

引用格式: 乔及森, 王晨洋, 陈新贵. 3D 打印负泊松比柱状蜂窝结构优化及面内轴向低速冲击性能[J]. 材料工程, 2026, 54(9): 235-243.

QIAO Jisen, WANG Chenyang, CHEN Xingui. Structural optimization and axial low-velocity impact performance of 3D printed auxetic columnar honeycomb structure[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(9): 235-243.

3D 打印负泊松比柱状蜂窝结构优化及 面内轴向低速冲击性能

乔及森^{1,2*}, 王晨洋^{1,2}, 陈新贵^{1,2}

(1 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050;

2 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

摘要:提出了一种新型负泊松比柱状蜂窝结构,通过改变蜂窝结构的单胞数量,设计了4种尺寸相同的蜂窝结构。通过冲击实验与有限元数值模拟研究了单胞数量对新型蜂窝结构力学行为与能量吸收性能的影响,并与不同质量铝蜂窝的比吸能进行对比。结果表明:新型蜂窝结构在冲击过程中表现出独特的压缩-扭转耦合变形机制,通过胞壁的扭转运动可以调整结构的受力分布,可有效地吸收和分散冲击能量,提高能量吸收效率。进一步分析发现,单胞数量对蜂窝结构力学性能有显著影响,可有效提高平台应力,最多可提高3.16倍,但压缩位移有所减小。综合力学性能分析表明,结构HM4-8在冲击力学性能和能量吸收效率方面具有最优表现,适合用于高效的能量吸收与冲击保护应用。该研究为蜂窝结构的优化设计提供了新的思路,具有重要的工程应用价值,特别是在轻量化与抗冲击性能要求较高的领域。

关键词:蜂窝结构;负泊松比;有限元分析;低速冲击;力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000819 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000819

中图分类号: TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)09-0235-09

Structural optimization and axial low-velocity impact performance of 3D printed auxetic columnar honeycomb structure

QIAO Jisen^{1,2*}, WANG Chenyang^{1,2}, CHEN Xingui^{1,2}

(1 School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A novel auxetic columnar honeycomb structure is introduced, in which four honeycomb structures of identical dimensions are designed by varying the number of unit cells. The effects of unit cell number on the mechanical behaviour and energy absorption performance of the honeycombs are investigated through impact experiments and finite element numerical simulations. The energy absorption performance is compared with the specific absorption energy of aluminum honeycombs of different masses. The results demonstrate that the honeycombs exhibit a unique compression-torsion coupling deformation mechanism during impact. The torsional motion of cell walls redistributes the internal forces, effectively absorbing and dissipating impact energy, thereby improving energy absorption efficiency. Further analysis reveals that the number of unit cells significantly affects the mechanical performance of the honeycombs, enhancing plateau stress and specific energy absorption, although compression displacement decreases. A comprehensive mechanical performance analysis indicates that HM4-8 demonstrates the optimal impact performance and energy absorption efficiency, making it suitable for high-efficiency energy absorption and impact protection applications. This study provides new insights into the optimized design of honeycomb structures, with significant engineering value, especially in fields requiring lightweight designs and high impact resistance.

Key words: honeycomb structure; negative Poisson's ratio; finite element analysis; low-velocity impact; mechanical property

随着全球对环境保护与资源节约的高度关注,轻量化结构在航空航天、汽车及建筑等领域的应用日益增多。蜂窝作为一种理想的轻量化结构,凭借其优异的力学性能,如高比强度、比刚度以及良好的能量吸收能力,在工程应用中得到了广泛的应用^[1-2]。尤其是近年来,增材制造技术发展迅速,3D打印技术为制备复杂几何结构提供了有力支持,能够制造出传统加工方法无法实现的高性能蜂窝结构,为结构设计带来了前所未有的灵活性^[3]。通过采用3D打印技术,不仅能够精确控制蜂窝单胞的几何形状,还能优化蜂窝结构在低速冲击过程中的力学响应,提高结构的能量吸收性能。特别是铝合金材料,因其优异的强度质量比和良好的抗冲击性能,已成为制备蜂窝结构的常用材料^[3-4]。Xiang等^[5]以铝合金为基体材料,提出了一种新的仿生双管薄壁结构,研究了结构在轴向冲击载荷下的吸能特性,为薄壁管的力学行为研究提供了数据支持。

