

## 层合多孔结构的裂纹扩展规律研究

许爽<sup>1</sup> 邓庆田<sup>1,2</sup> 李旺斐<sup>1</sup> 李新波<sup>1,2</sup> 宋学力<sup>1,2</sup> 温金鹏<sup>3</sup>

(1. 长安大学理学院, 西安 710064)

(2. 长安大学西安市结构损伤数字化检测技术重点实验室, 西安 710064)

(3. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 基于六边形和内凹形两种基本构型, 采用实验测试和有限元仿真的方法, 对三点弯曲作用下层合多孔结构裂纹扩展规律进行了研究, 讨论了胞元铺设方向的角度对层合多孔结构破坏形式、承载力和变形的影响。结果表明, 双层模型的裂纹扩展路径会向裂纹扩展抑制能力较弱层的裂纹扩展路径偏转; 强度低的一侧会发生更大的变形, 从而导致模型向强度高的一侧偏转; 在一些角度组合下, 双层模型承载力和韧性相较于对应的单层模型有明显提升。

**关键词:** 层合多孔结构; 三点弯曲实验; 裂纹扩展; 聚乳酸材料

**中图分类号:** O341 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.02.004

## 0 引言

近年来, 随着轻质结构的迅速发展, 多孔结构因具有质量轻、渗透性好、比强度高等优点, 从一系列轻质结构中脱颖而出, 广泛应用于工程与医疗领域<sup>[1-2]</sup>。

迄今为止, 现有的研究主要集中于多孔结构的单层模型, 大多由相同材料制成的周期性单元组成, 许多学者已经使用实验仿真<sup>[3]</sup>和理论<sup>[4-6]</sup>方法探究了其裂纹扩展模式。张欣茹等<sup>[7-8]</sup>基于有限元仿真和实验研究了拓扑形状、单元方向、孔隙率、预制裂纹参数和相对密度对平面多孔结构裂纹扩展的影响。GIBSON等<sup>[9]</sup>提出了一些经验公式来描述多孔结构的断裂韧性与其孔隙率、孔洞形状和分布等结构参数之间的关系。也有学者探究梯度多孔结构的裂纹扩展模式<sup>[10-11]</sup>。SHU等<sup>[12]</sup>提出了在均匀蜂窝结构中改变支板厚度的概念, 通过非均质设计提高均匀蜂窝结构的韧性。对多孔复合材料也有较多的研究<sup>[13]</sup>。LIU等<sup>[14]</sup>以 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 晶须为界面层制备了仿生 $\text{ZrB}_2$ - $\text{SiC}$ 层状陶瓷, 研究其抗弯强度和断裂韧性。也有对复合材料层合板的研究<sup>[15-16]</sup>。赵丽滨等<sup>[17]</sup>从试验研究、理论分析和数值模拟3个方面介绍了单向复合材料层间断裂韧性测试方法和原理, 对多向层合板分层扩展行为进行了试验研究。牟浩蕾等<sup>[18]</sup>对纤维增强复合材料层合试验样件进行拉伸、压缩剪切试验, 分析其破坏模式。有学者将层合板理论引入多孔结构中, 建立层合多孔结

构。马南芳<sup>[19]</sup>采用层合结构的方式提高蜂窝结构的能量吸收性能。贺璞等<sup>[20]</sup>研究了层合多孔圆柱壳在轴向压缩载荷下的承载力性能和变形破坏模式。鲜有对多孔层合结构裂纹扩展的研究。本文在多孔结构的基础上, 以层合板理论为依托, 建立层合多孔结构模型, 探究了层间效应对多孔结构裂纹扩展规律的影响。

本文基于复合材料力学层合板理论, 设计了层合多孔结构板, 通过合理调整每层多孔结构板的孔的构型和铺设方向获取等效力学性能。利用SolidWorks软件进行模型设计, 导入仿真软件进行模拟计算, 并通过3D打印技术制备了实验模型, 通过实验和仿真研究结果分析验证设计和方法的合理性。为功能多孔结构的设计和制备提供了一种新的思路和方法。

## 1 层合多孔结构

采用复合材料层合板设计方法, 以聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)材料为基础材料, 设计了层合多孔结构板。多孔结构板的基本尺寸为 $140\text{ mm}\times 70\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚), 单层结构厚度为 $10\text{ mm}$ , 双层结构每层厚度为 $5\text{ mm}$ 。本文引入了正六边形和内凹形2种基本构型, 并对构型进行旋转操作, 图1为2种基本构型示意图, 其夹角 $\alpha$ 分别为 $120^\circ$ 和 $60^\circ$ , 基本构型旋转角度为 $\beta$ , 其中, 正六边形旋转角度分别为 $15^\circ$ 和 $30^\circ$ , 内凹形则包括了 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 4种不同的旋转角度, 基本

收稿日期: 2023-05-29 修回日期: 2023-08-05

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院NSAF联合基金项目(U1930204)

作者简介: 许爽, 女, 2000年生, 陕西渭南人, 硕士研究生; 主要研究方向为多孔材料和结构力学性能; E-mail: 2022112039@chd.edu.cn。

邓庆田(通信作者), 男, 1980年生, 陕西咸阳人, 博士, 副教授; 主要研究方向为多孔材料和结构力学性能、损伤检测结构; E-mail: dengqt@chd.edu.cn。

引用格式: 许爽, 邓庆田, 李旺斐, 等. 层合多孔结构的裂纹扩展规律研究[J]. 机械强度, 2025, 47(2):28-36.

