

不同夹层材料层合板与 AA5052 铝合金自冲铆接接头 成形质量与静强度对比

黄志超, 张玉宽, 姜玉强

(华东交通大学 载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了对比不同夹层材料层合板与 AA5052 铝合金自冲铆接接头的成形质量与静强度, 分别采用 M005 丙烯酸高强度结构胶、EVA 泡棉和泡沫镍作为夹层制备了厚度为 1.5 mm 的层合板, 使用两种板料组合方式进行自冲铆接试验。结果表明: 在成形质量方面, 层合板作为上板的接头的成形质量优于层合板作为下板的接头的质量, 且夹层材料的种类对接头的成形质量产生了影响, EVA 泡棉夹层的层合板成形质量最优, 泡沫镍夹层的层合板次之, M005 丙烯酸高强度结构胶夹层的层合板最差。接头的成形质量影响了接头的静强度, 接头成形质量越好, 对应接头的静强度越大。在失效形式方面, 层合板作为上板时接头的失效形式为铆钉拔出铝合金板; 而层合板作为下板时接头的失效形式为铆钉拔出层合板下基板, 并伴随有层合板上基板与夹层材料的拉破撕裂。

关键词: 夹层材料; 层合板; 自冲铆接; 成形质量; 静强度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.012

中图分类号: TG938

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 11-0087-08

Comparison on forming quality and static strength for self-piercing riveting joints of laminated plates with different sandwich materials and AA5052 aluminum alloy

Huang Zhichao, Zhang Yukuan, Jiang Yuqiang

(Key Laboratory of Conveyance and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to compare forming quality and static strength for self-piercing riveting joints of laminated plates with different sandwich materials and AA5052 aluminum alloy, the laminated plates with the thickness of 1.5 mm were prepared by using M005 acrylic high-strength structural adhesive, EVA foam and nickel foam as interlayers, respectively, and the self-piercing riveting test was carried out by two kinds of plate combination methods. The results show that in the aspect of forming quality, the forming quality of joints when taking the laminated plate as the upper plate is better than that when taking the laminated plate as the lower plate, and the type of sandwich material affects the forming quality of joints. The forming quality of the laminated plate with EVA foam is the best, the laminated plate with nickel foam is the second, and the laminated plate with M005 acrylic high-strength structural adhesive has the worst forming quality. The forming quality of joints affects the static strength of joints. The better the forming quality of joints is, the greater the static strength of corresponding joints is. In terms of failure mode, when the laminated plate is used as the upper plate, the failure mode of joints is that the rivet pulls out the aluminum alloy plate, and when laminated plate is used as the lower plate, the failure mode of joints is that the lower substrate of laminated plate is pulled out by rivets, accompanied by the tensile tear of the upper substrate and the sandwich material of laminated plate.

Key words: sandwich material; laminated plate; self-piercing riveting; forming quality; static strength

汽车轻量化是汽车行业发展的重要方向, 轻量化结构、轻量化材料以及轻量化结构材料是实现汽车轻量化的重要途径^[1-2]。层合板是通过一定的连

接技术将两层及两层以上的单层板组合为一个整体的结构板, 夹层结构的表板的材料有铝合金、不锈钢、钛合金以及复合材料, 夹层的材料有轻质木材、泡沫塑料和金属蜂窝材料等, 夹层与表板一般利用胶粘结在一起, 也可采用熔焊、焊接等连接技术来形成整体。层合板由于多层的结构特性, 具有减振、隔声、抗冲击等诸多优势, 被广泛应用于航空航天

收稿日期: 2021-11-17; 修订日期: 2022-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51875201)

作者简介: 黄志超 (1971-), 男, 博士, 教授

E-mail: hzcosu@163.com

制造业、船舶制造业等领域^[3-4]。目前,层合板的连接技术主要有螺栓连接、胶接等^[5-7],这些传统的连接技术工艺复杂、稳定性较差。而自冲铆接作为一种冷变形连接技术^[8],通过液压缸或伺服电动机提供的动力,将特制铆钉直接刺穿待铆接板材的上板材,并在凹模的作用下将铆钉刺入下板材产生变形扩张,从而形成稳定连接的一种全新的板材连接技术。自冲铆接技术能够实现同种材料、异种材料以及多层材料之间的有效连接,被广泛应用于生产制造中。

基于自冲铆接技术,国内外相关学者做了大量研究。黄志超等^[9]研究了结构胶对钢/铝自冲铆接静力学性能的影响。刘洋等^[10]研究了泡沫金属夹层层合板自冲铆接接头的疲劳性能及失效机理。吕枫等^[11]采用数值模拟与试验研究相结合的方法,研究了在铝/钢异种金属板自冲铆接过程中,不同的板料组合方式下材料的受力及变形情况,并通过拉伸-剪切试验测试了铆接接头性能。Zhang X L 等^[12]研究了 1420 铝锂合金板材的自冲铆接接头的性能和失效模式。Ma Y W 等^[13]提出了改进摩擦自冲铆接(Friction Self-Piercing Riveting, F-SPR)工艺,并研究了工艺参数对铆钉和接头内材料塑性变形的影响以及材料的延展性改善。Haque R^[14]描述了影响自冲铆接接头成形质量的几个关键参数,讨论了一些有可能提高接头成形质量的辅助技术。Kam D H 等^[15-16]在两层金属板材之间添加阻尼夹层,并对带有阻尼夹层的复合板材与异种材料进行了自冲铆接试验研究,研究表明模具类型、搭接顺序均会影响接头的力学性能和失效模式,带阻尼夹层的复合板材的最大剪切载荷和失效模式明显区别于常规金属材料。

