加载角度对 6082 铝合金自冲铆接接头疲劳性能及失效模式的影响

雷付煜[1] 徐小旭[2] 赵亚明[2] 罗 军[1] 马 超[1] 徐从昌[1*] 李落星[13]
1.湖南大学机械与运载工程学院,长沙,410082
2.阿维塔科技有限公司,重庆,401120
3.湖南大学重庆研究院,重庆,401121

摘要:以 6082 铝合金自冲铆接为研究对象,采用拉伸试验、疲劳试验、扫描电镜观测等手段研究了接头疲劳裂纹扩展机理和微动磨损行为。结果表明:相较于 0°、45°,加载角度 90°的接头具有最优的静力学性能;在同一载荷水平下,接头疲劳寿命随加载角度的增大而增大;高周疲劳下的接头失效为下板开裂失效,低周疲劳下的接头失效为上板开裂和铆钉断裂;微动磨损影响接头疲劳裂纹的萌生位置和扩展路径,接头加载角度影响接头不同区域的微动磨损程度,加载角度 90°的铆钉头部与上层板接触区域、加载角度 0°的下板与铆钉腿表面接触区域的微动磨损最严重。

关键词:铝合金;自冲铆接;加载角度;疲劳性能;微动磨损
中图分类号:TH131.1
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.01.015 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Influences of Loading Angle on Fatigue Characteristics and Failure Modes of Self-piercing Riveted Joints in Aluminum Alloy 6082

LEI Fuyu[1] XU Xiaoxu[2] ZHAO Yaming[2] LUO Jun[1] MA Chao[1]
XU Congchang[1*] LI Luoxing[13]
1.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, 410082
2.AVATR Technology Co., Ltd., Chongqing, 401120
3.Research Institute of Hunan University in Chongqing, Chongqing, 401121

Abstract: Taking the self-piercing riveting of 6082 aluminum alloy as the research object, the fatigue crack propagation mechanism and fretting wear behavior of the joints were studied by tensile tests, fatigue tests and scanning electron microscopy. The results show that compared to the 0° and 45°, the joint has the best static mechanics properties under the loading angle of 90°. Under the same load level, the fatigue life of the joints increases with the increase of the loading angles. Under high-cycle fatigue, the joints fail by cracking of the lower plate, while under low-cycle fatigue, the joints fail by cracking of the upper plate and rivet fracture. Fretting wear affects the location and propagation path of the fatigue crack initiation in the joints, and the loading angles of the joints affect the fretting wear in different areas of the joints. Under the loading angle of 90°, the fretting wear in the contact areas between rivet head and upper plate is the most serious. Under the loading angle of 0°, the fretting wear in the contact areas between lower plate and surface of the rivet leg is the most serious.

Key words: aluminum alloy; self-piercing riveting; loading angle; fatigue property; fretting wear

0 引言

近年来,汽车行业大量使用铝合金、镁合金来为整车减重,这对材料连接工艺提出了更严格的要求[1]。自冲铆接具有无需预打孔、加工简便快速、环境友好、外观质量好等显著特点,在汽车、航空等行业得到迅速发展和广泛应用[2]。

接头强度是影响机械产品可靠性和使用寿命的重要因素,针对自冲铆接的静态力学特性、疲劳微动特性,国内外学者已开展较多研究。HE 等[3]研究了 AL5052 铝合金、H62 铜合金板材连接接头的性能差异及变化,发现接头强度差异主要受上板性能的影响。HAN 等[4]研究了不同结构多层铝合金板自冲铆接接头的静力学性能,发

收稿日期:2023-09-22
基金项目:国家自然科学基金(52272362);重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0035);湖南创新型省份建设专项(2021GK4044)

现二次弯曲是单搭接头剪切失效的主要原因，而具有双剪切且无二次弯曲效应的接头强度比单剪切接头强度高。HYUCK 等[5]研究了模具类型对减振铝与其他异种材料多层板连接接头的几何特性和力学性能的影响。

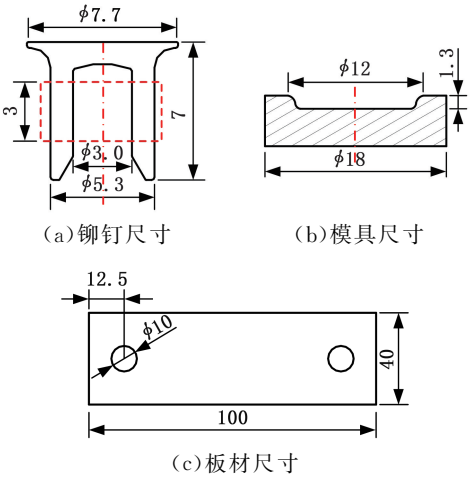
FU 等[6]研究了板厚对 5754 铝合金自冲铆接接头疲劳特性的影响，通过试验发现连接板厚度和载荷水平是影响疲劳寿命的关键因素。CHOI 等[7]研究了混合加载模式下铝合金自冲铆接接头的疲劳性能，评价了混合加载模式下接头的疲劳性能差异，并用有效应力强度因子作为参数来评估疲劳寿命。张先炼等[8-9]研究了钛合金自冲铆接接头的疲劳特性及裂纹扩展机理。黄志超等[10]通过断口分析发现，钛合金接头铆钉失效为脆性断裂，疲劳裂纹萌生于铆钉腿外侧；板材断裂为典型疲劳失效模式，裂纹萌生于铆钉腿部和板材接触区域。RAO 等[11-12]在研究碳纤维增强聚合物 CFRP 与 Al6111 板材连接的自冲铆接接头中发现，铆钉头高于上层板的单搭接头具有更好的剪切破坏性能及疲劳寿命。赵伦等[13-15]在研究 5052 铝合金自冲铆接接头过程中发现接头疲劳失效部位与微动损伤区重合，分析了接头疲劳失效机理及其与微动损伤之间的关系。魏文杰等[16]研究了不同搭接顺序下两种钢铝异质自冲铆接头的疲劳失效机理，发现不同搭接顺序的接头疲劳裂纹均源自铆钉腿部与下层板之间的微动磨损，但裂纹在铆钉和下层板的扩展路径及速率不同。HAN 等[17]研究了不同板件界面条件下铝合金自冲铆接接头的微动行为，发现两板之间的固体表面润滑剂可延缓微动损伤的发生并降低损伤程度，从而获得更长的疲劳寿命。XING 等[18]研究了搭接接触面积和加载频率对自冲铆接接头疲劳寿命及失效模式的影响，发现宽试样（有更大的接触面积）在增大接头刚度的同时减少了疲劳载荷加载导致的二次弯曲，因此宽试样的疲劳强度高于窄试样。目前，自冲铆接的研究集中在单个加载角度下的接头疲劳性能，对自冲铆接接头在不同加载角度下的疲劳失效特性研究较少。

本文对 6082-T6（3.0 mm＋2.5 mm）铝合金制成的十字形试样进行静态拉伸和疲劳试验，研究接头在加载角度 0°（拉拔工况）、45°（混合工况）和 90°（剪切工况）下，接头静态力学特性、疲劳特性的变化规律。运用扫描电子显微镜观察断口表面，探明接头疲劳失效过程中裂纹萌生位置及裂纹扩展路径，分析载荷水平影响接头失效模式的根本原因，以接触表面的损伤程度为评价标准，研究加载角度对各区域微动损伤的影响。

1　接头静力学与疲劳试验

1.1　试验材料

连接试验使用的板材是 6082-T6 铝合金型材，其抗拉强度为 340 MPa，弹性模量为 70.25 GPa，屈服极限为 310 MPa，延伸率为 15.91%。采用生产线上的 Express 铆接设备对板件进行铆接，铆钉、凹模和板件的几何形状和尺寸如图 1 所示，铆钉高度为 7 mm，接头上下层板的厚度分别为 3.0 mm 和 2.5 mm，板材尺寸均为 100 mm×40 mm。



