑性金属材料围绕搅拌针进行运动，材料会在搅拌针的作用下发生向下迁移，此时无焊接缺陷的生成。从图5b可看出，当搅拌针向前运动时，金属被带动到前方，而在后方会产生瞬时的空腔，塑性金属在轴肩的锻压作用下在搅拌针后方形焊接区域，但由于螺纹对塑性金属材料的驱动不足，使得位于搅拌针端部的塑性金属未填满因搅拌针前移而留下的空腔部分。从图5c可看出，随着搅拌针不断前移，这个瞬时空腔不断变大，并在搅拌针端部先生成一个较为尖锐的三角形空腔区域。

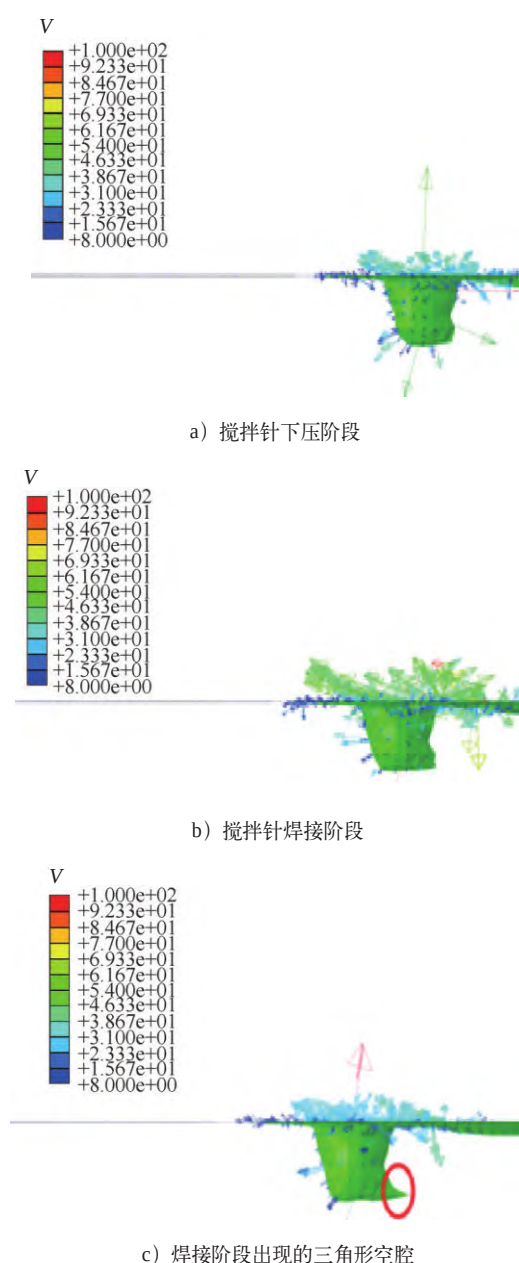


图5 焊接孔洞缺陷的形成过程

4.3 主轴旋转方向对焊接缺陷的影响

更改主轴旋转方向（旋转方向改为顺时针方向，旋转速度设置为1500r/min，焊接速度选用1100mm/min），焊接使用左旋螺纹搅拌针，研究旋向对焊接缺陷的影响。图6所示为在上述工艺条件下，左旋螺纹搅拌针焊接接头宏观金相及仿真结果。由图6可知，搅拌针旋转方向更改为顺时针后，搅拌针焊接所得焊接接头在焊核区前进侧底部出现较大的孔洞缺陷，该模型较为准确预测出孔洞缺陷位置，出现孔洞的位置处于前进侧，孔洞的面积大小与实际结果相近。左螺旋搅拌针在相同工艺参数情况下更换主轴旋转方向并不能将位于搅拌针底部的孔洞缺陷消除，并且孔洞缺陷的大小有变大的趋势。一方面，是由于在更改主轴旋向后，左螺旋搅拌针可以带动局部塑性金属流向搅拌针端部，而轴肩处螺线会驱动表层塑性金属向远离搅拌针处运动。另一方面，由于焊接速度较快，轴肩处塑性金属趋向于向搅拌针周围运动而使轴肩无法对搅拌针附近塑性金属产生足够的顶锻力，最终使位于搅拌针端部的塑性金属因流动性不足而产生较大的孔洞缺陷。

