

# 搅拌摩擦焊和熔化极气体保护焊 6082 铝合金 疲劳性能分析

佟建华, 张 坤, 林 松, 王卫兵

(北京航空制造工程研究所 中国搅拌摩擦焊中心, 北京 100024)

**摘 要:** 对 10 mm 厚 6082-T6 铝合金进行搅拌摩擦焊(FSW)和熔化极气体保护焊(MIG 焊)焊接,利用疲劳性能试验机、光学显微镜、扫描电子显微镜等手段对 6082 铝合金 FSW 和 MIG 焊接头的疲劳力学性能、微观组织、裂纹扩展特征、疲劳断口进行了分析。结果表明,在疲劳寿命为  $2 \times 10^6$  周次时,6082 铝合金母材及其 FSW 和 MIG 焊接头的名义应力分别为 126.3,110.2,84.2 MPa;在高应力水平下( $\Delta\sigma = 160$  MPa),FSW 接头疲劳寿命明显大于 MIG 焊接头、与母材的疲劳寿命相当。MIG 焊疲劳断口均位于焊趾处,焊缝内的气孔缺陷为其主要裂纹源;FSW 疲劳断口大多发生在轴肩边缘。接头的微观断口具有准解理特征,断口中存在疲劳条纹和韧窝。

**关键词:** 6082 铝合金; 搅拌摩擦焊; 熔化极气体保护焊; 疲劳性能

**中图分类号:** TG 405 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)07-0105-04

## 0 序 言

6082 铝合金属于 Al-Mg-Si 系防锈铝,具有中等强度、良好的焊接性能和耐腐蚀性等特点<sup>[1]</sup>,在轻质高性能结构中得到广泛应用,用其代替钢铁材料,可以大大减轻构件的质量,是节能、环保的最佳备选材料。目前 6082 铝合金焊接结构广泛应用于高速列车、船舶、航空航天、汽车工业以及相关技术领域,这些结构离不开焊接技术的支持,并且都承受疲劳载荷的作用<sup>[2,3]</sup>,6 系铝合金可以使用熔化焊,如 MIG 进行焊接,搅拌摩擦焊(friction stir welding,FSW)是 1991 年 TWI 发明的一种固态焊接方式,适用于轻质合金,特别是铝合金的焊接,在航空航天、轨道列车等领域应用广泛。

疲劳断裂是金属结构尤其是焊接结构失效的一种主要形式,在焊接结构的失效中,因交变载荷引起的疲劳断裂事故占机械结构失效总数的 80%~90%,各种连接接头所具有的疲劳性能是保证其结构安全可靠性的关键因素。因此确定 6082 铝合金对接 MIG 焊接头、FSW 接头的疲劳性能,对 10 mm 厚 6082-T6 铝合金结构优选制造工艺、提高效率具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。

文中对 6082 铝合金母材及其 FSW 和 MIG 焊对接头进行疲劳试验,根据疲劳 S-N 曲线试验结

果,对 6082 铝合金母材及其 FSW 和 MIG 焊对接接头的疲劳性能进行了初步比较,并分析裂纹启裂部位及扩展特征,对疲劳断裂机理进行初步探讨。

## 1 试验方法

试验采用 10 mm 厚 6082-T6 铝合金轧制板材,其化学成分如表 1 所示,力学性能如表 2 所示。其中 MIG 焊的工艺参数为焊接电流 150 A,电弧电压 21 V,氩气流量 9.8 L/min。FSW 焊接工艺参数为轴肩直径 18 mm,针长 9.7 mm,转速 600 r/min,焊接速度 150 mm/min。

表 1 6082 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 6082

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.7~1.3	0.5	0.1	0.4~1.0	0.6~1.2	0.25	0.2	0.1	余量

表 2 6082-T6 铝合金力学性能

Table 2 Mechanical properties of 6082

屈服强度 $R_{eL}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ (%)
316.72	333.79	13.96

试验采用 PLG-200C 高频疲劳试验机上进行拉伸疲劳试验,加载方向与对接焊缝垂直,载荷为恒幅正弦加载波形。试验机静载精度为  $\pm 0.2\%$ ,动载振

幅波动度为  $\pm 0.2\%$ , 加载频率范围为  $94 \sim 106$  Hz, 应力比  $R=0.1$ . 利用 Axiovert-2000 型光学显微镜和 HITACHI S-4800 扫描电子显微镜对 FSW 和 MIG 焊接头的微观组织和断口形貌进行观察.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微组织观察

