

2219 铝合金 FSW 接头残余应力分布特点

杜 杨<sup>1</sup>, 李 桓<sup>1</sup>, 罗传光<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 天津市现代连接技术重点实验室,天津 300072;  
2. 中国航天科技集团公司 长征机械厂,成都 610100)

**摘 要:**采用压痕应变法测量 2219-T87 高强铝合金 FSW 试板与筒体结构上典型位置的残余应力. 结果表明,在试板上接头残余应力呈不对称分布,焊缝上的纵向残余应力数值高于横向残余应力,纵向应力的最大拉应力出现在焊缝中心位置,最大压应力出现在后退侧轴肩外侧,横向残余应力的最大压应力出现在前进侧轴肩边缘;筒体结构的环缝上,纵向残余应力呈较大拉应力,横向残余应力的数值较小,纵缝接头处残余应力关于焊缝中心呈对称分布,纵向残余应力在焊缝上呈拉应力,横向残余应力在焊缝上呈压应力;压力试验使结构件上部分应力释放,应力数值略有下降.

**关键词:** 2219 铝合金; 搅拌摩擦焊; 压痕应变法; 残余应力

**中图分类号:** TG 404      **文献标识码:** A      **doi:**10.12073/j.hjxb.20150814003

0 序 言

用压痕应变法检测金属材料残余应力在近年来得到了较快的发展与应用<sup>[1]</sup>,其原理是由压入的球形压痕产生材料流变引起受力材料的松弛变形,该局域塑性变形始终处于周围弹性材料的约束之中,通过应变仪测得由压痕自身产生的弹塑性区与残余应力作用下周围应力应变场叠加产生的应变变化量,得到残余应变大小,利用胡克定律求出残余应力值. 在检测时,用电阻应变花作为测量敏感元件,并在事先对被测材料进行标定得到材料弹性应变与应变增量之间的关系<sup>[2]</sup>. 陈怀宁等人<sup>[3-4]</sup>已对压痕应变法的测量原理与工程应用进行深入的探究. 压痕应变法近于无损的检测特点满足精密构件的测量要求,例如,对于高强铝合金 LD10 来说,在母材上压痕深度小于 0.08 mm,在焊缝热影响区压痕深度小于 0.1 mm,且所有压痕直径均小于 2 mm,因此可以认为压痕应变法已达到微损甚至基本达到无损检测的需求. 压痕应变法测量操作简单,仪器价格合理且携带方便,测量结果准确度高,适用材料广泛.

随着高强铝合金在船舶、机车车辆、航天等领域的广泛应用,搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)技术受到越来越多的关注<sup>[5]</sup>,其中,搅拌摩擦焊接头的残余应力状态及分布成为当前工程应用研究的热

点和难点<sup>[6]</sup>. 由于残余应力的存在会降低结构的刚度和稳定性,在温度和介质的作用下还会影响结构的疲劳强度、抗脆断能力和抗应力腐蚀开裂能力. 目前已有不少焊接工作者对高强铝合金 FSW 接头残余应力分布进行研究, Livan 等人<sup>[7-9]</sup>研究发现,纵向应力较横向应力在数值上大,在轴肩范围内为拉应力,在焊缝中心出现低应力点,在轴肩范围外为压应力,且纵向残余应力最大值出现在轴肩边缘;张津等人<sup>[10]</sup>研究表明 2024-T351 铝合金 FSW 接头厚度中心层显微硬度分布呈 W 形,两个硬度极小值位于热影响区,与 XRD 拉应力分量极大值所在位置相同. 以上这些研究成果主要针对铝合金 FSW 试板残余应力分布特点<sup>[11-13]</sup>,但对于大型铝合金焊接结构件残余应力状态的研究还较少,因此,文中采用压痕应变法对 2219-T87 高强铝合金 FSW 结构的焊后残余应力状态及分布进行了检测,并与其焊接试板的状态作了对比.

1 试验方法

试验使用的残余应力测试仪器是由中国科学院沈阳金属研究所研发的 KJS-3 型压痕法应力测试仪,应变片选用中航电测仪器股份有限公司生产的 BA120-1BA(11)-ZKY 型应变花,灵敏度系数为 2.05,该系统测量精度为 ±15 MPa. 按照国家标准 GB/T 24179-2009《金属材料 残余应力测定 压痕应变法》要求,在试验测量之前,需要对被测材料

收稿日期: 2015-08-14  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475325); 天津市应用基础与前沿技术研究计划资助项目(14JCYBJC19100)

2219-T87 状态的铝合金进行标定. 测量过程分为四个步骤, 被测构件的表面准备、应变片的粘贴、压痕产生和数据处理.

