

# 2219 铝合金搅拌摩擦焊和钨极保护焊 焊接件残余应力的中子衍射研究

陈星雨<sup>1</sup>, 刘晓龙<sup>1,\*</sup>, 吴运新<sup>2</sup>, 聂林<sup>2</sup>, 李眉娟<sup>1</sup>, 孙凯<sup>1</sup>, 陈东风<sup>1</sup>, 刘蕴韬<sup>1,\*</sup>

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 中南大学, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 利用中子衍射法对 2219 铝合金搅拌摩擦焊(FSW)和钨极保护焊(TIG)焊接件开展了三维残余应力测量,并对残余应力分布规律进行了分析。结果表明:焊接件的纵向残余应力数值较大;FSW 焊接件残余应力整体较 TIG 焊接件的小;FSW 和 TIG 焊接件的残余拉应力最大值分别为 101 MPa 和 174 MPa,FSW 焊接件残余拉应力最大值较 TIG 焊接件的小;FSW 残余拉应力最大值处于轴肩边缘,且前进侧峰值大于后退侧峰值;TIG 焊接件残余拉应力最大值处于焊缝边缘。通过中子衍射实验获得的焊接件残余应力分布,将可用于焊接工艺的优化与焊接件的寿命预测。

**关键词:** 残余应力;中子衍射;2219 铝合金;搅拌摩擦焊;钨极保护焊

**中图分类号:** O571.56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2019)11-2289-06

**doi:** 10.7538/yzk.2019.youxian.0182

## Study on Residual Stress in Friction Stir and Tungsten Inert Gas Welded 2219 Aluminum Alloy Sheets Using Neutron Diffraction

CHEN Xingyu<sup>1</sup>, LIU Xiaolong<sup>1,\*</sup>, WU Yunxin<sup>2</sup>, NIE Lin<sup>2</sup>,  
LI Meijuan<sup>1</sup>, SUN Kai<sup>1</sup>, CHEN Dongfeng<sup>1</sup>, LIU Yuntao<sup>1,\*</sup>

(1. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

2. *Central South University, Changsha 410083, China*)

**Abstract:** The 3D residual stresses in the friction stir and tungsten inert gas welded 2219 aluminum alloy sheets were characterized using neutron diffraction. The results show that residual stress is larger in longitudinal direction after welding process. The magnitude of the residual stress in friction stir welded sheet is generally smaller than that in the tungsten inert gas welded sheet. The maximum tensile stress of friction stir welded sheet is 101 MPa, which is smaller than that of tungsten inert gas welded stress of 174 MPa. Friction stir welded sheet tensile peaks show at sides of the tool edge, and the tensile residual stress on the advancing side is higher than that on the retreating

收稿日期:2019-03-20;修回日期:2019-04-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFA0403704);国家自然科学基金委重大科研仪器设备研制专项资助项目(51327902);国家自然科学基金青年基金资助项目(11605293)

作者简介:陈星雨(1994—),男,江苏扬州人,硕士研究生,中子散射专业

\* 通信作者:刘晓龙,E-mail: liuxiaolong@ciae.ac.cn;刘蕴韬,E-mail: ytliau99@yahoo.com

网络出版时间:2019-09-04;网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190903.1505.010.html>

side. Tungsten inert gas welded stress residual stress peaks show at the sides of welding zone. Residual stress distributions obtained by neutron diffraction will be used to optimize the welding process and predict the lifespan of 2219 aluminum alloy.

**Key words:** residual stress; neutron diffraction; 2219 aluminum alloy; friction stir welding; tungsten inert gas welding

2219 铝合金具有优异的高温力学性能、高强度和良好的断裂韧性,常用于航天飞行器的燃料贮藏箱和氧化剂槽等关键部位<sup>[1]</sup>。航天飞行器燃料箱等大型构件多采用焊接技术连接成型,常用的焊接方法主要有钨极保护焊(TIG)和搅拌摩擦焊(FSW)。TIG是在惰性气体保护下,利用钨电极与工件间产生的电弧热熔化母材和填充焊丝的熔化焊方法<sup>[2]</sup>。FSW是一较新的固相连接技术,由搅拌针伸入工件接缝处,通过焊头高速搅拌与摩擦,完成材料软化与焊接<sup>[3]</sup>。焊接过程后,势必引入残余应力,并影响最终部件的疲劳强度、抗应力腐蚀性能和结构精度等<sup>[4]</sup>,因此焊接件残余应力的准确表征具有重要的意义。

