

钢板与三维编织碳纤维板盲端拉铆连接静力学性能研究

张瑞 张弛 王镛

(泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201201)

摘要:对钢板与三维编织碳纤维板盲端拉铆连接进行静力学性能研究。先对相同试件宽度及连接端距下的2种不同料厚组合的钢板与三维编织碳纤维板盲端拉铆连接试件进行静力学试验,而后对同一料厚组合不同试件宽度 W 及连接端距 E 下的盲端拉铆连接组合进行静力学试验,以研究钢板与碳纤复合材料盲端拉铆连接的静力学性能、失效模式以及试件宽度、连接端距对其静力学性能的影响。研究表明:采用盲端拉铆钉连接钢板与碳纤维板可获得较好的力学性能;碳纤维板与钢板盲端拉铆连接组合的失效模式及连接最大破坏载荷与三维编织碳纤维板切割方向相关;试件宽度及连接端距对连接的失效模式及最大破坏载荷均有影响。

关键词:三维编织碳纤维复合材料 钢板 拉铆 静力学试验

中图分类号:U466

文献标志码:B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20200374

Study on the Static Mechanical Properties of Blind End Riveting Connection between Steel Panel and Three-dimensional Braided Carbon Fiber Panel

Zhang Rui, Zhang Chi, Wang Di

(Pan Asia Technical Automotive Center, Shanghai 201201)

Abstract: Static mechanical properties of blind end riveting connection between steel panel and three-dimensional braided carbon fiber panel was studied. The static test of blind end riveting connection combination with two different material thicknesses with the same specimen width and end distance was carried out. Then, the static test was carried out on the blind-end riveting connection combination with the same material thickness with different specimen width and end distance, so as to study the influence of mechanical property, failure mode, specimen width and end distance on its static performance. The research shows that good mechanical properties can be obtained by using blind end rivet to connect steel panel and carbon fiber panel. The failure mode and the maximum failure load of the connection are related to the cutting direction of the three-dimensional braided carbon fiber panel. The specimen width and the end distance have an effect on the failure mode and the maximum failure load of the connection.

Key words: Three-dimensional braided carbon fiber panel, Steel panel, Blind end rivet, Static tests

1 前言

近年来,随着油价的上涨以及排放法规的日

益严格,节能减排逐渐成为消费者购买汽车时关注的重点,各大汽车厂商在设计研发阶段也将油耗及排放性能作为重点关注性能。轻量化是汽车

作者简介:张瑞(1990—),女,工程师,硕士学位,研究方向车身结构设计。

参考文献引用格式:

张瑞,张弛,王镛. 钢板与三维编织碳纤维板盲端拉铆连接静力学性能研究[J]. 汽车工艺与材料, 2024(1): 38-44.

ZHANG R, ZHANG C, WANG D. Study on the Static Mechanical Properties of Blind End Riveting Connection between Steel Panel and Three-dimensional Braided Carbon Fiber Panel[J]. Automobile Technology & Material, 2024(1): 38-44.

节能减排的重要途径之一。研究表明,汽车质量每减少 100 kg,每百公里可节省燃油 0.3~0.5 L,减少 CO₂ 排放 8~11 g^[1]。目前汽车轻量化主要通过轻量化材料、轻量化结构、轻量化制造技术实现。轻量化材料中碳纤维复合材料具有优秀的力学性能及优异的减重表现,研究表明,在等刚度或等强度设计原则下,碳纤维复合材料结构比低碳钢结构质量减少 50% 以上^[2~3]。在碳纤维复合材料中,三维编织碳纤维复合材料的力学性能优于传统层合板,其拉、压、剪性能普遍高于典型多向层合板^[4]。目前很少有汽车主机厂在白车身上运用三维编织碳纤维复合材料,针对三维编织碳纤维板及钢板连接的研究也较少。随着三维编织碳纤维复合材料制备技术的日臻成熟及其制备成本的逐年降低,其在白车身上的批量运用值得期待。

