

编织碳纤维复合材料加强铝合金帽型薄壁梁动态弯曲特性研究*

STUDY ON DYNAMIC BENDING CHARACTERISTICS OF WOVEN CARBON FIBER COMPOSITE MATERIAL REINFORCED ALUMINUM ALLOY CAP THIN-WALLED BEAMS

陈光**^{1,2} 杨宇杰¹ 韩铎***^{1,2} 刘烨****³ 景国玺^{1,2}

(1. 河北工业大学机械工程学院, 天津 300401)

(2. 天津市新能源汽车动力传动与安全技术重点实验室, 天津 300401)

(3. 中国北方发动机研究所, 天津 300400)

CHEN Guang^{1,2} YANG YuJie¹ HAN Duo^{1,2} LIU Ye³ JING GuoXi^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(2. Tianjin Key Laboratory of Power Transmission and Safety Technology for New Energy Vehicles, Tianjin 300401, China)

(3. China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China)

摘要 金属/复合材料混合薄壁结构可同时满足汽车车身抗撞性和轻量化的要求。旨在对比研究不同纤维铺层方式铝/碳纤维复合材料(Aluminum/Carbon Fibre Reinforced Plastic, Al/CFRP)混合帽型薄壁梁的动态弯曲特性。通过三点弯曲试验比较分析各试件的弯曲失效行为与耐撞性能,结合试验结果建立有限元模型且验证其准确性,并进一步分析压头尺寸、压头形状和冲击位置对混合梁弯曲性能的影响。结果表明,铺层角度较铺层顺序对试件弯曲性能影响更大,压头尺寸越大、压头形状越相对扁平或冲击位置越远离中间时可获得较好的耐撞特性。研究所用方法与所得结论可为类似抗弯结构耐撞性设计提供参考。

关键词 Al/CFRP 混合梁 动态弯曲 铺层方式 失效行为 耐撞特性

中图分类号 TB332

Abstract The metal/composite hybrid thin-walled structure can meet requirements of both crashworthiness and light-weight of auto body. Intended to compare the dynamic bending characteristic of Al/CFRP (Aluminum/Carbon Fibre Reinforced Plastic) hybrid beams with different fiber layup patterns, the bending failure behavior and crashworthiness of specimens were comparatively analyzed by three-point bending tests, and the finite element model was established in good agreement with experimental results. On this basis, the effects of punch size, punch shape and impact position on the bending performance of the hybrid beam were further analyzed. The results show that layup angle has a greater effect on the bending performance than the layup sequence. The larger the punch size, the flatter the punch shape or the further away from the middle the impact position is, the better the crashworthiness characteristic is. These methods used and these obtained conclusions can provide a reference for the crashworthiness design of similar bending resistant structures.

Key words Al/CFRP hybrid beam; Dynamic bending; Layup pattern; Failure behavior; Crashworthiness

Corresponding author: LIU Ye, E-mail: liuyesjz@126.com

This project supported by the National Key Laboratory of Science and Technology for National Defense (No. 61422120301), and the Hebei Provincial Natural Science Foundation (No. E2020202017).

Manuscript received 20220929, in revised form 20221102.

* 20220929 收到初稿, 20221102 收到修改稿。国防科技重点实验室基金项目(61422120301), 河北省自然科学基金项目(E2020202017)资助。

** 陈光, 女, 1987年生, 河北邯郸人, 汉族, 河北工业大学讲师, 主要研究方向为汽车安全性与轻量化。

*** 韩铎, 男, 1999年生, 辽宁铁岭人, 汉族, 河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为汽车安全性与轻量化。

**** 刘烨(通信作者), 女, 1982年生, 河北石家庄人, 汉族, 中国北方发动机研究所研究员, 主要研究方向为动力系统可靠性。

0 引言

作为汽车车身安全薄壁构件典型的结构形式,帽型截面梁广泛应用于保险杠、前纵梁后端、地板纵梁前端以及 B 柱等部位^[1-2],薄壁结构的弯曲失效特性决定了其在该类构件中应用的可行性。为了提高在弯曲载荷下的变形和吸能能力,复合材料与金属混合结构引起了研究人员的极大关注^[3]。

在动态载荷工况下,应变率效应和惯性效应可能会导致混合梁弯曲响应更加复杂。HUANG Z X 等^[4-6]对比研究单孔/多孔铝合金/碳纤维复合材料 (Aluminum/Carbon Fibre Reinforced Plastic, Al/CFRP) 混合方管在静动两种条件下的弯曲变形机制,结果表明,加载条件与 CFRP 布置共同影响结构的破坏模式和吸能特性,当破坏模式相同时,两种载荷工况表现出相似趋势。PAN Z X 等^[7]对比了 Al/CFRP 混合圆管在不同纤维铺层角度下的动态弯曲损伤扩展机制,结果表明,大角度编织混合管的损伤可从冲击侧扩展到非冲击侧,小角度编织混合管损伤扩展则受到抑制。XIAO Y 等^[8-9]研究了纤维铺层方式等因素对编织 CFRP 方管填充蜂窝铝动态抗弯性能的影响,结果表明,大角度纤维铺层易发生拉伸破坏,小角度纤维铺层易发生剪切破坏,且外层大角度、内层小角度纤维铺层方式的耐撞性较好。ZHOU G W 等^[10-11]研究了 CFRP 帽型梁的动态弯曲性能,发现随着冲击速率的增加,纤维损伤失效程度越发严重,但铺层角度对弯曲时效行为影响较小。WU Q J 等^[12]研究发现了动态工况下纤维铺层角度对钢/玻璃纤维复合材料 (Steel/Glass Fibre Reinforced Plastic, Steel/GFRP) 混合圆管的弯曲变形过程和破坏模式有明显影响。

由此可见,结构截面形状、纤维铺层方式等是影响混合梁动态弯曲特性的关键因素。但除几何因素外,

实际汽车碰撞过程中构件任何位置都可能会受到各类形状尺寸结构的撞击,压头尺寸与形状、冲击位置等载荷因素对结构动态弯曲变形机制和吸能特性同样会产生至关重要的影响^[13-15]。

