

本文引用格式:吴鹏,陈利,王静. 多向嵌入式圆形蜂窝面外动态冲击响应[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(2): 224-231.

Citation format: WU Peng, CHEN Li, WANG Jing. Impact resistance of polycarbonate circular honeycomb under out-of-plane impact load[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(2): 224-231.

文章编号 1672-6634(2025)02-0224-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024080011

多向嵌入式圆形蜂窝面外动态冲击响应

吴鹏^{1,2}, 陈利^{1,2}, 王静^{1,2}

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387)

摘要 聚碳酸酯(polycarbonate, 简称 PC)作为常用的工程塑料之一, 具有优异的综合性能, 而其蜂窝制品因具有较高的抗冲击强度和较低的质量密度被广泛关注。为了提高交错排列下 PC 圆形蜂窝(PC-RSH)的抗冲击性能, 通过向圆形胞元内部四个方向嵌入围绕着微圆结构的“Y”型支撑单元, 提出一种多向嵌入式 PC 圆形蜂窝(PC-MCH)。基于 PC-RSH 蜂窝样品的面外准静态压缩试验, 对试验结果进行了模拟对照, 验证模型的可靠性。采用有限元模拟分析的方法, 对不同相对密度和不同冲击速度下 PC-RSH 和 PC-MCH 的面外冲击动态响应进行了研究, 具体包括其变形模式、应力-应变曲线以及能量吸收能力等。结果表明, 在等相对密度的条件下, 向胞元内部嵌入支撑结构, 能够改变结构受冲击变形的位, 并且具有更高的平台应力。此外, 在不同冲击速度条件下, PC-MCH 的单位质量吸能值均优于 PC-RSH。平台应力和比吸能的最大改善程度分别达到 29.06% 和 26.03%, 说明支撑单元的嵌入可以提高结构的能量吸收能力。所得结果可为蜂窝结构冲击动力学研究及结构设计提供理论参考。

关键词 聚碳酸酯; 面外冲击; 平台应力; 变形模式; 比吸能

中图分类号 TB383.4

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Impact Resistance of Polycarbonate Circular Honeycomb under Out-of-Plane Impact Load

WU Peng^{1,2}, CHEN Li^{1,2}, WANG Jing^{1,2}

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Advanced Textile Composites Materials, Institute of Composite Materials, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract Polycarbonate (PC), as one of the commonly used engineering plastics, exhibits excellent comprehensive properties. Its honeycomb structures, known for their high impact strength and low mass density, have garnered significant attention. To enhance the impact resistance of staggered PC circular honeycombs(PC-RSH), a novel multi-directionally embedded PC circular honeycomb(PC-MCH) was proposed. This design involves embedding "Y"-shaped beam units oriented in four directions around a micro-circular structure within the circular cell units. Based on out-of-plane quasi-static compression tests of PC-RSH ho-

收稿日期: 2024-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3706100); 天津市院市合作项目(23YFYSHZ00230)资助

通信作者: 陈利, 男, 汉族, 博士, 教授, 博士生导师, 国家“百千万”人才, 研究方向: 先进纺织复合材料, E-mail: chenli@tiangong.edu.cn; 王静, 女, 汉族, 博士, 副研究员, 研究方向: 先进纺织复合材料, E-mail: jingwang@tiangong.edu.cn.

neycomb samples, the reliability of the model was verified by simulating and comparing the test results. Using finite element simulation analysis, the dynamic response of PC-RSH and PC-MCH under different relative densities and impact velocities was investigated, including deformation modes, stress-strain curves, and energy absorption capabilities. The results indicate that, under the condition of equal relative density, embedding the support structures inside the cells alters the impact deformation location of the structure and provides higher plateau stress. Furthermore, under different impact velocities, the energy absorption per unit mass of PC-MCH outperforms that of PC-RSH. The maximum improvements in plateau stress and specific energy absorption were 29.06% and 26.03%, respectively, demonstrating that the insertion of the support units enhances the energy absorption capacity of the structure. The obtained results can provide theoretical references for the study of honeycomb structure impact dynamics and structural design.

