

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20181114.001

碳纤维增强聚合物复合材料车身 T 型接头 静态性能与失效机制

许现哲, 刘通, 王文丽, 侯文彬*

(大连理工大学 汽车工程学院 运载工程与力学学部 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 通过解析预测、有限元分析和试验手段对热塑性碳纤维增强聚合物复合材料(CFRP) T 型接头的面外弯曲和弯扭耦合力学性能进行研究, 分析了 T 型接头的结构失效形式与力-位移曲线的关系, 并将解析模型、有限元仿真与试验结果进行对比。在弯曲刚度方面, 解析模型、有限元分析结果相对试验结果的刚度误差分别为 4.7% 和 0.5%。在弯扭耦合刚度方面, 解析模型及有限元仿真的结果相对试验结果的弯扭耦合刚度误差分别为 6.9% 和 9.6%。试验结果表明, CFRP 层合板的渐进失效引起 T 型接头弯曲刚度的衰减, 当力达到 2 047 N 时接头开始发生失效, 失效形式包括纤维的断裂、缠绕、树脂的压碎及纤维和树脂的分层等。

关键词: 热塑碳纤维增强聚合物复合材料(CFRP); 单冒型 T 型接头; 力学性能; 理论预测; 有限元分析; 弯扭耦合

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)10-2227-08

Performance and failure mechanics of carbon fiber reinforced polymer composite T-joint in quasi-static loading for automobile structures

XU Xianzhe, LIU Tong, WANG Wenli, HOU Wenbin*

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics,
School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: This paper presents an analytical, finite element and experimental study on the mechanical behavior of thermoplastic carbon fiber reinforced polymer (CFRP) T-joint subjected to out-of-plane bending and bending-torsion coupling. The relationship between failure mode and load-displacement curve was analyzed. The analytical, finite element and experimental results were compared. In bending test, the stiffness discrepancies in analytical and finite element model compared to that in the experiment are 4.7% and 0.5%, respectively. In bending-torsion test, the stiffness discrepancies in analytical and finite element model compared to that in the experiment are 6.9% and 9.6%, respectively. The results in the experiment show that the progressive damage of CFRP laminate causes the damping of transverse bending stiffness of the T-joint. The T-joint begins to fail when the force reaches 2 047 N. The failure results include matrix cracking, matrix/fiber deboning of transverse fibers, delimitation and fiber breakage leading to transverse rupture.

Keywords: thermoplastic carbon fiber reinforced polymer (CFRP); single hat-shaped T-joint; mechanical behavior; analytical model; finite element analysis; bending-torsion coupling

随着汽车工业的发展及对环境问题的重视, 提高燃油利用率成为汽车发展的重要趋势, 而实现汽车轻量化是节约燃油的有效途径^[1]。实现车身结构轻量化主要有两种方式: 结构优化和材料替换^[2]。

复合材料作为一种实现汽车结构轻量化关键的候选解决方案, 已经广泛地应用在车顶、车门、车身板件、车架及座椅上。其中采用碳纤维增强聚合物复合材料(CFRP)与采用金属材料相比可以减重

收稿日期: 2018-09-29; 录用日期: 2018-11-06; 网络出版时间: 2018-11-15 15:13
网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181114.001>
基金项目: 中央高校基本科研业务费(DUT19ZD222); 工业装备结构分析国家重点实验室自主课题(S18108)
通讯作者: 侯文彬, 教授, 博士生导师, 研究方向为车身轻量化 E-mail: houwb@dlut.edu.cn
引用格式: 许现哲, 刘通, 王文丽, 等. 碳纤维增强聚合物复合材料车身 T 型接头静态性能与失效机制[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2227-2234.
XU Xianzhe, LIU Tong, WANG Wenli, et al. Performance and failure mechanics of carbon fiber reinforced polymer composite T-joint in quasi-static loading for automobile structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(10): 2227-2234 (in Chinese).

40%~60%，同时还可以提升车身结构性能^[3-10]。

车身的承载结构主要由薄壁梁构成，各薄壁梁通过接头连接，尤其是 B 柱下部 T 型接头，如图 1 所示，对整车的扭转刚度有很大影响。相关研究表明，接头的几何结构、对接头施加载荷的方向以及引入内部膜片都能够影响和提高接头刚度^[11-13]。Jong 等^[14]运用数值方法研究了汽车中箱型梁结构的性能，尤其是接头设计。结果表明，带有接头的箱型梁结构中影响结构性能的最主要因素是厚度和截面长度的比值。Hou 等^[15]和王海丰等^[16]对编织

布 CFRP T 型接头的力学性能进行了解析、仿真和试验的对比分析，并对接头几何尺寸及铺层数目对接头力学性能的灵敏度进行分析，结果表明，解析和仿真能够对试验结果进行很好的预测，制造过程和试验方法会对试验结果产生影响^[17]。Burns 等^[18]采用 DOE 和数值优化方法对 CFRP T 型接头的铺层方向进行优化，提高了接头的失效力和弹性损伤极限。而对作为车身刚度重要组成部分的接头研究，是构造高刚度、轻量化、安全的 CFRP 复合车身的重要内容。