尽管前人进行了上述研究,但研究对象大多针对复合材料外部包裹金属结构,而复合材料内部加强金属构件在车身中也有所应用,对于平纹编织 CFRP 内部加强铝合金混合帽型截面形状结构,很少有学者对比分析其不同 CFRP 铺层方式下的动态弯曲特性,且载荷因素对动态弯曲响应的影响机制尚不清楚。因此,本文在已有研究基础上,以平纹编织 CFRP 内加强铝合金帽型混合管为研究对象,通过动态三点弯曲试验比较分析了不同纤维铺层方式试件的弯曲失效行为与耐撞特性,然后结合试验结果基于 Ls-Dyna 软件搭建有限元模型且验证其准确性,并在此基础上进一步探讨压头尺寸、压头形状和受压位置等载荷因素对仿真结果的影响。

1 样件制备与试验设置

1.1 试件制备

Al/CFRP 混合薄壁梁外部采用深圳诚品金属科技有限公司长度为 410 mm、外宽 120 mm、壁厚 1 mm 的 6063T5 型铝合金帽型梁,内部加强的 CFRP 预浸料由山东双一科技股份有限公司 T300-3K 型平纹编织丝束与热固性环氧树脂制成,单层厚度为 0.17 mm,树脂含量体积占比约为 32%。两者之间通过额外的环氧树脂黏结,为保证黏结紧密,预先采用粗砂纸对帽型铝合金内表面进行粗化打磨,再用丙酮进行清洗。混合梁通过热压罐工艺成型并切割成长度为 410 mm,将其与铝合金底板通过铆钉进行连接,样件实物如图 1 所示。CFRP 共铺设 3 层,共设计 $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$ $[45^\circ/0^\circ/0^\circ]$ $[0^\circ/45^\circ/0^\circ]$ $[0^\circ/0^\circ/45^\circ]$ 四种铺层方式,具体几何参数如表 1 所示。

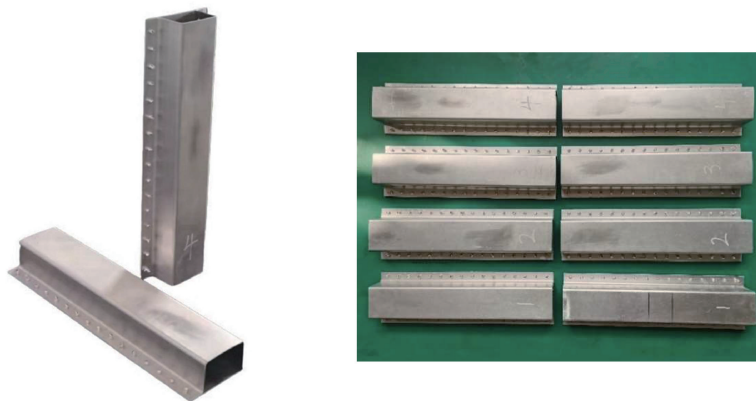


图 1 Al/CFRP 混合帽型梁样件实物图

Fig. 1 Physical picture of Al/CFRP hybrid cap beam samples

表 1 试件具体几何参数

Tab. 1 Specific geometric parameters of specimens

编号 Number	铺层方式 Layup pattern	结构尺寸 Structure size/mm	质量 Mass m/g
MX-DT-1	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$	410×120×48×1.51	436.0
MX-DT-2	$[45^\circ/0^\circ/0^\circ]$	410×120×48×1.51	441.3
MX-DT-3	$[0^\circ/45^\circ/0^\circ]$	410×120×48×1.51	438.6
MX-DT-4	$[0^\circ/0^\circ/45^\circ]$	410×120×48×1.51	435.4

1.2 动态三点弯曲试验

结构动态弯曲特性的研究相比于准静态更贴近于汽车实际碰撞过程,且在动态工况下,压头尺寸与形状以及受压位置等因素对混合构件的影响更加显著。采用吉林冠腾自动化技术有限公司生产的 JLY-7000 型微机控制示波式落锤冲击试验机,整体如图 2(a)所示。局部试验装置由压头与两个支撑柱组成,其中压头直径为 24 mm、长度为 150 mm;支撑柱直径

为 27 mm、长度为 150 mm;支撑高度为 100 mm;试验跨距为 260 mm,如图 2(b)所示。将压头正对混合梁中间位置,质量为 146 kg 的落锤在试件上方 120 mm 处自由落体,接触试件前落锤加载速率约为 1.53 m/s,加载位移为 40 mm。此外,在动态试验开始前,需在试件与支撑柱之间放置两个铝合金垫片用以抵消铆钉头的接触影响。

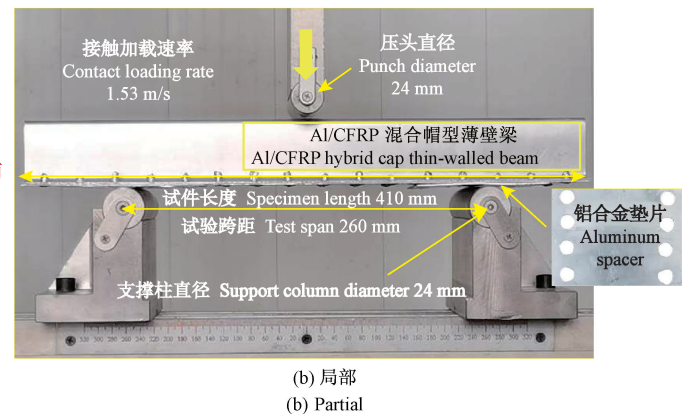


图 2 动态三点弯曲试验装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of the dynamic three-point bending test device

2 试验结果与分析

图 3 所示为各 Al/CFRP 混合帽型梁试件宏观弯曲损伤失效形式对比,两端均无明显变形,中心区域有塑性铰产生,CFRP 部件的突变失效通过铝合金的塑性变形引导为渐进破坏。MX-DT-1 号混合梁铝合金部件未发生断裂,CFRP 铺层角度均为 0° ,纤维主要受轴向拉伸应力作用;具有 45° 铺层混合梁则表现出铝合金断裂,CFRP 具有 45° 铺层,纤维受部分剪切应力作用。由于编织 CFRP 拉伸断裂相对剪切断裂更易发生^[16],导致 $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$ 铺层纤维损伤相对严重,具有 45° 铺层混合梁铝合金部分在内部 CFRP 与压头的共同挤压作用下最终断裂失效。