选取盲端拉铆钉对三维编织碳纤维复合材料及钢板进行连接,对该种连接组合的静力学性能进行研究。先对相同试件宽度及连接端距下 2 种不同料厚组合的盲端拉铆连接试件进行剪切及十字拉伸静力学试验,研究其剪切、剥离力学性能及失效模式;而后对同一料厚组合下不同试件宽度及连接端距下的盲端拉铆连接试件进行剪切及十字拉伸静力学试验,研究试件宽度及连接端距对连接的剪切及剥离性能影响。

2 试验

2.1 试件制备

选取三维编织碳纤维轮罩项目中碳纤维板与钢板连接处的料厚组合进行盲端拉铆连接研究,共 2 种料厚连接组合,详见表 1。选取图 1 所示直径 6.4 mm 的同系列(02221 系列)不同夹持厚度的拉铆钉对 2 种连接组合进行连接。2 种连接组合中碳纤维板厚度分别为 4.5 mm 和 6 mm。该 2 种料厚的碳纤维复合材料纱线种类、树脂材料及编织方式均一致,仅织物层数不一致。碳纤维板增强体为三维六向编织,编织结构如图 2 所示,力学性能如表 2 所示,其中,泊松比 μ_{23} 为 0.03。制备碳纤维复合材料料片时,先采用 VARTM 工艺成型出 350 mm×350 mm 的碳纤维复合材料板料,而后将碳纤维板料切割成试验所需料片尺寸。

表 1 碳纤维复合材料与钢板连接料片组合

连接组合	铆钉型号	上板		下板	
		材料 1	料厚 T_1 /mm	材料 2	料厚 T_2 /mm
1	02221	GMW3032M-ST-	1.5	CFRP	4.5
	00815	S-CR210P-HD60G60G-U			
2	02221	GMW2M-ST-S-	2.15	CFRP	6
	00818	CR3-HD60G60G-U			



图 1 02221 系列拉铆钉

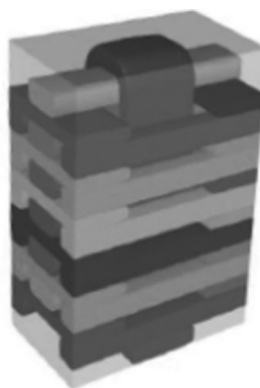


图 2 碳纤维增强体编织结构

表 2 碳纤维复合材料板料力学性能

参数	模量/GPa	强度/MPa
经向拉伸	26.08	363.77
经向压缩	15.20	192.83
纬向拉伸	70.41	836.06
纬向压缩	32.44	519.50
剪切 G_{12}	2.06	
剪切 G_{13}	1.75	
剪切 G_{23}	1.65	

2.2 试验设计

为研究三维编织碳纤维复合材料与钢板盲端拉

铆连接的失效模式以及其剪切和剥离静力学性能,对相同连接几何参数($E=15\text{ mm}$, $W=35\text{ mm}$)下的2种连接料厚组合试件进行剪切及十字拉伸静力学试验,剪切及十字拉伸试件连接形式如图3所示。由于碳纤维复合材料板料经向纱线与纬向纱线密度不同,其在经向及纬向的力学性能不同,将碳纤维板料沿经向纱线及纬向纱线2种方向进行切割,并对2种切割方向的料片连接组合进行静力学试验,2种切割方向的碳纤维板如图4所示。为研究不同试件宽度 W 及连接端距 E 对连接静力学性能的影响,对料片组合1在不同连接端距 E 及板宽 W 下的连接试件进行静力学试验。分别选取了3种不同的端距(E 为 15 mm 、 20 mm 、 25 mm)及板宽(W 为 25 mm 、 35 mm 、 45 mm),按照L9正交列表确定剪切试件试验组合,剪切试验样件列表详见表3,十字拉伸试件列表详见表4。文中对表3及表4中的试件组合在经向及纬向2种切割方向的料片均进行试验。

