

# 冷-热源辅助对FSW残余应力影响的数值模拟

史学海<sup>1</sup>, 吕赞<sup>2</sup>, 胡云瑞<sup>1</sup>, 王留芳<sup>2</sup>

(1. 中车四方车辆有限公司技术工程部, 山东 青岛 266111; 2. 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136)

**摘要:** **目的** 采用焊接中施加冷热源辅助的方式对焊接应力进行控制, 以减小焊后残余应力。**方法** 采用热-机械耦合数值模拟的方式对2024铝合金搅拌摩擦焊接过程进行仿真, 研究采用焊缝两侧加热且底部激冷的温差拉伸辅助工艺降低残余应力的效果。**结果** 与常规工艺相比, 温差拉伸时焊缝附近区域的温度梯度明显减小, 焊缝区域温度峰值降低了75.3℃; 搅拌头后方形成一个焊缝两侧温度高中间温度低的马鞍形温度场。两种工艺下的纵向残余应力峰值均位于焊缝边缘; 相比于常规工艺, 温差拉伸工艺下的残余应力峰值降低了23.4%。**结论** 冷热源辅助可以有效减小搅拌摩擦焊接头的残余应力峰值。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; 温差拉伸; 温度场; 应力场

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.02.009

**中图分类号:** TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)02-0055-06

## Numerical Simulation for Influence of Cold and Thermal Sources on FSW Residual Stress

SHI Xue-hai<sup>1</sup>, LYU Zan<sup>2</sup>, HU Yun-rui<sup>1</sup>, WANG Liu-fang<sup>2</sup>

(1. CSR Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

2. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**ABSTRACT:** The work aims to control the welding stress by applying cold and thermal sources during the welding process, so as to reduce the residual stress after welding. The friction stir welding of 2024 aluminum alloy was simulated by thermo-mechanical coupling numerical simulation, and the effect of thermal tension process for heating at both sides of weld and chilling at the bottom to reduce residual stress was studied. Compared with the conventional process, the temperature gradient in the area near the weld was obviously reduced during thermal tension process, and the temperature peak value in the weld area was reduced by 75.3℃. A saddle-shaped temperature field with high temperature on both sides of the weld and low temperature in the middle was formed behind the rotating tool. The peak value of longitudinal residual stress under both processes was located at the edge of weld. Compared with the conventional process, the peak residual stress value was reduced by 23.4% under thermal tension process. Cold and thermal sources can effectively reduce the peak value of residual stress in friction stir welding joints.

**KEY WORDS:** friction stir welding; thermal tension; temperature fields; stress fields

铝合金作为一种轻质材料,已经广泛地应用在航空、航天、汽车以及船舶等制造领域<sup>[1]</sup>。目前,铝合

金的主要连接方式为机械连接与焊接。机械连接存在一些问题,例如接头中会存在较大的应力集中、铆钉

收稿日期: 2019-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(51705339)

作者简介: 史学海(1966—),男,工程师,主要研究方向为轨道车辆焊接工艺技术。

通讯作者: 吕赞(1984—),男,硕士,工程师,主要研究方向为飞行器特种连接技术。

或螺栓会增加结构重量等。采用熔化焊连接铝合金容易产生热裂纹、夹渣以及气孔等缺陷<sup>[2]</sup>。搅拌摩擦焊作为一种固相连接技术,在铝合金等低熔点金属的焊接方面具有较强的优势<sup>[3-4]</sup>。王希靖等<sup>[5]</sup>采用搅拌摩擦焊技术对 6082-T6 铝合金进行连接,获得表面成形良好且无内部缺陷的接头。

