DOI: 10.3901/JME.2020.06.169

DP780/AA6061 薄板自冲铆接头微动损伤特性*

魏文杰 何晓聪 张先炼 卢嘉伟
(昆明理工大学机电工程学院 昆明 650500)

摘要: 对高强度 DP780 与铝合金 AA6061 薄板的异质自冲铆连接工艺进行研究, 并分别制备了不同搭接顺序的 DP780/AA6061(SA)和 AA6061/DP780(AS)接头。对两组接头进行了高周疲劳试验, 对比分析了两组接头的疲劳性能与失效行为, 并进一步利用微观检测技术较系统地分析了两组接头的微动损伤机理。结果表明: AS 接头的疲劳性能明显优于 SA 接头, 且两组接头疲劳失效模式依次为铆钉断裂和下板断裂。SA 接头和 AS 接头的上板近端与下板末端接触区域、上板近端与下板远端接触区域和铆钉与下板近端接触区域均发生微动磨损。微动磨损会导致 SA 及 AS 接头的铆钉和下板近端均出现疲劳裂纹, 由于板材性能的差异, 裂纹在铆钉和下板上的传播路径和扩展速率不同, 最终导致接头失效模式存在差异。

关键词: 自冲铆接; 铝合金; 高强度; 疲劳性能; 微动损伤

中图分类号: TG938

Characteristics of Fretting Damage in Hybrid DP780/AA6061 Self-piercing Riveted Joints

WEI Wenjie HE Xiaocong ZHANG Xianlian LU Jiawei
(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering,
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract: The self-piercing riveting (SPR) processes between the high strength steel DP780 and aluminum alloy AA6061 sheet are studied. The DP780/AA6061(SA) and AA6061/DP780(AS) joints with different combinations are fabricated respectively. The high-cycle fatigue tests are carried out and then comparative analysis about the fatigue properties and failure behaviors are conducted. Further, the fretting damage mechanism of the corresponding joints are discussed systematically using the micro detective methods. The results show that the fatigue strength of the AS joints is significantly better than that of the SA joints. The SA joints fail in locked sheet and the AS joints fail due to the rivet fractured. The fretting wear mainly exists in the contact surfaces between the proximal end of pierced sheet and the distal end of locked sheet, the proximal end of pierced sheet and the far end of locked sheet, as well as the rivet and the proximal end of locked sheet. The fretting wear can result in the fatigue cracks to initiate in both the rivet and the locked sheet of the SA and AS joints. However, due to the different material properties between the high strength steel and the aluminium sheet, the propagation path and rate of the fatigue crack on the rivet and the proximal end of locked sheet are affected, which finally bring the different fatigue failure modes.

Key words: self-piercing riveting; aluminium alloy; high strength steel; fatigue property; fretting damage

0 前言

汽车车身轻量化材料主要包括铝合金、高强度、钛合金、镁合金和复合材料等。单一材料在车身上的应用, 往往会增加车身重量(如钢结构车身)或制造成本(如全铝车身), 这在很大程度上阻碍了轻量化车身的发展。在保证车身安全性能的前提下, 目

前普遍采用“混合车身”这类组合材料结构^[1], 其应用不但有效降低了车身重量, 制造成本也得到了控制。且综合考虑材料制造、连接技术及成本控制等因素, 高强度与铝合金的车身材料组合极具性价比。然而, 高强度与铝合金因熔点、热导率和电导率等物理性质相差较大, 在焊接过程中会出现界面硬脆相、电化学腐蚀和变形与应力等问题^[2], 难以采用传统焊接技术对其进行有效连接。