Key words polycarbonate; out-of-plane impact; platform stress; deformation mode; specific energy absorption

0 引言

连续介质结构的高强度和高刚度有时并不能将碰撞所带来的冲击力降低到理想范围内,冲击能量的直接传递甚至还会对受保护方造成伤害,无法起到有效的吸能缓冲作用。而蜂窝结构内部存在大量的规则孔洞,在受到碰撞冲击时会产生具有相对稳定的孔洞塌陷,能有效吸收冲击能量,是优良的缓冲吸能结构,被广泛应用于汽车、航空航天以及建筑等领域^[1-3]。

蜂窝结构的抗冲击吸能性能与其胞元形态结构以及基体材料性质有关^[4-6],因此,为了提高蜂窝结构的抗冲击性能和材料利用率,得到高性能的蜂窝结构,国内外学者经过不断探索研究,设计出了不同构型、不同基体材料和多功能性的蜂窝结构,并对这些蜂窝结构在压缩和动态冲击下的变形模式和动力学响应等进行了研究。在自然界动植物的启发下,Yu等^[7]以毛竹微观结构为灵感,设计了仿生物胞壁蜂窝结构,通过有限元分析,发现优化设计后的结构能有效克服传统双圆管与六边形蜂窝薄壁结构存在的变形不稳定和压缩吸能效率低等缺陷。Wang等^[8]根据荷叶脉络走向,提出了一种新型具有仿荷叶脉络分枝特性的圆形蜂窝结构,并与常规圆形蜂窝的面内压缩模型对比,通过模拟分析两种蜂窝结构在结构参数、冲击速度和不同泊松比下的动态响应,发现优化后的蜂窝结构呈现出更均匀的变形,其动态泊松比几乎不受破碎速度的影响,比吸能也得到了巨大的提升。Song等^[9]借助玉米秸秆的结构灵感,充分利用其中空结构的轻量化特点,在普通圆管上引入具有一定尺寸的凹槽,提出一种槽型仿生薄壁管,通过实验和数值模拟对仿生管与普通圆管的吸能性能进行准静态三点弯曲试验对比,结果表明仿生管比普通圆管具有较高的吸能能力。Zhang等^[10]将蛛网的分布形式与六边形蜂窝结合,提出了具有适当层次的六边形蜂窝结构,将其作为新型轻质能量吸收器并应用于吸能盒设计中。Zhang等^[11]观察到柚子掉落后其内部果肉未受到明显伤害,根据其外皮具有层级的微观孔隙,构建出一种新型分级蜂窝结构。此外,Zhang和Chen等^[12,13]分别对内凹蜂窝和六角形蜂窝结构进行了层级和梯度结构设计。以形状结构组合为设计思路,Lu等^[14]将星型结构与双箭头结构进行胞元结合,提出了一种具有负泊松比效应的星型-箭头蜂窝构型,对此结构在不同冲击速度和不同相对密度下的各项评价指标进行了数值模拟研究,并给出了平台应力的经验公式。Li等^[15]将星型结构与菱形结构进行胞元结合,构建了星-菱形蜂窝结构,将准静态压缩试验和模拟结果的一致性作为仿真模型可靠性验证。在不同速度冲击下的动态响应结果表明,低速冲击作用下的星-菱形蜂窝结构会出现两个平台阶段。Liu等^[16]将负泊松比结构与空竹截面形状结合,提出了空竹型负泊松比蜂窝,该结构具有优于传统负泊松比蜂窝的平台应力和比吸能。此外,还有学者以传统结构加入支撑单元为设计理念,得到结构性能和稳定性有所提升的新构型。Sun等^[17]在正方形蜂窝结构中引入米字形支撑,设计了一种米字形填充正方形蜂窝构型,基于简化的超折叠单元理论,得到了该结构的面外准静态平台应力预测。Wang等^[18]将“X”型支撑单元引入矩形胞元中,发现当相对密度一定时,该结构蜂窝的缓冲性能会随支撑单元的扩展角度的增大而增大,而厚度变

化对变形模式的影响不大。Cheng^[19]等人在传统内凹蜂窝中引入斜撑单元,提出了强化型内凹蜂窝构型,在相对密度一致的情况下,比吸能得到了提高,且低速冲击时提升更多。

基于目前的研究现状可以发现,在蜂窝结构设计研究中,通过优化几何参数、分层次、分梯度以及加入额外支撑单元来改善蜂窝结构性能和提升结构抗冲击能力是常见的几种方式。本文以聚碳酸酯(PC)圆形蜂窝为研究对象,为了提高其结构稳定性,提升其吸能性能,采用添加支撑单元的方式,在交错排列 PC 圆形蜂窝(PC-RSH)构型的基础上,向其胞元内部嵌入围绕微圆的 Y 型支撑单元,提出了一种多向嵌入式圆形蜂窝(Multi-directional embedded circular honeycomb, MCH),并对设计前后蜂窝结构的面外冲击特性进行有限元分析,主要针对不同冲击速度下的力学性能和能量吸收性能进行对比研究。

1 计算模型的建立

1.1 几何构型创新设计

PC-MCH 构型的设计过程如图 1(a)所示。该结构在 PC-RSH 构型的基础上,通过往胞元内部四个方向嵌入围绕着微圆结构的“Y”型梁单元,由此得到多向嵌入式圆形蜂窝。PC-MCH 胞元的主要几何参数有圆半径 R_1 ,微圆半径 R_2 ,”Y”型梁单元较短胞壁长度为 l_1 ,较长胞壁两侧长度分别为 l_2 和 l_3 ,胞壁夹角为 θ ,胞元壁厚均为 t 。

