

## 连续碳纤维3D打印圆形增强蜂窝的面内压缩性能

孟云聪 周光明 蔡登安

### In-plane compression properties of 3D printed continuous carbon fiber circular improved honeycomb

MENG Yuncong, ZHOU Guangming, CAI Deng'an

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230721.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### Kevlar短纤维增韧碳纤维/铝蜂窝夹芯板三点弯曲与面内压缩性能

Three-point bending and in-plane compression properties of carbon-fiber/aluminum-honeycomb sandwich panels with short-Kevlar-fiber toughening

复合材料学报. 2017, 34(9): 1953–1959 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170104.001>

#### 利用外方内圆模型预测单向连续纤维增强树脂基复合材料的横向弹性模量

Prediction of transverse elastic modulus of unidirectional continuous fiber reinforced resin composites using the model of circle-in-square

复合材料学报. 2018, 35(8): 2110–2115 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170920.003>

#### 加筋增强泡沫夹芯结构面内压缩与界面断裂性能试验

Experimental study for in-plane compression and interfacial fracture properties of stiffened foam core sandwich structure

复合材料学报. 2018, 35(5): 1123–1130 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170801.001>

#### 面内压缩超轻质点阵夹芯板的优化、试验与仿真

Optimization, experiment and simulation of lightweight lattice sandwich plates under in-plane compression load

复合材料学报. 2019, 36(4): 1045–1051 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180530.002>

#### 新型并联梯度蜂窝结构的面内力学性能

In-plane crushing behaviors of honeycombs with a novel parallel graded design

复合材料学报. 2020, 37(1): 155–163 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190417.003>

#### 改性芳纶纤维增强木粉/高密度聚乙烯复合材料的力学性能

Mechanical properties of modified aramid fiber reinforced wood flour/high density polyethylene composites

复合材料学报. 2019, 36(3): 638–645 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180530.006>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20230721.001

# 连续碳纤维 3D 打印圆形增强蜂窝的面内压缩性能



分享本文

孟云聪, 周光明\*, 蔡登安

(南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 为提高圆形蜂窝 (CH) 的抗压缩性能和吸能性能, 以 CH 结构为基础, 在横向和竖向上增设树叶形支撑, 提出了单向增强圆形蜂窝 (SEH) 和双向增强圆形蜂窝 (DEH) 两种改进型蜂窝。以碳纤维 (CF) 作为增强体, 聚乳酸 (PLA) 为基体, 使用连续纤维 3D 打印技术制造了试验件, 并规划结构内部 CF 的成型路径, 同时设置 PLA 对照组。通过准静态压缩试验研究各蜂窝的面内压缩性能、吸能特性和结构的变形失效模式。结果表明: CF 增强后的 DEH-CF 相较 CH-CF 在比吸能上提升 167.63%。CH、SEH 和 DEH 在采用 CF 增强后, 比吸能相比 PLA 对照组分别提高 43.37%、63.17% 和 161.58%, 平均压缩力分别提高 51.72%、61.81% 和 96.09%。研究发现, CF 增强结构内部的纤维路径规划会影响结构的刚度和变形行为, 采用“支撑一体化成型”路径的 DEH-CF 在压缩时, 其结构动态泊松比保持在 PLA 对照组 33.36% 以下。

**关键词:** 圆形蜂窝; 面内压缩; 连续纤维; 路径规划; 3D 打印; 复合材料

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)04-1776-12

## In-plane compression properties of 3D printed continuous carbon fiber circular improved honeycomb

MENG Yuncong, ZHOU Guangming\*, CAI Deng'an

(State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To improve the compression resistance and energy absorption performance of circular honeycomb (CH), two improved honeycomb, single enhanced circular honeycomb (SEH) and double enhanced circular honeycomb (DEH) were designed on the basis of CH structure, and leaf shaped supports were added horizontally and vertically. Using carbon fiber (CF) as reinforcement and polylactic acid (PLA) as matrix, continuous fiber 3D printing technology was used to manufacture test parts, and the forming path of CF bundle inside the structure was designed, PLA control group was set. The in-plane compression properties, energy absorption characteristics and deformation failure modes of the honeycomb structures were investigated by quasi-static compression tests. The results show that the specific energy absorption (SEA) of CF enhanced DEH-CF is improved by 167.63% compared with CH-CF. The SEA are increased by 43.37%, 63.17% and 161.58% and mean crushing force are increased by 51.72%, 61.81% and 96.09% compared with the PLA control group, respectively. The results indicate that the fiber path planning inside the CF reinforced structure would affect the stiffness and deformation behavior of the structure. The dynamic Poisson's ratio of the DEH-CF using the "strut integrated molding path" during compression remains 33.36% lower than that of the PLA control group.

**Keywords:** circular honeycomb; in-plane compression; continuous fiber; path planning; 3D printing; composite material

收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-06-26; 录用日期: 2023-07-06; 网络首发时间: 2023-07-24 08:53:16

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230721.001>

通信作者: 周光明, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进复合材料的结构设计 E-mail: [zhougm@nuaa.edu.cn](mailto:zhougm@nuaa.edu.cn)

引用格式: 孟云聪, 周光明, 蔡登安. 连续碳纤维 3D 打印圆形增强蜂窝的面内压缩性能 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 1776-1787.

MENG Yuncong, ZHOU Guangming, CAI Deng'an. In-plane compression properties of 3D printed continuous carbon fiber circular improved honeycomb[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(4): 1776-1787(in Chinese).

蜂窝结构拥有隔热性、吸能性、轻质性等特点，广泛用于航空航天、汽车、建筑和冲击防护等领域<sup>[1-2]</sup>。根据单胞构型的不同，蜂窝结构可以分为六边形、四边形、三角形、圆形和异形蜂窝等<sup>[3]</sup>。以蜂窝受到面内压缩时横向变形的特点又可分为传统蜂窝和负泊松比蜂窝<sup>[4-5]</sup>。

使用传统工艺制作复杂结构的蜂窝难度大、成本高<sup>[6]</sup>，当前相关研究多使用熔融式 3D 打印技术制造各形蜂窝<sup>[7]</sup>。但基于热塑性树脂打印出的蜂窝因树脂力学性能不足表现出结构强度和刚度较弱等缺点<sup>[8]</sup>。通过在树脂中加入高性能纤维可有效增强结构的力学性能<sup>[9]</sup>。国内外学者已开展了相关研究。Quan 等<sup>[10]</sup>使用 3D 打印技术制造了一种连续芳纶纤维增强聚乳酸 (PLA) 基材料的负泊松比内凹六边形蜂窝结构，对该结构进行了面内压缩试验，同时设置 PLA 对照组，在质量增加 6% 的情况下，复材件相比 PLA 件在抗压刚度和吸能方面性能可分别提高 87% 和 100%。Cheng 等<sup>[11]</sup>使用碳纤维和特制基体制造了连续碳纤维 3D 打印轻质蜂窝，研究了结构在热激励下的自恢复特性，利用碳纤维自身的电阻属性，由碳纤维充当加热器，结构压缩后对内部碳纤维通电流，结构可在碳纤维发热后恢复部分形变。Zeng 等<sup>[12]</sup>研究了由碳纤维增强树脂基体制成的六边形和四边形单胞蜂窝结构，对该结构进行了压缩性能和吸能性能研究，并在压缩试验后将试验件放置在 70℃ 的温度箱中开展形状恢复测试。张亚男<sup>[13]</sup>打印了芳纶纤维增强热塑性聚氨酯 (TPU) 基蜂窝，在减少单胞尺寸，提高结构相对密度后可增强蜂窝的抗压缩性能。