自冲铆接技术作为一种快速机械冷成形连接工艺, 具有疲劳强度高、连接快速和可连接各种材料

* 国家自然科学基金资助项目(51565023)。20190830 收到初稿, 20191229 收到修改稿

等优点,能够实现对异种板材的有效连接^[3-4]。针对钢铝异质薄板组合自冲铆接头,国内外已有学者进行了相关的研究。金鑫等^[5]采用正交试验研究了铆钉和凹模几何尺寸对 AA6061 和 DP590 自冲铆接头几何特征量和拉剪强度的影响,并得出最优工艺参数组合。马运五等^[6]通过自冲铆过程仿真方法研究了板材屈服强度波动对接头应力集中区域和最大应力值的影响,对接头可能出现裂纹的区域进行了预测。MORI 等^[7]对钢铝三层板自冲铆接头不同搭接顺序下的可连接性进行了研究,并通过对模具的优化提高了接头强度,拓宽了可连接范围。

对于自冲铆接头,在交变载荷的作用下会因接头内部接触面间发生轻微相对滑动而发生微动磨损^[8],其对接头的使用寿命有直接影响。相关研究表明微动磨损和疲劳失效之间有着紧密的联系^[9]。张先炼等^[10]利用成组试验法研究了 TA1 和 AL1420 自冲铆接头疲劳特性,指出接头的疲劳失效均始于微动磨损区域,微动磨损导致疲劳裂纹的萌生,微动磨损的剧烈程度是影响疲劳强度的重要因素。CHEN 等^[8]指出了 AA5754 自冲铆接头的微动磨损区位置,研究了疲劳载荷大小和循环次数等测试条件对微动磨损的影响,指出微动磨损对疲劳裂纹的萌生是至关重要的,且微动裂纹萌生于微动磨损区域。HAN 等^[11]研究了自冲铆接头两板间不同接触条件下的微动磨损,发现固体润滑剂的加入减缓了接头微动磨损,能够延长疲劳寿命;而聚四氟乙烯的加入使得两板间的摩擦力减小,铆钉腿承载力增加,从而导致微动磨损消除或减缓的同时接头疲劳寿命降低。HE 等^[12]研究了 TA1 和 H62 自冲铆接头微动磨损,且高载时,微动区域位于铆钉与上下板接触面间,微动磨损使得铆钉断裂;低载时,微动区域位于铆钉和下板接触面,微动磨损使得下板断裂。HUANG 等^[13]进行了 AA6111 与 HSLA340 异质自冲铆接头的分段暂停疲劳试验,指出微动磨损与疲劳裂纹的萌生有着紧密的联系,裂纹萌生所需时间远小于裂纹扩展的持续时间。对于接头疲劳失效模式,低载时呈现出铝合金“眉纹状”断裂,且断裂区域应力最大;高载时则呈现出铆钉断裂。MORAES 等^[14]通过有限元法研究了疲劳断裂机制与接触压力的联系,指出高周疲劳下的 AA6111 和 AA5754 自冲铆接头微动区域为高接触压力面,而不是铆钉应力集中区域,并利用 LEFM 模型预测微动区域的疲劳寿命。

对钢铝自冲铆接头,目前重点集中在对接头工艺参数优化和钢/铝单一搭接顺序下的力学行为及微动磨损现象的研究,而对钢铝不同搭接顺序下自冲铆接头微动损伤特性的相关研究还比较少。本研

究对比分析了铝合金与高强钢异质薄板组合在不同搭接顺序下的自冲铆接工艺,对两种接头的疲劳性能及失效模式进行了较系统的讨论,并进而探究不同搭接顺序的钢铝自冲铆接头的微动损伤特性。

1 材料与方法

研究以厚度为 2 mm 的铝合金薄板 AA6061 和 1.26 mm 厚的镀锌高强双相钢薄板 DP780 为试验材料,AA6061 和 DP780 化学成分与质量分数分别如表 1 和表 2 所示。采用标距为 20 mm 的引伸计对试验薄板进行单向拉伸试验,拉伸速率为 2 mm/min,获得其力学性能如表 3 所示。