(a)铆钉尺寸　(b)模具尺寸

(c)板材尺寸

图 1　铆钉、模具和板的尺寸

Fig.1　Dimensions of rivet, die and sheets

1.2　试验方案

针对不同加载角度的拉伸及疲劳试验，设计了图 2 所示的十字接头。本研究采用的十字接头不能直接被试验设备夹持。为测试自冲铆接接头在加载角度 0°、45°、90°的静力学和疲劳性能，设计了 3 种角度的接头试验工装夹具，如图 3 所示。

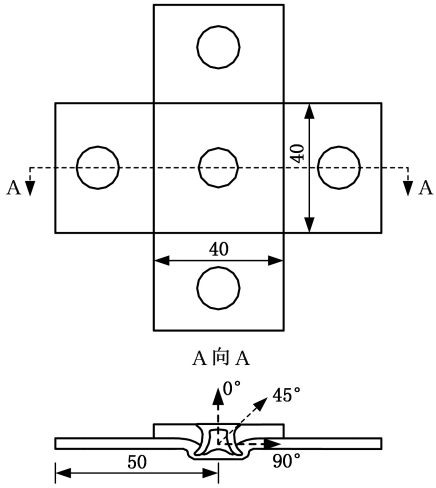


图 2　接头连接形式与不同角度加载示意图

Fig.2　Schematic diagram of joint connection form and loading at different angles

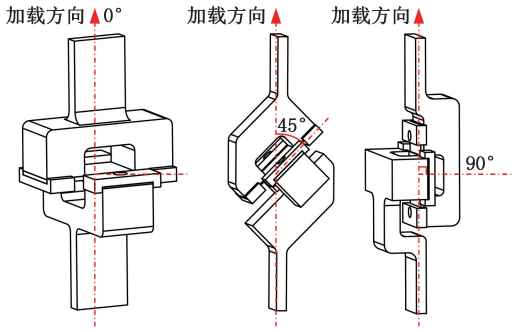


图 3　不同加载角度下接头试验工装

Fig.3　Joint test fixture underdifferent loading angles

拉伸试验在 Instron3369 电子万能试验机上进行。试验设置 2 mm/min 的静拉伸速率，采用力控制模式，以载荷下降到峰值载荷的 45%为试样完全失效判据(此时设备停止拉伸)。试验测试温度为室温。

考虑到疲劳寿命具有一定的分散性，为更准地确评估各工况下接头的疲劳性能，每组工况下均选择 7～8 个载荷水平在万能试验机上进行疲劳测试，寿命为 5000～2×10^6 次循环，且每个载荷水平下均测试 3～4 个有效试件。试验采用载荷应力比 $R=0.1$ 的拉-拉加载模式，疲劳载荷以正弦波形式输出，加载频率 f 根据载荷水平大小取 10～30 Hz，测试温度为室温。

2　接头静力学试验结果与分析

根据试验得到的试件的载荷-位移曲线如图 4 所示。随着加载角度的减小，接头的最大载荷降低，峰值载荷处的位移越大。加载角度 90°、45°、0°下的载荷峰值分别为 12 331.9 N、5841.4 N 和 4938.7 N，对应的载荷位移为 3.5 mm、5.7 mm 和 8.1 mm。达到峰值载荷后，加载角度 90°的载荷-位移曲线下降最平缓，这是由于铆接处在失效过程中产生了塑性变形。

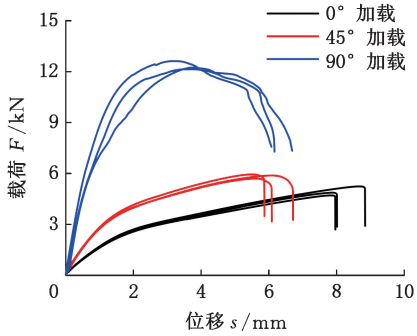
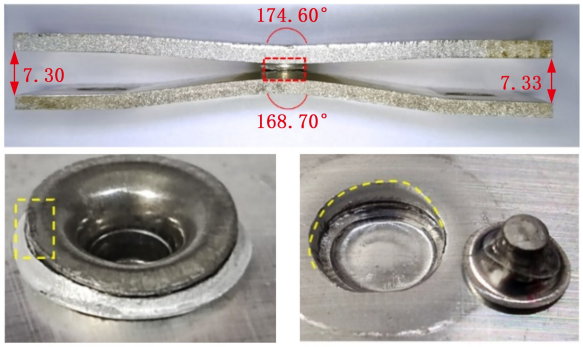


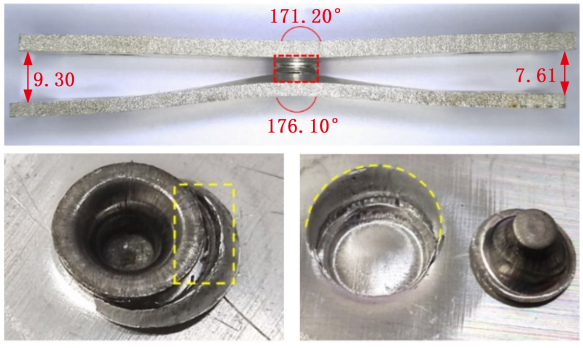
图 4　接头在不同加载角度下的载荷-位移曲线

Fig.4　The load-displacement curves of the joint under different loading angles

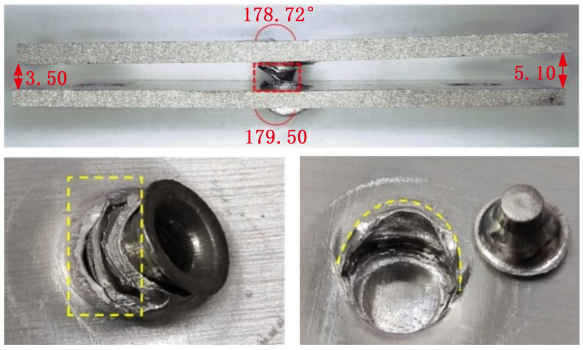
图 5 所示为不同加载角度下的接头静态失效模式——上层板与铆钉从下层板脱出失效。不同加载角度下，下板的弯曲变形角度大于上板，且加载角度越小，下层板变形越明显。如图 5a 所示，0°加载时，铆钉腿部向上挤压下层板。铆钉材料性能优于板材，当接头承载力大于下层板材料极限时，纽扣整圈接触部位被挤压、迅速脱出。如图 5b 所示，45°加载(拉拔剪切混合工况)时，接头出现铆钉腿与下层板撕扯产生的塑性变形区，且明显比加载角度 90°的塑性变形区域小。如图 5c 所示，90°加载时，铆钉头倾斜但没有脱出，上层板出现凹陷，铆钉腿在脱出下层板时与下层板表面摩擦撕扯，产生塑性变形。由图 5 可得随着加载角度的增大，下层板塑性变形程度增大。



(a)0°加载



(b)45°加载



(c)90°加载

图 5　不同加载角度的静态失效模式

Fig.5　Static failure modes under different loading angles

3　接头疲劳试验结果与分析

3.1　接头疲劳寿命

考虑到疲劳寿命具有一定的分散性，对十字

形试样进行 3 种加载角度、7～8 种疲劳载荷水平的疲劳试验来准确评估多应力工况下接头的疲劳性能，图 6 给出了 3 种加载角度下接头疲劳寿命与最大疲劳载荷的关系。加载角度 0°、45°、90°的疲劳载荷 F(N)与寿命 N(循环次数)的关系方程依次为 $F_{0°}=16\ 506.2N^{-0.186}$，$F_{45°}=27\ 578.4N^{-0.196}$，$F_{90°}=44\ 210.6N^{-0.128}$。由图 6 可知在低周水平的拐点处，45°加载角度接头的疲劳寿命变化最剧烈。加载角度 90°、45°、0°对应疲劳极限的载荷极值分别为 6488.9 N、1555.6 N 和 1066.7 N，它们相当于对应静强度的 52.6%、26.6%、21.6%。用 R_1(表示回归方程的整体拟合度)衡量曲线实际拟合的精度，其值越接近 1，拟合效果越好。加载角度 90°、45°、0°对应的 R_1 分别为 0.974、0.987、0.992，这说明曲线拟合效果较好，且实验一致性较好。90°加载的极限载荷寿命远远高于 45°、0°加载，0°、45°加载的疲劳寿命曲线几乎平行，最大疲劳载荷的变化趋势基本相同；45°加载的接头强度略高于 0°加载的接头强度，说明拉拔载荷主导影响 45°加载的接头寿命。