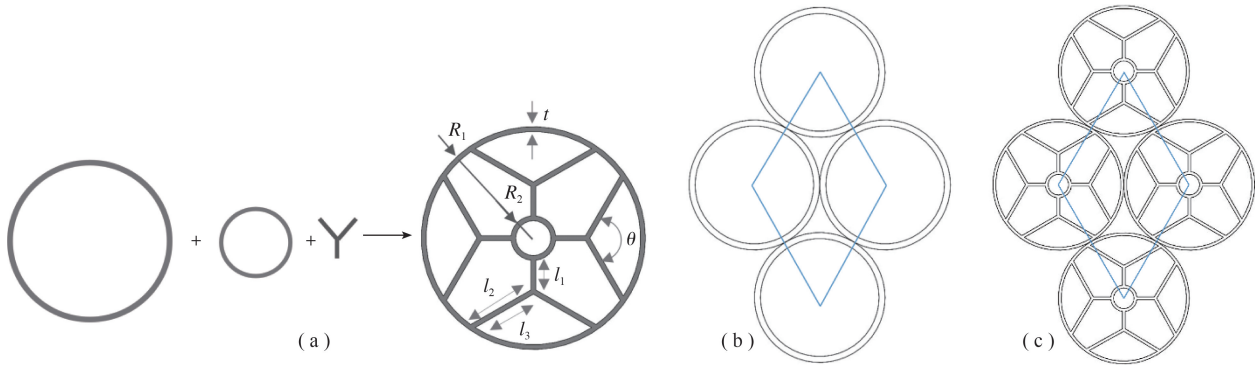


图 1 (a) PC-MCH 的构型设计过程; (b) PC-RSH 和 (c) PC-MCH 相对密度计算

Fig. 1 (a) The configuration design process of PC-MCH; (b) Relative density calculation of PC-RSH and (c) PC-MCH

与实体材料不同,蜂窝多孔结构的吸能性能与结构自身的相对密度密切相关^[20],图 1(b)和(c)用菱形分别标示了 PC-RSH 和 PC-MCH 的相对密度计算部分,为了简化 PC-MCH 的相对密度计算过程,将“Y”型梁单元与外侧圆和微圆的连接弧看作直线。蜂窝结构的相对密度的计算公式为

$$\Delta \bar{\rho} = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{A_s}{A}, \quad (1)$$

式中 ρ^* 为蜂窝表观密度, ρ_s 为基体材料密度。对于常规交错排列下的圆形蜂窝结构,其相对密度 $\Delta \bar{\rho}$ 计算公式为

$$\Delta \bar{\rho} = \frac{\pi t}{\sqrt{3} R_1}. \quad (2)$$

PC-MCH 蜂窝构型可以看作是由 1 个外侧圆、1 个微圆、4 个“Y”型梁组成。MCH 的相对密度公式为

$$\Delta \bar{\rho} = \frac{4S_1 + S_2}{2\sqrt{3} R_1^2}, \quad (3)$$

式中 S_1 为“Y”型梁的面积, S_2 为外侧圆和微圆的面积和,计算公式为

$$S_1 = l_1 t + 2 \left[l_2 t - \frac{1}{2} (l_2 - l_3) t \right] + \frac{\sqrt{3}}{4} t^2, \quad (4)$$

$$S_2 = 2\pi t (R_1 + R_2). \quad (5)$$

为验证相对密度计算的有效性,使用 Solidworks 面积测量工具将两种结构的模型相对密度计算区域的

测量数值进行了对比,对两种蜂窝结构胞元在等相对密度下的3D打印小样进行了称重,数值均一致。通过调整PC-MCH结构的厚度,保证加强前后两种结构为等相对密度,利用有限元仿真计算方法对冲击作用下的性能进行研究。

1.2 蜂窝结构有限元模型的建立

利用ABAQUS/Explicit显式动力学有限元软件对所构建的壳单元模型进行计算。为了得到相对稳定的动态响应结果^[21],选择两个方向单元数目为 11×11 ,蜂窝试样的初始深度为15 mm。PC-MCH的胞元参数为蜂窝半径 $R_1=2$ mm,微圆半径 $R_2=0.25$ mm, $l_1=0.5$ mm, $l_2=l_3=1.52$ mm, $\theta=120^\circ$,PC-RSH的蜂窝胞元半径为2 mm。选择PC-RSH的胞元厚度参数分别为0.06、0.08和0.1 mm,与之对应等相对密度PC-MCH的胞元厚度分别为0.026、0.035和0.044 mm。假定构建的是理想弹塑性模型,所使用基体材料密度约为 $1\,200\text{ kg/m}^3$,弹性模量为2.35 GPa,泊松比为0.34,屈服强度约为63 MPa。