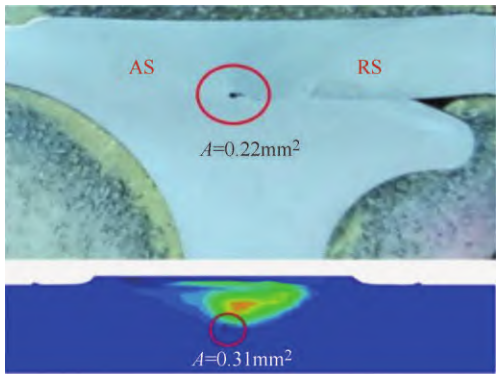


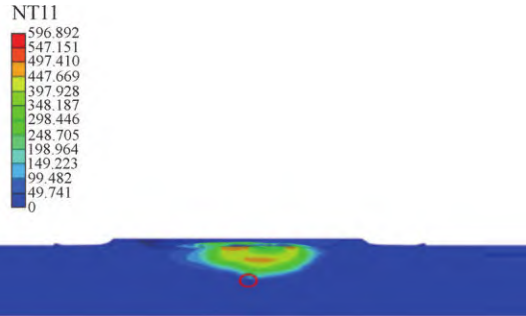
图6 左旋螺纹搅拌针焊接接头宏观金相及仿真结果

4.4 焊接参数对焊接缺陷的影响

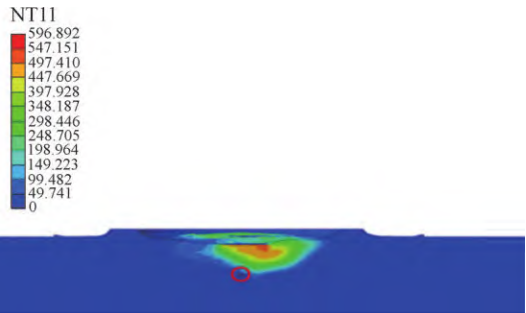
通过建立的有限元模型来预测3种不同的焊接参数（见表3）对左旋螺纹搅拌针焊接缺陷的影响，仿真结果如图7所示。从图7可看出，模型预测出左旋螺纹搅拌针在不同的焊接参数下不能获得无缺陷的焊接接头。当焊接速度与搅拌针转速均较小时，其孔洞缺陷也最小；而同时加快焊接速度和旋转速度，发现其孔洞缺陷会明显增大。因此，该搅拌针均无法在上述焊接工艺范围内获得无缺陷焊接接头。

表3 计算模型中所采用的焊接参数

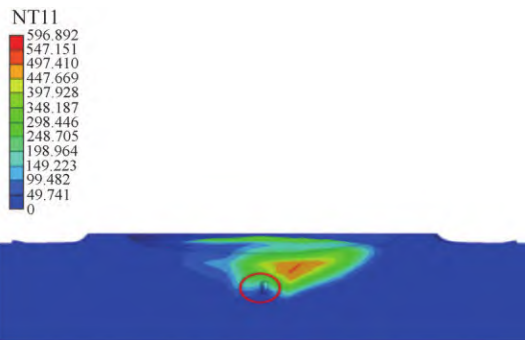
编号	焊接速度 / (mm/min)	旋转速度 / (r/min)
1	150	500
2	300	800
3	600	1500



a) 焊接速度150mm/min、旋转速度500r/min



b) 焊接速度300mm/min、旋转速度800r/min



c) 焊接速度600mm/min、旋转速度1500r/min

图7 模型在不同焊接参数下预测孔洞缺陷的大小

5 结束语

1) 螺纹方向会改变塑性金属的受力状态与流动状态，进而影响焊核区的最终成形质量。当螺纹对塑性金属材料的驱动不足时，位于搅拌针端部的塑性金属未填满，并伴随着搅拌针前移，因此易产生空腔。