虽然搅拌摩擦焊 (Friction stir welding, FSW) 技术具有热输入低、变形小的特点<sup>[6]</sup>,但是焊后客观存在的残余应力仍是不可避免的,尤其对于薄板铝合金的焊接。工件在服役过程中受到的应力与焊后残余应力进行叠加会严重影响结构的性能,因此,众多学者采用多种方式对搅拌摩擦焊接头的残余应力进行控制。Staron 等<sup>[7]</sup>采用机械拉伸的方式控制 AA2024 铝合金搅拌摩擦焊接头残余应力。柴鹏等<sup>[8]</sup>研究水雾冷却的方式对搅拌摩擦焊焊接结构的影响,发现水雾冷却有助于减少接头的残余应力。叶绍勇等<sup>[9]</sup>采用超声激励的方式控制焊接残余应力,发现超声辅助下的焊接残余应力降低了 28.5%。目前,采用冷-热结合的温差拉伸工艺对搅拌摩擦焊应力的控制缺少相关研究。

文中采用数值模拟的方法分析 2024 铝合金在常规与温差拉伸工艺下应力分布规律,研究温差拉伸对应力控制机制,推动温差拉伸方法在搅拌摩擦焊接领域中的应用。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 有限元网格划分

采用对接的方式将尺寸为 150 mm×240 mm×2 mm 的板材进行焊接,实体模型的网格均采用八节点六面体网格。为了提高计算精度,将距离焊缝中心

两侧 60 mm 区域设置较小尺寸的网格。同时为了减少计算时间,将远离焊缝区域设置较大尺寸的网格。网格划分后共有节点 27 346 个,单元 18 000 个。图 1 所示为实体网格划分。

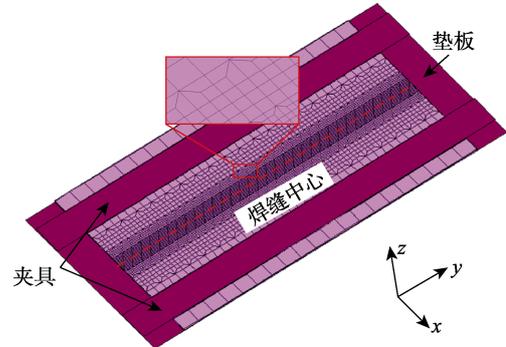


图 1 有限元网格划分

Fig.1 Finite element mesh generation

### 1.2 材料属性及边界条件

以 2024 铝合金为研究对象,分析常规与温差拉伸辅助工艺下残余应力分布情况。由于高温下的材料性能难以通过实验的方法获得,采用将低温下的物理性能外延的方式获得高温下的物理性能。2024 铝合金热物理性能如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

FSW 中的热主要来源于搅拌头与母材的摩擦<sup>[11]</sup>。摩擦面由 3 部分组成,包括轴肩、搅拌针侧面以及搅拌针端面。产热模型如式 (1—3)。

$$q_1 = \frac{2}{3} \pi \mu \omega p (R_1^3 - R_2^3) \quad (1)$$

$$q_2 = \frac{2\pi\mu\omega p}{3\sin\alpha} (R_2^3 - R_3^3) \quad (2)$$

$$q_3 = \frac{2}{3} \pi \mu \omega p R_3^3 \quad (3)$$

表 1 2024 铝合金热物理性能<sup>[10]</sup>

Tab.1 Thermophysical properties of 2024 Al alloy

温度/°C	弹性模量 $E/\text{GPa}$	热导率 $K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	线膨胀系数 $\alpha(\times 10^{-6})/^\circ\text{C}^{-1}$	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$
20	71.0	114.8	835.4	23.0	435
100	65.2	128.4	897.0	24.4	415
150	60.6	135.7	916.3	25.6	185
200	56.2	142.2	974.0	26.6	95
300	37.9	152.7	1012.5	28.7	45
400	31.5	160.8	1128.0	30.9	25
500	25.0	166.7	1205.0	32.6	20

式中:  $q_1, q_2, q_3$  分别为轴肩、搅拌针侧面以及搅拌针端面与母材摩擦产热功率;  $\mu$  为搅拌工具与母材之间的摩擦因数;  $\omega$  为搅拌工具角速度;  $p$  为轴肩与母材的垂直作用力;  $R_1, R_2, R_3$  分别为轴肩、搅拌针根部、搅拌针端部半径;  $\alpha$  为搅拌针锥角的 1/2。

