

DOI: 10.11973/jxgcl230220

装配间隙及垫片材料对碳纤维增强复合材料胶铆接头力学性能的影响

叶结和¹, 张子博², 徐野¹, 梁景恒², 郑自芹², 宋鸿宇¹

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111; 2. 中国兵器工业第五二研究所烟台分所有限责任公司, 烟台 264003)

摘要: 制备了碳纤维增强复合材料(CFRP)胶铆接头, 对其进行了单接缝拉伸剪切试验, 研究了装配间隙(0, 0.3, 0.5, 1.0 mm)和垫片材料(CFRP、无碱玻璃纤维布和EP6250环氧树脂胶黏剂)对接头拉伸-剪切力学性能和失效模式的影响。结果表明: 不同装配间隙和垫片材料下, 胶铆接头的载荷-位移曲线相似, 均可分为弹性阶段、界面失效阶段、铆钉受力阶段和铆钉头部拉脱阶段; 随着装配间隙增加, 垫片材料为CFRP和纤维布的胶铆接头的极限载荷下降, 垫片材料为胶黏剂的极限载荷基本不变, 当装配间隙为1.0 mm时, 垫片材料为胶黏剂的胶铆接头的极限载荷最大; 当垫片材料为CFRP和纤维布时, 不同装配间隙下胶铆接头的失效模式均为垫片侧胶面开裂, 当垫片材料为胶黏剂时, 胶铆接头失效模式均为CFRP板层间开裂。

关键词: 碳纤维; 铆接; 装配间隙; 力学性能; 失效模式

中图分类号: TG494

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2024)06-0088-05

0 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有轻质高强的特性, 可以提升设备整体机械强度, 减轻整体质量, 延长服役寿命, 广泛用于轨道交通、航空航天、汽车制造、船舶和风力发电等领域^[1-4]。目前, CFRP构件生产主要采用先分块制备再连接装配的方法, 连接方式主要有焊接、螺栓连接、铆接、胶接等。其中, 铆接属机械连接, 是复合材料常用的连接方式^[5-7]。相比其他连接方式, 采用铆接的构件间贴合更紧密, 连接件外形好、连接强度高、无噪声和震动, 且铆接工具机动灵活、简单价廉^[8-10]。但是, 铆接易产生应力集中, 诱发连接区域的内部损伤。胶接则可以有效缓解应力集中, 且胶接工艺简便, 胶接头具有良好的密封性、电绝缘性和耐腐蚀性。胶接与铆接混合的连接方式可以综合两者优势, 因此得到了推广。

随着胶铆接的推广应用, 其接头的强度及失效行为也成为关注的热点。目前, 相关研究多集中于铆接材料、搭接长度和铆钉几何布局对接头力学性

能和失效模式的影响^[11-14], 而关于胶铆接装配间隙和垫片材料方面的研究却鲜有报道。由于需要考虑轨道车辆、航空器材等设备的整体结构设计, 在实际胶铆连接装配过程中不可避免会出现间隙, 从而造成应力集中; 而且CFRP结构具有各向异性, 受力复杂, 重新分配载荷能力弱, 受力后易分层从而导致整体结构发生破坏。因此, 装配间隙对CFRP胶铆接头性能有很大的影响。考虑到车体的整体安全性能, 装配间隙需控制在1.0 mm及以内, 最常见的装配间隙为0.3, 0.5, 1.0 mm。此外, 不同材料垫片的承载能力和与胶铆接头母材的黏结强度不同, 也会显著影响接头性能。因此, 作者采用不同垫片材料在不同装配间隙下制备CFRP胶铆接头, 并进行了单接缝拉力剪切试验, 研究了装配间隙和垫片材料对接头拉伸-剪切力学性能和失效模式的影响, 以期为深入解析胶铆接头性能演变规律, 探究最佳胶铆接组合方式提供参考。

1 试样制备与试验方法

试验材料为CFRP板, 由上海晋飞碳纤科技股份有限公司提供, 规格为U2424-200, 厚度分别为4.4, 6.8 mm, 横截面尺寸均为135 mm×40 m; 该CFRP板由碳纤维织物和环氧树脂预浸料制备而