当前蜂窝领域研究热点集中于六边形蜂窝、增强型蜂窝及负泊松比蜂窝<sup>[14-16]</sup>。六边形蜂窝在面外压缩上优异的承载能力，而在面内压缩性能上，相同密度下的圆形蜂窝相较六边形蜂窝有更高的刚度和抗压强度<sup>[17]</sup>，同时具有更好的吸能性能<sup>[18]</sup>。在成型工艺方面，使用连续纤维 3D 打印成型试验件时，圆形蜂窝相较于多边形蜂窝在成型路径规划上有较大优势<sup>[19-20]</sup>，例如，在保证纤维连续性的情况下，圆形蜂窝可在任意平面阵列排布下做到零重复路径，能够提高成型效率并减少材料浪费。圆形蜂窝成型路径呈圆弧形，路线平滑且无突变角度，利于成型时纤维束的均匀分布，可减少纤维束滑移等成型缺陷<sup>[21]</sup>。

基于上述原因，本文在传统圆形蜂窝 (Circular honeycomb, CH) 结构的基础上，通过向单胞内引入树叶形增强结构，构建了单向增强圆形蜂窝 (Single enhanced CH, SEH) 和双向增强圆形蜂窝 (Double enhanced CH, DEH)。使用碳纤维 (CF) 作增强体、PLA 为基体的预浸渍丝材为原材料，3D 打印制造了连续碳纤维增强试验件，同时设置 PLA 试验件为对照组，讨论了蜂窝结构设计、材料体系和路径规划对结构面内压缩的抗压性能、吸能性能和变形模式的影响规律。

1 实验材料及方法

1.1 原材料及 3D 打印方法

本文使用一台自行研发的连续纤维 3D 打印设备制造 CF 增强试验件。当前复合材料 3D 打印主要分为原位浸渍工艺和预浸渍工艺<sup>[22-23]</sup>，本设备基于预浸渍工艺研制，如图 1(a) 所示。采用预浸

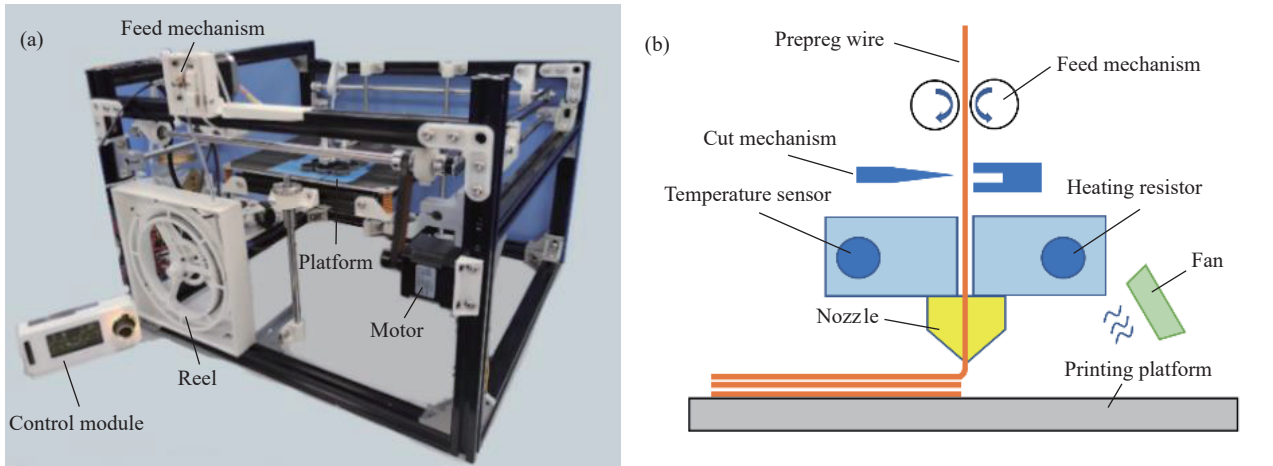


图 1 (a) 连续纤维 3D 打印设备; (b) 加工示意图

Fig. 1 (a) Continuous fiber 3D printing equipment; (b) Processing diagram

渍丝材作为打印原料。预浸渍丝材以 CF 为增强体，PLA 为基体。碳纤维 (HTA40-E15-1K)，单丝直径 7 μm，密度 1.78 g/cm<sup>3</sup>，由 Toho Tenax 公司提供。PLA 材料密度 1.31 g/cm<sup>3</sup>，由广东闪锐公司提供。预浸渍丝材使用自研的熔融浸渍设备生产，丝材直径为 1 mm，纤维体积含量为 8.3vol%。

本设备主要由卷线盘、进给机构、喷头组件、打印平台、运动机构和控制模块组成。预浸渍丝材储存在卷线盘内，进给机构将丝材按成型需求量送入到喷头组件。成型时，喷头组件内的加热电阻将喷嘴升温至基体熔融温度以上，融化的树脂混合碳纤维束从喷嘴处挤出后沉积粘附至打印平台上。设备按加工路径控制运动机构上的电机移动喷嘴，单层打印结束后打印平台下降一个层高的距离，如此循环，最终完成试验件的制造，3D 打印加工示意图如图 1(b) 所示，成型完成的试验件如图 2 所示。相较于传统打印设备，本设备对卷线盘、挤出机和喷头组件进行了重新设计，可适配带纤维束的小直径丝材。通过在丝材外包覆低阻尼保护管，优化喷嘴外形，可减少系统对丝材的摩擦，起到保护丝材，减少纤维损伤的作用。

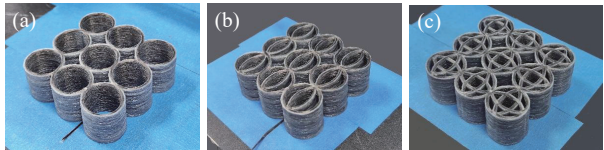


图 2 (a) 圆形蜂窝 (CH)-碳纤维 (CF) 试件; (b) 单向增强圆形蜂窝 (SEH)-CF 试件; (c) 双向增强圆形蜂窝 (DEH)-CF 试件

Fig. 2 (a) Circular honeycomb (CH)-carbon fiber (CF) specimen; (b) Single enhanced circular honeycomb (SEH)-CF specimen; (c) Double enhanced circular honeycomb (DEH)-CF specimen

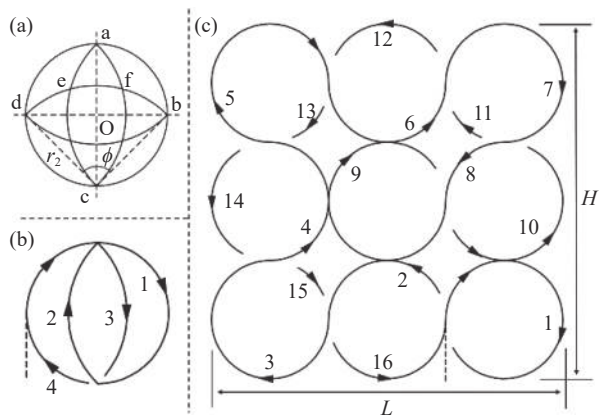
1.2 蜂窝几何设计

CH 是由多个圆形单胞在横向和竖向以阵列形式相切排列构成的，蜂窝各方向力学性能较均匀，但存在孔隙率高，受大位移压缩时易发生侧壁塌缩导致结构失效的情况。通过向蜂窝内添加支撑可有效提升结构的承载能力和吸能特性<sup>[24]</sup>。

SEH、DEH 两种蜂窝是在 CH 基础上增加树叶形支撑结构得到的。以 DEH 为例，其在横竖两方向上增加了支撑，单胞外圆的半径  $r_1=10\text{ mm}$ ，横竖两处树叶形支撑由 4 段圆弧组成，圆弧的圆心设置于单胞外圆上的 a、b、c、d 这 4 点，圆弧半径  $r_2=\sqrt{2}r_1$ ，绘制 4 段弧度  $\phi=90^\circ$  圆弧，见图 3(a)。此时，圆弧均被等分为 3 段小圆弧，存在几何关系：

$\widehat{ae}=\widehat{ef}=\widehat{fa}$  (1)

由点 a、e、f 围成的图形近似于等边三角形，力学性能较稳定。考虑原材料制作和设备成型尺寸限制，蜂窝结构采用 3×3 单胞构型。试件的设计参数如表 1 所示。



$r_2$ —Radius of leaf support;  $\phi$ —Radian of leaf support curve;  $L, H$ —Width, height of honeycombs

图 3 (a) DEH 单胞示意图; (b) SEH 单胞成型轨迹; (c) CH 成型轨迹

Fig. 3 (a) Diagram of DEH monocell; (b) SEH monocell forming path; (c) CH forming path

表 1 蜂窝结构设计参数

Table 1 Geometric parameters of honeycomb

$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$\phi/(^\circ)$	$L/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$q/\text{mm}$
10	14.14	90	60	60	20

Notes:  $r_1$ —Radius of honeycomb outer circle;  $q$ —Thickness of honeycombs.