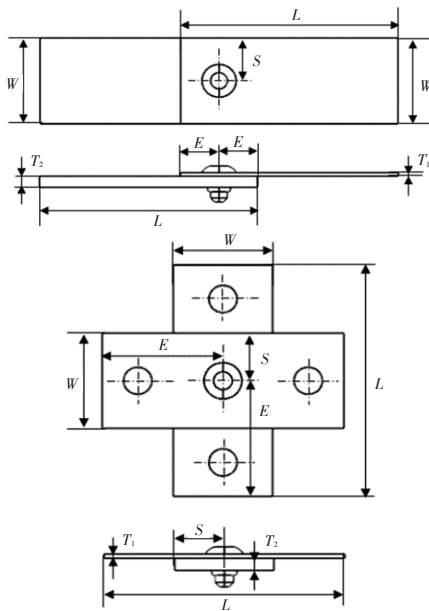


图3 剪切及十字拉伸试样连接形式



(a)经向切割料片



(b)纬向切割料片

图4 不同切割方向的碳纤维板

表3 CFRP-Steel 拉铆连接试验试样

试样	L/mm	W/mm	E/mm
1	85	25	15
2	85	25	15
3	85	25	15
4	85	35	20
5	85	35	20
6	85	35	20
7	85	45	25
8	85	45	25
9	85	45	25

表4 CFRP-Steel 拉铆连接十字拉伸试验试样

试样	L/mm	W/mm
1	85	25
2	85	35
3	85	45

试验时采用Z150拉伸机(量程为 50 kN),对试件施加载荷直至试件破坏,加载速度为 5 mm/min 。十字拉伸工装如图5所示,试验装置如图6所示。



图5 十字拉伸工装

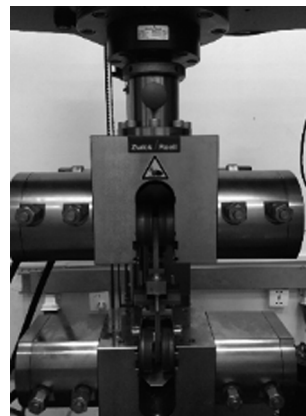


图6 试验装置

3 试验结果分析

3.1 相同端距 E 及板宽 W 下碳纤板和钢板拉铆连接静力学试验结果分析

相同端距($E=15\text{ mm}$)及宽度($W=35\text{ mm}$)下CFRP-steel拉铆连接静力学试验结果如表5所示,表中所列最大破坏力值为每组3个试样的平均值。图7为静力学试验各试件破坏形貌。

表5 相同端距 E 及板宽 W 下盲端拉铆连接静力学试验结果

试件编号	料片组合	CFRP切割方向	试验类型	最大破坏载荷/N	破坏模式
S-J-1-1	1	经向	剪切	8 545.96	剪切+挤压
S-W-1-1	1	纬向	剪切	8 164.01	拉伸+挤压
T-J-1-1	1	经向	十字拉伸	5 701.52	拉脱
T-W-1-1	1	纬向	十字拉伸	4 313.51	拉伸
S-J-2-1	2	经向	剪切	9 467.61	剪切+挤压
S-W-2-1	2	纬向	剪切	8 182.96	拉伸+挤压
T-J-2-1	2	经向	十字拉伸	8 031.57	拉脱
T-W-2-1	2	纬向	十字拉伸	5 697.28	拉伸

从表5中可以看出,2种料厚组合下经向料片的静力学性能均优于纬向料片的静力学性能。其中,纬向料片剪切最大破坏载荷约为经向料片的90%,纬向料片十字拉伸最大破坏载荷约为经向料片的70%。经向与纬向料片静力学性能差异由碳纤料片增强体经向纱线与纬向纱线密度差异导致。

采用02221系列盲端拉铆钉连接的碳纤板及钢板料片剪切及十字拉伸试验的连接失效模式均为碳纤板破坏。由于碳纤板力学性能呈各向异性,同种试验工况下,不同切割方向碳纤板的破坏模式不同。其中,经向料片剪切试验失效模式为剪切和挤压破坏,纬向料片剪切试验失效模式为挤压和拉伸破坏。经向料片十字拉伸试验失效模式为铆钉拉脱,纬向料片十字拉伸失效模式为拉伸破坏。从图7中可以看出,经向料片在剪切试验中铆钉至端头处的碳纤基体及碳丝受到明显挤