收稿日期: 2023-05-10; 修订日期: 2024-05-08

作者简介: 叶结和(1979—), 男, 安徽安庆人, 正高级工程师, 硕士

通信作者: 张子博工程师

成, 其中碳纤维织物克重为 $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 含胶量为 20% (质量分数), 碳纤维织物的铺层方式为 [0°/90°] 3S (0° 和 90° 表示铺层方向, S 表示对称)。垫片材料分别为 CFRP (与基板购自同一公司, 不同批次)、无碱玻璃纤维布 (纤维直径为 10~20 μm) 和胶黏剂 (EP6250 环氧树脂胶)。胶接所用胶黏剂为 EP6250 环氧树脂胶。铆接使用 CR7621-08-07 凸头铆钉, 由 Cherry Aerospace 提供, 材料为 A-286 不锈钢, 直径为 7.89 mm, 夹紧范围为 10.3~11.9 mm, 剪切强度不小于 22.24 kN。

用无水乙醇清洗 CFRP 板后, 使用工装、夹具将其固定, 采用 VMC850 型四轴立式加工中心以高转速低进给模式制孔, 通过专用钻套使孔轴线与零部件表面保持垂直, 制孔时不使用润滑剂或者冷却剂以防止水分渗入导致 CFRP 板分层, 制孔后使用无水乙醇清洗, 备用。对于无装配间隙的胶铆接头, 将胶黏剂均匀涂抹于 CFRP 板进行胶接, 再进行铆接; 对于有装配间隙的胶铆接头, 在 CFRP 板上使用胶黏剂粘贴不同厚度的垫片 (以胶黏剂为垫片材料时通过涂胶层数来控制厚度), 使装配间隙

分别为 0.3, 0.5, 1.0 mm, 再进行胶接和铆接。胶铆接后接头均在室温下固化 7 d, 不同间隙试样均为 5 个。根据 ISO 12996, 采用 Instron8803 型电液伺服试验机进行单接缝拉伸剪切试验, 拉伸速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 试样形状和尺寸如图 1 所示, 接头两端各粘贴一块垫块, 防止在拉伸过程中出现扭矩, 以确保试验准确性。

