

CFRP防撞梁低速碰撞渐进损伤及优化

黄德明 朱孙科 王秋林 孙永刚 郑佳秋

Progressive damage and optimization of CFRP anti-collision beams in low-speed collision

HUANG Deming, ZHU Sunke, WANG Qiulin, SUN Yonggang, ZHENG Jiaqiu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210702.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

灰色关联及熵权法对碳纤维增强树脂复合材料防撞梁的耐撞性优化设计

Optimization design of carbon fiber reinforced polymer anti-collision beam crashworthiness by grey relational analysis with entropy method

复合材料学报. 2020, 37(2): 345–355 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190506.001>

复合材料连续损伤力学模型在螺栓接头渐进失效预测中的应用

Application of continuum damage mechanics model for composites in progressive failure prediction of bolted joints

复合材料学报. 2020, 37(8): 2065–2075 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191030.004>

服役温度对铝合金-碳纤维增强树脂复合材料粘接接头准静态失效的影响

Effect of service temperature on quasi-static failure of aluminum alloy-carbon fiber reinforced polymer composite bonded joints

复合材料学报. 2020, 37(5): 1088–1095 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190708.001>

碳纤维增强树脂复合材料和铝合金温热自冲铆接工艺及接头力学性能

Joining process and mechanical properties of warm self-piercing riveting for carbon fiber reinforced polymer and aluminum alloy

复合材料学报. 2021, 38(11): 3563–3577 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210105.002>

湿热环境对CFRP复合材料-铝合金螺栓连接结构静力失效的影响

Effects of hygrothermal environment on quasi-static failure of CFRP composite-aluminum alloy bolted joints

复合材料学报. 2021, 38(7): 2224–2233 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200927.002>

服役低温老化对铝合金-玄武岩纤维增强树脂复合材料粘接接头力学性能的影响及失效预测

Effect of service low-temperature aging on mechanical properties of aluminum alloy-basalt fiber reinforced polymer composite bonding joints and failure prediction

复合材料学报. 2020, 37(8): 1884–1893 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191014.001>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210702.002

CFRP 防撞梁低速碰撞渐进损伤及优化

黄德明¹, 朱孙科^{*1}, 王秋林², 孙永刚¹, 郑佳秋³

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2. 成都航空职业技术学院, 成都 610100;
3. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 桂林 541010)



分享本文

摘 要: 为预测和控制低速碰撞中碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 防撞梁损伤程度, 建立了含 CFRP 防撞梁的有限元显式动力学碰撞模型, 防撞梁层内采用实体复合材料模拟其力学特性, 采用 Cohesive 单元模拟 CFRP 层间相互作用。发展了基于 Tsai-Wu 张量理论的 VUSDFLD 子程序用于判定碰撞过程中复合材料单元 6 个方向损伤, 失效单元按照突降退化模型进行刚度折减, 利用 Johnson-Cook 本构模型模拟铝合金强化层碰撞损伤, 其失效单元采用线性连续退化模型进行刚度折减。通过 $[\pm 45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ 和 $[\pm 45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ 两种 CFRP 防撞梁铺层结构碰撞结果与含铝合金强化层 CFRP 防撞梁碰撞结果对比可知, 在层内单元数相同的情况下, CFRP 防撞梁增设 4 层复合材料铺层后, 失效单元数量降低明显; 碰撞过程中含铝合金强化层的多材料混合防撞梁结构在质量基本不变的情况下, 失效单元数显著降低。结果表明, 所开发的 VUSDFLD 子程序能够用于复合材料防撞梁的显式动力学碰撞损伤模拟, 基于碰撞损伤的计算结果为 CFRP 防撞梁的结构设计提供参考。

关键词: CFRP; 显式动力学; Tsai-Wu 失效准则; 铝合金材料; 碰撞损伤

中图分类号: TH113.2; TB33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)06-2997-12

Progressive damage and optimization of CFRP anti-collision beams in low-speed collision

HUANG Deming¹, ZHU Sunke^{*1}, WANG Qiulin², SUN Yonggang¹, ZHENG Jiaqiu³

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chengdu Vocational and Technical College of Aviation, Chengdu 610100, China; 3. School of Mechanical and
Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541010, China)

Abstract: In order to predict and control the damage degree of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) anti-collision beams in low speed collision, a finite element explicit dynamic collision model of CFRP anti-collision beams was established. Mechanical properties of CFRP anti-collision beams were simulated by solid composite materials, and the interlayer interaction of CFRP was simulated by cohesive element. A VUSDFLD subroutine based on Tsai-Wu tensor theory was developed to determine the damage of composite elements in six directions during the collision process. The stiffness of the failure elements was reduced according to the sudden degradation model. The Johnson-Cook constitutive model was used to simulate the impact damage of reinforced aluminum alloy layers. The stiffness reduction of the failure element was carried out by linear continuous degradation model. The collision results of two CFRP laminates ($[\pm 45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ and $[\pm 45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$) were compared with the collision results of CFRP anti-collision beam containing aluminum alloy reinforced layer. It can be seen that when the number of elements in the layer is the same, the number of failure elements decreases obviously by adding four layers of composite laminates to CFRP anti-collision beam. The number of failure elements of the multi-material hybrid anti-collision beam structure with reinforced aluminum alloy layer is significantly re-

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-06-22; 录用日期: 2021-06-27; 网络首发时间: 2021-07-02 15:53:55
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210702.002>
基金项目: 重庆市自然科学基金 (cstc2016jcyjA0467; cstc2017jcyjAX0248); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN201800718)
通信作者: 朱孙科, 博士, 副教授, 研究方向为复合材料结构损伤 E-mail: suncobest@163.com
引用格式: 黄德明, 朱孙科, 王秋林, 等. CFRP 防撞梁低速碰撞渐进损伤及优化 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2997-3008.
HUANG Deming, ZHU Sunke, WANG Qiulin, et al. Progressive damage and optimization of CFRP anti-collision beams in low-speed collision[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 2997-3008(in Chinese).

duced under the condition that the mass of the beam is basically unchanged. The results show that the developed VUSDFLD subroutine can be used for the explicit dynamic collision damage simulation of composite anti-collision beams, and the results based on the collision damage simulation can provide a reference for the structural design of CFRP anti-collision beams.

