

航空航天装备

含预制缺陷 PLA 蜂窝加筋结构承载力分析

辛雨柯¹, 邓庆田^{1*}, 宋学力¹, 李新波¹, 温金鹏²

(1. 长安大学 理学院, 西安 710064; 2. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: **目的** 分析不同加筋构型及预制缺陷形式对蜂窝加筋结构抗弯承载能力的影响。**方法** 以热塑性 PLA 为基材, 通过增材制造技术, 制备含预制缺陷蜂窝加筋结构试件, 考虑缺陷的长度、数量、深度、方向等因素, 采用三点弯曲实验方式, 并结合有限元仿真结果进行综合分析。**结果** 实验得到了结构的位移-荷载关系及破坏情况。线弹性变形阶段, 实验与仿真拟合良好, 该阶段内, 六边构型 PLA 蜂窝加筋曲板结构承载能力整体优于正六边结构, 但后者在后屈曲阶段的残余承载能力更好, 且更不易发生断裂。相较于缺陷长度, 缺陷深度和缺损肋壁数量对结构承载力的影响更为显著。缺陷方向越趋近宽度方向, 结构承载能力越低。**结论** 实际工程中, 应尽可能避免结构中间承载位置处横向加筋肋壁出现缺损, 并充分利用正六边与内六边构型蜂窝加筋结构各自的承载优点。

关键词: 聚乳酸; 多孔蜂窝结构; 加筋板; 预制缺陷; 承载力

中图分类号: TB125

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)01-0026-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.01.004

Analysis of Bearing Capacity of PLA Honeycomb Reinforced Structure with Prefabricated Defects

XIN Yuke¹, DENG Qingtian^{1*}, SONG Xueli¹, LI Xinbo¹, WEN Jinpeng²

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the effect of different reinforcement configurations and prefabricated defect forms on the flexural bearing capacity of honeycomb reinforced structures. With thermoplastic PLA as the base material, the honeycomb stiffened structure specimens with prefabricated defects were prepared by additive manufacturing technology. Considering the length, quantity, depth and direction of the defects, the three-point bending test method and the finite element simulation results were used for comprehensive analysis. The displacement-load relationship and failure of the structure were obtained. The experiment and simulation fitted well in the linear elastic deformation stage. In this stage, the bearing capacity of the hexagonal configuration PLA honeycomb reinforced curved plate structure was better than that of the regular hexagonal structure, but the latter had better residual bearing capacity in the post-buckling stage and was less prone to fracture. Compared with the defect

收稿日期: 2023-07-11; 修订日期: 2023-12-07

Received: 2023-07-11; Revised: 2023-12-07

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 (U1930204); 国家自然科学基金 (52078419)

Fund: National Natural Science Foundation of China-NSAF Joint Fund of Chinese Academy of Engineering Physics (U1930204); The National Natural Science Foundation of China (52078419)

引文格式: 辛雨柯, 邓庆田, 宋学力, 等. 含预制缺陷 PLA 蜂窝加筋结构承载力分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 26-34.

XIN Yuke, DENG Qingtian, SONG Xueli, et al. Analysis of Bearing Capacity of PLA Honeycomb Reinforced Structure with Prefabricated Defects[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 26-34.

*通信作者 (Corresponding author)

length, the defect depth and the number of defective rib walls had a more significant effect on the bearing capacity of the structure. The closer the defect direction was to the width direction, the lower the bearing capacity of the structure was. In practical engineering, the defect of transverse reinforced rib wall at the middle bearing position of the structure should be avoided as much as possible, and the respective bearing advantages of regular hexagon and inner hexagon honeycomb reinforced structures should be fully utilized.

KEY WORDS: polylactic acid; porous honeycomb structure; reinforced plates; prefabrication defects; bearing capacity

加筋结构兼具强度高、质量轻、制造工艺成熟等优点, 广泛运用于各类实际工程, 特别是航天航空领域^[1-6], 舱体内外壁、火箭主发动机结构、飞机机身

机翼和中央翼盒等都有其应用背景。如图 1 所示, 在我国国产大型客机“C919”的制造工艺中, 仅机身前段就存在多组加筋壁板和整体复合材料球面加筋框。



图 1 C919 客机机身部分加筋结构
Fig.1 C919 airframe reinforced structure

加筋结构制造过程中, 可能出现过度加载、材料腐蚀、筋条与蒙皮层黏合差、装配失误等因素, 导致结构存在种种初始缺陷^[7-9]或初始损伤, 因此有必要对含损伤加筋体进行分析。Rodrigues 等^[10]评估了特殊钢加筋板的极限强度, 验证了不同初始缺陷对其承载力的影响, 并基于对 C_x 参数的校准, 提出了一种新的计算方法。Sohan 等^[11]考虑了具有各向同性特性的铝合金和具有正交各向异性特性的碳纤维增强复合材料 (CFRP), 对面内压缩荷载作用下的含缺陷加筋板进行了分析, 对其后屈曲阶段进行了评估。刘璐等^[12]对含有不同脱胶缺陷工形筋条的复合材料加筋板进行了压缩试验研究。结果表明, 30 mm 和 50 mm 的缺陷对试验件承载能力的影响很小, 当缺陷尺寸增至 80 mm 时, 试验件后屈曲承载能力明显下降。成李南等^[13]对复合材料帽形加筋壁板后屈曲破坏过程中黏界面失效问题进行了研究, 基于含预埋缺陷的帽形单筋板, 采用了四点弯曲实验方案及利用内聚力模型 (CZM) 的数值模拟方法。结果表明, 凸缘-蒙皮预埋缺陷对帽形加筋壁板起裂载荷基本没有影响, 筋条内角和填充区界面预埋缺陷会显著降低帽形加筋板的承载能力, 但起始裂纹均发生在筋条内角和填充区的黏接界面。刘存等^[14]采用 GMNIA 方法分析了特征值模态缺陷的幅值、公式表达几何缺陷的形状对加筋板的承载能力的影响, 并对承载能力进行了实验校验。其研究结果表明, 初始缺陷的显著影响表现在后屈曲段, 表现为后屈曲路径和极限承载能力的差异。