图 4 所示为各混合梁试件动态工况下的载荷-位移曲线与能量-位移曲线。其中,具有 45° 铺层混合梁表现出相似的载荷-位移曲线趋势,且相较于 MX-DT-1 号混合梁之间有很大差异,主要体现在两个方面:一方

面峰值载荷较高,这是由于 45° 纤维失效后的桥接作用;另一方面峰值载荷过后,载荷下降较快,这是由于压头正下方外部铝合金发生断裂,不能充分限制载荷的下降。综上可知,铺层角度较铺层顺序对试件弯曲失效行为影响更大。

本文选用载荷峰值($F_{\max}$)、平均载荷(F_{mean})、总吸能(E)、载荷效率(C_E)以及比吸能(S_E)等关键参数来评价各试件的耐撞性能^[17-19]。其中, C_E 为 F_{mean} 与 $F_{\max}$ 的比值, S_E 为结构单位质量的吸能量。通常对于车身碰撞弯曲变形部件,当上述参数尤其 S_E 较高时,可最大程度地吸收汽车碰撞过程中的能量,但 $F_{\max}$ 不宜过大。

为了比较分析各试件的耐撞性能,表 2 对各项耐撞性参数进行量化。对于两类不同破坏模式的 Al/CFRP 混合梁, $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$ 铺层耐撞性能表现更优。相比于具有 45° 铺层的试件,除 $F_{\max}$ 外, S_E 等参数

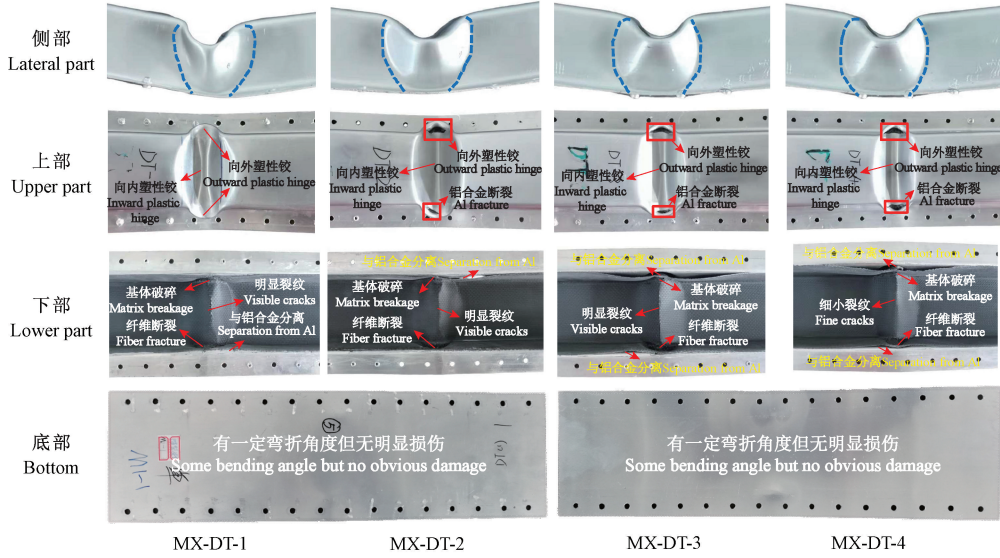


图 3 试件最终弯曲损伤失效形式对比

Fig. 3 Comparison of ultimate bending damage failure forms of specimens

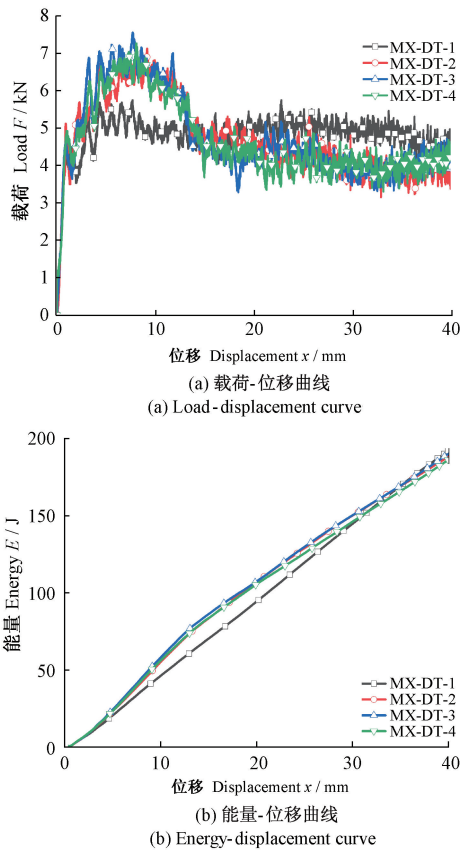


图 4 Al/CFRP 混合帽型梁三点弯曲试验曲线结果

Fig. 4 Three-point bending curve results of Al/CFRP hybrid cap beams obtained from the test

均有一定程度的增加。其中, C_E 最为明显, 提高了 26%~33%, 这是由于 F_{mean} 的增加率远远高于 F_{max} 的增加率。

3 Al/CFRP 混合帽型梁有限元分析

3.1 有限元模型

采用 Ls-Dyna 软件进行有限元模拟, 仿真模型如图 5 所示, 模型各部分尺寸以及 CFRP 铺层方式均与试件保持一致, 上部铝合金帽与下部铝合金底板之间通过设置焊点来代替铆钉。CFRP 和铝合金部分均采用单层全积分壳单元, 压头与支撑柱采用 Belytschko-Tsay 壳单元。网格大小均为 2 mm×2 mm, 共 55 392 个网格。

选用 MAT_54 材料模型对 CFRP 部分进行仿真模拟, 其作为一种渐进损伤力学本构模型, 具体如式(1)~式(3)所示。对应失效准则为 Chang-Chang 失效准则, 可预测 4 种失效模式, 如式(4)~式(7)所示。铝合金部分材料模型选择 MAT_24 材料模型, 压头与支撑柱通过 MAT_20 材料模型设置为刚体。

$$\varepsilon_{aa} = \frac{1}{E_a} (R_{aa} - \nu_{ab} R_{bb}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{bb} = \frac{1}{E_b} (R_{bb} - \nu_{ba} R_{aa}) \quad (2)$$

$$2\varepsilon_{ab} = \frac{1}{G_{ab}} R_{ab} + \alpha R_{ab}^3 \quad (3)$$

纤维拉伸模式:

$$R_{aa} > 0: e_t^2 = \left(\frac{R_{aa}}{X_t} \right)^2 + \beta \left(\frac{R_{ab}}{S_c} \right) - 1 =$$

$$\begin{cases} \geq 0, \text{失效} \\ < 0, \text{未失效} \end{cases}$$

$$E_a = E_b = G_{ab} = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0 \quad (4)$$