Keywords: CFRP; explicit dynamics; Tsai-Wu failure criterion; aluminum alloy material; impact damage

在日益低碳化的时代背景下,节能和环保的重要性显得尤为突出。复合材料抗热冲击性强、抗腐蚀性强、比强度高、比刚度高和可设计性强的优点,使其在航空、航天和汽车轻量化设计中得到广泛应用。碳纤维复合材料是由金属等基体材料和碳纤维增强材料复合而成。但其脆性特征使在汽车低速碰撞中,肉眼无法直接观察它的损伤情况,而检测设备很难对复合材料结构损伤进行准确的探测和损伤程度评估,更无法对碰撞中防撞梁的实时损伤过程进行监测。采用数值模拟方法能够以低成本、高可靠的方式获得碳纤维复合材料结构的损伤情况,汽车碰撞发生时间极短,是一个高度非线性的瞬态物理大变形过程,有限元显式动力学适用于求解各种结构的碰撞和爆炸等非线性动力学问题。基于 Tsai-Wu 的渐进损伤是用于复合材料损伤数值模拟的有效失效准则,发展 VUSDFLD 子程序是进行碳纤维复合材料显式动力学碰撞损伤研究手段之一。

国内外学者对碳纤维复合材料进行了大量的研究。Wang 等^[1]研究了三维碳纤维复合材料低速冲击下的损伤情况,采用了层内层间损伤模型,进行了实验和模拟结果对比;Caminero 等^[2]、Al-Hajaj 等^[3]和 Papa 等^[4]都采用了低速冲击实验的方法分别研究了不同厚度纯碳纤维复合材料层合板和含碳纤维的混杂复合材料层合板的冲击性能;He 等^[5]研究了含碳纤维的混杂复合材料的弯曲和拉伸压缩性能;Zhou 等^[6]研究了落锤冲头角度、大小和层合板铺层角度、铺层数的改变对动态载荷下碳纤维复合材料层合板损伤的影响;Pushparaja 等^[7]研究了冲击作用下不同破坏模式的碳纤维复合材料层合板吸能情况;Samal 等^[8]采用四点弯曲试验法研究了含碳纤维复合材料等多种材料冲击和弯曲性能;Caminero 等^[9]对不同厚度和铺层下的碳纤维复合材料的冲击强度进行了研究;Salvetti 等^[10]将光纤嵌入碳纤维复合材料中研究冲击作用下能量、最大接触力、损伤面积之间的关系;Fotouhi 等^[11]通过施加拉伸力研究含碳纤维的混杂复合材料层合板的断裂性能。

王莉等^[12]用实验方法研究了低速冲击作用下碳纤维复合材料层合板厚度与抗冲击力之间的关系;任明伟等^[13]通过研究吸能盒厚度、复合材料防撞梁厚度和铺层方式对防撞梁耐撞性的影响,进而引入仿生螺旋铺层设计来提升能量吸收特性;陈静等^[14]通过对碳纤维复合材料防撞梁结构铺层厚度进行多目标优化,使得优化后的防撞梁质量较优化前下降了 46.6%;张超等^[15]通过编写 VUMAT 子程序模拟冰雹高速冲击碳纤维复合材料的瞬态过程来探究材料的损伤特性和失效机理;周俊杰等^[16]使用 Hashin 和 Hou 失效准则来研究碳纤维复合材料在低速冲击下的渐进损伤情况;拓宏亮等^[17]基于连续介质损伤力学方法使用最大应变失效准则和 Puck 准则,研究了碳纤维复合材料在低速冲击下的纤维和基体损伤演化。

本文针对低速碰撞中碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)防撞梁损伤预测和控制问题。建立了含三维实体 CFRP 防撞梁的有限元显式动力学碰撞模型,运用 Cohesive 单元模拟复合材料层间作用力,编写了基于 Tsai-Wu 张量理论的 VUSDFLD 子程序用于判定碰撞过程中复合材料单元损伤情况,采用刚度折减的方式对损伤单元进行材料性能退化处理。在初始 CFRP 防撞梁碰撞模型的计算结果分析基础上,利用复合材料铺层层数变化和嵌入铝合金强化层的方式,来控制 CFRP 防撞梁碰撞损伤情况。研究为复合材料显式动力学碰撞损伤数值模拟提供了新方法,为 CFRP 防撞梁结构设计提供借鉴。

1 材料本构模型

复合材料防撞梁的材料本构关系与其数值模拟结果的准确度有关,在低速碰撞过程中复合材料防撞梁所产生的损伤,主要有层内纤维基体损伤和层间分层损伤两种形式。观测上述两种损伤形式的发生起始位置、破坏先后顺序和损伤演化过程,是对复合材料防撞梁碰撞损伤数值预测和损伤控制的前提条件,渐进损伤分析方法是实现上述过程的有效手段。它是一种假设材料损伤后还保留部分承载能力的计算方法,需给出材料本

构、失效准则和材料退化等力学行为描述。

1.1 复合材料本构模型

复合材料防撞梁单层应力-应变满足如下关系：

$\sigma = C^0 \varepsilon$ (1)

式中： σ 为应力矩阵； C^0 为刚度矩阵； ε 为应变矩阵。

三维实体模型中应力矩阵可表示为

$\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6]$ (2)

式中： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 1、2、3 方向的拉压应力， $\sigma_1 = \sigma_{11}$ ， $\sigma_2 = \sigma_{22}$ ， $\sigma_3 = \sigma_{33}$ ； σ_4 、 σ_5 、 σ_6 分别为 23、13、12 面内的剪应力， $\sigma_4 = \tau_{23}$ ， $\sigma_5 = \tau_{31}$ ， $\sigma_6 = \tau_{12}$ 。防撞梁有限元模型中 x 方向为 1 方向，铺层面内与 x 垂直的方向为 2 方向，与 12 平面垂直的方向为 3(法向) 方向，有限元模型见 2.2 节。

刚度矩阵可表示为

$$C^0 = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}$$
 (3)

式中： $c_{11} = \frac{E_1(1-\nu_{23}\nu_{32})}{\omega}$ ； $c_{12} = \frac{E_2(\nu_{12} + \nu_{13}\nu_{32})}{\omega}$ ； $c_{13} = \frac{E_3(\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23})}{\omega}$ ； $c_{22} = \frac{E_2(1-\nu_{13}\nu_{31})}{\omega}$ ； $c_{23} = \frac{E_3(\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13})}{\omega}$ ； $c_{33} = \frac{E_3(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\omega}$ ； $c_{44} = G_{23}$ ； $c_{55} = G_{13}$ ； $c_{66} = G_{12}$ ； $\omega = 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}$ ； E_1 、 E_2 、 E_3 分别为 1、2、3 方向的弹性模量； ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} 分别为 12、13、23 面泊松比； G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 分别为 12、13、23 面内剪切模量。

防撞梁采用 T700/BA9916 碳纤维/环氧复合材料，参数如表 1 所示。

表 1 碳纤维/环氧复合材料防撞梁材料参数

Table 1 Material parameters of carbon fiber/epoxy composite anti-collision beam

Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Density/(kg·m ⁻³)	Strength/MPa
$E_1=114$	$\gamma_{12}=\gamma_{13}=0.3$	$\rho=1\ 780$	$X_T=2\ 688$
$E_2=E_3=8.61$	$\gamma_{23}=0.45$		$X_C=1\ 458$
$G_{12}=G_{13}=4.16$			$Y_T=69.5$
$G_{23}=3.0$			$Y_C=236$
			$Z_T=55.5$
			$Z_C=175$
			$S_{12}=S_{13}=136$
			$S_{23}=95.6$

1.2 复合材料失效和退化准则

描述复合材料失效的准则主要有最大应力、Hashin、Tsai-Wu、Puck 等。其中，Tsai-Wu 失效准则描述复合材料破坏形式全面，因此，将 Tsai-Wu 准则作为复合材料失效判定依据。采用非线性有限元软件 ABAQUS 模拟复合材料防撞梁显式动力学碰撞，需要开发基于 Tsai-Wu 失效准则的 VUSDFLD 用户子程序，通过获取当前迭代步中的材料节点应力数值，与碳纤维复合材料各方向强度值一起，按照 Tsai-Wu 失效准则判断损伤情况，对于失效单元采用渐进损伤方法，通过改变材料积分点上的场变量，从而重新定义材料属性实现刚度折减。

