

静止轴肩搅拌摩擦焊接 6005 铝合金的力学和疲劳性能

张 坤¹, 方远方¹, 栾国红¹, 张景榆², 胡 丰²

(1. 中航工业北京航空制造工程研究所 中航工业航空连接技术重点实验室,北京 100024;
2. 中车株洲电力机车有限公司,株洲 412000)

摘 要: 利用静止轴肩搅拌摩擦焊接装置对 4.5 mm 6005 铝合金进行了研究,为满足工程需求,焊接速度设为 1 000 mm/min. 结果表明,静轴肩搅拌摩擦焊接接头随转速的增加,抗拉强度先升高后降低,当转速为2 100 r/min时最高,为 232 MPa,可达母材的 80%;各参数接头正弯和背弯 180°均无裂纹. 在应力循环频率70 Hz、正弦波形、应力比 R 为 0.1 的条件下,对 2 100 r/min 和 1 000 mm/min 参数的接头进行轴向高周疲劳测试,获得接头的 S-N 曲线和疲劳极限,在 $(1-a)$ 置信度 90%,失效概率 $P=5\%$ 条件下,S-N 曲线的下极限为 105 MPa,疲劳断裂主要位于接头的热影响区,疲劳断口分为裂纹萌生区、裂纹扩展区和瞬断区三个区域.

关键词: 静止轴肩搅拌摩擦焊; 6005 铝合金; 力学性能; 疲劳强度

中图分类号: TG 456.9 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20170428001

0 序 言

搅拌摩擦焊是英国焊接所(TWI)在 1991 年发明的一种固态焊接方法,具有绿色、环保、接头强度高、焊接变形小等优点,适用于轻质合金,特别是铝合金的焊接^[1-2]. 近年来,搅拌摩擦焊技术以其独特的优势,广泛地应用于航空、航天、轨道交通等领域,成为铝合金最理想的连接方式^[3-5].

常规搅拌摩擦焊接过程中,焊缝表面出现的弧纹是搅拌摩擦焊典型的一种宏观特征,不利于接头的性能和表面完整性. 尤其在焊接厚板和低热传导系数的合金如钛合金时,由于上表面,特别是轴肩产热量大,而下表面的产热量小,造成接头厚度方向的热梯度不均匀,恶化了接头的连接性能.

静止轴肩搅拌摩擦焊,是最近几年才出现的新型搅拌摩擦焊技术,可有效消除表面弧纹,且焊接过程中轴肩不旋转产热,优化了接头厚度方向的热梯度,改善了厚板及钛合金接头的连接质量.

国内外的研究者对静止轴肩的对接、角接等进行了研究^[6-9]. Li 等人^[7]获得了无缺陷的 2219 铝合金的对接接头;Wynne 等人^[8]的研究结果表明,静轴肩焊接钛合金时可以有效地避免沿焊缝厚度方向组织不均匀的情况;姬书得等人^[9]研究了 6005 铝合金静轴肩搅拌摩擦焊的接头随着转速的变化规律,但是其焊接速度仅为 200 mm/min,还处于试验室研

究阶段,无法进行大规模的工程应用. 因此目前针对静轴肩焊接的研究取得了一定的进展,但都处于实验室研究阶段. 文中以静轴肩搅拌摩擦焊工程化应用为研究背景,在 1 000 mm/min 转速的条件下,开展 6005A 铝合金接头静态力学和疲劳性能及疲劳断口的分析,为该技术在轨道列车上的工程化应用奠定基础.

1 试验方法

所用材料为 4.5 mm 厚的 6005A 铝合金,焊缝为对接形式,试板尺寸为 400 mm × 150 mm × 4.5 mm,母材的抗拉强度为 291 MPa,断后伸长率为 9.83%.

焊前用砂纸去除对接面的氧化层并用乙醇擦拭清洗. 在北京赛福斯特技术有限公司生产的 FSW-LM-2D 型搅拌摩擦焊接设备上焊接. 静轴肩焊接装置由外部静止的轴肩和内部可旋转的搅拌头组成,焊接过程中,外部静止轴肩与内部搅拌头同步沿焊接方向移动并实现焊接. 静止轴肩的内径和外径分别为 8.3 和 16 mm,搅拌针为锥形,其根部直径与端部直径为 8 和 5 mm,针长 4.2 mm.

从工程化角度考虑,选定的焊接速度为 1 000 mm/min,转速为 1 700,1 800,1 900,2 000,2 100,2 200和 2 300 r/min,焊接过程中倾角为 0°.