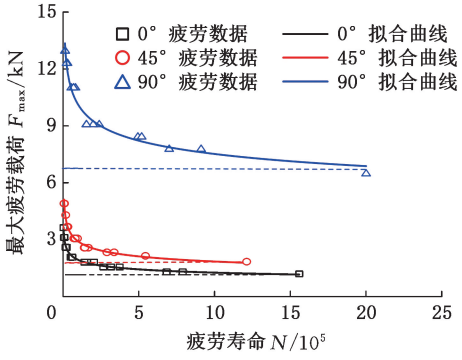


图 6　不同加载角度疲劳寿命曲线

Fig.6　Fatigue life curves under different loading angles

由图 6 可知，随着加载角度的增大，疲劳寿命延长，达到同一疲劳寿命所需的疲劳载荷也增大。这是因为 0°加载时，接头铆钉腿尾部主要受力，如图 7a 中红色区域所示。45°加载(模拟混合加载工况)时，接头钉腿尾部和部分铆钉颈部区域主要受力，如图 7b 中红色区域所示。90°加载时，受力区域为铆钉颈部，如图 7c 中红色区域所示。相比于 0°、45°加载，90°加载增大了受力面积，有效缓解应力集中。因此，接头要达到相同的疲劳寿命，90°加载的接头所承受的疲劳载荷更大。

3.2　接头失效模式

寿命 N 的跨度较大，低周水平样点分布较为集中，为形象说明载荷角、载荷水平与失效模式的关系，将最大疲劳载荷、疲劳寿命和每一组数据对

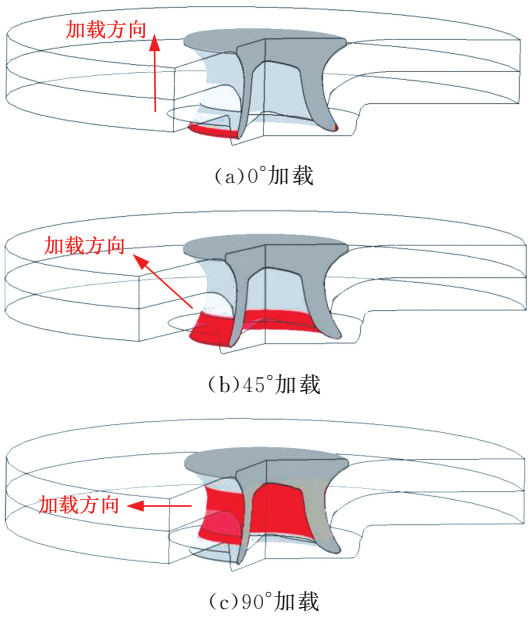


图 7　不同加载角度下的接头疲劳受力示意图

Fig.7　Schematic diagram of joint fatigue stress under different loading angles

应的失效模式用双对数曲线表征，如图 8 所示。加载角度 0°、45°、90°的 F-N 拟合方程分别是 $\lg F=-0.18\lg N+4.168$，$\lg F=-0.194\lg N+4.411$，$\lg F=-0.13\lg N+4.637$。加载角度 0°、45°、90°的曲线都遵循线性规律，对应的线性相关系数 R_2 分别为 0.990、0.989、0.973，这说明曲线拟合得到的方程能较好描述最大疲劳载荷和寿命之间的变化规律。

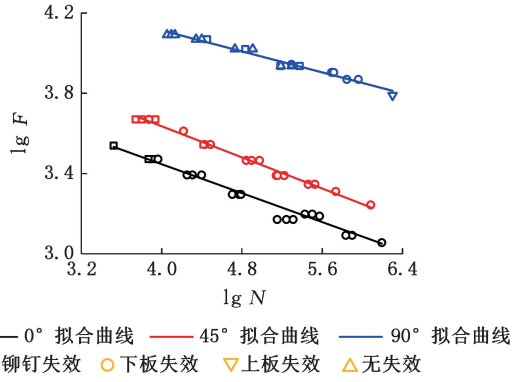


图 8　不同加载角度的疲劳-载荷双对数寿命曲线

Fig.8　Double logarithmic curve of fatigue load and life under different loading angles

由图 8 可知，载荷水平下降导致接头的疲劳失效模式发生改变。对于 0°、45°加载，高载荷水平下的失效模式以铆钉失效为主，随着载荷水平的降低，失效位置由上层板转变到下层板。90°加载时，高载荷水平下的接头以上板失效为主，随着载荷水平的降低，接头从上板失效转变为铆钉失效，最后变为下板失效。

接头疲劳失效(图 9)有上板撕裂、铆钉断裂、

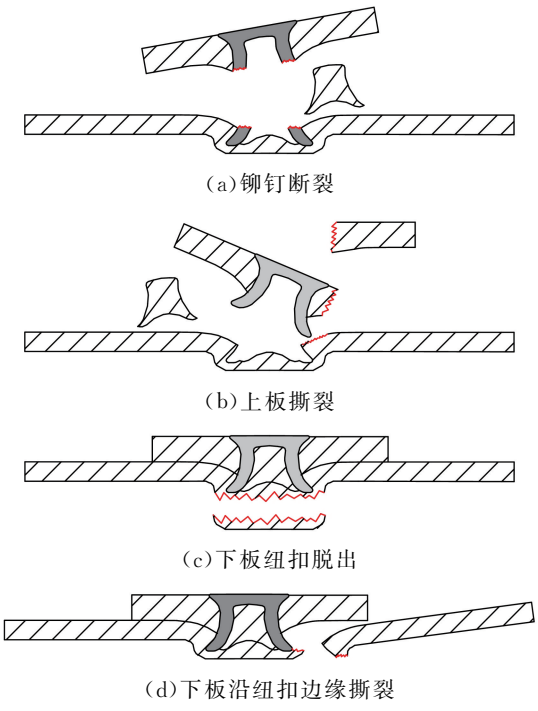


图 9　不同疲劳失效模式示意图

Fig.9　Schematic diagram of different fatigue failure modes

下层板纽扣脱出、下层板沿纽扣边缘撕裂四种模式。

图 10 为典型失效模式的断口宏观图。由图 10a、图 10b 可知，45°加载的接头受到剪切载荷的作用，纽扣同时受到拉拔分力和剪切分力，铆钉与纽扣夹持两端受力不均匀，因此，0°加载的纽扣断口表面相较于 45°加载更平整。如纽扣底部宏观裂纹图(图 10a)所示，0°加载的下板在纽扣颈部出现裂纹，但纽扣没有脱出失效，而是沿着板宽方向断裂失效。45°加载的接头存在一条半圆形断口，如图 10b 中红色虚线框所示。

90°加载接头的上板在高载荷水平下出现了严重的塑性变形，如图 10c 所示。结合图 9b 可以分析得到上板下表面靠近铆钉处发生旋转翘曲开裂，下板存在沿载荷方向摩擦滑移而产生的较大塑性变形。从图 10d 能看到，下层板沿板宽方向存在两条裂纹(最终汇合成一条横越纽扣中心的裂纹)，纽扣边缘处还有一个裂纹源。随着载荷的持续施加，接头从该裂纹源处向板长方向扩展，最终导致下板失效。

3 个加载角度的铆钉失效模式均为铆钉在上下板分离，但部分钉腿尾部残留在下层板，如图 10f～图 10g 所示。相较于 0°、45°加载，90°加载的铆钉断口塑性变形更大，且上板在铆钉旁约 2 mm 处有一条“眉型裂纹”，如图 10g 红色方框所示。