表 2 Al/CFRP 混合帽型梁各项耐撞性评价参数

Tab. 2 Each crashworthiness evaluation parameter of Al/CFRP hybrid cap beams

试件类型 Specimen type	载荷峰值 Peak load $F_{\max}/\text{kN}$	平均载荷 Average load $F_{\text{mean}}/\text{kN}$	载荷效率 Load efficiency $C_E/\%$	总吸能 Total energy absorption E/J	比吸能 Specific energy absorption $S_E/(\text{J/g})$
MX-DT-1	5.75	4.80	83.48	192.13	0.441
MX-DT-2	7.12	4.70	66.01	188.13	0.426
MX-DT-3	7.56	4.75	62.83	190.15	0.434
MX-DT-4	7.27	4.66	64.10	186.34	0.428

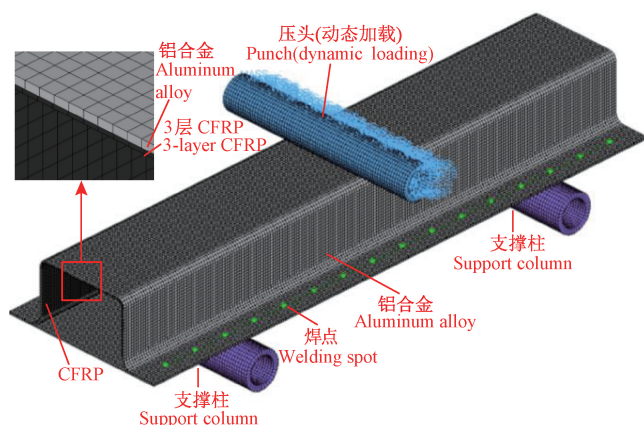


图 5 Al/CFRP 混合帽型梁动态三点弯曲有限元仿真模型

Fig. 5 Dynamic three-point bending finite element model of Al/CFRP hybrid cap beam

纤维压缩模式:

$$R_{aa} < 0: e_c^2 = \left(\frac{R_{aa}}{X_c}\right)^2 - 1 = \begin{cases} \geq 0, \text{失效} \\ < 0, \text{未失效} \end{cases}$$

$$E_a = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0 \quad (5)$$

基体拉伸模式:

$$R_{bb} > 0: e_m^2 = \left(\frac{R_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{R_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 = \begin{cases} \geq 0, \text{失效} \\ < 0, \text{未失效} \end{cases}$$

$$E_b = \nu_{ba} = 0 \Rightarrow G_{ab} = 0 \quad (6)$$

基体压缩模式:

$$R_{bb} < 0: e_d^2 = \left(\frac{R_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{R_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{R_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 = \begin{cases} \geq 0, \text{失效} \\ < 0, \text{未失效} \end{cases}$$

$$E_b = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0 \Rightarrow G_{ab} = 0 \quad (7)$$

式中, a 与 b 分别为纤维纵向与横向; R_{aa} 与 R_{bb} 为各方向上的应力; R_{ab} 为面内切应力; ε_{aa} 与 ε_{bb} 为各方向上的应变; ε_{ab} 为面内切应变; ν_{ab} 与 ν_{ba} 分别为主次泊松比; E_a 与 E_b 为各方向上的弹性模量; G_{ab} 为面内剪切模量; e_f 、 e_c 、 e_m 、 e_d 分别为各失效模式的判据; X_t 与 X_c 分别为纤维纵向的拉伸强度和压缩强度; Y_t 与 Y_c 分别为纤维横向的拉伸强度和压缩强度; S_c 为各面内剪切强度; α 为剪切应力非线性影响因子; β 为剪切应力在纤维拉伸损伤过程中的影响系数。

部分试验加载开始前与结束后实物如图 6 所示。本构关系通过单轴拉伸试验获得, 如图 7 所示。CFRP 力学性能参数根据 ASTM D3039、ASTM D3518、ASTM D3410 试验标准通过对 0° 与 45° 同样型号 CFRP 层合板进行拉伸与压缩试验获得, 具体如表 3 所示。CFRP 非物理参数主要通过试验进行对标调整确定, 主要包括 T_{FAIL} 、 A_{LPH} 、 S_{OFT} 、 F_{BRT} 、 Y_{CFAC} 、 D_{FAILT} 、 D_{FAILC} 、 E_{FS} 以及 B_{ETA} 等, 具体含义与取值如表 4 所示。铝合金力学性能材料参数由采购公司提供, 如表 5 所示。