SEH 即在 DEH 基础上保留竖向支撑，去掉横向支撑，其余几何参数保持一致。CH 结构仅保留外圆轮廓，其余参数一致。

蜂窝结构的相对密度是影响结构力学性能和变形模式的重要参数，本文中结构相对密度的计算公式如下：

$\bar{\rho}=\frac{\rho^*}{\rho_s}=\frac{A_s}{A}$  (2)

式中： $\rho^*$ 表示蜂窝结构的表观密度； $\rho_s$ 为蜂窝结构的材料密度； $A_s$ 表示蜂窝结构的实际横截面积； $A$ 表示蜂窝结构的总横截面积 ( $A=LH$ ， $L$ 表示试件宽度， $H$ 表示试件高度)。

1.3 路径规划和试件制造

相较传统 3D 打印技术，在连续纤维 3D 打印中，引入高性能纤维束增加了结构件力学性能，也同时增加了纤维束成型路径规划的环节。通常，



一种结构件拥有多种加工路径可供选择。本文以提高结构力学性能、降低缺陷发生率、保证纤维连续性为目标设计了 3 种蜂窝结构的成型路径。

CH 的成型路径如图 3(c) 所示，数字和箭头分别表示成型路径的顺序和方向，虚线表示第一层成型时，喷嘴的首次进入路径。CH 成型路径以加工平面右下角为起点，沿顺时针方向以螺旋形依次生成其余单胞，完成路径 16 后又回到起点。由于每一层的打印路径起点和终点均重合，因此每层的成型路径相同。SEH 结构的成型路径是在 CH 结构的成型路径基础上在每处单胞内加入竖向增强的成型路径，如图 3(b) 所示。

DEH 在横竖两方向均有支撑，存在多种成型路径方案可供选择，为发挥碳纤维优异的抗拉性能并提升结构刚度，为 DEH 结构设计了一种“支撑一体化成型”路径，如图 4 所示。该路径规划策略是将结构同方向的 3 处树叶形支撑依次打印，然后在后续成型中加入单胞外圆的成型路径，DEH 打印过程见图 5。

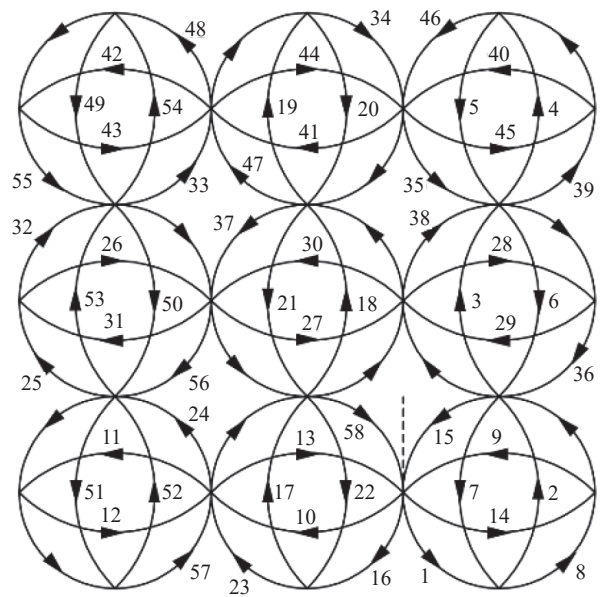


图 4 DEH 成型轨迹

Fig. 4 Forming path of DEH

因在同一打印层中，纤维束路径存在同多次交叉和轨迹角度较大偏转，为确保可行性，在试验前进行了工艺验证。单束 1 K 碳纤维束束层厚约 0.05 mm，在将 3D 打印层高  $t_z$  设置为 0.4 mm，喷嘴温度  $T_1$  为 200℃，同时令喷嘴经过节点时停留 0.5 s，可使节点处的上一层基体融化，线材之间二次熔融压实，通过以上优化措施，可满足有

4 次交叉时，节点处平滑。为避免因轨迹角度急剧偏转，发生纤维束剥离导致成型失败，设备对沉积到成型平面后的纤维束进行冷却散热，让熔融态基体快速固化，可有效提升打印质量。

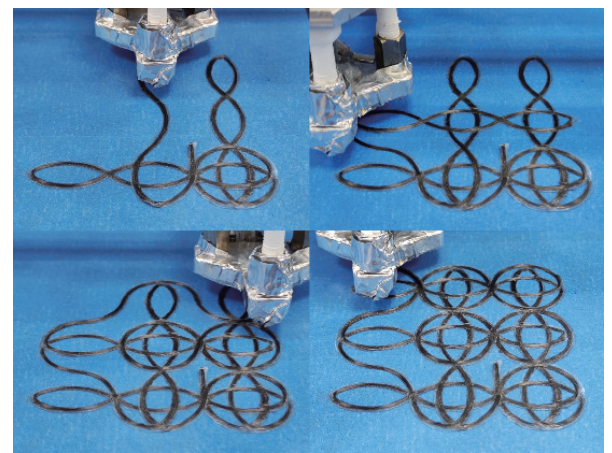


图 5 采用“支撑一体化成型”路径打印的 DEH 结构

Fig. 5 DEH printed by the path of "strut integrated molding"

连续纤维 3D 打印制造试验件的成型参数如表 2 所示，PLA 对照组的 3 种蜂窝结构使用桌面式熔融沉积制造 (FDM) 3D 打印机制造，由广东闪锐公司提供，PLA 材料与 CF 增强组所用 PLA 材料相同。每种构型的试验件制作 5 个，相关参数如表 3 所示。

表 2 打印成型参数

Table 2 Parameters of printing process

$t_z/\text{mm}$	$V_1/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	$T_1/^\circ\text{C}$	$n_1$	$t_H/\text{mm}$
0.4	130	200	50	1.7

Notes:  $t_z$ —Thickness of layer;  $V_1$ —Speed of moulding;  $T_1$ —Nozzle temperature;  $n_1$ —Number of layers;  $t_H$ —Honeycomb wall and strut thickness.

表 3 蜂窝试验件参数

Table 3 Parameters of honeycomb specimens

Type	$L/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$q/\text{mm}$	$m/\text{g}$	$\bar{\rho}$
CH-PLA	61	61	20	18.1	0.24
CH-CF	61	61	20	18.8	0.24
SEH-PLA	61	61	20	31.1	0.40
SEH-CF	61	61	20	32.1	0.40
DEH-PLA	61	61	20	43.3	0.57
DEH-CF	61	61	20	44.9	0.57

Notes:  $m$ —Mass of specimen;  $\bar{\rho}$ —Relative density; PLA—Polylactic acid.

