

2024 铝合金搅拌摩擦焊残余应力分布研究

Research on Residual Stress Distribution of Friction Stir Welding in 2024 Aluminum Alloy

南京航空航天大学机电学院
中国搅拌摩擦焊中心

张圣斌 左敦稳 宋波
董春林

[摘要] 采用 9 组不同的焊接参数,利用分割释放法对 3.2mm 厚 2024-T3 铝合金板搅拌摩擦焊对接板进行了上下两表面纵向残余应力的测量,然后对其分布规律进行了分析研究。结果表明,上表面的纵向残余应力呈现双峰值,峰值出现在轴肩两侧边缘,不对称分布,前进侧残余拉应力普遍高于后退侧;下表面呈现单峰值,峰值出现在焊缝中心附近,靠近前进侧;下表面的纵向残余应力峰值普遍高于上表面;上下两表面的纵向残余应力峰值会随着转速的增加或者焊速的减小而减小,即会随着热输入量的增加而减小。

关键词: 2024-T3 搅拌摩擦焊 纵向残余应力 切割释放法

[ABSTRACT] 2024-T3 aluminum alloy sheet with 3.2mm in thickness is friction stir welded in 9 different parameters, and the upper and lower longitudinal surface residual stresses are measured by using cutting-release method. The results show that the longitudinal residual stress on the upper surface presents double-peak, and the two peaks distribute asymmetric in the two sides of the edge. The tensile residual stress on the advancing side is generally higher than that on the retreating side. The residual stress on the lower surface presents single peak, and the peak appears near the center of the weld, close to the advancing side. The peak longitudinal residual stress on the lower side is generally higher than that on the upper surface. The peak residual stress on the upper and lower surfaces will decrease as the welding speed decreases or the rotation speed increases, in other words, the peak residual stress will decrease as the heat-input increases.

Keywords: 2024-T3 Friction stir welding Longitudinal residual stress Cutting-release method

铝合金尤其是 2XXX 和 7XXX 系列硬铝和超硬铝合金,具有良好的耐蚀性、导电性、延展性,且外形美观等一系列优点^[1]。但是它们难以用传统的熔焊进行焊接。搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是

英国焊接研究所(TWI)于 1991 年发明的一种针对铝合金、镁合金的新型固相焊接工艺,与传统的熔焊相比,FSW 具有固态连接、焊接缺陷少、接头残余应力和变形小、环保无污染等优点,迅速成为在制造镁铝等合金结构中可替代熔焊的非常具有潜力的新型工业连接技术^[2]。焊接后的残余应力对焊接构件承受静载能力、脆性断裂、疲劳强度、结构精度和应力腐蚀等都有重要影响。由于搅拌摩擦焊接过程中的热输入量比较低,因此可以获得比较小的残余应力。Staron 等^[3]采用中子衍射法对 6.3mm 厚的 2024-T351 铝合金搅拌摩擦焊对接接头残余应力进行研究,发现接头纵向残余应力分布呈现出双峰特征;李亭等^[4]认为机械搅拌和焊接温度场的叠加作用会对焊缝两侧纵向残余应力的分布产生影响;Lombard 等^[5]在 6mm 厚 AA5083-H321 铝合金的 FSW 中发现,残余拉应力分布宽度及其峰值和焊接热输入量大小成线性关系,单位长度热输入量的增加会增加残余拉应力的分布宽度,但会降低残余拉应力的峰值。

本试验测量了 9 种不同焊接参数下的 3.2mm 2024-T3 铝合金的残余应力,得到了其在不同转速和不同焊速下的上下两表面的分布曲线,并对结果进行了分析研究。

1 试验方法

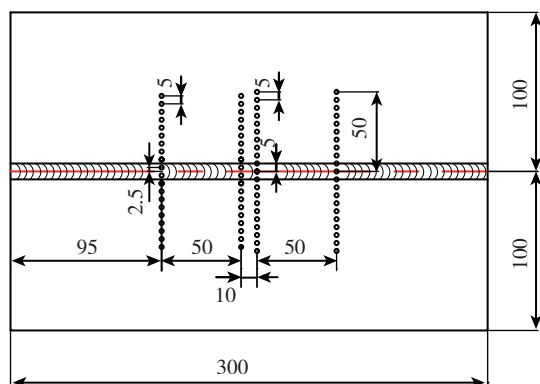
试验采用圆锥形带螺纹搅拌头,轴肩直径为 10mm,下压量为 0.3mm。采用 9 组不同的焊接参数,对 200mm × 100mm × 3.2mm 的 2024-T3 铝合金进行了对接焊,然后用分割释放法测量了接头的残余应力。焊接参数见表 1。