FSW 接头各区的组织如图 1 所示, 可以看出, 母材为伸长的条状组织, 为典型的轧制组织, 如图 1a 所示; 焊核区为细小均匀的等轴晶, 在搅拌摩擦焊接过程中, 焊核区的温度较高, 在搅拌针的作用下发生剧烈塑性变形, 致使该区的组织发生动态再结晶, 生成细小的等轴晶粒, 如图 1b 所示; 前进侧热力影响区和后退侧热力影响区的组织如图 1c, d 所示, 其组织差别不大, 但是前进侧热力影响区与焊核区的分界线更加明显, 这主要是因为前进侧热影响区的材料经受搅拌头的剪切作用, 塑性变形更加剧烈, 导致其分界线更加明显.

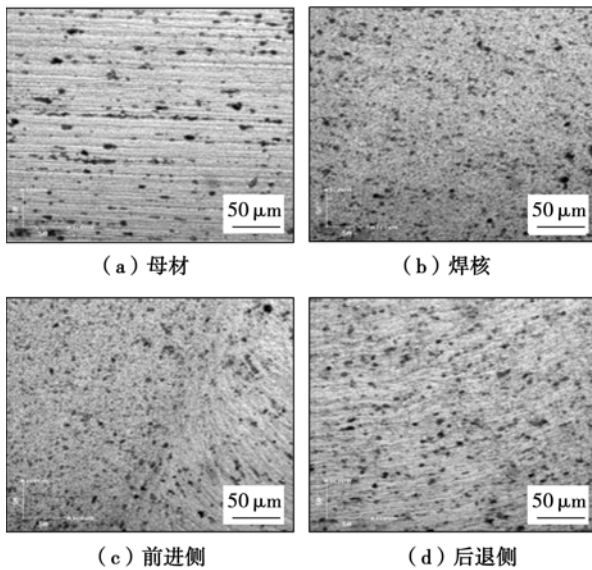


图 1 搅拌摩擦焊接头的组织

Fig. 1 Microstructure of base metal and FSW joint

MIG 焊接头的组织如图 2 所示, 从图 2a 可以看出, 焊缝的组织多为树枝晶, 且晶粒大小不一, 并从图 2b, c 中可以看出, 焊缝中存在着微裂纹及气孔. 裂纹尖端是极为严重的应力集中部位, 焊接裂纹会大幅度降低结构或接头的疲劳强度. 气孔的存在减少了承载面积尺寸, 引起接头疲劳强度下降.

### 2.2 疲劳试验结果

众所周知, 接头疲劳载荷的名义应力范围  $\Delta\sigma$  和

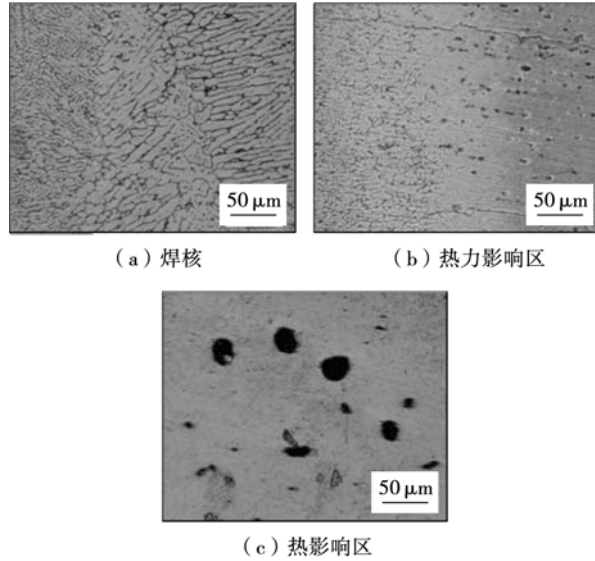


图 2 熔化极气体保护焊接头各区组织  
Fig. 2 Microstructure of MIG joints

疲劳寿命  $N$  关系<sup>[7]</sup>可表示为

$$C = N(\Delta\sigma)^m \quad (1)$$

式中:  $C$  为材料常数;  $m$  为  $S-N$  曲线的斜率.