研究表明, 采用多孔蜂窝^[15-19]加筋能够充分发挥轻质多孔结构的良好吸能特性, 在降低的质量同时, 提高了材料利用效率, 是近些年来的研究热点之一, 但针对含损伤蜂窝加筋结构的分析目前尚不详尽。赵志彬等^[20]针对复合材料蜂窝结构渐进损伤评估及阶梯式胶接挖补修理问题, 基于蜂窝芯子等效模型和 C3D8R 三维体单元及零厚度三维黏聚力单元 COH3D8, 建立了蜂窝结构渐进损伤分析的三维有限元模型。徐绯等^[21]通过试验结合有限元方法, 针对蜂窝夹芯结构的无损件和 3 种冲击损伤件开展了单轴压缩载荷下的失效模式研究。研究发现, 不同损伤位置可导致结构的整体承载能力不同, 下降范围为 10%~20%。本文通过对含预制缺陷 PLA 蜂窝加筋曲板结构的三点弯曲实验, 结合有限元软件仿真结果, 综合分析加筋构型及缺陷形式对结构抗弯承载能力的影响, 并为进一步的研究提供参考。

1 蜂窝加筋曲板结构

本文建立的 PLA 蜂窝加筋曲板结构如图 2 所示。结构长为 (130 ± 0.3) mm, 宽为 80 mm, 总厚度为 9 mm, 其中加筋层厚度为 6 mm, 蒙皮层厚度为 3 mm, 板弯曲角度为 30° 。加筋层构型分为正六边蜂窝构型、内六边蜂窝构型, 蜂窝单胞边长为 6 mm, 壁厚 (加筋肋厚度) 为 2 mm。

本文所引入的结构预制缺陷如图 3a 所示, 记缺陷长度为 W_1 , 分别取 2、4、6 mm 等 3 组样本值;

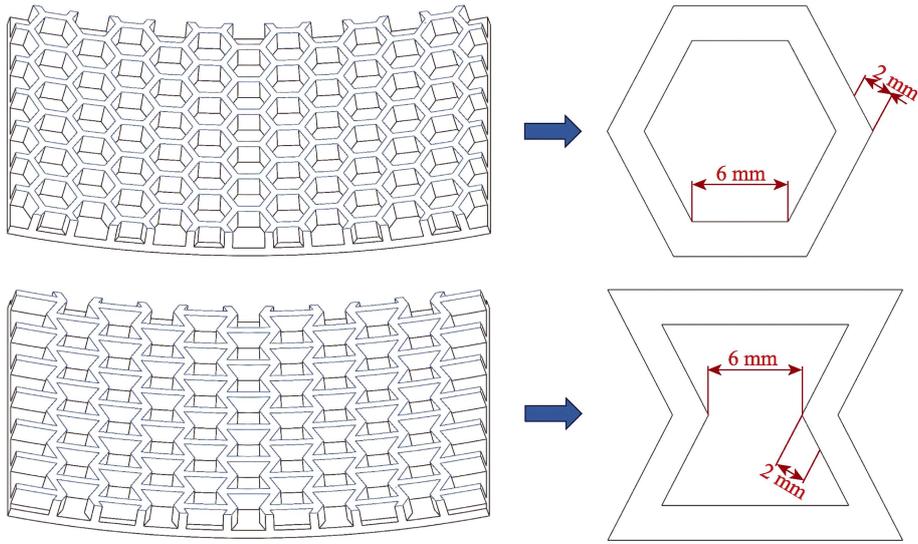


图2 蜂窝加筋曲板结构及其构型
Fig.2 Structure and configuration of honeycomb reinforced curved plate