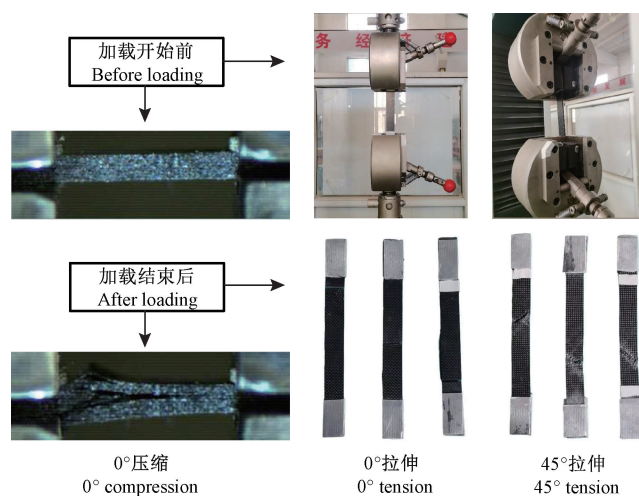


图 6 CFRP 层合板试件拉伸与压缩试验

Fig. 6 Tension and compression tests of CFRP laminate specimens

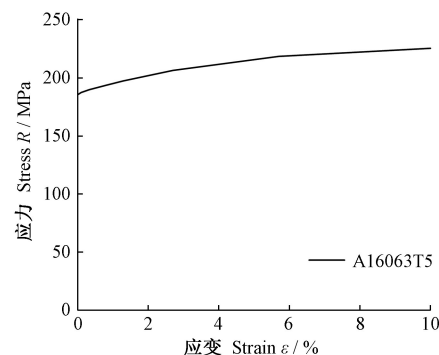


图 7 Al6063T5 本构关系

Fig. 7 Constitutive relation of Al6063T5

表 3 CFRP 力学性能参数
Tab.3 Mechanical properties of CFRP

密度 Density $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	纵向弹性模量 Longitudinal modulus of elasticity E_a/GPa	横向弹性模量 Transverse modulus of elasticity E_b/GPa	泊松比 Poisson's ratio ν
1.76	75.00	75.00	0.28
AB 面剪切模量 Shear modulus of AB surface G_{AB}/GPa	BC 面剪切模量 Shear modulus of BC surface G_{BC}/GPa	CA 面剪切模量 Shear modulus of CA surface G_{CA}/GPa	轴向压缩强度 Axial compression strength X_c/MPa
9.00	9.00	9.00	496.00
轴向拉伸强度 Axial tensile strength X_t/MPa	径向压缩强度 Radial compression strength Y_c/MPa	径向拉伸强度 Radial tensile strength Y_t/MPa	面内剪切强度 In-plane shear strength S_c/MPa
732.00	496.00	732.00	300.00

表 4 CFRP 非力学性能参数
Tab.4 Non-mechanical properties of CFRP

单元删除时间步长标准 Time step size for element deletion T_{FAIL}	非线性项剪切力参数 Shear stress parameter for the nonlinear term A_{LPH}	碰撞前端软化折减系数 Softening reduction factor for material strength in crashfront elements S_{OFT}
0.35	0.50	0.10
基体压缩破坏后纤维方向 拉伸强度退化系数 Reduction factor for tensile fiber strength after matrix compressive failure F_{BRT}	基体压缩破坏后纤维方向 压缩强度退化系数 Reduction factor for compressive fiber strength after matrix compressive failure Y_{CFAC}	纤维方向最大拉伸应变 Maximum strain for fiber tension D_{FLIAT}
0.35	3.00	0.05
纤维方向最大压缩应变 Maximum strain for fiber compression D_{FAILC}	有效破坏应变 Effective failure strain E_{FS}	拉伸纤维模式中剪切项加权系数 Weighting factor for shear term in tensile fiber mode B_{ETA}
-0.09	0.90	0.60

表 5 Al6063T5 力学性能参数
Tab.5 Mechanical properties of Al6063T5

密度 Density $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	弹性模量 Elastic modulus E_m/GPa	泊松比 Poisson's ratio ν
2.70	69.00	0.33

约束支撑柱所有自由度,压头仅有 Z 方向平移自由度。通过对节点赋予质量模拟落锤的质量,初始接触速度与重力场加速度分别设置为 1.53 m/s 和 9.81 m/s^2 。

表 6 CFRP 和铝合金层间连接参数

Tab.6 Parameters of aluminum alloy and CFRP interlayer connection

关键字选项 Keyword option O_{PT}	界面拉应力 Interfacial tensile stress $N_{\text{FLS}}/\text{MPa}$	界面剪切应力 Interfacial shear stress $S_{\text{FLS}}/\text{MPa}$	界面极限分离距离 Interface limit separation distance $C_{\text{CRIT}}/\text{mm}$
8	50	70	0.005

3.2 有限元结果分析

图 8 比较了 MX-DT-1 号混合帽型梁三点弯曲试验与有限元分析的结果。混合梁的主要失效行为与试验结果基本吻合,在有限元分析结果中,CFRP 受到挤压作

铝合金与 CFRP 之间的层间连接作用通过接触连接方式模拟,关键字卡片为 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK。其中的关键参数 N_{FLS} 与 S_{FLS} 分别为界面失效拉应力与剪切应力,两参数无法仅通过层间断裂试验直接测得,还需根据试验与仿真的一致性进行标定^[20],本文对已有同类层间连接参数采用试错法获得其最佳取值^[21-22],具体如表 6 所示。

用发生大面积的单元失效,大多集中在变形部位的上部。铝合金帽和铝合金底板向下弯曲变形,左右两壁均有塑性绞线产生,压头直接接触的部位出现明显的应力集中,但无明显铝合金断裂,与试验失效形态一致。

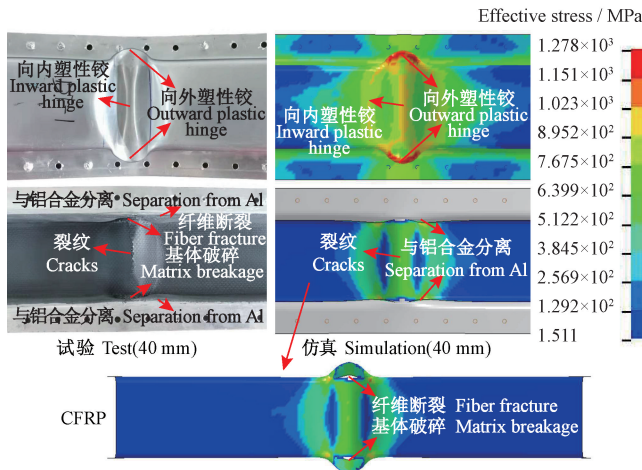


图 8 MX-DT-1 号混合帽型梁试验与仿真最终失效形式

Fig. 8 Test and simulation final failure forms of MX-DT-1 hybrid cap beam

有限元分析和试验的载荷-位移和能量-位移曲线对比如图 9 所示,其中曲线呈现出相似的趋势。表 7 对试验与有限元分析的各耐撞性评价参数进行量化比较,两者之间参数误差均不超过 6%。该有限元模型可用于载荷参数对 Al/CFRP 混合管弯曲特性的影响分析。