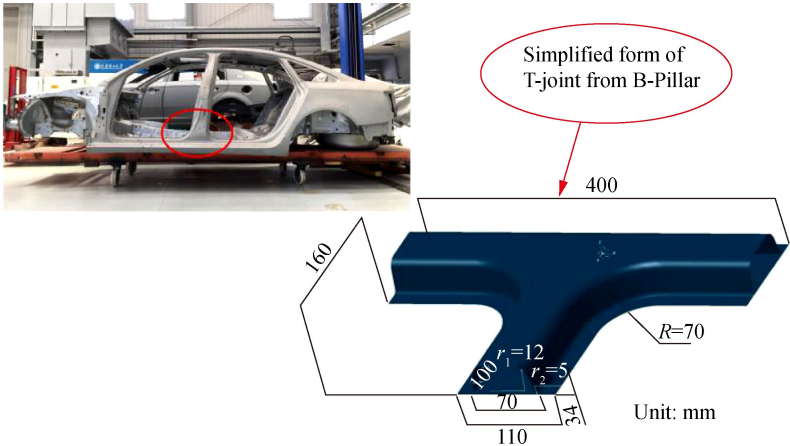


图 1 B 柱下接头的碳纤维增强聚合物复合材料(CFRP) T 型接头

Fig. 1 An illustrative example of the sectioned carbon fiber reinforced polymer(CFRP) composite T-joint from B-pillar

本文采用斜纹编织热塑性 CFRP 制作 T 型接头，在准静态加载条件下，研究接头在面外弯曲和弯扭耦合状态下的力学性能。通过建立解析模型对弯曲刚度和弯扭耦合刚度进行预测，运用有限元分析对接头弯曲状态下的刚度、峰值力、失效部位及应力-应变等参数进行预测。为车身 CFRP 结构接头的全新设计提供指导。

1 试验方法

1.1 CFRP T 型接头的设计与制备

以某白车身为参考，截取 B 柱下接头并将其进行简化，除去金属接头的内部加强板，并将 3 个分支截面做成相同形状，其几何尺寸如图 1 所示。

材料采用 3K 碳纤维/聚碳酸酯热塑性 2×2 斜纹编织预浸料(GEM301)。根据 ASTM D3410^[19]、ASTM D3039^[20]、ASTM D3518^[21] 测试标准对 CFRP 的力学性能参数进行测试。首先将 CFRP 层合板沿 0°方向截取压缩和拉伸试件，如图 2(a)、图 2(b)所示，沿 45°方向截取剪切试件如图 2(c)所示。然后运用 DIC(Digital Image Correlation)技术对拉

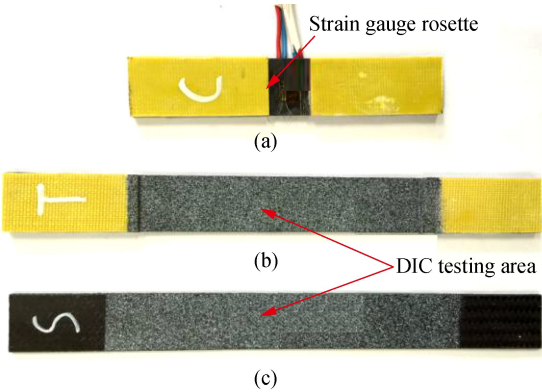


图 2 CFRP 力学性能测试试件

Fig. 2 Specimens for measuring mechanical properties of CFRP materials used in the T-joint