1.4 试验设备及试验设置

使用 MTS Model E45 型试验机，参照 GB/T

18942—2003<sup>[25]</sup> 标准对蜂窝结构进行准静态压缩试验，蜂窝试验件放置在试验机上下两块圆形压头之间，下压头固定在试验机平台上，上端压头安装在可移动的横梁上，试验设备及加载方式如图 6 所示。试验时上端压头施加向下的位移载荷，加载速率为 3 mm/min，压缩位移加载至 39 mm 以上(名义应变 $\varepsilon_y > 0.65$ )。上端压头的载荷通过力传感器将支反力数据传输给控制端，同时在试验机外放置了摄像装置，对压缩过程中试验件宏观变形情况进行记录。

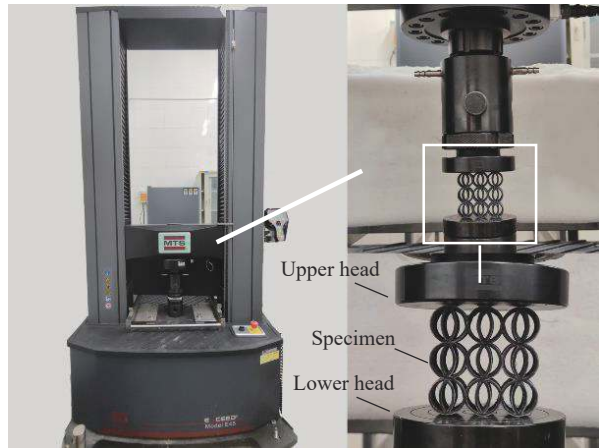


图 6 实验设备及试件安装

Fig. 6 Experimental equipment and installation of specimen

在面内压缩过程中，蜂窝结构的名义应力和名义应变计算公式如下：

$$\sigma = \frac{R_f}{A_t} \tag{3}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{H} \tag{4}$$

式中： $R_f$ 为上端压头与蜂窝结构之间的反作用力； $A_t$ 为试件的垂向初始横截面积，即 $A_t=Lq$ ， $q$ 表示试件厚度； $\Delta y$ 为上端压头的压缩位移。

2 结果与讨论

2.1 蜂窝结构的准静态压缩响应

CH、SEH 和 DEH 在准静态面内压缩时的名义应力-应变曲线如图 7 所示。为方便表述，将试验件名称简化为构型加材料体系英文缩写，如碳纤维增强组 DEH 试验件用 DEH-CF 表示。由曲线可知，两种材料体系的 SEH 和 DEH 准静态压缩响应均具有多胞材料的典型应力响应特征，即结构在压缩过程呈现出弹性阶段、平台阶段和密实化阶段 3 个时期。

SEH 和 DEH 的弹性阶段发生在压缩过程初期

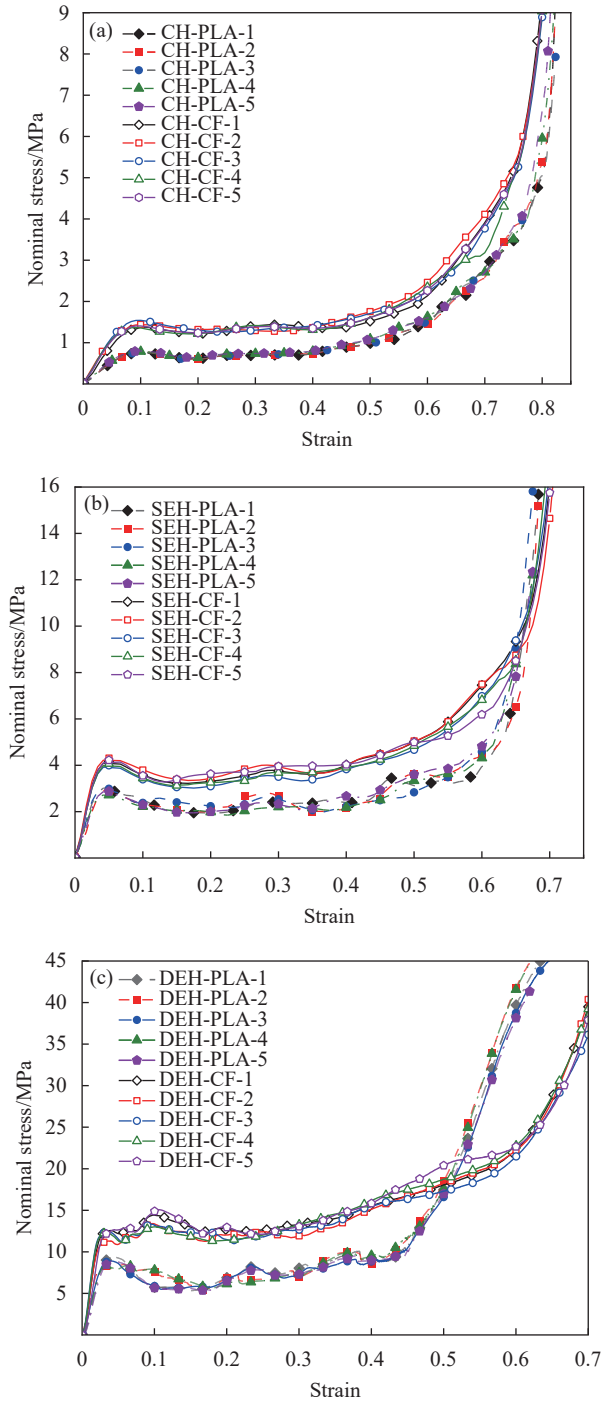


图 7 不同蜂窝的面内压缩名义应力-应变曲线：(a) CH；(b) SEH；(c) DEH

Fig. 7 In-plane compression stress-strain curves of different honeycombs: (a) CH; (b) SEH; (c) DEH

( $\varepsilon_y < 0.1$ )，结构各单胞发生均匀的弹性变形，且 CF 增强组的弹性阶段期大于 PLA 对照组。随压缩量增加，结构进入到平台阶段，结构的侧壁和支撑发生弯曲、接触和断裂，单胞出现局部密实化，应力在波动中逐渐升高。当压缩量进一步增大，结构由局部密实化逐渐发展成整体密实化，进入

到密实化阶段，此时支反力急剧提升。分析各结构的应力-应变曲线可知，结构的各应力响应特征阶段期随结构相对密度 $\bar{\rho}$ 的增加而变短。例如，DEH结构的3个阶段期均短于SEH和CH结构。 $\bar{\rho}$ 值较高的蜂窝结构，其内单胞内部空间有较多支撑填充，受压时侧壁和支撑会较早发生接触，影响结构的应力响应。

为探究不同材料体系对结构的抗压性能的影响，取弹性阶段峰值应力为结构抗压强度，结果如图8所示。采用连续纤维三维打印后，CH、SEH和DEH这3种结构在质量增加约4%的情况下，抗压强度相较PLA对照组分别提升了82.88%、42.73%、39.89%。结果显示，在PLA中加入碳纤维束有效提升了结构的面内抗压性能。

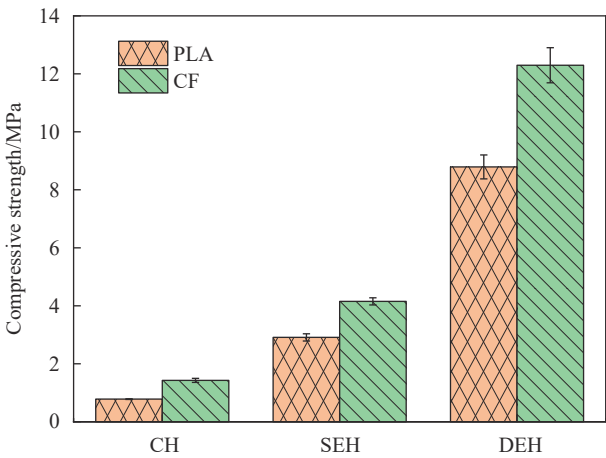


图8 各蜂窝的抗压强度  
Fig. 8 Compressive strength of honeycombs

2.2 蜂窝结构的变形模式

CH、SEH和DEH结构在面内压缩时结构的变形模式如图9~图11所示。

对于CH结构，CH-PLA在 $\epsilon_y = 0.2$ 时，部分单胞侧壁受压后发生弯折，可见塑性断口(图9(a)圆圈处)，结构出现局部坍塌，相同应变下的CH-CF仍为整体变形。在 $\epsilon_y = 0.4$ 时，CH-PLA在斜45°方向上的单胞塌缩，到 $\epsilon_y = 0.6$ 时，单胞塌缩范围继续扩展，CH-PLA组因斜向单胞断裂塌缩，整体变形呈“X”型。而碳纤维增强的CH-CF组，其侧壁抗弯和抗压性能较对照组有明显增强，压缩过程未出现单胞过早断裂导致结构局部失效的情况，结构变形模式也趋于整体变形。