目前,关于层合板以及不同夹层材料层合板自冲铆接的相关研究较少,本文将采取胶接技术制备不同夹层材料的层合板,对层合板与 AA5052-H112 铝合金进行自冲铆接试验,从接头成形质量、静拉伸强度以及接头失效形式进行对比研究,扩展和丰富层合板自冲铆接理论的研究体系。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

层合板的上、下基板材料为 AA5052-H112 铝合金,其尺寸为 110 mm×20 mm×0.5 mm;与层合板进行搭接的金属材料为 AA5052-H112 铝合金,其尺寸为 110 mm×20 mm×1.5 mm;夹层材料分别为

M005 丙烯酸高强度结构胶、EVA 泡棉和泡沫镍,其中 EVA 泡棉和泡沫镍尺寸为 110 mm×20 mm×0.5 mm。M005 丙烯酸高强度结构胶为合成丙烯酸酯和改性固化剂双组分组成的结构胶,其中,A 胶为合成丙烯酸酯,B 胶为改性固化剂。M005 丙烯酸高强度结构胶、泡沫镍和 EVA 泡棉的属性参数如表 1 所示。

表 1 夹层材料属性参数

Table 1 Property parameters of sandwich material

材料	参数	数值
M005 丙烯酸 高强度结构胶	A 胶粘度/(Pa·s)	10000~13000
	B 胶粘度/(Pa·s)	8000~10000
	A 胶剪切强度/MPa	≥15
	B 胶剪切强度/MPa	≥15
泡沫镍	孔径/mm	Φ0.2
	通孔率/%	≥98
	面密度/(g·m ⁻³)	320
	孔隙率/%	98
EVA 泡棉	表观密度/(kg·m ⁻³)	77.6
	拉伸强度/MPa	1.00
	断裂伸长率/%	13
	吸水率/(g·cm ⁻²)	98

1.2 层合板制备

层合板由上、下基板以及中间夹层粘合制成,关于层合板的制备,暂未发现统一的试验标准,本次试验制备参阅《简明粘接技术手册》^[17]和相关文献^[18-19],制备流程包括被粘接材料表面处理、配胶、涂胶、粘接、固化。在层合板制备过程中,在层合板上、下基板中使用铜丝辅助涂胶,以保证相同的胶层厚度。对制备的不同夹层材料的层合板进行随机抽样,测得其厚度为 1.5 mm。对 AA5052-H112 铝合金和不同夹层材料的层合板进行力学性能测试,测试结果如表 2 所示。

表 2 板材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of plates

板材	抗拉强度/ 屈服强度/ 弹性模量/ 伸长率/			
	MPa	MPa	GPa	%
AA5052-H112 铝合金	218.8	203.0	68.9	12
M005 丙烯酸高强度 结构胶夹层层合板	157.1	154.9	42.9	11
EVA 泡棉夹层层合板	158.8	157.5	49.4	11
泡沫镍夹层层合板	163.6	160.5	45.1	11

1.3 自冲铆接试验

层合板厚度为 1.5 mm,搭接材料为厚度为 1.5 mm 的 AA5052-H112 铝合金,使用 Henrob 公司

生产的自冲铆钉与模具进行自冲铆接试验，铆钉型号为 K50544AH00，凹模型号为 DZ0902025H1R1.5。铆钉与凹模的几何尺寸如图 1 所示。铆接件使用 RV300023 型自冲铆接机进行制备，为全面研究不同夹层材料层合板的自冲铆接接头的成形质量与静强度，制备了 6 种不同夹层材料层合板和 AA5052 铝合金板料组合方式的自冲铆接接头，各接头详细数据如表 3 所示，自冲铆接几何尺寸示意图如图 2 所示。

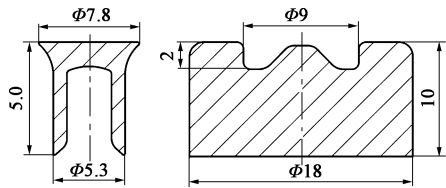


图 1 半空心铆钉和凹模几何尺寸
Fig. 1 Geometric dimensions of half-hollow rivet and die

表 3 各接头组合方式

Table 3 Combination modes of each joint

接头编号	上板	下板
A1	厚度为 1.5 mm 的 M005 丙烯酸高强度结构胶夹层合板	厚度为 1.5 mm 的 AA5052 铝合金
A2	厚度为 1.5 mm 的 AA5052 铝合金	厚度为 1.5 mm 的 M005 丙烯酸高强度结构胶夹层合板
A3	厚度为 1.5 mm 的 EVA 泡棉夹层合板	厚度为 1.5 mm 的 AA5052 铝合金
A4	厚度为 1.5 mm 的 AA5052 铝合金	厚度为 1.5 mm 的 EVA 泡棉夹层合板
A5	厚度为 1.5 mm 的泡沫镍夹层合板	厚度为 1.5 mm 的 AA5052 铝合金
A6	厚度为 1.5 mm 的 AA5052 铝合金	厚度为 1.5 mm 的泡沫镍夹层合板