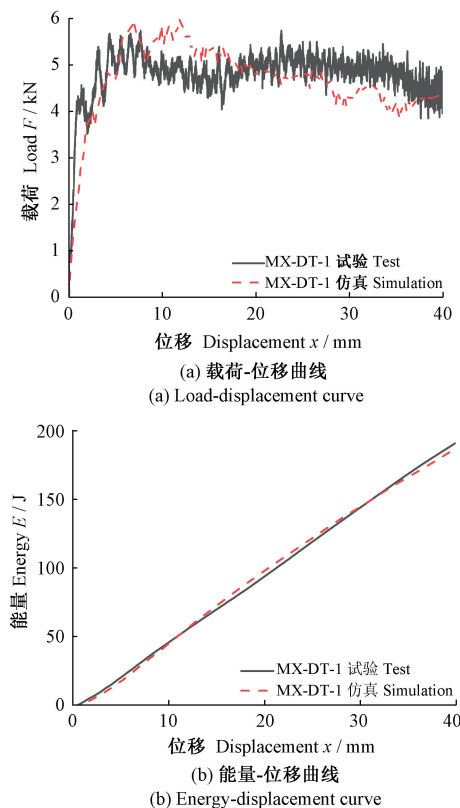


图 9 MX-DT-1 混合帽型梁试验与仿真曲线

Fig. 9 Test and simulation curves of MX-DT-1 hybrid cap beam

表 7 试验与仿真各耐撞性评价参数

Tab. 7 Each crashworthiness parameter of test and simulation

评价参数 Evaluation parameter	试验结果 Test result	仿真结果 Simulation result	评价参数 Evaluation parameter	误差 Error/%
$F_{\max}/\text{kN}$	5.75	5.98	$F_{\max}$	4.00
$F_{\text{mean}}/\text{kN}$	4.80	4.70	F_{mean}	-2.08
$C_E/\%$	83.48	78.60	C_E	-5.85
E/J	192.13	187.91	E	-2.20
$S_E/(J/g)$	0.441	0.431	S_E	-2.27

4 载荷参数分析

为进一步探讨 Al/CFRP 混合帽型薄壁梁的动态抗弯性能,本节分析了载荷参数对 $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$ 铺层试件弯曲响应的影响,主要包括压头尺寸、压头形状以及冲击位置。当探讨其中某个参数的影响时,其余因素均保持不变。

4.1 压头尺寸

考虑到实际汽车碰撞过程中外界物体与不同级别车型构件之间尺寸比例会有明显差异,分别建立压头直径尺寸为 24、48、96 mm 的有限元模型,得到的载荷-位移曲线如图 10 所示。由图 10 可以看出,随着压头尺寸的增加,曲线后期阶段不断升高,载荷与吸能水平显著提升。图 11 所示为不同压头直径尺寸对应的最终失效形式,均以弯曲压痕的特征变形,且压痕深度随着压头直径的增加而增加,同时铝合金未发生断裂。

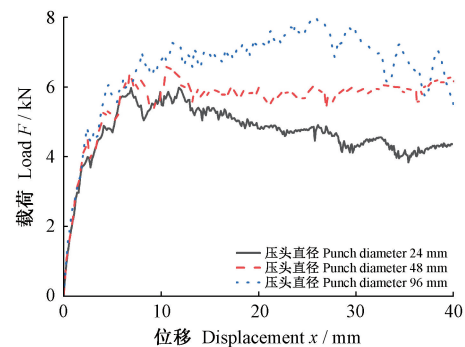


图 10 不同压头尺寸混合帽型梁载荷-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of hybrid cap beams with different punch sizes

不同压头直径尺寸下混合帽型梁各项耐撞性评价参数如表 8 所示。除 C_E 外,其余参数均随着压头直径尺寸增加而明显增加。当压头直径为 48 mm 时, C_E 表现最佳,这是由于平均载荷的增加率明显高于峰值载荷的增加率。

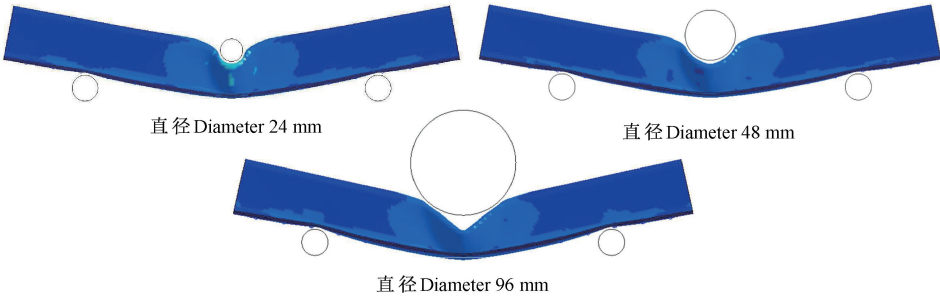


图 11 不同压头尺寸混合帽型梁最终弯曲失效形式

Fig. 11 Ultimate bending failure forms of hybrid cap beams with different punch sizes

表 8 不同压头尺寸混合帽型梁各项耐撞性评价参数

Tab. 8 Each crashworthiness parameter of hybrid cap beams with different punch sizes

压头直径 Punch diameter d/mm	$F_{\max}/\text{kN}$	$F_{\text{mean}}/\text{kN}$	$C_E/\%$	E/J	$S_E/(\text{J/g})$
24	5.98	4.70	78.60	187.91	0.431
48	6.62	5.63	85.05	225.16	0.516
96	8.02	6.57	81.92	262.73	0.603

4.2 压头形状

汽车实际碰撞过程中薄壁梁可能会受到各类形状结构的冲击,因此压头形状对 Al/CFRP 混合帽型薄壁梁动态弯曲失效机制至关重要。分别探讨了锥形、圆形以及方形压头对混合帽型梁耐撞性能的影响,压头的截面尺寸示意图如图 12 所示,仿真模拟得到的载荷-位移曲线与最终弯曲失效行为分别如图 13 与图 14 所示。总体来看,压头形状越相对扁平,对应曲线整体载荷越大,能量吸收越多。