XU Shuang, DENG Qingtian, LI Wangfei, et al. Study on the crack expansion low of laminated porous structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(2):28-36.

构型的几何参数如表 1 所示。在双层模型中,对所选取构型进行分层组合,模型及其简称如表 2 所示。为了分析裂纹的扩展规律,在下边缘中部预置一个长 11 mm、宽 2 mm 的三角形贯穿裂纹,如图 2 所示。

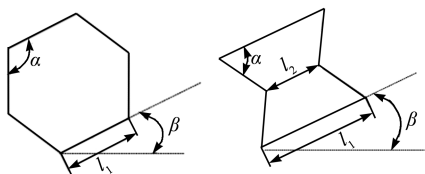


图 1 基本构型

Fig. 1 Basic configuration

表 1 基本构型几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of basic configurations

基本构型 Basic configuration	边长 Length $l_1/\text{mm}$	边长 Length $l_2/\text{mm}$	夹角 Angle $\alpha/(\text{°})$	夹角 Angle $\beta/(\text{°})$
正六边形 Hexagon	1.6	—	120	0、15、30
内凹形 Concave	2.9	1.45	60	0、15、30、 45、90

表 2 模型及简称

Tab. 2 Model and abbreviation

基本构型 Basic configuration	角度 Angle $\theta/(\text{°})$	简称 Abbreviations	角度 Angle $\theta/(\text{°})$	简称 Abbreviations
正六边形 Hexagon	0	LBX-1C-0	15	LBX-1C-15
	30	LBX-1C-30	0/15	LBX-2C-0-15
	15/-15	LBX-2C-15-15	0/30	LBX-2C-0-30
内凹形 Concave	0	NAX-1C-0	15	NAX-1C-15
	30	NAX-1C-30	45	NAX-1C-45
	90	NAX-1C-90	0/15	NAX-2C-0-15
	15/-15	NAX-2C-15-15	0/30	NAX-2C-0-30
	30/-30	NAX-2C-30-30	0/45	NAX-2C-0-45
	45/-45	NAX-2C-45-45	0/90	NAX-2C-0-90

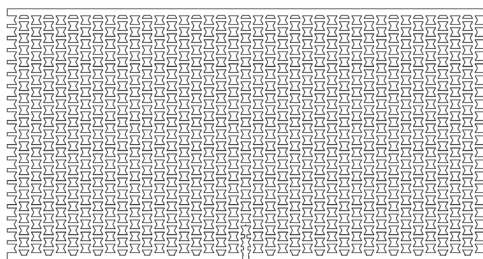


图 2 单层模型

Fig. 2 Single layer model

## 2 实验测试与有限元仿真

### 2.1 实验测试

采用 3D 打印机熔融丝进行模型制备,打印速度为 30 mm/s,如图 3 所示。通过三点弯曲测试层合多孔结构裂纹扩展规律,实验装置如图 4 所示(以 NAX-1C-0 为例),使用微机控制电子万能试验机进行测试,加载速度为 1 mm/min,如图 5 所示。

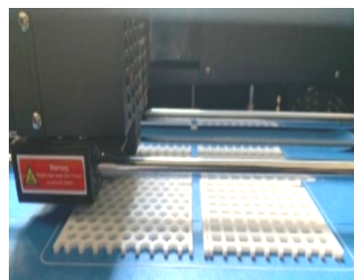


图 3 模型制备

Fig. 3 Model preparation

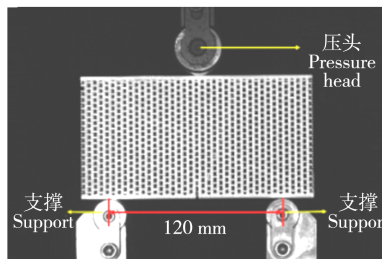


图 4 三点弯曲加载装置

Fig. 4 Three-point bending loading device



图 5 试验机

Fig. 5 Testing machine

### 2.2 有限元仿真

使用 Abaqus 有限元仿真软件对平面多孔结构板进行了准静态三点弯曲模拟,并选用聚乳酸作为材料,材料参数如表 3 所示。实验装置底端两支撑间距为 120 mm。顶端压头及底端两支撑与平面多孔结构板之间的接触形式均为摩擦接触,摩擦因数为 0.3。采用四面体网格对平面多孔结构板进行划分,模型划分网格单元尺寸为 2 mm,网格划分如图 6 所示。设置底端两