试件焊接后,要在试件上钻通孔,用于定位测量。采用分段布置测量孔的方法来加密测量点,其布置情况见图 1(a)。对于长板试件的搅拌摩擦焊接头来说,可

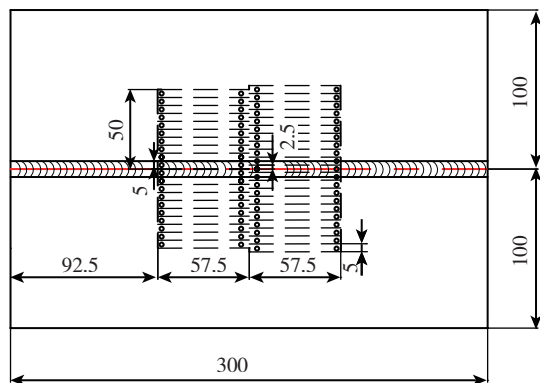
表1 焊接参数

工艺参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
转速 $n / (r \cdot \min^{-1})$	400	600	800	1000	1200	1000	1000	1000	1000
焊速 $v / (mm \cdot \min^{-1})$	300	300	300	300	300	100	150	200	250

认为焊缝中间区域处于稳定区,该区域任一截面上的纵向残余应力的分布都可以代表焊接接头纵向残余应力的分布情况。用 YCY 型机械应变仪测量试件纵向上两点之间的距离,每一数据测量 3 次,求其平均值,得到数据 x_1 。然后为全部释放测量点周围的应力,用线切割将试件沿纵向切条,线切割沿两排小孔中间位置切开,位置离测量孔 2.5mm,其具体尺寸见图 1 (b)。再用 YCY 型机械应变仪测量线切割后相应两点间的距离,每一数据测量 3 次,取其平均值,得到数据 x_2 。最后根据公式 $\sigma_x = -E(x_2 - x_1)/x_1$ (其中 E 是工件的弹性模量,为 72.4GPa) 便可得到试件的纵向残余应力。



(a) 钻孔布置图(mm)



(b) 线切割方案(mm)

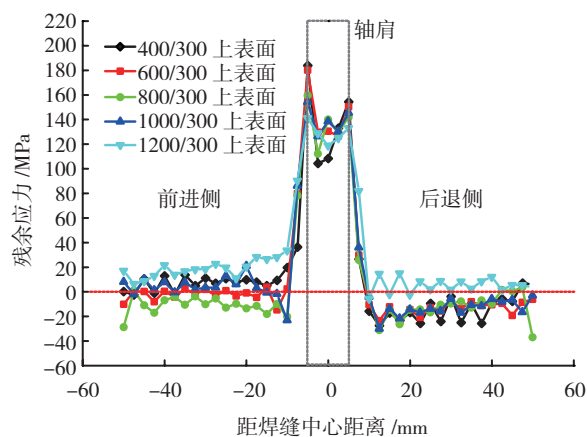
图1 测试方法

Fig.1 Testing methods

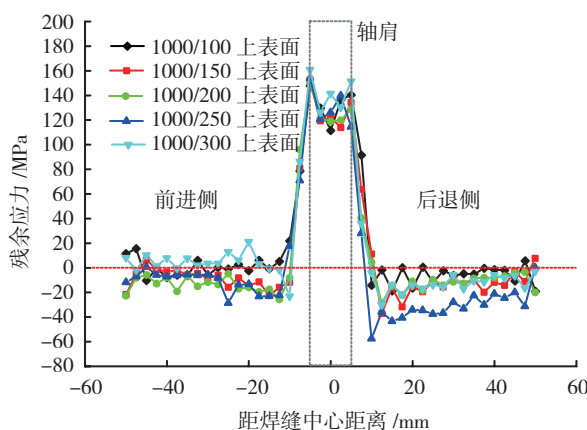
2 试验结果

2.1 上表面纵向残余应力测量结果

由图 2 可以看出,上表面轴肩作用区为纵向残余应力高应力区,呈不对称分布,并且呈现双峰分布特征,峰值出现在轴肩两侧边缘附近;前进侧的应力均高于后退侧,在轴肩区以外残余应力值迅速降低,在远离焊缝区转变为压应力或是很小的拉应力。在所有不同的焊接参数下,上表面残余应力峰值在 130~187MPa 范围内变化。



