

变形诱导特性蜂窝结构的轴向压溃性能研究

杨轶凡

安徽工业大学建筑工程学院 安徽马鞍山 243032

摘要: 蜂窝结构因其优异的物理、力学性能被广泛应用于冲击防护领域的缓冲结构设计, 为了进一步适应耐撞性的需求、改善传统蜂窝结构的压溃性能, 本文提出一种具有变形诱导特性的蜂窝结构。通过对该变形诱导蜂窝结构开展了准静态面外轴向压缩实验, 分析了设计参数对蜂窝结构压溃性能的影响, 结果表明, 诱导层数和稳定性参数对于变形诱导蜂窝结构的能量吸收性能影响较大; 改变诱导层数可以降低变形诱导蜂窝结构力-位移曲线的波动性和峰值荷载。

关键词: 多孔结构; 变形诱导; 3D 打印; 压溃性能

前言

多孔结构因其具有吸能, 隔热, 可设计性强等优点, 通常作为能量吸收结构、保温结构和夹心结构被广泛应用于汽车工业^[1-3], 航空航天^[4], 军事防护^[5], 生物医学^[6-7]等领域。但是随着工程技术的不断发展, 在工程实际中对多孔结构的力学性能要求也在不断提高。近年来, 相关学者^[8]通过对蜂窝结构的宏观变形进行诱导, 发现该方式可以有效地解决传统蜂窝结构所存在的问题。Zhuai 等^[9]人提出一种新的预折叠蜂窝结构, 研究发现折纸蜂窝结构的内面强度明显高于传统蜂窝结构的内面强度, 并且通过改变折叠角度和长度等几何参数, 可以使折纸蜂窝结构强度比传统蜂窝结构强度提高近 10 倍。Zhang^[10]等基于折纸技术制备了折纸蜂窝结构, 通过实验研究发现, 改变折纸蜂窝的几何参数可以使折纸蜂窝结构的能量吸收效率明显优于传统蜂窝结构。

本文通过对变形诱导蜂窝结构的轴向压溃性能试验, 分析了变形诱导蜂窝结构的变形模式及其胞元尺度上的变形失效机理, 定量分析了变形诱导蜂窝结构的平均压溃承载力和能量吸收性能。

1 实验概况

1.1 试件的设计

本文设计了三个影响参数, 分别为稳定性参数 (α) 和诱导层数 (NL)。其稳定性参数表达式为

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ic}}{\sum_{i=1}^n A_{i0}} = \frac{1}{WB} \quad (1)$$

式中 A_{ic} 为单个蜂窝收缩处面积, A_{i0} 为单个蜂窝底部面积, W 为蜂窝结构宽度, B 为蜂窝结构长度, 如图 1 (a) 和图 1 (c) 所示。

诱导层数则表示在整个试件上单层蜂窝的数量之和, 诱导层数用 NL 表示, 当变形诱导蜂窝结构只有一个单层蜂窝时, 则表示结构的诱导层数为一, 如图 1 (c) 所示, 当变形诱导蜂窝结构有三个单层蜂窝时, 则表示结构的诱导层数为三, 如图 1 (d) 所示, 以此类推。

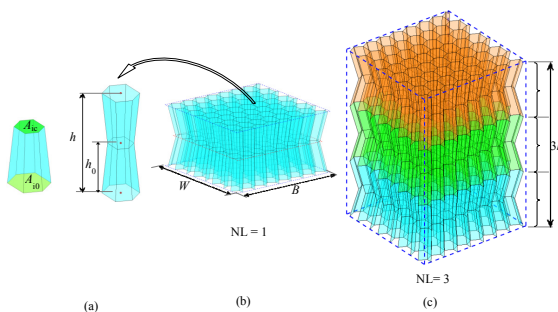


图 1 变形诱导蜂窝结构参数示意图: (a) 稳定性参数示意图; (b) 单层蜂窝示意图; (c) 诱导层数示意图

1.2 变形诱导蜂窝结构试件制备

本文利用 3D 打印技术制作变形诱导蜂窝结构, 通过采用融沉

积快速成型系统制备。因所用熔融沉积快速成型系统制备以及材料与王宏权^[11]等人一致, 所以本文所用王宏权等人已经测定的 PLA 材料的力学性能。

为了将二维蜂窝结构扩展到三维空间, 将初始蜂窝面板整体沿径向拉升, 得到指定高度的蜂窝结构。随后, 在蜂窝结构的指定位置按照一定比例的整体收缩来获得变形诱导蜂窝结构, 最后, 通过沿径向拉升收缩的蜂窝来获得具有特定厚度的变形诱导蜂窝结构, 形成具有实体特征的蜂窝结构。最终将所得到的三维变形诱导蜂窝结构空间拓扑信息以 STL 文件的形式存储于用于增材制造系统的识别, 制备成实体模型。