表 1 AA6061 化学成分与质量分数 %

Mg	Si	Zn	Ti	Fe	Mn	Al
0.5	0.4	0.25	0.15	0.7	0.15	余量

表 2 DP780 化学成分与质量分数 %

Mn	Si	C	P	S	Fe
2.5	0.8	0.18	0.04	0.015	余量

表 3 板材力学性能参数

板材	屈服强度 /MPa	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)
AA6061	248	70	275	17.1
DP780	829	172	833	15.2

自冲铆接工艺试验在电液伺服自冲铆接设备(Böllhoff RIVSET VARIO-FC MTF)上进行。采用剖面直观检测法^[15]评估自冲铆接头的成形质量,通过对比铆接试验获得以 AA6061 作为下板的接头(DP780/AA6061, SA 接头)与 DP780 作为下板的接头(AA6061/DP780, AS 接头)最优成形截面如图 1 所示。可见,铝合金作为下板的 SA 接头铆钉轮廓曲线平滑,铆钉腿向两侧呈现出明显的弯曲;而高强钢作为下板的 AS 接头铆钉腿部向两侧笔直张开,无弯曲现象,但铆钉有轻微墩粗。此外,SA 接头的钉脚张开度($l=1.05$ mm)与残余底厚($t=0.94$ mm)明显优于 AS 接头($l=0.63$ mm, $t=0.49$ mm),这说明 SA 接头具有更好的接头强度,SA 接头的成形质量更优。

图 1 不同搭接顺序的钢铝自冲铆接头成形截面

上述成形截面所采用的半空心自冲铆钉材料为硼钢 36MnB4, 硬度为 $50 \text{ HRC} \pm 2 \text{ HRC}$ 。铆钉和模具的尺寸示意图见图 2, 其中模具深度分别为 1.7 mm(SA 接头)和 1.9 mm(AS 接头); 铆接参数为: 刺穿压强 20 MPa, 冲头行程 131.2 mm。由此工艺参数, 分别制备 SA 和 AS 两组自冲铆接头, 接头搭接尺寸如图 3 所示。

图 2 铆钉和模具几何尺寸

图 3 板材搭接顺序

两组接头的拉伸-剪切试验和高周疲劳试验均在 MTS Landmark 100 电液伺服材料试验机上进行, 为了减少试件在试验过程中因弯矩而导致的影响, 在 DP780 末端夹持 $25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的垫片, 在 AA6061 末端夹持 $25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1.26 \text{ mm}$ 的垫片。

通过拉伸-剪切试验获得 SA 接头静强度为 7.1 kN, AS 接头静强度为 5.3 kN。为了保证自冲铆接头疲劳拟合曲线($F-N$)的准确性, 通常需要通过高周疲劳试验获得接头在短、中和长寿命区的疲劳数据, 即疲劳循环次数分别为 10^4 、 10^5 和 10^6 数量级。本研究以 50% 载荷水平(3.5 kN)对 SA 接头进行疲劳试验, 获得其平均疲劳寿命为 22 233 次(10^4 数量级)。基于此, 进一步确定了 SA 接头在 10^5 、 10^6 数量级下的载荷分别为 2.0 kN(28%)、1.8 kN(25%), 1.5 kN(20%)。为了直观对比两组接头的疲劳性能差异, 选取与 SA 接头相同的载荷 3.5 kN 和 2.0 kN 对 AS 接头进行试验; 试验发现在载荷为 1.9 kN 时大部分 AS 接头达到 200 万次循环仍未失效, 其数据无法用于曲线拟合, 因此补做载荷为 2.5 kN 下的 AS 接头疲劳试验。每级疲劳载荷水平下分别测试四个接头试样, 采用加载频率 $f=20 \text{ Hz}$, 应力比 $r=0.1$ 的正弦波形载荷对接头试样进行拉-拉疲劳试验, 以

