引文格式：王浩军, 张兵宪, 牛鹏亮, 等. 补焊对7050–T7451铝合金FSW接头疲劳性能的影响研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(21): 25020260.

WANG Haojun, ZHANG Bingxian, NIU Pengliang, et al. Investigation on effect of repair welding on fatigue performance of friction stir welded 7050–T7451 aluminum alloy joints[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(21): 25020260.

补焊对7050–T7451铝合金FSW接头疲劳性能的影响研究

王浩军[1]，张兵宪[1]，牛鹏亮[2]，陈　聪[2]，黄春平[3]，刘丰刚[2]

（1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司，西安 710089；
2. 南昌航空大学材料科学与工程学院，南昌 330063；
3. 中国航空研究院研究生院，扬州 225111）

［摘要］ 大型高强铝合金搅拌摩擦焊过程中遇到搅拌针变短、断裂等问题必须进行补焊，本文采用搅拌摩擦焊对7050–T7451高强铝合金进行了1~3次的补焊，测量了母材和不同补焊次数下接头的疲劳寿命，获得了不同接头的*S–N*曲线。通过扫描电镜对母材和不同补焊次数接头的疲劳断口进行了分析。结果表明，在相同的应力水平下，母材的疲劳寿命高于焊接接头，补焊2次接头的疲劳寿命高于补焊1次和补焊3次的接头。在最大应力为460 MPa时，疲劳裂纹源和疲劳裂纹扩展区并不明显，疲劳瞬时断裂区面积最大。在低应力水平下，疲劳断口各区域特征明显，疲劳扩展区面积增大，疲劳瞬时断裂区面积减小。

关键词：7050–T7451铝合金；搅拌摩擦补焊；*S–N*曲线；疲劳性能；断裂机制

中图分类号：V25；TG44；TG407　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.16080/j.issn1671-833x.25020260

Investigation on Effect of Repair Welding on Fatigue Performance of Friction Stir Welded 7050–T7451 Aluminum Alloy Joints

WANG Haojun[1], ZHANG Bingxian[1], NIU Pengliang[2], CHEN Cong[2], HUANG Chunping[3], LIU Fenggang[2]

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
3. Graduate School of Chinese Aeronautical Establishment, Yangzhou 225111, China)

[ABSTRACT] In the friction stir welding of large-size high-strength aluminum alloys, repair welding is required when problems such as stirring pin shortening and fracture occur. Repair welding by friction stir welding was performed on 7050–T7451 high-strength aluminum alloy for 1 to 3 cycles. The fatigue lives of the base material and joints with different repair-welding cycles were measured, and the corresponding *S–N* curves of these joints were obtained. Fatigue fracture surfaces of the base material and joints after different repair-welding cycles were characterized using scanning electron microscopy. The results show that under identical stress levels, the base material exhibits longer fatigue life than the welded joints, and the joint with two repair-welding cycles possesses superior fatigue life compared with the joints with one and three repair-welding cycles. At a maximum stress of 460 MPa, the fatigue crack initiation site and fatigue crack propagation zone are indistinct, and the area of the final fast-fracture zone reaches the maximum. At low stress levels, distinct morphological features appear in each zone of the fatigue fracture; the area of the fatigue crack propagation zone

收稿日期：2025–08–20；**退修日期：**2025–11–07；**录用日期：**2026–07–29

基金项目：国家自然科学基金（52565044）

通信作者：牛鹏亮，副教授，研究方向为固相焊接与接头疲劳可靠性。

increases, whereas the area of the final fast-fracture zone decreases.

Keywords: 7050–T7451 aluminum alloy; Friction stir welding repairing; *S–N* curve; Fatigue performance; Fracture mechanisms

7050–T7451作为一种Al–Zn–Mg–Cu系高强铝合金，由7050铝合金经过T7451热处理之后获得，具有高强度、高韧性及耐腐蚀性能，已广泛应用于飞机的机翼、地板和机身等重要部件，如大飞机C919前机身货舱门框、中机身加强框等部位[1]。铝合金作为一种综合性能良好的航空航天结构材料，常采用熔焊或铆接等方法进行连接。然而，相比于传统熔焊工艺，搅拌摩擦焊（Friction stir welding，FSW）作为固相连接技术，具有热输入低、残余应力小，以及无裂纹与气孔倾向等优势，适用于熔焊难以焊接的材料，如铝合金、镁合金等，弥补了传统熔焊方法焊接接头存在的缺陷[2–3]。

疲劳断裂是焊接结构失效的重要原因之一。由于铝合金构件在使用过程中出现的疲劳裂纹不易被发现，难以有效预防，进而易导致灾难的发生。焊接接头的疲劳强度严重影响飞行器的服役安全，确定接头的疲劳性能是保证其结构可靠的关键因素[4–5]。因此，本文通过测试接头的疲劳*S–N*曲线，实现对接头疲劳可靠性的评价，为飞行器构件在不同使用环境下的疲劳寿命提供数据支持。

关于FSW接头疲劳性能，国内外研究者做了一些探索，发现接头疲劳性能往往与焊接缺陷、焊接工艺参数[6]、外加辅助技术[7–8]有关。吴庆祝等[9]研究了不同尺寸的隧道型缺陷对6082–T6铝合金FSW接头疲劳性能的影响，发现小尺寸的隧道型缺陷对疲劳性能的影响较小，而大尺寸的隧道型缺陷处大大降低了接头的疲劳性能。王磊等[10]研究了超声冲击对2024–T4铝合金FSW接头疲劳性能影响，表明在相同应力水平下，超声冲击处理对接头疲劳性能提升明显，疲劳寿命由1.35×10^5升高到2.72×10^5，这是由于冲击产生了强化层，裂纹萌生位置由表面转移到了强化层以下的亚表面。同时，Wen等[11]也发现激光强化使疲劳裂纹源从样品表面转移到亚表面，从而提高了疲劳寿命。钮旭晶等[12]研究了搅拌针不同偏移量对6082–T6铝合金FSW接头疲劳性能影响，搅拌针偏移量越大，焊缝越容易出现未焊透等缺陷，从而降低了疲劳极限强度。对于单条焊缝长度在十几米以上的大型高强铝合金FSW焊接结构，焊接过程中搅拌针有断裂、磨损、变短等现象时，必须对焊缝进行补焊。由于补焊过程引入的焊接热循环，7050–T7451铝合金FSW接头搅拌区（Stir zone，SZ）和热影响区（Heat affected zone，HAZ）中的强化相有被粗化的风险，从而影响补焊接头的疲劳性能。