热源施加前将试验件的初始温度设置为 25 °C。试

验件与夹具间的接触散热系数设置为 150 W/(m<sup>2</sup>·K), 试验件与空气接触部分散热系数设置为 40 W/(m<sup>2</sup>·K)。对试验件进行图 1 所示的接触约束。

### 1.3 温差拉伸工艺及实现

常规工艺下只采用常规搅拌头进行焊接。温差拉

伸辅助工艺示意图如图 2 所示。温差拉伸工艺采用冷-热结合的方式对焊缝区域的应力进行控制。焊接过程中，在焊缝底部施加激冷源，在焊缝两侧加热；焊后停止激冷与辅热。在模拟过程中，背面激冷源距离焊缝中心两侧 6 mm，因此将此区域表面散热系数设置为  $400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；正面焊缝两侧的热源距离焊缝中心两侧 20~30 mm，将此区域节点的温度设定为  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

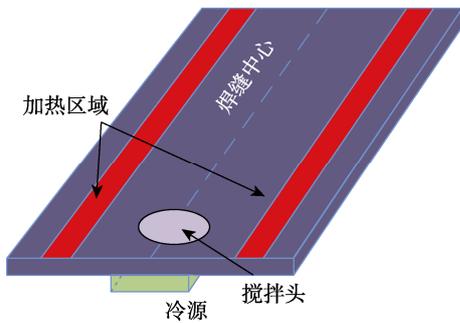


图 2 温差拉伸辅助工艺示意图  
Fig.2 Schematic diagram of thermal tension process

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度场

图 3 为焊接时间 100 s 时的温度分布。常规工艺下的高温区域呈现出典型的椭圆形，热源前方的温度

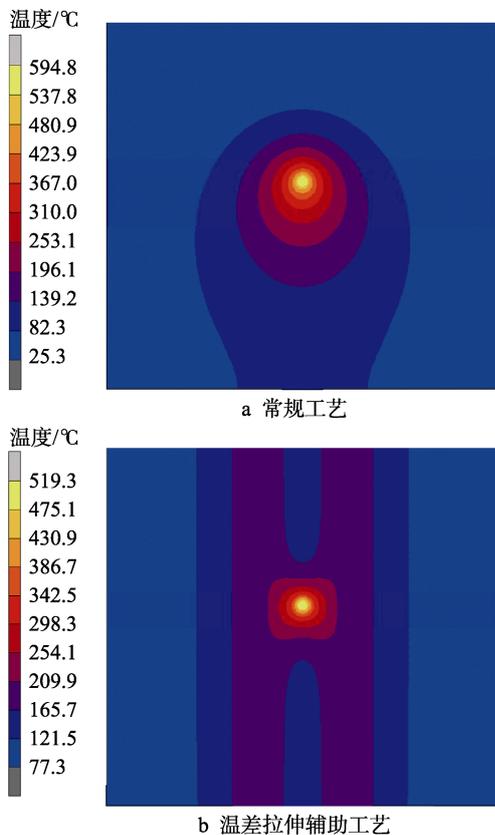


图 3 不同工艺下的温度分布

Fig.3 Temperature fields under different welding processes

梯度高于热源后方（见图 3a）。这是因为在焊接中，搅拌头前方材料只受到热传导的作用，而搅拌头后方材料受到搅拌头的加热与热传导作用。由于热量的积累，紧邻搅拌针后方区域沿垂直焊缝方向的高温区域略大于搅拌头作用区。相比于常规工艺，温差拉伸工艺中焊缝底面存在激冷区域，使得焊缝区域温度峰值降低了  $75.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ，且在焊缝两侧加热与底部激冷的共同作用下，热源附近区域的温度分布更加均匀。搅拌头后方焊缝两侧加热区域温度高于焊缝中心区域，形成一个马鞍形的温度场。