目前,国内外在铝合金焊接件残余应力表征方面已展开了许多研究。李亭等<sup>[5]</sup>采用小孔法对铝合金 FSW 焊接件进行了残余应力测量,结果表明残余应力以纵向残余应力为主,拉应力范围主要在轴肩区域;Staron 等<sup>[6]</sup>采用中子衍射法对 2024 铝合金 FSW 焊接件残余应力进行测量,结果表明纵向应力分布呈双峰特征;李庆庆等<sup>[7]</sup>采用 X 射线法测量了 2219 铝合金 TIG 焊接件表面残余应力分布,最大纵向拉应力为 165 MPa,位于焊缝中部热影响区。然而,对于 2219 铝合金焊接件残余应力尚未开展三维深度残余应力研究。在各种测量技术中,中子衍射法具有三维深度无损的优势<sup>[8]</sup>,因此利用中子衍射法进行 2219 铝合金 FSW 和 TIG 焊接件残余应力测量具有极大应用价值。

本工作通过中子衍射法分别对 2219 铝合金 FSW 和 TIG 焊接件进行残余应力测量与分析,以得到两种工艺焊接件的残余应力分布,为理解和控制 2219 铝合金焊接件残余应力分布提供实验依据。

## 1 样品制备

实验样品分别采用 FSW 和 TIG 进行焊

接。样品材料为 10 mm 厚的 2219 铝合金,主要成分列于表 1。其力学性能为:抗拉强度 455 MPa,屈服强度 352 MPa。样品尺寸均为 200 mm×200 mm×10 mm。焊接参数为:FSW 的搅拌针转速为 1 200 r/min,焊接速度为 100 mm/min,轴肩半径为 10 mm,搅拌针半径为 2 mm,焊缝宽度为 20 mm;TIG 的焊接电流为 220 A,焊接电压为 32 V,焊接速度为 2 mm/s,焊缝宽度为 8 mm。

表 1 2219 铝合金的主要化学成分  
Table 1 Main chemical composition of 2219 aluminum alloy

元素	质量分数/%
Cu	6.48
Mn	0.32
Fe	0.23
Ti	0.06
V	0.08
Zn	0.04
Si	0.49
Zr	0.20
Al	余量

## 2 中子衍射实验

### 2.1 测量原理

中子衍射法测量残余应力的基本原理为:一定应力状态引起的材料宏观应变与晶格应变相关,而晶面间距的变化将引起 Bragg 衍射峰的位置移动。由布拉格定律(式(1))可知,波长为  $\lambda$  的中子束通过样品后,衍射峰的位置  $\theta$  将发生偏移。通过测量样品与无应力试样对应位置处的衍射峰位置,可得到应变  $\epsilon$ 。

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \Delta d / d_0 =$$

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} - 1 = -\Delta \theta \cot \theta_0 \quad (2)$$

式中: $d$ 为待测点的晶格面间距; $d_0$ 为无应力试样对应位置处的晶格面间距; $\theta$ 为样品衍射峰位置; $\theta_0$ 为无应力试样对应的衍射峰位置。

对于被测应变 $\epsilon_{\text{eff}}$ ,可用给定坐标系下的正应变和切应变来表示,一般需测量至少6个方向的应变以解出应变分量。如果已知该点应力的主方向,则没有切应变,因此只需测量3个主方向的应变。通过广义胡克定律:

$$\sigma_i = \frac{E_{hkl}}{1 + \nu_{hkl}} \left[ \epsilon_i + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \right] \quad (3)$$

可将应变转换为3个主应力方向的应力,式中 $i=1,2,3$ 分别对应3个正交方向, $E_{hkl}$ 为对应晶面的弹性模量, $\nu_{hkl}$ 为对应晶面的泊松比。

## 2.2 实验测量

残余应力测量实验在德国亥姆霍兹柏林材料与能源研究中心(HZB)的E3谱仪上进行。谱仪使用Si(400)晶面的双聚焦单色器,起飞角为 $74^\circ$ ,中子波长为0.148 nm,选择受晶间应力影响较小且衍射强度较高的Al(311)为研究晶面,对应的弹性模量 $E_{311}$ 为69 GPa,泊松比 $\nu_{311}$ 为0.35。

