

碳玻混杂复合材料层合板的弯曲损伤研究

Flexural damage study of carbon glass hybrid composite laminates

李星宇¹, 阮诗伦^{1,2}, 谷俊峰¹
Li Xing-yu¹, Ruan Shi-lun^{1,2}, Gu Jun-feng¹

(1. 大连理工大学 力学与航空航天学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 碳/玻璃纤维层间混杂复合材料在弯曲载荷下的损伤失效形式较为复杂。因此, 结合试验与有限元仿真方法对碳/玻混杂复合材料在弯曲载荷条件下的损伤演化过程与断裂行为进行研究具有重要意义。为此, 基于复合材料刚度连续折减方案与三维 Hashin 失效准则, 采用 Fortran 语言编写了 Abaqus 用户子程序, 结合双线性内聚力模型, 建立了三维复合材料层合板渐进损伤分析模型。同时, 开展了三点弯曲试验, 对混杂层合板的损伤演化过程进行分析, 并结合仿真结果总结了碳/玻混杂纤维复合材料损伤演化规律。结果表明, 渐进损伤分析模型能够较好地预测混杂复合材料层合板三点弯曲失效的极限载荷和损伤形貌, 在弯曲载荷作用下, 碳玻混杂增强复合材料层合板主要的失效模式是受压侧基体压缩失效、纤维屈曲, 受拉侧纤维断裂失效并伴随混杂界面层的分层失效, 层间较大的剪切应力是导致复合材料层合板发生分层失效的主要原因。

关键词: 碳玻混杂复合材料 分层失效 三点弯曲 渐进损伤

0.引言

随着工程技术的发展, 对轻质高强材料的需求日益增加, 碳玻混杂复合材料因其兼具碳纤维的高强度、高模量特性以及玻璃纤维的良好韧性和低成本优势, 已成为航空航天、汽车、船舶和风电等领域结构件设计的重要选择, 例如汽车 B 柱加强板^[1]、风力机叶片^[2]、城轨列车头罩^[3]等。但在实际工程应用中, 这类材料面临的一个关键挑战是其在受载过程中的分层失效问题。由于不同纤维层的力学性能差异及界面特性复杂性, 碳玻混杂复合材料层合板在三点弯曲等典型加载条件下容易出现微裂纹、基体开裂、纤维断裂及分层等损伤模式, 并最终导致结构性能的整体破坏。

近年来, 关于复合材料渐进损伤行为的研究受到学术界的广泛关注, 国内外学者进行了大量的研究。Hu^[4]等将层合板理论与粘结界定义相结合提出了一种复合材料层合板的周向动力学模型, 应用于含孔复合材料层合板的渐进损伤分析, 包括纤维及基体断裂、界面脱层等。Tarfaou^[5]等研究了含碳纳米管碳纤维/环氧树脂复合材料的损伤, 依据 Hashin 准则建立了层间损伤模型, 用界面元模拟并预测了含碳纳米管复合材料层合板的分层失效, 数值计算得到的力-位移曲线与实验结果吻合较好。Tang^[6]等对碳纤维增强复合材料的疲劳损伤行为进行了实验和数值研究, 提出了一种预测疲劳行为的多尺度渐进损伤疲劳模型, 该模型在代表性体积元 (RVE) 模型中加入了一种新的随机碎片堆积算法和连续损伤模型, 模拟结果在开裂模式和预测寿命方面与实验数据吻合较好。Kolasangiani^[7]等构建了基于应力分析的渐进疲劳损伤模型 (PFDM), 该模型采用 Hashin 失效准则和最大应力准则确定材料性能的退化。模型预测的应变-寿命曲线与不同应变水平下的实验结果吻合良好。龙连春^[8]等利用 Hashin 失效准则以及刚度退化理论研究了碳纤维复合材料结构在热-力耦合作用下的失效过程, 形成了结构在耦合作用下的渐进损伤分析方法, 该方法能够预测结构在不同加载条件下的极限载荷。刘方^[9]等建立了基于 Tsai-Wu 准则的 T700 复合材料螺栓连接结构的损伤模型, 分析了不同孔端距/孔直径对连接结构的影响, 并应用试验证明了该模型的有效性。

基金项目: “十四五”国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项, 电动载货车多材料底盘结构轻量化关键技术开发(2022YFB2503503)

竺森森^[10]等基于多尺度分析方法, 构建了丝束内混杂纤维复合材料的渐进损伤失效模型, 结

合试验和有限元仿真,探究了纤维混杂方式、铺层层数及铺层角度对耐撞性能的影响并将该模型应用于汽车 B 柱加强板设计。张砚雯^[10]等探讨了碳玻混杂复合材料抽油杆在弯曲载荷下的失效机制,采用 Hashin 和 Puck 准则结合界面内聚力模型,建立 ABAQUS 数值仿真模型。进行抽油杆的三点弯曲试验,结果表明,材料受压区先出现“压头状”损伤,裂纹随后贯穿杆体,最终垂直于纤维方向断裂,材料的主要失效模式包括纤维断裂、基体损伤和界面脱粘。