压,同时纬向碳丝有断裂迹象。纬向剪切试验中,沿力加载方向铆钉至端头处的碳纤基体及碳丝沿力加载方向受到挤压,料片组合1铆钉处纬向碳丝有较为明显的断裂迹象,裂纹与加载方向垂直,试验过程中可听到清脆的碳丝断裂声音;料片组合2纬向碳丝断裂迹象不明显,其失效模式以挤压为主。经向十字拉伸试验中,铆钉周围的碳丝局部受到挤压破坏。纬向十字拉伸试验中铆钉处纬向碳丝全部断裂。



图7 各试件静力学试验破坏形貌

3.2 不同端距 E 及板宽 W 下碳纤板和钢板盲端拉铆连接静力学试验结果分析

3.2.1 端距 E 及板宽 W 对碳纤板和钢板盲端拉铆连接剪切力性能影响

图8为不同板宽下,盲端拉铆连接试件剪切试验最大失效力随端距 E 的变化曲线。图9为不同端距 E 下连接试件最大破坏载荷随板宽 W 的变化曲线。表6为不同板宽及端距下,各试件剪切试验破坏形貌。从图8和图9中可以看出,碳纤钢板拉铆连接剪切最大破坏力值及失效模式受料片端距及板宽影响。

从图8中可以看出,对纬向料片而言,宽度一定时,随着端距 E 增大,各连接组合最大破坏载荷明显呈上升趋势;对经向料片而言,宽度一定时,随着端距 E 增大,各连接组合最大破坏载荷大体呈上

升趋势。其中, $W=45\text{ mm}$ 、 $E=25\text{ mm}$ 时经向连接试件最大破坏载荷较 $W=45\text{ mm}$ 、 $E=20\text{ mm}$ 时经向试件最大破坏载荷约降低 70 N, 该力值的轻微降低