伸和剪切试件的应变进行测量，采用静态应变仪对压缩试件应变进行测量，试验装置如图 3 所示。测得 CFRP 力学性能参数如表 1 所示。

图 4 为热塑性 CFRP T 型接头制作过程中的三个关键步骤:图 4(a)将裁剪好的预浸料平整的铺在模具上;图 4(b)放置在热压机中进行高温高压成

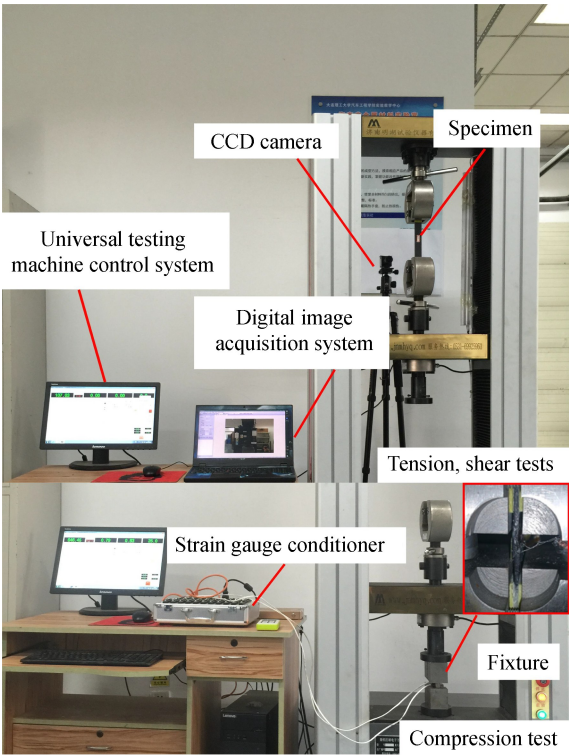


图 3 力学性能测试试验装置

Fig. 3 Experimental setup for measuring mechanical properties

表 1 CFRP 性能参数

Table 1 Material properties of CFRP composites

Properties	Values
Density/(g·cm ⁻³)	1.5
Young modulus in longitudinal (transverse) direction/GPa	48
Shear modulus/GPa	2.15
Poisson's ratio	0.1
Longitudinal (transverse) tensile strength/MPa	519
Longitudinal (transverse) compressive strength/MPa	172
In plane shear strength/MPa	35

型, 其中温度为 170℃, 压强为 3 MPa, 成型时间为 40 min; 图 4(c)将成型好的冒型件与用相同工艺制作的底板进行粘接。其中层合板的厚度控制在 2 mm, 预浸料铺 7 层进行制作。

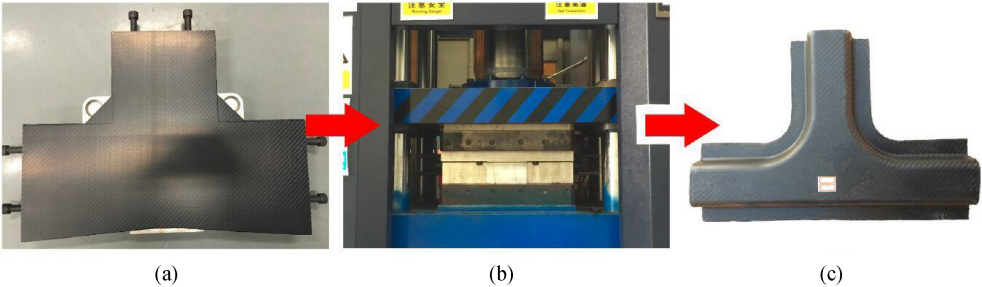


图 4 热塑性 CFRP T 型接头制作流程

Fig. 4 Preparation of the CFRP T-joint

1.2 CFRP T 型接头弯曲和弯扭试验方案

CFRP T 型接头弯曲和弯扭试验布置方式如图 5(b)所示。T 型接头被安装在一套可调节的固定装置上从而确保试验过程中的精准装夹, 在济南明湖试验仪器有限公司生产的电子万能试验机 (ND-PC105) 上进行弯曲和弯扭的加载试验, 加载位置如图 5(a)所示。在接头的上表面和下表面都贴有应变片来获取加载过程中 T 型接头的应变情况, 应变片粘贴形式如图 6 所示。

2 模型建立

2.1 CFRP T 型接头解析模型建立

2.1.1 弯曲挠度响应

弯曲载荷作用下接头端部的变形可以表示为 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ (1) 其中: δ_1 为 B 柱悬臂梁的弯曲变形; δ_2 为接头下边梁的扭转变形。 δ_1 又可以看作是弯矩所引起的弯曲变形与剪力所引起的剪切变形之和, 即

$$\delta_1 = \frac{PL^3}{3E_1 I_x} + \frac{kPL}{AG_{12}} \quad (2)$$

其中: E_1 和 G_{12} 分别为材料的弹性模量和剪切模量; I_x 是 B 柱截面相对于自身中性轴的惯性矩; A 是接头横截面积; k 是剪切修正因子, 由于层合板很薄, 因此剪切变形可以忽略不计。即

$$\frac{kPL}{AG_{12}} \approx 0 \quad (3)$$

接头下边梁扭转变形可以表示为 $\delta_2 = \Psi_r \times L$ (4) 其中, Ψ_r 是下边梁扭转角度, 对于薄壁结构, Ψ_r 可以表示为

$$\Psi_r = \frac{PL_1 \times \left(\frac{L_r}{2} - L_2 - L_3 \right) L_T}{4G_{12} \omega^2 t} \quad (5)$$