支撑面固定端约束,并对顶端压头施加分步位移载荷直至 50 mm。

表 3 PLA 材料参数  
Tab. 3 PLA material parameters

参数 Parameter	密度 Density $\rho/(g/cm^3)$	弹性模量 Modulus of elasticity $E / MPa$	泊松比 Poisson ratio $\mu$	塑性应变 Plastic strain $\varepsilon$	塑性应力 Plastic stress $R / MPa$
值 Value	1.25	2 200	0.3	0 0.006 0.013 3 0.019 9	40.689 1 45.218 6 46.791 7 46.959 9

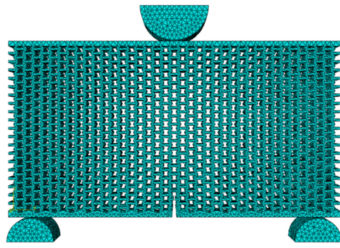


图 6 网格划分  
Fig. 6 Mesh division

### 3 结果分析

#### 3.1 破坏形式

六边形模型的实验结果和有限元仿真结果如表 4

表 4 六边形模型实验结果和仿真结果

Tab. 4 Experimental results and simulation results of hexagonal shape model

模型 Model	实验结果 Experimental result	仿真结果 Simulation result	模型 Model	实验结果 Experimental result	仿真结果 Simulation result
LBX-1C-0			LBX-1C-15		
LBX-1C-30			LBX-2C-0-15 (0°铺层) (0° paving)		
LBX-2C-15-15 (15°铺层) (15° paving)			LBX-2C-15-15 (-15°铺层) (-15° paving)		
LBX-2C-0-30 (0°铺层) (0° paving)			LBX-2C-0-30 (30°铺层) (30° paving)		

所示。由表 4 可知,在六边形模型中,LBX-1C-15 裂纹扩展方向与竖直方向的夹角大约为 15°, LBX-2C-0-15 胞元 15°铺层的裂纹扩展方向相对于 LBX-1C-15 的裂纹扩展方向向竖直方向偏转; LBX-1C-30 的裂纹扩展方向大致为竖直方向,整个裂纹扩展路径呈“S”形, LBX-2C-0-30 胞元 30°铺层的裂纹扩展方向为竖直方向,相较于 LBX-1C-30 的裂纹扩展方向更靠近竖直方向。其他六边形模型的裂纹扩展方向都大致为竖直方向。由于失稳现象, LBX-2C-0-15 上方萌生了新裂纹,且每层新裂纹的扩展方向与预置裂纹扩展方向一致,其他六边形模型均未出现此现象。

单层模型和双层反对称模型都在压头附近出现轻微致密化现象, LBX-2C-0-15 和 LBX-2C-0-30 在压头与支座附近均出现明显致密化现象;且由于失稳现象的出现,在 LBX-2C-0-15 中,压头附近的致密化现象只出现在胞元 15°铺层中, 0°铺层产生了较大变形但只在支座附近出现轻微致密化现象;在 LBX-2C-0-30 中,胞元 30°铺层的致密化现象较 0°铺层更为严重; LBX-2C-0-30 在压头下方出现对称“V”形致密化区域,其他六边形模型均未出现此现象。

内凹形模型的实验结果和有限元仿真结果如表 5 所示。由表 5 可知,在内凹形模型中,NAX-1C-15、NAX-1C-30 裂纹扩展方向与竖直方向的夹角同基本构型转动的角度一致,分别为 15°和 30°;NAX-1C-45 的裂纹扩展方向与竖直方向的夹角大约为 20°。NAX-2C-0-15、NAX-2C-0-30 和 NAX-2C-0-45 的非 0°铺层裂纹扩展方向相对于对应单层模型的裂纹扩展方向向竖直方向偏转。其余模型的裂纹扩展方向都为竖直方向。由于失稳现象,NAX-2C-0-15 上方萌生了新裂纹,且每

层新裂纹的扩展方向与预置裂纹扩展方向一致,其他模型均未出现此现象。

在内凹形单层模型中,NAX-1C-90 产生了较大变形,在压头两侧与支座附近出现了大面积致密化区域;NAX-1C-30 和 NAX-1C-45 产生了轻微变形,在靠近压头处出现了轻微致密化现象。在内凹形双层模型中,由于失稳现象,NAX-2C-0-15 和 NAX-2C-0-90 的 0°铺层出现了较大变形,但未出现致密化区域,非 0°铺层则在压头附近产生了严重的致密化现象。

表 5 内凹形模型实验结果和仿真结果

Tab. 5 Experimental results and simulation results of inner concave shape model

模型 Model	实验结果 Experimental result	仿真结果 Simulation result	模型 Model	实验结果 Experimental result	仿真结果 Simulation result
NAX-1C-0			NAX-1C-15		
NAX-1C-30			NAX-1C-45		
NAX-1C-90			NAX-2C-0-15 (0°铺层) (0° paving)		
NAX-2C-0-15 (0°铺层) (0° paving)			NAX-2C-0-15 (15°铺层) (15° paving)		
NAX-2C-15-15 (15°铺层) (15° paving)			NAX-2C-15-15 (-15°铺层) (-15° paving)		
NAX-2C-0-30 (0°铺层) (0° paving)			NAX-2C-0-30 (30°铺层) (30° paving)		
NAX-2C-30-30 (30°铺层) (30° paving)			NAX-2C-30-30 (-30°铺层) (-30° paving)		
NAX-2C-0-45 (0°铺层) (0° paving)			NAX-2C-0-45 (45°铺层) (45° paving)		