接头出现可视裂纹或疲劳循环次数超过 200 万次作为高周疲劳试验的终止条件。

2 结果与分析

2.1 疲劳寿命

通过高周疲劳试验获得两组自冲铆接头的疲劳数据如表 4 所示。可见, 在相同疲劳载荷下(3.5 kN 和 2.0 kN), AS 接头的平均疲劳循环次数分别高于 SA 接头 259.1%、239.1%, 且 AS 接头在 1.9 kN 疲劳载荷作用下, 有三个试样的疲劳循环次数超过 200 万次而未失效。总体上讲, AS 接头的疲劳循环次数明显高于 SA 接头。此外, 研究采用 $S-N$ 曲线拟合法^[16]得出两组接头的 $F-N$ 疲劳曲线方程如下

SA

$$\lg N = 4.84 - 1.47 \lg(F - 1.37) \quad (1)$$

AS

$$\lg N = 5.09 - 0.74 \lg(F - 1.87) \quad (2)$$

式中, N 为疲劳循环次数, F 为疲劳载荷。由此绘制图 4, 可见, SA 和 AS 接头 $F-N$ 曲线并无交点, 在高载、中载和低载区间, 当承受相同的疲劳载荷时, AS 接头的疲劳循环次数均高于 SA 接头; 当达到相同的疲劳循环次数时, AS 接头所能承受的疲劳载荷高于 SA 接头, 故 AS 接头疲劳性能整体上优于 SA 接头。SA 接头在接近 1.5 kN 时, 其 $F-N$ 曲线缓慢下降并有继续下降的趋势, 结合 SA 接头承受载荷为 1.5 kN 时, 疲劳循环次数未达到 200 万次, SA 接头疲劳极限低于 1.5 kN; AS 接头在疲劳载荷接近 1.9 kN 时, 其 $F-N$ 曲线趋于平行, 结合表中载

表 4 各组接头疲劳试验数据

SA 接头		AS 接头	
载荷水平/kN	疲劳循环次数	载荷水平/kN	疲劳循环次数
3.5	25 891	3.5	67 920
	20 145		70 307
	16 971		67 104
	25 924		114 026
2.0	151 084	2.5	208 570
	143 598		178 096
	118 995		221 428
	203 881		160 665
1.8	194 715	2.0	538 214
	221 602		558 443
	205 137		469 884
	226 422		527 850
1.5	1 170 031	1.9	2 000 000
	1 157 196		610 220
	1 506 719		2 000 000
	1 730 391		2 000 000

荷为 1.9 kN 时, 大多数接头疲劳循环次数已超过 200 万, AS 接头疲劳极限约为 1.9 kN, 故 AS 接头疲劳强度优于 SA 接头。

图4 SA 和 AS 接头 $F-N$ 曲线

2.2 疲劳失效

两组接头的疲劳失效模式如图 5 所示。通过高周疲劳试验, 发现 SA 接头在各级载荷水平下均因下板断裂而失效, 且裂纹沿铆钉腿圆周方向穿过, 见图 5a。对于 AS 接头, 疲劳失效模式均为铆钉腿断裂, 如图 5b 所示, 且多数接头铆钉腿断裂后扩张部位和刺穿部位未完全分离。

图5 接头失效模式

采用 TENSAN VEGA3 SCAN 扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM), 对典型的失效断口进行分析, 图 6 为图 5a 中 SA 接头下板断口微观形貌。图 6a 为区域 1 微观形貌, 呈现韧窝状, 为韧性断裂特征。图 6b 为区域 2 微观形貌, 可观察到清晰的解理台阶及二次裂纹, 为典型的疲劳断裂特征^[17]。可见 SA 接头在下板断裂过程中, 一侧发生韧性断裂, 另一侧发生疲劳断裂。

为便于观察, 将图 5b 中 AS 接头铆钉扩张部位与刺穿部位进行分离, 其断口形貌如图 7a 所示。可见, 铆钉右侧宏观断口较为平整, 选取虚线方框区域进行微观断口分析, 如图 7b 所示。该区域 SEM 图中断口