其中: L 、 L_1 、 L_2 、 L_3 如图 7 所示; L_r 是下边梁的长度; L_T 是截面壁厚中线的长度, 可以表示为

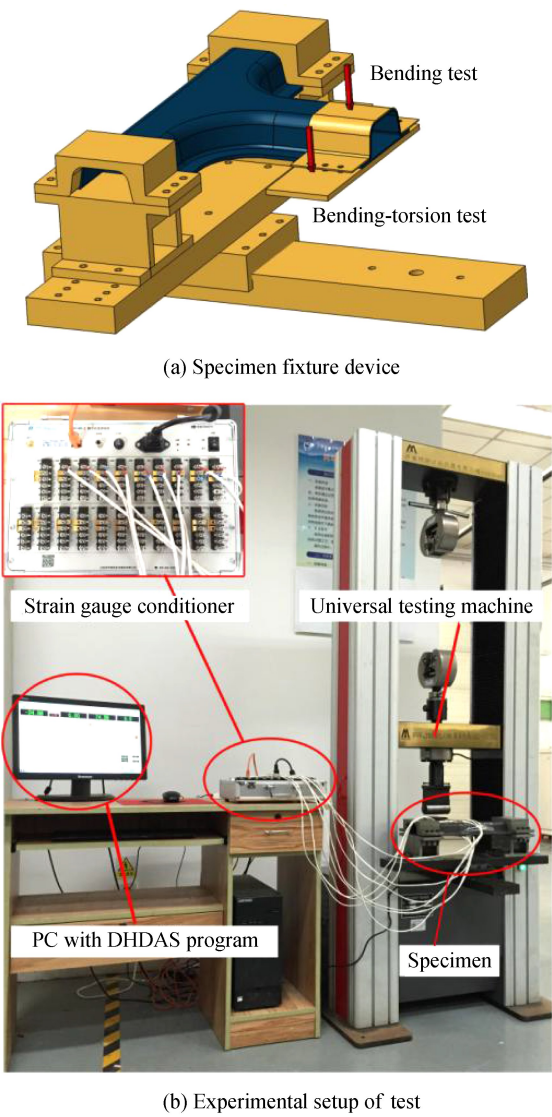


图5 CFRP T型接头试验装置
Fig. 5 Experimental setup for the CFRP T-joint

$$L_T = B_x + \left(\frac{B_y}{2} - r\right) \times 2 + \frac{B_x}{2} + \frac{1}{2} \times 2\pi r \quad (6)$$

ω 是截面壁厚中线所围面积, 可以表示为

$$\omega = B_x \times \left(\frac{B_y}{2} - r + t\right) + \frac{B_x}{2} \times r + \frac{1}{2} \pi r^2 \quad (7)$$

B柱端部的挠度响应为

$$\frac{\delta_{ben}}{P_{ben}} = \frac{L^3}{3E_1 I_x} + \frac{L_1 \times \left[\frac{L_r}{2} - L_2 - L_3\right] L_T}{4G_{12} \omega^2 t} \quad (8)$$

更多详细过程参考文献[15]。

2.1.2 弯扭耦合挠度响应

弯扭加载情况下, 端部加载部位的扭转角度可以表示为

$$\Psi_{tor} = \frac{L_4 \times L_5 \times L_T}{4G_{12} \omega^2 t} \quad (9)$$

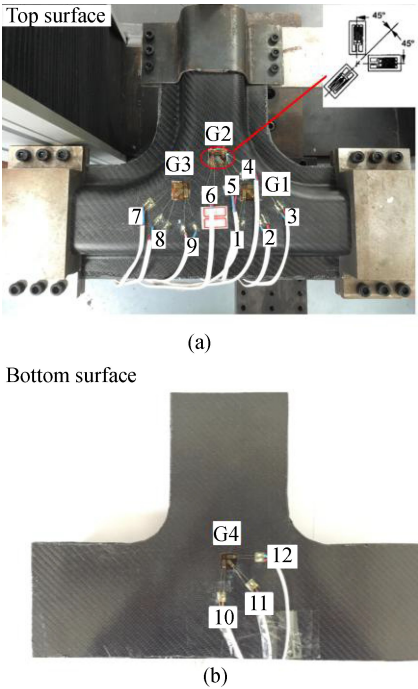


图6 应变片粘贴形式
Fig. 6 Placement of the strain rosettes

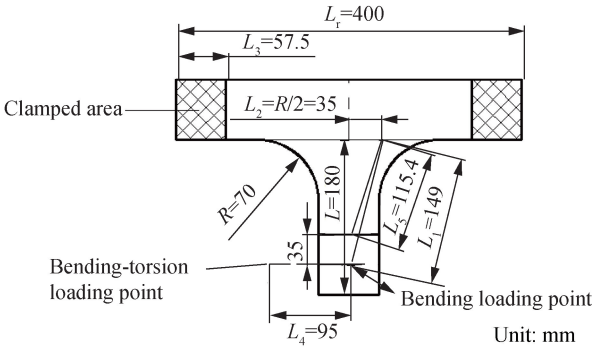


图7 CFRP T型接头俯视图
Fig. 7 Schematic of top view of the CFRP T-joint

其中, L_4 和 L_5 如图7所示。弯扭耦合的挠度响应为B柱端部的挠度响应与端部扭转产生的位移之和, 即

$$\frac{\delta_{tor}}{P_{tor}} = \frac{\delta_{ben}}{P_{ben}} + \Psi_{tor} L_4 \quad (10)$$