FSW和TIG焊接件的测量路径示于图1。测点分布在FSW焊接件中间位置的A-A横截面和TIG焊接件中间位置的B-B横截面。预估A-A横截面和B-B横截面上靠近焊缝区部分的应力变化较大,因此在垂直焊缝方向,焊缝两侧区域测点间距5 mm,焊缝内部测点间距2.5 mm,外侧测点间距15 mm,垂直焊缝方

向共设置23个测点,样品右侧因有夹具遮挡,测点有所减少。沿板材厚度方向,测点间距2.5 mm。入射狭缝的宽度和高度均2 mm,径向准直器的衍射束取样尺寸为2 mm。

由于焊接件在厚度方向的尺寸远小于长宽方向的尺寸,因此厚度方向的温度梯度较小,厚度方向的应力可假定为平面应力状态<sup>[9-10]</sup>。令式(3)中的 $\sigma_3=0$ ,并将式(2)代入式(3),可解出平面应力状态下的 $d_0$ 。

$$d_0 = \frac{1 - \nu_{hkl}}{1 + \nu_{hkl}} d_3 + \frac{\nu_{hkl}}{1 + \nu_{hkl}} (d_1 + d_2) \quad (4)$$

因此无需测量无应力试样的晶格面间距 $d_0$ 。

## 3 结果与讨论

样品厚度仅10 mm,可视为平面应力分布,重点分析纵向和横向残余应力的分布和变化。

### 3.1 FSW焊接件残余应力测量结果

图2为FSW焊接件上、中、下层3条线的焊接残余应力分布。由图2可知,轴肩作用区域附近,纵向残余应力呈不对称残余拉应力分布。残余拉应力峰值出现在轴肩边缘外侧的热影响区域。焊缝中心的残余拉应力值小于轴肩边缘区域,这主要是由于搅拌针的搅拌和高温使中心区域发生动态再结晶,从而一定程度上降低了中心处的拉应力<sup>[11]</sup>。纵向残余应力在远离焊缝区形成相平衡的压应力。纵向残余应力值分布在 $-42 \sim 101$  MPa之间。