疲劳  $S-N$  曲线的斜率  $m$  利用最小二乘法原理拟合各组试样的  $S-N$  曲线获得, 拟合公式为

$$\lg S = -B \lg N + A \quad (2)$$

式中:  $S$  为所加载的疲劳载荷;  $B, A$  为拟合常数, 与斜率  $m$  的关系为

$$m = 1/B \quad (3)$$

将  $n$  次试验所获取的名义应力范围  $\Delta\sigma_i (i=1, \dots, n)$  和  $m$  带入式(1)可确定  $C_i (i=1, \dots, n)$  值.  $C_m$  为  $C_i (i=1, \dots, n)$  的平均值.

在  $N=2 \times 10^6$  周次时,  $C_m$  表示对应存活率 50% 特征值, 其疲劳载荷的应力范围  $\Delta\sigma_m$ , 和对应 95% 存活率并位于 75% 置信区间特征值  $C_k$  对应的疲劳载荷的应力范围  $\Delta\sigma_k$  分别表示为

$$\Delta\sigma_m = \sqrt{\frac{C_m}{2 \times 10^6}}, \quad \Delta\sigma_k = \sqrt{\frac{C_k}{2 \times 10^6}} \quad (4)$$

根据上述公式对疲劳试样分别计算的结果如表 3 所示. 根据表 3 的疲劳数据绘出 6082 铝合金母材、MIG 焊和 FSW 焊接头的名义应力中值  $S-N$  曲线, 如图 3 (对应存活率 50%) 和图 4 (对应存活率 95%) 所示.

从疲劳试验结果可看出, 6082 铝合金母材、FSW 和 MIG 焊接头  $S-N$  曲线的斜率  $m = 5.39 \sim 6.65$ , 名义疲劳强度特征值 (50% 存活率) FAT 分别为 126.3, 110.2, 84.2 MPa,  $S-N$  曲线的变化趋势 (斜率) 基本类似, FSW 接头的疲劳强度为母材的 87.3%; MIG 焊接接头的疲劳强度为母材的 66.7%.

表 3 6082 铝合金母材和 MIG 及 FSW 焊接头试样疲劳强度统计分析结果 ( $R=0.1$ )

Table 3 Fatigue test results of 6082 aluminum alloy for BM, MIG joint and FSW joint

试样类型	曲线斜率 $m$	对应 50% 存活率特征值		对应 95% 存活率特征值	
		材料常数		材料常数	
		$C_m (10^{17})$	$\Delta\sigma_m / \text{MPa}$	$C_k (10^{17})$	$\Delta\sigma_k / \text{MPa}$
母材	5.392 6	4.296 9	126.303 6	2.349 9	112.930 3
FSW	6.092 2	55.286 0	110.209 6	10.987 0	84.534 8
MIG	6.652 3	128.200 0	84.173 9	305.640 0	67.853 3

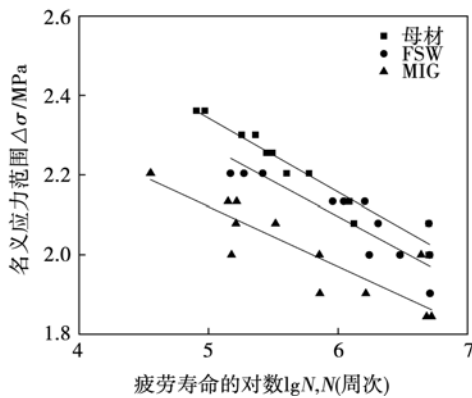


图 3 母材和 MIG 及 FSW 焊接头试样疲劳 S-N 曲线 (存活率 50%)

Fig. 3 S-N curves of 6082 aluminum alloy for BM, MIG and FSW joints

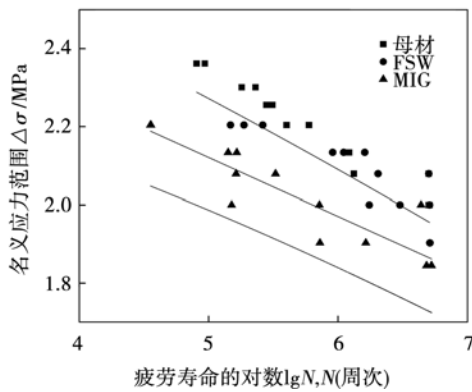


图 4 母材和 MIG 及 FSW 焊接接头试样的疲劳 S-N 曲线 (存活率 95%)