本文针对3.5 mm厚7050–T7451铝合金母材、焊态，以及补焊1~3次的焊接接头，采用升降法测试其疲劳极限并获得*S–N*曲线。对比分析不同焊接状态接头的疲劳断口形貌，研究不同应力下接头的疲劳性能，为航空航天工程实际应用提供理论基础。

1 试验及方法

试验所用材料为7050–T7451铝合金轧制板材，几何尺寸为500 mm×150 mm×3.5 mm，化学成分如表1所示。搅拌头如图1所示，试验采用锥形右旋螺纹搅拌针，搅拌头逆时针旋转，轴肩直径D_1=10 mm，搅拌针长H=3.3 mm，根部直径D_2=5 mm，端部直径D_3=3.5 mm。使用自制的龙门式数控搅拌摩擦焊机进行对接试验，工

表1 7050–T7451铝合金的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 7050–T7451 aluminum alloy (mass fraction) %

Mg	Zn	Cu	Zr	Mn	Fe	Si	Al
1.9~2.6	5.7~6.7	2.0~2.6	0.08~0.15	0.1	≤0.15	≤0.12	余量

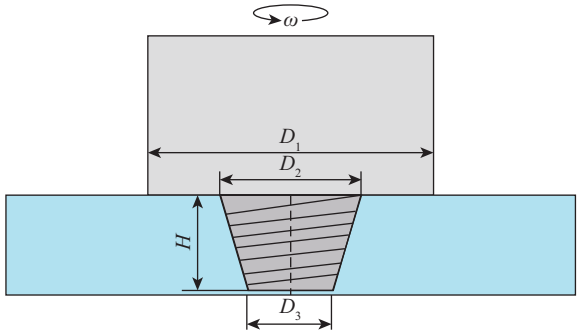


图1 搅拌头示意图

Fig.1 Schematic diagram of welding tool

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

焊接速度/(mm/min)	搅拌头旋转速度/(r/min)	倾斜角/(°)	滞留时间/s
150	600	2.5	1

艺参数如表2所示。在初次焊接结束后，切割试样进行拉伸试验获得其拉伸性能，如表3所示，然后以相同工艺参数沿着焊缝重新焊接，分别进行1~3次补焊试验。

检测标准参照HB5287—1996，疲劳试样尺寸如图2所示。根据试验标准采用高频疲劳试验机，应力比R=0.5，载荷频率80~100 Hz。结合已有文献资料，依据不同补焊次数，选取期望最大应力作为第一级应力水平开展试验。后续试件的试验应力水平由前一试件的试验结果确定：若前一试件未发生失效，则将应力水平上调一个应力级；反之，则下调一个应力级，直至完成全部试验。应力台阶取10 MPa，约使用15个试样，根据统计学方法求出50%存活率时的疲劳强度。

采用升降法测定疲劳极限，即在循环基数为10^7周次未发生断裂的最大应力水平为该试样的疲劳强度。当出现一对相反结果时对应的应力作为事件的起点S_0，式(1)和(2)可求得试样的疲劳强度δ_0和疲劳强度标准差δ_1。

$$\delta_0 = S_0 + d\left(\frac{A}{C} - \frac{1}{2}\right) \tag{1}$$

$$\delta_1 = 1.62d\,(D + 0.029) \tag{2}$$

$$A = \sum_{i=1}^{n} if_i, B = \sum_{i=1}^{n} i^2 f_i, C = \sum_{i=1}^{n} f_i, D = \frac{BC - A^2}{c^2} \tag{3}$$

式中，d为应力台阶；i为事件序号，f_i为失效事件个数。

根据式(1)~(3)的计算结果，得到7050铝合金搅拌摩擦焊母材、焊态，以及不同补焊次数下焊接接头的疲劳强度和标准差。

表3 母材和最佳参数下接头的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of BM and optimized welding parameters

试样	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
母材	534	449	11
接头	495	390	7.2

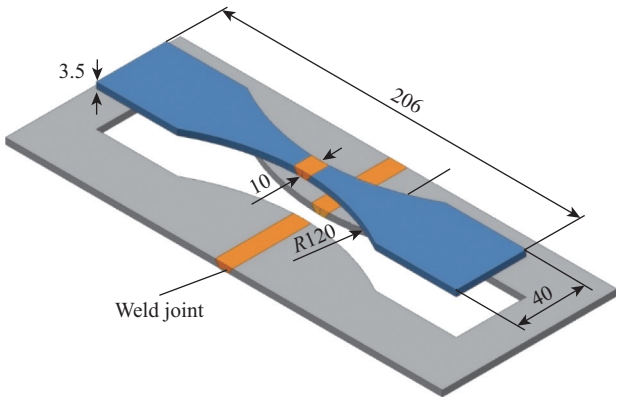


图2 疲劳试样尺寸(mm)

Fig.2 Geometries of fatigue specimen (mm)

采用成组法，从前期测试的极限抗拉强度和当前测试得到的疲劳强度中选定5个应力水平进行疲劳试验，每个应力水平测试3个平行试样。根据描述材料S–N曲线的常用模型，采用非线性模型拟合，即

$$\lg N = A_1 + A_2 \lg(S_{\max} - S_0) \tag{4}$$

式中，A_1和A_2分别为材料在一定应力集中系数和应力比R=0.5下的S–N曲线形状常数；N为代表材料或接头在特定应力S下发生疲劳断裂前所能承受的应力循环周次(疲劳寿命)；S_0为材料在一定应力集中系数和应力比R=0.5下的疲劳极限；$S_{\max}$为试样所承受的最大应力幅值。