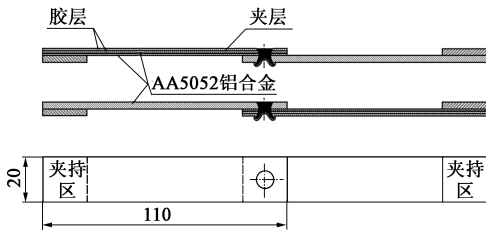


图 2 自冲铆接几何尺寸
Fig. 2 Geometric dimensions of self-piercing riveting

2 接头成形质量比较

行业内普遍认为自冲铆接接头成形质量的评价

指标为钉头高度、钉脚张开度与残余底厚^[20-21]。钉头高度是钉头上表面与上板料上表面的垂直距离，钉头高度主要用来表征铆接的平整度；钉脚张开度是铆钉钉杆外表面与该侧铆钉脚尖处的水平距离，钉脚张开度越大，其自锁性能越好；残余底厚是接头内部扩张的铆钉脚尖位置与下板下表面间的垂直距离，残余底厚越小，越容易造成磨损，使得铆接件底部脱落。图 3 为自冲铆接接头成形质量评价参数示意图。

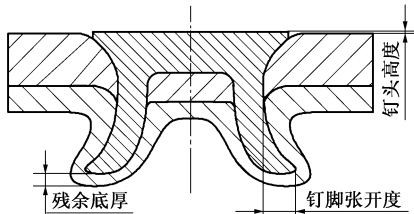


图 3 自冲铆接接头成形质量评价参数示意图
Fig. 3 Schematic diagram of forming quality evaluation parameters for self-piercing riveting joints

为了对比研究不同夹层材料层合板和 AA5052 铝合金板料组合方式下自冲铆接接头的成形质量，对各接头进行了成形质量评价参数的比较与分析，使用型号为 LA114032 的 M42 双金属锯条对铆钉子午面进行切割，依次使用由低目数至高目数的砂纸对接头剖面进行打磨与抛光，将处理好的接头放置于 Dino 光学显微镜下观察并标注接头成形参数。图 4 为各接头中心剖面图，各接头的钉脚张开度和残余底厚对比如图 5 所示。

观察图 4 可以发现，各接头均已形成有效的机械自锁。层合板作为上板时（图 4a、图 4c 和图 4e），铆钉完全刺穿层合板，上、下板材与铆钉发生了塑性变形，且完全充盈于铆钉内腔中，由于层合板的多层结构特性，在接头成形后可以发现铆钉内腔内有明显的夹层材料区域。层合板作为下板时（图 4b、图 4d 和图 4f），上、下板材因塑性变形完全充盈于铆钉内腔中。由于层合板的上、下基板材料厚度较薄，在成形过程中层合板下基板发生了大程度的塑性变形，产生裂纹，致使接头剖面铆扣处存在明显的损伤。

如图 5 所示，在钉脚张开度方面，在相同夹层材料条件下，A1、A3 和 A5 接头的钉脚张开度分别大于 A2、A4 和 A6 接头，即当层合板作为上板时能够获得更大的钉脚张开度。这是因为：当层合板作为上板时，铆钉由上至下依次刺穿层合板的各夹层材料，夹层材料会对铆钉的刺穿产生阻碍作用，使