蜂窝结构的力学行为是当前轻量化材料研究中的一个关键问题,特别是在低速冲击载荷下的力学响应。低速冲击行为是蜂窝结构在实际应用中常见的一种载荷状态,尤其在汽车碰撞、飞机起降等工程领域中,其力学行为直接关系到材料的能量吸收性能及结构的安全性^[6]。Wang等^[7]根据铝蜂窝在不同冲击速度下的冲击实验与参数化研究分析了蜂窝结构的速度敏感性,证明了冲击速度的增加对能量吸收的促进作用。作为新型蜂窝结构,由于在受力变形过程中存在的负泊松比效应,负泊松比蜂窝在承受冲击载荷时展现了优异的能量吸收能力^[8]。与传统蜂窝结构相比,负泊松比蜂窝结构不仅能在横向膨胀的同时保持较高的纵向强度,而且其变形模式更为复杂,有助于提升冲击能量的分散与吸收效率。Guo等^[9]提出了一种双U型蜂窝结构,该结构具有可调的负泊松比和等效刚度,并对冲击响应进行了数值研究,为减震结构的设计、制造和分析提供了有益的指导。然而,负泊松比结构较高的孔隙率导致了结构刚度的降低,如何在提高结构吸能能力的同时提高刚度是一个挑战。Gohar等^[10]通过对胞壁结构进行形状优化,对结构的抗弯性能进行评估,发现与未优化的结构相比,刚度提高了427%,比吸能提高了151%,显著提高了结构的弯曲性能。Zhu等^[11]在传统的可重入式蜂窝结构中引入椭圆环形结构,提出了一种新型椭圆环形重入蜂窝。通过准静态压缩实验发现,椭圆环的加入在不阻碍横向变形的情况下,提供了额外的纵向支撑,对结构刚度有着显著的增强效果。研究结果解决了负泊松比效应

与刚度之间的矛盾,为蜂窝结构优化设计提供了新的思路。

目前,对蜂窝结构在低速冲击下的研究主要集中在传统蜂窝结构的力学行为及其能量吸收性能的分析上。已有研究表明,负泊松比蜂窝结构的几何参数,如单胞尺寸、壁厚、相对密度等,对冲击性能具有显著影响,对设计参数进行优化可显著提高结构的冲击吸能能力^[12]。Andrew等^[13]研究了不同蜂窝单胞结构在低速冲击下的能量吸收性能,发现通过调整单胞的尺寸和排列方式可以有效优化蜂窝结构的冲击响应。Yang等^[14]通过在圆形蜂窝结构中加入弧形肋骨结构,建立了花瓣状蜂窝结构,研究了不同冲击速度下结构的面内冲击行为与吸能性。结果表明,在相同冲击速度下,新型结构的比吸能比普通圆形蜂窝结构的提高了近两倍。然而,现有的研究大多基于理论分析或简单的实验模型,缺乏对复杂几何形状和材料的深入研究。

基于此,本工作提出了一种新型负泊松比柱状蜂窝结构,结合冲击实验与有限元数值分析,通过对结构参数进行设计研究了单胞数量对蜂窝结构力学性能的影响。研究了负泊松比柱状蜂窝结构在低速冲击下的变形机制,为负泊松比蜂窝结构的优化设计提供了理论依据。