续表

模型 Model	实验结果 Experimental result	仿真结果 Simulation result	模型 Model	实验结果 Experimental result	仿真结果 Simulation result
NAX-2C-45-45 (45° 铺层) (45° paving)			NAX-2C-45-45 (-45° 铺层) (-45° paving)		
NAX-2C-0-90 (0° 铺层) (0° paving)			NAX-2C-0-90 (90° 铺层) (90° paving)		

在所有模型中,反对称结构裂纹扩展路径大致为垂直方向,其余模型的非0°层相对于单层模型都发生了向垂直方向的偏转。在双层模型中,0°层总是先出现裂纹,由于层间黏结力的存在,非0°层受到0°层裂纹扩展力的影响,从而使其裂纹扩展方向向0°层裂纹扩展的方向发生偏转。发生失稳现象的模型,均是朝0°层偏转,导致非0°层产生严重致密化现象。这与双层模型两层的强度差有关,强度低的一侧会发生更大的变形,从而导致模型向强度高的一侧偏转。

### 3.2 承载力和变形

选取压头下压距离和下压过程中的峰值力为判断指标,压头的下压距离越大,则模型韧性越强;压头下压过程中的峰值力越大,则模型的承载力越强;对于压头下压至30 mm前产生严重失稳的模型,选取发生失稳时压头的下压距离为判断指标,发生失稳时压头的下压距离越大,则结构稳定性越好。

在六边形模型中,所有单层模型和LBX-2C-15-15均在压头下压至30 mm之前发生了脆性断裂,导致无法继续加载。六边形模型压头下压距离和下压过程中的峰值力如表6所示,载荷-位移曲线如图7、图8所示。

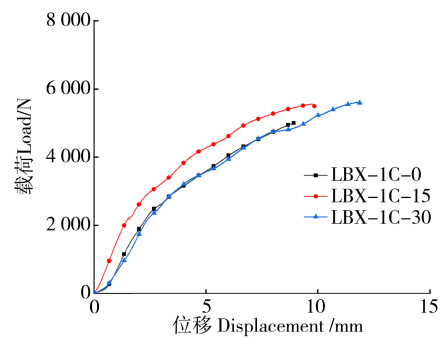
表6 六边形模型压头下压距离与峰值力

Tab. 6 Downforce distance and peak force of the hexagonal model's indenter

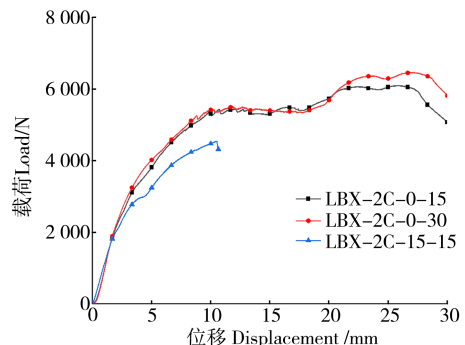
模型 Model	下压距离 Downforce distance/mm	峰值力 Peak force/N
LBX-1C-0	8.92	5 002.26
LBX-1C-15	9.84	5 559.25
LBX-1C-30	11.87	5 610.61
LBX-2C-0-15	30	6 095.67
LBX-2C-15-15	10.79	4 542.54
LBX-2C-0-30	30	6 460.73

由表6、图7和图8可知,六边形单层模型中,0°模型承载力和韧性最弱;30°模型承载力和韧性最强,相较于单层0°和15°,承载力分别提升了12.2%和

0.9%,韧性分别提升了33.1%和20.6%。六边形双层模型中,LBX-2C-0-15相较于单层0°和15°模型,承载力分别提升了21.9%和9.6%,韧性分别提升了236.3%和204.9%;LBX-2C-15-15的承载力和韧性最弱,承载力相较于单层15°模型下降了18.3%,韧性相较于单层15°模型提升了9.7%;LBX-2C-0-30承载力和韧性最强,承载力相较于单层0°、30°,双层15°/-15°和0°/15°模型分别提升了29.2%、15.2%、42.2%和6%,韧性相较于单层0°、30°和双层15°/-15°模型分别提升了236.3%、204.9%和178%。



(a) Single layer model



(b) Double layer model

图7 六边形模型实验载荷-位移曲线

Fig. 7 Experimental load-displacement curve of the hexagonal model

在内凹形模型中,NAX-2C-0-15和NAX-2C-0-90在压头下压至30 mm前发生了严重失稳导致不能加载,单层90°模型和NAX-2C-45-45压头下压至30 mm

实验停止,其余模型均在压头下压至 30 mm 之前发生了脆性断裂导致无法继续加载。内凹形模型压头的下压距离和下压过程中的峰值力如表 7 所示,载荷-位移曲线如图 9、图 10 所示。