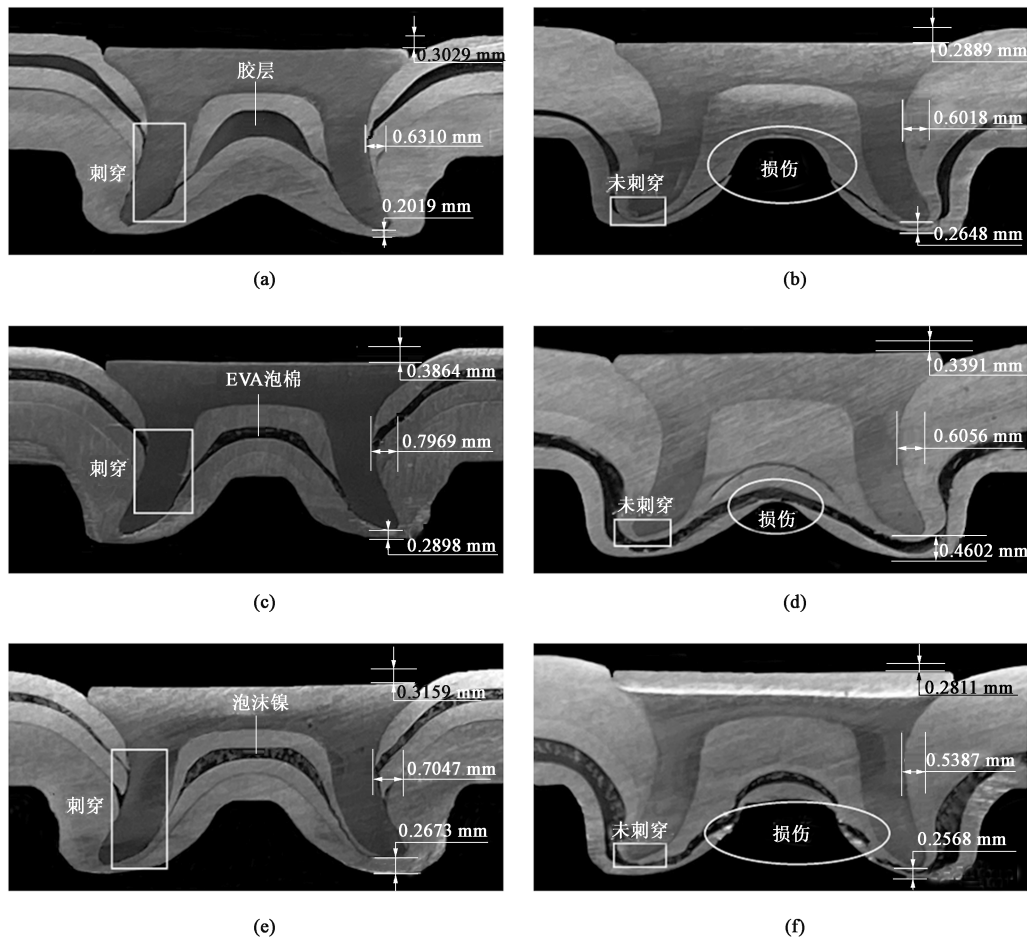


图 4 各接头的成形质量
(a) A1 (b) A2 (c) A3 (d) A4 (e) A5 (f) A6

Fig. 4 Forming quality of each joint

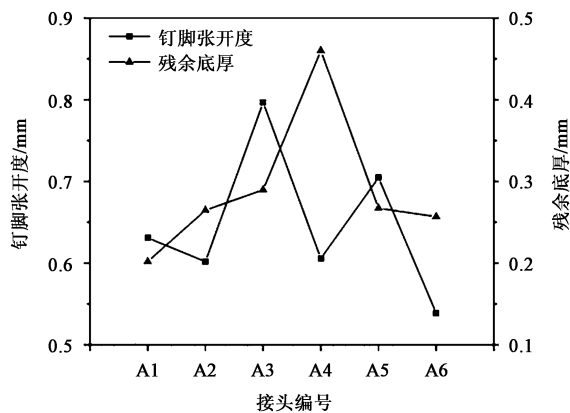


图 5 自冲铆接接头的钉脚张开度与残余底厚对比
Fig. 5 Comparison of pin foot opening and residual bottom thickness for self-piercing riveting joints

得钉脚张开度增大。在不同夹层材料条件下, 当层合板作为上板时, A3、A5 和 A1 接头的钉脚张开度依次减小; 当层合板作为下板时, A4、A2 和 A6 接头的钉脚张开度依次减小。在残余底厚方面, 在相

同夹层材料条件下, A2、A4 和 A6 接头的残余底厚分别大于 A1、A3 和 A5 接头, 即层合板作为下板时能够获得更大的残余底厚。这是因为: 当层合板作为上板时, 铆钉会刺穿层合板, 而当层合板作为下板时, 铆钉未刺穿层合板, 层合板发生严重的挤压变形, 这种挤压变形使得铆接后的层合板下基板出现损伤, 从而降低残余底厚。在不同夹层材料的条件下, 当层合板作为上板时, A5、A1 和 A3 接头的残余底厚依次减小; 当层合板作为下板时, A4、A6 和 A2 接头的残余底厚依次减小, 这表明在各组接头中, 残余底厚的大小受夹层材料种类的影响, 夹层材料的弹性和硬度越大, 铆接过程中的变形能力越大, 获得的残余底厚就越大。在钉头高度方面, 由于钉脚张开度与残余底厚的共同作用以及层合板的整体硬度小于 AA5052 铝合金, 6 组接头铆钉均出现了沉降现象, 钉头高度越低, 钉脚张开度越大, Li D Z 等^[22] 在研究中得到了同样的结论。

3 接头静强度比较及失效形式分析

采用瑞格尔 RGM4030 型万能试验机对各接头进行拉伸-剪切试验，设置拉伸速率为 $2\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，力值小于最大力值的 5%即认为试样已经断裂，为避免夹持过程中产生的扭矩对试验造成不良的影响，在试件的加持位置放置与试验板料等厚度的垫片，垫片尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。对各组接头进行 5 次重复试验，选取试验结果最为接近的 3 组数据用于后续的研究分析。表 4 为 6 组接头的拉伸-剪切试验数据。

表 4 拉伸-剪切试验主要数据

Table 4 Main data of tensile-shear test				
接头 编号	峰值载荷/kN	峰值载荷 平均值/kN	最大失效位移/ mm	最大失效位移 平均值/mm
A1	1.76/1.63/1.78	1.72	4.64/4.24/4.84	4.57
A2	1.60/1.36/1.53	1.50	8.54/7.21/8.29	8.01
A3	1.88/1.84/1.95	1.94	5.06/4.04/4.04	4.38
A4	1.74/1.50/1.59	1.61	9.92/8.76/8.87	9.18
A5	1.89/1.83/1.81	1.91	4.70/4.68/4.24	4.54
A6	1.54/1.69/1.50	1.58	5.13/5.79/8.43	6.45

3.1 板料组合方式对接头静强度的影响

板料组合方式会对接头静强度产生影响^[11,23]。为了对比不同板料组合方式对接头静强度的影响，按照夹层材料种类分为 3 组，分别对各接头的拉伸-剪切试验数据进行整合，利用 Origin 软件绘制接头载荷-位移曲线。图 6 为不同板料组合方式对接头静强度的影响对比图，图 7 为接头的峰值载荷与钉脚张开度的对比图，图 8 为各接头的能量吸收对比图。