对于SEH结构，SEH-PLA在 $\epsilon_y = 0.2$ 时，底层3个单胞塌缩，单胞的侧壁和树叶形支撑发生了弯折和断裂，可见塑性断口。同应变下SEH-CF的多处单胞的侧壁和支撑发生弯折，但未见断裂。在 $\epsilon_y = 0.4$ 时，两组蜂窝均因斜向单胞塌缩，变形呈“X”型，但PLA组内弯折的侧壁和支撑多已断裂，而碳纤维组则是侧壁与支撑在压缩后屈曲并相互贴合，结构并未断裂。在 $\epsilon_y = 0.6$ 时，两种结构处于密实化阶段前期，单胞均已塌缩。

对于DEH结构，DEH-PLA组在 $\epsilon_y = 0.2$ 时，中层和底层部分单胞支撑发生断裂，同应变下的DEH-CF结构中层单胞的横向树叶形支撑出现明显的横向拉伸(图11(b)箭头处)，但单胞未出现侧壁和支撑断裂。在 $\epsilon_y = 0.4$ 时，DEH-PLA结构单胞内的横向支撑均发生断裂，PLA抗拉强度已无法

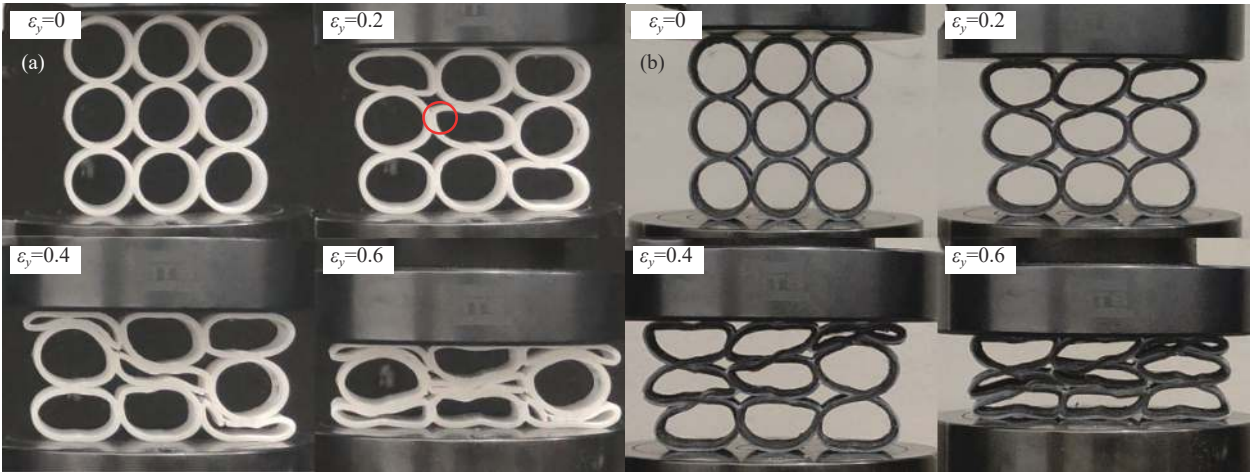


图9 变形过程: (a) CH-PLA; (b) CH-CF  
Fig. 9 Deformation process: (a) CH-PLA; (b) CH-CF



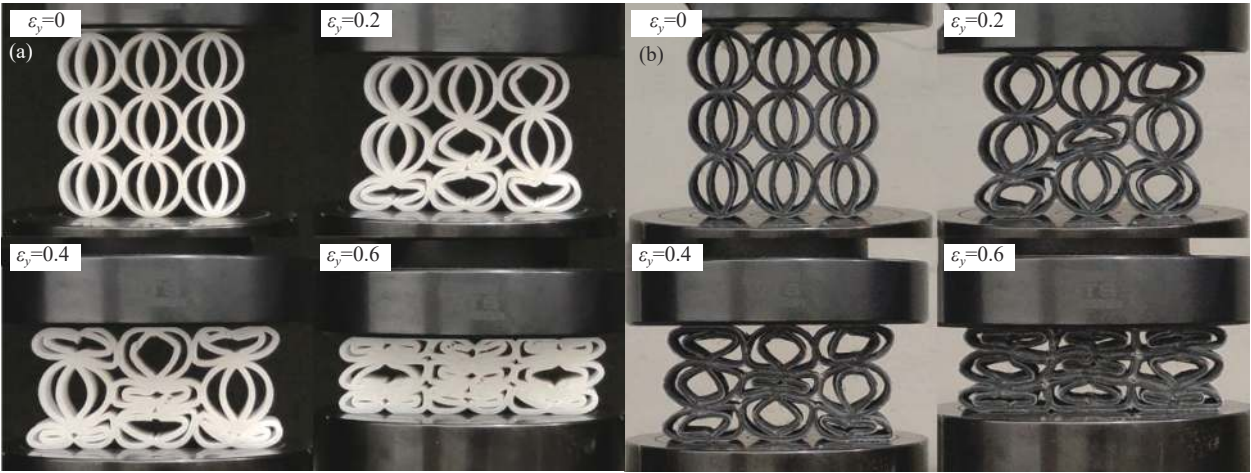


图 10 变形过程: (a) SEH-PLA; (b) SEH-CF  
Fig. 10 Deformation process: (a) SEH-PLA; (b) SEH-CF

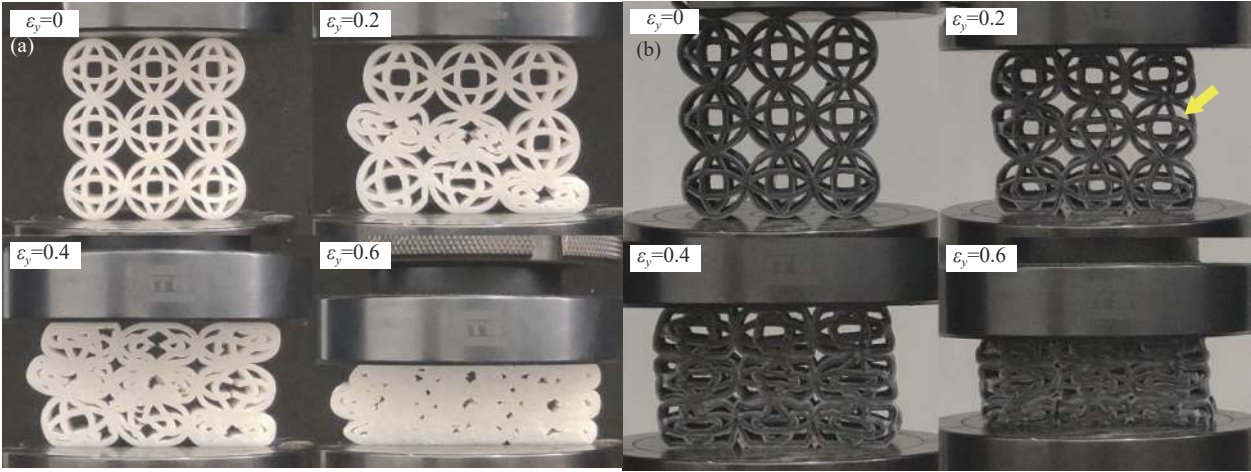


图 11 变形过程: (a) DEH-PLA; (b) DEH-CF  
Fig. 11 Deformation process: (a) DEH-PLA; (b) DEH-CF

承受结构的横向扩展应力，同阶段 DEH-CF 单胞的侧壁和支撑均有弯折和塌缩，但未断裂。在  $\varepsilon_y = 0.6$  时，两种结构均处于密实化阶段，结构趋于整体密实化，单胞完全塌缩。

由上述 6 组分析可知，在结构中引入碳纤维增强了单胞的抗压和抗弯性能，改变了蜂窝结构的变形模式。在受压时，纤维增强结构单胞变形更加均匀，局部塌缩减少。

2.3 蜂窝结构的破坏模式

试验结束后，使用 Hirox KH-7700 高倍光学显微镜对试验件的典型断口等失效部位进行拍照。结构的破坏模式受材料体系影响较大，图 12(a) 是压缩后的 CH-PLA 试件，其中标识 1 处为蜂窝中相邻单胞节点处的失效断面，侧壁完全断裂并弯折，断裂模式为脆性断裂，断口表面有锯齿状