令X=lg$N$，Y=lg($S_{\max}$–S_0)，则式(4)可以写为

$$X = A_1 + A_2 Y \tag{5}$$

按最小二乘法可得S–N曲线形状参数及其与试验数据的相关系数r，即

$$A_1 = \overline{X} - A_2 \overline{Y} \tag{6}$$

$$A_2 = \frac{L_{YX}}{L_{YY}} \tag{7}$$

$$r = \frac{L_{YX}}{\sqrt{L_{YY} L_{XX}}} \tag{8}$$

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i;\ \overline{Y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y_i \tag{9}$$

$$L_{XX} = \sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)^2 \tag{10}$$

$$L_{YY} = \sum_{i=1}^{n} Y_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)^2 \tag{11}$$

$$L_{YX} = \sum_{i=1}^{n} X_i Y_{i-\frac{1}{n}} \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right) \tag{12}$$

式中，$\overline{X}$为X的平均值，$\overline{Y}$为Y的平均值，分别代表所有试验点在对数寿命轴($\overline{X}$)和对数应力轴($\overline{Y}$)上的几何平均中心点，反映该组试验数据的整体响应中心；n为事件个数；L_{YY}为应力对数(Y)的离差平方和，反映试验所选取的各个应力层级在平均应力水平附近的分布幅宽；L_{YX}为应力与寿命的协方差分子(交叉离差乘积和)，表征疲劳应力S与疲劳寿命N之间的协同变化趋势；L_{XX}为寿命对数(X)的离差平方和，反映疲劳寿命测试数据在自身平均值附近的分散程度；X_i与Y_i为疲劳物理量的对数值，在双对数S–N曲线中，通常X_i = lgN_i，Y_i = lgS_i。根据上述公式求得相关系数r及一定应力集中系数A_1、A_2，然后代入式(4)中获得线性拟合方程。

2 结果与讨论

2.1 母材疲劳性能

根据试验要求，采用升降法求得7050铝合金母材

的疲劳极限。表4为7050铝合金母材在不同应力水平下的疲劳试验结果，其中i为事件序号，f_i为失效事件个数，同时取事件起始点S_0=300 MPa，事件个数n=4，应力台阶取d=10。

根据式(1)~(3)的计算结果，得到7050铝合金母材的疲劳强度δ_0=323 MPa，标准差δ_1=17.32 MPa。

由前期测试的抗拉强度和当前测试得到的疲劳强度323 MPa中选定5个应力水平进行疲劳试验，即在323~470 MPa内取5个应力水平进行疲劳试验。

根据描述材料S–N曲线的常用模型，采用非线性模型拟合，根据式(6)~(12)，求得r=–0.801，A_1=–1.22，A_2=7.409，代入式(4)中得到式(13)。

$$\lg N = 7.409 - 1.22\lg(S_{max} - 323) \tag{13}$$

对式(13)进行变式，最终得到的拟合曲线方程为

$$N = 10^{7.409}(S_{max} - 323)^{-1.22} \tag{14}$$

2.2 不同接头疲劳性能

根据试验要求，采用升降法求得7050铝合金FSW接头的疲劳强度取事件起始点S_0=260 MPa，事件个数n=4，应力台阶取d=10。表5为7050铝合金焊态接头在不同应力水平下的疲劳结果。

根据式(1)~(3)的计算，得到7050铝合金焊态接头的疲劳强度δ_0=278.3 MPa，标准差δ_1=14.87 MPa。

由前期测试的极限抗拉强度和当前测试得到的疲劳强度278.3 MPa中选定5个应力水平进行疲劳试验，即在278.3~470 MPa内取5个应力水平进行疲劳试验。参照母材疲劳S–N曲线方程的计算方法，求得r=–0.848，A_1=8.844，A_2=–2.270，将数据代入式(4)中变形后得到最终的拟合曲线方程为

$$N = 10^{8.844}(S_{max} - 278.3)^{-2.270} \tag{15}$$

母材和焊态接头的相关系数分别为–0.801和–0.848，r值趋向于–1，数据为负相关，试验结果与拟合曲

表4 母材疲劳试验结果

Table 4 Fatigue test results of the base matal

最大应力/MPa	O=通过，X=失效															i	f_i	if_i	i^2f_i
340												X		X		4	2	8	32
330									X		O		O		O	3	1	3	9
320						X		O		O						2	1	2	4
310			X		O		O									1	1	1	1
300		O		O												0	0	0	0
290	O																		
总和																	5	14	46
参数																	C	A	B

表5 焊态接头疲劳试验结果

Table 5 Fatigue test results of the as-welded joints

最大应力/MPa				O=通过，X=失效												i	f_i	if_i	i^2f_i
300												X				4	1	4	16
290											O		X			3	1	3	9
280						X		X		O				X		2	3	6	12
270			X		O		O		O						O	1	1	1	1
260		O		O												0	0	0	0
250	O																		
计算值																	6	14	38
参数																	C	A	B

线具有相关性。根据拟合曲线方程绘制拟合曲线，如图3所示，可以看出，母材的疲劳寿命在相同的最大应力值下高于焊态接头，这是由于经过FSW后，接头的组织均匀程度和抗拉强度都有所降低，导致疲劳性能大幅下降。