Tsai-Wu 失效准则依据 Tsai-Wu 张量理论，其表达式为

$$F_i \sigma_i + F_j \sigma_j + F_k \sigma_k + F_{ij} \sigma_i \sigma_j + F_{ji} \sigma_j \sigma_i + F_{ii} \sigma_i^2 + F_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k + \dots = 1 \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, 6)$$
 (4)

式中： σ_i 、 σ_j 、 σ_k 为应力向量； F_i 、 F_j 、 F_k 、 F_{ij} 、 F_{ji} 、 F_{ii} 、 F_{ijk} 为强度张量系数。

基于 Tsai-Wu 准则的复合材料防撞梁三维有限元模型，取式 (4) 前两阶有：

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + F_{44} \sigma_4^2 + F_{55} \sigma_5^2 + F_{66} \sigma_6^2 = 1$$
 (5)

拉伸加载状态 (T) 和压缩加载状态 (C) 下，张量系数满足：

$$F_1 = \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_T}, F_2 = \frac{1}{Y_C} - \frac{1}{Y_T}, F_3 = \frac{1}{Z_C} - \frac{1}{Z_T}, F_{11} = \frac{1}{(X_C X_T)}, F_{22} = \frac{1}{(Y_C Y_T)}, F_{33} = \frac{1}{(Z_C Z_T)}, F_{44} = \frac{1}{S_{23}^2}, F_{55} = \frac{1}{S_{31}^2}, F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2}, F_{12} = -\frac{1}{(2\sqrt{X_C X_T Y_C Y_T})}, F_{23} = -\frac{1}{(2\sqrt{Y_C Y_T Z_C Z_T})}, F_{31} = -\frac{1}{(2\sqrt{Z_C Z_T X_C X_T})}。$$

式中： X_T 和 X_C 、 Y_T 和 Y_C 、 Z_T 和 Z_C 分别为 1 方向拉压强度、2 方向拉压强度、3 方向拉压强度； S_{12} 、 S_{23} 、 S_{31} 分别为 12、23、31 面内的剪切强度。

复合材料退化模型主要有突降退化模型和渐进退化模型两种，其中，突降退化模型是当判定单元出现损伤后，按照刚度折减系数 $d(0 < d < 1)$ 将材料性能一次性退化；渐进退化模型是当判定单元出现损伤后，材料性能按照线性或非线性逐渐退化。如图 1 所示。

CFRP 的材料性能突降退化方式在参考文献 [18] 的基础上，将原 1 方向拉伸压缩破坏时退化为 0

的弹性模量、剪切模量和泊松比，分别设置为原材料属性值的 0.01%、0.01% 和 1%。如表 2 所示。

1.3 内聚力模型

内聚力单元 (Cohesive 单元) 是描述复合材料层间相互作用的有效方法，复合材料防撞梁有限元碰撞模型中，采用内聚力单元模拟碳纤维复合材料层间相互作用力及分层损伤。内聚力单元的本构关系如下：

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1c} \\ \sigma_{2c} \\ \sigma_{3c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中： σ_{1c} 、 σ_{2c} 、 σ_{3c} 分别为单元的 1、2、3 方向应力； δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为单元的 1、2、3 方向位移； K_1 、 K_2 、 K_3 分别为 1、2、3 方向刚度系数。

表 2 碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 性能退化方式

Breaking mode	Breaking rule	Stiffness reduction
1 direction stretch	$\sigma_1 > X_T$	$E = 0.01\%E \quad G = 0.01\%G \quad \nu = 1\%\nu$
1 direction compression	$-\sigma_1 > X_C$	$E = 0.01\%E \quad G = 0.01\%G \quad \nu = 1\%\nu$
2 direction stretch	$\sigma_2 > Y_T$	$E_2 = 1\%E_2 \quad G_{12} = 20\%G_{12} \quad G_{13} = 20\%G_{13}$
2 direction compression	$-\sigma_2 > Y_C$	$E_2 = 1\%E_2 \quad G_{12} = 20\%G_{12} \quad G_{13} = 20\%G_{13}$
3 direction stretch	$\sigma_3 > Z_T$	$E_3 = 1\%E_3 \quad G_{12} = 20\%G_{12} \quad G_{13} = 20\%G_{13}$
3 direction compression	$-\sigma_3 > Z_C$	$E_3 = 1\%E_3 \quad G_{12} = 20\%G_{12} \quad G_{13} = 20\%G_{13}$
1-2 in-plane shear	$ \tau_{12} > S_{12}$	$E_2 = 1\%E_2 \quad G_{12} = 1\%G_{12}$
1-3 in-plane shear	$ \tau_{13} > S_{13}$	$E_3 = 1\%E_3 \quad G_{13} = 1\%G_{13}$
2-3 in-plane shear	$ \tau_{23} > S_{23}$	$E_2 = 1\%E_2 \quad E_3 = 1\%E_3 \quad G = 1\%G$

Notes: E includes E_1 , E_2 and E_3 ; G includes G_{12} , G_{13} and G_{23} ; ν includes ν_1 , ν_2 and ν_3 .

在众多内聚力本构模型中，双线性本构模型计算较快、收敛性好、准确性高，其本构关系如图 2 所示。

D 为内聚力单元的退化参数，取值在 0~1 之间。0< D <1 时，单元层内部损伤， $D=1$ 时，内聚力单元失效，材料出现分层。

损伤起始准则采用二次名义应力准则，其表达式如下：

$$\left(\frac{\sigma_{3c}}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{2c}}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{1c}}{S}\right)^2 = 1 \tag{7}$$

式中， S 、 T 、 N 分别代表单元的 1、2、3 方向强度。

采用 B-K 准则断裂能定律描述混合载荷模式下的损伤演化，表达式为

$$G_c = G_{3c} + (G_{1c} - G_{3c}) \left(\frac{G_{2c} + G_{1c}}{G_{1c} + G_{3c}} \right)^\eta \tag{8}$$