3.3　接头裂纹扩展机理

如图 11 所示，由疲劳试验结果发现，接头微

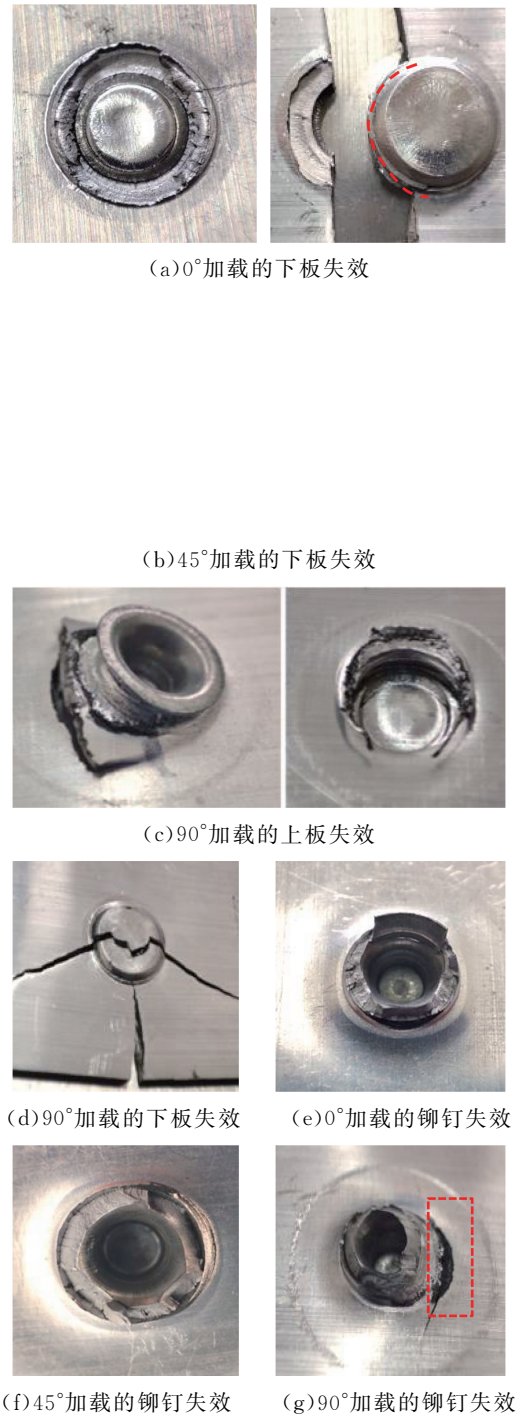


图 10　典型失效模式的断口宏观图

Fig.10　Macro diagram of typical failure mode fracture

动磨损主要发生于上板表面与铆钉头接触区域(A 区域)、两板之间(B 区域)、下板与铆钉腿表面接触区域(C 区域)。接头疲劳失效部位集中在 B、C 区域，说明微动磨损与接头失效存在紧密联系。微动磨损会加速疲劳裂纹的扩展，从而在一定程度上影响疲劳特性[19]。为深入研究接头的微动磨损失效机理，对疲劳失效典型试样的断口区域微观结构进行研究，探讨铆钉和板材的失效机理。

根据断口的微观形貌特征，将形貌分为疲劳源区、疲劳裂纹扩展区、瞬时断裂区。图 12a 为纽

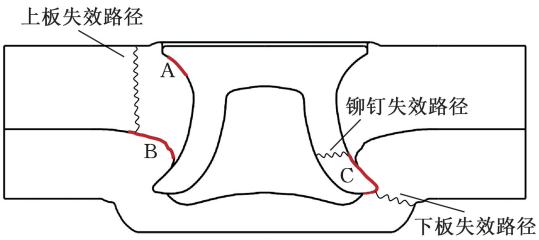
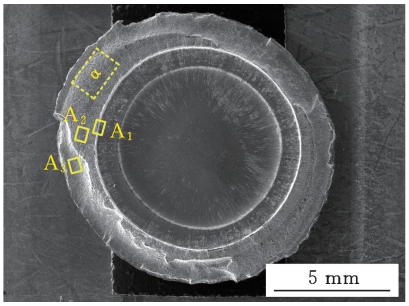


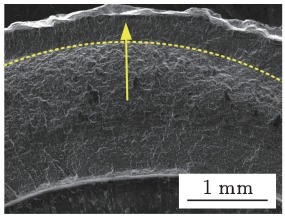
图 11　疲劳断裂失效部位与裂纹扩展路径示意图

Fig.11　Schematic diagram for fatigue failure site and crack growth path

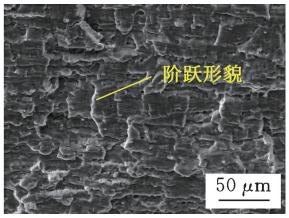
扣脱出失效模式下断裂面的宏观图，图 12b～图 12e 分别为区域 α、A_1、A_2、A_3 的放大图。疲劳辉纹沿纽扣外边缘而不是沿圆周方向扩展，如图 12b 所示。靠近铆钉腿底部的 A_1 区域呈现密集的阶跃状形貌，且存在疲劳辉纹[10]，是典型的疲劳源区形貌。A_2 区域存在大量的韧窝和疲劳辉纹，为裂纹扩展区。A_3 区域存在明显的韧窝及撕裂棱分布，属于典型的塑性断裂特征。可推测，疲劳裂纹萌生于铆钉腿尖与下层板接触位置即 A_1 区域，并不断向纽扣外边缘扩展，随着疲劳载荷持续施加，纽扣受力面积减小；直至剩余材料不足以承受载荷而发生瞬时断裂。



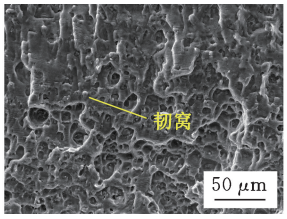
(a)纽扣断口宏观视图



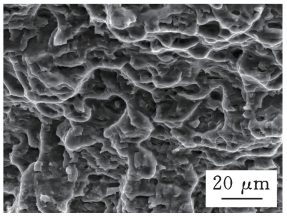
(b)α 放大视图



(c)A_1 放大视图



(d)A_2 放大视图

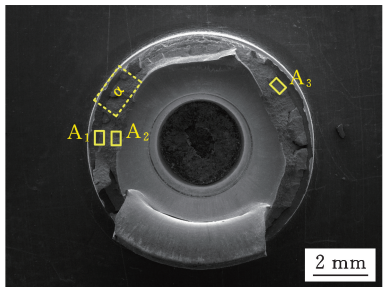


(e)A_3 放大视图

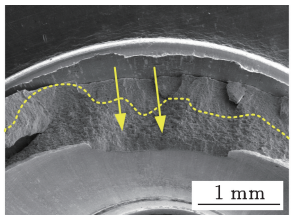
图 12　接头纽扣断口分析

Fig.12　Joint fracture analysis of button

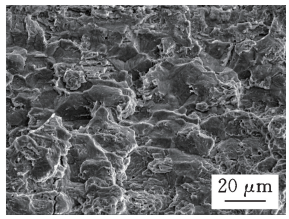
图 13a 为铆钉断裂失效断口宏观图，图 13b～图 13e 为黄色方框标记部位 α、A_1、A_2、A_3 的微观放大图。由图 13b 可知，靠近铆钉外径的断口 A_1 和 A_3 区域均呈现河流形貌，晶粒明显，晶界分明，无明显的塑性变形，并且有二次裂纹，属于典型的沿晶断裂疲劳源区特征，裂纹扩展方向沿着铆钉中心，如图 13b 的黄色箭头所示。在 A_2 区域中，铆钉靠近内径位置分布着密集的韧窝与撕裂棱。由此可知裂纹萌生于铆钉腿外侧与板件接触位置即 A_1、A_3 区域，并沿晶界不断向铆钉内侧扩展延伸，直至铆钉截面不能承受载荷发生瞬时断裂失效。



