连接形式及胶层厚度对胶铆复合连接力学性能的影响研究

刘璟琳 赵书强 谢英杰 冯进成 蒋月静 孟祥瑞

（大连海洋大学，大连 116023）

摘要：以铝合金胶接-抽芯拉铆复合接头为研究对象，研究不同胶层厚度和不同排列方式的单/双搭接双铆钉胶接-抽芯拉铆连接接头的剪切力学性能。结果表明，无论铆钉采用横排或纵排布置，接头失效顺序均为胶层先发生内聚失效；铆钉排列不影响铆钉失效对应的第二峰值载荷，但横排接头整体失效载荷高于纵排接头。单搭接双铆钉随后出现拉拔失效；双搭接双铆钉试件中间的铝合金板随后不规则断开。试验范围内胶层厚度对接头整体失效模式无显著影响，结果可为车身铝合金胶接-抽芯拉铆复合接头的结构设计与工程应用提供试验依据。

关键词：单/双搭接 复合连接 剪切性能

中图分类号：TH131.3 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260025

Study on the Influence of Connection Form and Adhesive Thickness on the Mechanical Properties of Adhesive-Riveted Hybrid Joints

Liu Jinglin, Zhao Shuqiang, Xie Yingjie, Feng Jincheng, Jiang Yuejing, Meng Xiangrui

(Dalian Ocean University, Dalian 116023)

Abstract: Taking aluminum alloy adhesive-bonded blind riveting hybrid joints as the research object, this paper investigates the shear mechanical properties of single/double lap double-rivet adhesive-bonded blind riveting joints with different adhesive layer thicknesses and rivet arrangements. The results show that regardless of transverse or longitudinal rivet arrangement, the failure sequence of the joints uniformly initiates with cohesive failure of the adhesive layer. The rivet arrangement has no effect on the second peak load corresponding to rivet failure, while the overall failure load of transversely arranged joints is higher than that of longitudinally arranged counterparts. For single lap double-rivet joints, pull-out failure of rivets follows; for double lap double-rivet joints, the middle aluminum alloy sheet of the specimen undergoes irregular fracture subsequently. Within the test scope, the adhesive layer thickness has no significant influence on the overall failure mode of the joints. The findings can provide experimental basis for the structural design and engineering application of aluminum alloy adhesive-bonded blind riveting hybrid joints applied to vehicle bodies.

Key words: Single/double lap joint, Hybrid joint, Shear performance

1 前言

连接工艺是构建完整车身结构的必要前提，其技术合理性直接决定了车身结构的整体强度、刚度及安全性。复合接头的连接机制与失效特性已成为重要研究课题。汽车车身采用粘接工艺可

作者简介：刘璟琳（1994—），女，助教，硕士学位，研究方向为胶铆复合连接力学性能。

基金项目：辽宁省教育科学“十四五”规划2025年度立项一般课题（JG25EB033）；2026年度辽宁省科协科技创新智库项目成果（LNKX2026ZD06）。

参考文献引用格式：

刘璟琳，赵书强，谢英杰，等. 连接形式及胶层厚度对胶铆复合连接力学性能的影响研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(8): 39-43.

LIU J L, ZHAO S Q, XIE Y J, et al. Study on the Influence of Connection Form and Adhesive Thickness on the Mechanical Properties of Adhesive-Riveted Hybrid Joints[J]. Automobile Technology & Material, 2026(8): 39-43.

降低质量与制造成本、提升机械及疲劳性能，拉铆连接则适配封闭腔结构单侧操作及自动化生产，能提升车身可靠性与制造效率。胶铆复合连接接头集成了2种连接方式的优势，可有效提高接头服役性能，现已在新能源汽车车身上应用。

王鹏[1]等通过静载拉伸试验，分析不同胶铆混合接头的承载能力和失效模式。史晓[2]等探究胶粘剂对自冲铆接头拉剪性能影响，对铝合金制成的铆接接头和胶铆复合接头进行了拉剪试验，发现胶铆复合接头在不同疲劳载荷下的失效模式均为自锁失效。李玲玲[3]指出胶接接头的静力学性能随着胶层的厚度增大而减小。解倩[4]研究钢铝胶接接头的失效模式及影响因素，并提出相关试验验证方法。卞海玲[5]等发现不同搭接长度的胶铆接头拉伸-剪切失效过程一致。朱伟[6]等对比多种连接方式，证实胶铆连接在面连接中综合力学性能更优。韩啸[7]等发现胶层厚度对胶粘剂正应力工况下断裂特性有显著影响，在所研究胶层厚度范围内，随着厚度增加其Ⅰ型断裂韧性先增大后减小，失效模式则由内聚失效转变为混合失效。