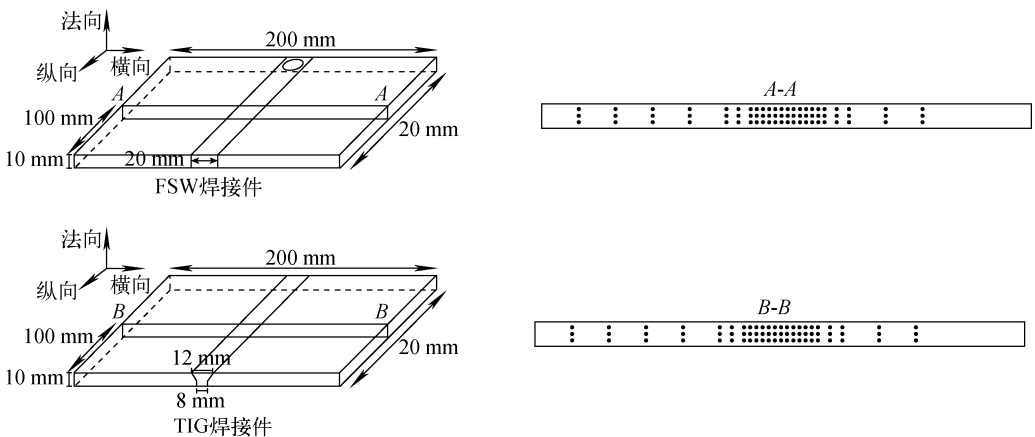


图1 FSW和TIG焊接件的测量路径

Fig. 1 Measuring path of FSW and TIG sheets

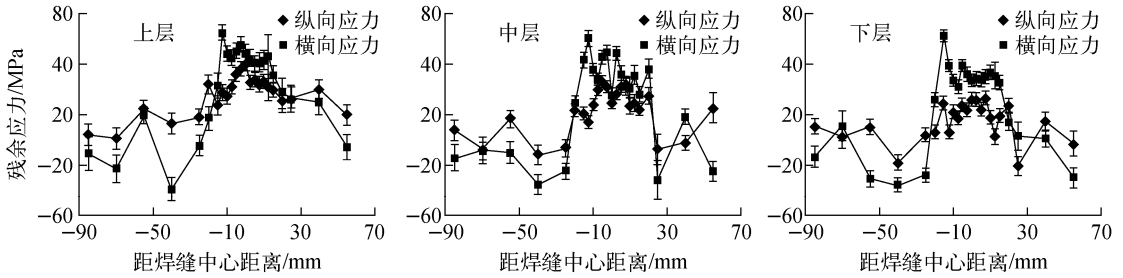


图2 FSW 焊接件残余应力分布

Fig.2 Residual stress distribution in FSW sheet

前进侧由于轴肩上每点的线速度与前进方向相同,形成叠加,轴肩与材料之间的相对速度更大,因此会带来更大的摩擦热,从而导致更大的残余应力。图2中负轴为前进侧,正轴为后退侧,可看出残余应力分布不对称,且前进侧的残余拉应力峰值相对高于后退侧的。

和纵向残余应力相比,横向残余应力相对较小,应力分布在 $-16\sim 47$  MPa之间。纵向残余应力是FSW焊接过程形成的主要残余应力。

FSW焊接件纵向残余应力的数值较大,为比较不同厚度处的残余应力水平,从图2提取不同厚度处的纵向残余应力分布,如图3所示。从图3可看出,上层残余应力峰值略小于下层的峰值。主要原因是上层焊接区域受轴肩的摩擦作用和顶锻作用,对抑制焊后残余应力起重要作用<sup>[12-13]</sup>。构件下层的顶锻作用减小,对残余应力的抑制减小。此外,下层的再结晶程度相对较小,应力释放程度降低,因此下层的残余拉应力较大。中间层残余应力分布介于上层与下层之间。

### 3.2 TIG 焊接件残余应力测量结果

图4为TIG焊接件上、中、下层3条线的焊接残余应力分布。由图4可知,焊接区域内

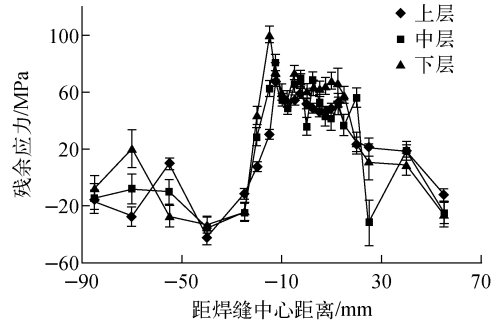


图3 FSW 焊接件厚度方向纵向残余应力分布

Fig.3 Longitudinal residual stress distribution through thickness in FSW sheet

纵向残余应力呈拉应力分布,纵向残余应力峰值位于对应厚度处的焊缝边缘区域,外侧为相平衡的压应力区域。形成原因是在焊接过程中,焊缝区域的材料温度高,导致膨胀,该部分受相邻材料约束先产生压应力;在冷却过程中,这部分将产生收缩,但被附近的材料牵拉,从而形成拉应力区域。TIG焊缝中心区域的纵向残余拉应力小于焊缝边缘区域处拉应力,主要由于铝合金材料热扩散系数较大,焊缝中心的高温区域出现弹性应力松弛,一定程度上降低了该区域残余拉应力<sup>[14]</sup>。此外,盖面焊的焊缝

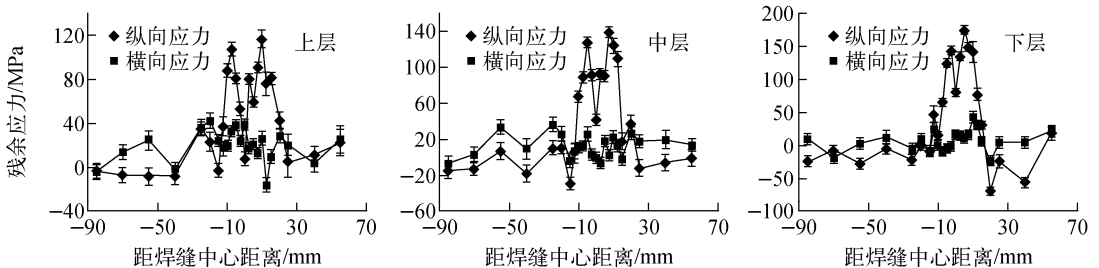


图4 TIG 焊接件残余应力分布

Fig.4 Residual stress distribution in TIG sheet

宽度为 12 mm,略宽于宽度为 8 mm 的打底焊缝,因此随厚度的增加,焊缝宽度减小,拉应力最大值所在位置间距减小。上层纵向残余应力分布在  $-69 \sim 174$  MPa 之间。