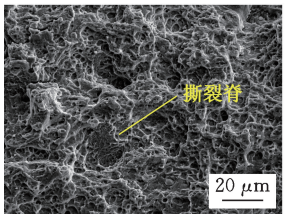
(a)铆钉断口宏观视图



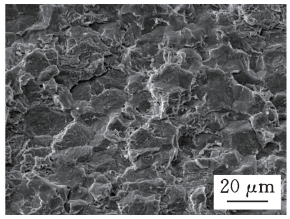
(b)α 放大视图



(c)A_1 放大视图



(d)A_2 放大视图



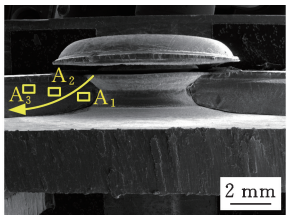
(e)A_3 放大视图

图 13　接头铆钉断口分析

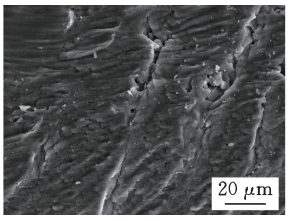
Fig.13　Joint fracture analysis of rivet

下层板沿纽扣边缘断裂的失效宏观断口形貌如图 14a 所示，图 14b～图 14d 为黄色方框标记部位 A_1、A_2、A_3 的放大图。A_1 区域断面平整光滑，呈现密集牛舌状形貌，疲劳条纹清晰，是典型的疲劳源区，根据横向疲劳辉纹的萌生方向可得裂纹朝板厚方向扩展的速率比板宽方向快。A_2 区域存在少量韧窝和沿板宽方向延伸的竖向疲劳条纹，属于疲劳裂纹扩展区。远离铆钉的 A_3 区域分布大量的横向二次裂纹，说明该区域疲劳裂纹扩展极快，接近瞬断区。裂纹扩展路径如图 14a 中黄色箭头所示。由此可知疲劳裂纹萌生于铆钉外径与下层板接触区域即 A_1 区域，在疲劳载荷作用下，疲劳裂纹首先向板厚方向扩展，随后

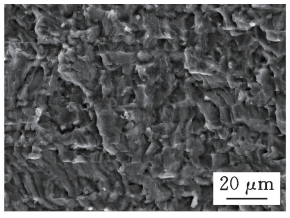
再向两侧板宽方向延伸，随着宏观裂纹的增大，裂纹扩展加快，板件承载面积减小直至剩余结构不能承受载荷而发生完全断裂。



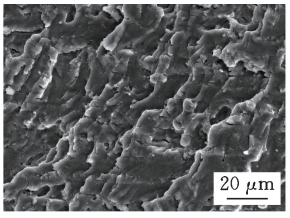
(a)下板断口宏观视图



(b)A_1 放大视图



(c)A_2 放大视图



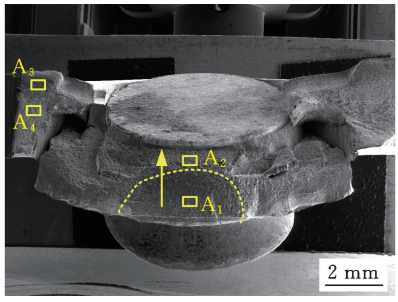
(d)A_3 放大视图

图 14　接头沿纽扣边缘断裂失效断口分析

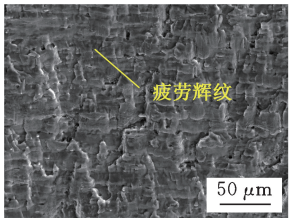
Fig.14　Joint fracture analysis of failure along the edge of the button

图 15a 为上层板失效断面的宏观图，图 15b～图 15e 为黄色方框标记区域 A_1、A_2、A_3、A_4 的放大图。A_1 区域为疲劳初期产生的海滩状形貌，存在大量的横向疲劳辉纹，说明 A_1 区域接近疲劳源区且裂纹向铆钉头扩展，如图 15a 中箭头所示。靠近铆钉头的 A_2 区域存在解理形貌，有明显的二次裂纹，为裂纹扩展区。在剪切载荷作用下，A_3 区域存在向下的撕裂形貌，A_4 区域存在大量的韧窝和撕裂脊，为瞬断区。由此可知疲劳裂纹萌生于靠近铆钉中心的接触面即 A_1 区域，并沿板厚方向朝上扩展直至穿透上层板；在疲劳载荷的作用下，宏观裂纹同时往两侧板宽和板厚方向延伸，并不断撕扯上层板直至接头失效。

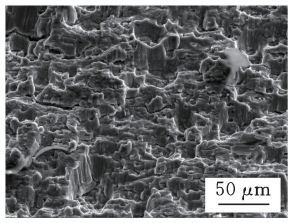
图 16a 为下板产生三道交叉裂纹失效断口宏观图，截取的是所呈夹角较大的两条长裂纹段。图 16b～图 16d 为区域 A_1、A_2、A_3 的放大图。纽扣底部 A_1 区域较为平坦，存在沿左下方扩展的疲劳辉纹和较少的二次裂纹，这说明 A_1 区域为裂纹的疲劳源区。A_2 区域存在解理形貌和二次裂纹，说明此处为疲劳裂纹扩展区。二次裂纹走向均为横向，说明裂纹沿板宽方向延伸扩展。远离铆钉中心的 A_3 区域呈现塑性断裂的大韧窝及撕裂棱形貌，为最终断裂区域。可推测裂纹萌生于铆钉腿尖即 A_1 区域，并朝纽扣底部扩展，形成 3 个裂纹源。纽扣底部较薄，纽扣沿中心出现裂纹，在载荷作用下，下板裂纹沿 3 个裂纹源分别向板宽和板长方向延伸，直至剩余结构承受不住载荷而发生瞬时撕裂。



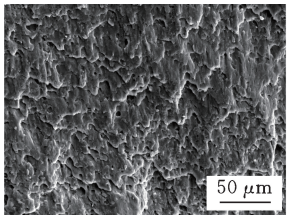
(a)上板断口宏观视图



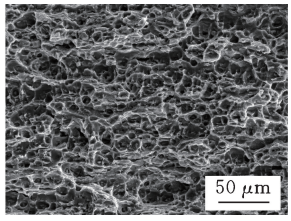
(b)A_1 放大视图



(c)A_2 放大视图



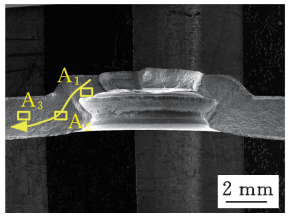
(d)A_3 放大视图



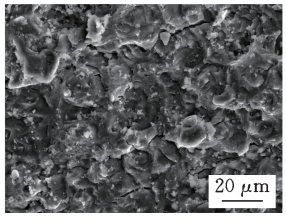
(e)A_4 放大视图

图 15　接头上板断口分析

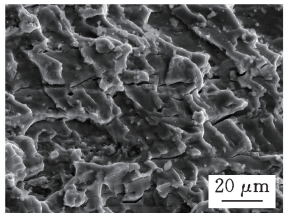
Fig.15　Joint fracture analysis of upper sheet