图 4 为常规与温差拉伸工艺下焊缝横截面的温度分布云图。在搅拌摩擦焊中，轴肩与母材上表面材料摩擦产生的热高于搅拌针与母材摩擦产生的热量<sup>[12]</sup>。因为轴肩的作用区域宽于搅拌针的作用区域，且接头上表面与空气接触的散热系数小于接头下表面与垫板接触的散热系数，所以焊缝中心高温区域呈现出上宽下窄的碗型分布。相比与常规工艺，温差拉伸辅助工艺下焊缝高温区域较小，这是因为焊接中焊缝底部激冷的作用。尽管温差拉伸工艺下焊缝区域温度峰值低于常规工艺，但是在两侧高温区域宽度高于常规工艺。

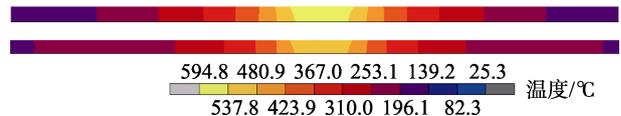


图 4 不同焊接工艺下焊缝横截面温度分布

Fig.4 Temperature fields of weld cross sections under different welding processes

图 5 为焊缝中心特征点处的温度循环曲线。两种工艺下，温度均具有先上升后下降，最后至室温的趋势。相比于常规工艺，温差拉伸工艺下初始阶段特征点位置的温度随着焊接的进行逐渐升高，随后趋向于稳定，这是因为在焊接中焊缝两侧加热的作用。温差拉伸工艺的降温阶段速度较慢，且存在一段保温时间，这是由于焊缝两侧加热区域对其散热产生一定的影响。焊接结束时，两种工艺下搅拌头后方材料逐渐冷却至室温的趋势相同。

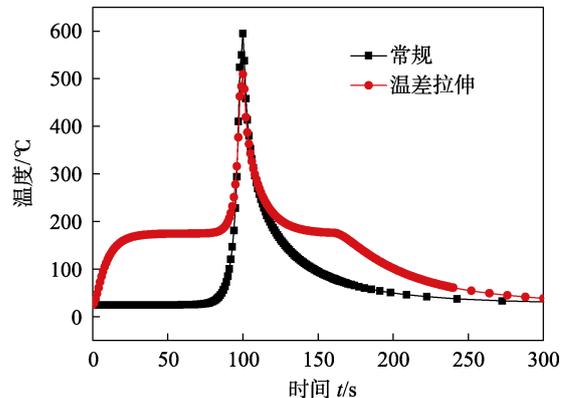


图 5 焊缝特征点温度循环曲线

Fig.5 Temperature cycle curves of weld characteristic points

图 6 为搅拌头后方垂直于焊缝方向的温度分布曲线。常规工艺下呈现出焊缝中间温度高两侧温度低的状态，而温差拉伸工艺下焊缝两侧加热区域的温度在 200 °C，焊缝底部存在激冷源，焊缝远离两侧加热区域的温度逐渐降低，焊缝中心处温度值最小，呈现出一个马鞍形的温度场。

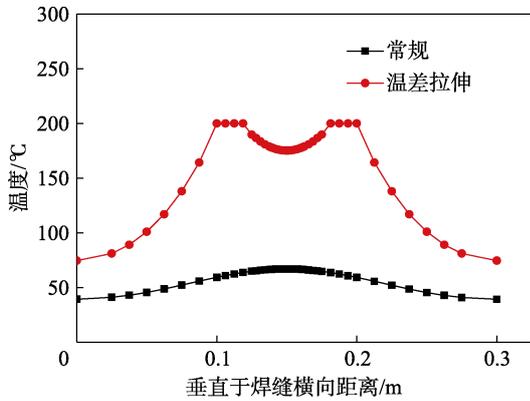


图 6 搅拌头后方垂直于焊缝方向的温度分布  
Fig.6 Temperature fields perpendicular to the weld behind rotating tool