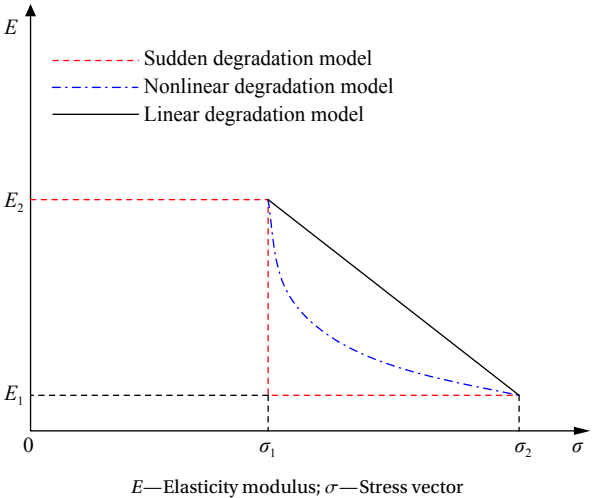
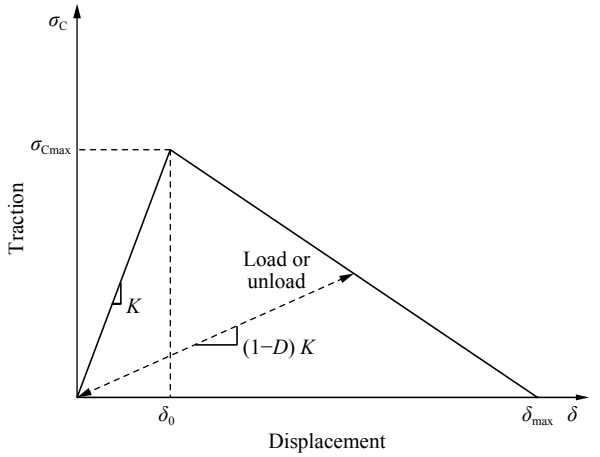


图 1 复合材料刚度折减方式

Fig. 1 Composite material stiffness reduction method



σ_{Cmax} —Maximum traction; δ_0 —Displacement at the beginning of the damage; δ_{max} —Displacement at break; D —Degradation parameter of the cohesion unit

图 2 内聚力单元双线性本构关系

Fig. 2 Bilinear constitutive relationship of cohesion unit

式中： G_{1c} 、 G_{2c} 和 G_{3c} 分别为两个沿剪切方向的断裂能和沿法线方向的断裂能； η 为 B-K 准则材料参数，其值取 1。

内聚力单元材料属性参考文献 [19]，如表 3 所示。

表 3 黏结层 Cohesive 单元材料参数

Table 3 Material parameters of the cohesive element of the bonding layer

Parameter	$K_1/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	$K_2/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	$K_3/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	N/MPa	S/MPa	T/MPa	$G_{1c}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$G_{2c}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$G_{3c}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$
Value	24 000	24 000	24 000	60	70	70	3.84	3.84	1.88

Notes: K —Stiffness coefficients in different directions; N , S , T —Intensity in different directions; G_c —Fracture energies in different directions.

1.4 铝合金材料 Johnson-Cook 本构模型

基于应力应变的材料动态本构模型主要有 Johnson-Cook、Zerilli-Armstrong 和 Steinberg 等，其中 Johnson-Cook 材料模型是一个能反映金属材料的应变效应、应变率强化效应和温升软化效应的理想刚塑性模型[20]，其表达式为

$$\bar{\sigma} = \left(A + B \bar{\epsilon}^n \right) \left(1 + c \ln \dot{\bar{\epsilon}}^* \right) \left(1 - T^* \right)^m \tag{9}$$

式中： $\bar{\sigma}$ 为等效应力， A 、 B 、 c 、 m 、 n 为材料参

数； $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变； $\dot{\bar{\epsilon}}^* = \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}$ 为等效应变率， $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 为参考应变率， $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为实时应变率； T^* 为带温度软化因子，表达式为

$$T^* = \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)} \tag{10}$$

式中： T_r 为室温； T_m 为材料熔点； T 为实时温度（本文未考虑温度效应）。Johnson-Cook 本构模型参数值如表 4 所示。

表 4 6061-T6 铝合金材料参数

Table 4 6061-T6 aluminum alloy material parameters

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
Density $\rho/(\text{t} \cdot \text{mm}^{-3})$	2.7×10^{-9}	Material parameter c	0.2215	Damage parameter D_2	1.45
Elastic modulus E/MPa	7×10^4	Material parameter n	0.34	Damage parameter D_3	-0.47
Poisson's ratio γ	0.33	Material parameter m	1	Damage parameter D_4	0.011
Material parameter A/MPa	265	Reference strain rate $\dot{\epsilon}_0/S$	1.34	Damage parameter D_5	1.6
Material parameter B/MPa	426	Damage parameter D_1	-0.77	Reference strain rate $\dot{\epsilon}_0/S$	1

1.5 铝合金材料 Johnson-Cook 损伤断裂模型

Johnson-Cook 损伤断裂模型包含损伤萌生准则、损伤演化规律及材料断裂判据等损伤关系。

Johnson-Cook 损伤萌生准则损伤开始时等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_0$ 定义如下：

$$\bar{\epsilon}_0 = \left(D_1 + D_2 \exp(-D_3 \eta_1) \right) \left(1 + D_4 \ln(\dot{\bar{\epsilon}}^*) \right) \left(1 + D_5 \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)} \right) \tag{11}$$

式中： D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 为损伤参数； $\eta_1 = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$ 表示应力三轴度； σ_m 表示平均应力； $\bar{\sigma}$ 为等效应力。

Johnson-Cook 损伤萌生准则用一个与等效塑性应变有关的变量作为损伤参数，当损伤参数达到 1 时损伤开始萌生，损伤参数 $\bar{D}$ 定义如下：

$$\bar{D} = \sum \left(\frac{\bar{\epsilon}_0}{\bar{\epsilon}_0} \right) \tag{12}$$

式中， $\bar{\epsilon}_0$ 为等效塑性应变增量。

当损伤萌生之后，损伤的演化规律如图 3 所示。

当位移达到最大值 $U_{\max}$ 时， $\bar{D}$ 最大，料发生断裂失效。

铝合金材料的 Johnson-Cook 模型参数参考文献 [21]，如表 4 所示。

2 CFRP 防撞梁低速碰撞有限元模型

2.1 复合材料失效准则有效性验证

采用文献 [22] 中 CFRP 试件结构尺寸、铺层方式和加载条件等实验数据，结合本文发展的 VUSDFLD 显式动力学损伤子程序，建立 CFRP 试件动力学损伤有限元模型，进行失效准则有效性验证。

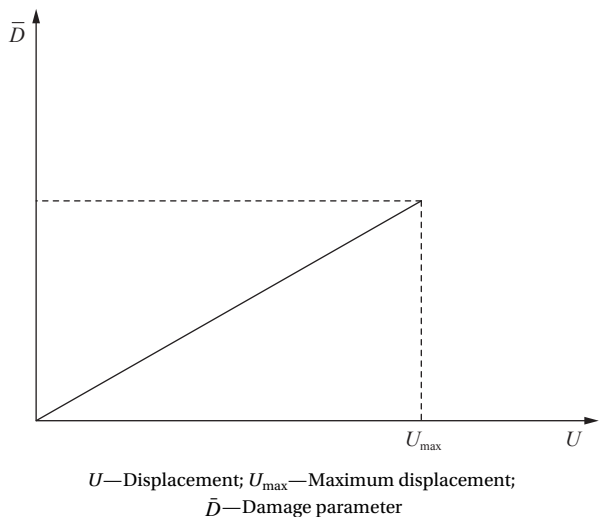


图3 Johnson-Cook 模型的损伤演化规律

Fig. 3 Damage evolution law of Johnson-Cook model

图4、图5和表5分别为CFRP试件压缩过程的有限元模拟结果和实验数据。不同于文献中的静力学计算结果，图4载荷时变曲线和图5应力时变曲线动力学冲击效应明显。本文显式动力学计算的破坏载荷约为48 kN，剩余强度约为436 MPa，考虑到动力学计算具有质量效应，使破坏载荷略小于实验数据是合理的。