1 实验材料与方法

1.1 结构设计

图1为新型蜂窝结构的设计演化过程及相应参数设置,通过将传统的负泊松比蜂窝结构加工成筒状,得到了一种负泊松比柱状蜂窝(auxetic columnar honeycomb, ACH)结构,各单胞紧密连接。蜂窝单胞的几何参数由边长 L_1 、 L_2 、 L_0 与角度 θ 确定, H 、 R 分别为整体结构的高度与直径, R 固定为60 mm, t 为结构的壁厚, m 、 n 分别为结构的层数与每层单胞的个数。为探究参数设计对结构力学性能的影响,保证各结构的高度基本一致, L_0 与 t 相同,改变单胞数量提出了4种ACH结构如图2所示,结构的几何参数如表1所示。

1.2 实验材料

增材制造技术具有制备复杂几何结构的独特优势,已广泛应用于轻量化吸能结构的开发中。本研究所有试样均采用3D打印技术制备,工艺参数设置为:全局打印速度2 m/s,激光功率200 W,单层层厚0.035 mm。考虑到铝合金蜂窝材料在工程领域的广泛应用,本研究中选择AlSi₁₀Mg合金作为蜂窝结构的基体材料^[3,15]。

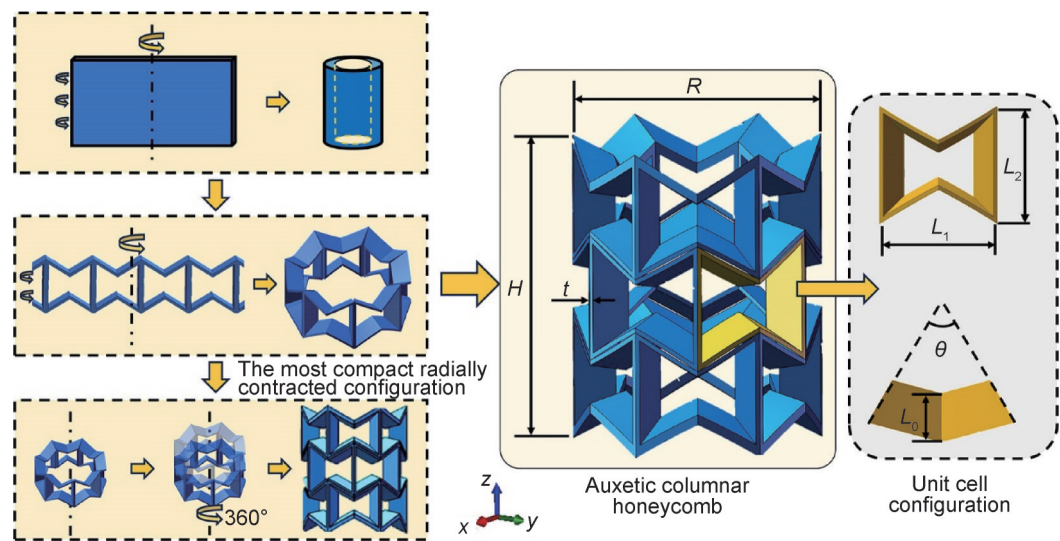


图1 新型蜂窝结构设计
Fig.1 Design of the novel honeycomb

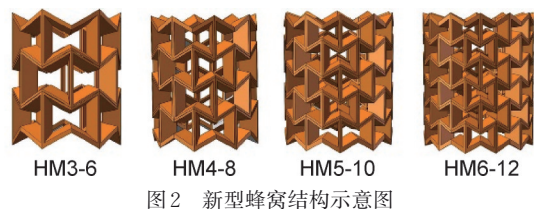


图2 新型蜂窝结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of the novel honeycomb structure

表1 模型几何参数

Table 1 Geometrical parameters of the models

Model	m	n	H/mm	$L_1=L_2/\text{mm}$	L_0/mm	t/mm
HM3-6	3	6	72.68	30.00	10.00	2.00
HM4-8	4	8	71.96	22.96	10.00	2.00
HM5-10	5	10	71.30	18.54	10.00	2.00
HM6-12	6	12	70.76	15.53	10.00	2.00