(a) 不同转速上表面残余应力分布曲线



(b) 不同焊速上表面残余应力分布曲线

图2 不同参数下上表面纵向残余应力分布

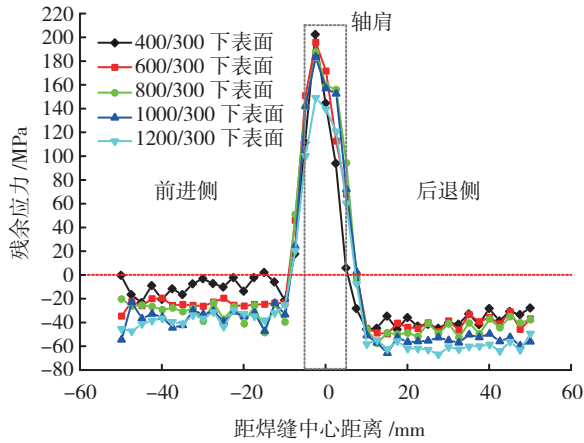
Fig.2 Upper residual stress distribution with different parameters

2.2 下表面纵向残余应力测量结果

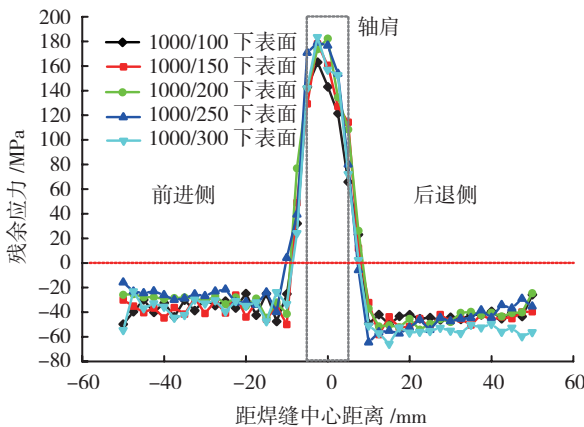
由图 3 可以看出,轴肩作用区也是下表面的纵向残余应力高应力区,呈现单峰分布特征,并且分布左右不对称,峰值出现在焊缝中心附近,偏向前进侧;在轴肩区以外残余应力值迅速降低,在远离焊缝区转变为较小的压应力。在所有不同的焊接参数下,下表面残余应力峰值在 150~202MPa 范围内变化。

3 分析与讨论

上表面的纵向残余应力均呈“M”形分布,峰值并非出现在焊核中心,而是出现在搅拌头轴肩边缘区域,这是由于搅拌头的搅拌和高温使中心处材料发生了动态再结晶,一定程度上降低了焊缝中心处的应力水平;下表面的纵向残余应力分布呈“单峰”分布特征,这是因为在焊接过程中下表面的材料只受到搅拌针的搅拌作用,而不受轴肩的摩擦作用,焊缝中心处所受的机械搅拌最剧烈,材料发生了很大的塑性变形,冷却稳定后



(a) 不同转速下下表面残余应力分布曲线



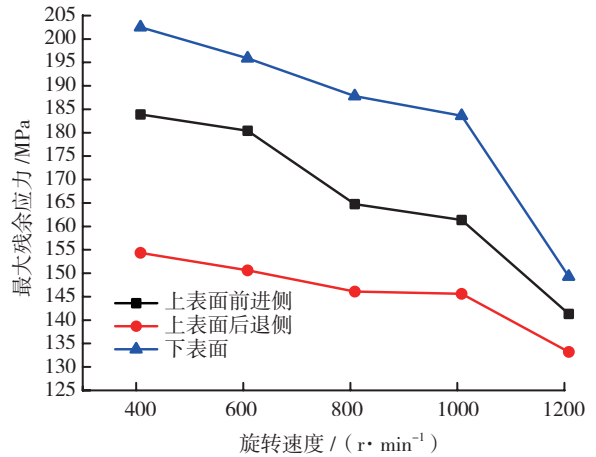
(b) 不同焊速下下表面残余应力分布曲线

图3 不同焊速下下表面残余应力分布
Fig.3 Lower residual stress distribution with different parameters