突起。标识 2 处是结构下层一处单胞侧壁的断面，断口平整，断裂模式同样为脆性断裂。结构失效是由节点处侧壁过早断裂而引起的。

图 12(b) 是压缩后的 CH-CF 试件，标识 3 处为相邻两单胞连接处的失效断面，该处侧壁未完全断裂，初始于右侧的裂纹扩展到碳纤维束处便停止扩展(箭头处)，裂纹中间断口有碳纤维单丝从基体拨出。标识 4 为上下相邻单胞接合处，侧壁受压后弯曲贴合，纤维束分布均匀无断裂，基体未见明显裂纹。结构失效是由侧壁受压后弯曲失去承载能力而引起的。

SEH 和 DEH 与 CH 类似，其破坏模式根据材料体系不同有明显差异。PLA 组受压后在侧壁和支撑接合处出现较多断口，结构因侧壁和支撑受压后发生塑性断裂而失效。CF 组受压后其侧壁和

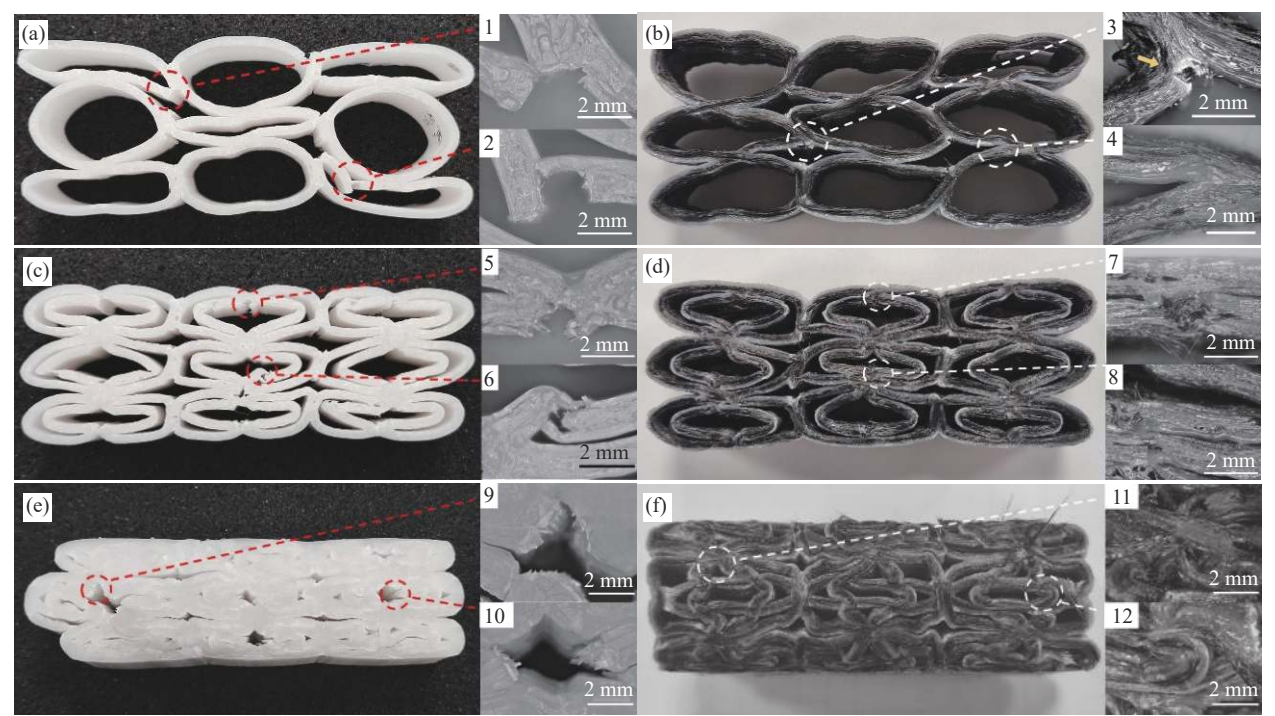


图 12 蜂窝破坏模式: (a) CH-PLA; (b) CH-CF; (c) SEH-PLA; (d) SEH-CF; (e) DEH-PLA; (f) DEH-CF

Fig. 12 Failure mode of honeycombs: (a) CH-PLA; (b) CH-CF; (c) SEH-PLA; (d) SEH-CF; (e) DEH-PLA; (f) DEH-CF

支撑绕节点弯曲，最终相互贴合，未见明显断口，结构因侧壁和支撑受压后弯曲而失效。

由上述分析可知，材料体系影响了蜂窝结构的破坏模式。碳纤维增强组结构的侧壁和支撑抗断裂能力明显增加，连续纤维阻止了裂纹在基体中的传播，有效防止侧壁和支撑在受压后过早断裂，延缓了结构的整体失效。

2.4 DEH 结构动态泊松比

采用“支撑一体化成型”路径制作的 DEH-CF 相较 DEH-PLA 在压缩时主平面的横向变形上表现出较大差异。DEH-PLA 在压缩时，结构在各个特征阶段均朝主平面的横向扩展，在垂直于主平面的侧向平面上变形量较少。DEH-CF 在压缩时结构整体横向变形趋势较小，在结构进入到密实化阶段后，相较同时期对照组，其横向的变形增量下降明显，而在侧向平面上出现横向扩展变形，如图 13 所示。为详细研究 DEH 结构在压缩时的横向变形机制，本文使用结构动态泊松比参数对变形过程进行分析<sup>[26]</sup>。蜂窝结构的动态泊松比  $\mu$  的计算公式如下：

$$\bar{L} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (L_{A_i B_i} - L) \tag{5}$$

$$\mu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{\Delta \bar{L} / L}{\varepsilon_y} \tag{6}$$

式中： $\bar{L}$ 是蜂窝结构在压缩时结构横向位移变化量； $L$ 是蜂窝结构的初始宽度； $A_i$ 、 $B_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 是横向上蜂窝结构每层单胞两侧端点。

图 14 给出了两种材料的 DEH 结构在面内压缩下的动态泊松比-名义应变曲线。从曲线可知，DEH-PLA 在压缩过程中结构动态泊松比显著大于 DEH-CF，且在 DEH-PLA 进入到密实化阶段以后 ( $\mu > 0.5$ ) 泊松比有继续增加的趋势，而 DEH-CF 的泊松比则有所下降的趋势。

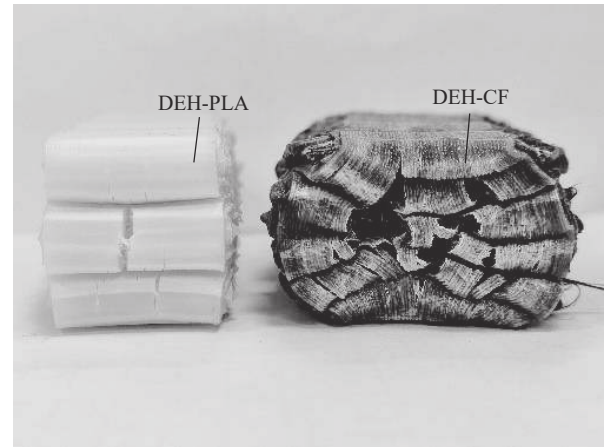


图 13 DEH-PLA 和 DEH-CF 侧向视图

Fig. 13 Side view of DEH-PLA and DEH-CF

对 DEH-PLA 宏观变形过程分析后发现，部分



单胞的侧壁和支撑因材料性能不足在压缩过程初期 ( $\mu = 0.1$ ) 便发生了塑性断裂 (图 15 圆圈处), 单胞失去支撑后迅速坍塌并朝横向扩展, 导致结构在压缩响应时表现出较高泊松比特性。