接头中切取拉伸试样,按照 GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验 第一部分:室温试验方法》在 Z100 型通用拉伸试验仪上进行室温拉伸,切取弯曲

试样,按照 GB/T2653—1989《焊接接头弯曲及压扁试验方法》在 EMSYS 电子万能材料试验机上进行三点弯曲试验,弯曲速率为2 mm/min,弯头直径为 10 mm,记录出现裂纹时的弯曲角度. 从接头横截面切取金相试样,打磨、抛光和侵蚀后,在 Leica DM6000M 型光学显微镜和 Philips X130 型扫描电镜上进行组织观察. 按照 GB/T3075—2008《金属材料疲劳试验 轴向力控制方法》在 QBG-100 型高频疲劳试验机上进行室温轴向高周疲劳性能的测试,疲劳性能测试试样如图 1 所示,应力循环频率为 70 Hz,正弦波形,应力比 $R=0.1$. 循环次数达不到 10^7 为失效,循环次数达到 10^7 为非失效. 按照 GB/T24176—2009《金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法》进行疲劳试验数据的统计和分析,测定焊接接头的疲劳性能的平均 S-N 曲线和疲劳极限. 在 Philips X130 型扫描电镜上观察疲劳断口的形貌特征.



图 1 静轴肩搅拌摩擦 6005 铝合金接头疲劳测试试样
Fig. 1 Fatigue test sample of 6005 aluminum alloy joint after stationary shoulder friction stir welding

2 试验结果与分析

2.1 转速对静轴肩接头力学性能和组织的影响

静止轴肩焊接的接头如图 2 所示,可以看出,焊缝表面光滑,没有弧纹等常规搅拌摩擦焊的特征,且焊缝几乎无飞边,焊缝的厚度基本无减薄. 焊缝中间较光亮的区域是搅拌针影响区,靠近母材的亮度较低的区域为轴肩影响区.

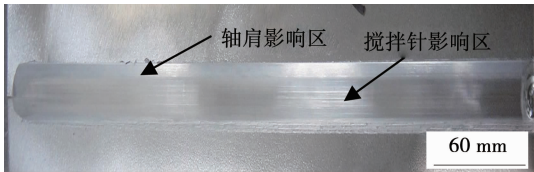


图 2 静轴肩搅拌摩擦焊 6005 铝合金接头的表面形貌
Fig. 2 Upper surface of 6005 AA joint after stationary shoulder friction stir welding

不同转速条件下,接头拉伸过程中的应力应变曲线如图 3 所示,可以看出,不同转速条件下,接头的屈服强度(弹性变形阶段)近似相同,随着转速的提高,接头的抗拉强度先升高后降低,当转速为

2 100 r/min时,接头的抗拉强度最高为 232 MPa,而后随着焊接速度的提高,抗拉强度下降. 且值得注意的是,在 1 700 ~2 300 r/min 这个范围内,抗拉强度的变化值在 15 MPa 以内,这说明在选定的上述工艺参数范围内,接头的性能稳定性较好.

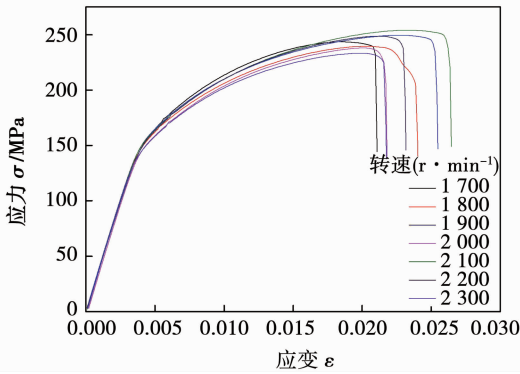


图 3 静轴肩焊接 6005 铝合金接头的应力应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of 6005 aluminum alloys samples after stationary shoulder friction stir welding

试样的正弯和背弯性能的测试结果如图 4 所示,结果表明正弯和背弯 180°均无裂纹产生.



图 4 静轴肩焊接 6005 接头的正弯和背弯试样
Fig. 4 Face and root bending test of 6005 AA joint after stationary shoulder friction stir welding

静轴肩搅拌摩擦焊与常规的搅拌摩擦焊类似,随转速的增加,单位时间内焊接热输入增加,焊接的峰值温度也提高,当焊接温度峰值较低时,材料的流动性较差,在焊接过程中材料可能无法有效填充搅拌头后方的空腔且材料受到的搅拌头搅拌混合的作用差,可能造成弱链接、孔洞甚至隧道等. 当焊接热输入过大时,材料的流动过于充分,导致部分材料被挤出焊缝,也会导致接头的质量下降^[10]. 故在试验中,当转速为 2 100 r/min 时,焊接过程中的峰值温度和焊接过程中的材料受到的作用力使得能够形成最佳的接头.