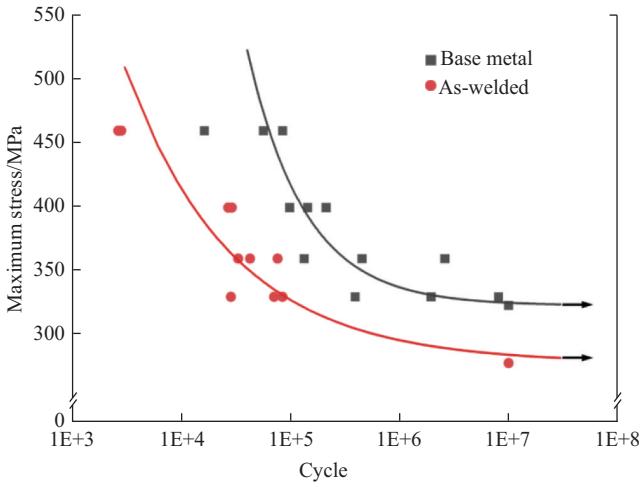


图3 母材与焊态接头的*S–N*曲线

Fig.3 *S–N* curves of BM and as-welded joints

表6为7050铝合金补焊1次接头在不同应力水平下的疲劳寿命试验结果。根据式(1)~(3)的计算结果，得到7050铝合金补焊1次接头的疲劳强度δ_0=270 MPa，标准差δ_1=20.72 MPa。由前期测试的极限抗拉强度和当前测试得到的疲劳强度270 MPa中选定5个应力水平进行疲劳试验，即在270~470 MPa内取5个应力水平进行疲劳试验。参照母材疲劳*S–N*曲线方程的计算方法，求得r=–0.89，A_1=9.626，A_2=–2.571，将A_1和A_2代入式(4)中变形后得到最终的拟合曲线方程为

$$N=10^{9.626}(S_{\max}-270)^{-2.571} \tag{16}$$

表7为7050铝合金补焊2次接头在不同应力水平下的疲劳试验结果寿命。根据式(1)~(3)的计算，得到7050铝合金补焊3次接头的疲劳强度δ_0=291 MPa，标准差δ_1=17.32 MPa。

由前期测试的极限抗拉强度和当前测试得到的疲劳强度291 MPa中选定5个应力水平进行疲劳试验，即

表6 补焊1次接头疲劳试验结果

Table 6 Fatigue test results of joints with one re-welded cycle

最大应力/MPa	O=通过，X=失效											i	f_i	if_i	i^2f_i
290								X				4	1	4	16
280							O		X			3	1	3	9
270						O				X		2	1	2	4
260			X		O						O	1	1	1	1
250		O		O								0	0	0	0
240	O														
总和													4	10	30
参数													C	A	B

表7 补焊2次接头疲劳试验结果

Table 7 Fatigue test results of joints with two re-welded cycles

最大应力/MPa	O=通过，X=失效													i	f_i	if_i	i^2f_i
310												X		4	1	4	16
300									X		O		X	3	2	6	18
290						X		O		O				2	1	2	4
280			X		O		O							1	1	1	1
270		O		O										0	0	0	0
260	O																
计算值															5	13	39
参数															C	A	B

在291~470 MPa内取5个应力水平进行疲劳试验。求得r=–0.947，A_1=10.068，A_2=–2.736，将数据代入式(4)中变形后得到最终的拟合曲线方程为

$$N=10^{10.068}(S_{max}-291)^{-2.736} \quad (17)$$

表8为7050铝合金补焊3次接头在不同应力水平下的疲劳寿命。根据式(1)~(3)的计算，得到7050铝合金3次补焊接头的疲劳强度δ_0=271 MPa，标准差δ_1=17.31 MPa。由前期测试的极限抗拉强度和当前测试得到的疲劳强度271 MPa中选定5个应力水平进行疲劳试验，即在271~470 MPa内取5个应力水平进行疲劳试验。求得r=–0.87，A_1=9.276，A_2=–2.393，将数据代入式(4)中变形后得到最终的拟合曲线方程为

$$N=10^{9.276}(S_{max}-271)^{-2.393} \quad (18)$$

补焊1次、补焊2次和补焊3次接头的相关系数分别为–0.89、–0.947和–0.87，相关系数趋向于–1，拟合数据为负相关，试验结果与拟合曲线具有相关性，补焊2次接头的相关系数更高，S–N曲线拟合更准确。根据补焊1~3次的拟合曲线方程绘制拟合曲线如图4所示。可以看出，补焊2次接头的疲劳寿命在相同的最大应力值下都是要高于补焊1次和补焊3次，补焊1次和补焊3次的S–N曲线几乎一致。在较大最高应力时，补焊3次接头的疲劳寿命略高于补焊1次，都保持在2×10^3~1×10^4之间，补焊1次和补焊3次接头的疲劳极限基本一致，约为270 MPa。不同补焊接头的疲劳性能的变化趋势和拉伸性能趋势基本一致，补焊2次接头的抗拉强度和疲劳强度都高于补焊1次和补焊3次接头。

2.3 不同接头的疲劳强度和S–N曲线

将母材、补焊1次、补焊2次和补焊3次接头在高应力下的疲劳寿命进行对比分析，如图5所示。可以看出，在高应力水平下，母材的疲劳寿命长于接头，这是由于在焊接热循环作用下HAZ强化相粗化和GP区的溶解导致7050铝合金强度下降所致。对比焊态接头的疲劳寿命，在460 MPa应力水平下，补焊2次接头的平均疲劳寿命最高，比焊态、补焊1次和补焊3次接头平均疲劳寿命分别多7780次、

表8 补焊3次接头疲劳试验结果

Table 8 Fatigue test results of joints with three re-welded cycles

最大应力/MPa	O=通过，X=失效													i	f_i	if_i	i^2f_i
290								X						4	1	4	16
280							O		X		X			3	2	6	18
270						O				O		X		2	1	2	4
260			X		O								O	1	1	1	1
250		O		O										0	0	0	0
240	O																
计算值															5	13	39
参数															C	A	B