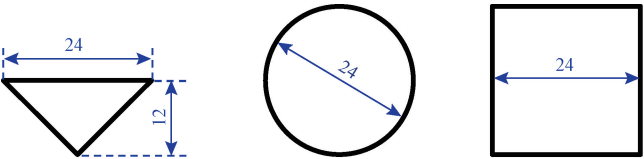


图 12 不同压头结构截面尺寸示意图

Fig. 12 Schematic diagram of structural section size of different punches

不同压头形状作用下混合帽型梁各项耐撞性评价参数如表 9 所示。压头形状越扁平, $F_{\max}$ 、 F_{mean} 、 E 与 S_E

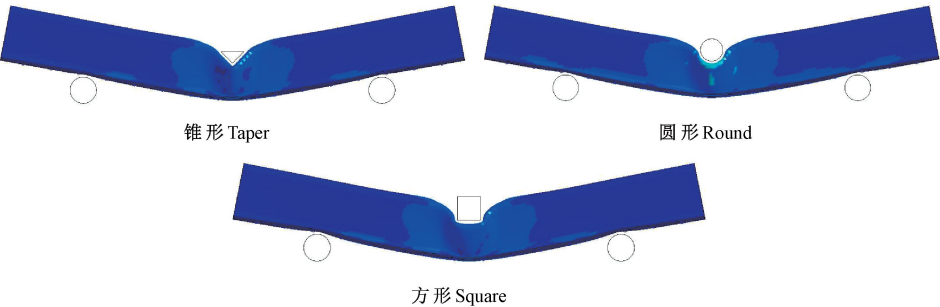


图 14 不同压头形状混合帽型梁最终弯曲失效形式

Fig. 14 Ultimate bending failure forms of hybrid cap beams with different punch shapes

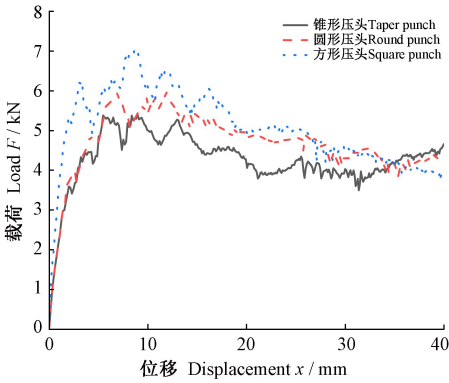


图 13 不同压头形状混合帽型梁载荷-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of hybrid cap beams with different punch shapes

均不断增加,方形压头较锥形压头增加了 18%~31%,然而 C_E 却不断减少,方形压头较锥形压头减少了 8.91%。综合来看,方形压头作用下结构吸能效果最佳。

表 9 不同压头形状混合帽型梁各项耐撞性评价参数

Tab. 9 Each crashworthiness parameter of hybrid cap beams with different punch shapes

压头形状 Punch shape	$F_{\max}/\text{kN}$	$F_{\text{mean}}/\text{kN}$	$C_E/\%$	E/J	$S_E/(\text{J/g})$
锥形 Taper	5.42	4.29	79.15	171.46	0.393
圆形 Round	5.98	4.70	78.60	187.91	0.431
方形 Square	7.06	5.09	72.10	203.59	0.467

4.3 冲击位置

在实际事故碰撞中薄壁梁任何位置都可能受到外

界物体冲击,为进一步探究冲击位置对结构弯曲破坏行为的影响,分别建立压头在中间位置、距中间左侧 40 mm 以及距中间左侧 80 mm 的有限元模型。获得的载荷-位移曲线如图 15 所示。由图 15 可知,前期阶段曲线趋势基本一致,后期阶段冲击位置越远离中间,

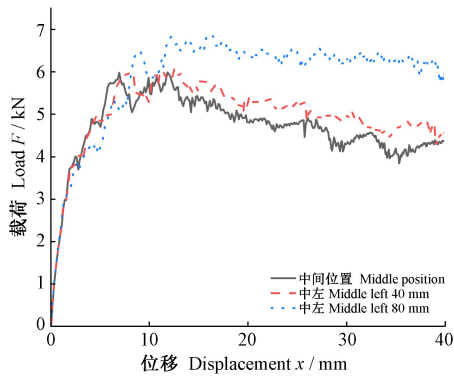


图 15 不同冲击位置混合帽型梁载荷-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curves of hybrid cap beams with different impact positions

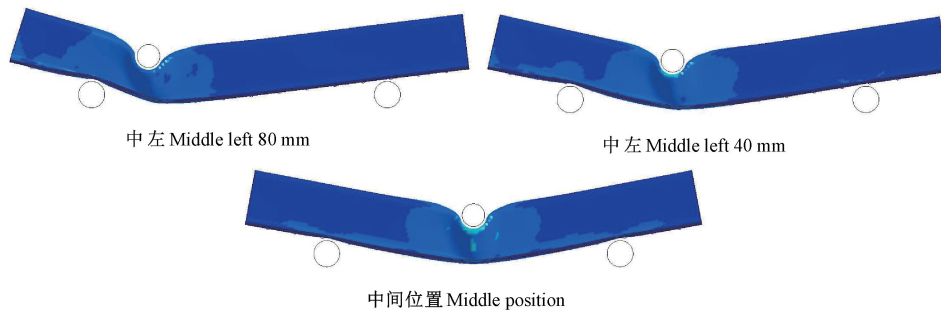


图 16 不同冲击位置混合帽型梁最终弯曲失效形式

Fig. 16 Ultimate bending failure forms of hybrid cap beams with different impact positions

曲线明显偏高,载荷与吸能明显增加。图 16 所示为不同冲击位置对应的最终损伤失效形式,除两侧与支撑柱接触位置失效形式有一定差异外,弯曲压痕模式基本相同。

不同冲击位置条件下混合帽型梁各项耐撞性评价参数如表 10 所示。由表 10 可知,随着冲击位置不断远离中间,各项参数均不断增加,其中 S_E 中间左侧 80 mm 位置较中间位置增量可达约 25.06%。

表 10 不同冲击位置混合帽型梁各项耐撞性评价参数

Tab. 10 Each crashworthiness parameter of hybrid cap beams with different impact positions

受压位置 Impact position	$F_{\max}/\text{kN}$	$F_{\text{mean}}/\text{kN}$	$C_E/\%$	E/J	$S_E/(\text{J/g})$
中间位置 Middle position	5.98	4.70	78.60	187.91	0.431
中左 40 mm Middle left 40 mm	6.06	4.99	82.34	199.77	0.458
中左 80 mm Middle left 80 mm	6.85	5.88	85.84	235.19	0.539