2 100 r/min,1 000 mm/min 参数条件下接头横

截面的组织如图 5a 所示,可以看出,静轴肩接头的前进侧和后退侧的形貌近似对称,且焊缝厚度方向上没有减薄,和母材等厚,这也是焊缝上表面近乎无飞边的原因。同时,焊核区的中心有 S 线,利用扫描电镜对图 5a 中的方框区域进行分析,得到图 5b,有研究^[10]认为 S 线为焊缝氧化物的残留,被搅拌进入焊缝的内部,6 系铝合金的 S 线较明显,但是 S 线对于材料的性能的影响还没有定论,从试验中可以看出,S 线并没有对接头的静力性能产生不利的影响。

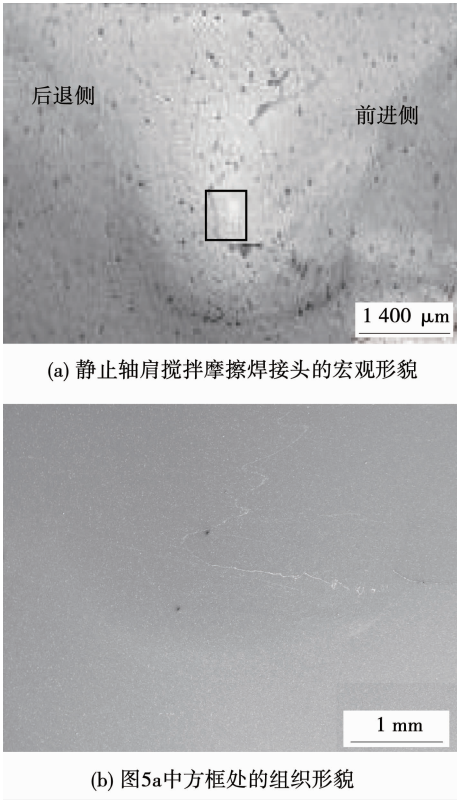


图 5 静止轴肩搅拌摩擦焊接头的组织形貌
Fig. 5 Microstructure of 6005 AA joints after stationary shoulder friction stir welding

2.2 静轴肩接头的疲劳性能及 S-N 曲线

为测定 6005 铝合金静轴肩搅拌摩擦焊接头疲

劳性能的 S-N 曲线及疲劳极限,在 50% 失效概率、不同的应力水平下进行疲劳试验。有限疲劳寿命区段的平均 S-N 曲线数据的获取方法为:以可靠性设计为目的,试验至少需要 30 件试样,在 5 个等间距的应力水平下,每个应力水平测试 6 件试样。应力水平选取疲劳寿命介于 3 个量级之间,如 $5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ 周。

无限疲劳寿命范围疲劳强度采用改进的升降法试验获取数据:根据有限疲劳数据寿命区段的平均 S-N 数据计算出疲劳强度标准偏差 $\hat{\sigma}_y$,升降法应力台阶选择应接近此标准偏差。利用上述 2 个区段试验数据的统计做出 S-N 全曲线图,如图 6 所示。

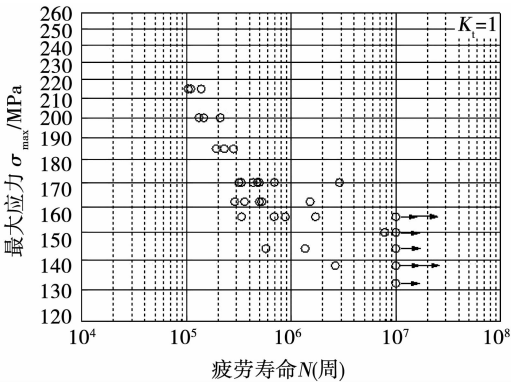


图 6 静轴肩焊接 6005 铝合金接头的疲劳 S-N 曲线
Fig. 6 S-N curves of 6005 aluminum alloys joint after stationary shoulder friction stir welding

由图 6 可以看出,在置信度 90%、失效概率 $P = 5\%$ 的条件下,S-N 曲线下极限的斜线方程为: $x(5) = 9.602\ 56 - 0.022\ 55y - 2.08 \times 0.412\ 3$,平均疲劳极限为 $\bar{y} = 143.4\ \text{MPa}$,此时疲劳极限下极限为 $y(5) = 105.370\ \text{MPa}$ 。