采用3D打印技术制备拉伸试样,以测试基体材料的力学性能,拉伸试样如图3(a)所示。为提高ACH结构在冲击过程中的稳定性并降低材料中的残余应力,分别对3D打印制备的拉伸试样进行不同的热处理,保温时间均为2 h,冷却方式为空冷,保温温度分别为300、400、500℃。使用万能拉伸试验机测得其应力-应变曲线,如图3(b)所示。结果表明,在500℃的退火条件下,材料的伸长率最优,为18.3%。基于此,最终选择对基体材料进行500℃,2 h的退火处理以优化材料的延展性和韧性,确保其适用于高冲击能量工况。通过拉伸试样测得材料的性能参数如表2所示, E 为弹性模量, ν 为泊松比, ρ_s 为密度, σ_y 为屈服强度。

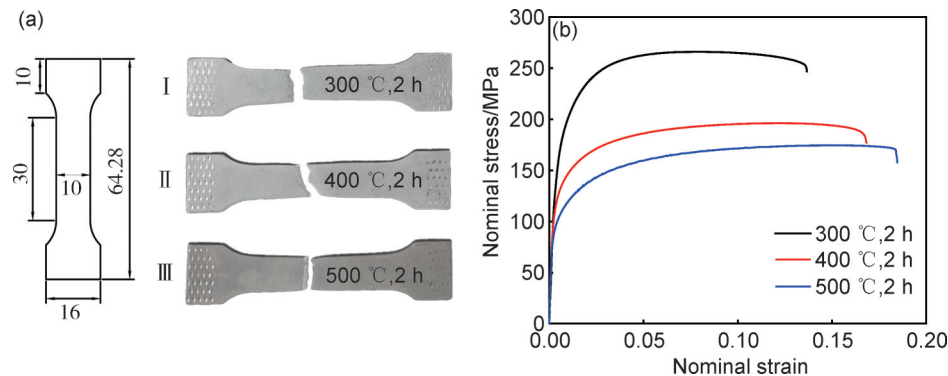


图3 退火拉伸试样

(a)断后照片(I代表300℃,2 h; II代表400℃,2 h; III代表500℃,2 h);(b)应力-应变曲线对比

Fig.3 Annealed tensile specimens

(a)post-fracture photographs (I represents 300℃,2 h; II represents 400℃,2 h; III represents 500℃,2 h);(b) comparison of stress-strain curves

1.3 实验平台搭建与有限元模型的建立

动态冲击实验对于研究蜂窝材料的力学行为具

有重大意义。在实际应用中(如汽车碰撞与子弹穿透等)通常发生瞬时冲击行为,静态压缩实验不足以支

表 2 材料性能参数

Table 2 Property parameters of the material

E/GPa	ν	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	σ_y/MPa
64	0.3	2670	123

撑对蜂窝材料大变形力学行为的研究。因此,工程应

用中在选择新材料时,必须要考虑新材料的抗冲击性能,提高工程的安全性。本研究通过低速冲击实验,研究了蜂窝结构的低速冲击响应行为,对结构HM3-6、HM4-8、HM5-10、HM6-12进行落锤低速冲击实验,锤头下落初速度为10 m/s,向ACH结构施加的能量为357.70 J。落锤冲击实验平台如图4所示。