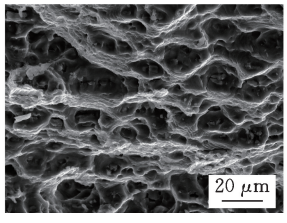
(a)上板断口宏观视图



(b)A_1 放大视图



(c)A_2 放大视图



(d)A_3 放大视图

图 16　接头下板三条裂纹断口分析

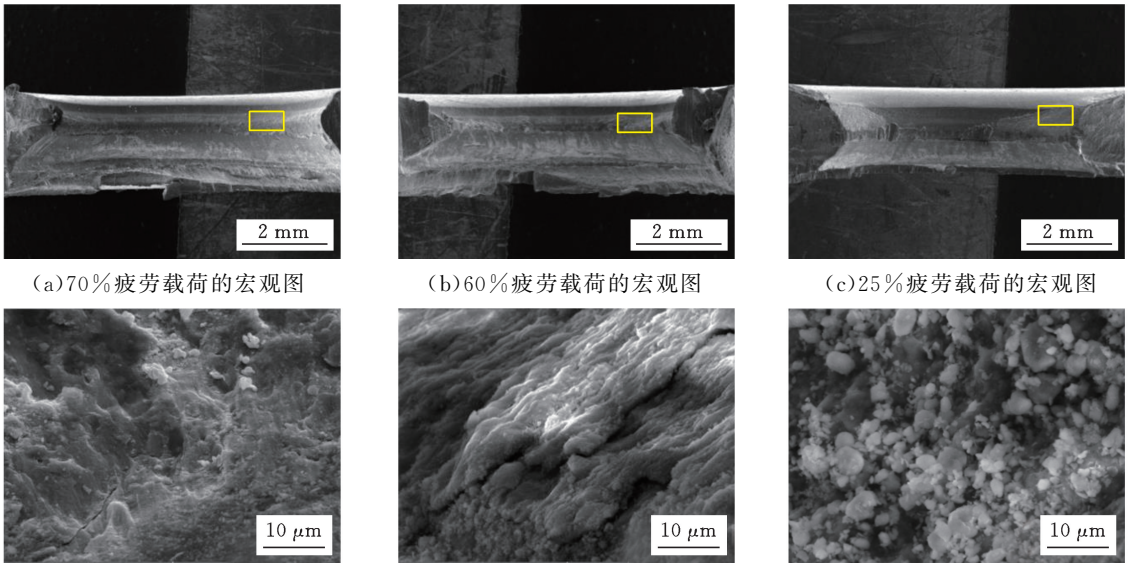
Fig.16　Joint fracture analysis of lower sheet for three cracks

4　多载荷工况接头微动分析

4.1　载荷水平对接头微动损伤的影响

采用 SEM 观测接头微观断口形貌，探究不同加载角度的疲劳载荷水平下降导致接头疲劳失效位置下移的根本原因。0°、45°加载的失效模式变化相同，因此以 0°加载为代表进行分析。挑选 70%、60%、25%疲劳载荷的接头为研究对象。如

图 17a～图 17c 所示，下层板两侧断口附近均出现不同程度的微动损伤，微动损伤表面呈白色粗糙状态。为进一步分析微动磨损的变化，将图中黄色方框所示部位放大进行观测，如图 17d～图 17f 所示，70%载荷的接头下板断口（图 11 中的 C 区域）的磨损表面的片状磨屑分布较为整齐，并存在少量微裂纹，60%载荷与 25%载荷的接头表面出现明显的脱层及颗粒状磨屑堆积形貌。由此推断较低疲劳载荷水平下，下板与钉腿尾部接触区域更容易出现微动磨损。随着接头疲劳载荷水平的不断降低，接头下层板与铆钉腿接触 C 区域微动损伤程度逐渐加重。



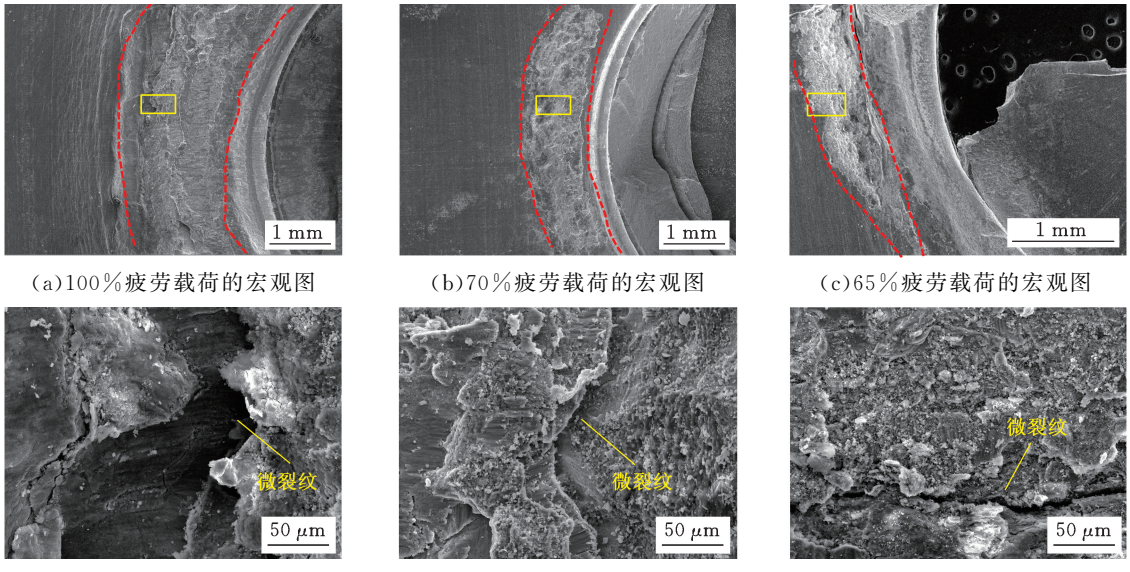
(a)70%疲劳载荷的宏观图　(b)60%疲劳载荷的宏观图　(c)25%疲劳载荷的宏观图

(d)70%疲劳载荷的微观图　(e)60%疲劳载荷的微观图　(f)25%疲劳载荷的微观图

图 17　0°加载接头的下板断口 C 区域的宏观图与微观图

Fig.17　Macro and micro diagram of C area of lower sheet fracture under 0° loading angle

90°加载时，随着疲劳载荷的降低，接头失效部位由上层板转移到铆钉最后到下层板，因此对比接头上板与下板失效断口的微动损伤可探究疲劳载荷下降引起剪切工况的接头失效部位变化的原因。B 区域（位置见图 11）微动损伤是导致接头上层板疲劳失效的直接原因，因此选取 90°加载时 100%、70%、65%载荷的接头进行分析。3 种载荷的接头在 B 区域均发生严重的微动损伤，接头在 B 区域表面存在明显的黑色磨屑及磨损形貌，100%、70%、65%载荷磨损的平均宽度依次为 1.9 mm、0.8 mm、0.6 mm，如图 18a～图 18c 所示。将图中黄色方框所示部位放大进行观测发现，100%载荷接头放大部位脱层程度及微裂纹宽度最高，其他 2 个接头仅有微裂纹，且脱层现象并不明显，如图18d～图18f



(a)100%疲劳载荷的宏观图　(b)70%疲劳载荷的宏观图　(c)65%疲劳载荷的宏观图

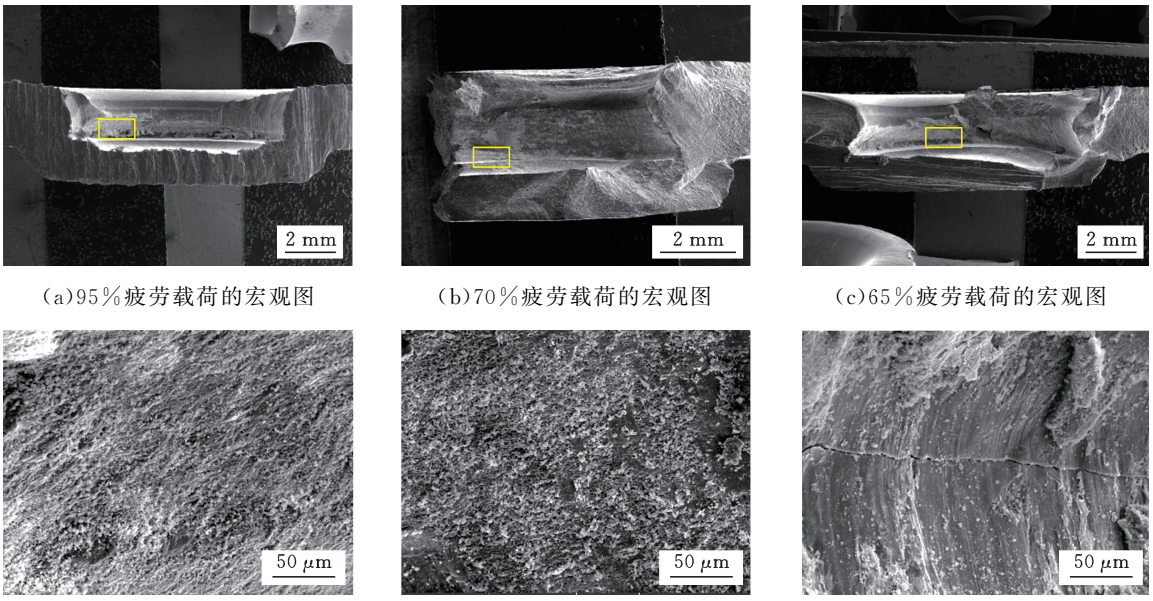
(d)100%疲劳载荷的微观图　(e)70%疲劳载荷的微观图　(f)65%疲劳载荷的微观图