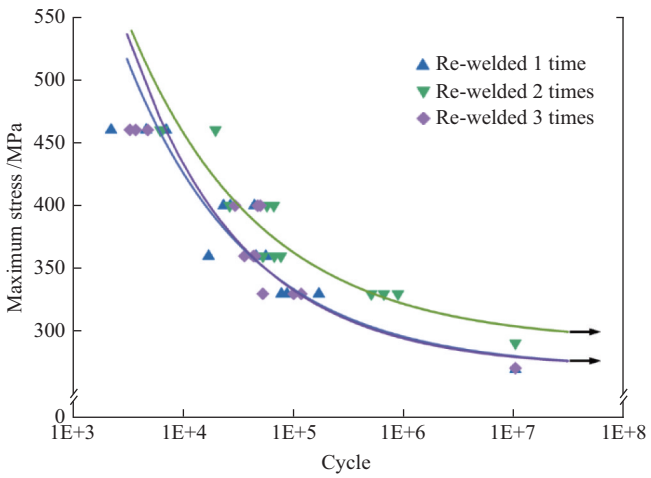


图4 不同补焊次数下的S–N曲线

Fig.4 S–N curves of joints with different re-welded times

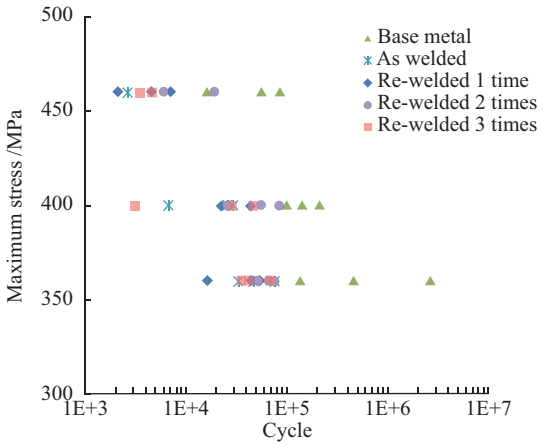


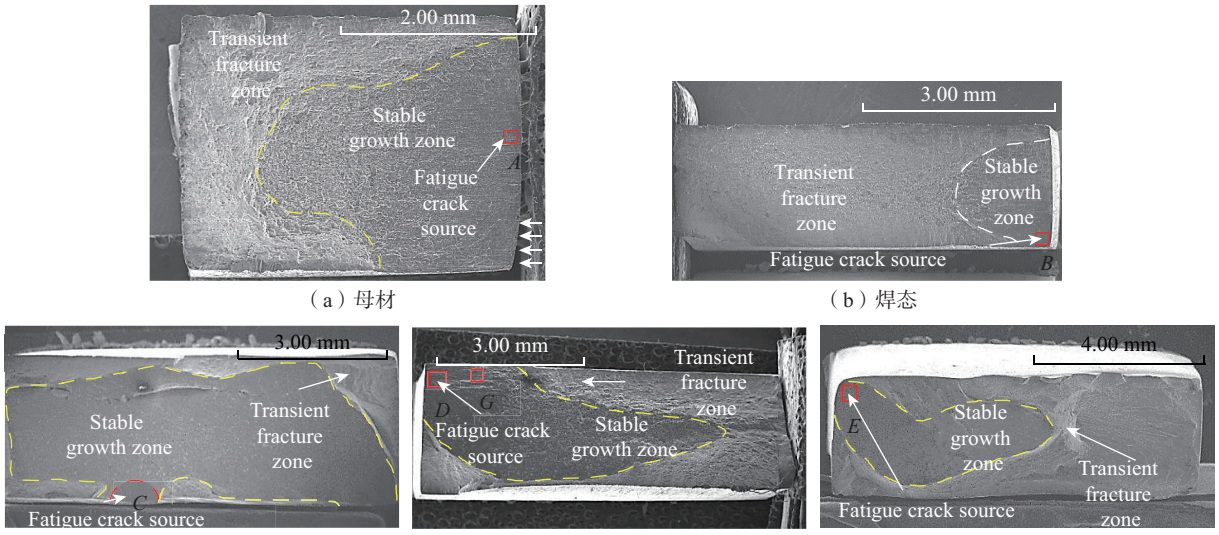
图5 高应力水平下母材，补焊1次、补焊2次和补焊3次的接头疲劳寿命

Fig.5 Fatigue lives of BM and joints with one, two and three re-welded cycles under high stress levels

5970次和6640次。在其他应力水平下，补焊2次接头的疲劳寿命长于焊态、补焊1次和补焊3次接头的疲劳寿命。该结果表明在补焊条件下，补焊2次接头在最大应力下疲劳寿命更长，这是由于在特殊的焊接热循环作用下，HAZ中的低温强化相GP区和η/η'相的体积分数最高，从而强化了HAZ。同时，补焊2次接头的SZ硬度也是最高的[13]。

2.4 接头疲劳断口分析

图6为不同焊接状态接头低应力下疲劳断裂的宏观断口形貌，可以看出疲劳断口呈现出疲劳裂纹源区、疲劳裂纹扩展区和瞬时断裂区，黄色线条内为疲劳裂纹扩展区[14–16]。母材断口*A*区域为一组平行的疲劳源，补焊1次接头断口*C*区域呈现扇形形状，与周围区域的亮度有所区别，呈现光学暗区，推断为疲劳裂纹源区和疲劳裂纹扩展区。焊态、补焊2次和补焊3次接头的疲劳源都是从边角产生，向四周延展；由于疲劳裂纹源张开位移较小，扩展速度极缓慢，裂纹反复的张开和闭合使断口两面互相挤磨，因此该区域表面较为平坦细滑，随着裂纹长度的增加，裂纹张口逐渐变大，扩展速度加快，形成了稳定扩展区。