弯扭耦合的挠度响应表示为

$$\frac{\delta_{tor}}{P_{tor}} = \frac{L^3}{3E_1 I_x} + \frac{L_1 \times \left[\frac{L_r}{2} - L_2 - L_3\right] L_T}{4G_{12} \omega^2 t} L + \frac{L_4 \times L_5 \times L_T}{4G_{12} \omega^2 t} L_4 \quad (11)$$

2.2 CFRP T型接头有限元建模

采用 ABAQUS 建立 CFRP T 型接头的有限元

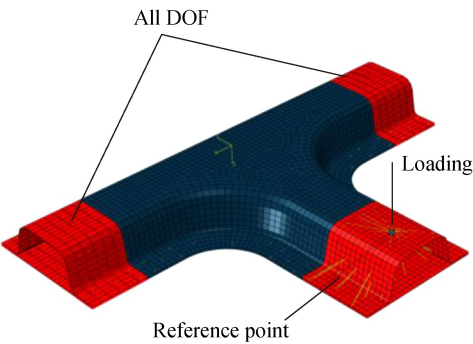


图 8 CFRP T 型接头有限元模型

Fig. 8 Finite element model of CFRP T-joint

模型如图 8 所示。材料属性见表 1, 单元类型采用 S4R 壳单元, 铺层方式采用单层板正交叠合近似代替编织结构, 单层板厚度为 0.14 mm, 铺层数目 14 层。由于试验过程中胶层不会发生失效, 因此采用 Tie 单元来模拟胶结连接来提高运算速度。下边梁两端采用全约束固定, B 柱自由端受到垂直向下的载荷。选用 Hashin 准则来模拟接头的失效过程^[22-23]。

3 试验结果与分析

3.1 CFRP T 型接头面外弯曲失效形式

图 9 为面外弯曲载荷作用下 CFRP T 型接头的力-位移曲线。曲线大致可以分为两个阶段: 弹性阶段和失效阶段。在弹性阶段, 弯曲变形的载荷随位移呈线性增长, 并在位移为 21 mm 处载荷到达最大峰值 2 047 N, 此时在接头上表面根部发生拉伸失效, 如图 9 点 A 和图 10(a) 所示。随后峰值力迅速下降至 1 870 N, 接头的下边梁圆角处开始发生剪切失效。在位移为 46 mm 处接头下表面发生压

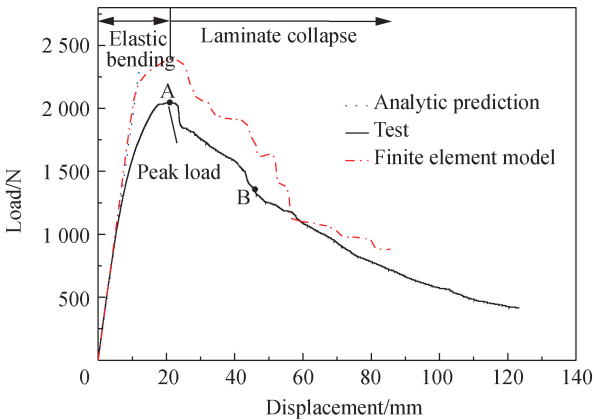


图 9 CFRP T 型接头弯曲载荷作用下力-位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of load-displacement curves in CFRP T-joint bending test measured in the experiments and predicted by the analytic and finite element modeling

溃失效, 弯曲载荷下降至 1 328 N, 上表面中心三角区域发生大面积拉伸和剪切失效, 如图 9 点 B 和图 10(b)、10(c) 所示。层合板的失效形式包括纤维的断裂、缠绕、树脂的压碎及纤维和树脂的分层等。

3.2 CFRP T 型接头解析、有限元模型和试验结果

解析模型、有限元模型与试验结果对比如图 9、图 10 所示。面外弯曲试验中, 解析模型、有限元模型及试验结果在弹性阶段刚度分别为 192 N/mm、201 N/mm 和 202 N/mm。解析模型、有限元模型与试验结果的刚度误差分别为 4.7% 和 0.5%, 有限元模型与试验结果的峰值力误差为 16.7%。从图 9 可以看出, 试验过程中失效位移发生在 20.6 mm 处, 有限元分析失效位移为 21.2 mm 处, 误差为