2.3 静轴肩接头的疲劳断口分析

分析疲劳断裂的位置,发现疲劳断裂主要位于靠近焊缝的热影响区。图 7 给出了焊接工艺参数为

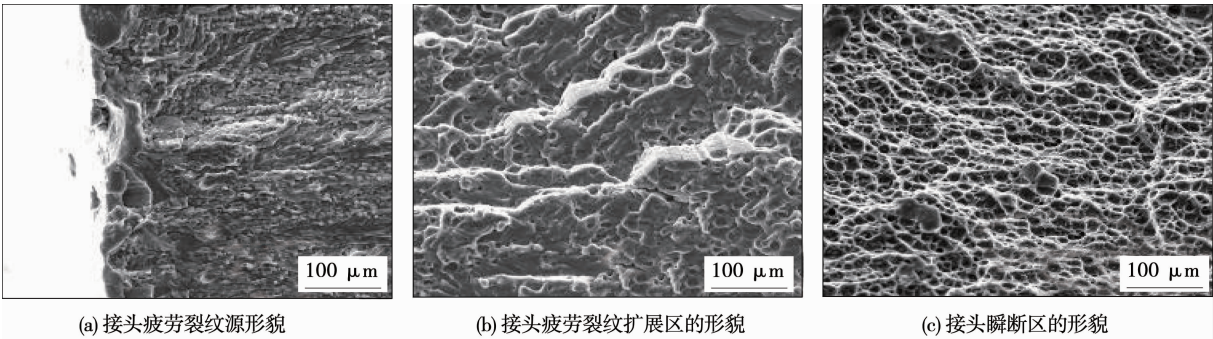


图 7 静轴肩搅拌摩擦焊接头疲劳断口形貌

Fig. 7 Fatigue fractography of 6005 aluminum alloys joint after stationary shoulder friction stir welding

2 100 r/min, 1 000 mm/min 参数下疲劳接头的断口形貌,从图 7a 可以看出,疲劳裂纹源靠近试样的上表面,该区域的组织较光滑、平整、呈扇形分布,图 7b 给出了裂纹扩展区的组织形貌,可以看出,该区域存在解理断裂的河流、台阶花样和疲劳裂纹,该区域占据了疲劳断口的大部分区域,瞬断区的形貌如图 7c 所示,该区域中存在大量的韧窝,主要为韧性断裂。

3 结 论

(1) 利用自主开发的静轴肩焊接装置,实现了 4.5 mm 厚 6005 铝合金的焊接,焊接成形优良,表面光洁,无弧纹、飞边等,焊缝几乎无减薄。

(2) 在焊接速度为 1 000 mm/min 的条件下,随着搅拌针转速的增加,静止轴肩搅拌摩擦焊接头的抗拉强度先升高后降低,在 2 100 r/min 时最高,可达 232 MPa,为母材强度的 80%。

(3) 对 2 100 r/min 和 1 000 mm/min 参数下接头的高周疲劳性能进行了研究,获得了接头的 S-N 曲线,其平均疲劳极限为 143.4 MPa;在置信度 90%、失效概率 5% 的条件下疲劳极限下极限为 105.37 MPa,疲劳断口分为裂纹源区、裂纹扩展区和瞬断区。

参考文献:

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C. Friction stir butt welding: PCT/GB92102203[P]. 1991.
- [2] Sato Y S, Kokawa H. Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2001, 32(12): 3023–3031.
- [3] Schmidt H B, Hattel J H. Thermal modelling of friction stir welding[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(5): 332–337.
- [4] 姬书得, 孟庆国, 史清宇, 等. 搅拌针形状影响搅拌摩擦焊

过程金属塑性流动规律的数值模拟[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 93–96.

Ji Shude, Meng Qingguo, Shi Qingyu, *et al.* Numerical simulation of metal plastic flow in friction stir welding affected by pin shape[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 93–96.

- [5] Wan L, Huang Y X, Lu Z L, *et al.* Effect of self-support friction stir welding on microstructure and microhardness of 6082-T6 aluminum alloys joint [J]. Materials and Design, 2014, 55: 197–203
- [6] 刘会杰, 李金全, 段卫军. 静止轴肩搅拌摩擦焊的研究进展[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 108–112.
Liu Huijie, Li Jinquan, Duan Weijun. Progress in the stationary shoulder friction stir welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 108–112.
- [7] Li J Q, Liu H J. Effects of tool rotation speed on microstructures and mechanical properties of AA2219-T6 welded by the external non-rotational shoulder assisted friction stir welding[J]. Materials and Design, 2013, 43: 299–306.
- [8] Davies P S, Wynne B P, Rainforth W M, *et al.* Development of microstructure and crystallographic texture during stationary shoulder friction stir welding of Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(8): 2278–2289.
- [9] 姬书得, 孟祥晨, 黄永宪. 搅拌头旋转频率对静止轴肩搅拌摩擦焊接头力学性能的影响规律[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 51–54.
Ji Shude, Meng Xiangchen, Huang Yongyan. Effect of rotational velocity of tool on mechanical properties of stationary shoulder friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(1): 51–54.
- [10] 王卫兵, 董春林, 栾国红, 等. 搅拌摩擦焊 S 线特征模型[J]. 航空制造技术, 2015, 484(S1): 13–16.
Wang Weibing, Dong Chunlin, Luan Guohong, *et al.* The S model of friction stir welding [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 484(S1): 13–16.

作者简介: 张 坤,男,1982 年出生,博士,高级工程师. 主要从事搅拌摩擦焊新技术的研究工作. 发表论文 10 余篇. Email: zhangkun@cfswt.com