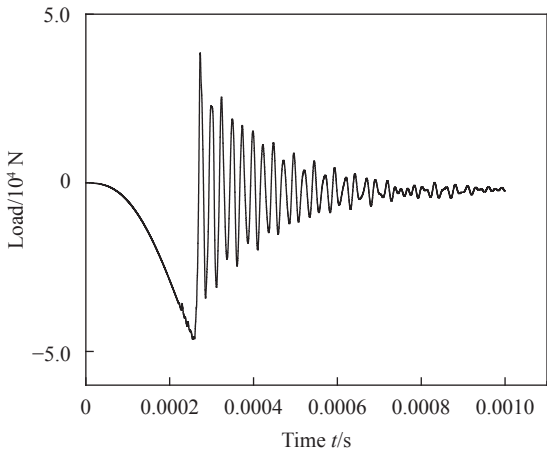


图4 CFRP 试件载荷-时间曲线

Fig. 4 Load-time curve of CFRP specimen

2.2 CFRP 防撞梁低速碰撞有限元建模

图6为T700/BA9916碳纤维/环氧复合材料防撞梁低速碰撞有限元显式动力学模型，模型考虑了低速碰撞器和复合材料防撞梁结构及整车碰撞效应的影响。其中，低速碰撞器结构尺寸参考国家汽车低速碰撞标准，如图7所示，采用离散刚体壳单元建立有限元模型，单元类型为R3D4；防

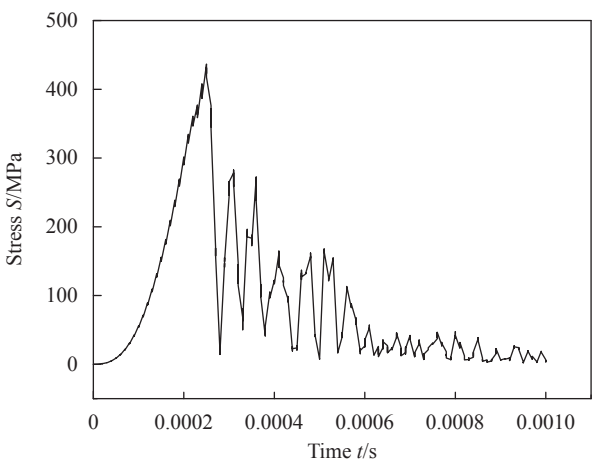


图5 CFRP 试件应力-时间曲线

Fig. 5 Stress-time curve of CFRP specimen

表5 6个CFRP试件的数据

Table 5 Data of 6 experimental CFRP specimens

Number	Maximum load/kN	Residual strength/MPa
1	56.92	419
2	54.39	400
3	57.22	421
4	55.87	406
5	61.04	441
6	54.19	399

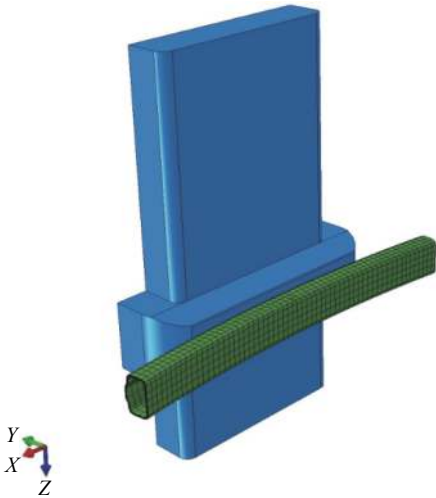


图6 CFRP 防撞梁低速碰撞有限元模型

Fig. 6 Finite element model of low-speed collision of CFRP anti-collision beam

撞梁初始设计结构由20层复合材料组成，每层厚0.15 mm，共3 mm，单元类型为C3D8R，铺层方向参考文献[23]为 $[\pm 45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ ，层间通过Cohesive单元传递相互力，单元类型为COH3D8；整车质量效应参考某SUV汽车的实车数据，在模型中按照汽车质心位置建立参

表 6 20 层 CFRP 防撞梁复合材料层失效单元数统计

Table 6 Statistics on the number of failure units of 20 composite material layers of CFRP anti-collision beam

Concrete layer number	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	Total	Angle/(°)
1	0	187	213	0	5	202	607	45
2	0	147	227	0	5	178	557	-45
3	0	129	164	0	7	187	487	45
4	0	184	54	7	2	106	353	0
5	0	178	52	7	2	108	347	0
6	0	0	236	42	57	41	376	90
7	0	102	198	0	0	151	451	-45
8	0	181	91	13	5	108	398	0
9	0	184	102	14	4	90	394	0
10	0	0	122	44	56	119	341	90
11	0	0	134	45	54	133	366	90
12	0	136	103	10	6	97	352	0
13	0	129	97	10	6	105	347	0
14	0	138	236	0	11	193	578	-45
15	0	0	171	38	47	141	397	90
16	0	86	103	8	10	109	316	0
17	0	90	104	8	8	109	319	0
18	0	85	116	0	8	207	416	45
19	0	68	183	0	13	235	499	-45
20	0	112	159	0	15	218	504	45

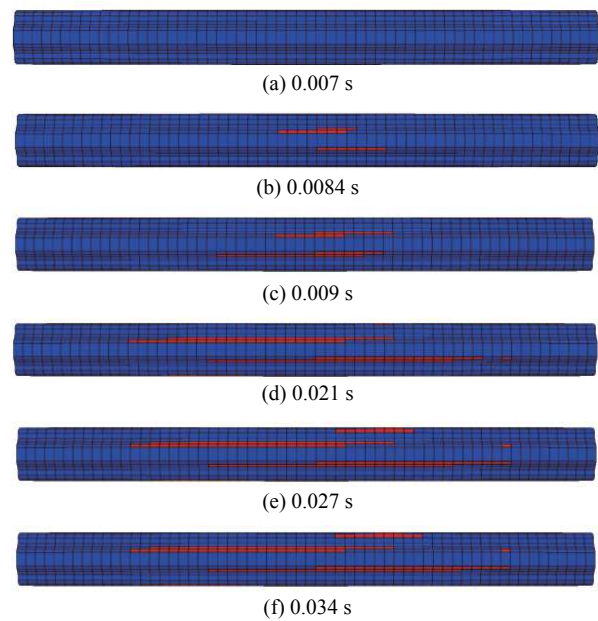


图 9 CFRP 防撞梁第 2 层复合材料 FV3 方向损伤演化过程

Fig. 9 Damage evolution process in the FV3 direction of the second layer of composite material of CFRP anti-collision beam

化规律基本一致。

表 7 为 24 层碳纤维复合材料防撞梁低速碰撞损伤计算结果。可知，从失效单元数看，0°和 90°铺层少于 45°和-45°铺层，此损伤规律与初始防撞梁铺层设计结构的结果一致。优化改进后的复合材料防撞梁结构大部分铺层总失效单元数在 300