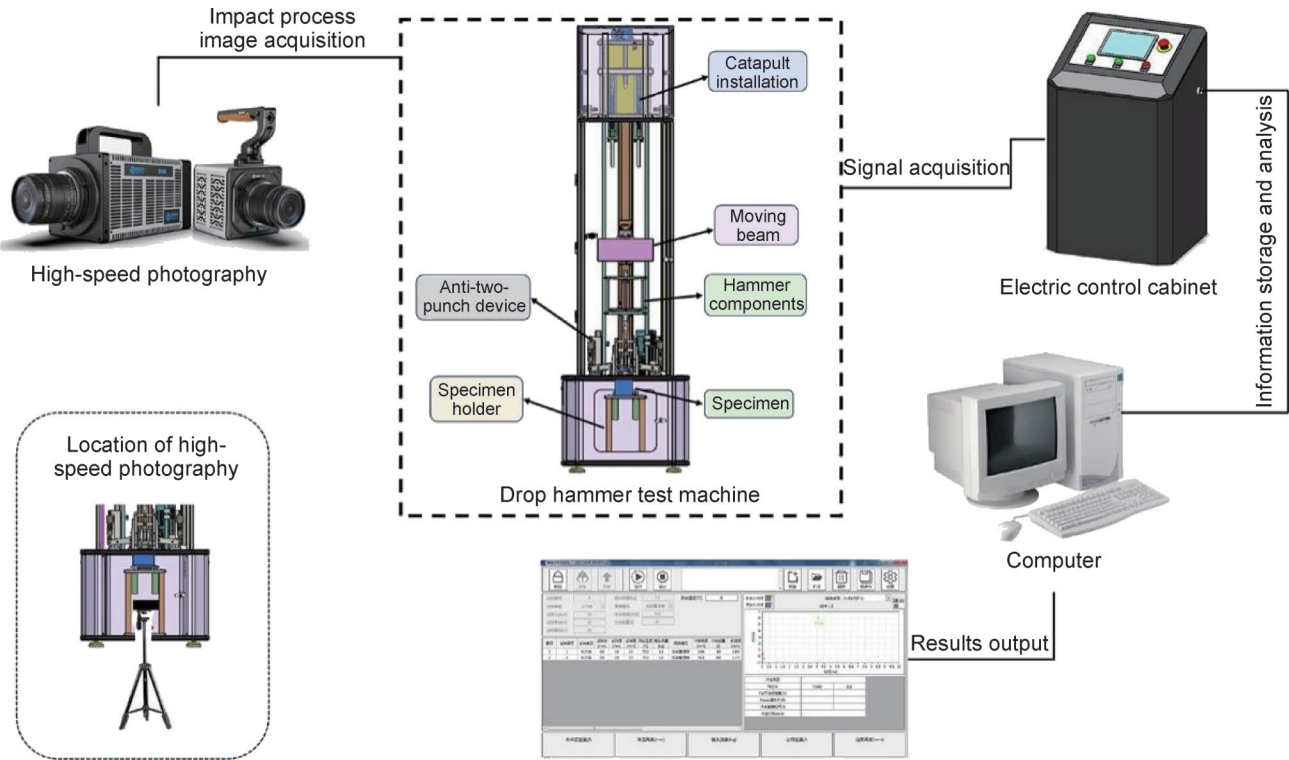


图4 动态冲击实验平台

Fig.4 Dynamic impact experiment platform

在实际应用中对蜂窝结构力学性能进行研究时常面对的是高速冲击工况,无法通过实验满足,此时需要通过有限元数值模拟对其进行分析。也可在实验前进行有限元数值模拟对比得出最优方案后再进行实验,以此减少成本消耗。通过有限元与实验相结合的方法可以对数值模型的准确度进行分析,确保数值模拟结果的有效性。本文中采用ABAQUS 2023/Explicit求解器对有限元模型进行计算^[16],图5为模型装配与载荷施加的示意图,将ACH结构放置在上下两块刚性板之间,下刚性板固定不产生位移,与蜂窝结构之间设置为绑定接触。对上刚性板设定质量模拟落锤冲击实验中的冲击锤头,并对其赋予不同的轴向速度,向下对结构进行冲击。有限元模型均采用沙漏控制、八节点一次线性六面体单元(C3D8R)进行分析。考虑计算精度与计算效率,有限元模型网格计算尺寸设置为0.8 mm。采用通用接触模拟蜂窝内部的自接触,采用面面接触模拟蜂