Fig. 4 S-N curves of BM, MIG and FSW joints

造成这种结果的原因是 MIG 焊缝区域存在一定的角变形,焊趾处形状和应力集中导致疲劳性能下降;而对于 FSW 焊接接头,由于试样几何形状明显优于 MIG 焊接接头,不存在明显应力集中区域,对接焊试样平整,不存在角变形,在保证焊缝质量的情况下 FSW 接头可以获得很高的疲劳强度。

### 2.3 疲劳断口分析

#### 2.3.1 宏观断口分析

FSW 和 MIG 焊接头疲劳试验的断裂试样和宏

观断口形貌如图 5、图 6 所示,从图 5 可以看出, MIG 焊疲劳断口均位于焊趾处,FSW 疲劳断口大多发生在轴肩边缘。从图 6 中可以看出,FSW 接头的疲劳断口较为平滑,而 MIG 焊接头的断口较为粗糙。从宏观上看,FSW 和 MIG 焊试件在断裂前无明显的塑性变形,断口齐平,断裂后把断裂试件的两边裂口对接时,裂口吻接完好,因此试件的疲劳断裂基本可判断为脆性断裂。

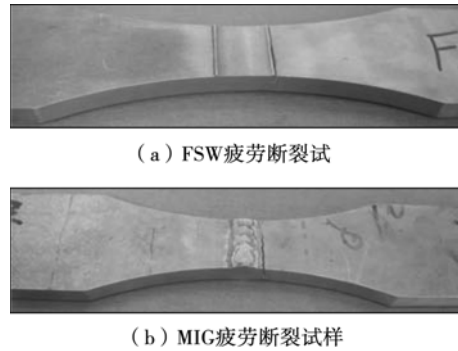


图 5 6082 铝合金 FSW 及 MIG 焊疲劳断裂试样

Fig. 5 Fatigue fracture of specimen of 6082 aluminum alloy

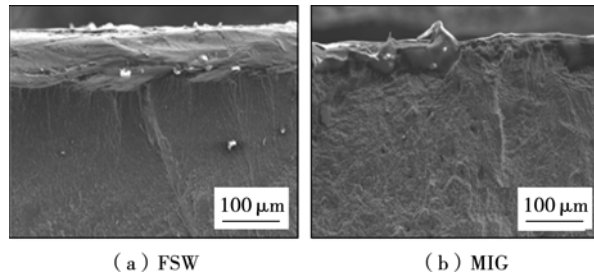


图 6 6082 铝合金 FSW 及 MIG 焊宏观疲劳断口形貌

Fig. 6 Macrostructure of fatigue fractures of 6082 aluminum alloy

#### 2.3.2 微观断口分析

对 6082 铝合金 FSW 和 MIG 焊接头的疲劳断口进行 SEM 断口观察,其微观形貌如图 7,图 8 所示。如图 7a,b 所示,FSW 焊接头的疲劳源区出现在次表面,源区较小,形貌较光亮、平坦、半椭圆形。而 MIG 焊接头的疲劳源区出现在试件内部,主要是熔化过程中产生的气孔造成的,通常有多个疲劳源,扩展连接后形成台阶,断口表面比较粗糙。从 MIG 焊接头裂纹源区扫描电镜图片上可以看到大的气孔,并可以看到气孔底部的晶粒,如图 8a,b 所示。