本文以胶层厚度和铆钉排列方式为研究变量，以胶铆接头的交互作用为重点研究对象，旨在系统探究不同胶层厚度、不同铆钉排列方式对单/双搭接双铆钉胶接-抽芯拉铆接头剪切力学性能及失效模式的影响，明确接头失效载荷与各研究变量的关联规律，为胶接-抽芯拉铆接头在车身上的合理设计、优化选型及工程应用提供参考。

2 试验方法

目前，对于车身基板胶接接头力学性能的试验方法均为实验室料片级物理验证试验，本文主要介绍常规试片的剪切性能试验。

2.1 试验材料

试验材料为厚度2.5 mm的6061-T6铝合金，采用单/双搭接2种搭接形式。选用的胶粘剂SikaPower®4720是一种双组分聚氨酯结构胶，专为汽车车身制造设计，兼具结构粘接与密封功能，适配轻量化多材料车身的异种材质连接需求。

本试验采用BB-AFIX0614铆钉为单搭接铆钉，紧固厚度范围为3.5~6.0 mm，采用BB-AFIX0618铆钉为双搭接铆钉，紧固厚度范围为6.0~8.5 mm，满足试验设计的2种搭接接头厚度需求。铆钉材料为304不锈钢。

2.2 试验方案设计

拉丁方试验方案设计适用于单处理因素、双区组因素的水平比较试验。作为析因设计、正交设计、均匀设计等现代试验设计方法的重要源头，拉丁方设计以其独特的方阵结构为基础。拉丁方是由字母或数字构成的方阵，满足每行、每列中每个符号恰好出现一次的约束条件。方阵的行数（或列数）称为拉丁方的阶数。

全面试验设计是针对包含2个及以上试验因素的研究，将各因素所有水平的组合均作为独立处理开展试验的设计方法。本文采用全面试验设计法，以胶层厚度、铆钉的排列方式和接头搭接方式作为因素考虑。以此设置三因素两水平的全面试验，总计8组，试验因素与水平如表1所示，表2为全面试验设计方案。

表1 试验因素与水平

因素	水平一	水平二
胶层厚度 /mm	0.5	1
铆钉排列方式	横	纵
搭接方式	单	双

表2 全面试验设计方案

试验组	胶层厚度/mm	铆钉排列方式	搭接方式
1	0.5	横	单
2	0.5	横	双
3	0.5	纵	单
4	0.5	纵	双
5	1	横	单
6	1	横	双
7	1	纵	单
8	1	纵	双

2.3 试件尺寸和制备

铆钉横排与纵排排列方式如图1所示，以双铆钉横排列单搭接接头和双铆钉纵排列双搭接接头为例。

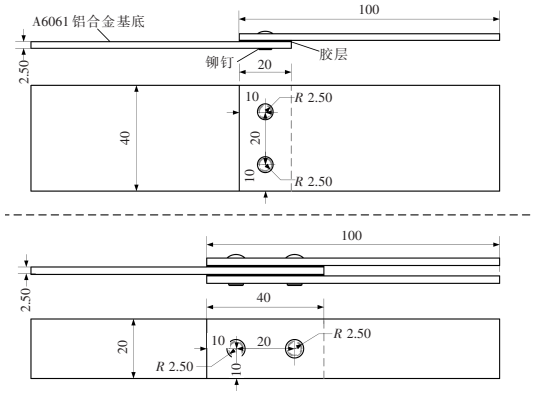


图1　双铆钉胶铆连接试件尺寸

根据试验方案操作线用切割机切割所需尺寸的试件,首先画出搭接区域中心位置,对准打孔,注意孔洞尺寸需大于铆钉半径0.1 mm。接着使用100目砂纸沿45°方向均匀打磨基板表面,增加表面粗糙度,促进基板表面与胶粘剂充分粘接。为去除基板表面油污,涂胶前使用丙酮擦拭搭接区域。为避免试件加工过程中,溢胶粘连在铝合金板搭接区域以外的边缘部分,涂胶前在搭接区域外涂适量的脱模剂。涂胶过程应注意需涂抹均匀,避免胶层出现空隙。为确保每次施胶量相同,用带有刻度的针管施胶。为保障胶层厚度,涂胶过程中要在胶层中放置金属丝或玻璃珠[8]。试件搭接完成后,放入相应型号的铆钉,用平口夹夹紧。