窝结构与刚性面板之间的接触,切向接触摩擦因数设置为0.2,法向接触设置为“硬”接触。此处ACH结构的本构模型采用与应变率无关的理想弹塑性模型^[17],基体材料为AlSi₁₀Mg合金,弹性模量为64 GPa,密度为2670 kg/m³,泊松比为0.3,屈服强度为123 MPa。

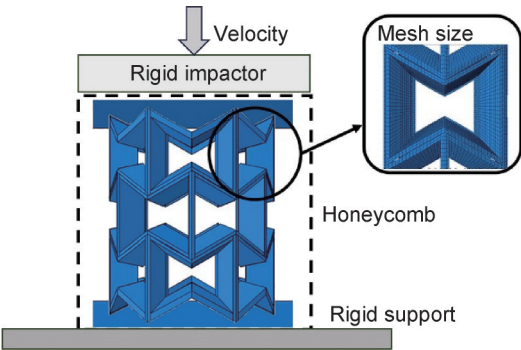


图5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

2 结果与分析

2.1 变形模式

通过高速摄像设备对试样的冲击过程进行采集,得到的变形模式如图6所示,将试样最先开始变形的两层定义为第0层(Layer 0)。初始状态下ACH结构绕中心轴线呈线对称,冲击初始,在轴向冲击载荷的作用下,结构被完全压缩,此时试样变形为弹性变形,变形量较小,结构中的缝隙被压密实,结构达到最紧径向收缩构型;收缩阶段结束后,随着冲击锤头的下落,ACH结构中的胞壁被激活,进行具有线对称的倾斜运动。在冲击载荷作用下,Layer 0

层胞壁同时开始发生相反方向的倾斜,从而促进结构发生扭转。此时胞壁处未发现明显的屈曲现象,可近似看作是刚性运动;随着冲击过程的进行和Layer 0的变形,其他胞壁也开始发生变形,有些行的胞壁是顺时针旋转,而另一些行是逆时针旋转,原因是这样结构两端的相对旋转可以抵消掉。分析其运动路径发现ACH结构所有其他行都随着Layer 0的扭转运动而展开;冲击最后阶段,结构变形终止,实验结束。在冲击过程中ACH结构发生径向收缩,由于边界约束,ACH结构中间部分的收缩程度比两端大,为沙漏状,在整个冲击过程中表现出负泊松比现象。