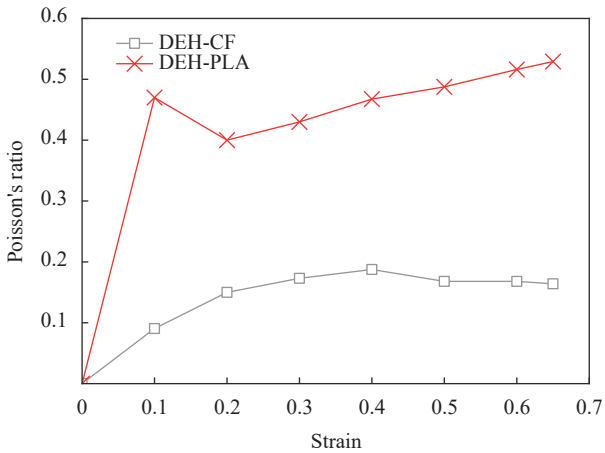
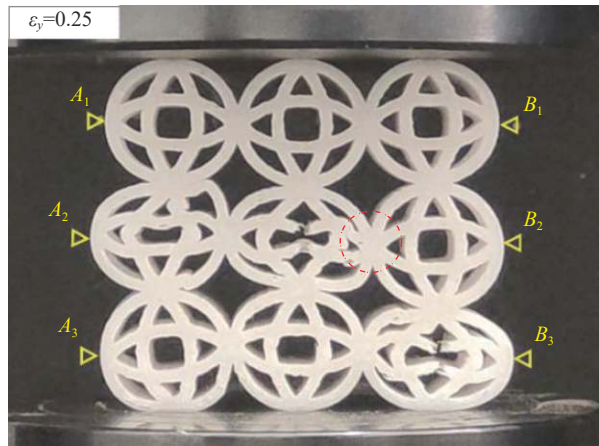


图 14 DEH 蜂窝的泊松比-名义应变曲线

Fig. 14 Poisson's ratio-nominal strain curves of DEH



$A_1-A_3$ —Left end point of DEH;  $B_1-B_3$ —Right end point of DEH

图 15 DEH-PLA 变形过程

Fig. 15 Deformation process of DEH-PLA

对 DEH-CF 结构, 其内部的纤维路径影响了压缩响应时结构的变形行为。图 16 中标号为 1、2 的横向叶形支撑与右端侧壁的纤维束整体相连, 标号 3 的横向支撑与左端侧壁纤维束相连, DEH-CF 成型路径可参照图 4。试验件右端侧壁变形均匀, 整体与右侧虚线齐平, 需要注意标号 1、2、3 所指处的侧壁均有内凹收缩的趋势, 这是由横向支撑结构抵抗蜂窝横向变形而牵引侧壁所导致的。3 处圆圈所指区域的横向支撑与其对应侧壁无纤维直接相连, 仅有树脂基体连接, 区域呈现浅白色, 基体有剥离的趋势, 同时侧壁有不规则

变形。值得注意的是, 随着压缩响应向密实化阶段发展 ( $\mu > 0.4$ ), DEH-CF 减缓了主平面的横向扩展, 结构厚度方向出现层间开裂。这是 CF 增强后导致结构主平面横向刚度过高和 3D 打印层间性能不足共同作用的结果。

因此, “支撑一体化成型” 路径规划增强了 DEH-CF 的横向刚度, 在结构受压时, 纤维束抵抗侧壁横向扩展的作用明显, 结构在压缩过程中呈现出低泊松比的特性。

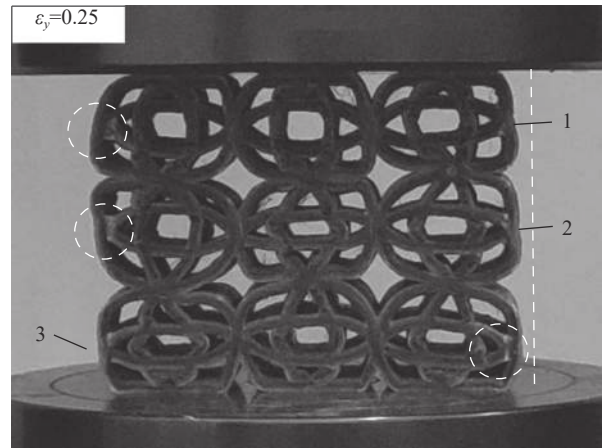


图 16 DEH-CF 变形过程

Fig. 16 Deformation process of DEH-CF

2.5 蜂窝结构的吸能性能

蜂窝结构拥有优秀的吸能特点, 为研究 3 种蜂窝结构的能量吸收性能, 使用比吸能 (Specific energy absorption,  $S'$ ) 和平均压缩力 (Mean crushing force,  $M'$ ) 参数进行研究。比吸能表示蜂窝结构单位质量吸收的能量, 定义公式如下:

$$S' = \frac{E_a}{m} \tag{7}$$

式中,  $E_a$  为蜂窝结构在压缩过程中的总吸收能量。 $E_a$  的计算公式如下:

$$E_a = \int_0^{y_d} F dy \tag{8}$$

式中:  $y$  代表压缩位移;  $F$  为压缩反力;  $y_d$  表示结构在进入致密化阶段时的致密化压缩位移。 $y_d$  由致密化应变  $\varepsilon_d$  换算得出, 其定义为

$$E(\varepsilon) = \frac{\int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \tag{9}$$

$$\left. \frac{dE(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \tag{10}$$

式中,  $E(\varepsilon)$  为蜂窝结构应力应变能与名义应力的

比值。公式通常可以得到多个符合条件的 $\varepsilon_d$ 解,通常取 $\varepsilon_d$ 最大值解为本蜂窝结构对应的致密化应变,该点过后结构由平台阶段进入致密化阶段,压缩应力急剧增大。平均压缩力计算公式如下:

$$M' = \frac{1}{y_d} \int_0^{y_d} F dy$$

(11)

表 4 给出了各类蜂窝结构的 $\varepsilon_d$ 、 $S'$ 、 $M'$ 参数。

表 4 各蜂窝结构的吸能参数

Table 4 Energy absorption parameters of each honeycomb

Type	$\varepsilon_d$	$S' / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$(S'_{\text{CF}} - S'_{\text{PLA}}) / S'_{\text{PLA}}$	$M' / \text{kN}$	$(M'_{\text{CF}} - M'_{\text{PLA}}) / M'_{\text{PLA}}$
CH-PLA	0.76	3.62	—	1.45	—
CH-CF	0.74	5.19	43.37%	2.20	51.72%
SEH-PLA	0.59	3.53	—	3.09	—
SEH-CF	0.61	5.76	63.17%	5.00	61.81%
DEH-PLA	0.42	5.31	—	8.95	—
DEH-CF	0.59	13.89	161.58%	17.55	96.09%

Notes:  $\varepsilon_d$ —Densification strain;  $S'$ —Specific energy absorption;  $M'$ —Mean crushing force.

DEH 结构在增加了双向树叶形支撑后,提升了结构面内刚度并增加了塑性铰数量,因此有更优异的能量吸收性能,DEH-PLA 相较 CH-PLA 在比吸能上提升了 46.69%。

在材料方面,同种蜂窝结构采用碳纤维增强后,单位质量能量吸收性能提升明显。其中以 DEH-CF 组提升幅度为最高,提升了 161.58%,结合 2.4 节分析可知,连续纤维的路径规划增强了结构的横向刚度,有效延长了结构压缩响应时的平台期,是大幅提升 DEH 吸能能力的关键因素。

3 结论

以圆形蜂窝(CH)为基础,在其横向和竖向加入树叶形支撑,得到了两种增强型蜂窝结构:单向增强圆形蜂窝(SEH)和双向增强圆形蜂窝(DEH)。结合连续纤维 3D 打印技术,规划了连续纤维的成型路径并制造出试验件,同时设置聚乳酸(PLA)对照组。对上述蜂窝结构开展了准静态压缩性能和吸能特性研究,得到了以下几点结论:

(1) SEH 和 DEH 结构在准静态压缩下,应力-应变曲线表现出了多胞材料的典型应力响应特征,即出现弹性阶段、平台阶段和密实化阶段;

(2) CH、SEH 和 DEH 结构在采用连续碳纤维 3D 打印制造后相较 PLA 对照组,抗压强度分别提高 82.88%、42.73% 和 39.89%,比吸能性能分别提高 43.37%、63.17% 和 161.58%,平均压缩力分别提高 51.72%、61.81% 和 96.09%;

由数据可知,增加了竖向树叶形增强的 SEH 结构相较 CH 结构吸能特性提升较小,SEH-CF 相较 CH-CF 提升 10.98%,而 SEH-PLA 相较 CH-PLA 比吸能性能有下降,这与 SEH-PLA 受压时因材料强度低,支撑过早断裂失效有关。SEH 结构在受压时拥有可吸能的塑性铰数目较少且结构横向稳定性差,综合性能提升较小。

(3) 连续碳纤维增强蜂窝中的纤维束阻止了树脂基体中裂纹的扩展,防止结构的侧壁和支撑在受压时过早断裂,显著提升了结构的抗压缩和吸能性能;

(4) 在连续纤维 3D 打印成型中,结构内部的纤维路径设计可影响结构的刚度和变形模式。

参考文献:

[ 1 ]   WANG Z G. Recent advances in novel metallic honeycomb structure[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 166: 731-741.