以下，较初始铺层结构总失效数都在 300 以上的结果有明显下降，表明外层增加 4 层复合材料铺层的设计结构，可以有效降低复合材料防撞梁的碰撞损伤。从与初始防撞梁设计结构损伤较严重的 7 层铺层对比可以发现，优化改进后的铺层结构在第 1 层、第 7 层、第 14 层、第 19 层和第 20 层等铺层上的失效单元数均有所减少，其中第 7 层、第 19 层和第 20 层的损伤降低明显，但第 2 层和第 3 层失效单元数未下降。

从优化改进的碳纤维复合材料防撞梁损伤结果可知，虽在外层增设了 4 层复合材料铺层，但第 1 层、第 2 层、第 3 层和第 14 层损伤依然严重，失效单元数均在 500 上下。由参考文献 [21] 的研究结果发现，使用带铝合金材料的复合材料板抗冲击能力优于复合材料裸板，因此，采用含 Jonhson-Cook 损伤本构的铝合金材料分别替换第 1 层、第 2 层、第 3 层和第 14 层的碳纤维复合材料，进一步开展铝合金材料嵌入式碳纤维复合材料防撞梁碰撞损伤研究。

图 10 为铝合金嵌入式多材料混合防撞梁失效单元数最多的第 21 层复合材料在 FV3 方向损伤演化过程。可知，失效单元首先从中下部开始产生，然后逐步向防撞梁两端扩展，失效单元演化过程与碳纤维复合材料防撞梁一致。但从损伤出现和发展的时间上看，复合材料在 0.014 s 左右开始出

表 7 24 层 CFRP 防撞梁复合材料层失效单元数统计

Table 7 Statistics on the number of failure units of 24 layers of composite material of CFRP anti-collision beam

Concrete layer number	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	Total	Angle/(°)
1	0	171	221	0	0	175	567	45
2	0	176	197	0	1	197	571	-45
3	0	145	171	0	2	177	495	45
4	0	226	65	9	6	20	326	0
5	0	207	51	8	8	21	295	0
6	0	185	36	9	4	20	254	0
7	0	152	143	0	2	87	384	-45
8	0	0	143	14	0	58	215	90
9	0	125	134	0	3	58	320	-45
10	0	184	42	5	7	25	263	0
11	0	178	52	3	7	28	268	0
12	0	0	106	15	0	112	233	90
13	0	0	15	13	0	155	183	90
14	0	374	138	6	3	11	532	0
15	0	149	99	5	8	28	289	0
16	0	80	28	0	2	100	210	-45
17	0	0	12	6	0	153	171	90
18	0	66	20	0	0	123	209	-45
19	0	170	21	3	11	35	240	0
20	0	181	34	2	12	32	261	0
21	0	225	58	2	11	32	328	0
22	0	77	33	0	3	205	318	45
23	0	79	24	0	0	192	295	-45
24	0	90	53	0	3	213	359	45

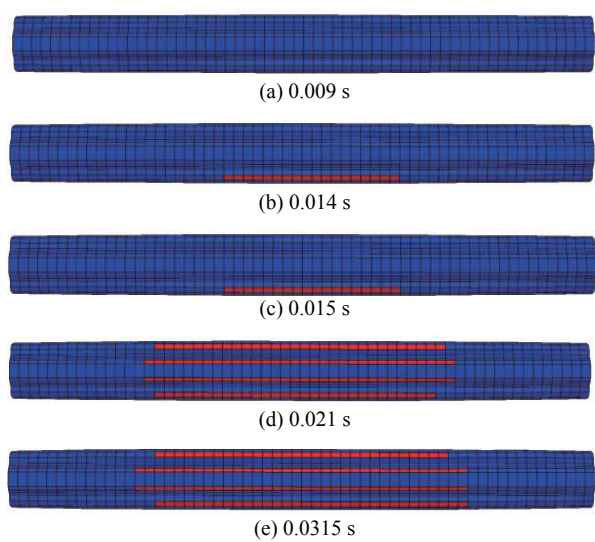


图 10 多材料混合防撞梁第 21 层复合材料 FV3 方向损伤演化过程
Fig. 10 Damage evolution process in FV3 direction of the 21st layer composite of multi-material hybrid anti-collision beam

现失效单元，如图 10(b) 所示；0.015~0.021 s 时间段内，复合材料产生大量失效单元，0.021 s 之后失效单元基本不再增加，如图 10(d)所示。与优化改进后的 CFRP 防撞梁失效数最多铺层结果相比，多材料混合防撞梁结构失效单元数明显增加的时间区间进一步减小，这与铝合金材料法向弹性模

量 (3 方向) 比 T700/BA9916 碳纤维环氧复合材料更大有关，使得嵌入铝合金材料后的防撞梁刚度增加，碰撞变形减小。

表 8 为多材料混合防撞梁低速碰撞损伤计算结果。可知，铝合金材料层没有失效单元，多材料混合防撞梁的复合材料铺层失效单元数，较优化改进后的纯 CFRP 防撞梁相应复合材料铺层失效数明显降低，前者失效单元数普遍在 200 以下，而后者失效单元数大都在 200 以上。表明含铝合金材料的多材料混合防撞梁具有更好的低速防撞性能。

图 11 和图 12 分别为纯 CFRP 防撞梁优化改进设计结构和多材料混合防撞梁结构，在 FV3 方向损伤单元出现的时间对比情况。对比可知，纯 CFRP 防撞梁在 0.0056 s 前 FV3 方向未出现损伤，之后防撞梁产生损伤，如图 11(b) 所示。而多材料混合防撞梁结构于 0.0129 s 前 FV3 方向未产生破坏，之后防撞梁才出现损伤，如图 12(b) 所示。可见，含铝合金材料的多材料混合防撞梁结构整体产生初始损伤的时间，较纯 CFRP 防撞梁晚。表明嵌入铝合金材料层后复合材料防撞梁整体抗损伤性能变好，使其产生损伤所需的碰撞能量更

表 8 铝合金层和 CFRP 层失效单元数统计

Table 8 Statistics of the number of failure units of the aluminum alloy layer and the CFRP layer

Concrete layer number	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	Total	Angle/(°)
1	0	0	0	0	0	0	0(SDEG)	Aluminum alloy
2	0	0	0	0	0	0	0(SDEG)	Aluminum alloy
3	0	0	0	0	0	0	0(SDEG)	Aluminum alloy
4	0	103	5	4	2	23	137	0
5	0	17	1	4	2	20	44	0
6	0	1	1	4	2	20	28	0
7	0	36	26	0	0	30	92	-45
8	0	0	0	0	0	62	62	90
9	0	43	33	0	0	70	146	-45
10	0	71	41	0	4	17	133	0
11	0	80	0	1	5	17	103	0
12	0	0	0	0	0	173	173	90
13	0	0	0	0	0	176	176	90
14	0	0	0	0	0	0	0(SDEG)	Aluminum alloy
15	0	134	4	1	6	16	161	0
16	0	51	10	0	0	139	200	-45
17	0	0	5	0	0	198	203	90
18	0	55	13	0	0	140	208	-45
19	0	224	126	0	6	20	376	0
20	0	226	129	0	5	21	381	0
21	0	262	133	0	8	20	423	0
22	0	58	30	0	3	155	246	45
23	0	61	78	0	0	164	303	-45
24	0	73	47	0	3	197	320	45

Note: SDEG—Scalar stiffness degradation, when SDEG>1, the material fails.