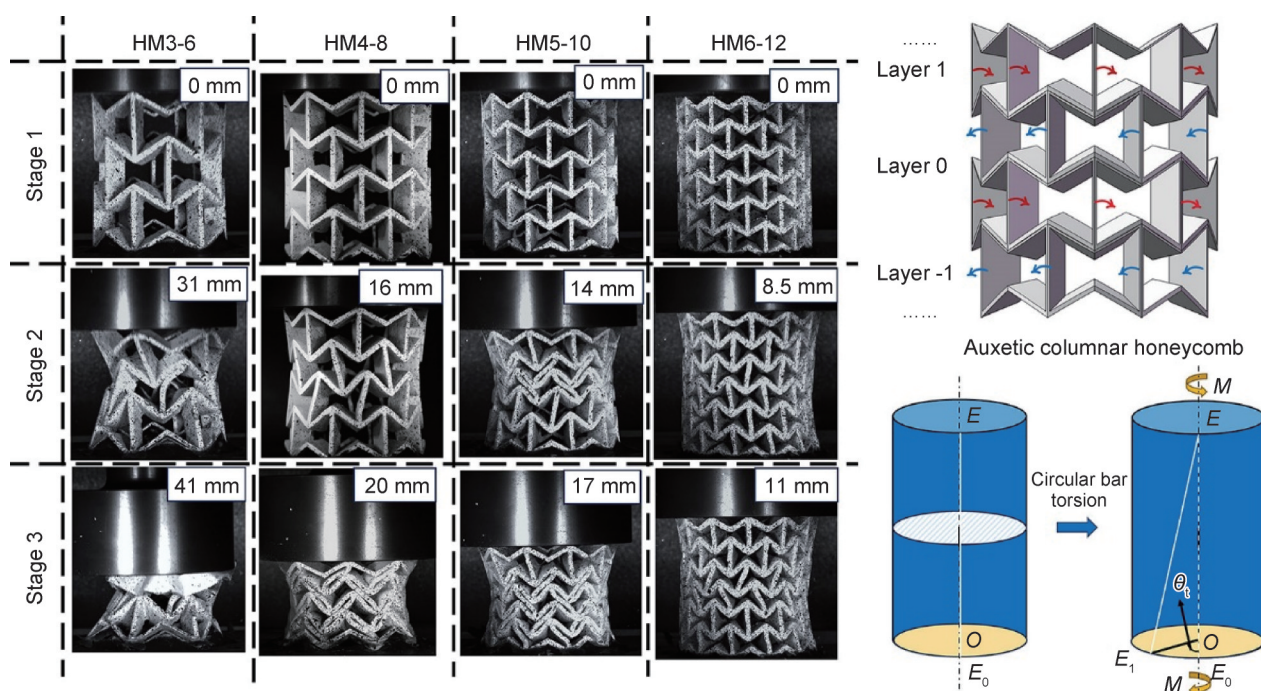


图6 10 m/s 冲击变形模式

Fig.6 10 m/s impact deformation patterns

图6展示了ACH结构在轴向冲击载荷下的变形模式。结果表明,结构不仅发生了轴向压缩变形,还出现了自结构中部向两端扩散的扭转运动。在扭矩 M 的作用下中, E 、 E_0 处的点运动至 E 、 E_1 处, θ_t 为扭转角,与胞壁的屈曲变形不同,这种扭转运动具有自动同步性,因此运动路径与力学性能更易于设计调控^[18]。该压缩-扭转耦合变形机制可显著提升结构对冲击能量的吸收与耗散能力,将胞壁两端绕管中心轴线发生相对转动的角度 θ_t 定义为每层单胞变形时的扭转角,其表达式见式(1):

$$\theta_t = \arcsin\left(\frac{2\Delta x}{R}\right) \quad (1)$$

式中: Δx 为胞壁两端节点的横向位移差; R 为结构的

直径。结构发生扭转变形时,冲击载荷不仅在轴向上传递,还会通过扭转效应分散到其他方向,有助于提高结构的能量吸收效率。如图7(a)所示,由于结构中所有胞壁扭转角大小一致,在结构HM4-8中随机选择一条胞壁,并在胞壁两端标记 A_0 、 B_0 两点,图7(b)展示了冲击结束后 A_0 、 B_0 两点的最终位置,并标记为 A_1 、 B_1 。图7(c)以结构 x 、 y 方向的位移为横纵坐标,展示了 A_0 、 B_0 两点在10 m/s冲击载荷下的运动路径。路径在 C_0 与 C_1 处发生了一次转向,是因为结构在冲击变形过程中发生了一次扭转,以此将胞壁的运动分为两个阶段。第一阶段胞壁开始倾斜倒塌,当其运动到 C_0C_1 位置时,Layer 0胞壁的倾斜运动停止。接着进入第二个阶段,第一层(Layer 1)胞壁开始旋转倾斜,带动胞