[ 2 ]   FENG G Z, LI S, XIAO L J, et al. Energy absorption performance of honeycombs with curved cell walls under quasi-static compression[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 210: 106746.

[ 3 ]   QI C, JIANG F, YANG S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 227: 109393.

[ 4 ]   NOVAK N, HOKAMOTO K, VESENJAK M, et al. Mechanical behaviour of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods at high strain rates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122: 83-90.

[ 5 ]   沈振峰, 张新春, 白江畔, 等. 负泊松比内凹环形蜂窝结构的冲击响应特性研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(18): 89-95, 117. SHEN Zhenfeng, ZHANG Xinchun, BAI Jiangpan, et al. Dynamic response characteristics of re-entrant circular honeycombs with negative Poisson's ratio[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(18): 89-95, 117(in Chinese).



- [6] 周星驰, 唐振刚, 周徐斌, 等. CFRP圆形胞元蜂窝芯层面外剪切模量[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(10): 2777-2785.  
ZHOU Xingchi, TANG Zhengang, ZHOU Xubin, et al. External shear modulus of CFRP circular cell honeycomb[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(10): 2777-2785(in Chinese).
- [7] 章娅菲, 闵世威, 王海涛, 等. TPU蜂窝结构及吸能特性研究[J]. *塑性工程学报*, 2023, 30(3): 113-122.  
ZHANG Yafei, MIN Shiwei, WANG Haitao, et al. Study on compression and energy absorption characteristics of TPU honeycomb structure[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30(3): 113-122(in Chinese).
- [8] 孙靖, 王旭琴, 柳玉文, 等. 熔融沉积成型连续碳纤维增强尼龙蜂窝芯材的压缩特性[J]. *上海航天*, 2020, 37(3): 32-37.  
SUN Jing, WANG Xuqin, LIU Yuwen, et al. Compressive behavior of continuous carbon fiber reinforced nylon honeycomb cores prepared by fused deposition modeling[J]. *Aerospace Shanghai*, 2020, 37(3): 32-37(in Chinese).
- [9] 杨来侠, 刘波, 刘腾飞, 等. 3D打印连续纤维增强聚碳酸酯复合材料预浸丝制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(10): 5654-5665.  
YANG Laixia, LIU Bo, LIU Tengfei, et al. Preparation and properties of 3D printing continuous fiber reinforced polycarbonate composite prepreg filaments[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(10): 5654-5665(in Chinese).
- [10] QUAN C, HAN B, HOU Z H, et al. 3D printed continuous fiber reinforced composite auxetic honeycomb structures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 187: 107858.
- [11] CHENG Y Y, LI J J, QIAN X P, et al. 3D printed recoverable honeycomb composites reinforced by continuous carbon fibers[J]. *Composite Structures*, 2021, 268: 113974.
- [12] ZENG C, LIU L W, BIAN W, et al. Compression behavior and energy absorption of 3D printed continuous fiber reinforced composite honeycomb structures with shape memory effects[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101842.
- [13] 张亚男. 连续芳纶纤维增强TPU复合材料蜂窝结构设计及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.  
ZHANG Yanan. Study on the design and properties of honeycomb structure of continuous PPTA fiber reinforced TPU composites[D]. Jinan: Shandong University, 2019(in Chinese).
- [14] 胡锦顺, 林永水, 陈威, 等. 改进星形蜂窝结构面内动力学响应及能量吸收特性研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(23): 119-128.  
HU Jinshun, LIN Yongshui, CHEN Wei, et al. In-plane dynamic response and energy absorption characteristics of improved star-shape honeycomb structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(23): 119-128(in Chinese).
- [15] 杨玉平, 张中伟, 李玮洁, 等. 碳/碳蜂窝制备工艺及压缩与剪切行为[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(12): 6639-6648.  
YANG Yuping, ZHANG Zhongwei, LI Weijie, et al. Preparation process, compression and shear behavior of carbon/carbon honeycomb[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(12): 6639-6648(in Chinese).
- [16] YANG X F, XI X L, PAN Q F, et al. In-plane dynamic crushing of a novel circular-celled honeycomb nested with petal-shaped mesostructure[J]. *Composite Structures*, 2019, 226: 111219.
- [17] LIN T C, CHEN T J, HUANG J S. In-plane elastic constants and strengths of circular cell honeycombs[J]. *Composites Science and Technology*, 2012, 72(12): 1380-1386.
- [18] ORUGANTI R K, GHOSH A K. FEM analysis of transverse creep in honeycomb structures[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(4): 726-735.
- [19] 张帆, 魏培祥, 赵圆圆, 等. 基于体素的机械臂连续碳纤维3D打印路径规划[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(5): 1517-1527.  
ZHANG Fan, WEI Peixiang, ZHAO Yuanyuan, et al. Voxel-based path planning method for continuous carbon fiber 3D printing with robot arm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(5): 1517-1527(in Chinese).
- [20] 韩宁达. 连续纤维复合材料构件三维打印工艺及机电系统设计[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.  
HAN Ningda. 3D printing technology and electromechanical system design of continuous carbon fiber composite components[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019(in Chinese).
- [21] 秦若森, 孙守政, 韩振宇, 等. 3D打印连续纤维增强热塑性复合材料成型质量的研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(17): 200-208.  
QIN Ruosen, SUN Shouzheng, HAN Zhengyu, et al. 3D printing for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites: A review on molding quality[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(17): 200-208(in Chinese).
- [22] 田小永, 张亚园, 刘腾飞, 等. 连续碳纤维增强尼龙复合材料预浸丝制备与3D打印性能研究[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(15): 24-33.  
TIAN Xiaoyong, ZHANG Yayuan, LIU Tengfei, et al. Prepreg preparation and 3D printing of continuous carbon fiber reinforced nylon composite[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(15): 24-33(in Chinese).
- [23] MATSUZAKI R, UEDA M, NAMIKI M, et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-

nozzle impregnation[J]. [Scientific Reports](#), 2016, 6: 23058.

[24] WU H X, ZHANG X C, LIU Y. In-plane crushing behavior of density graded cross-circular honeycombs with zero Poisson's ratio[J]. [Thin-Walled Structures](#), 2020, 151: 106767.

[25] 中国国家标准化管理委员会. 高聚物多孔材料 压缩应力应变特性的测试: GB/T 18942—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Flexible cellular polymeric materials—Determination of stress-strain characteristics in compression: GB/T 18942—2003[S]. Beijing: China Standards Press, 2003.

[26] 魏路路, 余强, 赵轩, 等. 内凹-反手性蜂窝结构的面内动态压溃性能研究[J]. [振动与冲击](#), 2021, 40(4): 261-269.

WEI Lulu, YU Qiang, ZHAO Xuan, et al. In-plane dynamic crushing characteristics of re-entrant anti-trichiral honeycomb[J]. [Journal of Vibration and Shock](#), 2021, 40(4): 261-269(in Chinese).