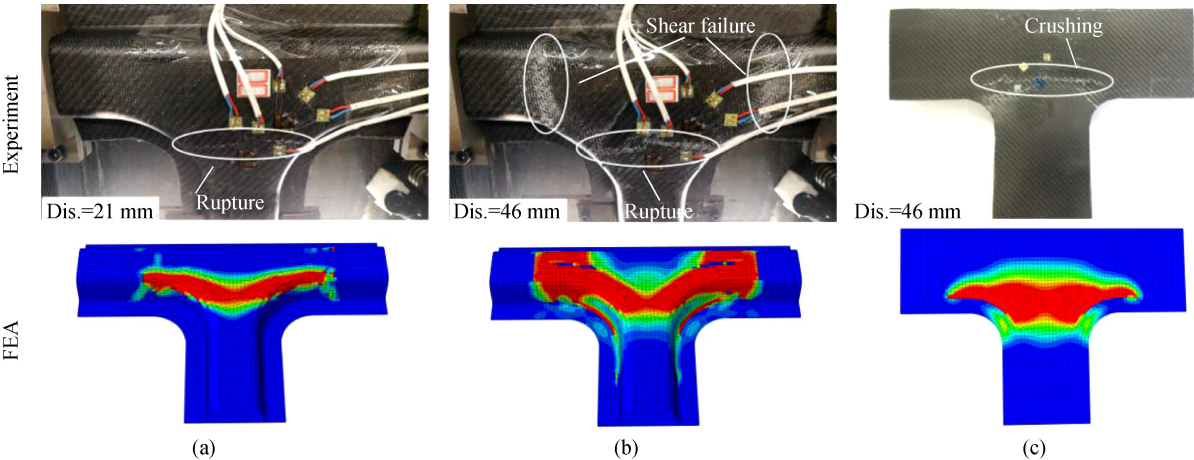


图 10 CFRP T 型接头弯曲试验与有限元结果对比

Fig. 10 Comparison of experimentally observed failure modes and failure predicted by finite element analysis in CFRP T-joint bending test

2.9%。此外，有限元曲线与试验曲线在失效趋势上也十分接近。

图 10 为 CFRP T 型接头基于 Hashin 准则的有限元分析与弯曲试验过程中失效模式的对比。在接头的上表面，纤维在接头处发生的拉伸失效、基体在下边梁上发生的剪切失效与有限元分析结果具有良好的一致性。在接头下表面，纤维产生的压溃失效也与有限元结果相吻合。

在弯扭载荷作用下，解析模型、有限元模型和试验在弹性阶段的刚度分别为 135 N/mm、131 N/mm 和 145 N/mm。解析模型、有限元模型对试验结果得到的弯扭耦合刚度进行很好的预测，理论分析及有限元仿真的弯扭耦合刚度变化趋势与试验结果具有良好的一致性，误差分别为 6.9% 和 9.6%，对比结果如图 11 所示。

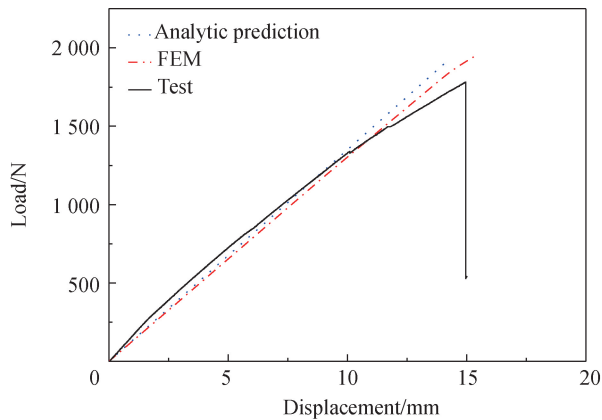


图 11 CFRP T 型接头弯扭载荷作用下解析模型、有限元模型和试验得到的力-位移曲线对比
Fig. 11 Comparison of load-displacement curves in CFRP T-joint bending-torsion test measured in the experiments and predicted by the analytic and finite element modeling

3.3 CFRP T 型接头的应变

CFRP T 型接头弯曲载荷作用下的应变-位移曲线如图 12(a)所示，其中接头上表面 3 号应变片的 8、9 方向显示为正值，受到拉伸力，而由于 2 号应变片的 6 方向测量点在破坏区域附近，使数据波动较大且产生一定误差。相应地 2 号应变片 4 方向受到压缩力表现为负值。在下表面 4 号应变片 10 方向在弯曲过程中受到压缩力，12 方向受到拉伸力。图 13(a)为 2 号应变片 4 方向有限元仿真与试验结果对比。可以看出，在位移小于 5 mm 曲线呈线性变化且二者吻合较好，后面逐渐发生失效且曲线成非线性变化。