图 18　90°加载接头的上板断口 B 区域宏观与微观图

Fig.18　Macro and micro diagram of B area of upper sheet fracture under 90° loading angle

所示。因此可以推测 90°加载时，接头在两板接触 B 区域微动损伤程度随疲劳载荷下降逐渐减小。

选择 95%、70%、65%载荷的接头下层板的断口进行微观扫描分析。图 19a～图 19c 为断口宏观图，黄色方框放大后的微观形貌如图 19d～图 19f 所示。65%载荷接头的 C 区域（位置见图 11）微动损伤最严重，下层板中部存在一条朝板长方向延伸的扩展性宏观疲劳裂纹。70%载荷接头的中部表面颗粒状磨屑密集分布，与铆钉腿尖接触位置有大量磨损产生的脱层材料，其黑色磨屑带面积大小和微观磨损程度均高于 95%载荷接头，可知 90°加载时，随着疲劳载荷的降低，接头 C 区域表面微动损伤加剧。



(a)95%疲劳载荷的宏观图　(b)70%疲劳载荷的宏观图　(c)65%疲劳载荷的宏观图

(d)95%疲劳载荷的微观图　(e)70%疲劳载荷的微观图　(f)65%疲劳载荷的微观图

图 19　90°工况接头下板断口 C 区域宏观与微观图

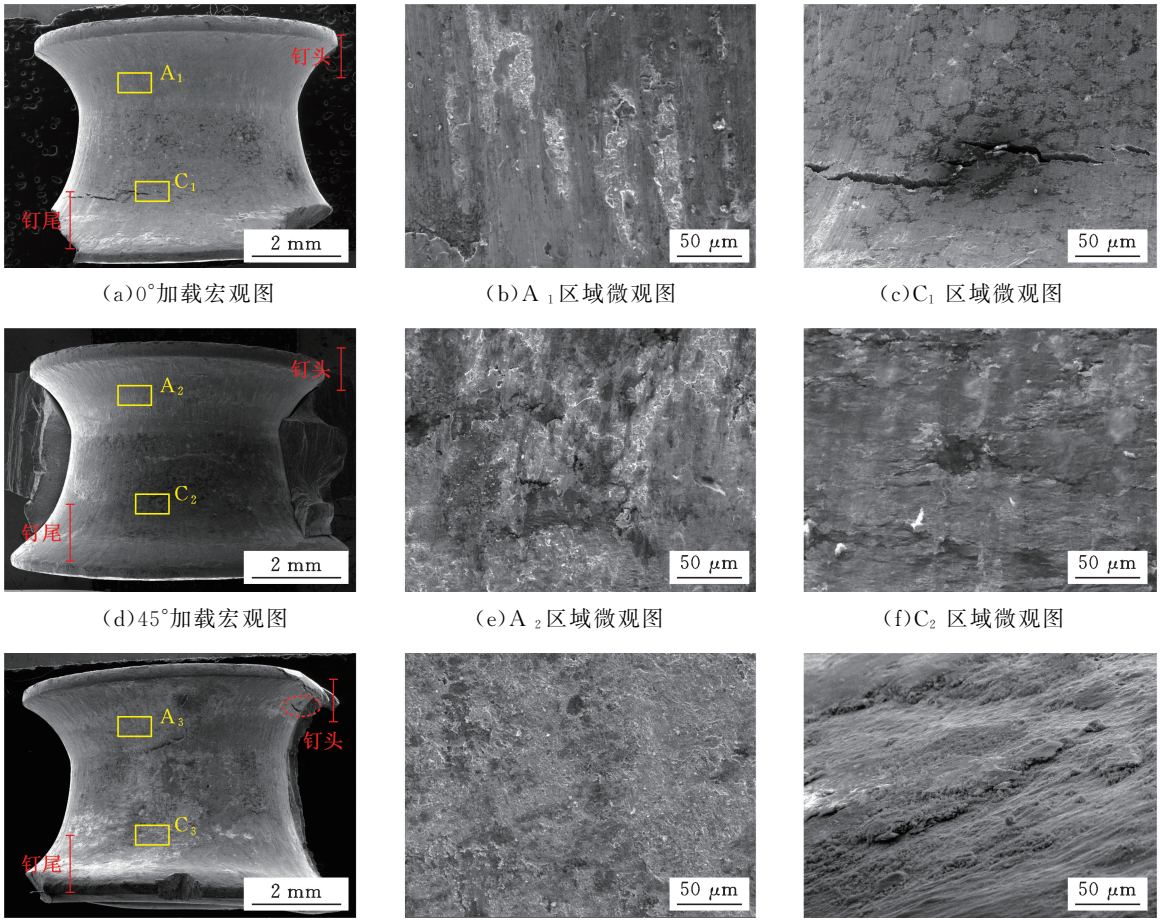
Fig.19　Macro and micro diagram of C area of lower sheet fracture under 90° loading angle

4.2　加载角度对接头微动损伤的影响

不同加载角度的铆钉微动区域如图 20 所示。疲劳加载过程中，接头存在局部联锁和滑动，除了上下板接触区域有微动外，铆钉与上下板之间的接触面也产生微动，出现严重的表面粗糙化。如图 20g 所示，铆钉在 90°加载时的微动磨损区域最大，且磨损区域为铆钉头以下和钉腿尾部（钉尾）以上的颈部区域，磨损泛白面积大于 0°、45°加载；0°加载时，铆钉尾部位出现较大磨损，如图 20a 所示，可得不同加载角度下的铆钉与上下板的磨损接触面积不同。

为进一步研究加载角度对微动损伤的影响，放大铆钉宏观图中的黄色方框区域进行分析。90°加载接头的 A_3 区域出现大面积的微动磨损和黑色磨屑，且钉头右上角位置有超过 1 mm 长的微动疲劳裂纹，如图 20h 所示。45°加载时，A_2 区域表面泛白面积明显减小。0°加载时，铆钉表面平整光滑，仅存在少量磨屑。这说明剪切方向的载荷对 A_1 区域的微动损伤起促进作用，导致 90°加载接头的微动损伤程度大于 45°加载接头，而 0°加载接头最低。这是因为 90°加载时，接头铆钉在载荷作用下发生轻微偏转，造成铆钉头与上层板接触面之间出现间隙，加剧该区域的微动损伤。0°加载时，铆钉与上层板贴合紧密，不存在接触面间的切向挤压运动，所以 A_1 区域的微动程度最低。45°加载的接头受剪切分力的影响，其 A_2 区域微动程度略微高于 0°加载。0°、90°加载的接头区域 C_1、C_3 均存在严重的微动损伤，如图 20c、图 20i 所示。0°加载接头的铆钉腿部左右两侧断裂，且铆钉腿位置存在一条约 2 mm 长的疲劳裂纹，如图 20a 所示。90°加载时，接头铆钉 C_3 区域分布大面积的白色磨痕和微动碎片，呈现材料脱层形貌，且铆钉两侧磨损面积和程度不同。45°加载时，C_2 区域微动形貌与接头 A_2 区域类似，呈现表层开裂及磨屑混合特征，如图 20f 所示，但接头微动程度远低于 0°、90°加载的接头。综上，接头在 0°加载的铆钉 C_1 区域微动损伤最大，90°加载次之，45°加载最小。分析认为，0°加载的接头铆钉腿部 C_1 区域承受了较大的轴向载荷，导致该区域容易出现裂纹扩张。90°加载的接头铆钉腿部承受剪切载荷最大，故发生明显的脱层现象。45°加载的工况为混合工况，可将载荷拆分成轴向和切