综上所述,现有大多数研究主要聚焦于单一纤维类型的复合材料或是针对复合材料结构件的力学性能分析。尽管这些研究揭示了复合材料的损伤机制,但忽略了混杂纤维在加载下的复杂力学行为,尤其是碳玻混杂复合材料中的层间失效问题。目前的损伤分析模型多侧重于对层内损伤及演化的研究,没有充分反映不同纤维层的相互作用及层间损伤的复杂性。然而,由于混杂纤维复合材料不同材料层的弹性模量差异,在使用过程中容易发生层间损伤,从而导致整体结构的失效。

本文基于渐进损伤分析方法研究碳玻混杂复合材料层合板在弯曲载荷作用下的损伤失效行为,分析碳玻混杂复合材料层合板的损伤失效模式及导致层合板损伤失效的主要原因。首先基于复合材料刚度连续折减方案与三维 Hashin 失效准则,结合双线性内聚力模型建立起复合材料渐进损伤分析模型,模型通过层内损伤和层间损伤的间接耦合机制,能够更好的描述弯曲载荷下的损伤演化问题,弥补了现有研究中对混杂纤维层间损伤考虑的不足。然后利用该模型对碳/玻璃纤维层间混杂增强复合材料层合板三点弯曲进行仿真,通过与试验结果对比验证渐进损伤分析模型的有效性,并分析碳玻混杂复合材料层合板的整体失效过程。

1. 复合材料渐进损伤分析模型

复合材料渐进损伤分析模型需层内损伤部分要定义复合材料失效准则,建立复合材料刚度折减方案,通过复合材料失效准则判断材料是否发生失效,发生失效则需按照复合材料刚度折减方案对材料刚度进行折减。层间损伤部分要确定内聚力单元本构模型,通过二次名义应力准则判断损伤起始。层内损伤部分与层间损伤之间通过应力相互影响。当层内发生损伤时,损伤单元的刚度会逐渐降低,导致载荷重新分布,影响相邻内聚力单元的应力状态。内聚力单元根据新的应力状态判断是否达到层间损伤条件。通过这种载荷的动态分配和更新机制,实现模型中层内失效和层间失效的间接耦合。

1.1 层间失效分析模型

针对复合材料的分层现象,本文采用双线性内聚力模型进行层合板层间的数值仿真分析,如图 1 所示。图中 K 为内聚力单元刚度、 G_c 为内聚力单元断裂能、 σ_c 为内聚力强度。双线性内聚力模型具有计算稳定、物理合理的优点,适用于复合材料、金属和聚合物等多种材料^[11,12]。双线性内聚力模型计算效率高,易于在有限元软件中实现,并且能够准确地模拟复合材料的分层现象,广泛应用于复合材料界面失效、粘接结构和动态断裂力学研究^[13]。

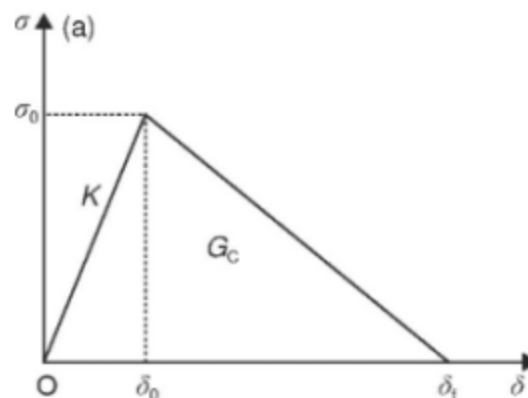


图 1 双线性本构模型

在损伤起始判据方面,选择使用二次名义应力准则如下式。其中: σ_n 表示完全垂直于界面的名义应力; σ_x 表示为第一方向上的名义应力; σ_y 表示为第二方向的名义应力。 N_{max} 、 S_{max} 、

T_{max} 分别表示变形完全垂直于界面、完全在第一或第二剪切方向上的极限名义应力值。

$$\left(\frac{\sigma_n}{N_{max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{T_{max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{S_{max}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

1.2 层合板失效准则

层合板的失效准则采用三维 Hashin 失效准则，该准则现在已经在学术和工程领域得到了广泛应用，且被各大有限元软件集成。本文采用基于应变的 Hashin 失效准则对材料的失效进行判断：

1) 纤维拉伸失效 ($\varepsilon_{xx} \geq 0$) :

$$f_f = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx}}{X_T^e}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{xy}}{S_{12}^e}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{xz}}{S_{13}^e}\right)^2} \quad (2)$$

2) 纤维压缩失效 ($\varepsilon_{xx} < 0$) :

$$f_f = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx}}{X_C^e}\right)^2} \quad (3)$$

3) 基体拉伸失效 ($\varepsilon_{yy} + \varepsilon_z \geq 0$) :

$$f_m = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{yy}}{Y_T^e}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{xy}}{S_{12}^e}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{yz}}{S_{23}^e}\right)^2} \quad (4)$$