为进行两种构型的对比研究,给出了冲击模型示意图(以PC-MCH为例),如图2所示。模型包括蜂窝试样和两个刚性板,下压板支撑蜂窝试样,上压板作为冲击端并赋予足够的点质量,保证蜂窝试样被完全压溃而不反弹。模型均采用5个积分点的壳单元(S4R)进行离散,壳单元边长设置为0.34。为防止仿真过程出现穿透现象,将接触类型设置为通用接触,切向行为采用“罚”函数,法向行为采用“硬”接触,定义摩擦系数设置为0.1。试件底端与下刚性板固定,通过限制冲击端除冲击方向外的所有自由度,防止蜂窝体在冲击过程中发生偏移。冲击端方向分别以1、15和50 m/s的初速度进行冲击。

1.3 模型可靠性分析

使用岛津AG-250KN电子万能试验机对PC-RSH蜂窝芯样品进行面外准静态压缩实验,并与模拟结果进行对照验证可靠性。使用ABAQUS/Explicit软件建立基于壳单元的有限元模型,上压板施加位移载荷边界条件。图3为两次重复实验结果和仿真模拟的力-位移曲线以及变形情况,实验和仿真结果具有较好的一致性。通过评估模型的能量平衡,确认了准静态压缩模型动能小于其内能的5%^[22],符合准静态响应下的能量耗散。对于冲击模型,其伪能远小于系统总能量并保持在很小的正值,进一步保证了仿真模型的有效性^[23]。

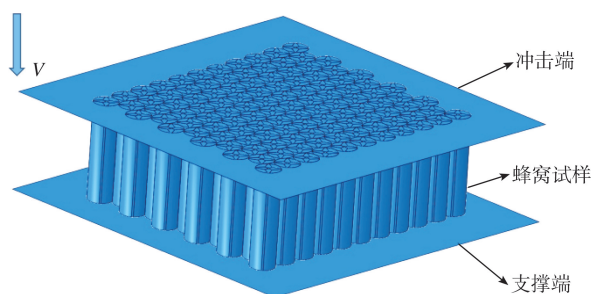


图2 PC-MCH蜂窝有限元模型

Fig. 2 PC-MCH honeycomb finite element model

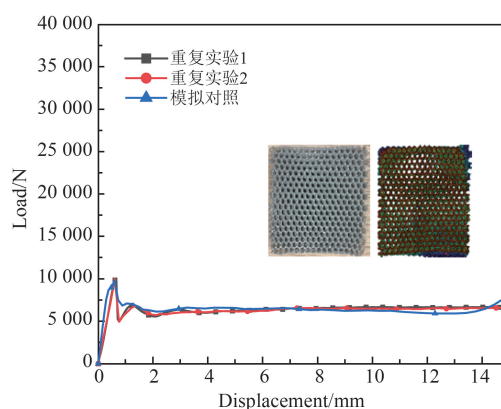


图3 实验和有限元对照

Fig. 3 Experimental and finite element comparison

2 数值结果与分析

2.1 变形模式及应力-应变曲线

图4给出了PC-RSH和PC-MCH在不同面外冲击载荷下的变形模式($\Delta\bar{\rho}=0.054$)。由图4(a)可知,在冲击速度为 $V=1\text{ m/s}$ 作用下,PC-RSH主要从远离冲击刚性板开始发生压溃变形。随着压缩进程不断推进,固定端压溃变形持续增加,冲击端变形较小,直到蜂窝被压溃。PC-MCH的变形褶皱区域主要集中在蜂窝的中部,随着压缩进程的增加,变形褶皱主要集中在上部区域。当应变达到0.5时,上部区域完全压溃,变形集中发生在褶皱下部区域,直到完全压溃。

由图 4(b)可知,冲击速度为 $V = 15 \text{ m/s}$ 时,PC-RSH 在变形初始,固定端和冲击端同时有很小的屈曲。随着压缩进程的推进,冲击端和固定端均有明显变形,应变达到 0.5 时,两端变形程度基本一致,接着变形会继续增加,直到被压溃。PC-MCH 的初始变形主要集中在冲击端,固定端呈轻微的手风琴式褶皱,随后的变形主要以冲击端向下呈连续褶皱的塑性塌陷为主。

由图 4(c)可知,当冲击速度为 $V = 50 \text{ m/s}$ 时,此时的惯性效应更加明显,PC-RSH 变形主要集中在冲击端,而固定端的变形在应变为 0.4 左右时开始明显。PC-MCH 固定端呈明显的手风琴式褶皱变形,冲击端也有较明显的变形。随着压缩进程的推进,这种渐进的褶皱变形不断增加,直至完全压溃。不同相对密度模型的变形类似。