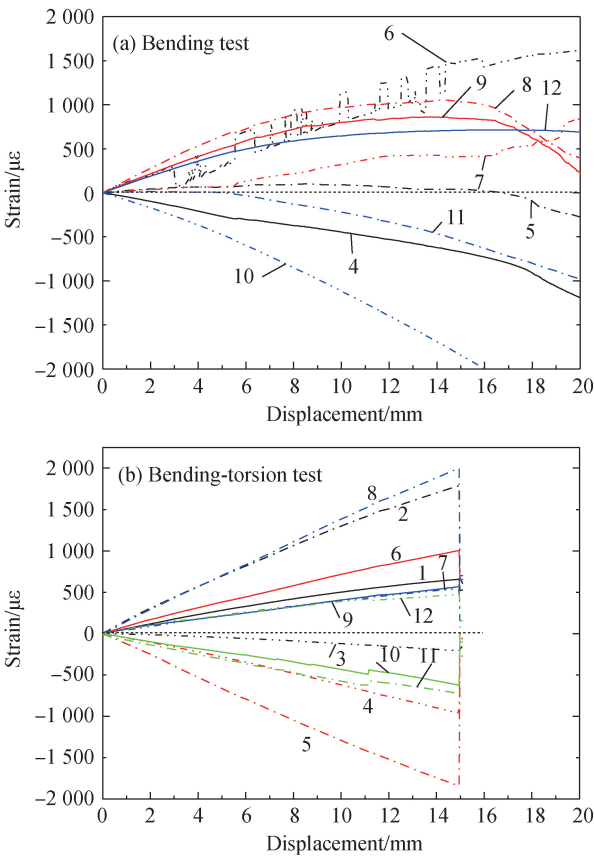


图 12 CFRP T 型接头各测量点应变曲线
Fig. 12 Variations of strains in CFRP T-joint

在弯扭载荷作用下应变-位移曲线如图 12(b)所示，应变片 1 的 2 方向和应变片 3 的 8 方向显示出较大的正值，表示在弯扭加载过程中 45°方向受到较大的拉伸力。应变片 2 的 5 方向则显示较大的负值，表示受到压缩力。图 13(b)为 2 号应变片 6 方向有限元仿真与试验结果对比。可以看出曲线呈线性变化且二者吻合较好。

4 结 论

本文通过选取白车身 B 柱下接头并对其简化成单帽型碳纤维增强聚合物(CFRP)复合材料 T 型接头，采用热塑性 CFRP 斜纹编织布制作样件，并对其进行面外弯曲和弯扭耦合试验。通过解析模型、有限元分析和试验手段三个方法对接头的力学性能进行研究。

(1) 面外弯曲载荷作用下的力-位移曲线分为弹性阶段和失效阶段，失效形式包括拉伸失效、剪切失效和压溃失效。表现为纤维的断裂、缠绕、树脂的压碎及纤维和树脂的分层等。

(2) 在面外弯曲载荷作用下，CFRP T 型接头

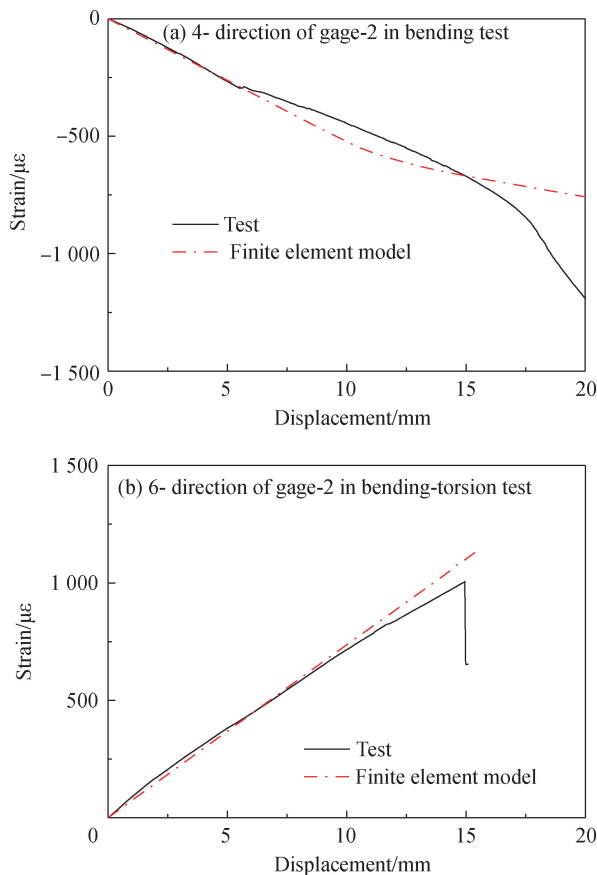


图 13 CFRP T 型接头仿真与试验应变-位移结果对比
Fig. 13 Comparison of strain-displacement curves
in CFRP T-joint

的解析模型、有限元分析和试验得到的弯曲刚度分别为 192 N/mm、201 N/mm 和 202 N/mm。解析模型与有限元分析对试验结果刚度预测误差分别为 4.7% 和 0.5%。T 型接头失效的峰值力方面, 有限元分析结果为 2 388 N, 试验结果为 2 047 N, 误差 16.7%。