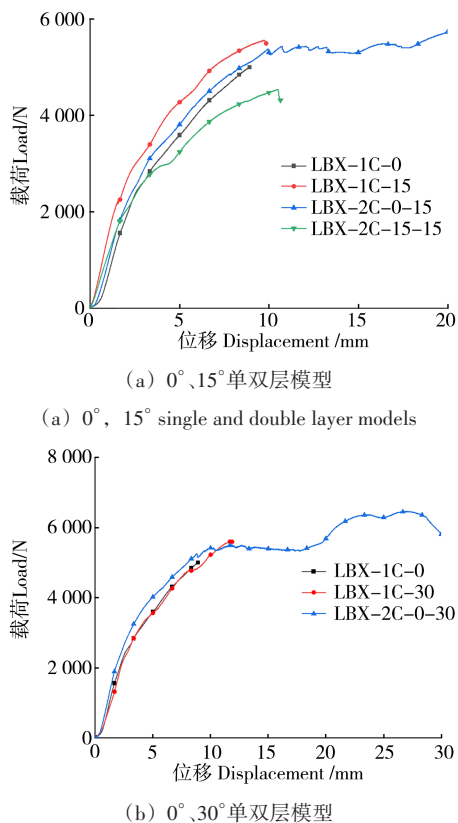


图 8 六边形模型实验单双层对比的载荷-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve for experimental single and double layer comparison of the hexagonal model

表 7 内凹形模型压头下压距离与峰值力

Tab. 7 Downforce distance and peak force of the inner concave shape model's indenter

模型 Model	下压距离 Downforce distance/mm	峰值力 Peak force/N
NAX-1C-0	4.81	3 041.72
NAX-1C-15	8.02	3 055.74
NAX-1C-30	17.36	4 198.10
NAX-1C-45	15.25	3 694.23
NAX-1C-90	30	6 075.97
NAX-2C-0-15	22.40	4 841.12
NAX-2C-15-15	17.64	3 092.35
NAX-2C-0-30	10.61	4 080.50
NAX-2C-30-30	8.15	3 373.65
NAX-2C-0-45	15.49	4 224.67
NAX-2C-45-45	30	4 688.84
NAX-2C-0-90	23.26	4 501.68

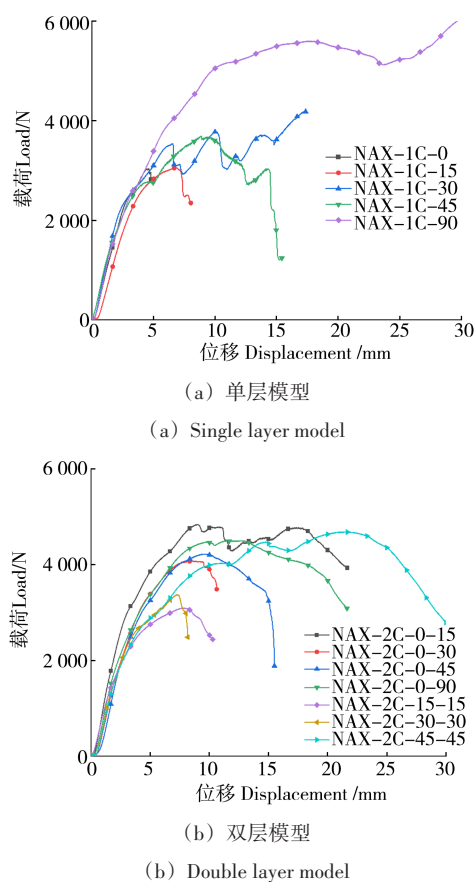
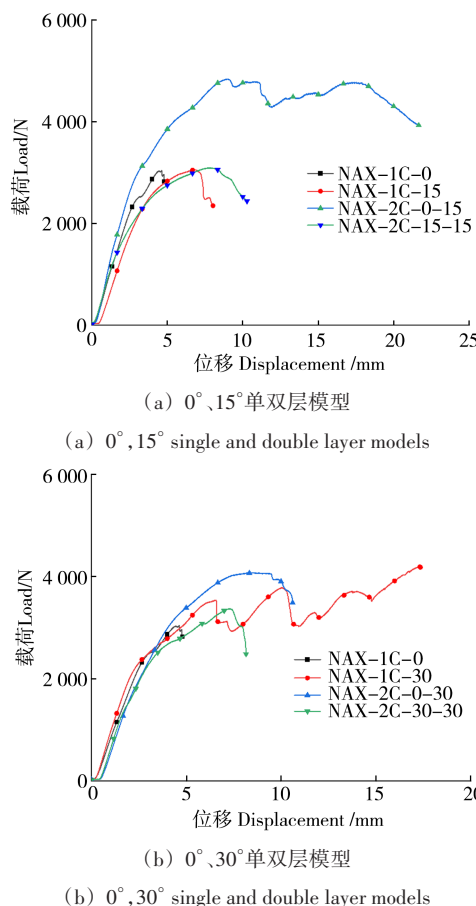
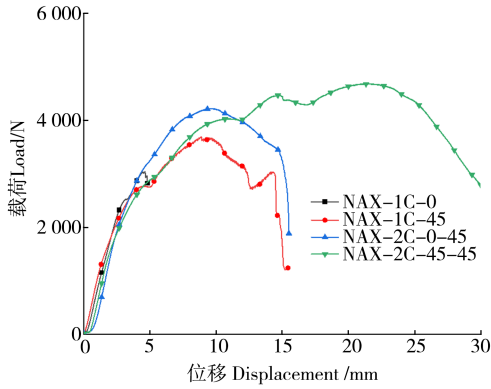