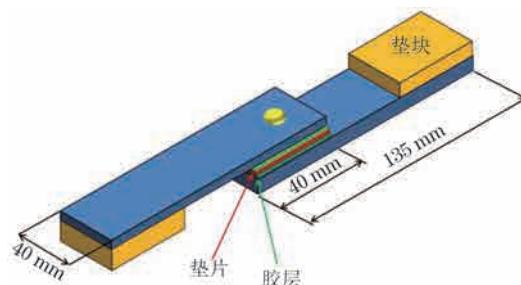


图 1 胶铆接头剪切试样形状和尺寸
Fig. 1 Shape and size of shear sample of bond-riveted joint

2 试验结果与讨论

2.1 拉伸-剪切性能

由图 2 可见: 不同装配间隙和垫片材料下, 胶

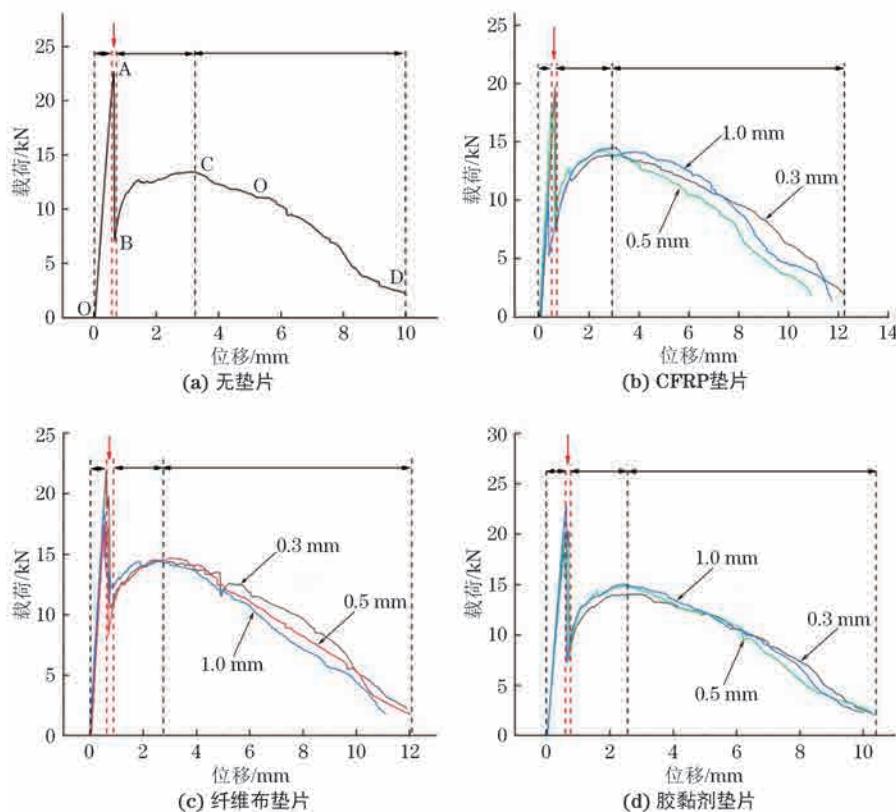


图 2 不同装配间隙和垫片材料下胶铆接头的载荷-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of bond-riveted joints with different assembly gaps and gasket materials:

(a) without gasket; (b) CFRP gasket; (c) fibre cloth gasket and (d) adhesive gasket

铆接头的载荷-位移曲线相似, 均包括弹性阶段、界面失效阶段、铆钉受力阶段、铆钉头部拉脱阶段等4个阶段。在弹性阶段, 胶铆接头载荷与位移成正比, 曲线呈线弹性特征; 不同装配间隙和垫片材料下, 接头弹性阶段曲线的斜率基本一致, 说明在此阶段各接头整体结构刚度基本相同^[15], 装配间隙和垫片材料对胶铆接头的刚度无显著影响。在界面失效阶段, 载荷随着位移增加突然下降。在铆钉受力阶段, 由于界面失效, 铆钉成为唯一承受拉伸载荷的对象, 载荷随着位移的增加不断增加, 直至铆钉所能承受之最大载荷。在铆钉头部拉脱阶段, 铆钉和CFRP板的变形进一步加剧, 胶铆接头的承载能力持续降低, 最终完全失效, 即铆钉头部脱离CFRP板。此外, 与无装配间隙相比, 装配间隙为1.0 mm时, 不同垫片材料下胶铆接头的拉伸位移均增加。

由表1可知: 随着装配间隙增加, 垫片材料为CFRP和纤维布的胶铆接头的极限载荷减小, 垫片材料为胶黏剂的极限载荷基本不变; 当装配间隙为1.0 mm时, 垫片材料为胶黏剂的胶铆接头的极限载荷最大, 比垫片材料为CFRP和纤维布时分别提高了49.0%, 36.4%, 这说明选择合适的垫片材料有利于提高胶铆接头的失效极限载荷。胶铆接头的剪切吸收功由载荷-位移曲线与横坐标轴围成的面积计算得到^[16], 计算结果同样列于表1中。当装配间隙为1.0 mm时, 3种垫片材料的胶铆接头的剪切吸收功趋于一致, 在103~107 kJ之间。

表1 不同装配间隙和垫片材料下胶铆接头的极限载荷和剪切吸收功

Table 1 Ultimate load and shear absorption work of bond-riveted joints with different assembly gaps and gasket materials

垫片材料	装配间隙/mm	极限载荷/kN	剪切吸收功/kJ
CFRP	0	22.92	100.04
	0.3	19.60	105.83
	0.5	18.81	112.51
	1.0	15.76	103.88
纤维布	0.3	22.34	118.77
	0.5	19.06	108.30
	1.0	17.72	100.46
胶黏剂	0.3	20.72	106.52
	0.5	20.02	106.85
	1.0	22.93	106.93