拉铆枪操作方法为:拉铆枪枪头对准铆钉芯杆,扣动扳机,拉力增大,持续向后拉芯杆,芯杆带动钉体向孔内收缩并向外鼓胀,达到芯杆预设断裂载荷时,芯杆在断颈槽处韧性断裂。铆接过程挤压胶层,会伴随胶瘤产生,需去除胶瘤后,再将带有平口夹的试件根据胶粘剂使用说明放置在恒温箱中60 ℃保温固化1 h。取出试件后,注意要在室温中静置24 h,防止试件因温度变化胶层内产生内应力,进而影响试验结果。

2.4　力学性能测试

本试验使用万能试验机,进行准静态拉伸试验。对试件在轴线方向上做拉伸试验,试验在常温干燥的环境下完成。为防止试件打滑以及确保拉伸过程中载荷作用在试件中心,在试件两端分别放置同试件宽度的正方形垫片,注意垫片厚度与试件板厚相同。根据标准GB/T 7124—2008《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)》,以拉伸速率为2.0 mm/min完成试验,拉伸过程注意观察胶层、铆钉和铝合金板逐步失效过程,分别对各组接头进行3组重复性试验。试验过程中,注意观察拉伸机软件检测的载荷-位移曲线,并对比观察接头承载被破坏的情况。

3　结果和讨论

3.1　搭接方式和铆钉排列方式对接头力学性能的影响分析

表3和图2所示为单/双搭接双铆钉胶铆连接试件的平均第一峰值载荷、平均第二峰值载荷及其上、下偏差和平均铝合金板失效强度。图3展示了单搭接双铆钉接头失效情况,搭接区域表面胶层分布均匀为内聚失效,2个铆钉拉拔断开,留在试件上。图4所示为单搭接横/纵排列双铆钉接头载荷-位移曲线。观察对比图3和图4可知,单搭接双铆钉试件在拉伸过程中,第一峰值载荷为复合接头失效载荷即,图4中A点,第二峰值载荷为铆钉失效载荷即,图4中B点。对比可知:胶层厚度0.5 mm时,试验组1平均第一峰值载荷显著大于试验组3;胶层厚度1 mm时,试验组1平均载荷略大于试验组3。单搭接双铆钉试件,铆钉在胶层失效后继续起作用,铆钉承载过程中钉腿弯曲变形,最终双铆钉近乎同时失效,拉拔断开,钉头和钉尾被分别留在2个试件上。由于双铆钉近乎同时失效,失效载荷和失效形式并未受铆钉排列方式影响。

表3　单/双搭接双铆钉胶铆连接试件力学性能参数

试验组	平均第一峰值载荷/N	平均第二峰值载荷/N	平均铝合金板失效强度/MPa
1	12 706	11 804	
2	27 709	18 181	363
3	11 411	11 517	
4	14 910	12 893	343
5	10 830	10 584	
6	26 940	17 750	355
7	10 593	10 018	
8	14 551	12 558	334