## 2 试板上残余应力测量及分布特点

试验对两块尺寸为 500 mm × 300 mm × 6 mm 的 2219-T87 状态铝合金进行 I 形对接 FSW 试验, 搅拌头尺寸及焊接工艺参数如表 1 所示.

表 1 搅拌头尺寸及 2219-T87 试板 FSW 工艺参数  
Table 1 Size of stir-head and parameters in FSW of 2219-T87 aluminum alloys test plate

| 搅拌针尺寸            |                  | 搅拌头<br>转速 $n/$<br>( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 搅拌头<br>行进速度 $v/$<br>( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 搅拌头<br>倾角<br>$\alpha/(^{\circ})$ |
|------------------|------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 直径 $d/\text{mm}$ | 针长 $h/\text{mm}$ |                                                        |                                                           |                                  |
| 6                | 5.57             | 600                                                    | 180                                                       | 2.5                              |

对焊后试板进行残余应力测量, A、B 两组测量位置如图 1 所示, 图中黑色方块表示应变片的粘贴位置. A 组试验中测量点 6 位于焊缝中心, 点 5、点 7 也在焊缝上, 点 1~6 之间的距离依次为 25、20、15、15 和 8 (mm), 点 7~11 分别与点 5~1 关于焊缝中心线对称. B 组试验中测量点 18 位于焊缝中心, 点 17、点 19 也在焊缝上, 点 12~18 之间的距离依次为 20、15、10、10、8 和 8 (mm), 点 19~24 分别与点 17~12 关于焊缝中心线对称. 焊缝宽度为 22 mm, A、B 两组测量间距为 40 mm, 图中虚线表示焊缝中心位置. 记焊缝中心线为零位置, 前进侧为正方向, 后退侧为负方向, 纵向(沿焊缝方向)残余应力  $\sigma_x$  (MPa),

横向(垂直焊缝方向)残余应力  $\sigma_y$  (MPa). 测量结果见图 2.

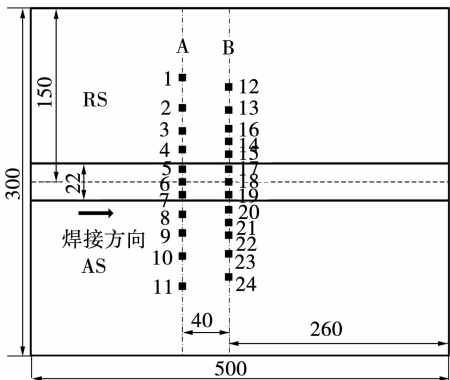


图 1 试板残余应力测量位置示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic of residual stress measuring positions on test plate

在图 2a 中,纵向残余应力  $\sigma_x$  与横向残余应力  $\sigma_y$  关于焊缝中心呈不对称分布. 在焊缝上纵向残余应力  $\sigma_x$  在数值上明显大于横向残余应力  $\sigma_y$ . 纵向残余应力  $\sigma_x$  在焊缝上为拉应力,且最大拉应力在焊缝中心位置(点 6), $\sigma_x$  沿垂直焊缝方向快速过渡为压应力,最大压应力出现在后退侧的轴肩边缘外侧(点 4),在远离焊缝方向  $\sigma_x$  数值逐渐减小,在后退侧试板边缘有增加趋势(点 1,点 2). 横向残余应力  $\sigma_y$  在被测的 11 个位置均表现为压应力,后退侧轴肩边缘(点 5)的  $\sigma_y$  要小于前进侧焊缝上靠近轴肩边缘(点 7)的  $\sigma_y$ ,且  $\sigma_{y7}$  为最大压应力, $\sigma_y$  沿垂直焊缝方向逐渐减小,最小压应力在前进侧距离焊缝中心线 58 mm 处测得(点 10),在靠近试板边缘处(点 1,点 11) $\sigma_y$  压应力有逐渐增大的趋势.