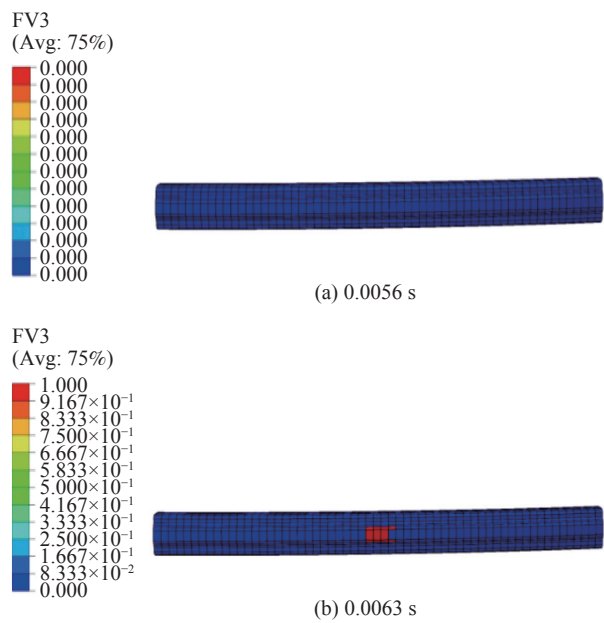


图 11 CFRP 防撞梁 24 层复合材料防撞梁出现损伤时间对比
Fig. 11 Comparison of damage time of 24-layer CFRP anti-collision beam

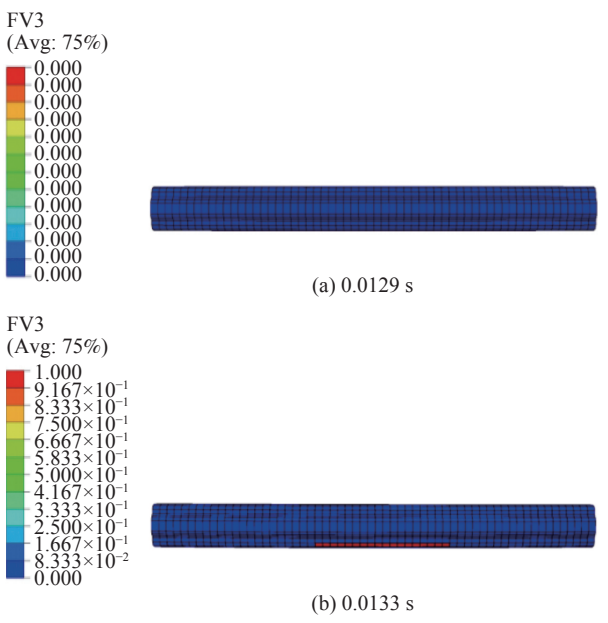


图 12 嵌入铝合金材料防撞梁出现损伤时间对比
Fig. 12 Comparison of damage time of anti-collision beams embedded in aluminum alloy materials

大，具有更优的低速碰撞损伤性能。
图 13 为三种防撞梁结构的碰撞动能变化曲线。可知，含铝合金的多材料混合防撞梁碰撞动能随

时间下降速度最快，初始 20 层 CFRP 防撞梁结构碰撞动能随时间下降速度最慢，表明增加复合材料铺层和嵌入铝合金材料层均能使复合材料防撞

梁碰撞性能更优, 而嵌入铝合金材料层碰撞性能较纯 CFRP 防撞梁更优。

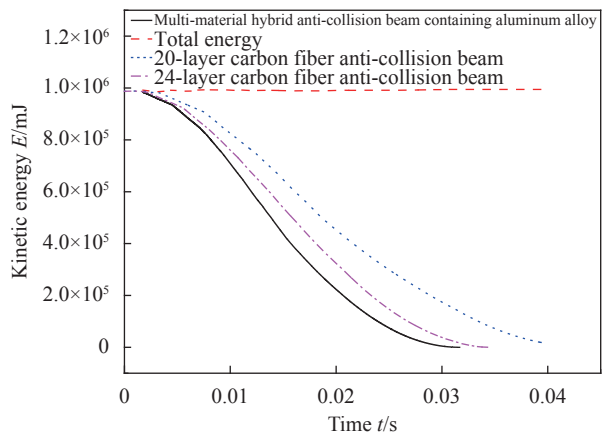


图 13 三种防撞梁结构碰撞动能曲线对比

Fig. 13 Comparison of collision kinetic energy curves of three anti-collision beam structures

图 14 为三种防撞梁结构弧形顶点处(防撞梁率先与碰撞器接触的点)变形值对比曲线。可见, 含铝合金材料的多材料混合防撞梁结构弧形顶点处变形值明显小于其他两种防撞梁结构, 表明其抗变形能力优于纯 CFRP 防撞梁。

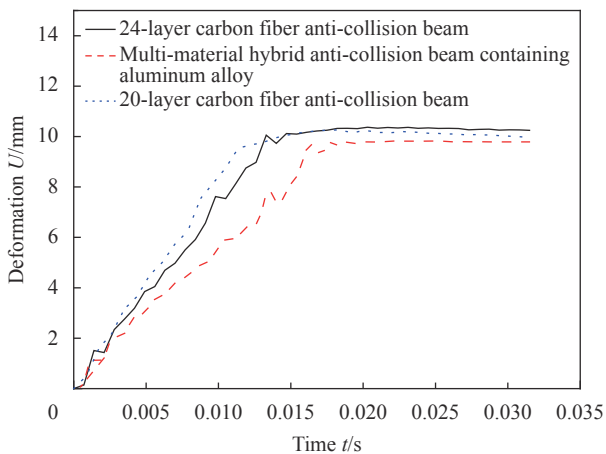


图 14 三种防撞梁结构弧形顶点处变形对比

Fig. 14 Comparison of deformations at the arc vertices of three anti-collision beam structures

4 结论

针对碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)防撞梁开展了低速碰撞损伤研究, 建立了基于VUSDFLD子程序的复合材料防撞梁有限元显式动力学碰撞模型, 分别采用Tsai-Wu失效准则、Jonhson-Cook损伤本构及Cohesive内聚力单元模拟防撞梁层内和层间损伤效应, 在初始复合材料

防撞梁设计结构分析基础上, 对比分析了不同铺层数纯 CFRP 防撞梁和含铝合金多材料混合防撞梁损伤结果, 提出了复合材料防撞梁低速碰撞损伤优化改进方案。主要研究结论有:

- (1) 由纯 CFRP 防撞梁低速碰撞结果对比可以发现, 适当增加复合材料铺层层数可以有效降低 CFRP 防撞梁损伤, 且 0°和 90°较 45°和 -45°铺层角度碳纤维复合材料层产生的失效单元数少;
- (2) 从含铝合金多材料混合防撞梁与同铺层纯 CFRP 防撞梁损伤结果比较可知, 保持防撞梁质量基本相同的情况下, 嵌入铝合金材料层可以显著改善复合材料层的碰撞损伤;
- (3) 复合材料防撞梁低速碰撞损伤产生至损伤稳定的时间范围, 可以通过适当增加铺层数和合理嵌入铝合金材料层得到有效控制;
- (4) 含铝合金多材料混合防撞梁较纯 CFRP 防撞梁抗损伤性能和抗变形性能更好, 出现损伤较纯 CFRP 防撞梁需要更大的碰撞速度, 为 CFRP 防撞梁在汽车上的应用提供参考。

参考文献:

[1] WANG Kangkang, ZHAO Libin, HONG Haiming, et al. A strain-rate-dependent damage model for evaluating the low velocity impact induced damage of composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 995-1003.