可见, 剪切吸收功与极限载荷的变化并不一致, 这是因为剪切吸收功受载荷和位移的双重影响, 虽然装配间隙增加会使胶铆接头的极限载荷急剧减小, 但其拉伸位移增加, 反而使胶铆接头的剪切吸收功增加。

2.2 失效模式

由图3可知: 无垫片和垫片材料为胶黏剂的胶铆接头均在搭接区一侧发生CFRP板层间开裂, 这是因为胶黏剂与CFRP板的黏结界面强度大于CFRP板层间强度; 垫片材料为纤维布的胶铆接头的失效位置为纤维布和CFRP板的黏结界面, 且界面较光滑, 无胶黏剂黏附, 这是因为纤维布与胶黏剂的黏结强度较差, 并无物理和化学反应, 仅仅在表面发生机械耦合, 二者黏结界面成为接头中最薄弱的部位, 在拉伸载荷作用下首先发生开裂, 失效模式为垫片侧胶面开裂; 垫片材料为CFRP的胶铆接头失效模式也是垫片侧胶面开裂, 这可能是因为CFRP垫片与CFRP板的批次不同, 二者表面状态不同, 相比而言, CFRP垫片与胶黏剂的黏结强度更差。

此外, 在不同装配间隙和垫片材料下, 所有胶铆接头铆钉头部拉脱侧CFRP板的加工孔附近均发生大量纤维撕裂, 可能是因为胶铆接过程中铆钉与CFRP板之间产生相互作用, 从而导致CFRP板加工孔附近纤维受损。这直接影响了胶铆接头的连接性能, 导致铆钉在铆钉受力阶段直接脱离CFRP板。铆钉头部拉脱与装配间隙和垫片材料无关。

3 结 论

(1) 不同装配间隙和垫片材料下, 胶铆接头的单接缝拉伸剪切试验载荷-位移曲线相似, 均可分为弹性阶段、界面失效阶段、铆钉受力阶段和铆钉头部拉脱阶段。

(2) 随着装配间隙增加, 垫片材料为CFRP和纤维布的胶铆接头的极限载荷下降, 垫片材料为胶黏剂的胶铆接头的极限载荷基本不变, 当装配间隙为1.0 mm时, 垫片材料为胶黏剂的胶铆接头的极限载荷最大。

(3) 胶铆接头的失效模式与装配间隙无关, 与垫片材料密切相关。当垫片材料为CFRP和纤维布时, 胶铆接头失效模式为垫片侧胶面开裂, 当垫片材料为胶黏剂时, 胶铆接头失效模式为CFRP板层间开裂。