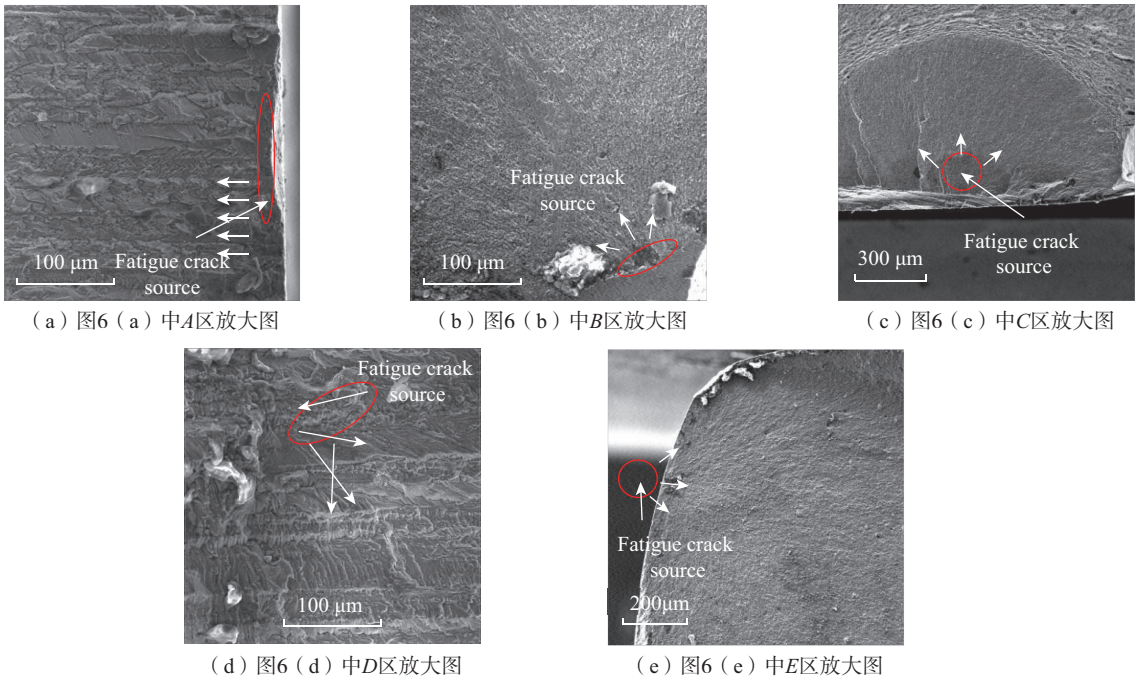


（a）母材　（b）焊态

（c）补焊1次　（d）补焊2次　（e）补焊3次

图6　低应力水平下不同接头疲劳断口形貌

Fig.6　Fatigue fracture morphologies of different joints under low stress levels



（a）图6（a）中*A*区放大图　（b）图6（b）中*B*区放大图　（c）图6（c）中*C*区放大图

（d）图6（d）中*D*区放大图　（e）图6（e）中*E*区放大图

图7　图6中断口形貌放大图

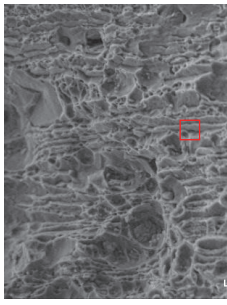
Fig.7　Enlarged fracture morphologies in Fig.6

图7为图6断口形貌标记区域的放大图。可以看出明显的疲劳裂纹源和疲劳裂纹扩展区。疲劳裂纹扩展区表现出两种扩展形式，一种是放射状条纹向试样内部区域扩展，另一种为垂直试样表面的裂纹扩展方向，疲劳裂纹扩展区为光滑平整存在少量的河流状解理断面；同时疲劳裂纹源基本都出现在试样表面，因为试样表面的几何不完整性，容易造成应力集中，使裂纹优先在表面产生。

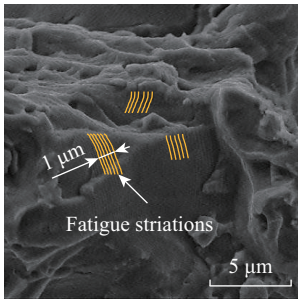
图8为图6中母材*A*区域和补焊2次接头*G*区域宏观断口形貌放大图，这两处区域都在疲劳扩展中间部分。如图8(b)和(d)所示，该区域内存在疲劳辉纹，其中母材的疲劳辉纹间距约为0.2 μm，补焊2次接头的疲劳辉纹间距约为0.34 μm，母材的疲劳辉纹间距小于补焊2次接头。这是由于疲劳裂纹扩展可以解释为裂纹尖端处的连续损伤积累和破坏过程，在疲劳裂纹扩展区域，疲劳辉纹间距等于一段时间内疲劳裂纹的扩展速率，即疲劳辉纹越小，疲劳裂纹的扩展速率越小，在相近的应力水平下，母材的疲劳寿命会更高，符合*S*–*N*曲线所得结果。

图9为母材、焊态，以及补焊1次、补焊2次、补焊3次接头在460 MPa应力下疲劳断口的宏观形貌。疲劳裂纹源和疲劳裂纹扩展区并不明显，而疲劳裂纹瞬时断裂区面积较大。对比发现，母材的疲劳裂纹瞬时断裂区最小，补焊3次接头的疲劳裂纹瞬时断裂区最大，这是由于母材的强度大于焊接接头，疲劳裂纹扩展区域相对更大，发生疲劳裂纹瞬时断裂的区域更小，导致母材的寿命长于接头。

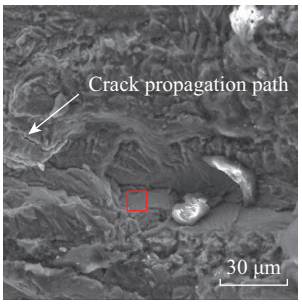
图10为不同接头在460 MPa时疲劳断口形貌部分区域放大图。在高应力作用的疲劳断口中，只有母材的疲劳断口微观特征较为明显，如图10(a)所示，*A*



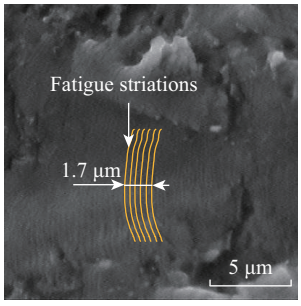
（a）图6中*A*区放大图



（b）图8（a）红框区域放大图



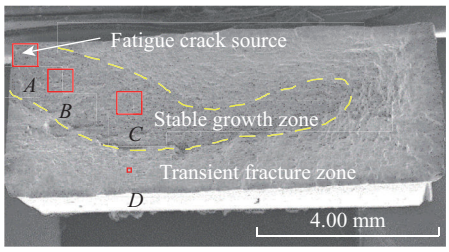
（c）图6（d）中*G*区放大图



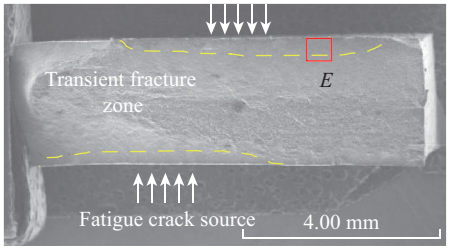
（d）图8（c）红框区域放大图

图8　图6中母材和补焊2次接头断口形貌放大图

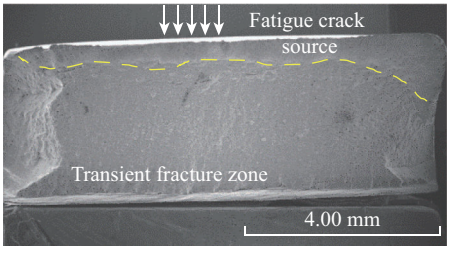
Fig.8　Enlarged fracture morphologies of BM and joints with two re-welded cycles in Fig.6