图 9 内凹形模型实验载荷-位移曲线

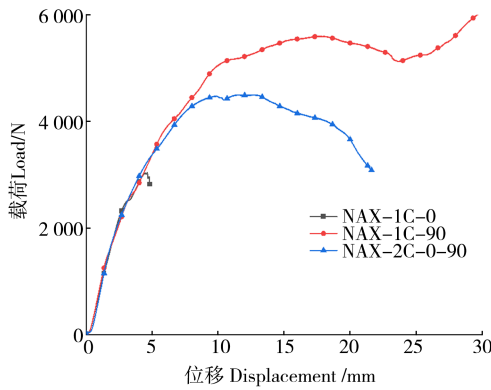
Fig. 9 Experimental load-displacement curve of the inner concave shape model





(c) 0°, 45° 单双层模型

(c) 0°, 45° single and double layer models



(d) 0°, 90° 单双层模型

(d) 0°, 90° single and double layer models

图 10 内凹形模型实验单双层对比的载荷-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curve for experimental single and double layer comparison of the inner concave shape model

由表 7、图 9 可知,内凹形单层模型中,0°模型的承载力和韧性最弱;90°模型的承载力和韧性远大于其他模型,相较于单层 0°、15°、30°和 45°,承载力分别提升了 99.8%、98.8%、44.7%和 64.5%,韧性分别提升了 523.7%、274.1%、72.8%和 96.7%。在内凹形双层模型中,承载力最弱的模型为 NAX-2C-15-15,韧性最弱的模型为 NAX-2C-30-30;承载力最强的模型为 NAX-2C-0-15,韧性最强的模型为 NAX-2C-45-45。

由表 7 和图 10 可知,内凹形双层模型中, NAX-2C-0-15 相较于单层 0°和 15°,承载力分别提升了 59.2%和 58.4%,韧性分别提升了 365.7%和 179.3%; NAX-2C-0-30 相较于单层 0°,承载力提升了 34.2%,韧性提升了 120.6%; NAX-2C-0-30 和 NAX-2C-30-30 相较于单层 30°,承载力分别降低了 2.8%和 17.3%,韧性分别降低了 38.9%和 53.1%; NAX-2C-0-45 相较于单层 0°和 45°,承载力分别提升了 38.9%和 14.4%,韧性分别提升了 222%和 1.5%; NAX-2C-45-45 相较于单层 45°,承载力提升了 26.9%,韧性提升了 96.7%。 NAX-2C-0-90 相较于单层 0°,承载力提升了 48%,韧性提升了 383.6%;相较于单层 90°,承载力降低了 25.9%,韧性降低了 22.5%。

### 3.3 误差分析

图 11~图 14 所示分别为六边形单层、六边形双层、六边形 0°/15°单双层对比和六边形 0°/30°单双层对比模型拟合载荷-位移曲线。本文有限元仿真仅考虑了弹塑性的本构关系,未考虑材料和结构的断裂属性和损伤规律。由图 11~图 14 可知,弹性阶段的实验和仿真结果较吻合,且规律类似,弹性阶段之后的仿真结果相较于实验结果偏大(图 11~14 中, T 为实验结果, S 为仿真结果)。