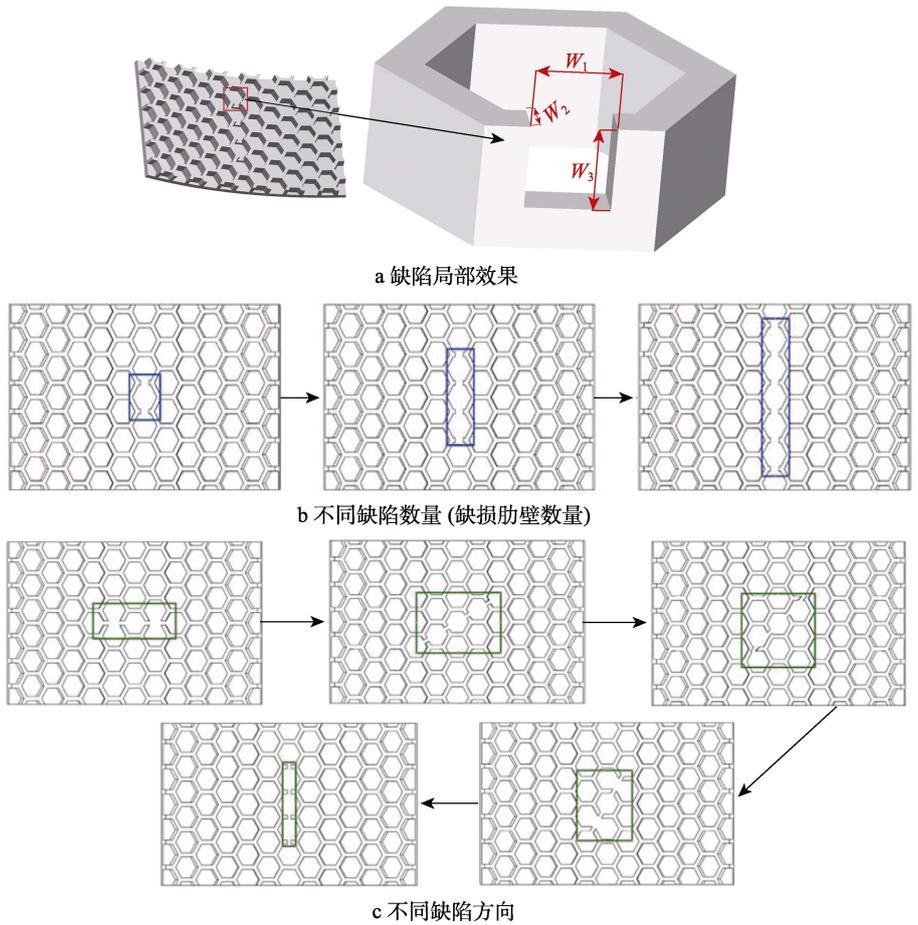


图3 预制缺陷实例
Fig.3 Prefabricated defects: a) local effects of defects; b) different number of defects (number of defective rib walls); c) different defect directions

宽度为 W_2 , 始终保持为 2 mm; 深度为 W_3 , 分别取 2、4、6 mm 等 3 组样本值。含不同数量 (2、4、6)、方向 (0°、30°、45°、60°、90°) 的预制缺陷结构 (以

正六边蜂窝构型为例) 分别如图 3b、c 所示。各组试件编号及其预制缺陷详细参数情况见表 1, 其中 Z 表示正六边构型, N 表示内六边构型。

表 1 各组试件缺陷详细参数

Tab.1 Detailed parameters of each group of specimen defects

试件编号	$W_1 \times W_2 \times W_3$ 参考值/mm	缺陷数量	缺陷方向
Z0	(无缺陷)		
Z1	2×2×6	4	90°
Z2	4×2×6	4	90°
Z3	6×2×6	4	90°
Z4	4×2×6	2	90°
Z5	4×2×6	4	90°
Z6	4×2×6	6	90°
Z7	4×2×6	4	90°
Z8	4×2×4	4	90°
Z9	4×2×2	4	90°
Z10			0°
Z11			30°
Z12			45°
Z13			60°
Z14			90°
N0	(无缺陷)		
N1	2×2×6	4	90°
N2	4×2×6	4	90°
N3	6×2×6	4	90°
N4	4×2×6	2	90°
N5	4×2×6	4	90°
N6	4×2×6	6	90°
N10			0°
N11			30°
N12			45°
N13			60°
N14			90°

备, 基材为 PLA (聚乳酸纤维)^[22-25], 其具有良好的热稳定性、可加工性、抗拉强度及延展度, 广泛应用于 3D 打印及科研试剂制备领域。首先制备标准狗骨试件进行材料检测, 使用万能试验机将标准狗骨试件拉伸至断裂停止, 通过测得的名义应力应变曲线 (如图 4 所示) 计算出 PLA 材料属性参数: 弹性模量 $E \approx 1750 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu \approx 0.3$, 屈服应力 $\sigma_s \approx 35.93 \text{ MPa}$ 。

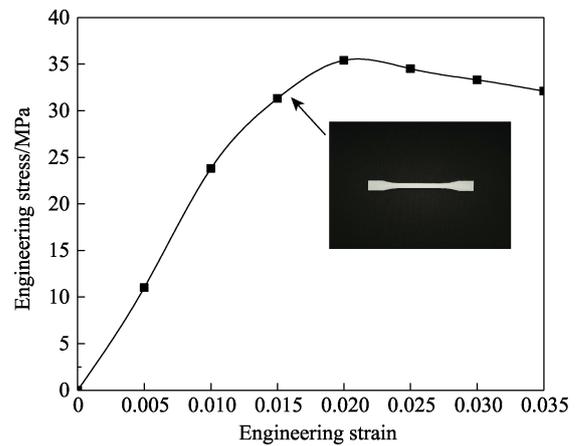


图 4 PLA 基材标准狗骨试件及其名义应力应变曲线
Fig.4 Standard dog bone specimen of PLA substrate and its nominal stress-strain curve