与 FSW 焊接件类似,和纵向残余应力相比,TIG 焊接件的横向残余应力相对较小,应力分布在  $-24 \sim 43$  MPa 之间。纵向残余应力为 TIG 焊接过程形成的主要焊接应力。

TIG 焊接件纵向残余应力的数值较大,为比较不同厚度处的残余应力水平,从图 4 提取不同厚度处的纵向残余应力分布,如图 5 所示。从图 5 可看出,下层的纵向残余拉应力峰大于上层的纵向残余拉应力。TIG 常用的焊接方法为先进行一层打底焊,再进行一层盖面焊。下层区域由于受到两次焊接热循环的作用,将形成较大的残余拉应力峰。同时,打底焊时形成的压缩变形会对上层区域起到预拉伸的作用,从而使上层纵向残余应力略小于下层纵向应力<sup>[15]</sup>。中间层残余应力分布介于上、下层之间。

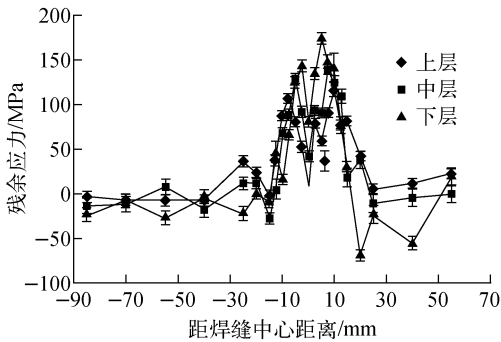


图 5 TIG 焊接件厚度方向纵向残余应力分布  
Fig. 5 Longitudinal residual stress distribution through thickness in TIG sheet

### 3.3 FSW 和 TIG 焊接件残余应力比较

为比较两种焊接工艺的焊后残余应力分布,选择了 FSW 和 TIG 焊接件的下层纵向残余应力结果进行比较,结果如图 6 所示。

FSW 焊接件的残余拉应力峰值小于 TIG 焊接件的残余拉应力峰值,且 FSW 焊接件的纵向残余应力分布整体更平缓。原因主要有:FSW 是固相焊接技术,焊接过程中的最高温度一般只有金属熔点的 80%,低于熔化焊

的焊接温度,带来的变形和应力相对较小<sup>[16]</sup>;FSW 除摩擦热外,还存在轴肩的顶锻作用,而顶锻作用有利于降低残余应力。两种原因综合影响,使得 FSW 焊接件的残余应力相对小于 TIG 的。

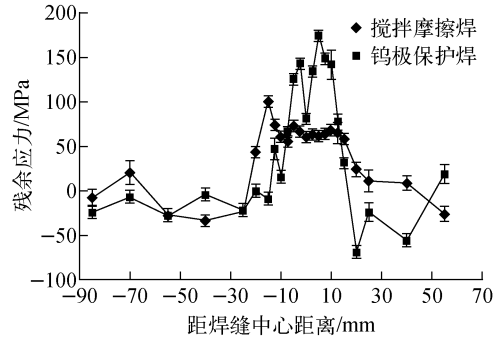


图 6 FSW 和 TIG 焊接件下层纵向残余应力分布比较  
Fig. 6 Comparison between longitudinal residual stress distribution of lower plane in FSW and TIG sheets

## 4 结论

利用中子衍射技术获得了 2219 铝合金 FSW 和 TIG 焊接件的三维残余应力分布,得到结论如下。

1) 焊接纵向残余应力较大,其中 TIG 焊接件的纵向残余应力范围为  $-69 \sim 174$  MPa,FSW 焊接件的纵向残余应力范围为  $-42 \sim 101$  MPa;横向残余应力及法向残余应力相对较小。

2) FSW 焊接件的纵向残余应力在轴肩范围内为残余拉应力,残余拉应力最大值处于轴肩边缘的热影响区;前进侧的残余拉应力峰值大于后退侧的残余拉应力峰值;轴肩区外为平衡的残余压应力;焊接件上层区域的最大残余拉应力小于焊接件下层区域。