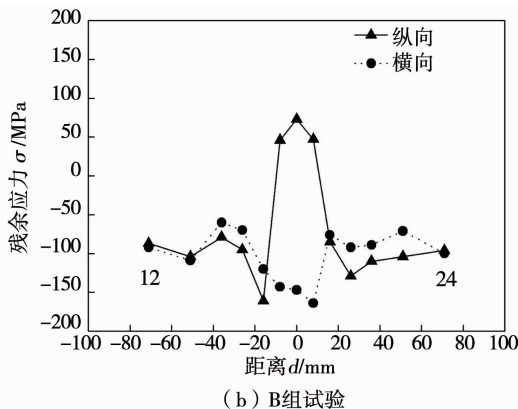
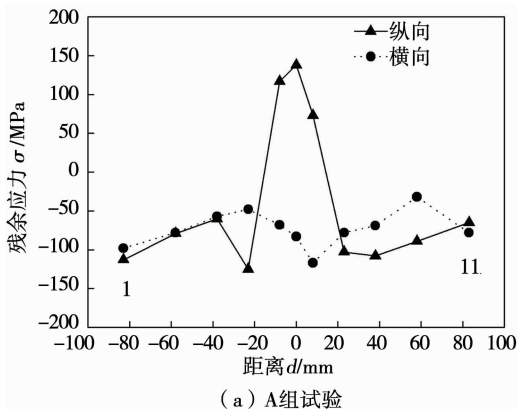


图2 试板残余应力测量结果分布图

Fig. 2 Distribution diagrams of residual stress measuring results on test plate

在图 2b 中,纵向残余应力  $\sigma_x$  与横向残余应力  $\sigma_y$  关于焊缝中心也呈不对称分布. 在焊缝上纵向残余应力  $\sigma_x$  在数值上同样大于横向残余应力  $\sigma_y$ . 纵向残余应力  $\sigma_x$  在焊缝上为拉应力,且最大拉应力在焊缝中心位置(点 18),  $\sigma_x$  沿垂直焊缝方向快速过渡为压应力,最大压应力出现在后退侧的轴肩边缘外侧(点 16),向母材方向压应力减小. 横向残余应力  $\sigma_y$  在被测的 13 个位置均表现为压应力,后退侧轴肩边缘(点 17)的  $\sigma_y$  要小于前进侧轴肩边缘(点 19)的  $\sigma_y$ ,且  $\sigma_{y,19}$  为最大压应力,  $\sigma_y$  沿垂直焊缝方向逐渐减小,最小压应力在后退侧距离焊缝中心线 36 mm 处测得(点 14),在靠近试板边缘处(点 13,点 24)  $\sigma_y$  压应力有逐渐增大的趋势.

试板上的残余应力整体呈现的分布规律为纵向残余应力  $\sigma_x$  与横向残余应力  $\sigma_y$  关于焊缝中心呈不对称分布. 在焊缝上纵向应力  $\sigma_x$  在数值上明显大于横向残余应力  $\sigma_y$ . 纵向应力  $\sigma_x$  在焊缝上呈拉应力,最大拉应力出现在焊缝中心位置,母材处为压应力,最大压应力出现在后退侧轴肩边缘外侧. 横向应力  $\sigma_y$  在试验测量的 24 个位置均表现为压应力,最大压应力出现在前进侧焊缝上靠近轴肩边缘,沿垂直焊缝方向从焊缝中心到母材,  $\sigma_y$  先减小,在靠近试板边缘处  $\sigma_y$  压应力有逐渐增大的趋势.

2219 铝合金 FSW 试板上这种不对称的残余应力分布特点与 FSW 过程中金属不均匀的塑性流动有关. 焊缝区直接受到搅拌头的搅拌作用,温度升高,是残余应力主要集中的区域,前进侧的塑性金属在搅拌头的搅拌作用下一部分向搅拌头前侧流动,一部分向搅拌头后侧流动,当搅拌头离开后温度降低,塑性金属开始凝固并受到周围母材的拉应力. 后退侧的塑性金属在搅拌头的作用下向搅拌头的后方流动,在搅拌头的后方受到压应力作用,在凝固过程中又受到拉应力作用. 试验结果表明,在焊缝上的纵向残余应力均为拉应力,且最大拉应力出现在焊缝中心,焊缝上的横向拉应力均为压应力,且最大压应力出现在前进侧靠近轴肩边缘的焊缝上,母材上均为压应力.

3 结构件残余应力测量及分布特点

试验采用压痕应变法对圆周长约为 10 m、板厚为 5.5 mm 的 2219-T87 状态铝合金搅拌摩擦焊筒体结构进行残余应力测量. 对典型的 FSW 对接环缝、纵缝及环缝上的 T 形接头和首尾相接位置进行压力试验前后的残余应力测量,搅拌摩擦焊焊缝宽 22 mm. 在压力试验(打压至设计压强 0.5 MPa)后

FSW 环缝上的部分典型位置上残余应力分布情况如图 3. 图中粗实线圆环表示 FSW 环缝位置,细实线为纵向残余应力数值的连线,虚线为横向残余应力数值的连线.