### 2.2 焊接过程中应力场

图 7 为常规与温差拉伸辅助工艺下纵向应力分布云图。搅拌头前方材料在热传导的作用下发生膨胀，在周围冷金属的约束作用下产生压应力。搅拌头作用区域的应力值较小，这主要受到两个方面的影响：一是焊接中搅拌头作用区域温度较高时材料弹性模量低；二是在焊接中搅拌头具有顶锻作用，能够为焊缝施加一个额外的压应力。搅拌头后方材料因冷却发生收缩，在周围温度较低的金属约束下，产生较大的拉应力。对于温差拉伸工艺来说，在焊缝底部激冷以及焊缝两侧加热的双重作用下，热源前方预热材料的温度与周围金属温度差较小，所以搅拌头周围压应力区域小于常规工艺。在常规工艺下搅拌头作用区呈现出较小的拉应力，而温差拉伸工艺下搅拌头作用区呈现出压应力，这说明温差拉伸工艺对焊接过程中拉

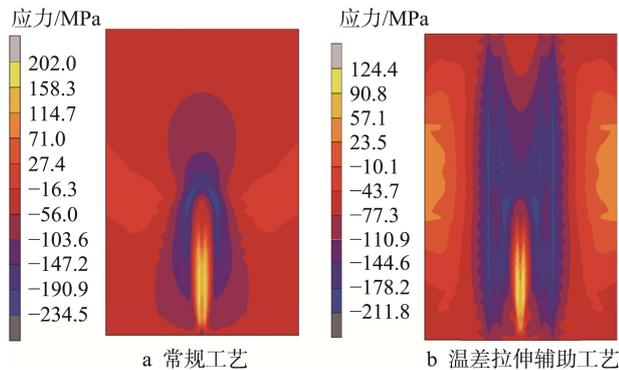


图 7 焊接中不同工艺下纵向应力分布  
Fig.7 Longitudinal stress fields under different welding processes

应力的控制具有明显效果。搅拌头后方材料在冷-热源共同作用下，焊缝区域温度低于两边加热区域，焊缝两边材料的膨胀会对焊缝区域材料起到拉伸作用，对焊缝区域冷却收缩具有较好的抑制效果。温差拉伸工艺将焊接中的应力峰值降低了 62.9%。

### 2.3 应变与纵向残余应力

图 8 为焊缝中心特征点应变演变曲线。对于常规工艺来说，在热源远离特征点时，材料未受到热影响作用，此时应变未出现变化。随着热源的逐渐移动，特征点温度逐渐升高，受到热影响作用材料发生膨胀，在周围冷金属的约束作用下拉伸塑性应变逐渐增大。当搅拌头到达特征点时，首先轴肩前端与特征点接触，在轴肩的碾压作用下，特征点拉伸塑性应变逐渐降低。随着搅拌头的前进，对搅拌头作用区域施加的顶端效果更加明显，特征点由拉伸塑性应变逐渐变为压缩塑性应变。当搅拌头远离特征点时，搅拌头后方材料发生冷却收缩，压缩塑性残余应变留在接头中。温差拉伸辅助工艺下的焊缝底部存在激冷源，与常规工艺相比，搅拌头前方材料受到预热较小，因此在搅拌头到达特征点之前，搅拌头前方材料产生的拉伸塑性应变较小。当搅拌头到达特征点时，表现出和常规工艺相同的规律，但是由于在冷-热源的共同辅助下，压缩塑性应变有所降低。随着搅拌头离开特征点，特征点应力值先变小后稳定，这是因为搅拌头后方焊缝区域材料受到两侧加热区域的拉伸作用，抑制其收缩，当到达一个稳定状态时，残余压应变留在接头中。

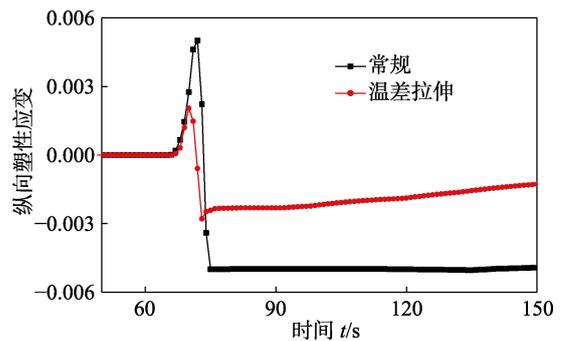


图 8 不同工艺下纵向塑性应变演变曲线  
Fig.8 Evolution of longitudinal plastic strain under different welding processes