1.3 压溃性能评价指标

本文采用比吸能 Set 和平均压溃载荷 Pl 两个评价指标。

在整个轴向压溃的过程中, 结构的有效能量吸收 E_t 可以表示为

$$E_t = \int_0^{x_D} F(x) dx \quad (2)$$

式中, $F(x)$ 为结构在压溃位移为 x 时瞬间的压溃力, x_D 为变形诱导蜂窝结构基本处于完全屈曲时的总位移, 即结构的压溃密实位移。

比吸能 Set 作为能量吸收结构吸能性能优劣的主要评价指标, 其表示单位质量结构能够吸收的能量, 其值越大则表示结构的能量吸收能量越优异, 其表示为

$$S_{et} = \frac{E_t}{M} = \frac{\int_0^{x_D} F(x) dx}{M} \quad (3)$$

式中 M 为变形诱导蜂窝结构的总质量。而平均压溃荷载 Pl 是评价结构耐撞性能的重要指标, 其表示为

$$Pl = \frac{E_t}{x_D} = \frac{\int_0^{x_D} F(x) dx}{x_D} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 稳定性参数的影响

为了研究稳定性参数对变形诱导蜂窝结构轴向压溃性能的影响, 构建了三种不同稳定性参数的变形诱导蜂窝结构并开展轴向压溃试验。结果表明, 随着稳定性参数的逐渐增大, 蜂窝结构的平均压溃载荷和峰值荷载均逐渐增大, 三种不同稳定性参数的蜂窝结构在压溃过程中承载力波动相似。而由图 5 可知, 随着稳定性参数的逐渐增大, 蜂窝结构的比吸能和平均压溃荷载也逐渐增大, 由承载力-位移曲线可以看出, 随着稳定性参数的增大, 结构整体承载力在增大。

2.2 诱导层数的影响

通过构建了三种不同诱导层数的变形诱导蜂窝结构来研究诱导层数对变形诱导蜂窝结构轴向压溃性能的影响。其结果表明, 当诱导层数为 2 和 4 的时候, 结构的承载力呈现一定的波动性, 并且结构承载力的波动性与诱导层数具有一定的相关性, 如图 6 所示。而随着诱导层数的增加, 结构的比吸能和平均压溃荷载都随之减小, 如图 7 所示。