4) 基体压缩失效 ($\varepsilon_{yy} + \varepsilon_z < 0$) :

$$f_m = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{yy}}{Y_C^e}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{xy}}{S_{12}^e}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{yz}}{S_{23}^e}\right)^2} \quad (5)$$

式中， f_f 、 f_m 分别为复合材料层合板单层的纤维损伤变量和基体损伤变量； ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} 分别为沿纤维方向、垂直于纤维方向和铺层法向的应变； X_T^e 、 X_C^e 、 Y_T^e 、 Y_C^e 、 S_{12}^e 、 S_{13}^e 、 S_{23}^e 分别为复合材料单层的纵向拉伸失效应变、纵向压缩失效应变、横向拉伸失效应变、横向压缩失效应变和面内剪切失效应变。其中，

$$\begin{aligned} X_T^e &= \frac{X_T}{E_{11}}; X_C^e = \frac{X_C}{E_{11}}; Y_T^e = \frac{Y_T}{E_{22}}; Y_C^e = \frac{Y_C}{E_{22}}; \\ S_{12}^e &= \frac{S_{12}}{G_{12}}; S_{13}^e = \frac{S_{13}}{G_{13}}; S_{23}^e = \frac{S_{23}}{G_{23}}; \end{aligned} \quad (6)$$

式中， X_T 、 X_C 分别为纤维方向的拉伸强度和压缩强度； Y_T 、 Y_C 分别为垂直于纤维方向的拉伸强度和压缩强度； S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23} 分别为相应方向的层内剪切强度； E_{11} 、 E_{22} 、 G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 分别为复合材料单层对应的弹性模量和剪切模量。 f_f 、 f_m 大于 1，说明材料发生了对应模式的失效，则需要对材料属性进行相应退化。

1.3 刚度折减方案

复合材料失效后材料的承载能力将会下降，此时应对材料刚度进行折减。本文采用应变形式的基于断裂韧性的幂指数连续退化模型^[4]，以此描述复合材料的损伤扩展过程，为

$$d_f = 1 - \frac{1}{f_f} e^{-L_f (X_T^e)^2 (1-f_f) / G_f / C_{11}} \quad (7)$$

$$d_m = 1 - \frac{1}{f_m} e^{-L_m (Y_T^e)^2 (1-f_m) / G_m / C_{22}} \quad (8)$$

其中： d_f 、 d_m 分别为纤维损伤状态变量和基体损伤状态变量； C_{11} 、 C_{22} 为刚度矩阵 C 的矩阵元素； L_c 表示单元特征长度，用于减少数值模拟的网格依赖性； G_f 、 G_m 分别表示纤维、基体失效对应的断裂韧性。

通过损伤变量 d_f 、 d_m 分别控制损伤后的刚度折减，其形式如下：

$$C_d = \begin{bmatrix} \alpha C_{11} & \alpha \beta C_{12} & \alpha C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha \beta C_{12} & \beta C_{22} & \beta C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha C_{13} & \beta C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha \beta C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中， $\alpha = (1 - d_f)$ ； $\beta = (1 - d_m)$ 。

使用 ABAQUS/Standard 进行数值模拟过程中，当材料发生损伤后其整体性能发生退化，单元刚度矩阵的减小将导致计算收敛困难。为提高计算收敛性，使用粘性正则化模型对损伤状态变量进行粘性调整，粘性损伤仅用于刚度折减的计算，粘性损伤与损伤的关系如下^[15]：

$$d_x^v = \frac{\Delta t}{\eta + \Delta t} d_{x,old}^v + \frac{\eta}{\eta + \Delta t} d_x \quad (10)$$

式中， Δt 为时间增量； $d_{x,old}^v$ 为前一增量步的粘性正则化损伤变量； η 为粘性系数。

2. 三点弯曲试验与有限元模型

基于本文的渐进损伤分析模型编写了用户材料子程序 (UMAT) 定义了材料的损伤本构关系，通过有限元软件 ABAQUS 调用该程序对碳玻混杂复合材料层合板三点弯曲进行仿真，得到加载过程中载荷与位移的关系曲线，与试验结果进行对比，并分析碳玻混杂复合材料层合板的失效机理。

2.1 碳玻混杂复合材料层合板三点弯曲试验

本小节对碳玻混杂复合材料层合板进行了三点弯曲试验，如图 2 所示，所用试验设备为 Instron Legend 2344 型万能材料试验机；试验参数参照 GB/T 3356-2014 标准^[16]进行设置；采用位移加载方式，加载速率为 2 mm/min，在试验过程中连续采集位移与载荷，当参数出现突变时结束试验，试验后对试验件拍照，得到碳玻混杂复合材料层合板的破坏载荷与破坏模式。