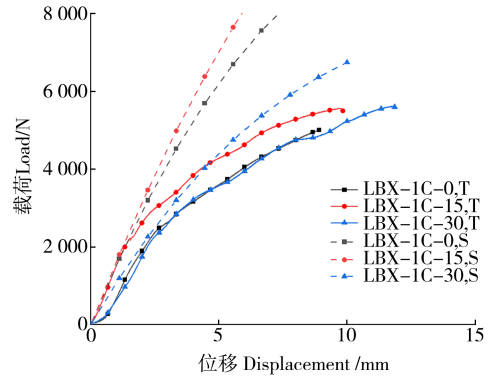


图 11 六边形单层模型拟合载荷-位移曲线

Fig. 11 Fitted load-displacement curve of the hexagonal single layer model

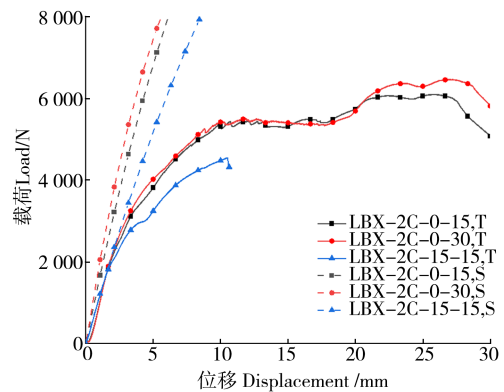


图 12 六边形双层模型拟合载荷-位移曲线

Fig. 12 Fitted load-displacement curve of the hexagonal double layer model

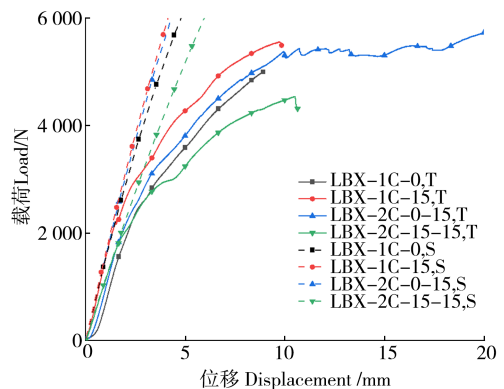


图 13 六边形 0°/15°单双层模型拟合载荷-位移曲线

Fig. 13 Fitted load-displacement curve of the hexagonal 0°/15° single and double layer model

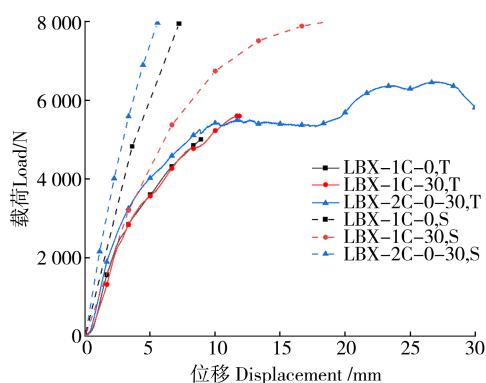


图 14 六边形  $0^{\circ}/30^{\circ}$  单双层模型拟合载荷-位移曲线

Fig. 14 Fitted load-displacement curve of the hexagonal  $0^{\circ}/30^{\circ}$  single and double layer model

## 4 结论

基于六边形和内凹形两种基本构型研究了单元方向、角度组合多孔结构的破坏形式、承载力和变形的影响,经实验测试与有限元分析得到以下主要结论:

1) 由于层间黏结力的存在,双层模型的裂纹扩展路径会向裂纹扩展抑制能力较差层的裂纹扩展路径偏转。

2) 在双层模型中,强度低的一侧会发生更大的变形,从而导致模型向强度高的一侧偏转,发生失稳现象,进而会导致两侧模型发生不同程度的致密化现象。

3) 六边形单层模型中,胞元  $30^{\circ}$  铺层模型承载力和韧性最强;六边形双层模型中, $0^{\circ}$  与  $30^{\circ}$  层合模型的承载力和韧性最强;内凹形单层模型中,胞元  $90^{\circ}$  铺层模型的承载力和韧性最强;内凹形双层模型中,承载力最强的模型为  $0^{\circ}$  与  $15^{\circ}$  层合模型,韧性最强的模型为  $45^{\circ}$  与  $-45^{\circ}$  层合模型。

4) 在一些角度组合下,双层模型承载力和韧性相较于对应的单层模型有明显提升,六边形  $0^{\circ}$  与  $30^{\circ}$  层合模型承载力和韧性提升幅度均最大,内凹形  $0^{\circ}$  与  $15^{\circ}$  层合模型承载力提升幅度最大,内凹形  $0^{\circ}$  与  $90^{\circ}$  层合模型韧性提升幅度最大。

## 参考文献 (References)

[1] 杨智春,邓庆田. 负泊松比材料与结构的力学性能研究及应用[J]. 力学进展,2011,41(3):335-350.  
YANG Zhichun, DENG Qingtian. Mechanical properties of materials and structures with negative Poisson's ratio and applications[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(3):335-350. (In Chinese)

[2] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2004:

1-20.

LIU Peisheng. Introduction to porous materials [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1-20. (In Chinese)