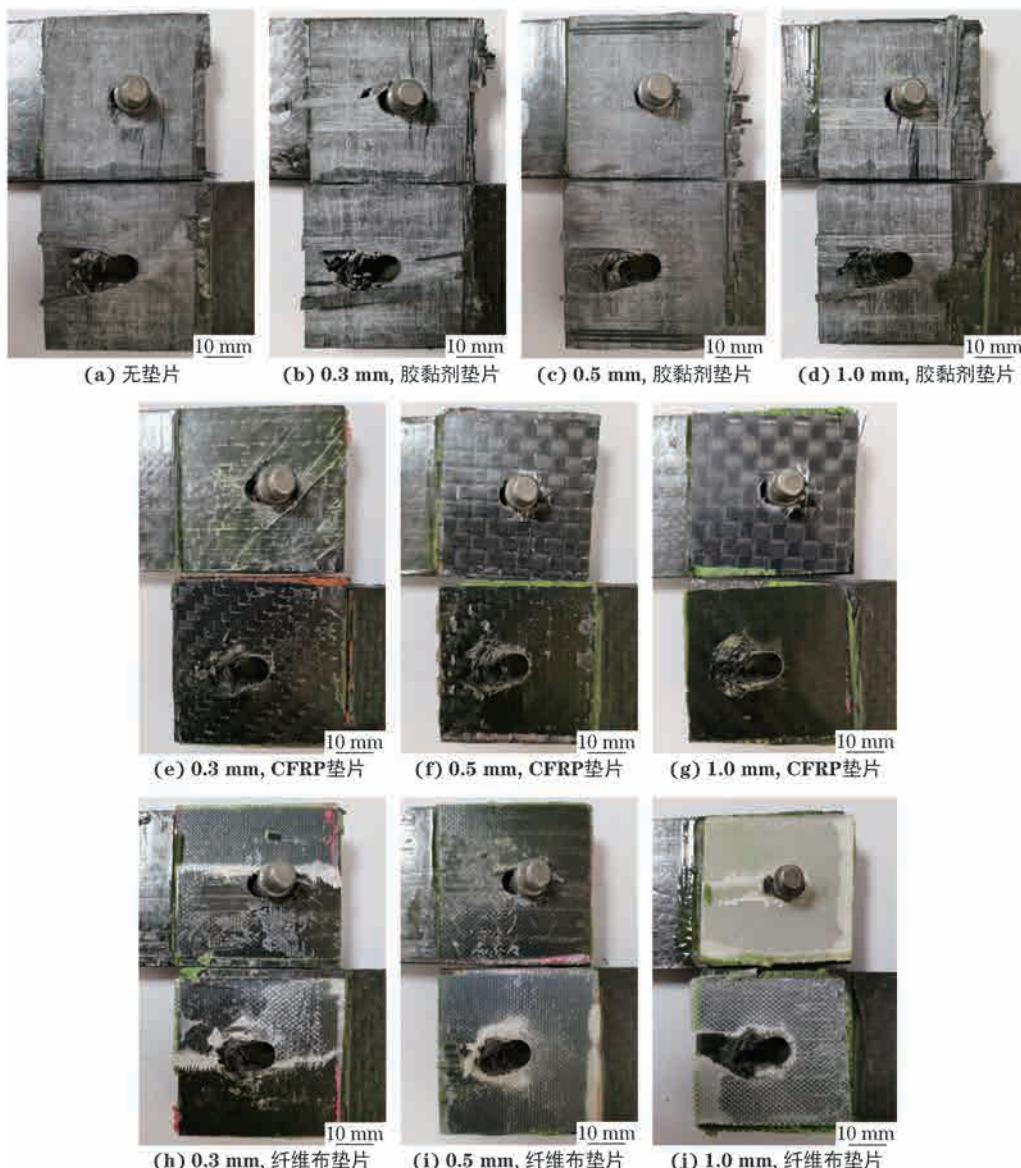


图 3 不同装配间隙和垫片材料的胶铆接头的失效形貌

Fig. 3 Failure morphology of bond-riveted joints with different assembly gaps and gasket materials:

(a) without gasket; (b-d) adhesive gasket; (e-g) CFRP gasket and (h-j) fibre cloth gasket

参考文献:

- [1] ZHANG X H, HAO H, SHI Y C, et al. Static and dynamic material properties of CFRP/epoxy laminates[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 638-649.
- [2] SARANTINOS N, TSANTZALIS S, UCSNIK S, et al. Review of through-the-thickness reinforced composites in joints[J]. Composite Structures, 2019, 229: 111404.
- [3] 刘晓波, 杨颖. 碳纤维增强复合材料在轨道车辆中的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(4): 72-76.
- LIU X B, YANG Y. Application of carbon fiber-reinforced polymer in rail vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(4): 72-76.

- [4] WANG W X, MATSUBARA T, HU J F, et al. Experimental investigation into the influence of the flanged diffuser on the dynamic behavior of CFRP blade of a shrouded wind turbine[J]. Renewable Energy, 2015, 78: 386-397.
- [5] THOPPUL S D, FINEGAN J, GIBSON R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures: A review[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3/4): 301-329.
- [6] 曹增强, 张铭豪, 谭学才, 等. 航空复合材料结构铆接技术综述[J]. 航空制造技术, 2023, 66(增刊1): 26-37.
- CAO Z Q, ZHANG M H, TAN X C, et al. Overview of riveting technology for aviation composite structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(S1):

26-37.