5 结论

本文通过试验与有限元分析相结合的方法研究了动态工况下 Al/CFRP 混合帽型薄壁梁的三点弯曲失效行为与耐撞性能,并进一步分析了载荷参数对弯曲特性的影响。主要研究结论如下:

1) 动态工况下,铺层角度较铺层顺序对 Al/CFRP 混合帽形梁弯曲失效行为影响更大, $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$ 铺层试件与具有 45° 铺层试件之间 CFRP 纤维失效机制有明显差异,导致形成有无铝合金断裂的两种破坏模式。

2) 除峰值载荷外, $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$ 铺层混合梁相比于具有 45° 铺层混合管其余耐撞性评价参数均有一定程度提升;具有 45° 铺层混合管载荷-位移曲线表现出相似趋势,峰值载荷后曲线下落明显。

3) 基于 Ls-Dyna 建立了与试验结果一致性良好的三点弯曲有限元模型,各项参数误差均小于 6%;当压头直径尺寸越大、压头形状越相对扁平或者冲击位置越远离中间时,可以获得较好的耐撞特性。

参考文献 (References)

- [1] 王 振, 朱国华. Al-碳纤维增强聚丙烯混合帽型梁的热模压成形特性及三点弯曲特性[J]. 复合材料学报, 2022, 39(12): 6096-6108.
WANG Zhen, ZHU GuoHua. Hot press molding characteristics and three-point bending characteristics of Al-carbon fiber reinforced polypropylene hybrid hat-shaped rail[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(12): 6096-6108 (In Chinese).
- [2] ASAE Z, MONTESANO J, WORSWICK M. Assessing the failure mechanisms and mechanical performance of Co-moulded hybrid AA5182-O/GFRP hat-channel beams under quasi-static three-point bending [J]. Composite Structures, 2021, 256 (prepublish): 113007.
- [3] HUSSEIN R D, RUAN D, LU G X, et al. An energy dissipating mechanism for crushing square aluminium/CFRP tubes [J]. Composite Structures, 2018, 183: 643-653.
- [4] HUANG Z X, LI Y, ZHANG X, et al. A comparative study on the energy absorption mechanism of aluminum/CFRP hybrid beams under quasi-static and dynamic bending [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 163: 107772.

- [5] HUANG Z X, ZHANG X. Crashworthiness and optimization design of quadruple-cell Aluminum/CFRP hybrid tubes under transverse bending[J]. *Composite Structures*, 2020, 235: 111753.
- [6] HUANG Z X, ZHANG X, YANG C Y. Experimental and numerical studies on the bending collapse of multi-cell aluminum/CFRP hybrid tubes[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 181: 107527.
- [7] PAN Z X, QIAO F, WANG M L, et al. A novel damage mechanism analysis of integrally braided CFRP and CFRP/aluminum hybrid composite tube subjected to transverse impact [J]. *Materials & Design*, 2021, 206: 109815.
- [8] XIAO Y, HU Y F, ZHANG J G, et al. Dynamic bending responses of CFRP thin-walled square beams filled with aluminum honeycomb [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 132: 494-503.
- [9] XIAO Y, WEN X D, LIANG D. Failure modes and energy absorption mechanism of CFRP thin-walled square beams filled with aluminum honeycomb under dynamic impact [J]. *Composite Structures*, 2021, 271: 114159.
- [10] ZHOU G W, TANG H B, SUN Q P, et al. Analysis of the crushing behaviors of woven carbon fiber reinforced plastic hat section component under dynamic bending and axial crushing loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161: 107426.
- [11] ZHOU G W, SUN Q P, FENNER J, et al. Crushing behaviors of unidirectional carbon fiber reinforced plastic composites under dynamic bending and axial crushing loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 140(C): 103539.
- [12] WU Q J, ZHI X D, LI Q X, et al. Experimental and numerical studies of GFRP-reinforced steel tube under low-velocity transverse impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 127: 135-153.
- [13] OMID N A, HOSSEIN P M, REZAEI G N. Retraction notice to "experimental investigation of parameters affected on behavior of composite tubes under quasi-static and dynamic axial loading" [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 205: 108538.
- [14] HUANG Z X, ZHANG X, FU X R. On the bending force response of thin-walled beams under transverse loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 154: 106807.
- [15] ZHU G H, LIAO J P, SUN G Y, et al. Comparative study on metal/CFRP hybrid structures under static and dynamic loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 141(preublish): 103509.
- [16] ZHU G H, SUN G Y, LI G Y, et al. Modeling for CFRP structures subjected to quasi-static crushing[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 41-55.
- [17] 庄蔚敏, 刘 洋, 刘西洋. 碳纤维增强环氧树脂基复合材料圆管轴向压溃分层失效仿真[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(12): 107-115.
- ZHUANG WeiMin, LIU Yang, LIU XiYang. Simulation on delamination failure of carbon fiber reinforced epoxy resin composite circular tube under axial crushing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(12): 107-115 (In Chinese).
- [18] 孙佳睿, 马其华, 蔡 明, 等. 横向压溃载荷下碳纤维缠绕薄壁钢管的失效分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(9): 5-13.
- SUN JiaRui, MA QiHua, CAI Ming, et al. Failure analysis of carbon fiber winded thin-walled steel tube under transverse crushing load[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2019(9): 5-13 (In Chinese).
- [19] LI S F, GUO X, LI Q, et al. On lateral compression of circular aluminum, CFRP and GFRP tubes [J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111534.
- [20] LIU P F, YANG J, WANG B, et al. A study on the intralaminar damage and interlaminar delamination of carbon fiber composite laminates under three-point bending using acoustic emission [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2015, 15 (1): 101-121.
- [21] 庄蔚敏, 王 楠, 吴 迪, 等. 碳纤维复合材料层合板三点弯曲损伤仿真研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(10): 109-114.
- ZHUANG WeiMin, WANG Nan, WU Di, et al. Simulation and analysis of the damage of carbon fiber composite laminates under three point bending load[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(10): 109-114 (In Chinese).
- [22] GURPINDER S D, GOLAM M N. Experimental and numerical investigation of flexural behavior of hat sectioned aluminum/carbon fiber reinforced mixed material composite beam[J]. *Composites Part B*, 2020, 182: 107642.