- [3] 李政鸿,徐武,张晓晶,等. 多孔多裂纹平板的疲劳裂纹扩展试验与分析方法[J]. 航空学报,2018,39(7):149-157.  
LI Zhenghong, XU Wu, ZHANG Xiaojing, et al. Fatigue crack extension test and analysis method for porous multi-cracked flat plates [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(7): 149-157. (In Chinese)
- [4] 应宇轩,黄玮,马玉娥,等. 基于相场法的周期性多孔结构断裂行为研究[J]. 力学学报,2022,54(12):3430-3443.  
YING Yuxuan, HUANG Wei, MA Yu'e, et al. Fracture behavior of periodic porous structures by phase field method [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(12): 3430-3443. (In Chinese)
- [5] JELITTO H, SCHNEIDER G A. A geometric model for the fracture toughness of porous materials [J]. Acta Materialia, 2018, 151: 443-453.
- [6] FAN T Y, HU H Y, TANG Z Y. Plastic analysis of central crack specimen of cellular/foam materials [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 99(1): 79-86.
- [7] 张欣茹,邓庆田,李新波,等. 预制裂纹参数及相对密度对平面多孔结构裂纹扩展的影响[J]. 实验力学,2023,38(1):68-80.  
ZHANG Xinru, DENG Qingtian, LI Xinbo, et al. Influences of pre-fabricated crack parameters and relative density on crack propagation in planar cellular structures [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(1): 68-80. (In Chinese)
- [8] 张欣茹,邓庆田,李新波,等. 平面多孔结构裂纹扩展研究[J]. 塑性工程学报,2022,29(4):158-167.  
ZHANG Xinru, DENG Qingtian, LI Xinbo, et al. Study on crack propagation of plane cellular structures [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(4): 158-167. (In Chinese)
- [9] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge University Press, 1997: 101-140.
- [10] 付君健,舒正涛,田启华,等. 功能梯度多孔结构拓扑优化的混合水平集方法[J]. 机械工程学报,2022,58(17):249-260.  
FU Junjian, SHU Zhengtao, TIAN Qihua, et al. A hybrid level set method for topology optimization of functional graded cellular structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(17): 249-260. (In Chinese)
- [11] MANNO R, GAO W, BENEDETTI I. Engineering the crack path in lattice cellular materials through bio-inspired microstructural alterations [J]. Extreme Mechanics Letters, 2019, 26: 8-17.
- [12] SHU X, MAO Y Q, LEI M, et al. Toughness enhancement of honey-comb lattice structures through heterogeneous design [J]. Materials & Design, 2022, 217: 110604.
- [13] SUN D L, YU X C, LIU W J, et al. Laminated biomorphous SiC/Si porous ceramics made from wood veneer [J]. Materials & Design, 2012, 34(2): 528-532.

- [14] LIU Z, WEI C, WANG P, et al. Enhanced mechanical properties of laminated ZrB<sub>2</sub>-SiC ceramics with porous Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> interface[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 17003-17009.
- [15] 肖鹏程, 邓健, 王增贤, 等. 超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料层合板层间断裂韧性[J]. *复合材料学报*, 2023, 41: 1-11.  
XIAO Pengcheng, DENG Jian, WANG Zengxian, et al. Interlaminar fracture toughness of ultra-high molecular weight polyethylene fiber reinforced composite laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 41: 1-11. (In Chinese)
- [16] 朱怀亮, 梁思辉, 余磊. 非规则多孔介质材料层合板的力学性能研究[J]. *南京理工大学学报*, 2006, 30(3): 265-268.  
ZHU Huailiang, LIANG Sihui, YU Lei. Mechanical properties of non-regular hole laminated materials[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2006, 30(3): 265-268. (In Chinese)
- [17] 赵丽滨, 龚愉, 张建宇. 纤维增强复合材料层合板分层扩展行为研究进展[J]. *航空学报*, 2019, 40(1): 166-194.  
ZHAO Libin, GONG Yu, ZHANG Jianyu. A survey on delamination growth behavior in fiber reinforced composite laminates[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(1): 166-194. (In Chinese)
- [18] 牟浩蕾, 张雪晗, 宋东方, 等. 复合材料层合结构破坏机理及压溃吸能特性分析[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(22): 194-200.  
MOU Haolei, ZHANG Xuehan, SONG Dongfang, et al. Damage mechanism and energy-absorption characteristics of composite laminated structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(22): 194-200. (In Chinese)
- [19] 马南芳. 轴向载荷下层合蜂窝板壳结构的力学性能[D]. 西安: 长安大学, 2022: 1-20.  
MA Nanfang. Mechanical properties of laminated honeycomb structures under axial load [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022: 1-20. (In Chinese)
- [20] 贺璞, 邓庆田, 李新波, 等. 层合多孔圆柱壳轴向压缩实验与仿真研究[J]. *机械强度*, 2023, 45(1): 43-49.  
HE Pu, DENG Qingtian, LI Xinbo, et al. Experimental study and simulation on axial compression of laminated cellular cylindrical shell[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2023, 45(1): 43-49. (In Chinese)

## Study on the crack expansion law of laminated porous structure

XU Shuang<sup>1</sup> DENG Qingtian<sup>1,2</sup> LI Wangfei<sup>1</sup> LI Xinbo<sup>1,2</sup> SONG Xueli<sup>1,2</sup> WEN Jinpeng<sup>3</sup>

(1. School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. Xi'an Key Laboratory of Digital Detection Technology for Structure Damage, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(3. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Based on two basic configurations of hexagonal and inner concave shapes, by utilizing experimental test and finite element simulation method, the crack expansion law of laminated porous structures under three-point bending was studied, the influence of cellular element angle of laying direction on failure mode, load capacity, and deformation of the laminated porous structures was discussed. The results indicate that the crack expansion path in the bilayer model deviates towards the weaker layer with less crack expansion inhibition capability. The weaker side experiences greater deformation, leading to a deviation of the model towards the stronger side. Under certain angle combinations, the bilayer model shows significantly improved load-bearing capacity and toughness compared to the corresponding single-layer model.

**Key words:** Laminated porous structure; Three-point bending experiment; Crack expansion; Polylactic acid LA material

Corresponding author: DENG Qingtian, E-mail: dengqt@chd.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China-Chinese Academy of Engineering Physics NSAF Joint Fund (U1930204)

Received: 2023-05-29 Revised: 2023-08-05