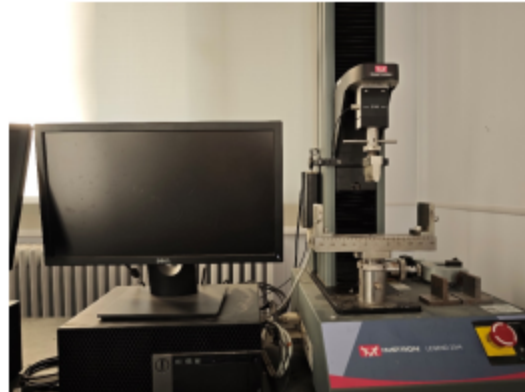


图 2 万能材料试验机

碳玻混杂复合材料层合板试件材料为 ECR16-600 单向玻璃纤维/环氧树脂预浸料、T300 单向碳纤维/环氧树脂预浸料，预浸料单层厚度 0.125 mm，通过手工铺贴，热压成型工艺进行

制备；材料的力学性能如表 1 所示。根据 GB/T 3356-2014 标准要求试件长为 50 mm，宽为 12.5 mm，厚为 2 mm，共 16 层，均为 0° 铺层，其中第 9 层为碳纤层，其他均为玻纤层。加载头与支座半径均为 5 mm，支座跨距为 32 mm，试件安装如图 3 所示。

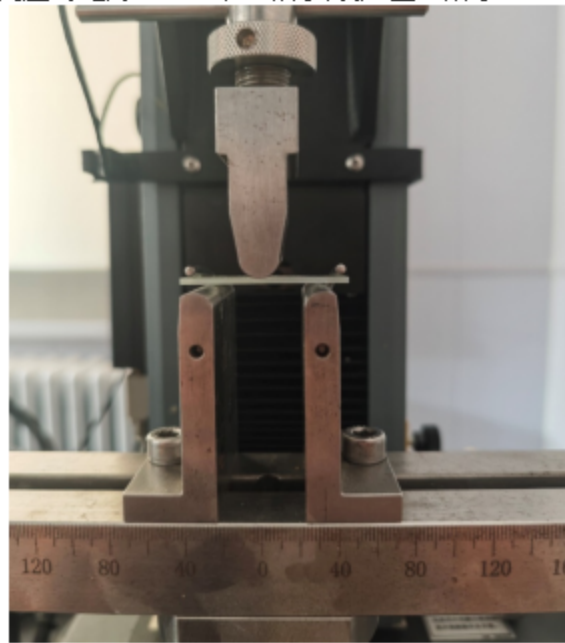


图 3 碳玻混杂层合板试件装夹

表 1 材料力学性能参数

参数	ECR16-600	T300
弹性模型 E_1/MPa	43980	113597
弹性模型 E_2/MPa	14662	1761
弹性模型 E_3/MPa	14662	1761
剪切模型 G_{12}/MPa	3528	7195
剪切模型 G_{13}/MPa	3528	7195
剪切模型 G_{23}/MPa	1482	3986
泊松比 ν_{12}	0.29	0.28
泊松比 ν_{23}	0.35	0.3
纵向拉伸强度 X_T/MPa	1016	1835
纵向压缩强度 X_C/MPa	695	1013
横向拉伸强度 Y_T/MPa	45	45
横向压缩强度 Y_C/MPa	153	249
面内剪切强度 S_{12}/MPa	52	55
纤维断裂韧性 $G_f/(\text{N/mm})$	31.5	106.3
基体断裂韧性 $G_m/(\text{N/mm})$	0.383	0.28

2.2 有限元模型

建立 2.1 节碳玻混杂复合材料层合板三点弯曲试验的有限元模型，如图 4 所示。使用八节点六面体线性积分单元 (C3D8) 对层合板试件进行网格划分，共 16 个铺层，每层厚度为 0.125 mm，与实际试件一致，在厚度方向上每层复合材料层之间插入一层零厚度的八节点内聚力单元 (COH3D8) 以模拟分层损伤，如图 4b 所示，支座和加载头采用解析刚体单元。模型接触设置采用有限滑移算法，法向设置为硬接触，切向约束设置为“罚函数”，摩擦系数设置为 0.2。同时两端支座施加固支边界条件，加载头施加沿重力方向的位移载荷。模型中的层间界面属性采用文献^[17,18]中的数值模拟参数，其中 C-G 界面参数取自碳纤维层数据，列于表 2。