图 9 为常规与温差拉伸辅助工艺下纵向残余应力分布。常规工艺与温差拉伸辅助工艺下纵向残余应力峰值均出现在焊缝处。这是因为焊接完成后，焊缝区域冷却发生收缩塑性变形，焊缝区域表现为拉应力。常规与温差拉伸辅助工艺下的纵向残余应力峰值分别为 179.8 MPa 和 137.8 MPa。常规工艺下，由于焊缝处温度较高，产生的膨胀大，而远离焊缝区域的温度较小，膨胀较小，因此随着到焊缝中心距离的增

加,拉应力值逐渐降低后变为压应力。温差拉伸辅助工艺下,焊缝两侧加热区域材料温度维持在 200 ,加热区域材料的膨胀会对搅拌头后方区域温度较低的材料产生拉伸作用,这对于残余应力的降低具有较好的作用,因此焊缝区域的残余应力峰值有所降低。

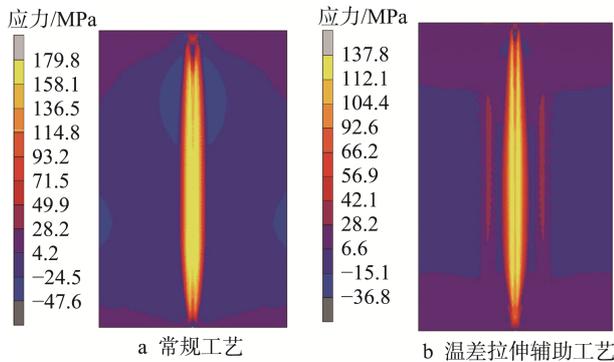


图 9 纵向残余应力分布云图

Fig.9 Longitudinal stress distributions

图 10 为纵向残余应力沿垂直焊缝方向分布曲线。两种工艺下,纵向应力峰值均出现在焊缝两侧,这是由于搅拌头在焊接过程中为焊缝区域提供一个额外的压应力作用。温差拉伸辅助工艺下,残余拉应力的宽度小于常规工艺,且焊缝中心的残余拉应力降低效果比轴肩区域拉应力降低更明显。另外,两侧加热区域的残余应力出现较小拉应力,这是因为在焊后冷却阶段,冷却收缩产生的拉应力高于焊接中产生的压应力。