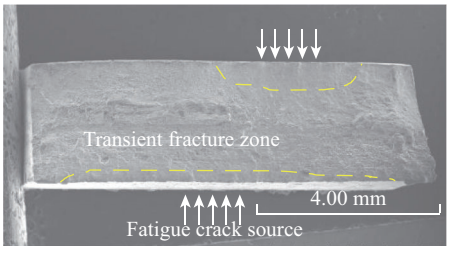
（a）母材



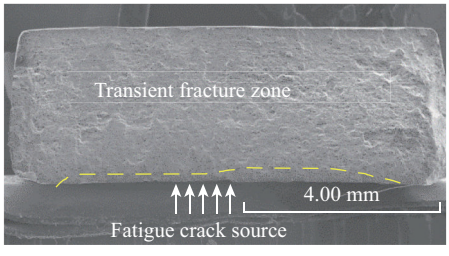
（b）焊态



（c）补焊1次



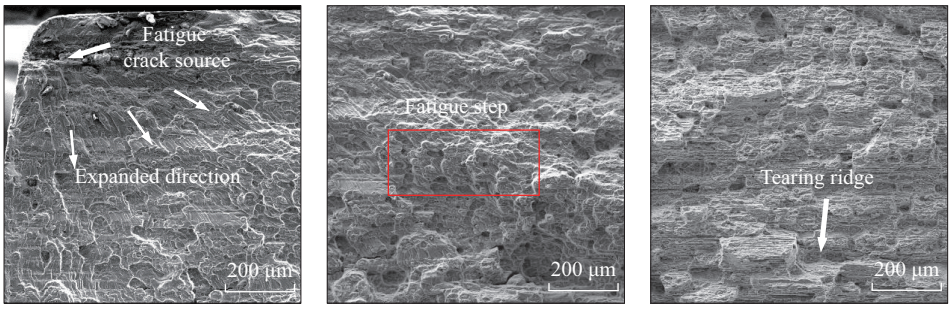
（d）补焊2次



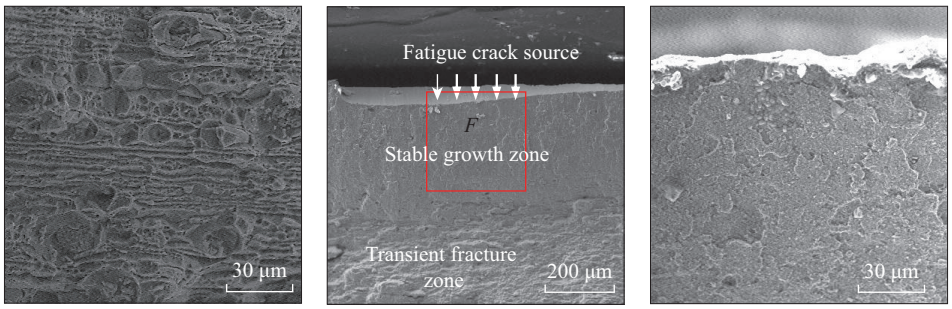
（e）补焊3次

图9　母材和不同接头在460 MPa下疲劳断口形貌

Fig.9　Fatigue fracture morphologies of BM and different joints at 460 MPa



（a）图9（a）中母材*A*区放大图　（b）图9（a）中母材*B*区放大图　（c）图9（a）中母材*C*区放大图



（d）图9（a）中母材*D*区放大图　（e）图9（b）中焊态接头*E*区放大图　（f）图10（e）中*F*区域放大图

图10　母材，以及补焊1次和补焊3次的接头在460 MPa下疲劳断口形貌放大图

Fig.10　Enlarged fatigue fracture morphologies of BM，joints with one and three re-welded cycles at 460 MPa

处区域为母材疲劳源区，出现在试样表面边角处，呈现河流花样向内部扩展；如图10（b）和（c）所示，*B*处区域和*C*处区域为母材的疲劳裂纹扩展区，可以观察到较多的台阶形状断口形貌，这是由于该区域的组织均匀性较差，疲劳裂纹源选择该区域进行扩展，这也表明疲劳裂纹扩展路径的曲折程度，消耗了大量的能量，阻碍了疲劳裂纹的扩展；如图10（d）所示，*D*处区域为母材的疲劳裂纹瞬时断裂区，呈现出典型的韧窝和解理特征，表现出韧–脆断裂形式，与拉伸断口形貌类似；图10（e）为焊态接头的疲劳裂纹源和裂纹扩展区，相较于母材，其裂纹扩展面积小，扩展轨迹不明显，因为在460 MPa高应力下，疲劳裂纹扩展速度非常迅速，使其进入疲劳裂纹瞬时断裂阶段，所以其寿命也会大幅降低。

3　结论

（1）在存活率50%的条件下，母材、焊态，以及补焊1次、补焊2次和补焊3次接头的疲劳极限分别为323 MPa、278.3 MPa、270 MPa、291 MPa和271 MPa，补焊2次接头的疲劳极限最高，其次是补焊3次接头，补焊1次接头的疲劳极限最低。母材的疲劳寿命在相同的最大应力值下高于焊态和补焊试样，补焊2次接头的疲劳寿命在相同的最大应力值下高于补焊1次和补焊3次。