形貌呈现出脆性穿晶断裂特征。由此可推断, 铆钉断裂始于右侧, 并沿着铆钉圆周方向传播, 最终呈现为铆钉扩张部位与刺穿部位未完全分离的失效模式。

图6 SA 接头下板断口

图7 AS 接头疲劳断口

2.3 微动损伤

2.3.1 微动区域

研究采用第 2.2 节所述扫描电子显微镜和 X 射线能谱仪(Energy disperse spectroscopy, EDS)对典型疲劳失效接头进行微动分析。通过疲劳试验发现, 钢铝接头的微动磨损主要发生在上板近端与下板末端接触区域(A 区域)、上板近端与下板远端接触区域(B 区域)和铆钉与下板近端接触区域(C 区域)。两组接头的微动区域及疲劳断裂路径如图 8 所示。

图8 不同搭接顺序接头的微动损伤区域及断裂路径

两组失效接头在 A 区域与 B 区域的微动磨损情况如图 9 所示,在微动区域内(箭头标注)均存在明显的磨损痕迹及黑色磨屑;且可见微动现象仅出现在上板底面近端,而在末端没有相应的磨损痕迹。究其原因,是在高周疲劳试验过程中,两组接头上板均出现明显的翘曲变形,如图 10 所示。单搭接接头在疲劳循环载荷作用下,上层板材末端逐渐发生翘曲变形,导致两板接触间 I 区域更加紧密,II 区域产生明显缝隙,使得区域 I 处因上下板紧密贴合而发生微动磨损,区域 II 处因上下板分离而未出现磨损现象。此外,以 AS 接头为例,观察接头在不同疲劳循环载荷作用下的 A 和 B 区域微动磨损情况,如图 11 所示。可见,随着疲劳载荷的增加,接头 A 和 B 区域微动磨损面积逐渐增大。这进一步证明,疲劳载荷增大导致上板近端与下板接触更加紧密(即 I 区域),导致两板间的微动磨损程度更严重。

图 9 不同搭接顺序接头在两板间的微动区域

图 10 单搭接接头受载后翘曲变形

图 11 AS 接头不同载荷下上板近端微动磨损

2.3.2 SA 接头微动分析

对于典型 SA 失效接头,采用激光切割沿图 9a 中“路径 γ ”进行切割,以便取出铆钉进行后续分析。SA 接头铆钉如图 12a 所示,在铆钉头区域及铆钉脚区域附近未出现明显的磨损痕迹,而在铆钉表面中部 C 区域可见清晰的泛白磨损痕迹。结合 SA 接头成形截面可知, C 区域的磨损是由铆钉与下板间的微动所致。图 12b 为 C 区域中虚线框处放大图,

可见 SA 接头的铆钉在与下板接触处磨损区出现细微裂纹。对 C 区域进行 EDS 分析,其元素分布和元素含量分别如图 12c 和表 5 所示。

图 12 SA 接头铆钉微动损伤分析

表 5 铆钉 C 区域元素含量 %

元素	Zn	Fe	Al	O
质量分数	41.62	2.96	4.76	50.66
原子分数	71.14	4.32	3.36	21.18

从图 12c 中元素(Zn、Fe、Al、O)分布难以分析微动磨损情况。但是,结合 Al 元素的存在和表 5 中 O 元素的高含量,可知 C 区域中铆钉与下板接触区域发生了严重的微动氧化磨损。图 12c 中铆钉裂纹两侧 Al 元素密集差异,显示裂纹上部铆钉区域磨损更为剧烈,铆钉表面 C 区域中细微裂纹的萌生由此处微动磨损所致。

图 13 为 SA 接头下板 C 区域微动磨损痕迹,图中黑色虚线区域磨损痕迹较为明显,表明铆钉与下板接触面间发生了严重的微动磨损。该微动磨损区域在水平方向位于断口边缘,竖直方向靠近下板上表面。铆钉与下板接触面在发生严重微动磨损过程中,裂纹从下板 C 区域萌生并扩展,最终导致下板疲劳裂纹的生成。根据以上对 SA 接头微动磨损的