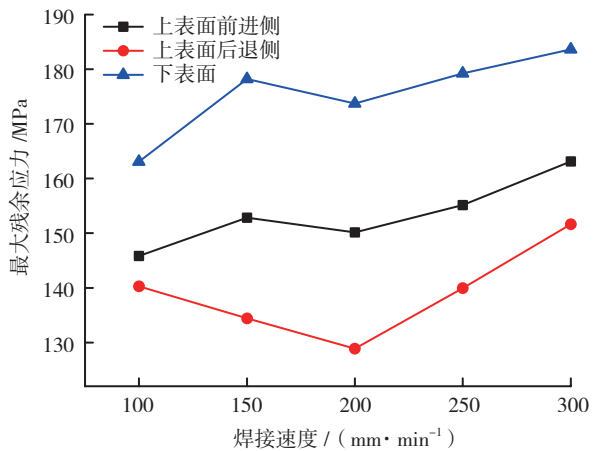
就产生了较高的残余应力。上下两表面的峰值应力均出现于前进侧,这是由于焊接过程中焊接方向和搅拌头旋转方向在前进侧相同,后退侧相反,两侧金属塑性变形的程度不同所致。

图4为不同参数下的峰值残余应力的变化曲线图,可以看出,下表面的残余应力峰值普遍高于上表面,分析认为这是由轴肩的顶锻(碾压)作用和沿厚度方向上的温度场的共同作用造成的:在靠近上表面的焊缝区域,材料受到了轴肩的摩擦作用和顶锻作用,而这对抑制焊后残余应力起着重要作用^[6]。随着厚度的增加,焊缝区得材料不再与轴肩接触,受到的顶锻作用也迅速减小,对残余应力的抑制作用也迅速减小,在焊缝的下表面顶锻力对残余应力的抑制作用近乎为零;此外,随着厚度的增加,温度也迅速的降低,焊缝下表面材料的再结晶程度明显减小,应力释放的程度也就大大降低,从而在下表面形成了较大的残余应力。

无论是改变转速还是焊速,上下两表面的残余应力峰值都有着相同的变化规律,当焊速为300mm/min



(a) 不同转速上下两表面峰值残余应力分布 ($v=300\text{mm/min}$)



(b) 不同焊速上下两表面峰值残余应力分布 ($n=1000\text{r/min}$)

图4 不同参数下上下两表面峰值残余应力分布

Fig.4 Peak residual stress curves with different parameters

不变,转速从400r/min向1200r/min逐渐增加时,残余应力峰值会随着搅拌头转速的增加而减小。当转速为1000r/min不变,焊速从100mm/min向300mm/min逐渐增加时,残余应力峰值会随着焊接速度的增加而增加。从图4中还可以发现,纵向残余应力峰值在不同转速下的变化幅度要大于不同焊速下的变化幅度,也就是说,纵向残余应力对转速变化比较敏感。

转速决定了产热的效率和塑性变形的程度,而焊速决定了焊接时的单位长度上的热输入量^[7]。当搅拌头转速较低时($n \leq 800\text{r/min}$),经X光检测后发现焊缝区域有隧道缺陷,塑性金属的流动不充分,分析认为这是由于转速过低热输入量不足所致,局部区域因此产生了较高的应力集中,应力难以释放,从而形成了较高的残余应力(上表面可达约187MPa,下表面可达约200MPa);在较高的旋转速度下($n > 800\text{r/min}$),焊缝区域的隧道缺陷消失,这时已能够产生充足的热量来支撑

(下转第31页)

(3) 典型缺陷分析。

图3中典型缺陷放大后的形貌见图6所示,分析认为,钎焊过程中,少量未充分排出的钎剂堆积在液态钎料中,钎缝凝固后,形成钎剂残余缺陷。由于坩锅炉钎焊工艺特点所致,钎焊过程中必须使用由卤化物组成的钎剂去除母材表面氧化膜。钎焊后,部分残余钎剂分布在接头钎缝内部,并被凝固的钎缝密封,无法去除,并形成钎剂残余缺陷。