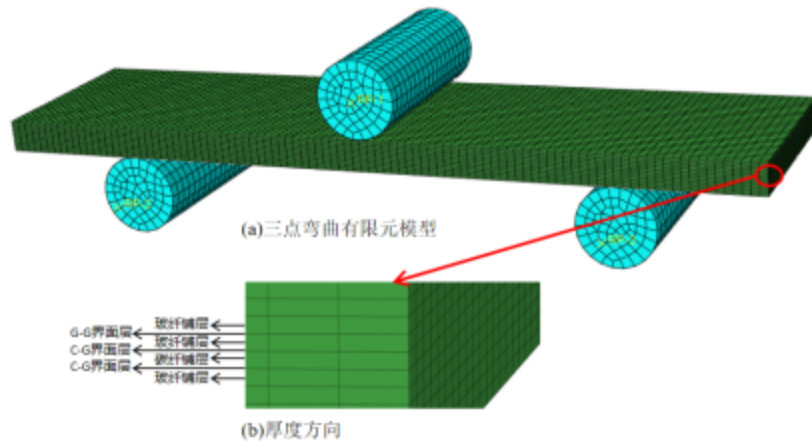


图4 复合材料层合板三点弯曲有限元模型
表2 界面层性能参数

参数	C-G 界面	G-G 界面
弹性模量 E/MPa	3000	4590
I 型断裂韧性 $G_{Ic}/(\text{N}/\text{mm})$	0.28	0.383
II 型断裂韧性 $G_{IIc}/(\text{N}/\text{mm})$	0.79	0.836

3 结果对比与损伤失效分析

3.1 数值分析与试验结果对比

试验与仿真的位移-载荷曲线对比如图 5 所示,从图中可以看出载荷-位移曲线在达到失效载荷后,曲线迅速下降且呈波浪状,这说明碳玻混杂复合材料层合板是逐层断裂破坏。共对试件进行了三组三点弯曲试验,平均失效载荷为 1268.67 N,平均失效位移为 3.34 mm。仿真得到的失效载荷为 1186.16 N,失效位移为 3.22 mm,失效载荷相对误差为 6.51%,失效位移相对误差为 3.59%,可见本文方法的仿真结果与试验结果吻合较好,验证了本文渐进损伤分析模型的有效性。

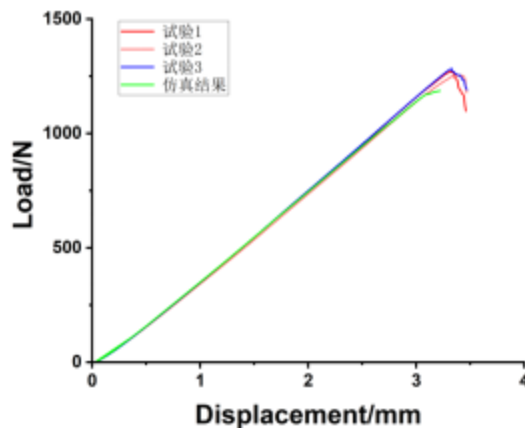


图5 仿真分析位移载荷曲线

3.2 碳玻混杂复合材料层合板损伤失效分析

根据本文的仿真结果可知,碳玻混杂复合材料层合板的失效过程可分为多个阶段。首先,

最开始的损伤模式出现在层合板与加载头接触的区域，该区域内基体单元承受较大压应力，基体发生压缩损伤，如图 6 所示。此时，损伤主要集中在上表面基体层，未对层合板的整体结构造成严重影响。随着加载的继续，加载头接触区域内的基体损伤逐步扩展，整体较大的应力水平进一步导致试件的上表面纤维发生压缩损伤，试件下表面以及层合板内部的碳纤维层发生纤维拉伸损伤。此外，碳纤维与玻璃纤维接触界面层开始表现出层间损伤现象，如图 7 所示。

在这一阶段，碳玻混杂复合材料层合板尚未失去承载能力，且层间并未出现明显的分层现象。但随着载荷的继续增大，层合板内部的层间剪切应力逐渐增大，特别是在碳玻混杂界面层。与其他界面层相比，碳玻混杂界面层的剪切应力更加显著，如图 8 所示。这种过大的层间剪切应力最终导致碳玻混杂界面层的分层失效，如图 9 所示。界面层的分层现象通常会引发进一步的结构破坏，特别是当界面层的粘结强度不足时，分层失效往往是导致复合材料层合板失效的主要原因。

随着界面层分层失效的发生，层间分层损伤迅速在碳玻混杂界面层内由中部区域向两侧扩展。在发生上述分层损伤的同时，碳玻混杂复合材料层内纤维单元等效应力随着压头不断加载也不断增大，试件底部的纤维拉伸程度不断加深，逐层发生纤维断裂失效。此时，层合板的承载能力迅速下降，最终导致试件的整体失效，如图 10 所示。试验结果也证实了这一过程，图 11 中展示了碳玻混杂复合材料层合板的失效情况。其中，图 11a 显示了层合板在加载头受压区域内的基体压缩失效和纤维屈曲现象；图 11b 和 11c 分别展示了受拉层中的纤维拉伸失效与纤维断裂；图 11d 则显示了碳玻混杂界面层发生的分层失效。从图 11 中可以看出，仿真分析结果与试验结果在损伤形貌上的吻合度较高，证明了本文所采用的仿真方法能够有效地模拟碳玻混杂复合材料层合板的弯曲失效过程。

综上所述，本文的仿真结果与实验结果在损伤模式、失效过程以及最终失效状态方面表现出较好的一致性，验证了所提出的渐进损伤分析模型在预测碳玻混杂复合材料层合板损伤和失效行为中的有效性。