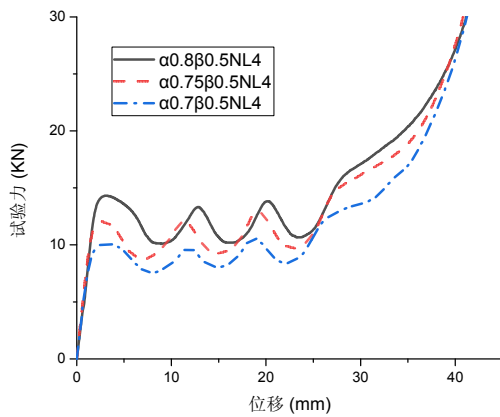


图4 不同稳定性参数的承载力-位移曲线对比

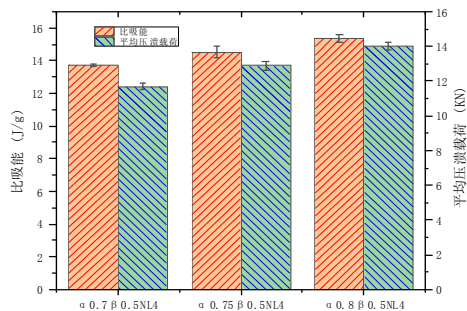


图5 不同稳定性参数的比吸能-平均压溃荷载对比

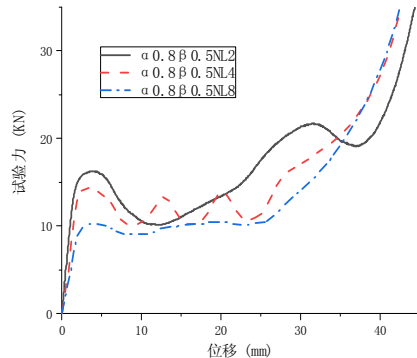


图6 不同诱导层数的承载力-位移曲线对比

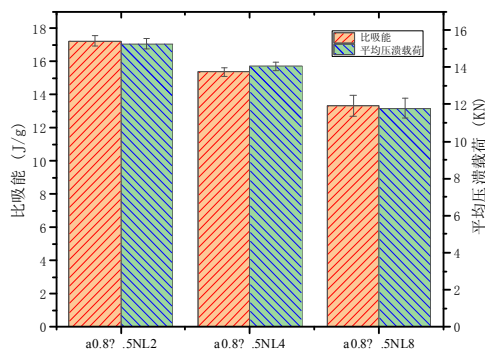


图7 不同诱导层数的比吸能-平均压溃荷载对比

3 结论

本文利用 3D 打印技术制备了变形诱导蜂窝结构,研究了该新型蜂窝结构的压溃性能,基于试验研究结果,得出以下结论:

(1) 变形诱导蜂窝结构的比吸能和平均压溃荷载主要受到诱导层数和稳定性参数的影响。诱导层数的改变不仅影响结构的吸能能和平均压溃荷载,也会影响结构的承载力-位移曲线的变化,结构的承载力-位移曲线会随着诱导层数变化呈现相应的波动,但是随着诱导层数的逐渐增大,层数对于结构的承载力-位移曲线的影响也逐渐消失。稳定性参数的逐渐增大,结构的比吸能和平均压溃荷载也随之增大。

(3) 变形诱导蜂窝结构的峰值荷载和整体承载力都受到诱导层数和稳定性参数的影响。随着稳定性参数的逐渐增大,结构的峰值荷载也逐渐增大,但随着诱导层数的逐渐增大,结构的峰值荷载逐渐降低。

参考文献:

- [1]Ma F, Liang H, Pu Y, et al. Multi-objective optimization of crash box filled with three-dimensional cellular structure under multi-angle impact loading[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering, 2021, 235 (9): 2397-2412.
 - [2]Wang C Y, Wang W W, Zhao W Z, et al. Structure design and multi-objective optimization of a novel NPR bumper system[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 153: 78-96.
 - [3]Wang Y L, Zhao W Z, Zhou G, et al. Parametric design strategy of a novel cylindrical negative Poisson's ratio jounce bumper for ideal uniaxial compression load-displacement curve[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61: 1611-1620.
 - [4]Ogpenoord M M J, Wilcox K E. Design for additive manufacturing: cellular structures in early-stage aerospace design[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 60: 411-428.
 - [5]朱建生, 武天宇. 火炮发射载荷下负泊松比蜂窝结构抗冲击性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42 (10): 97-102.
 - [6]Long J, Zhang W, Chen Y, et al. Multifunctional magnesium incorporated scaffolds by 3D-Printing for comprehensive postsurgical management of osteosarcoma[J]. Biomaterials, 2021, 275: 120950.
 - [7]焦晨, 晁龙, 朱磊, 等. 面向骨科植入物的仿生多孔结构设计方法与制造方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33 (23): 2844-2850.
 - [8]Li Z, Yang Q, Fang R, et al. Origami metamaterial with two-stage programmable compressive strength under quasi-static loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 189: 105987.
 - [9]Ma J, You Z. Energy absorption of thin-walled square tubes with a prefolded origami pattern — part I: geometry and numerical simulation[J]. Journal of applied mechanics, 2014, 81 (1).
 - [10]Zhai J, Liu Y, Geng X, et al. Energy absorption of pre-folded honeycomb under in-plane dynamic loading[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 145: 106356.
 - [11]王宏权, 王耀, 王士龙, 等. 3D 打印随机蜂窝夹芯圆管结构的准静态轴向压溃性能研究[J]. 实验力学, 2021, 36 (3): 397-413.
- 作者简介: 杨轶凡 (1997—), 男, 安徽马鞍山人, 在读硕士, 主要从事吸能缓冲结构研究。