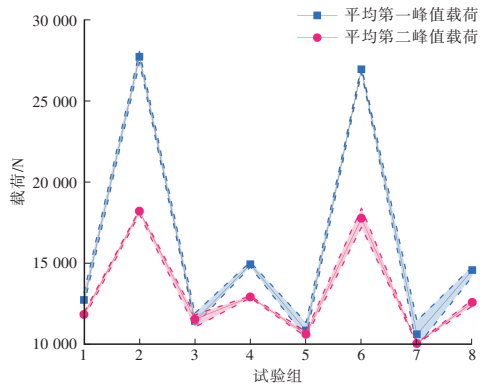


图 2　单/双搭接双铆钉胶铆连接试件载荷波动变化

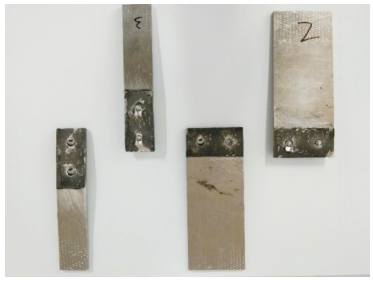


图 3　单搭接双铆钉胶铆接头失效情况

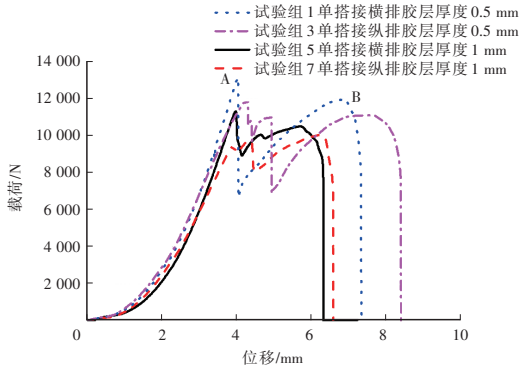


图 4　单搭接双铆钉胶铆接头载荷-位移曲线

图 5 展示了双搭接双铆钉接头失效情况，失效区域表面胶层分布均匀为内聚失效，铝合金板不规则断开[9]。图 6 所示为双搭接横/纵排列双铆钉接头载荷-位移曲线。观察对比图 5 和图 6 可知，双搭接铆钉试件在拉伸过程中，第一峰值载荷为复合接头失效载荷，如图 6 中 A 点和 C 点，第二峰值载荷为铝合金板失效载荷，如图 5 中 B 点和 D 点。对比试验组 2 和试验组 4 以及试验组 6 和试验组 8 可知，横排列试件的平均第一峰值载荷和第二峰值载荷远高于纵排列试件，横排列试件的铝合金失效面积较纵排列大，所以铝合金板失效强度相近。双铆钉横排列试件，失效载荷达到 A 点（27 000 N 左右），随后孔洞附近铝合金板拉伸承载形变，试件中间部分铝合金板断裂，残余部分连着胶层留在试件上、下部分铝合金板内。双铆钉纵排列试件，失效载荷只达到 D 点（14 900 N 左右），随后该孔洞附近铝合金板拉伸承载形变，试件中间部分铝合金板小部分断裂，残余部分连着胶层留在试件上、下部分铝合金板内。

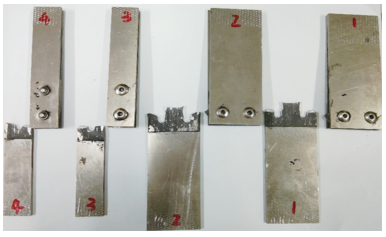


图 5　双搭接双铆钉胶铆接头失效情况

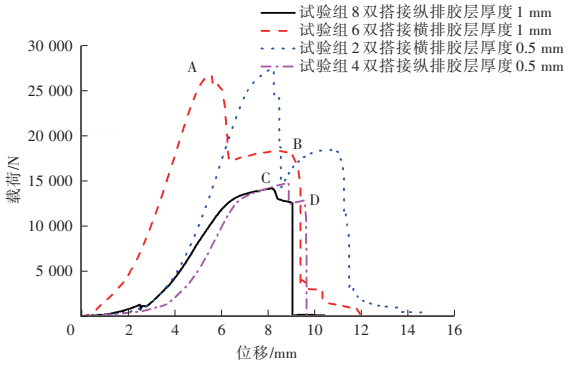


图 6　双搭接双铆钉胶铆接头载荷-位移曲线

3.2　胶层厚度对接头力学性能的影响分析

图 7 所示为 1 mm 胶层厚度的双铆钉胶铆接头失效表面，可以看出胶层失效表面为混合失效模式，界面失效模式为主，其余为内聚失效模式。图 8 为胶铆混合接头胶层空隙产生原因示意。本试验涂胶流程较为成熟，其余几组试件胶层表面失效模式均较为稳定。多次试验后发现，由于铆接力较大，在拉铆的过程中，会挤出一部分胶粘剂，胶层内混合的控制胶层厚度直径为 1 mm 的玻璃珠也随着胶粘剂的流动，大多分布在搭接区域的四周，铝合金板由于受力不均匀，小幅度弯曲变形，胶层分布不再均匀，进而在胶层内产生空隙，致使胶层失效过程中发生界面失效，如图 9 所示。对比胶层厚度为 0.5 mm 的试件，失效模式较为稳定，胶层分布均匀，更能有效发挥复合连接中胶接的作用，此款抽芯拉铆枪适用于 2.5 mm 厚度的铝合金板胶铆连接，更适合 0.5 mm 的胶层厚度配合连接。