由图 7 和图 8 可知，在夹层材料相同的条件下，A1 接头的峰值载荷大于 A2 接头，A3 接头的峰值载荷大于 A4 接头，A5 接头的峰值载荷大于 A6 接头。由上述分析可得：层合板作为上板时能够获得更大的峰值载荷，接头静强度大于层合板作为下板时的接头静强度。这是因为：层合板作为下板时，铆钉的钉脚未刺穿层合板（图 4b、图 4d 和图 4f），下板在成形过程中阻碍了钉脚的张开程度；而层合板作为上板时，钉脚刺穿了层合板（图 4a、图 4c 和图 4d）并继续在 AA5052 铝合金板里成形，在铆钉逐

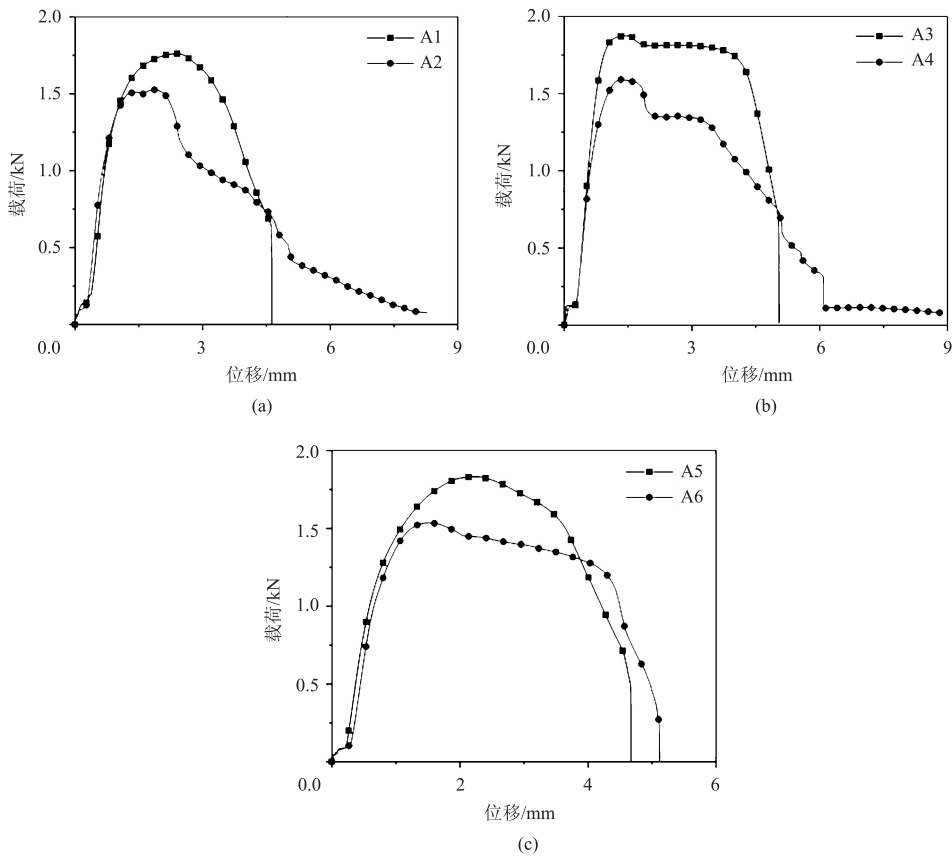


图 6 板料组合方式对接头静强度的影响对比图

(a) M005 丙烯酸高强度结构胶夹层层合板 (b) EVA 泡棉夹层层合板 (c) 泡沫镍夹层层合板

Fig. 6 Comparison diagrams of influence of plate metal combination modes on static strength of joints

(a) Laminated plate with M005 acrylic high-strength structural adhesive sandwich (b) Laminated plate with EVA foam sandwich
(c) Laminated plate with foam nickel sandwich

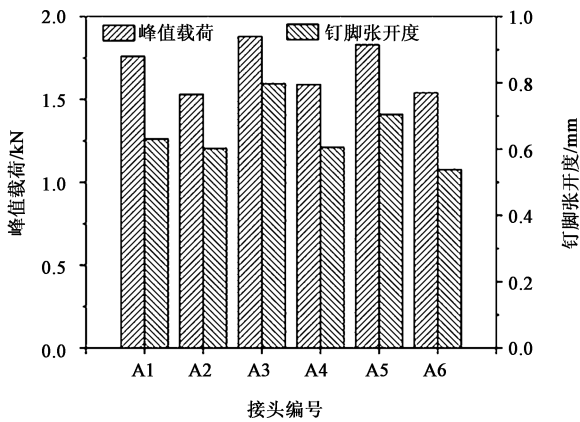


图7 自冲铆接接头的峰值载荷与钉脚张开度对比

Fig. 7 Comparison between peak load and pin foot opening for self-piercing riveting joints