综合考虑打印精度和试件尺寸, 在 3D 打印切片软件 JGcreat 中的具体参数设置如下: 打印层高为 0.1 mm, 打印环境温度为 210 °C, 打印平台温度为 50 °C, 总体打印速度为 30 mm/s, 空驶速度与起始层速度分别为 30、8 mm/s。

本文采用三点弯曲实验方案, 执行标准为 GB/T 14452—93, 以准静态缓慢加载, 加载速度始终保持为 1 mm/min。实验过程由微机控制电子万能试验机控制, 以位移传感器数据为指标, 试件下压位移达到 30 mm 或发生断裂时, 结束加载, 入口力大小为 5.0 N。通过高速摄像设备记录实验过程中的正面变形形貌图像。试件制备与实验设备如图 5 所示。

2 研究方法

2.1 试件制备及实验测试

各组试验件均通过 3D 打印熔融沉积工艺进行制

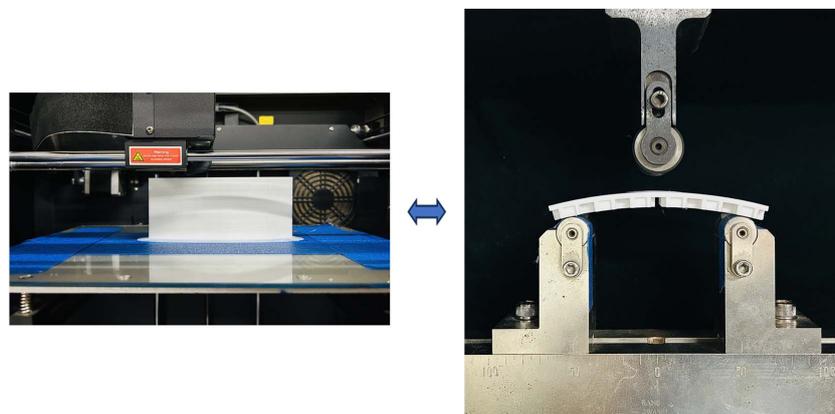


图 5 试件制备与实验设备
Fig.5 Specimen fabrication and experimental equipment

2.2 有限元仿真

应用 ANSYS/Static Structural 有限元软件对结构进行仿真分析。PLA 蜂窝加筋曲板结构采用四面体单元 Tetrahedrons 进行离散,单元大小为 2.4 mm,压头及支座采用结构钢,单元类型为 Hex Dominant,压头及支座与加筋结构的接触面摩擦系数为 0.2。结构的有限元模型如图 6 所示。

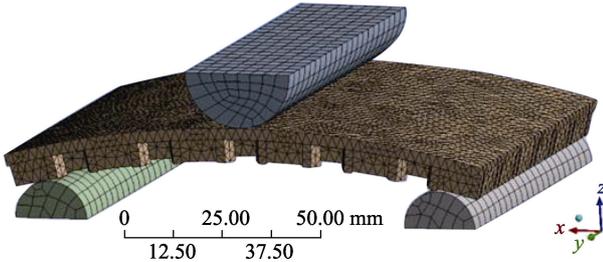


图 6 蜂窝加筋曲板结构有限元模型
Fig.6 Finite element model of honeycomb reinforced curved plate structure

3 结果讨论与分析

观察含预制缺陷 PLA 蜂窝加筋曲板结构三点弯曲实验过程可知:加载初始阶段,荷载快速上升;加载至峰值荷载时,观察到缺陷肋壁与蒙皮层交界处产生开裂,并伴随脆裂声响;继续加载,裂纹随之扩张,蒙皮层中间位置也出现沿试件宽度方向的裂纹,大部分试件卸载后可见加筋层与蒙皮层交界处产生脱裂破坏。

部分内六边蜂窝构型 (N0、N1、N3、N4) 试件达到峰值荷载后随即发生断裂,残缺试件中间承载位置出现贯穿整个蒙皮层的纵深裂纹。结合正面变形形貌可知,裂纹在较短时间内产生,并快速扩展,导致试件沿中轴线发生断裂。Z6、N6 在整个变形过程中没有发生开裂,卸载后观察到蒙皮层完整性良好。实验和仿真得到的结构荷载-位移曲线对比如图 7 所示。