（2）在460 MPa应力水平下，母材的疲劳寿命最高可达10^5次，焊态和补焊接头的疲劳寿命在10^3~10^4之间。补焊2次接头的平均疲劳寿命最高，比焊态、补焊1次和补焊3次接头平均疲劳寿命分别多7780次、5970次和6640次。在不同应力水平下，母材的疲劳寿命最高，其次是补焊2次接头，而焊态，补焊1次和补焊3次接头较低。

（3）疲劳断口包括疲劳裂纹源、疲劳裂纹扩展区和疲劳快速断裂区。在最大应力为460 MPa时，母材的疲劳断口特征明显、补焊1次和补焊3次接头的疲劳裂纹源区面积较小，扩展趋势不明显，疲劳瞬时断裂区面积大，表现出典型的拉伸断裂特征。在低应力水平下，疲劳裂纹源都出现在试样表面，有扇形疲劳裂纹源和平行疲劳裂纹源两种类型。母材和补焊2次疲劳断口存在疲劳辉纹，母材的疲劳辉纹间距比补焊2次接头小，疲劳裂纹的扩展速率越小，疲劳寿命更高。相对于高应力水平下的疲劳断口，疲劳扩展区面积增大，疲劳瞬时断裂区面积减小，表现出疲劳断裂的典型特征。

参 考 文 献

[1]　王国军, 王祝堂. 铝合金在中国民用航空器上的应用[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(11): 1–11.

Wang Guojun, Wang Zhutang. Application of aluminum alloy on China’s civil aircraft[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2017, 45 (11): 1–11.

[2] 李充, 田亚林, 齐振国, 等. 6082–T6铝合金无减薄搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 102–107.

Li Chong, Tian Yalin, Qi Zhenguo, et al. Microstructure and mechanical properties of non-weldthinning friction stir welded 6082–T6 aluminum alloy joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(6): 102–107.

[3] 贺地求, 姚俊歌, 赖瑞林, 等. FSW与MIG补焊的6005A–T6铝合金型材FSW接头疲劳性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(13): 20–23.

He Diqiu, Yao Junge, Lai Ruilin, et al. Fatigue properties of 6005A – T6 aluminum alloy FSW joints by FSW and MIG repairing welding[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(13): 20–23.

[4] 王世君, 耿明, 肖宇, 等. 6082–T6铝合金双面搅拌摩擦焊焊接接头组织及性能[J]. 大连交通大学学报, 2018, 39(5): 34–37.

Wang Shijun, Geng Ming, Xiao Yu, et al. Microstructures and properties of Al alloy 6082 plate butt joint prepared with double-FSW[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2018, 39(5): 34–37.

[5] 张航, 刘晓琴, 赵立哲, 等. 搅拌摩擦焊接头疲劳数据统计分析[J]. 焊接技术, 2021, 50(11): 9–12, 105.

Zhang Hang, Liu Xiaoqin, Zhao Lizhe, et al. Statistical analysis of fatigue data of friction stir welding joints[J]. Welding Technology, 2021, 50(11): 9–12, 105.

[6] Zhang B, Liu J Z, Sun Y X, et al. On the fatigue resistance assessment of friction stir welded joints affected by heat input[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 161: 108262.

[7] Kosturek R, Torzewski J, Joska Z, et al. The influence of tool rotation speed on the low-cycle fatigue behavior of AA2519–T62 friction stir welded butt joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106756.

[8] 金玉花, 吴永武, 王希靖, 等. 滚动轧制对铝合金搅拌摩擦焊接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(4): 50–54, 163.

Jin Yuhua, Wu Yongwu, Wang Xijing, et al. Effect of rolling on friction stir welded joints of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(4): 50–54, 163.

[9] 吴庆祝, 许鸿吉, 蔺博, 等. 隧道型缺陷对6082–T6铝合金FSW焊接接头力学性能和疲劳性能的影响[J]. 焊接技术, 2022, 51(5): 26–31.

Wu Qingzhu, Xu Hongji, Lin Bo, et al. Influence of tunnel defects on mechanical properties and fatigue properties of 6082–T6 aluminum alloy FSW welded joints[J]. Welding Technology, 2022, 51(5): 26–31.

[10] 王磊, 黄秉汉, 丛家慧, 等. 超声冲击对搅拌摩擦焊缝疲劳性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2542–2548.

Wang Lei, Huang Binghan, Cong Jiahui, et al. Effect of ultrasonic impact on fatigue performance of friction stir weld[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(11): 2542–2548.

[11] Wen F J, Long Z, Xing Z G, et al. The effect of laser shock peening on very high cycle fatigue properties of laser welded 2A60 aluminum alloy joints[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 290: 109537.

[12] 钮旭晶, 鲁二敬, 郁志凯, 等. 搅拌针不同偏移量对6082–T6铝合金接头劳性能的影响[J]. 制造技术与机床, 2017(7): 146–148.

Niu Xujing, Lu Erjing, Yu Zhikai, et al. Effect of different offset of pin on fatigue properties of 6082 – T6 aluminum alloy butt joints[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(7): 146–148.

[13] 张兵宪, 陈素明, 贺鞞, 等. 补焊对7050–T7451高强铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响[J]. 材料导报, 2025, 39(10): 153–158.

Zhang Bingxian, Chen Suming, He Wei, et al. Effect of repair welding on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7050–T7451 aluminum alloy joints[J]. Materials Reports, 2025, 39(10): 153–158.

[14] 王磊, 付强, 安金岚, 等. 2A12–T4铝合金搅拌摩擦焊多区域疲劳裂纹扩展行为[J]. 焊接学报, 2021, 42(2): 24–29.

Wang Lei, Fu Qiang, An Jinlan, et al. Multi-zone fatigue crack growth behavior of friction stir welding of 2A12–T4 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(2): 24–29.

[15] 蒋若蓉. 2024–T3铝合金搅拌摩擦焊接头冷喷涂腐蚀防护研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.

Jiang Ruorong. Research on cold spray corrosion protection of friction stir welded joints of 2024 – T3 aluminum alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.

[16] Ales S, Yazdanian S, Pasang T, et al. Fatigue strength of friction stir lap welded AA2024 to Ti_6Al_4V dissimilar joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106309.

（责编 七七）