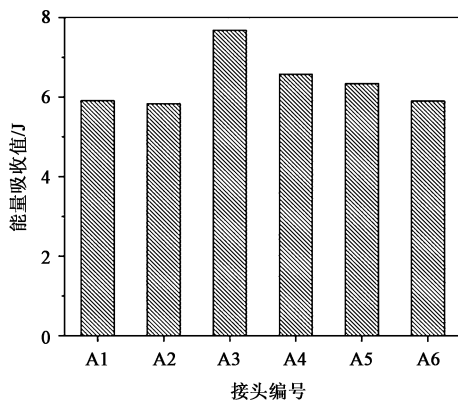


图8 自冲铆接接头的能量吸收值比较

Fig. 8 Comparison of energy absorption value for self-piercing riveting joints

渐拔出的过程中,层合板作为上板时的钉脚与板料的自锁程度更大,接头的峰值载荷也更大。在能量

吸收值方面,A1、A3和A5接头的能量吸收值分别大于A2、A4和A6,即层合板作为上板时,接头在拉伸试验过程中能够吸收更大数值的能量,这是因为:层合板作为上板时的铆钉成形质量优于层合板作为下板时的铆钉成形质量,较大的钉脚张开度能够使得板料与铆钉之间形成更紧密的自锁与接触,以延缓接头的塑性变形与静力学破坏,进而提高了接头的能量吸收值。

3.2 夹层材料种类对接头静强度的影响分析

搭接板材料的差异性会对接头静强度产生影响^[24-25]。由于试验所用的夹层材料不同,各层合板的材料属性参数也不相同。将6组接头按照板料组合方式的不同,分为两组进行对比研究。图9为夹层材料种类对接头静强度的影响对比图。

图9a为3种不同夹层材料层合板作为上板时接头的载荷-位移曲线,结合图7可以看出:3组曲线中,A3接头的峰值载荷最大,A5接头的次之,A1接头的峰值载荷最小。图9b为3种不同夹层材料层合板作为下板时的载荷-位移曲线,结合图7可以看出:A4接头的峰值载荷最大,A6接头的次之,A2接头的峰值载荷最小。由上述分析可得:不同夹层材料层合板接头的峰值载荷有所差别,就整体而言,EVA泡棉夹层层合板接头的静强度最大,泡沫镍夹层层合板接头次之,M005丙烯酸高强度结构胶夹层层合板接头的静强度最小。这是因为:夹层材料的种类不同影响了接头的成形质量,在试验使用的3种夹层材料中,EVA泡棉的弹塑性相比之下更好,在铆钉刺穿板料的过程中EVA泡棉夹层层合板起到的阻碍作用相对较小,使得接头成形质量更优。

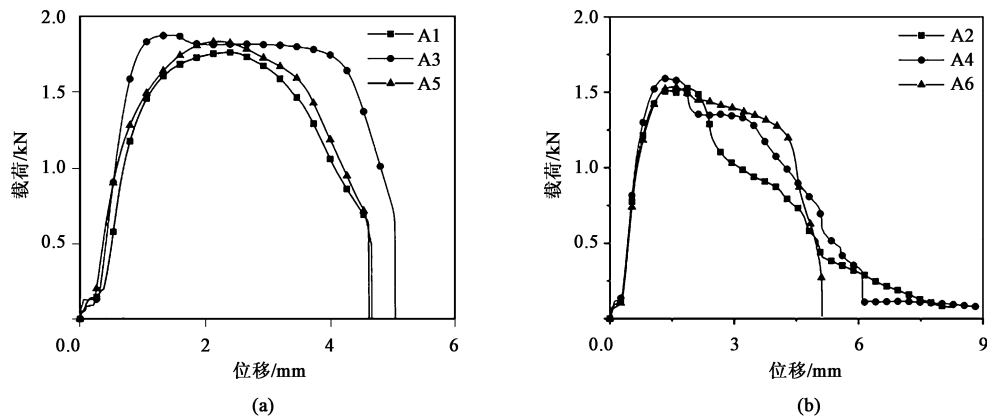


图9 夹层材料种类对接头静强度的影响对比图

(a) 层合板作为上板 (b) 层合板作为下板

Fig. 9 Comparison diagrams of influence of sandwich material types on static strength for joints

(a) Laminated plate as upper plate (b) Laminated plate as low plate

3.3 接头的失效形式分析

图 10 为 6 组接头的拉伸失效形式, 板料组合方式对拉伸失效形式产生了重要的影响。图 10a、图 10c 和图 10e 为层合板作为上板与 AA5052 铝合金自冲铆接接头的拉伸失效形式, 图 10b、图 10d 和图 10f 为层合板作为下板与 AA5052 铝合金自冲铆接接头的拉伸失效形式。通过对比可以发现: 层合板作为上板时的失效形式为铆钉拔出下板, 但铆钉仍然保留在层合板上, 且上板的铆接区域发生弯曲, 下板的铆接位置出现沿受力方向的磨损变形。这是因为: 接头在剪切力的作用下, 上板首先发生弯曲变形, 随着剪切力的持续作用, 铆钉开始拔出下板, 弯曲变形程度大的一侧钉脚率先拔出铆扣, 而弯曲变形程度较小的一侧钉脚与铆扣发生摩擦, 在剪切力的作用下出现磨损现象。而当层合板作为下板时的失效形式为铆钉拔出层合板, 并且上基板和夹层材料在铆钉的拉伸剪切作用力下发生拉破撕裂。这是因为: 层合板是由不同夹层材料粘合而成, 在成形过程中钉脚未刺穿层合板, 在拉伸过程中随着剪切力的作用, 上板弯曲变形程度大的一侧钉脚拔出层合板, 而相对侧的钉脚同时受到轴向作用力与剪切力, 层合板的下基板与夹层处的粘接用胶层发生失效, 上基板与夹层仍存在有效的胶接强度, 铆钉开始拉破撕裂层合板的上基板与夹层。