- [7] 汪林,余海燕.碳纤维复合材料铆接接头的失效行为和失效机理[J].机械设计与研究,2020,36(3):176-181.
WANG L, YU H Y. Study on the failure behavior and failure mechanism of CFRP/CFRP riveted joints[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(3): 176-181.
- [8] 高佳佳,楚珑晟.纤维增强树脂基复合材料连接技术研究现状与展望[J].玻璃钢/复合材料,2018(2):101-108.
GAO J J, CHU L S. Present situation and prospect of research on the join technology of composite materials[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(2): 101-108.
- [9] 王华.飞机先进复合材料结构装配协调技术研究现状与发展趋势[J].航空制造技术,2018,61(7):26-33.
WANG H. Advanced composite part assembly: A survey of methodologies and practices[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(7): 26-33.
- [10] 宫占峰.复合材料结构连接技术研究[J].纤维复合材料,2015,32(2):26-29.
GONG Z F. Research on composite structure join technology[J]. Fiber Composites, 2015, 32(2): 26-29.
- [11] WU C, ZHAO X, DUAN W, et al. Bond characteristics between ultra high modulus CFRP laminates and steel[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 51: 147-157.
- [12] JIMENEZ-VICARIA J D, PULIDO M D, CASTRO-FRESNO D. Influence of carbon fiber stiffness and adhesive ductilityon CFRP-steel adhesive joints with short bond lengths[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119758.
- [13] CUI J J, WANGS H, WANGS L, et al. Strength and failure analysis of adhesive single-lap joints under shear loading: Effects of surface morphologies and overlap zone parameters[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 238-247.
- [14] 邹田春,秦嘉徐,李龙辉,等.搭接长度对钛合金-芳纶纤维复合材料单搭接接头胶接性能的影响[J].中国塑料,2020,34(1):17-21.
ZOU T C, QIN J X, LI L H, et al. Effect of lap length on bonding properties of titanium alloy/aramid fiber composites single lap joints[J]. China Plastics, 2020, 34 (1): 17-21.
- [15] 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.
BIAN H L, XU S, XING Y F. Effect of lap length on mechanical properties of CFRP-aluminum riveted joints[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(10): 1-5.
- [16] 邢保英,何晓聪,严柯科.粘接剂对自冲铆-粘接复合接头强度的影响及数理统计分析[J].材料导报,2012,26(8):117-120.
XING B Y, HE X C, YAN K K. Influence of adhesive on strength of SPR-adhesive bonded joints and its mathematical statistics analysis[J]. Materials Review, 2012, 26(8): 117-120.

Effect of Assembly Gap and Gasket Material on Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Composite Bond-Riveted Joints

YE Jiehe¹, ZHANG Zibo², XU Ye¹, LIANG Jingheng², ZHENG Ziqin², SONG Hongyu¹

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China; 2. No.52 Institute of China North Industries Group Yantai Branch Co., Ltd., Yantai 264003, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced composite (CFRP) bond-riveted joint was prepared, and single seam tensile shear test was carried out. The effects of assembly gap (0, 0.3, 0.5, 1.0 mm) and gasket material (CFRP, alkali-free glass fiber cloth and EP6250 epoxy resin adhesive) on the tensile-shear mechanical properties and failure mode were studied. The results show that the load-displacement curves of the bond-riveted joints with different assembly gaps and gasket materials were similar, which could be divided into elastic stage, interface failure stage, rivet stress stage and rivet head pulling stage. With the increase of the assembly gap, the ultimate load of the bond-riveted joint with CFRP gasket and fiber cloth gasket decreased, and the ultimate load of the bond-riveted joint with adhesive gasket was basically unchanged. When the assembly gap was 1.0 mm, the ultimate load of the bond-riveted joint with adhesive gasket was the largest. When the gasket material was CFRP or fiber cloth, the failure mode of the bond-riveted joints was cracking of the rubber surface on the side of the gasket; when the gasket material was the adhesive, the failure mode of the bond-riveted joint was cracking in CFRP plates.

Key words: carbon fiber; riveting; assembly gap; mechanical properties; failure mode