疲劳裂纹扩展区在断口上位于疲劳源区和瞬断区之间,如图 7c,d 和图 8c,d 所示,在 FSW 焊和 MIG 焊的裂纹扩展区均发现疲劳条纹。疲劳条纹的

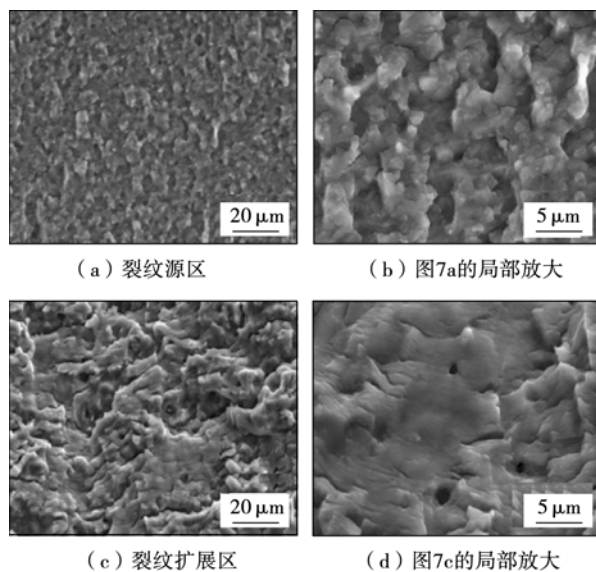


图7 FSW接头微观疲劳断口形貌

Fig. 7 SEM images of fatigue fracture sections of 6082 aluminum alloy for FSW

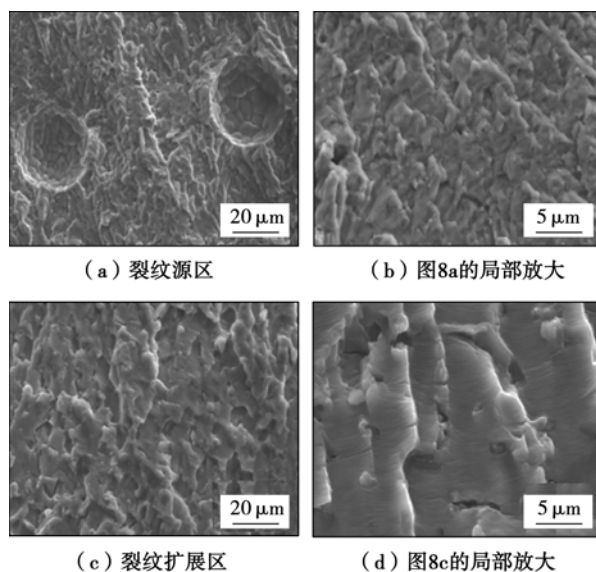


图8 MIG焊接头微观疲劳断口形貌

Fig. 8 SEM images of fatigue fracture sections of 6082 aluminum alloy for MIG

产生是因为疲劳裂纹的尖端处于张开形的平面应变状态,疲劳断面与疲劳载荷张应力相垂直(即正断)。由于6082铝合金塑性比较好,所以在疲劳裂纹高速扩展区出现韧窝,其瞬断区断口较平,在断口边缘出现微小的剪切唇。

### 3 结 论

(1) FSW接头的疲劳强度为母材的87.3% ;

MIG焊接头的名义应力为母材的66.7%。在高应力水平下( $\Delta\sigma = 160$  MPa),FSW接头疲劳寿命明显大于MIG焊接头、与母材的疲劳寿命相当。

(2) FSW接头为细小的等轴晶组织,晶粒细小;而MIG焊接头为树枝晶组织,晶粒较大。

(3) MIG焊接疲劳断口均位于焊趾处,焊缝内的气孔缺陷为其主要裂纹源;FSW疲劳断口大多发生在轴肩边缘,而起裂于焊缝根部试样的疲劳寿命偏低,采用有效工艺措施严格控制FSW焊接头根部质量,是改善和提高FSW焊接头疲劳性能的关键因素。

### 参考文献:

- [1] 栾国红,关桥. 高效、固相焊接新技术—搅拌摩擦焊[J]. 电焊机, 2005, 35(9): 8-13.  
Luan Guohong, Guan Qiao. High-effective, solid-phase new welding technology—FSW[J]. Electric Welding Machine, 2005, 35(9): 8-13.
- [2] 张华,林三宝,吴林,等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 91-96.  
Zhang Hua, Lin Sanbao, Wu Lin, et al. Current progress and prospect of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 91-96.
- [3] Cavaliere P, Squillace A, Panella F. Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of 6082 joints produced by friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 21(6): 60-65.
- [4] Moreira P, Jesus D, Ribeiro S, et al. Fatigue crack growth in friction stir welds of 6082-T6 aluminum alloys[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2008, 50(2): 81-91.
- [5] Adamowski J, Szkodo M. Friction stir welds (FSW) of aluminum alloy 6082-T6[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 12(5): 44-48.
- [6] 王希靖,韩晓辉,郭瑞杰,等. 搅拌摩擦焊接过程温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2005, 26(12): 17-20.  
Wang Xijing, Han Xiaohui, Guo Ruijie, et al. Numerical simulation of temperature field in friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(12): 17-20.
- [7] 张昭,刘会杰. 搅拌头形状对搅拌摩擦焊材料变形和温度场的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(3): 5-7.  
Zhang Zhao, Liu Huijie. Effect of tool shape on friction stir welding deformation and temperature field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(3): 5-7.

作者简介: 佟建华,男,1983年出生,硕士研究生。主要从事搅拌摩擦焊的技术研究。发表论文10篇。Email: tongjianhua@cfswt.com