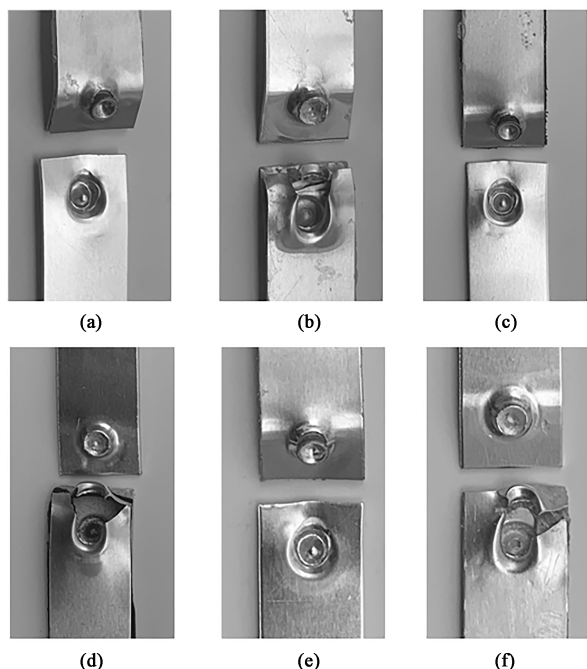


图 10 自冲铆接接头的失效形式

(a) A1 (b) A2 (c) A3 (d) A4 (e) A5 (f) A6

Fig. 10 Failure modes of self-piercing riveting joints

夹层材料的不同未能大程度地改变接头的失效形式, 但在当层合板作为下板时, 层合板的上基板与夹层材料的拉破撕裂形式有所不同。对比图 10b、图 10d 和图 10f, M005 丙烯酸高强度结构胶夹层层合板的撕裂方式为上基板撕裂并且发生压缩; 而 EVA 泡棉夹层层合板和泡沫镍夹层层合板则是上基板与夹层材料脱离下基板并且发生翘曲撕裂。这是因为: M005 丙烯酸高强度结构胶夹层层合板的夹层材料均为高强度胶, 在拉伸过程中下基板未与 M005 丙烯酸高强度结构胶夹层胶层发生明显的失效, 在铆钉轴向运动下, M005 丙烯酸高强度结构胶夹层胶层开始受挤压向铆钉运动方向填充, 上基板发生撕裂变形且逐渐被压缩。而 EVA 泡棉夹层层合板和泡沫镍夹层层合板内粘合用胶层厚度相比较小, 在拉伸过程中下基板与夹层材料之间的粘合用胶层首先发生失效, 造成下基板的脱落, 上基板和夹层之间的粘合用胶层仍保持着有效的连接, 随着铆钉的轴向运动发生翘曲撕裂。

4 结论

(1) 对比 3 种不同夹层材料层合板接头的成形质量, 当层合板作为上板时, 能够获得更大的钉脚张开度, 自锁性能更优; 当层合板作为下板时, 能够获得更大的残余底厚, 接头的抗磨损性能更优。夹层材料会对接头的成形质量产生影响, EVA 泡棉夹层层合板接头在钉脚张开度与残余底厚方面均表现最优。

(2) 在接头静强度方面, 板料组合方式和夹层材料种类对接头的静强度产生了影响。当层合板作为上板时接头的静强度更高; EVA 泡棉夹层层合板接头的静强度大于泡沫镍夹层层合板接头的静强度, M005 丙烯酸高强度结构胶夹层层合板接头的静强度最低。在能量吸收值方面, 则 EVA 泡棉夹层层合板接头吸收的能量大于泡沫镍夹层层合板, M005 丙烯酸高强度结构胶夹层层合板接头吸收的能量最少。

(3) 由于层合板是由铝合金和夹层材料粘合而成的, 其失效形式也明显不同于传统金属与金属接头。当层合板作为上板时, 其失效形式为铆钉拔出下板; 当层合板作为下板时, 其失效形式为铆钉拔出层合板下基板, 并拉破撕裂层合板上基板与夹层。

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 Y B, Li Y T, Lou M, et al. Lightweight of car body and its challenges to joining technologies [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (18): 44-54.