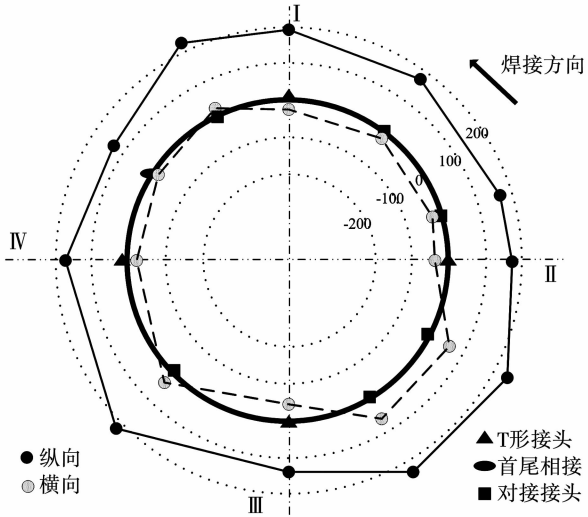


图 3 FSW 环缝残余应力测量结果分布(圆环为应力数值刻度)  
Fig. 3 Distribution diagrams of residual stress measuring results of circumferential weld

图 3 中在环焊缝上 11 个不同位置测得的纵向应力  $\sigma_x$  均表现为拉应力,且  $\sigma_x$  最大值出现在第 II ~ III 象限对接接头位置,约为 220 MPa,  $\sigma_x$  最小值出现在第 IV ~ I 象限的环缝首尾相接处,约为 150 MPa. 该 11 个位置测得的横向应力  $\sigma_y$  均为数值较小的拉应力或压应力,在第 I ~ II 象限的 T 形接头和对接环缝上测得的  $\sigma_y$  集中表现为数值较小的压应力,在第 II ~ III 象限的对接环缝上  $\sigma_y$  表现为数值较小的拉应力,在整个 FSW 环缝上测得的纵向残余应力值  $\sigma_x$  比横向残余应力值  $\sigma_y$  要大. 在图 3 中第 IV 象限的 T 形接头与纵缝位置测量打压前后的残余应力,测量位置见图 4,测量结果分别见图 5a, b.

图 4 中黑色小方块表示应变片粘贴位置,点 1,点 2,点 3 和点 5 均位于焊缝中心线上. 点 1 为打压试验前残余应力测量位置,点 2 为打压至使用压强(0.385 MPa)后残余应力测量位置,点 3,点 4,点 5 和点 6 为打压至设计压强后残余应力测量位置.

由图 5a 可知,与打压前点 1 的残余应力数值相比,打压后的点 2 和点 3 处的残余应力数值稍有下降,试验中测得的纵向残余应力数值,  $\sigma_{x1}$  为 212 MPa,  $\sigma_{x2}$  为 190 MPa,  $\sigma_{x3}$  为 174 MPa,可见在打压前后残余应力逐渐减小,相比较纵向残余应力,横向残余应力在打压前后的应力数值也有所降低,但

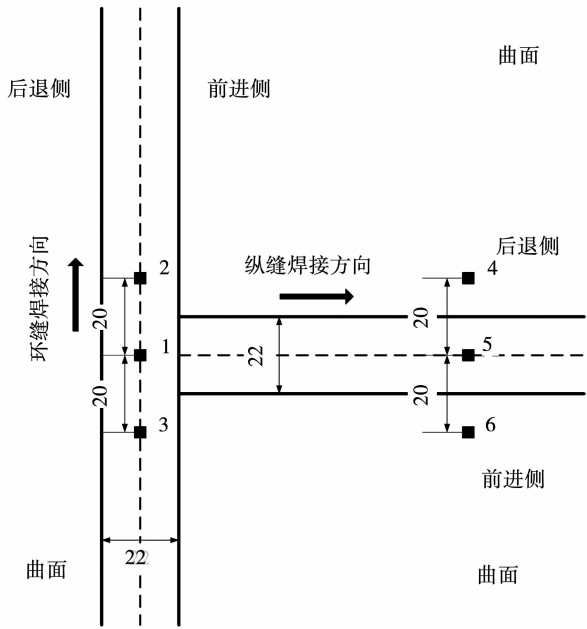


图 4 T 形接头残余应力测量位置示意图 (mm)

Fig. 4 Schematic of residual stress measuring positions of T-junction

下降幅度较小. 由图 5b 可知,在纵缝处残余应力关于焊缝中心呈对称分布. 焊缝中心点 5 的纵向残余应力  $\sigma_{x5}$  为拉应力,横向残余应力  $\sigma_{y5}$  为压应力,焊缝两侧点 4,点 6 的纵向残余应力 ( $\sigma_{x4}$  和  $\sigma_{x6}$ ) 与横向残余应力 ( $\sigma_{y4}$ ,  $\sigma_{y6}$ ) 均为压应力.