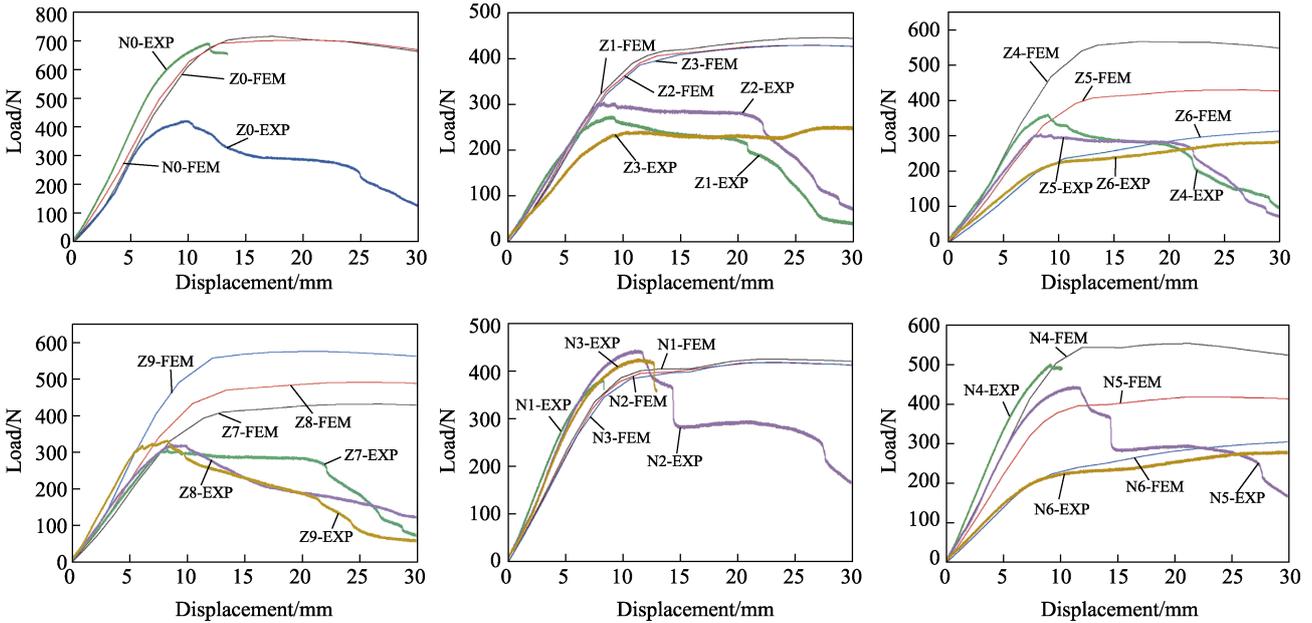


图 7 蜂窝加筋曲板结构荷载位移曲线对比
Fig.7 Comparison of load displacement curves of honeycomb reinforced curved plate structure

图 7 表明,实验阶段各组试件的位移荷载关系在后屈曲阶段呈现出明显差异。除部分试件断裂使曲线中断外,Z1、Z2、Z4、Z5、Z7 均在达到峰值荷载后,承载力将保持一段时间的相对稳定,即随着下压位移增加,荷载没有显著变化,类似于平台期,此时加筋肋已经开裂,蒙皮层为主要承载部位。继续加载,当蒙皮层产生纵深裂纹后,结构承载力再次下降,并最终都趋于 0,说明各组试件最终失效模式相似。N2、N5 后屈曲阶段承载力下降更为显著,曲线存在多次陡降现象,结合正面变形形貌情况可知,曲线每次陡降即对应一次开裂情况。Z6、N6 中间承载位置处沿

试件长度方向的六根加筋肋壁均存在缺损,实际加载过程主要由比刚度、比强度更高的实心蒙皮承载,得益于热塑性 PLA 基材的高韧性,蒙皮层受到弯矩剪力的共同作用,但并未产生明显裂纹,因此曲线变化规律较特殊。结合位移荷载关系与试件开裂状况可知,裂纹是导致结构承载力下降的主要因素。部分试件的危险应力分布与实验开裂情况对比如图 8 所示。

图 8 表明,各组试件出现裂纹位置均为其局部应力较大区域。由于仿真未考虑 PLA 基材加筋结构产生裂纹后的弹塑性本构,以及打印瑕疵、支座滑移等潜在误差因素,因此对后屈曲阶段参考价值有限,但

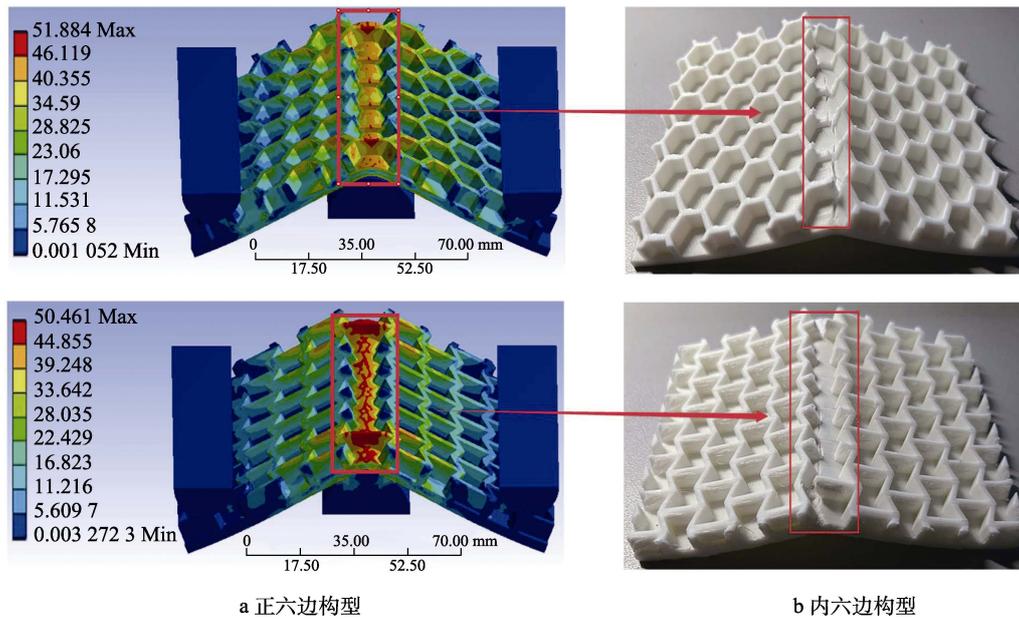


图 8 危险应力分布与实验开裂情况

Fig.8 Hazardous stress distribution and experimental cracking: a) regular hexagonal configuration; b) internal hexagonal configuration