- [2] 李宁宁, 吕贻旬, 刘慎. 浅谈汽车车身轻量化问题 [J]. 有色金属加工, 2020, 49 (5): 14-16.
Li N N, Lyu Y X, Liu S. Discussion on lightweight of automobile body [J]. Nonferrous Metals Processing, 2020, 49 (5): 14-16.
- [3] 李伟, 靳诚忠, 刘思远. 夹层板大挠度问题的力学表征与数值模拟 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2014, 31 (1): 24-27.
Li W, Jin C Z, Liu S Y. Mechanical performance and numerical simulation of sandwich plate with large deflection [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2014, 31 (1): 24-27.
- [4] 张元明, 赵鹏飞. 低速小型无人机中的复合材料结构及分析 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2003, (6): 36-40.
Zhang Y M, Zhao P F. Analysis of composite UAV structure [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2003, (6): 36-40.
- [5] 刘衍峰, 张达, 周振功, 等. 纤维金属层合板连接结构拉脱失效机理分析 [J]. 机电工程技术, 2020, 49 (8): 44-49.
Liu Y F, Zhang D, Zhou Z G, et al. Pull-through failure properties analysis of fiber-metal laminates bolted joint structure [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49 (8): 44-49.
- [6] 孙颖, 臧旭, 乔静, 等. 复合材料层合板沉头螺栓连接结构失效机制 [J]. 飞机设计, 2021, 41 (4): 74-80.
Sun Y, Zang X, Qiao J, et al. Failure mechanism of countersunk bolted connections in composite laminates [J]. Aircraft Design, 2021, 41 (4): 74-80.
- [7] 胡春幸, 侯玉亮, 铁瑛, 等. 不同胶接参数对 CFRP 层合板单搭接胶接结构强度的影响及优化设计 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (8): 154-165.
Hu C X, Hou Y L, Tie Y, et al. Influence of different bonding parameters on the strength of CFRP laminates with single lap bonding structure and optimization [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (8): 154-165.
- [8] 黄志超, 赖家美, 张永超. 自冲铆接技术 [M]. 江西: 江西高校出版社, 2017.
Huang Z C, Lai J M, Zhang Y C. Self-Piercing Riveting Technology [M]. Jiangxi: Jiangxi Universities and Colleges Press, 2017.
- [9] 黄志超, 刘帅红, 赖家美, 等. 结构胶对钢铝自冲铆接接头力学性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (7): 157-162.
Huang Z C, Liu S H, Lai J M, et al. Influence of structural adhesive on mechanical properties of steel-aluminum self-piercing riveted joints [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (7): 157-162.
- [10] 刘洋, 何晓聪, 邢保英, 等. 泡沫金属夹层板自冲铆接头的疲劳性能及失效机理 [J]. 材料导报, 2018, 32 (14): 2431-2436.
Liu Y, He X C, Xing B Y, et al. Fatigue properties and failure mechanisms of self-piercing riveted joints in metal foam sandwich structures [J]. Materials Review, 2018, 32 (14): 2431-2436.
- [11] 吕枫, 邓将华, 陈如明, 等. 板料组合方式对铝/钢异种金属板自冲铆接头性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (4): 134-141.
Lyu F, Deng J H, Chen R M, et al. Effect of sheet combination modes on joints properties of aluminum/steel dissimilar metal sheets under self-piercing riveting [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (4): 134-141.
- [12] Zhang X L, He X C, Gu F S, et al. Self-piercing riveting of aluminium-lithium alloy sheet materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 268 (3): 192-200.
- [13] Ma Y W, Xian X R, Lou M, et al. Friction self-piercing riveting (F-SPR) of dissimilar materials [J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 950-955.
- [14] Haque R. Quality of self-piercing riveting (SPR) joints from cross-sectional perspective: A review [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18 (1): 83-93.
- [15] Kam D H, Jeong T E, Kim J. A quality study of a self-piercing riveted joint between vibration-damping aluminum alloy and dissimilar materials [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (17): 5947.
- [16] Kam D H, Jeong T E, Kim M G, et al. Self-piercing riveted joint of vibration-damping steel and aluminum alloy [J]. Applied Sciences, 2019, 9 (21): 4575.
- [17] 马长福. 简明粘接技术手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
Ma C F. Concise Bonding Technical Manual [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2012.
- [18] 辛锋先, 张钱城, 卢天健. 轻质夹层材料的制备和振动声学性能 [J]. 力学进展, 2010, 40 (4): 375-399.
Xin F X, Zhang Q C, Lu T J. Advances in lightweight sandwich materials and structures: Manufacture and vibroacoustic performances [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40 (4): 375-399.
- [19] 王志瑾, Khaliulin V I, Skripkin E. 皱褶结构芯格构型的几何设计方法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2002, (1): 6-11.
Wang Z J, Khaliulin V I, Skripkin E. Geometry design method of folded structure [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2002, (1): 6-11.
- [20] 王淑敏, Hu S J, 李双义, 等. 半空心铆钉自冲铆接的工艺参数及铆接质量的判定 [J]. 天津大学学报, 2007, (4): 494-498.
Wan S M, Hu S J, Li S Y, et al. Process parameters and joint evaluation of self-piercing riveting with half-hollow rivets [J]. Journal of Tianjin University, 2007, (4): 494-498.
- [21] Li D Z, Chrysanthou A, Patel I, et al. Self-piercing riveting-A review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, (92): 1777-1824.
- [22] Li D Z, Han L, Chrysanthou A, et al. The effect of setting velocity on the static and fatigue strengths of self-piercing riveted joints for automotive applications [A]. TEM 2014 143rd Annual Meeting & Exhibition: Annual Meeting Supplemental Proceedings [C]. San Diego: 2014.
- [23] Zhang X L, He X C, Xing B Y, 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.
- [24] 黄志超, 程露, 涂林鹏, 等. 不同纤维铺层玻璃-碳纤维混杂复合材料与铝合金自冲铆接强度对比 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (10): 54-61.
Huang Z C, Cheng L, Tu L P, et al. Comparison on self-piercing riveting strength of glass-carbon fiber hybrid composites with different fiber layers and aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (10): 54-61.
- [25] 卢毅, 何晓聪, 王医锋, 等. 钛合金同种/异种板自冲铆接头静态失效机理分析 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (15): 104-108.
Lu Y, He X C, Wang Y F, et al. Analysis on static failure mechanism of self-piercing riveting joints in similar and dissimilar sheets with titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (15): 104-108.