与样件破坏模式相关。料片宽度一定时, 随着 E 增大, 挤压面增加从而使得料片连接组合的承载能力增大。

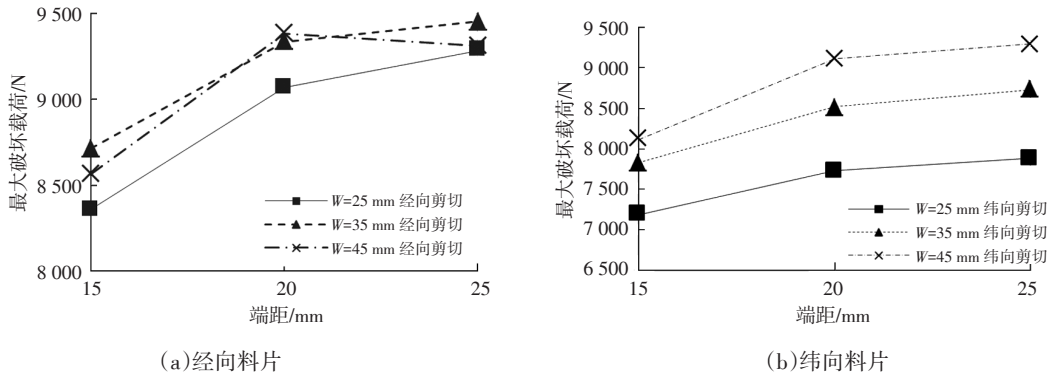


图 8 不同板宽 W 下最大破坏载荷随端距 E 变化曲线

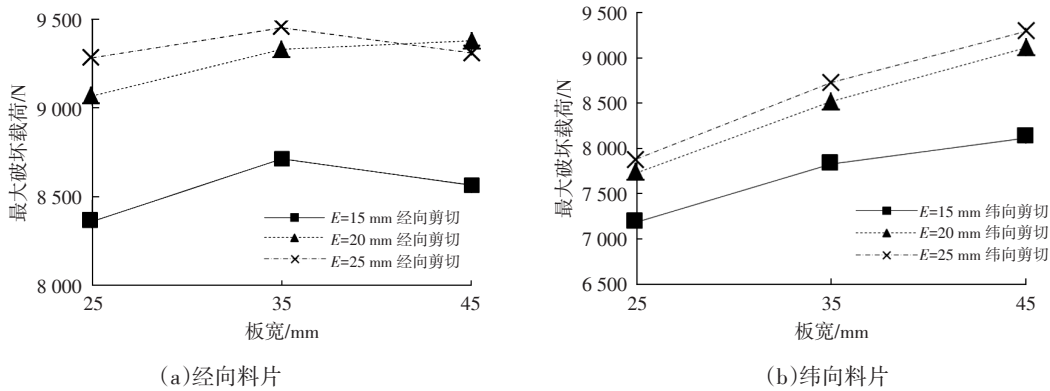


图 9 不同端距 E 下最大破坏载荷随板宽 W 变化曲线

表 6 不同板宽 W 及端距 E 下各试件破坏形貌

料片类型	$E=15\text{ mm}$ $W=25\text{ mm}$	$E=20\text{ mm}$ $W=25\text{ mm}$	$E=25\text{ mm}$ $W=25\text{ mm}$	$E=15\text{ mm}$ $W=35\text{ mm}$	$E=20\text{ mm}$ $W=35\text{ mm}$	$E=25\text{ mm}$ $W=35\text{ mm}$	$E=15\text{ mm}$ $W=45\text{ mm}$	$E=20\text{ mm}$ $W=45\text{ mm}$	$E=25\text{ mm}$ $W=45\text{ mm}$
经向料片									
纬向料片									

对经向料片而言, 当样件板料宽度 W 一定时, 随着 E 增加, 3 种边距的经向料片连接组合破坏模式均发生变化。其中, W 为 25 mm 和 35 mm 的失效模式随着 E 的增大, 先由碳纤维板剪切加挤压破坏变为铆钉拉脱, 而后变为铆钉断裂; 当 W 为 45 mm 时, 其失效模式随着 E 的增大由碳纤维板剪切加挤压

破坏变为铆钉断裂。当 W 为 45 mm 时, 料片端距 E 为 20 mm 和 25 mm 的样件失效模式均为铆钉断裂, 其最大破坏载荷由铆钉自身承载能力决定, 故样件端距 E 为 20 mm 和 25 mm 时的最大破坏载荷仅有微小差异。

对纬向料片而言, 随着 E 增加, W 为 25 mm 的

经向料片连接组合破坏模式未发生变化,仅 W 为35 mm和45 mm的连接组合破坏模式发生变化。其中,当 W 为25 mm时,其失效模式为碳纤维拉伸破坏,由于板宽较小,沿加载方向承力的纬向纱较少,同时纬向纱本身密度较小、承力能力弱,从而导致碳纤维在出现挤压破坏前已出现拉伸破坏导致连接失效;当 W 为35 mm时,纬向料片连接组合破坏模式为拉伸+挤压破坏,此宽度下碳纤维纬向纱沿力加载方向断裂,同时挤压面处的经向纱受到挤压破坏;当 W 为45 mm时,随着 E 增加,纬向料片连接组合破坏模式由拉伸+挤压破坏变为拉脱破坏,当 E 为25 mm时,由于 W 为45 mm,试样较宽,沿力加载方向的纬向纱增多,碳纤维纬向承力结构较强,从而使得碳纤维未沿力加载方向出现拉伸破坏,同时,由于 E 较大,挤压面增加,从而使得碳纤维不易沿力加载方向受挤压破坏。

从图9中可以看出,对经向料片而言,当端距 E 一定时,随着板宽 W 的增加,其最大破坏载荷有变化但无明显变化规律,相同端距 E 、不同板宽 W 下的最大破坏载荷力值相差不大。当 E 为15 mm时,经向料片连接失效模式为碳纤维破坏,而碳纤维为纬向丝受破坏而失效,纬向丝承力能力主要由 E 值决定,由于 E 值均为15 mm,故各板宽下的连接组合最大失效力值接近。当 E 为20 mm和25 mm时,各板宽 W 下经向料片连接的失效模式为铆钉拉脱和铆钉断裂,铆钉断裂破坏下各连接组合的最大失效力值接近,铆钉拉脱的最大失效力值较铆钉断裂的最大失效力值略低。