线弹性变形阶段实验与仿真拟合良好。各组试件的实验峰值荷载见表 2。

表 2 各组试件实验峰值荷载
Tab.2 Peak load of each group of specimens during experiments

试件编号	峰值荷载/N	试件编号	峰值荷载/N
Z0	423	N0	693
Z1	276	N1	384
Z2	308	N2	446
Z3	256	N3	427
Z4	364	N4	502
Z5	308	N5	447
Z6	284	N6	283
Z7	309		
Z8	322		
Z9	333		

对比表 2 中数据可知, 预制缺陷形式相同时, 内六边蜂窝构型加筋曲板结构相较正六边具有更高的峰值荷载, 其中 N0 的峰值荷载比 Z0 提高约 38.96%, N2 比 Z2 提高约 30.94%。内六边结构具有一定的负泊松比效应^[26-27], 能够在线弹性变形阶段更好地抑制胞元向两侧膨胀变形的趋势, 从而提高线弹性变形阶段的平均承载力与极限承载力。进入后屈曲阶段, 裂纹的产生及扩展使得加筋层加固效果明显下降, 此时内六边结构更容易发生断裂。而正六边结构情况相反, 线弹性变形阶段承载力低于内六边结构, 但 10 组实验试件均完成了 30 mm 的预定下压位移, 未发

生断裂。其中 Z2、Z5 的剩余承载力最高, 下压位移 20 mm 时, 其承载力仅比峰值荷载下降约 6.8%。卸载后观察到的现象表明, 正六边结构弹性变形量高于内六边结构。

对比无缺陷试件 (Z0、N0), N1 的峰值荷载降低得最多 (44.58%), 其次为 N3 (38.38%), Z4 的峰值荷载降低得最少 (13.95%), 各组正六边结构峰值荷载平均降低 28.69%, 内六边结构平均降低 36.33%, 表明肋壁缺损对后者承载力影响更大。对比 Z1、Z2、Z3 及 N1、N2、N3 的实验结果可知, 预制缺陷长度 W_1 对结构的影响并不显著。变形较小时, 各组荷载位移曲线几乎重合, 由于加载的连续性, 肋壁如果存在贯穿厚度方向 (W_2 方向) 的损伤, 肋壁将丧失加筋效果, 从而使结构整体应力分布规律发生改变。不论正六边结构或内六边结构, W_1 取 4 mm 时, 峰值荷载均最高 (相较 W_1 取 2、6 mm)。对比应力分布云图可知, 缺陷长度为 4 mm 时, 肋壁最大应力 (危险应力) 数值小于其他各组试件, 表明此类缺陷形式下结构的承载力较高。

中间位置处缺损肋壁数量对结构承载力的影响更为显著, 随着缺损肋壁数量的增加, 线弹性变形阶段荷载位移曲线明显下移, 等效弹性模量减小, 承载能力降低, Z4 峰值荷载比 Z5 下降了约 15.38%, N4 峰值荷载比 N5 下降了约 11.16%。随着缺陷深度 W_3 的减小, 结构承载能力提高, 主要体现在线弹性变形阶段加筋肋壁仍能保持部分有效承载, 但对峰值荷载影响较小。 W_3 取 6mm 时, 峰值荷载仅比取 2 mm 时降低约 7.20%。不同缺陷方向的 PLA 蜂窝加筋曲板结构荷载位移曲线如图 9 所示。

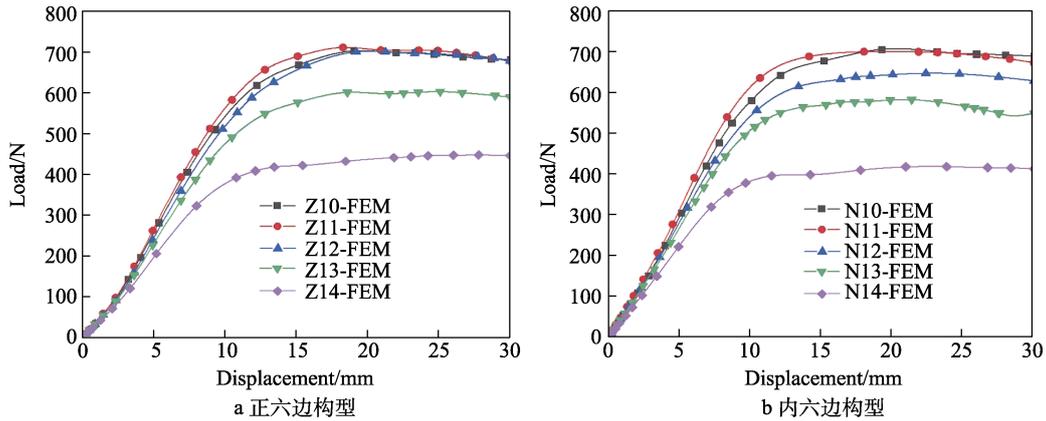


图9 缺陷方向对蜂窝加筋曲板结构承载力的影响

Fig.9 Effect of defect direction on bearing capacity of honeycomb reinforced curved plate structure: a) regular hexagonal configuration; b) internal hexagonal configuration