3) TIG 焊接件的纵向残余应力在焊接区内为残余拉应力,焊接区外为平衡的残余压应力;残余拉应力最大值处于焊缝边缘;焊接件上层区域的最大残余拉应力小于焊接件下层区域。

4) FSW 与传统熔化焊相比,引入的残余应力较小,有助于延长工件寿命和提高服役性能。

感谢德国亥姆霍兹柏林材料与能源研究中心 Wimpory 博士在中子衍射实验和数据处理方面给予的支持和帮助。

### 参考文献:

- [1] 钟掘,何振波. 航空航天用铝合金的研究及发展方向[M]//中国新材料产业发展报告(2006)——航空航天材料专辑. 北京:化学工业出版社, 2006:45-46.
- [2] TARNG Y S, TSAI H L, YEH S S. Modeling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert gas welding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, 39(9): 1 427-1 431.
- [3] 宋晓村,朱政强,陈燕飞. 搅拌摩擦焊的研究现状及前景展望[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(13): 5-7.  
SONG Xiaocun, ZHU Zhengqiang, CHEN Yanfei. Research status and prospect of friction stir welding[J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(13): 5-7 (in Chinese).
- [4] WITHERS P J, BHADESHIA H K D H. Residual stress, part 1: Measurements[J]. *Materials Science & Technology*, 2001, 17(4): 355-365.
- [5] 李亭,史清宇,李红克,等. 铝合金摩擦搅拌焊接头残余应力分布[J]. *焊接学报*, 2007, 28(6): 105-108.  
LI Ting, SHI Qingyu, LI Hongke, et al. Residual stress distribution of aluminum friction stir welding sample[J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2007, 28(6): 105-108 (in Chinese).
- [6] STARON P, KOCAK M, WILLIAMS M, et al. Residual stresses in friction stir welded Al sheets [J]. *Physical B: Condensed Matters*, 2004, 350(1-3): 491-493.
- [7] 李庆庆,宋建岭,彭江涛,等. TIG 焊接头残余应力分布[J]. *焊接*, 2016(1): 54-57.  
LI Qingqing, SONG Jianling, PENG Jiangtao, et al. Residual stress distribution of tungsten inert welding sample[J]. *Welding and Joining*, 2016(1): 54-57(in Chinese).
- [8] WOO W C, EM V, MIKULA P, et al. Neutron diffraction measurements of residual stresses in a 50 mm thick weld[J]. *Material Science and Engineering*, 2011, A528: 4 120-4 124.
- [9] STEUWER A, PEEL M J, WITHERS P J. Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082: The effect of process parameters on residual stress[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 441: 187-196.
- [10] ALLEN A J, HUTCHING M T, WINDSOR C G, et al. Neutron diffraction methods for the study of residual stress fields[J]. *Advanced Physics*, 1985, 34(4): 445-473.
- [11] 柴鹏,梁国红,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, 81-82.  
CHAI Peng, LUAN Guohong, GUO Delun, et al. Technology of friction stir welding residual stress distribution and controlling[J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2005, 26(11): 79, 81-82(in Chinese).
- [12] TERASAKI T, AKIYAMA T. Mechanical behavior of joints in FSW residual stress, inherent strain and heat input generated by friction stir welding[J]. *Welding in the World*, 2003, 47(11-12): 24-31.
- [13] 张胜斌,左敦稳,宋波,等. 2024 铝合金搅拌摩擦焊残余应力分布研究[J]. *焊接技术*, 2014, 8: 26-28, 31.  
ZHANG Shengbin, ZUO Dunwen, SONG Bo, et al. Research on residual stress distribution of friction stir welding in 2024 aluminum alloy[J]. *Welding Technology*, 2014, 8: 26-28, 31.
- [14] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除[M]. 北京:中国石化出版社, 2004.
- [15] 姜丕洋. 2219 铝合金 TIG 焊及 FSW 焊残余应力研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2016.
- [16] 王磊,回丽. 摩擦搅拌焊接过程残余应力的中子衍射法测量分析[J]. *无损检测*, 2011, 34(6): 33-36.  
WANG Lei, HUI Li. Measurement and analysis of residual stresses in friction stir welding process[J]. *Nondestructive Testing*, 2011, 34(6): 33-36(in Chinese).