(3) 在弯扭载荷作用下, CPRP T 型接头的解析模型、有限元分析和试验结果的弯扭耦合刚度分别为 135 N/mm、131 N/mm 和 145 N/mm。解析模型和有限元分析结果相对试验结果的误差分别为 6.9% 和 9.6%。解析模型和有限元分析都能够准确地预测试验结果刚度。

(4) 通过测量 CPRP T 型接头的面外弯曲载荷和弯扭载荷作用下样件表面的应变情况, 绘制应变-位移曲线, 并通过有限元分析进行预测, 结果表明有限元分析与试验结果曲线吻合较好。

通过建立有效的解析模型和有限元模型来对车身接头的力学性能进行评估与预测, 能够节省设计

时间, 降低成本。

参考文献:

[1] MUTUA J, KIHU J M, RADING G O, et al. Use of magnesium alloys in optimizing the weight of automobile: Current trends and opportunities[J]. Sustainable Research and Innovation Proceedings, 2011, 3.

[2] LIU Q, LINA Y, ZONGA Z, et al. Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle[J]. Composite Structures, 2013, 97: 231-238.

[3] NING H, PILLAY S, VAIDYA U K. Design and development of thermoplastic composite roof door for mass transit bus[J]. Materials Design, 2009, 30: 983-991.

[4] THATTAPARTHASARTHY K B, PILLAY S, NING H, et al. Process simulation, design and manufacturing of a long fiber thermoplastic composite for mass transit application[J]. Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 2008, 39: 1512-1521.

[5] JANOWSKI G M, VAIDYA U K, HUSMAN G. Thermoplastic sandwich structure design and manufacturing for the body panel of mass transit vehicle[J]. Composite Structures, 2007, 80: 82-91.

[6] NING H, VAIDYA U K, JANOWSKI G M, et al. Design, manufacture and analysis of a thermoplastic composite frame structure for mass transit[J]. Composite Structures, 2007, 80: 105-116.

[7] BARTUS S D, VAIDYA U K, ULVEN C A. Design and development of a long fiber thermoplastic bus seat[J]. Journal of Thermoplast Composite Materials, 2006, 19: 131-154.

[8] GLISZCZYNSKI A, KUBIAK T. Load-carrying capacity of thin-walled composite beams subjected to pure bending[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 115: 76-85.

[9] CZECHOWSKI L, GLISZCZYNSKI A, BIENIAS J, et al. Failure of GFRP channel section beams subjected to bending-numerical and experimental investigations[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 111: 112-123.

[10] BELINGARDI G, BEYENE A T, KORICHO E G. Geometrical optimization of bumper beam profile made of pultruded composite by numerical simulation[J]. Composite Structures, 2013, 102: 217-225.

[11] BELINGARDI G, KORICHO E G. Implementation of composite material car body structural joint and investigation of its characteristics with geometry modifications[C]. 14th European Conference on Composite Materials, Budapest,

2010.

[12] BELINGARDI G, OBRADOVIC J. Influence of geometry modification of vehicle body joints on their structural behaviour [C]. XXII Intl. Automotive Conference, Belgrade, 2009; 1-12.

[13] FAI T C, SAID M R. The effect of diaphragm in continuous sill member on the strength of automotive B-Pillar[J]. Journal Teknology, 2007, 47(A): 35-53.

[14] JONG-KEUN C, YONG R, SEOK H, et al. Study on the beam modelling box channel structure: For the T type joint structure[J]. SAE, 1996; 960554.

[15] HOU W B, XU X Z, WANG H F, et al. Bending behavior of single hat-shaped composite T-joints under out-of-plane loading for lightweight automobile structures[J]. Journal of Reinforced Plastics Composites, 2018, 37(12): 808-823.

[16] 王海丰, 于野, 许现哲, 等. 车身碳纤维接头横向弯曲性能研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(1): 86-90, 111.

WANG H F, YU Y, XU X Z, et al. A study of transverse bending behavior of CFRP T-joint in vehicle-body[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(1): 86-90, 111 (in Chinese).

[17] KORICHO E G, BELINGARDI G. An experimental and finite element study of the transverse bending behaviour of CFRP composite T-Joints in vehicle structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 79: 430-443.

[18] BURNS L, MOURITZ A P, POOK D, et al. Strengthening of composite T-Joints using novel ply design approaches[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 88: 73-84.

[19] ASTM. Standard test method for compressive properties of unidirectional or cross-ply fiber-resin composites; ASTM D3410[S]. Philadelphia; American Society for Testing and Materials, 1987;132-139.

[20] ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials; ASTM D3039[S]. Philadelphia; American Society for Testing and Materials, 1995; 99-109.

[21] ASTM. Standard test method for compressive properties of unidirectional or cross-ply fiber-resin composites; ASTM D3518[S]. Philadelphia; American Society for Testing and Materials, 1987.

[22] HASHIN Z, ROTEM A. A fatigue failure criterion for fibre reinforced materials [J]. Journal of Composite Materials, 1973, 7: 448-464.

[23] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47: 329-334.