研究, SA 接头微动磨损主要发生在 A 区域、B 区域和 C 区域, 但 C 区域中铆钉与下板间微动磨损是引起 SA 接头下板沿“路径 α ”疲劳断裂的原因。

图 13 SA 接头下板 C 区域微动磨损

2.3.3 AS 接头微动分析

图 14b 为 AS 接头下板 C 区域表面的微动磨损情况, 可见板材表面存在清晰的磨损痕迹, 表明下板 C 区域发生了微动磨损, 其中 C 区域 a 侧磨损较 b 侧更为剧烈。且由失效板材表面发现微动磨损现象仅出现在下板近端 C 区域, 这进一步证明了微动磨损与铆钉疲劳断裂的联系。即下板近端与铆钉接触的 C 区域的微动磨损使得疲劳裂纹在铆钉右侧区域(图 7a)萌生, 并沿铆钉圆周扩展至铆钉左侧区域, 最终使得断裂的铆钉从下板中被拉出。此外, 对 C 区域中磨损区域进行 EDS 分析, 结果如图 14c 和表 6 所示。

(c) 下板 C 区域元素分析

图 14 AS 接头下板微动损伤分析

表 6 下板 C 区域元素含量 %

元素	Zn	Fe	Mn	O
质量分数	40.07	23.01	0.59	36.33
原子分数	57.98	28.43	0.72	12.86

该区域可检测到 Zn、Fe、Mn 和 O 元素, 由于铆钉和下板存在相同元素(如 Fe、Mn 元素), 通过元素种类无法分析微动磨损情况, 故从元素分布角度考虑。图 14c 中 Zn 元素在 C 区域 b 侧分布更为密集, 而 Fe、O 元素则在 C 区域 a 侧分布更为密集。表明 C 区域 b 侧发生轻微的微动磨损, 板材镀锌层未遭到明显破坏, 故 Zn 元素更密集。而 C 区域 a 侧下板和铆钉接触面因发生相对较大的微量滑动, 致使镀锌层被破坏, 表面磨损更严重, 结合表 6 中 O 元素含量较高表明磨损区发生了剧烈氧化反应, 故 a 侧的 Fe、O 元素更密集。这说明 C 区域中铆钉与下板近端发生微动磨损, 并最终使得 AS 接头铆钉疲劳裂纹沿“路径 β ”扩展。

同时, 在 AS 接头下板 C 区域局部可观察到细微疲劳裂纹, 如图 15 所示。表明 C 区域的微动磨损也导致了下板疲劳裂纹的萌生。综上所述, 对不同搭接顺序的钢铝自冲铆接头, 导致接头最终疲劳失效的微动磨损均出现在铆钉与下板近端接触的 C 区域内, 并引起疲劳裂纹萌生在铆钉和下板接触区域。但由于高强钢和铝合金薄板性能差异的影响, 会导致板材及铆钉上的裂纹传播路径和扩展速率不同, 使得铝合金作为下板的接头失效于下板断裂, 而高强钢作为下板的接头失效于铆钉断裂。

图 15 AS 接头下板 C 区域微动裂纹

3 结论

(1) 采用自冲铆接技术均能对铝合金作为下板的 SA 接头和高强钢作为下板的 AS 接头实现有效连接, SA 接头的成形质量更优。

(2) AS 接头的疲劳寿命在各级疲劳载荷水平下均优于 SA 接头。SA 接头的疲劳失效模式为下板断裂, 断口特征呈现出一侧脆性解理断裂, 另一侧韧性断裂; AS 接头失效于铆钉断裂, 断口呈现出穿晶脆性断裂特征。

(3) 不同搭接顺序的钢铝自冲铆接头在上板近端与下板末端接触区域、上板近端与下板远端接触区域以及铆钉与下板近端接触区域均存在微动磨损痕迹, 而铆钉与下板近端接触区域的微动磨损是导致钢铝接头疲劳断裂的根本原因。