2) 搅拌针螺纹旋向改为左旋, 易在焊核区底部获得较小的焊接孔洞缺陷, 且更换主轴旋转方向会使位于底部的孔洞缺陷变大。

3) 模型预测表明, 右旋螺纹搅拌针塑性应变区无焊接缺陷生成, 而左旋螺纹搅拌针在不同的焊接参数下不能获得无缺陷的焊接接头。

参考文献:

- [1] 翟明, 宋宏图, 石磊, 等. 搅拌摩擦焊在轨道交通领域的应用现状与发展前景[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (1): 1-7.
- [2] 侯振国, 钮旭晶, 李充, 等. 搅拌摩擦焊技术在高速列车制造中的应用[J]. 电焊机, 2018, 48 (3): 32-36.
- [3] XIE G, THOMPSON D J, JONES C J C. A modelling approach for the vibroacoustic behaviour of aluminium extrusions used in railway vehicles[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293 (3-5): 921-932.

- [4] 柯黎明, 潘际奎, 邢丽, 等. 搅拌摩擦焊焊缝金属塑性流动的抽吸-挤压理论[J]. 机械工程学报, 2009, 45 (4): 89-94.
- [5] 朱智, 王敏, 张会杰, 等. 基于CEL方法搅拌摩擦焊材料流动及缺陷的模拟[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28 (2): 294-299.
- [6] CHOUDHARY A K, JAIN R. Numerical prediction of various defects and their formation mechanism during friction stir welding using coupled Eulerian-Lagrangian technique[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2023, 30 (12): 2371-2384.
- [7] 武晓燕, 罗巍, 王怡嵩, 等. 基于CEL模型的搅拌摩擦焊7055铝合金仿真模拟[J]. 焊接学报, 2021, 42 (7): 44-50, 59, 100-101.

(收稿日期: 20250219)

(上接第23页)

Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured 2319 aluminum alloy treated by laser shock peening[J]. Materials Characterization, 2024, 217: 114354.

- [51] 王敏, 邢彦锋, 曹菊勇, 等. 磁场约束对CMT增材制造铝合金微观组织及力学性能的影响[J]. 轻工机械, 2022, 40 (6): 27-32.
- [52] 张骥俊, 邢彦锋, 曹菊勇. 超声振动对CMT电弧增材制造铝合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47 (4): 159-164.
- [53] 莫春立, 刘春宇, 赵磊, 等. 固溶处理对CMT电弧增材制造2319铝合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (16): 153-156.
- [54] 张瑞, 王克鸿. 氩氮混合气对铝合金CMT电弧增材制造过程成形质量的影响[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47 (1): 36-39.
- [55] 李洋, 袁涛, 张元彬, 等. 孕育剂SiC对Al-Zn-Mg-Cu合金GMAW电弧增材制造构件微观组织及力学性能的影响[J]. 焊接技术, 2022, 51 (4): 6-12.
- [56] 康士豪, 孟杰, 杨代婷, 等. 基于三维CT图像的

电弧增材制造高强AlCuMnZr合金的气孔缺陷及其控制研究[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (10): 82-88.

- [57] XUE S, DU D, TANG Y, et al. Studies on the microstructure and mechanical properties of AlCu₄MgSi aluminum alloy repaired via electron beam directed energy deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1004: 175971.
- [58] WANG C, LI Y, TIAN W, et al. Influence of ultrasonic impact treatment and working current on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminium alloy wire arc additive manufacturing parts[J]. Journal Of Materials Research and Technology, 2022, 21: 781-797.
- [59] SUN R, LI L, ZHU Y, et al. Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 255-265.

(收稿日期: 20250407)