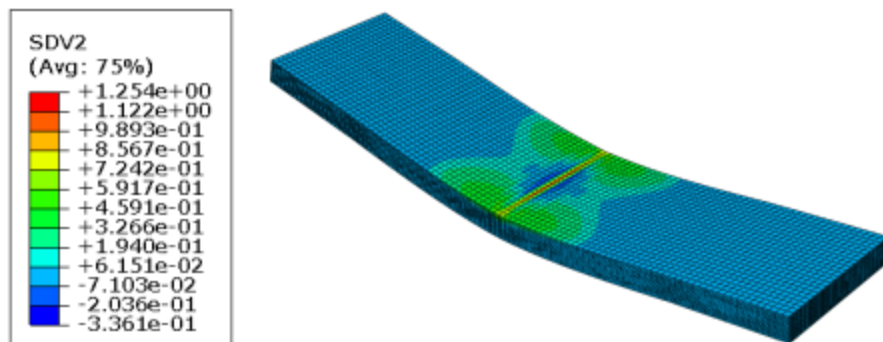
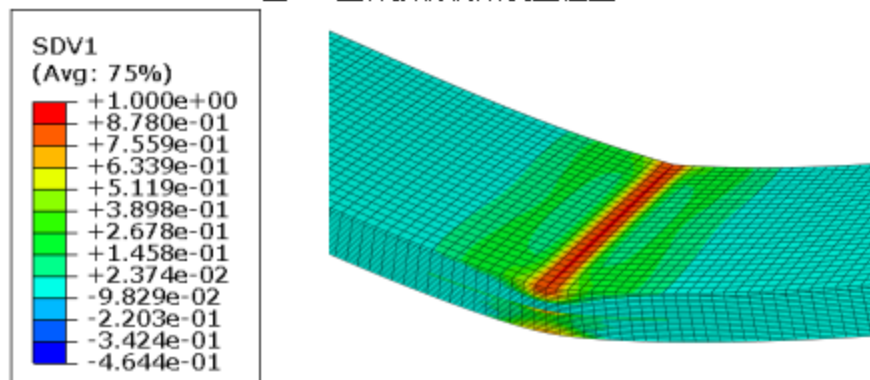
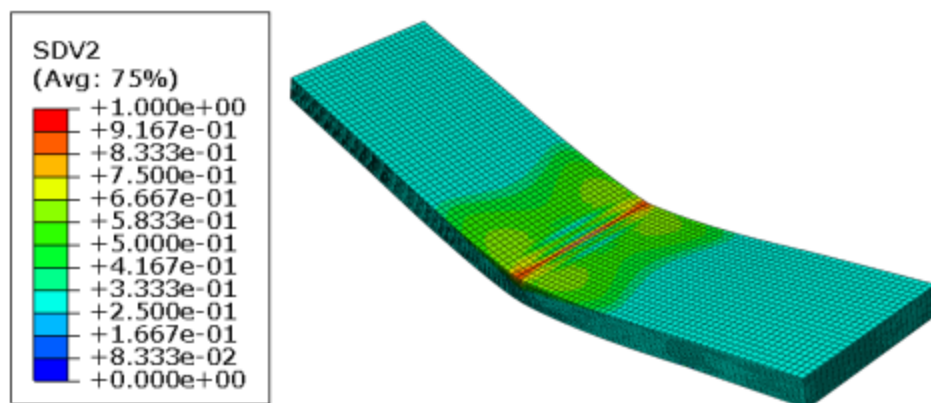