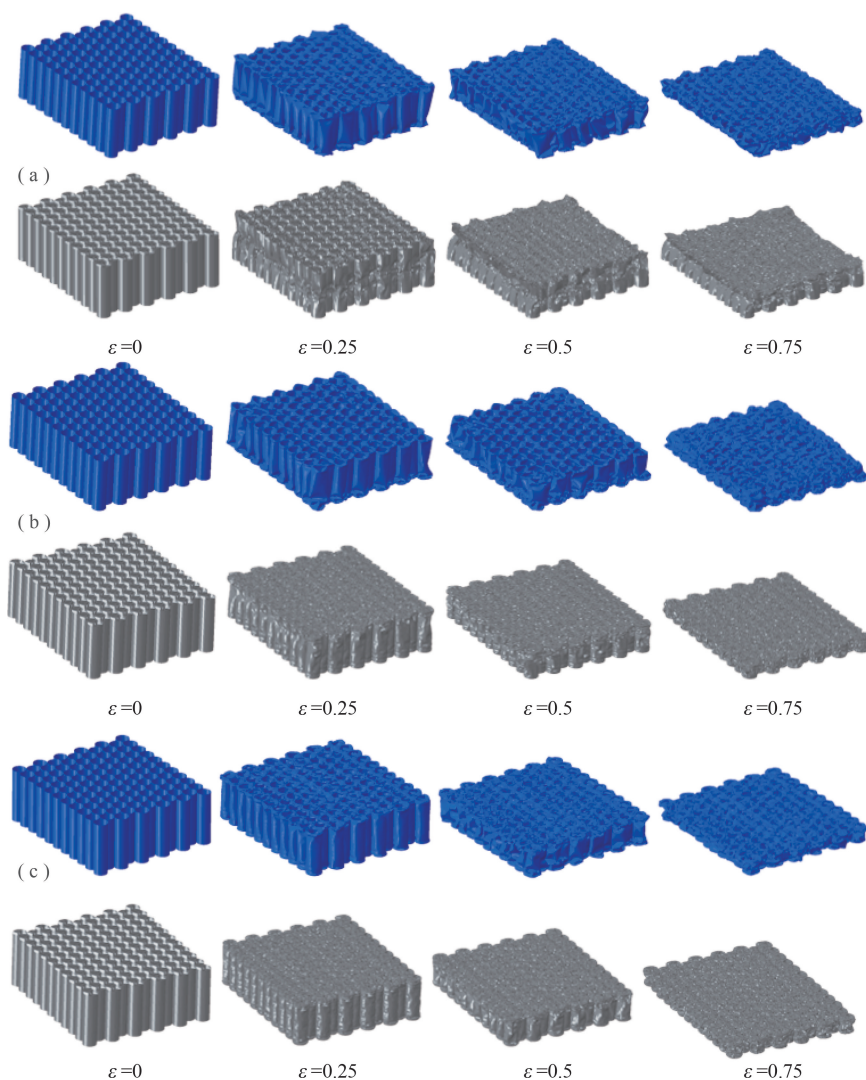


图 4 在(a)1、(b) 15 和 (c) 50 m/s 冲击速度下两种蜂窝结构(蓝色:PC-RSH;灰色:PC-MCH)的变形模式

Fig. 4 Deformation modes of PC-RSH (blue) and PC-MCH (gray) honeycomb structures at impact velocities of (a) 1, (b) 15 and (c) 50 m/s

图 5 为 PC-RSH 和 PC-MCH 在不同冲击速度下的名义应力-应变曲线 ($\Delta \bar{\rho} = 0.054$),该曲线是通过提取刚性板的支反力以及位移,经过处理得到的。曲线均表现出多胞材料在受压过程中经典的三个阶段:线弹性阶段、应力平台阶段和密实化阶段。可以看出,平台应力的大小和波动均会随着冲击速度的增加而增大,且不同冲击速度下 PC-MCH 的应力平台阶段均明显高于 PC-RSH。

随着支撑结构的嵌入,两种蜂窝结构的变形规律和承载能力也随着构型的变化而不同,其变形模式的改变意味着支撑单元产生了作用,提高了有支撑结构的 PC-MCH 的承载力。