向分力，如图 6 所示，45°加载接头的疲劳寿命曲线更靠近 0°加载曲线，说明接头在 45°加载下主要受到轴向力的影响，因此 45°加载微动损伤的程度较低，磨损面积小于 90°加载的铆钉表面。



(a)0°加载宏观图　(b)A_1区域微观图　(c)C_1区域微观图

(d)45°加载宏观图　(e)A_2区域微观图　(f)C_2区域微观图

(g)90°加载宏观图　(h)A_3区域微观图　(i)C_3区域微观图

图 20　不同加载角度的铆钉微动区域

Fig.20　Fretting wear area of rivets under different loading angles

5　结论

1)在静力学测试中，铆接接头在 90°加载下的承载能力最大，失效峰值载荷为 12.33 kN。随着加载角度的减小，接头的峰值载荷逐渐减小。0°、45°、90°加载的接头失效模式均为铆钉从下层板中脱出。

2)随着加载角度的增大，接头的疲劳强度不断提高，90°加载的接头极限疲劳载荷为 6.49 kN。接头在高载荷水平下的疲劳失效模式以上层板或铆钉断裂为主。低载荷水平下，接头的失效模式为下层板底扣脱落。

3)微动磨损是导致失效模式差异的关键因素。疲劳载荷的降低使得接头微动磨损区域由两板之间变为下板与铆钉腿表面接触区域，裂纹萌生位置和疲劳裂纹扩展路径改变，可得疲劳载荷水平降低使得接头失效模式由上板失效变为下板失效。

4)加载角度影响接头微动磨损程度。加载角度为 0°时，微动磨损区域主要在铆钉钉腿处；加载角度为 45°时，接头主要受 0°分力的影响，微动磨损较轻；加载角度为 90°时，铆钉钉头至钉腿的整个区域均为微动磨损区，磨损面积增大，接头极限疲劳载荷最高。

参考文献：

[1] 范子杰，桂良进，苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报，2014，5(1):1-16.
FAN Zijie，GUI Liangjin，SU Ruiyi. Research and Development of Automotive Lightweight Technology[J]. Journal of Automotive Safety and Energy，2014，5(1):1-16.

[2] LI Dezhi，CHRYSANTHOU A，PATEL I，et al. Self-piercing Riveting—a Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2017，92(5):1777-1824.

[3] HE Xiaocong，ZHAO Lun，DENG Chengjiang，et al. Self-piercing Riveting of Similar and Dissimilar Metal Sheets of Aluminum Alloy and Copper Alloy

[J]. Materials & Design (1980-2015), 2015, 65: 923-933.

[4] HAN L, CHRYSANTHOU A, YOUNG K W. Mechanical Behaviour of Self-piercing Riveted Multi-layer Joints under Different Specimen Configurations[J]. Materials & Design, 2007, 28(7): 2024-2033.

[5] HYUCK K D, EON J T, JEDO K. A Quality Study of a Self-piercing Riveted Joint between Vibration-damping Aluminum Alloy and Dissimilar Materials [J]. Applied Sciences, 2020, 10(17):5947.

[6] FU Maofeng, MALLICK P K. Effect of Process Variables on the Static and Fatigue Properties of Self-piercing Riveted Joints in Aluminum Alloy 5754[C]// SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive. Warrendale, 2001:183-189

[7] CHOI D H, HAN D W, KIM H K. Fatigue Life Estimation of Self-piercing Riveted Aluminum Joints under Mixed-mode Loading[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 97:20-28.

[8] 张先炼，何晓聪，邢保英，等. TA1 纯钛与 1420 铝锂合金异质薄板自冲铆接微动疲劳特性[J]. 材料工程，2019，47(4):143-151.
ZHANG Xianlian, HE Xiaocong, XING Baoying, et al. Fretting Fatigue Characteristics of Self-piercing Riveting in Dissimilar Sheets of TA1 Pure Titanium and 1420 Aluminum-lithium Alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(4):143-151.

[9] ZHANG Xianlian, HE Xiaocong, XING Baoying, et al. Quasi-static and Fatigue Characteristics of Self-piercing Riveted Joints in Dissimilar Aluminium-lithium Alloy and Titanium Sheets[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 5699-5711.

[10] 黄志超，宋天赐，赖家美. TA1 钛合金自冲铆接接头疲劳性能及失效机理分析[J]. 焊接学报，2019，40(3):41-46.
HUANG Zhichao, SONG Tianci, LAI Jiamei. Fatigue Performance and Failure Mechanism Analysis of TA1 Titanium Alloy Self-piercing Riveted Joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(3):41-46.

[11] RAO H M, KANG Jidong, HUFF G, et al. Impact of Specimen Configuration on Fatigue Properties of Self-piercing Riveted Aluminum to Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 113:11-22.

[12] RAO H M, KANG Jidong, HUFF G, et al. Structural Stress Method to Evaluate Fatigue Properties of Similar and Dissimilar Self-piercing Riveted Joints[J]. Metals, 2019, 9(3):359.

[13] 赵伦. 5052 铝合金自冲铆接头微动损伤研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2018.
ZHAO Lun. Study on Fretting Damage of Self-piercing Riveting Joint of 5052 Aluminum Alloy [D].Kunming:Kunming University of Science and Technology, 2018.

[14] ZHAO Lun, HE Xiaocong, XING Baoying, et al. Influence of Sheet Thickness on Fatigue Behavior and Fretting of Self-piercing Riveted Joints in Aluminum Alloy 5052[J]. Materials & Design, 2015, 87:1010-1017.

[15] ZHAO L, HE X C, XING B Y, et al. Fretting Behavior of Self-piercing Riveted Joints in Titanium Sheet Materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249:246-254.

[16] 魏文杰，何晓聪，张先炼，等. DP780/AA6061 薄板自冲铆接头微动损伤特性[J]. 机械工程学报，2020，56(6):169-175.
WEI Wenjie, HE Xiaocong, ZHANG Xianlian, et al. Characteristics of Fretting Damage in Hybrid DP780/AA6061 Self-piercing Riveted Joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(6): 169-175.

[17] HAN L, CHRYSANTHOU A, O'SULLIVAN J M. Fretting Behaviour of Self-piercing Riveted Aluminium Alloy Joints under Different Interfacial Conditions[J]. Materials & Design, 2006, 27(3): 200-208.

[18] XING Baoying, TANG Fa, SONG Chengyu, et al. Static and Fatigue Behavior of Self-piercing Riveted Joints with Two Overlap Areas[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14:1333-1338.

[19] 周仲荣. 关于微动磨损与微动疲劳的研究[J]. 中国机械工程，2000，11(10):1146-1150.
ZHOU Zhongrong. On Fretting Wear and Fretting Fatigue[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(10):1146-1150.

（编辑　张　洋）

作者简介：雷付煜，女，2000 年生，硕士研究生。研究方向为汽车车身异种材料连接。发表论文 1 篇。E-mail:1248272938@qq.com。徐小昌*（通信作者），男，1989 年生，副研究员。研究方向为汽车轻量化或汽车车身异种材料连接。发表论文 13 篇。E-mail:xuccae86@126.com。

本文引用格式：
雷付煜，徐小旭，赵亚明，等.加载角度对 6082 铝合金自冲铆接接头疲劳性能及失效模式的影响[J]. 中国机械工程，2025，36(1):141-151.

LEI Fuyu, XU Xiaoxu, ZHAO Yaming, et al. Influence of Loading Angle on Fatigue Characteristics and Failure Modes of Self-piercing Riveted Joints in Aluminum Alloy 6082[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):141-151.