由图9可知,当缺陷方向逐渐趋近试件宽度方向(90°方向),结构承载力将受到影响,趋于90°时的影响最大。以正六边结构为例,缺陷方向为0°、30°、45°、60°、90°时,对应的峰值荷载分别为693、723、689、589、430 N。90°方向时,峰值荷载最低;30°方向时,峰值荷载最高。此时结构仅部分胞元的侧向加筋肋壁存在缺陷,而作为主要承载部位的横向加筋肋壁均完好,因此平均承载力与极限承载力均较高,内六边结构的影响规律与正六边结构相似。

4 结论

1) PLA加筋壁板结构弯曲试验中,破坏形式表现为基材层间纤维脱黏、开裂引起的结构失效,仅从正面变形形貌无法有效观察裂纹延展过程,需结合力-位移曲线进行分析。正六边构型结构达到峰值荷载后,仍具有良好的残余承载能力,在后屈曲阶段不易发生断裂。内六边构型结构的峰值荷载高出正六边构型结构约38.96%,其负泊松比效应在弹性变形阶段抑制了胞元向两侧膨胀变形的趋势,提升了加筋层的加固效果。

2) 结构肋壁处缺损横向长度的影响相对较小,而缺损深度和数量的影响更为显著,工程中应尽量避免出现贯穿肋壁深度方向的裂纹或损伤,以保持中间肋壁作为主承力部位的完整性。预制缺陷相同时,正六边构型结构峰值荷载下降约28.69%,内六边构型结构峰值荷载下降约36.33%,表明后者对肋壁损伤更敏感。当缺陷方向逐渐趋近试件宽度方向(90°方向),结构承载力将受到影响,越趋于90°时,影响越显著。

参考文献:

- [1] 熊健,李志彬,刘惠彬,等. 航空航天轻质复合材料壳体结构研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1629-1650.
- [2] XIONG J, LI Z B, LIU H B, et al. Advances in Aerospace Lightweight Composite Shell Structure[J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2021, 38(6): 1629-1650.
- [2] 谭翔飞, 谭鹏达, 何宇廷, 等. 航空碳纤维增强树脂基复合材料加筋壁板吸湿行为[J]. 材料工程, 2018, 46(12): 61-69.
- [2] TAN X F, TAN P D, HE Y T, et al. Moisture Behavior of Aeronautic Carbon Fiber Reinforced Resin Composite Stiffened Panel[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(12): 61-69.
- [3] 尹翔, 冯宇, 张辉, 等. 航空复合材料短柱加筋板压缩性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(12): 55-59.
- [3] YIN X, FENG Y, ZHANG H, et al. Experimental Study on the Compressive Performance of Aero short-Beam Composite Stiffened Panel[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(12): 55-59.
- [4] 熊家林, 王轲, 周苏枫. 加筋板在复杂载荷下的振动疲劳寿命分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(9): 12-17.
- [4] XIONG J L, WANG K, ZHOU S F. Vibration Fatigue Life Analysis of Stiffened Plates under Complex Loads[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 12-17.
- [5] 彭涛, 韩鹏程, 刘兴强, 等. 基于混合 FE-SEA 方法的加筋板宽频隔声预计[J]. 装备环境工程, 2022, 19(9): 32-38.
- [5] PENG T, HAN P C, LIU X Q, et al. Prediction of Broadband Sound Insulation of Stiffened Panels Based on Hybrid FE-SEA Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 32-38.
- [6] 卢文书, 马元春, 梁伟, 等. 机身复合材料加筋板壳的稳定性及强度分析系统[J]. 航空学报, 2009, 30(5): 895-900.
- [6] LU W S, MA Y C, LIANG W, et al. Analysis System of Stability and Strength for Airframe Composite Stiffened