对比图 4 和图 6 中曲线以及表 3 可知，胶层厚度为 1 mm 的试件要略低于胶层厚度为 0.5 mm 试件的第一峰值载荷，而第二峰值载荷和平均铝合金板失效强度不受胶层厚度的影响。1 mm 胶层厚

度的试件胶层失效模式为混合失效,而0.5 mm胶层厚度的试件胶层失效模式大多为内聚失效。铆钉失效模式和铝合金板失效模式均不受胶层厚度的影响。



图7　1 mm胶层厚度双铆钉胶铆接头失效表面

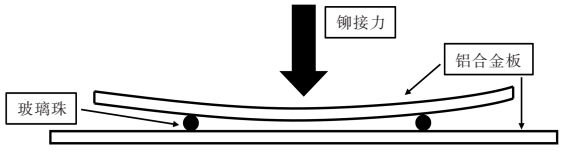


图8　胶铆混合接头胶层空隙产生示意



图9　1 mm胶层厚度的双铆钉单搭接胶铆接头胶层分布不均匀情况

对于混合接头载荷-位移曲线,可以看出其总体趋势与单种连接方式接头十分相似。混合接头的后段铆接强度不受胶层厚度的影响,载荷仅仅由铆钉部分来维持,而铆钉的直径不取决于胶层厚度(在铆钉中,只有钉身的长度是板厚的函数)。这导致铆钉不依赖于胶层厚度受纯剪切破坏。

4　结论

a. 单搭接双铆钉横/纵排列的接头失效模式均为胶层发生内聚失效,铆钉发生拉拔失效,但是横排列的接头失效载荷均高于纵排列的接头。第二峰值载荷即铆钉失效载荷不受排列方式影响。

b. 双搭接双铆钉横/纵排列的接头失效模式均为胶层发生内聚失效,试件中间的铝合金板发生不规则断开。横排列的接头铝合金板断裂面积较纵排列接头更大。双搭接双铆钉横排列的复合接头失效载荷远高于纵排列,铝合金板断裂失效强度相近。

c. 胶层厚度在本试验中对接头失效模式影响不大。由于1 mm直径的玻璃珠和较大的拉铆力,致使胶层内部产生空隙,胶层分布不均匀,胶层发生界面失效,致使本试验中胶层厚度增加,较低程度的降低了复合接头失效载荷。胶层厚度对铆钉和铝合金板的失效载荷、失效强度以及失效模式均无影响。

d. 全面试验后,分析得出的8组力学性能参数,对比观察8组接头的失效模式,表明0.5 mm的单搭接双铆钉横排列接头服役性能较,接头失效模式为胶层内聚失效、铆钉承载拉拔失效,相对于双搭接的铝合金板失效,单搭接接头完全发挥了其承载性能。并且双铆钉横排列的复合接头失效载荷均优于纵排列接头。在相同搭接面积的双铆钉胶铆复合连接实际应用中,优先推荐单搭接横排列接头。

参考文献:

[1] 王鹏, 胡亮, 李刚卿, 等. 碳纤维复合材料胶铆混合结构拉伸失效研究[J]. 粘接, 2025(1): 1-8.

[2] 史晓, 刘东, 赵杨洋, 等. 钢铝异种金属胶铆复合接头力学性能研究[J]. 塑性工程学报, 2024 (12): 195-203.

[3] 李玲玲. 5182铝合金-碳纤维复合材料胶/铆接头力学性能研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.

[4] 解倩. 车身钢铝连接结构胶选型分析[J]. 时代汽车, 2024 (22): 145-148.

[5] 卞海玲, 许莎, 邢彦峰. 搭接长度对CFRP-铝板胶铆接头力学性能的影响[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59 (10): 1-5.

[6] 朱伟, 魏健, 冯雪桥, 等. 汽车异种材料连接技术的试验研究[J]. 机械制造与智能化, 2023 (22): 51-55.

[7] 韩啸, 金勇, 杨鹏, 等. 胶层厚度对胶粘剂Ⅰ型断裂韧性影响试验和仿真研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 43-52.

[8] SADOWSKI T, KNEĆ M, GOLEWSKI P. Experimental Investigations and Numerical Modelling of Steel Adhesive Joints Reinforced by Rivets[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30(5): 338-346.

[9] SADOWSKI T, GOLEWSKI P, ZARZEKA-RACZKOWSKA E. Damage and Failure Processes of Hybrid Joints: Adhesive Bonded Aluminium Plates Reinforced by Rivets[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(4): 1256-1262.