对纬向料片而言, E 值一定时,随着板宽 W 的增加,最大破坏载荷呈增大趋势。纬向料片拉伸时,随着板宽 W 增加,纬向料片拉伸净面积增加,可承力的纬向碳丝增加,故纬向最大破坏载荷增加。

3.2.2 板宽 W 对碳纤维和钢板盲端拉铆连接十字拉伸力学性能影响

图10为十字拉伸最大破坏载荷随板宽 W 的变化曲线,表7为不同板宽 W 下连接组合试件十字拉伸试验破坏形貌。从图10中可以看出,随着 W 增加,经向及纬向料片十字拉伸最大破坏载荷均增大。随着料片 W 增加,拉伸净截面积增大,碳纤维

承力能力提高,故最大破坏载荷增大。

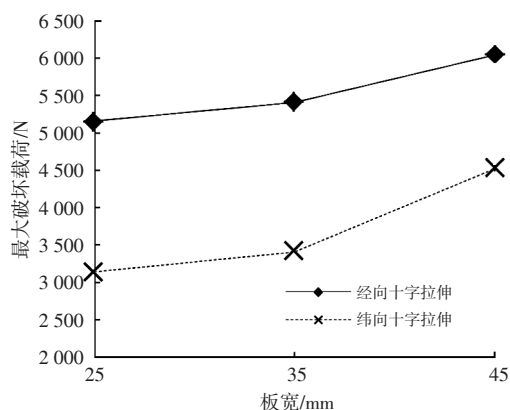


图10 最大破坏载荷随 W 变化曲线

W/mm	25	35	45
经向料片			
纬向料片			

从表7中可以看出,对经向料片而言,随着碳纤维 W 增加,连接试件十字拉伸失效模式由拉伸破坏变为拉脱破坏。当 W 为25 mm时,由于板宽较小,经向碳丝数量较少,其承力能力较大板宽碳纤维弱,故加载过程中碳纤维经向碳丝受拉断裂,同时,由于加载时主要为经向丝承力,其承力能力较纬向丝强,故在加载力大至足以使铆钉周围碳丝沿力加载方向挤出时经向丝方才断裂。对纬向料片而言,随着碳纤维 W 增加,连接试件十字拉伸失效模式未发生变化,其失效模式均为碳纤维拉伸破坏,在铆钉周围未观察到碳纤维挤出。由于纬向料片加载过程中主要为纬向纱承力,纬向纱密度较小,其承力能力较弱,故加载过程中纬向纱断裂失效,同时,纬向纱断裂时的加载力不足以使碳丝挤出,从而未观测到碳纤维挤出。

4 结束语

对相同板宽 W 及端距 E 下2种不同料厚组合的钢板与三维编织碳纤维复合材料拉铆连接试件以及同一料厚组合在不同板宽 W 及端距 E 下的拉铆

连接组合进行了剪切及十字拉伸静力学试验,得出以下结论:

a. 采用拉铆钉接可对钢板与三维编织碳纤维板进行有效连接;

b. 采用文中所示铆钉对三维编织碳纤维复合材料与钢板进行连接时,剪切及十字拉伸静力学试验工况下除拉铆钉断裂及拉脱外均为碳纤维板破坏从而导致连接失效;

c. 由于碳纤维力学性能呈各项异性,不同碳纤维板切割方向连接组合的失效模式及连接最大破坏载荷均不同;

d. 连接组合的端距 E 及样板宽 W 对连接的失效模式及最大破坏载荷均有影响。

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(1): 1-16.
- [2] 宋燕利, 杨龙, 郭巍, 等. 面向汽车轻量化应用的探险复合材料关键技术[J]. 材料导报, 2016(11): 16-25.
- [3] 王宏雁, 陈君毅. 汽车车身轻量化结构与轻质材料[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [4] 张迪, 郑锡涛, 孙颖, 等. 三维编织与层合复合材料力学性能对比试验[J]. 航空材料学报, 2015(3): 89-96.

AT
&M