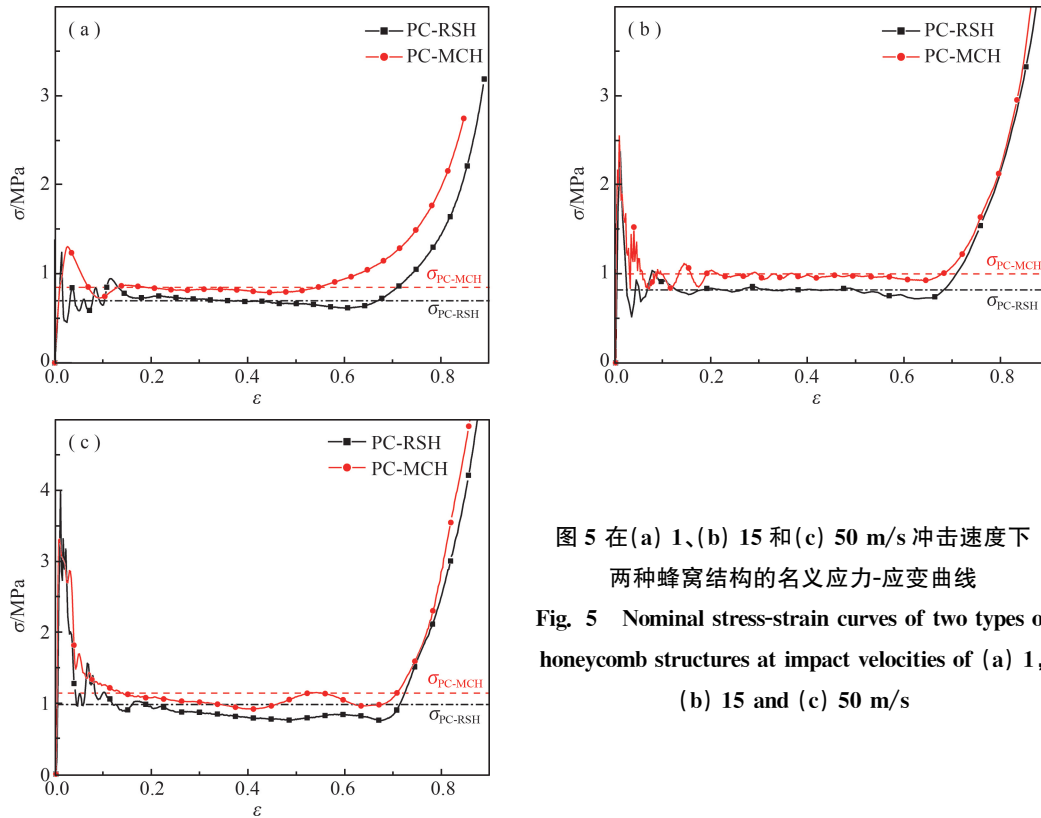


图5 在(a) 1、(b) 15和(c) 50 m/s冲击速度下
两种蜂窝结构的名义应力-应变曲线

Fig. 5 Nominal stress-strain curves of two types of
honeycomb structures at impact velocities of (a) 1,
(b) 15 and (c) 50 m/s

2.2 平台应力分析

蜂窝结构应力-应变曲线的平台阶段是评价其耐撞性能的关键指标,平台应力的大小影响着蜂窝结构吸能特性。通常将初始应力峰值到密实化应力出现时的平台阶段的平均应力定义为平台应力 σ ^[24],

$$\sigma = \frac{1}{\epsilon_d - \epsilon_c} \int_{\epsilon_c}^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon, \quad (6)$$

式中 ϵ_d 表示密实化应变, ϵ_c 表示初始峰值应力对应的应变。为了更加科学选择密实化应变,采用能量吸收效率法^[25],将能量吸收效率曲线尾端局部最高点对应的应变值定义为密实化应变。图6为PC-RSH和PC-MCH的名义应力-应变曲线及其对应的能量吸收效率曲线($V=50$ m/s)。

能量吸收效率的计算公式为

$$E(\epsilon) = \frac{\int_0^{\epsilon_a} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma_a}, \quad (7)$$

式中 ϵ_a 和 σ_a 分别为应力-应变曲线中的应变及其对应的应力。密实化应变的计算公式为

$$\left. \frac{dE(\epsilon)}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_d} = 0. \quad (8)$$

表1给出了两种蜂窝结构在不同相对密度和不同冲击速度载荷下平台应力的详细对比。相对密度为0.054时,随着冲击速度的增加,PC-MCH的平台应力相较于PC-RSH高出20%左右,冲击速度较高时,差值略有降低。相对密度为0.0725时,随着冲击速度的增加,二者的平台应力差异呈一定的下降趋势,但差值始终高出20%。相对密度为0.0725时,随着冲击速度的增加,其差值显著减小。结合图6分析可知,PC-MCH的平台应力得到了增强,能量吸收效率受到的影响较小。同时,高速冲击下初始应力峰值得到一定缓和,这对受保护方在处于高速撞击时的保护效果更加突出。