- Plate/Shell[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(5): 895-900.
- [7] 申志彬, 张维星. 预制缺陷柱壳结构的等效裂纹分析方法[J]. *国防科技大学学报*, 2014, 36(5): 155-161.
SHEN Z B, ZHANG W X. Equivalent Crack Analysis Method of the Cylindrical Shell with Prefabricated Defects[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(5): 155-161.
- [8] 胡昌明, 王翔, 刘仓理, 等. 预制缺陷的 K9 玻璃层裂特性研究[J]. *力学学报*, 2011, 43(6): 1125-1132.
HU C M, WANG X, LIU C L, et al. Spallation Characteristics of K9 Glass with Prefabricated Defects[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(6): 1125-1132.
- [9] 安妮, 宋天舒, 赵明. 含缺陷功能梯度压电材料的动态断裂行为分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(7): 126-134.
AN N, SONG T S, ZHAO M. Dynamic Fracture Behavior Analysis of Functionally Graded Piezoelectric Materials with Defects[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(7): 126-134.
- [10] RODRIGUES F, DA S VELLASCO P C G, DE LIMA L R O, et al. Structural Assessment of Stainless Steel Stiffened Panels[J]. *Structures*, 2023, 57: 105162.
- [11] SOHAN R, LIKITH S, SAI J, et al. Linear, Nonlinear and Post Buckling Analysis of a Stiffened Panel with Cut-outs[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2022, 1248(1): 012078.
- [12] 刘璐, 关志东, 徐荣章, 等. 脱胶缺陷尺寸对复合材料加筋板屈曲及后屈曲特性的影响[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3): 749-758.
LIU L, GUAN Z D, XU R Z, et al. Effects of Debond Size on Buckling and Post-Buckling Behaviors of Composite Stiffened Panels[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 749-758.
- [13] 成李南, 徐思文, 陈向明, 等. 含预埋缺陷复合材料帽形加筋壁板界面失效研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2022(8): 28-34.
CHENG L N, XU S W, CHEN X M, et al. Analysis of Interfacial Failure in Omega Stiffened Composite Panel with Embedded Defect[J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(8): 28-34.
- [14] 刘存. 初始几何缺陷对翼面结构承载能力影响[J]. *航空计算技术*, 2022, 52(6): 35-39.
LIU C. Influences of Initial Geometrical Imperfections on Ultimate Bearing Capacity of Wing Structure[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2022, 52(6): 35-39.
- [15] 张武昆, 谭永华, 高玉闪, 等. 周期性轻质多孔结构在能量吸收和振动方面的研究进展[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(8): 1-19.
ZHANG W K, TAN Y H, GAO Y S, et al. Research Progress on Energy Absorption Properties and Vibration of Periodic Lightweight Porous Structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(8): 1-19.
- [16] 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 Y X, HUANG W, MA Y 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.
- [17] 郭春霞, 赵冬, 孙永涛, 等. 正弦负泊松比多孔蜂窝梁平面内三点弯吸能性能实验研究[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(6): 2404-2409.
GUO C X, ZHAO D, SUN Y T, et al. Energy Absorption Property of Sinusoidal Auxetic Cellular Honeycomb Beam under In-Plane Three-Point Bending Test[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(6): 2404-2409.
- [18] 孟晗, 辛锋先, 卢天健. 多孔纤维吸声材料填充蜂窝结构的声学性能[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44(6): 599-609.
MENG H, XIN F X, LU T J. Acoustical Properties of Honeycomb Structures Filled with Fibrous Absorptive Materials[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2014, 44(6): 599-609.
- [19] BAI X M, WANG S W, DONG C F, et al. Porous Honeycomb-Like C_3N_4/rGO Composite as Host for High Performance Li-S Batteries[J]. *Science China Materials*, 2019, 62(9): 1265-1274.
- [20] 赵志彬, 谢逸夫, 刘志琪, 等. 复合材料蜂窝结构渐进损伤评估及挖补修理研究[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(5): 1047-1053.
ZHAO Z B, XIE Y F, LIU Z Q, et al. Study on Progressive Damage Assessment and Scarf Repair of Composite Honeycomb Structure[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(5): 1047-1053.
- [21] 徐绯, 刘亚各, 闫慧敏. 蜂窝夹芯结构冲击损伤后的压缩行为研究[J]. *应用力学学报*, 2013, 30(5): 726-730.
XU F, LIU Y G, YAN H M. Honeycomb Sandwich Composite Structure with Pre-Damage under Uniaxial Compression[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2013, 30(5): 726-730.
- [22] 李鹏飞, 江龙, 黄云, 等. 紫外光阻隔型低分子量聚乳酸的合成及结构性质研究[J]. *高分子学报*, 2023, 54(2): 206-216.
LI P F, JIANG L, HUANG Y, et al. Synthesis and Structural Properties of UV-Blocking Low Molecular Weight Polylactide[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2023, 54(2): 206-216.
- [23] 单梦瑶, 杨操, 张世科, 等. 聚乳酸增强增韧的研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(3): 183-190.
SHAN M Y, YANG C, ZHANG S K, et al. Progress in Reinforcing and Toughening of Polylactic Acid[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38(3): 183-190.

- 183-190.
- [24] 刘畅. 连续型碳纤维增强聚乳酸基复合材料仿生设计与3D打印制备研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
LIU C. Bionic Design and 3D Printing of Continuous Carbon Fiber Reinforced Polylactic Acid-Based Composites[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [25] 高尧, 李玲梦, 孔祥威, 等. 3D打印用聚乳酸复合材料进展[J]. 塑料, 2022, 51(3): 73-76.
GAO Y, LI L M, KONG X W, et al. Research Progress of PLA Composite for 3D Printing[J]. *Plastics*, 2022, 51(3): 73-76.
- [26] PLEWA J, PŁOŃSKA M, FELIKSIK K. An Experimental Study of Auxetic Tubular Structures[J]. *Materials*, 2022, 15(15): 5245.
- [27] 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 Z C, DENG Q T. Mechanical Property and Application of Materials and Structures with Negative Poisson's Ratio[J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(3): 335-350.