[2] CAMINERO M A, GARCÍA-MORENO I, RODRÍGUEZ G P. Damage resistance of carbon fibre reinforced epoxy laminates subjected to low velocity impact: Effects of laminate thickness and ply-stacking sequence[J]. *Polymer Testing*, 2017, 63: 530-541.

[3] AL-HAJAJ Z, SY B L, BOUGHERARA H, et al. Impact properties of a new hybrid composite material made from woven carbon fibres plus flax fibres in an epoxy matrix[J]. *Composite Structures*, 2019, 208: 346-356.

[4] PAPA I, BOCCARUSSO L, LANGELLA A, et al. Carbon/glass hybrid composite laminates in vinylester resin: Bending and low velocity impact tests[J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111571.

[5] HE B, WANG B, WANG Z, et al. Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon fiber and high-strength and high-modulus polyimide fiber[J]. *Polymer*, 2020, 204: 122830.

[6] ZHOU J, LIAO B, SHI Y, et al. Low-velocity impact behavior and residual tensile strength of CFRP laminates[J]. *Composites*, 2019, 161: 300-313.

[7] PUSHPARAJA M, BALAGANESAN G, VELMURUGAN R, et al. Energy absorption characteristics of carbon/epoxy nano filler dispersed composites subjected to localized impact

- loading[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 173(Complete): 175-181.
- [8] SAMAL S, MARVALOVA B, PETRIKOVA I, et al. Impact and post impact behavior of fabric reinforced geopolymer composite[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 127(nov. 30): 111-124.
- [9] CAMINERO M A, GARCÍA-MORENO I, RODRIGUEZ G P, et al. Experimental study of the influence of thickness and ply-stacking sequence on the compression after impact strength of carbon fibre reinforced epoxy laminates[J]. *Polymer Testing*, 2018, 66: 360-370.
- [10] SALVETTI M, SBARUFATTI C, GILIOLI A, et al. On the mechanical response of CFRP composite with embedded optical fibre when subjected to low velocity impact and CAI tests[J]. *Composite Structures*, 2017, 179: 21-34.
- [11] FOTOUHI M, JALALVAND M, WISNOM M R. High performance quasi-isotropic thin-ply carbon glass hybrid composites with pseudo-ductile behaviour in all fibre orientations[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 152: 101-110.
- [12] 王莉, 熊舒, 肇研, 等. T800级碳纤维复合材料抗冲击性能[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(5): 147-151.
WANG Li, XIONG Shu, ZHAO Yan, et al. Impact resistance of T800 grade carbon fiber composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(5): 147-151(in Chinese).
- [13] 任明伟, 洪治国, 周玉敬, 等. 复合材料防撞梁低速碰撞优化设计[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(2): 854-862.
REN Mingwei, HONG Zhiguo, ZHOU Yujing, et al. Low-speed collision optimization design of composite anti-collision beams[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(2): 854-862(in Chinese).
- [14] 陈静, 唐傲天, 田凯, 等. 碳纤维复合材料防撞梁轻量化设计[J]. *汽车工程*, 2020, 42(3): 390-395.
CHEN Jing, TANG Aotian, TIAN Kai, et al. Lightweight design of carbon fiber composite anti-collision beam[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(3): 390-395(in Chinese).
- [15] 张超, 方鑫, 刘建春. 复合材料层板冰雹高速冲击损伤预测及失效机理分析[J/OL]. *北京航空航天大学学报*: 1-14[2021-05-20]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0636>.
ZHANG Chao, FANG Xin, LIU Jianchun. High-speed impact damage prediction and failure mechanism analysis of composite laminates with hail[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*: 1-14[2021-05-20]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0636> (in Chinese).
- [16] 周俊杰, 王生楠. 复合材料层板低速冲击渐进损伤模型[J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(1): 37-45.
ZHOU Junjie, WANG Shengnan. Progressive damage model of composite laminates under low-velocity impact[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(1): 37-45(in Chinese).
- [17] 拓宏亮, 马晓平, 卢智先. 基于连续介质损伤力学的复合材料层板低速冲击损伤模型[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(7): 202-212.
TUO Hongliang, MA Xiaoping, LU Zhixian. Low-velocity impact damage model of composite laminates based on continuum damage mechanics[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(7): 202-212(in Chinese).
- [18] 孔祥宏, 王志瑾. 基于Abaqus的有限元渐进损伤强度分析[J]. *计算机应用与软件*, 2012, 29(10): 236-240.
KONG Xianghong, WANG Zhijin. Finite element progressive damage analysis based on Abaqus[J]. *Computer Applications and Software*, 2012, 29(10): 236-240(in Chinese).
- [19] 王涛, 侯玉亮, 铁琰, 等. 基于ECPL模型的平纹机织复合材料低速冲击多尺度模拟[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(20): 295-304.
WANG Tao, HOU Yuliang, TIE Ying, et al. Multi-scale simulation of low-velocity impact of plain woven composites based on ECPL model[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(20): 295-304(in Chinese).
- [20] 周琳. 金属材料新的动态本构模型[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
ZHOU Lin. New dynamic constitutive model of metal materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019(in Chinese).
- [21] 崔俊杰, 郭章新, 朱明, 等. 表面带金属层的复合材料层板低速冲击数值模拟[J]. *材料导报*, 2021, 35(4): 4150-4158.
CUI Junjie, GUO Zhangxin, ZHU Ming, et al. Numerical simulation of low-velocity impact of composite laminates with metal layers on the surface[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(4): 4150-4158(in Chinese).
- [22] 孔祥宏, 王志瑾. 复合材料层压板压缩剩余强度分析[J]. *飞机设计*, 2014, 34(6): 42-47, 52.
KONG Xianghong, WANG Zhijin. Analysis of compression residual strength of composite laminates[J]. *Aircraft Design*, 2014, 34(6): 42-47, 52(in Chinese).
- [23] 肖金涛, 张帅, 徐锐良, 等. 碳纤维复合材料防撞梁与铝合金吸能盒低速碰撞轻量化设计优化[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(3): 25-32, 33.
XIAO Jintao, ZHANG Shuai, XU Ruiliang, et al. Low-speed collision lightweight design optimization of carbon fiber composite anti-collision beam and aluminum alloy energy-absorbing box[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science*, 2021, 42(3): 25-32, 33(in Chinese).