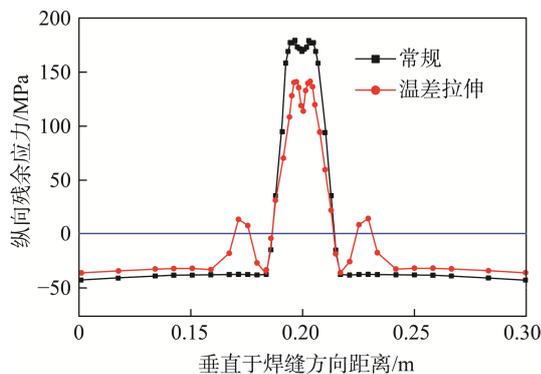


图 10 纵向残余应力分布曲线

Fig.10 Distribution curve of longitudinal residual stress

### 3 结论

1) 常规工艺下热源前方与后方温度梯度相差较大,而基于焊缝两侧加热且底部激冷的温差拉伸辅助工艺下热源前方与后方的温度梯度相差较小。

2) 温差拉伸工艺下热源后方在沿垂直焊缝方向上能够形成一个两侧温度高、中心温度低的马鞍形温度场,这有利于降低残余应力峰值。

3) 常规与温差拉伸工艺下焊后残余应力在沿垂

直焊缝方向上均呈现出“M”型分布。相比于常规工艺,温差拉伸作用下的纵向残余拉应力宽度减小,且峰值降低 42 MPa。

### 参考文献:

- [1] 袁豪峰, 杨峰, 陈亮, 等. 焊后热处理对 6061 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(11): 59—63.  
YUAN Hao-feng, YANG Feng, CHEN Liang, et al. Effects of Postweld Heat Treatment on Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy FSW Joint[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(11): 59—63.
- [2] 徐荣正, 张德良, 李慧, 等. 铝/铜异种金属搅拌摩擦焊研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(11): 7—10.  
XU Rong-zheng, ZHANG De-liang, LI Hui, et al. Study on Friction Stir Welding of Al/Cu Dissimilar Metals[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(11): 7—10.
- [3] 牛鹏亮, 李文亚. 搅拌摩擦焊残余应力研究现状及展望[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 1—6.  
NIU Peng-liang, LI Wen-ya. Present Study and Prospect of Friction Stir Welding Residual Stress[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 1—6.
- [4] 刘建光, 胡忠民, 吴为. 铝合金加筋壁板搅拌摩擦焊接残余应力及变形分析[J]. 精密成形工程, 2017, 9(4): 10—105.  
LIU Jian-guang, HU Zhong-min, WU Wei. Residual Stress and Deformation in Friction Stir Welding of Aluminium Stiffened Panel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(4): 101—105.
- [5] 王希靖, 魏学玲, 张亮亮. 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊组织演变与力学性能[J]. 焊接学报, 2018, 39(3): 1—5.  
WANG Xi-jing, WEI Xue-ling, ZHANG Liang-liang. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 6082-T6 Aluminum Alloy[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2018, 39(3): 1—5.
- [6] 张圣斌, 左敦稳, 宋波, 等. 2024 铝合金搅拌摩擦焊残余应力分布研究[J]. 航空制造技术, 2014, 452(8): 26—28.  
ZHANG Sheng-bin, ZUO Dun-wen, SONG Bo, et al. Research on Residual Stress Distribution of Friction Stir Welding in 2024 Aluminum Alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 452(8): 26—28.
- [7] STARON P, KOCAK M, WILLIAMS S. Residual Stresses in Friction Stir Welded Al Sheets[J]. Applied Physics A, 2002, 74(1): 1161—1162.
- [8] 柴鹏, 栾国红, 郭德伦, 等. FSW 接头残余应力分布及控制技术[J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 79—82.  
CHAI Peng, LUAN Guo-hong, GUO De-lun, et al. Distribution and Control of Residual Stress in FSW Joints[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2005, 26(11): 79—82.
- [9] 叶绍勇, 贺地求, 杨坤玉, 等. 超声辅助搅拌摩擦焊

- 对焊缝残余应力的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 1843—1847.
- YE Shao-yong, HE Di-qiu, YANG Kun-yu, et al. Effect of Ultrasonic Assisted Friction Stir Welding on Residual Stress of Welded Joint[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2013, 23(7): 1843—1847.
- [10] BANCHMANN M, CARSTENSEN J, BERGMANN L, et al. Numerical Simulation of Thermally Induced Residual Stresses in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 2024-T3 at Different Welding Speeds[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 103(91): 1443—1452.
- [11] 姬书得, 卓彬, 高双胜, 等. TC4 钛合金静止轴肩和传统搅拌摩擦焊的温度场对比[J]. 航空制造技术, 2016, 68(19): 98—101.
- JI Shu-de, ZHUO Bin, GAO Shuang-sheng, et al. Temperature Field Comparison of TC4 Titanium between Stationary Shoulder Friction Stir Welding and Traditional Friction Stir Welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 68(19): 98—101.
- [12] 龚海, 吴运新, 廖凯. 铝合金厚板残余应测试方法有效性分析[J]. 材料工程, 2010, 54(1): 42—46.
- GONG Hai, WU Yun-xin, LIAO Kai. Analysis on Validity of Residual Stress Measurement Methods for Aluminum Alloy Thick-plate[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 54(1): 42—46.