筒体上压力试验后的残余应力整体呈现以下分布规律,环缝上的纵向残余应力  $\sigma_x$  呈数值较大的拉应力,横向残余应力  $\sigma_y$  呈数值较小的拉应力或压应力. 在纵缝位置残余应力呈对称分布,纵向应力  $\sigma_x$  在焊缝上呈拉应力,横向残余应力  $\sigma_y$  在焊缝上呈压应力,母材处残余应力均为压应力. 压力试验后一部分应力得以释放,T 形接头处的残余应力数值略有减小.

2219-T87 铝合金 FSW 在筒体上的残余应力分布特点与试板上的残余应力分布特点存在较大差异. 环缝上的  $\sigma_x$  数值比试板焊缝上的  $\sigma_x$  数值要大,这是因为对筒体结构而言,其纵向收缩的自由度比试板的收缩自由度大,较大的纵向收缩自由度可使纵向应力减小,但该筒体的半径和壁厚较大,因此纵

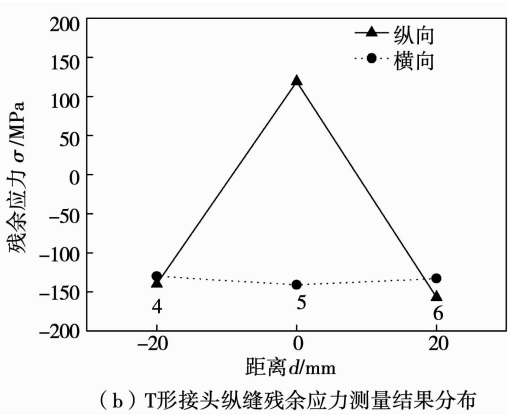
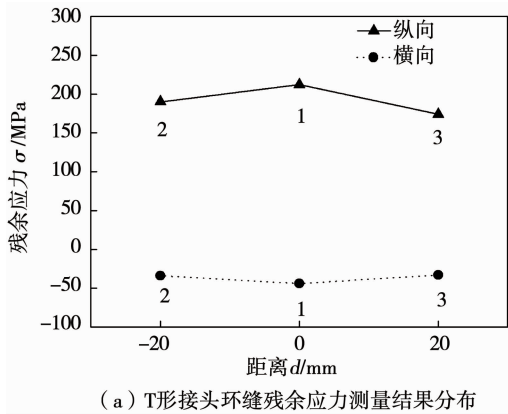


图 5 T 形接头残余应力测量结果分布

Fig. 5 Distribution diagrams of residual stress measuring results of T-junction

向残余应力  $\sigma_x$  最终表现为数值较大的拉应力. 另外,在试板上残余应力关于焊缝中心呈不对称分布,但在筒体纵缝处的残余应力关于焊缝中心呈对称分布,可知在尺寸较大的筒体结构件上,前进侧与后退侧的残余应力分布差异表现得并不明显.

#### 4 结 论

(1) 采用压痕应变法可以准确可靠快速的测量 2219 铝合金试板和筒体结构的残余应力分布情况,其中试板上的测量结果与已往的结果呈现较好的一致性,这说明用压痕应变法测量高强铝合金残余应

力是有效可行的.

(2) 2219-T87 铝合金试板上的残余应力分布特点:纵向残余应力  $\sigma_x$  与横向残余应力  $\sigma_y$  关于焊缝中心呈不对称分布,前进侧与后退侧的残余应力存在较大差异. 在焊缝上,纵向残余应力  $\sigma_x$  的数值高于横向残余应力  $\sigma_y$ ,纵向应力  $\sigma_x$  的最大拉应力出现在焊缝中心位置,最大压应力出现在后退侧轴肩外侧,横向残余应力  $\sigma_y$  的最大压应力出现在前进侧的轴肩边缘. 与前进侧相比,后退侧轴肩边缘处的纵向应力较大,横向应力较小,母材处残余应力均为压应力.