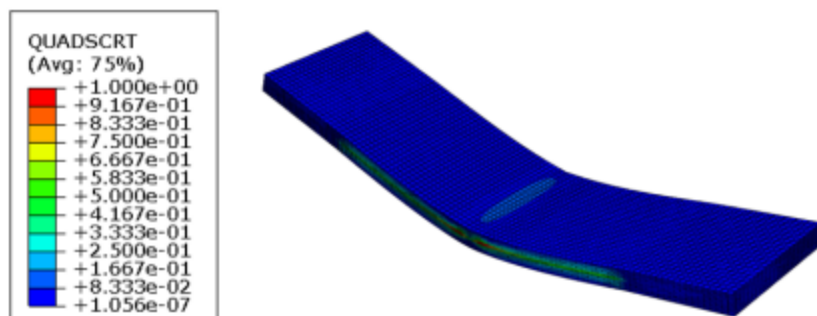
图 6 基体损伤初始发生位置



(a) 纤维损伤



(b) 基体损伤



(c) 层间损伤

图7 层合板损伤扩展情况

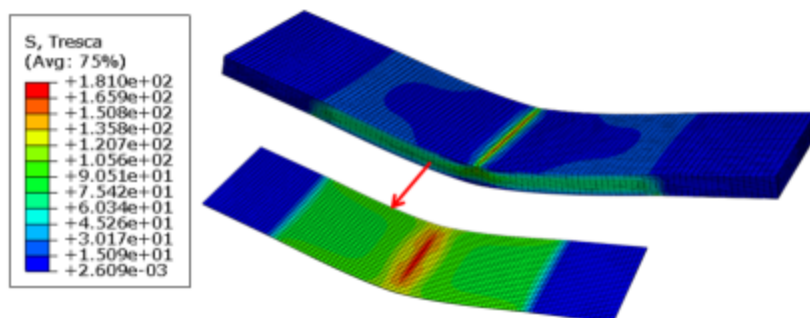


图8 碳玻混杂层合板界面层剪切应力分布

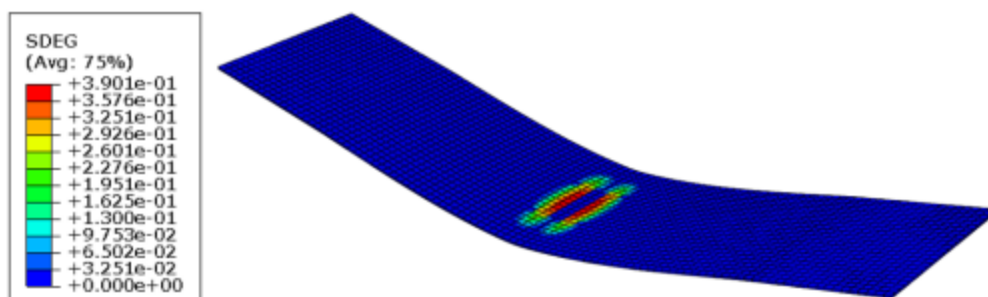
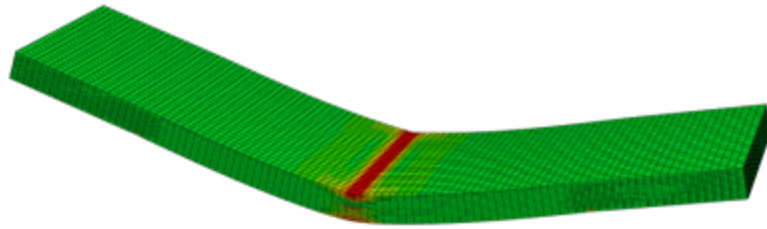
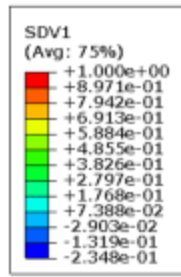
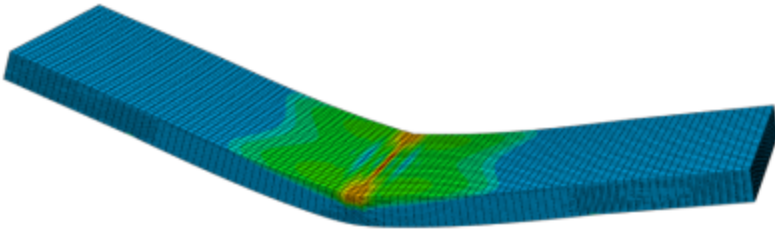
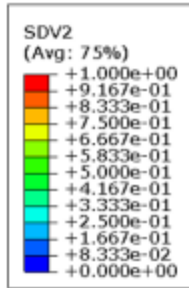


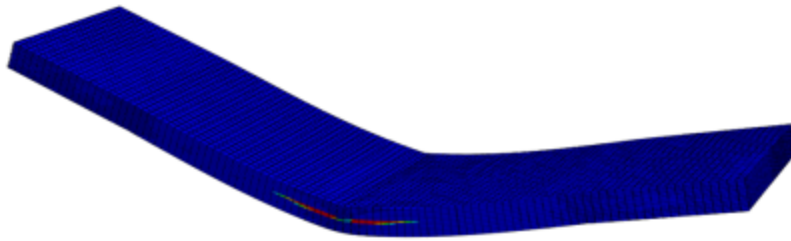
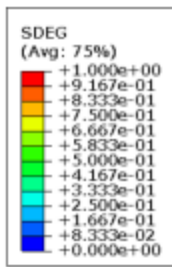
图9 分层失效发生位置