由于钎剂残余缺陷并未影响到钎着率,因此对接头强度及密封性能无直接影响。

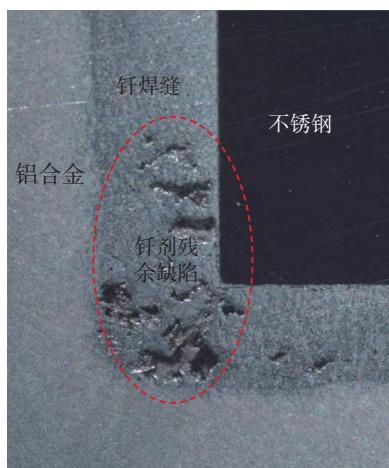


图6 接头内部残余钎剂
Fig.6 Residual brazing flux inside the joint

4 结论

采用坩锅炉钎焊工艺获得的1Cr18Ni9Ti不锈钢与6A02铝合金异种金属钎焊接头外观质量良好,焊脚饱满。钎焊接头由铝合金扩散区、钎缝区(铝合金钎焊缝与钢/铝界面区构成)及不锈钢扩散区组成。其中铝合金钎焊缝主体为Al-Si共晶组织,并存在少量Fe、Cr等元素;钢/铝界面区主要由Al-Fe-Si-Cr/Al-Fe-Si-Ni四元化合物组成。此外,钎缝内部存在一定程度的钎剂残余缺陷,无法去除。

参考文献

- [1] 冯吉才,何鹏,张洪涛. 铝钢异种金属预涂层连接方法: 中国,200810064272. 2.
- [2] 宋建岭,林三宝,杨春利,等. 铝合金/不锈钢预涂层钨极氩弧熔钎焊接头的特性. 中国有色金属学报,2009,19(7): 1209-1215.
- [3] 雷振,于宁,游爱清,等. 5A02/Q235 钢 Nd: YAG 激光—脉冲 MIG 复合热源熔钎连接. 焊接学报,2008,29(7): 21-28.
- [4] 里亚博夫 B P. 铝及铝合金与其他金属的焊接. 北京: 宇航出版社,1990.

(责编 亿霖)

(上接第 28 页)

材料的塑性流动,随着转速的提高,温度也就会越来越高^[1],高热输入就会提供给位错运动更多的能量,残余应力将很有可能得以释放。在比较低的焊速下,单位长度上的热输入量比较高,在远离焊缝区的材料也被加热,这就导致了在搅拌头周围的高温区的宽度增加,进而减小了热梯度,热膨胀不匹配程度也在冷却过程中得以降低,从而表现出较低的残余应力,随着焊速的提高,单位长度上的热输入量逐渐减小,峰值残余应力也就会逐渐地升高。

4 结论

(1) 上表面的纵向残余应力呈现双峰值,峰值出现在轴肩两侧边缘,不对称分布,前进侧残余拉应力普遍高于后退侧;下表面呈现单峰值,峰值出现在焊缝中心偏于前进侧的附近位置。

(2) 温度和顶锻力的共同作用造成了下表面的残余应力峰值普遍高于上表面,在所试验的焊接条件下,上表面残余应力峰值在 130~187MPa 范围内变化,下表面残余应力峰值在 150~202MPa 范围内变化。

(3) 上下两表面的残余应力有着相同的变化规律,当焊速为 300mm/min 不变,转速在 400~1200r/min 变化时,上下两表面的残余应力峰值都会逐渐减小;当转速为 1000r/min 不变,焊速在 100~300mm/min 逐渐增加时,上下两表面的残余应力峰值会逐渐增大,即上下表面的纵向残余应力峰值会随着热输入量的增加而减小。

参考文献

- [1] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接. 北京: 机械工业出版社,2006:321-337.
- [2] Enomoto M. Application of friction stir welding for Al alloy. Light Metal Welding and Construction, 1998, 36(2): 75-79.
- [3] Staron P, Kocak M, Williams M, et al. Residual stress distributions in friction stir welded AL sheets determined by neutron strain scanning//ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research, 2002: 253-256.
- [4] 李亭,史清宇,李红克,等. 铝合金搅拌摩擦焊接头残余应力分布. 焊接学报,2007,28(6):105-108.
- [5] Lombard H, Hattingh D G, Steuwer A, et al. Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds. Material Science and Engineering, 2009, 501(1): 119-124.
- [6] Terasaki T, Akiyama T. Mechanical behavior of joints in FSW residual stress, inherent strain and heat input generated by friction stir welding. Welding in the World, 2003, 47(11-12): 24-31.
- [7] Xu W F, Liu J H, Zhu H Q. Analysis of residual stresses in thick aluminum friction stir welded butt joints. Materials and Design, 2011, 32(4): 2000-2005.

(责编 良辰)