(3) 2219-T87 铝合金筒体上压力试验后的残

余应力分布特点:在环缝上,纵向残余应力  $\sigma_x$  呈较大拉应力,横向残余应力  $\sigma_y$  呈数值较小的压应力或拉应力。在纵缝处纵向残余应力  $\sigma_x$  与横向残余应力  $\sigma_y$  关于焊缝中心呈对称分布,压力试验使部分应力释放,使应力数值稍有下降。与试板上的残余应力分布特点相比,二者的差异在于,在结构件的环缝上纵向残余应力数值增大,而在筒体纵缝处的焊缝前进侧与后退侧的应力差异表现不明显;二者的相同之处在于:焊缝上的纵向残余应力均为拉应力,焊缝上的横向残余应力均为压应力或数值较小的拉应力,母材处均为压应力。

(4) 残余应力的测量结果会受到实际焊接接头经历的热循环所导致材料性能变化的影响。另外,试验中存在测量误差,如仪器误差、人为测量误差等。测试结果的误差可控制在 30 ~ 50 MPa 之内。

## 参考文献:

- [1] 林丽华, 陈立功, 顾明元. 球面压痕测量残余应力试验方法研究[J]. 机械强度, 1998, 20(4): 303-306.  
Lin Lihua, Chen Ligong, Gu Mingyuan. A new method for determining residual stress-a spherical indenter pressed on the structure surface and added a additional stress field[J]. Journal of Mechanical Strength, 1998, 20(4): 303-306.
- [2] 中国科学院金属研究所 GB/T24179-2009, 金属材料残余应力测定压痕应变法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [3] 陈怀宁, 林泉洪, 陈 静, 等. 冲击压痕法测量残余应力中的塑性区问题[J]. 焊接学报, 2001, 22(5): 21-24.  
Chen Huaining, Lin Quanhong, Chen Jing, et al. On plastic zone around an indentation during stress determination by impact indentation method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(5): 21-24.
- [4] 王者昌, 陈怀宁. 关于焊接应力变形两个问题的进一步探讨[J]. 焊接学报, 2002, 23(5): 69-74.  
Wang Zhechang, Chen Huaining. Further discussion on two problems of welding stress and deformation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(5): 69-74.
- [5] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 王国庆, 赵衍华. 铝合金的搅拌摩擦焊接[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [7] Livan Fratini, Bernardo Zuccarello. An analysis of through-thickness residual stresses in aluminium FSW butt joints[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006(46): 611-619.
- [8] 林 森, 刘拥军, 周友龙, 等. 6061 铝合金 FSW 接头残余应力分析[J]. 电焊机, 2013, 43(11): 144-146.  
Lin Sen, Liu Yongjun, Zhou Youlong, et al. Study on residual stress analysis of 6061 aluminum alloy welding joint by FSW[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(11): 144-146.
- [9] 陈 健, 吕 林, 方 锴. 超声冲击改善 6061 铝合金焊接残余应力的数值模拟[J]. 焊接学报, 2013, 34(12): 88-92.  
Chen Jian, Lü Lin, Fang Kai. Numerical simulation of ultrasonic impact treatment on 6061 aluminum alloy welding residual stress[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(12): 88-92.
- [10] 张 津, 李 峰, 郑 林, 等. 2024-T351 铝合金搅拌摩擦焊焊件内部残余应力测试[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 28-34.  
Zhang Jin, Li Feng, Zheng Lin, et al. Inter residual stresses in the friction stir weldment of 2024-T351 Al alloy determination by short wavelength X-ray diffraction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 28-34.
- [11] Luciano Buglioni, Leonardo N Tufaro. Thermal cycles and residual stresses in FSW of aluminum alloys: experimental measurements and numerical models[J]. Procedia Materials Science, 2015(9): 87-96.
- [12] 李 娜. 铝合金搅拌摩擦焊残余应力检测与数值模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [13] 束 彪, 国旭明, 张春旭. 2195 铝锂合金搅拌摩擦焊接头组织及性能[J]. 航空材料学报, 2010, 30(8): 12-15.  
Shu Biao, Guo Xuming, Zhang Chunxu. Microstructure and properties of friction stir welded joint of 2195 Al-Li alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials. 2010, 30(8): 12-15.

**作者简介:** 杜 杨, 女, 1990 年出生, 硕士研究生. 主要从事铝合金焊接工艺性能及仿真的研究. Email: du\_yang823@163.com

**通讯作者:** 罗传光, 男, 博士研究生, 工程师. Email: chg\_luo@163.com