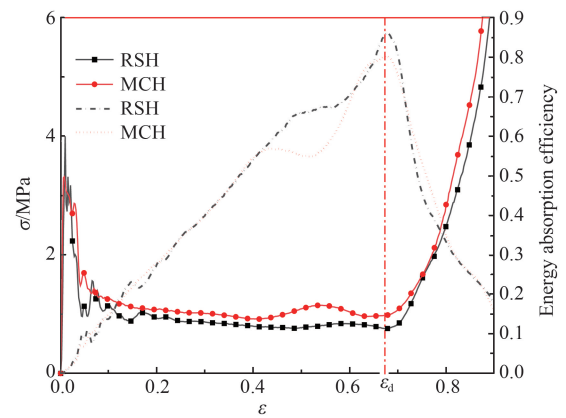


图6 名义应力-应变曲线及能量吸收效率曲线($V=50$ m/s)

Fig. 6 Nominal stress-strain curves and energy
absorption efficiency curves ($V=50$ m/s)

表 1 两种蜂窝结构在冲击载荷下的 σ Tab. 1 σ of two honeycombs under impact loads

$\Delta\rho$	$V/(m \cdot s^{-1})$	σ/MPa		$\frac{\sigma_{MCH}-\sigma_{RSH}}{\sigma_{RSH}}(\%)$
		PC-MCH	PC-RSH	
0.054	1	0.847 959	0.697 447	21.58
	15	1.002 423	0.821 985	21.95
	50	1.146 791	0.985 378	16.39
0.072 5	1	1.453 994	1.127 707	28.93
	15	1.560 754	1.231 563	26.73
	50	1.819 633	1.508 742	20.67
0.09	1	2.065 648	1.600 631	29.06
	15	2.141 566	1.786 724	19.86
	50	2.441 344	2.116 270	15.36

2.3 缓冲吸能性能

在考虑轻量化前提下,衡量蜂窝结构吸能性能的重要评价指标是比吸能(Specific Energy Absorption, E_{SA}),是结构的总吸能 E_a 与质量的比值,表示蜂窝结构单位质量所能吸收的能量,比吸能越大说明结构的轻量化防护性能越好,抗冲击性能越突出,其计算公式为

$$E_{SA} = \frac{E_a}{M} = \frac{\int_0^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\Delta\rho\rho_s} \quad (9)$$

表 2 两种蜂窝结构在冲击载荷下的 E_{SA} Tab. 2 E_{SA} of two honeycombs under impact loads

$\Delta\rho$	$V/(m \cdot s^{-1})$	$E_{SA}/(kJ \cdot kg^{-1})$		$\frac{E_{SA}(MCH)-E_{SA}(RSH)}{E_{SA}(RSH)}(\%)$
		PC-MCH	PC-RSH	
0.054	1	8.404 339	7.098 463	18.39
	15	10.515 24	8.785 659	19.69
	50	12.579 76	10.433 09	20.58
0.072 5	1	10.842 28	8.888 870	21.98
	15	11.810 08	9.981 596	18.32
	50	13.619 14	11.840 33	15.02
0.09	1	12.605 27	10.002 24	26.03
	15	13.299 5	11.178 67	18.97
	50	14.627 17	12.964 26	12.83

表 2 给出了在不同冲击载荷下两种蜂窝的比吸能,该数值取自密实化应变对应的比吸能值。表中数据可以看出,相对密度为 0.054 时,二者比吸能的百分比差值随着冲击速度的增加而增大,差值基本稳定在 20%。相对密度为 0.072 5 时,随着冲击速度的增加,二者的比吸能差值会逐渐减小至 15%。相对密度为 0.09 时,二者比吸能差值在高速冲击下,下降到了 12.83%。

为了呈现 PC-MCH 构型在受力分布上的优势,对不同冲击速度和不同相对密度下的平台应力和比吸能分别进行数据拟合。数据拟合结果表明 PC-MCH 整体平台应力和比吸能的提升分别是 PC-RSH 的 2.1 倍和 1.18 倍。分析结果表明,这种向胞元内部嵌入支撑单元的方法,能提高蜂窝内部致密化程度,增加蜂窝受冲击过程中的塑性变形区域,无论是平台应力还是吸收能量的能力比原结构均得到提高,可以根据具体的冲击条件选择合适的相对密度,以达到最佳的材料性能利用。