(a) 纤维失效



(b) 基体失效



(c) 分层失效

图 10 失效载荷时层合板失效情况

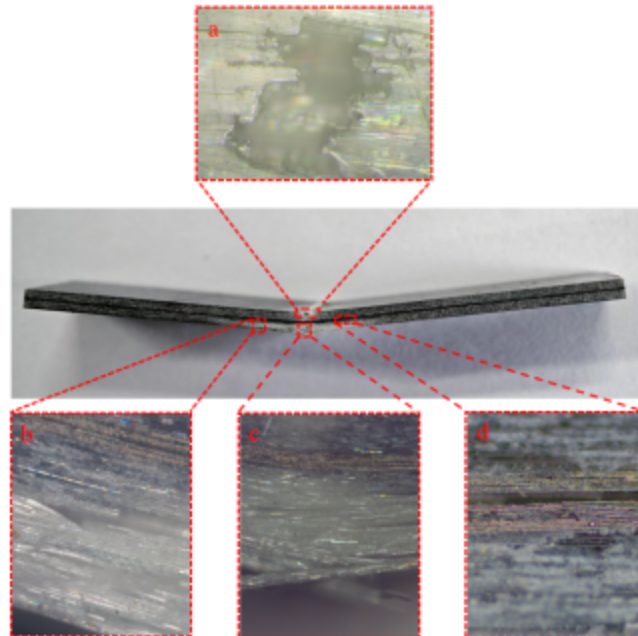


图 11 碳玻混杂复合材料层合板失效情况
(a)纤维/基体压缩失效(b)纤维拉伸失效
(c)纤维断裂(d)碳玻界面层分层失效

4.结论

(1) 本文基于双线性内聚力单元模型、复合材料刚度折减方案,结合三维 Hashin 失效准则建立了碳玻混杂复合材料渐进损伤分析模型,利用该模型对碳玻混杂复合材料层合板三点弯曲进行仿真,有效的模拟了混杂纤维层合板在弯曲载荷下的损伤演化过程,仿真得到的碳玻混杂复合材料层合板的失效形貌、失效载荷及失效位移与试验结构较为符合。

(2) 碳玻混杂复合材料层合板在弯曲载荷的作用下的主要失效模式是受压侧基体压缩失效、纤维屈曲,受拉侧的纤维断裂失效与碳玻混杂界面层的分层失效,分层失效发生后扩展迅速,受拉侧逐层破坏,层合板迅速失去承载能力最终失效,层间剪切应力过大是导致复合材料曲梁发生分层失效的主要原因。

参考文献

- [1] 竺森森. 混杂纤维复合材料车身构件多尺度建模及弯曲载荷工况下耐撞性能研究[D]. 2023.
- [2] 肖远航, 陆承志, 王国军, 等. 风电叶片用碳/玻层内混杂复合材料湿热老化性能. 工程塑料应用[J], 2022, 50(05): 113-120.
- [3] 罗乐. 城轨车辆碳/玻混杂复合材料头罩制备及性能试验研究[D]. 2017.
- [4] Hu Y-I, Yu Y, Wang H. Peridynamic analytical method for progressive damage in notched composite laminates[J]. Composite Structures, 2014, 108: 801-810.
- [5] Tarfaoui M, El Moumen A, Lafdi K. Progressive damage modeling in carbon fibers/carbon nanotubes reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 112: 185-195.
- [6] Tang H, Zhou G, Chen Z, et al. Fatigue behavior analysis and multi-scale modelling of chopped carbon fiber chip-reinforced composites under tension-tension loading condition[J]. Composite Structures, 2019, 215: 85-97.
- [7] Kolasangiani K, Oguamanam D, Bougherara H. Strain-controlled fatigue life prediction of Flax-epoxy laminates using a progressive fatigue damage model[J]. Composite Structures, 2021, 266.
- [8] 龙连春, 侯剑南, 王兆坤, et al. 复合材料层合板热-力作用下的失效研究. 宇航总体技术[J], 2017, 1(02): 33-41.
- [9] 刘方, 张桐欢, 郑鑫超, et al. T700 碳纤维增强复合材料螺栓连接的新进损伤分析. 科学技术与工程[J], 2020, 20(15): 5983-5989.
- [10] 张砚雯, 王旱祥, 于长录, et al. 弯曲载荷下碳/玻复合材料抽油杆失效机制. 中国石油大学学报(自然科学版)[J], 2022, 46(05): 133-140.
- [11] 赵海峰. 反分析确定金属薄膜与陶瓷间界面的力学性能参数. 工程力学[J], 2008(10): 80-85.
- [12] Chandra N, Li H, Shet C, et al. Some issues in the application of cohesive zone models for metal/ceramic interfaces[J]. International journal of solids and structures, 2002, 39(10): 2827-2855.
- [13] 黄刘刚. 内聚力模型的分析及有限元子程序开发[D]. 2010.
- [14] 胡祎乐, 余音, 汪海, et al. 纤维增强复合材料机翼长桁压缩破坏预测方法. 上海交通大学学报[J], 2012, 46(09): 1471-1475+1481.
- [15] Chen J, Ravey E, Hallett S, et al. Prediction of delamination in braided composite T-piece specimens[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(14): 2363-2367.
- [16] 定向纤维增强聚合物基复合材料弯曲性能试验方法[M]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会, 2014: 12.
- [17] 施建伟, 张彦飞, 杜瑞奎, 等. 复合材料层合板三点弯曲分层损伤有限元模拟. 工程塑料应用[J], 2015, 43(02): 60-63.
- [18] Wang L, Zheng C, Luo H, et al. Continuum damage modeling and progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite pressure vessel[J]. Composite Structures, 2015, 134: 475-482.

作者简介：李星宇，大连理工大学硕士。从事复合材料损伤与结构可靠性研究。
电话：13347706026