(4) 微动磨损会导致钢铝自冲铆接头的疲劳裂纹萌生在铆钉和下板近端。受高强钢和铝合金薄板性能差异的影响, 使得 SA 接头失效于下板断裂, 而 AS 接头失效于铆钉断裂。

参 考 文 献

- [1] 李永兵, 李亚庭, 楼铭, 等. 轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 44-54.
LI Yongbing, LI Yating, LOU Ming, et al. Lightweighting of car body and its challenges to joining technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 44-54.
- [2] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1-23.
LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in welding and jointing processes of multi-material lightweight car body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1-23.
- [3] HE X C, PEARSON I, YOUNG K. Self-pierce riveting for sheet materials: State of the art[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199(1-3): 27-36.
- [4] HE X C, WANG Y F, LU Y, et al. Self-piercing riveting of similar and dissimilar titanium sheet materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9-12): 2105-2115.
- [5] 金鑫, 李永兵, 楼铭, 等. 基于正交试验的铝合金——高强钢异种金属自冲铆接工艺优化[J]. 汽车工程学报, 2011, 1(4): 185-191.
JIN Xin, LI Yongbing, LOU Ming, et al. Process optimization of self-piercing riveting aluminum to high strength steel using DOE method[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011, 1(4): 185-191.
- [6] 马运五, 楼铭, 李永兵. 铝合金高强钢自冲铆接工艺仿真研究[J]. 汽车工艺与材料, 2017(8): 11-15, 19.
MA Yunwu, LOU Ming, LI Yongbing. Simulation research on self-piercing riveting process of aluminum alloy to high strength steel [J]. Automobile Technology & Material, 2017(8): 11-15, 19.
- [7] MORI K, ABE Y, KATO T. Self-pierce riveting of multiple steel and aluminium alloy sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(10): 2002-2008.
- [8] CHEN Y K, HAN L, CHRYSANTHOU A, et al. Fretting wear in self-piercing riveted aluminium alloy sheet[J]. Wear, 2003, 255(7): 1463-1470.
- [9] 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(10): 75-79.
ZHOU Zhongrong. Research on fretting wear and fretting fatigue[J]. China Mechanical Engineering, 2000(10): 75-79.
- [10] 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 Xiacong, 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.
- [11] 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.
- [12] HE X C, DENG C, ZHANG X L. Fretting behavior of SPR joining dissimilar sheets of titanium and copper alloys[J]. Metals, 2016, 6(12): 1-9.
- [13] HUANG L, BONNEN J, LASECKI J, et al. Fatigue and fretting of mixed metal self-piercing riveted joint[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 83: 230-239.
- [14] MORAES J F C, RAO H M, JORDON J B, et al. High cycle fatigue mechanisms of aluminum self-piercing riveted joints[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 41(1): 57-70.
- [15] 何晓聪, 何家宁, 柯建宏, 等. 自冲铆接头的质量评价及强度可靠性预测[J]. 湖南大学学报, 2010, 37(12): 1-4.
HE Xiacong, HE Jianing, KE Jianhong, et al. Quality evaluation and strength reliability prediction of self-pierce riveted joints[J]. Journal of Hunan University, 2010, 37(12): 1-4.
- [16] 高镇同, 傅惠民, 梁美训. S-N 曲线拟合法[J]. 北京航空航天大学学报, 1987(1): 115-119.
GAO Zhentong, FU Huimin, LIANG Meixun. A method for fitting S-N curve[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1987(1): 115-119.
- [17] 钟群鹏, 赵子华, 张峥. 断口学的发展及微观断裂机理研究[J]. 机械强度, 2005(3): 358-370.
ZHONG Qunpeng, ZHAO Zihua, ZHANG Zheng. Development of "fractography" and research of fracture micromechanism[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005(3): 358-370.

作者简介: 魏文杰, 男, 1993 年出生。主要研究方向为薄板材料连接新技术。

E-mail: wei_wenjie@126.com

何晓聪(通信作者), 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为薄板材料连接新技术

E-mail: xiacong_he@126.com