3 结论

本文以传统圆形蜂窝为研究对象,在交错排列 PC 圆形蜂窝(PC-RSH)的基础上,通过向胞元内部嵌入

围绕着微圆结构的“Y”型支撑单元,提出了一种多向嵌入式PC圆形蜂窝构型(PC-MCH)。通过建立ABAQUS/Explicit有限元分析模型,研究了两种蜂窝构型的面外冲击性能,得到了以下结论:(1) PC-MCH在面外冲击载荷作用下,其名义应力-应变曲线均为三个阶段:线弹性阶段、应力平台阶段和密实化阶段。(2) 冲击速度对变形模式的影响较大,不同冲击速度下的变形不同。在1 m/s时,PC-MCH的变形褶皱区域主要集中在蜂窝结构的中部,随后褶皱上部区域先被完全压溃,随后整体被压溃;在15 m/s时,PC-MCH变形主要集中在冲击端,固定端呈轻微的手风琴式褶皱,随后变形主要呈连续褶皱的塑性塌陷。在50 m/s时,PC-MCH固定端呈明显的手风琴式褶皱变形,冲击端也有较明显的变形,这种渐进的褶皱变形不断增加直至完全压溃。在不同的冲击速度下,相对密度改变引起的厚度变化对PC-MCH的变形模式未产生明显影响。(3) 根据PC-MCH和PC-RSH在相同条件下的平台应力和比吸能的分析结果和数据拟合结果可知,这种嵌入单元的方式能够有效提高蜂窝整体的吸能性能,抵抗冲击性能明显提升。

参 考 文 献

- [1] YIN S, CHEN H, WU Y, et al. Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 131-140.
- [2] 陈静, 邱启艳. 蜂窝夹层结构在飞机上的应用及发展[J]. *新材料产业*, 2018(7): 63-67.
- [3] 赵心悦, 孙献娥, 杨小军, 等. 蜂窝与微穿孔声学结构研究进展及其在木结构建筑中的应用[J]. *林产工业*, 2021, 58(2): 31-35.
- [4] 张勇, 蔡检明, 赖雄鸣. 异面撞击载荷下金属蜂窝填充薄壁结构的动态力学性能[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(1): 120-126.
- [5] 王志鹏, 李剑峰, 李海波, 等. 嵌锁式碳纤维/树脂基复合材料方形蜂窝夹芯结构的力学性能及损伤失效[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(4): 1778-1789.
- [6] 李国志, 孙德强, 张超, 等. 规则排列圆形蜂窝共面对角线方向缓冲性能的研究[J]. *包装工程*, 2022, 43(23): 234-243.
- [7] 于鹏山. 新型仿生薄壁结构的设计与吸能特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [8] 王勇辉, 何强, 顾航. 仿荷叶脉络薄壁管耐撞性能研究[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(1): 59-66.
- [9] SONG J, XU S, LIU S, et al. Design and numerical study on bionic columns with grooves under lateral impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 148: 106546.
- [10] ZHANG Y, WANG J, WANG C, et al. Crashworthiness of bionic fractal hierarchical structures[J]. *Materials & Design*, 2018, 158: 147-159.
- [11] WEN Z, SHA Y, Yu T X, et al. Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 163-172.
- [12] 张晓楠, 晏石林, 欧元勋, 等. 负泊松比内凹蜂窝结构梯度设计与动态冲击响应[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(3): 193-198.
- [13] 陈碧敏, 黄小娣. 梯度蜂窝力学行为及其多目标优化设计[J]. *机械强度*, 2024, 46(1): 107-114.
- [14] 卢子兴, 王欢, 杨振宇, 等. 星型-箭头蜂窝结构的面内动态压溃行为[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1893-1900.
- [15] 李娜, 刘述尊, 张新春, 等. 新型星-菱形负泊松比蜂窝结构的动态力学特性[J]. *复合材料学报*, 2024, 42: 1-12.
- [16] 刘海涛, 刘佳岳, 张德权. 空竹型负泊松比蜂窝结构的面内冲击性能研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(17): 262-267.
- [17] 孙德强, 常露, 邢月卿, 等. 米字形填充正方形蜂窝异面平台应力[J]. *包装工程*, 2024, 45(1): 281-289.
- [18] 王森, 宋正美, 许亚利, 等. 矩形与X形组合蜂窝异面缓冲性能的研究[J]. *包装工程*, 2022, 43(17): 72-81.
- [19] 程志伟, 侯秀慧. 强化型内凹蜂窝的力学特性研究[J/OL]. *应用力学学报*, 1-9[2024-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20230228.1147.007.html>.
- [20] GIBSON L J, ASHBY M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [21] 张新春, 祝晓燕, 李娜. 六切带手性蜂窝结构的动力学响应特性研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(8): 1-7.
- [22] ZHANG W, WANG H, LOU X, et al. On in-plane crushing behavior of a combined re-entrant double-arrow honey-comb[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 194: 111303.
- [23] 刘朝群, 张文鹏. 超弹性记忆合金蜂窝共面冲击特性研究[J]. *工业控制计算机*, 2023, 36(5): 111-112.
- [24] Dong Z, Li Y, Zhao T, et al. Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic re-entrant honeycomb[J]. *Materials & Design*, 2019, 182: 108036.
- [25] 韩会龙, 张新春, 王鹏. 负泊松比蜂窝材料的动力学响应及能量吸收特性[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(1): 47-57.

(责任编辑:蒲锡鹏)