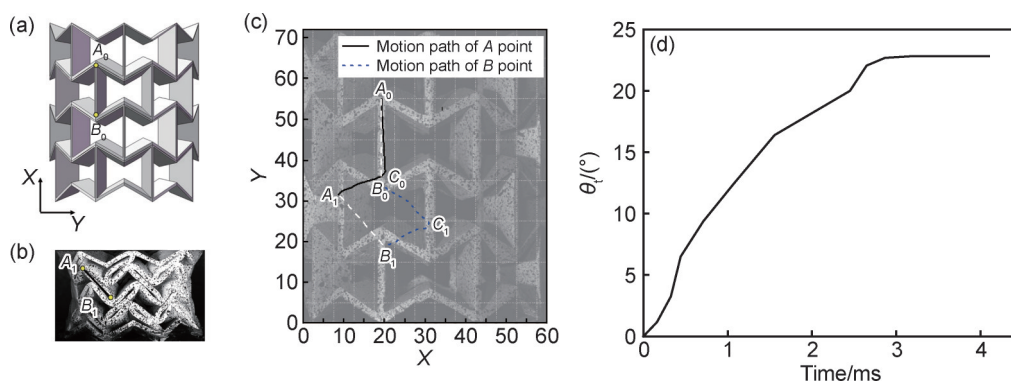


图7 结构HM4-8胞壁运动路径

(a)模型取点示意图;(b)模型最终运动状态;(c)两点运动路径图;(d)扭转角-时间曲线

Fig.7 Motion path of HM4-8 cell wall

(a)schematic diagram of model taking points;(b)model final motion state;(c)motion path diagram of two points;(d)torsion angle-time curve

壁进行反方向的扭转,胞壁随结构的扭转平移至 A_1B_1 处,此时胞壁两端节点相对位移不再变化。对 A_0 、 B_0 两点运动路径进行分析发现,结构变形过程中 $\Delta x = L_1/2$ 。由式(1)可推知结构的最大扭转角由式(2)可得。

$$(\theta_t)_{\max} = \arcsin\left(\frac{L_1}{R}\right) \quad (2)$$

图7(d)记录了结构HM4-8在冲击过程中扭转角随时间的变化曲线。结果表明,扭转角曲线近似呈线性增长,到达某一稳定值后不再变化,说明该结构在冲击过程中失稳风险较低。扭转角的增加导致胞壁产生剪切变形与弯曲变形,当应力超出屈服点时,局部塑性铰开始形成。随着塑性铰的逐渐形成,结构的局部屈曲耗散了冲击,限制了扭转角的进一步增加。表3列出了不同结构对应的最大扭转角值,便于进一步比较分析。综上可知,扭转角 θ_t 与行数 m 无关,只受单胞个数 n 的影响,最终扭转角 θ_t 为 $\theta/2$ 。相邻两层胞壁扭转角方向相反,且随着单胞个数 n 的增大而减小,调整参数 n 可设计出具有大范围轴向应变角的结构。但轴向冲击载荷下结构的扭转角不宜过大,对于结构HM3-6,结构的扭转角较大导致结构局部屈曲变形,影响结构的整体稳定性。对于结构HM6-12,由于冲击能量较小,结构变形不明显。较为合适的扭转角通常是能在保证结构稳定性的前提下尽量增大,达到最大化能量吸收的效果。从变形模式的角度来看,结构HM4-8的变形最为规则,层层折叠,扭转角较大的情况下可保持结构稳定,是较为理想的结构。

表3 各结构对应扭转角

Table 3 Corresponding torsion angles for the structure

HM3-6	HM4-8	HM5-10	HM6-12
30°	22.82°	18°	15°

2.2 力学性能

图8(a)~(e)为通过落锤冲击实验得到的冲击力与位移的关系曲线。由曲线的趋势可以看出随着单胞个数的增加,结构的冲击力逐渐增大,而压缩位移则相应减小。同时结构的初始峰值力随单胞数量增加而增大。然而,单胞个数的改变对结构的刚度的影响并不显著。在冲击力-位移曲线中,出现了多段波动,是由于结构在冲击过程中发生了动态接触与局部变形。结构受到冲击载荷时,胞壁发生接触,导致局部刚度突然增加,在曲线上表现为曲线的突升。当一层单胞发生屈曲后,变形向邻近单胞传递。随着更多单胞参与变形,接触条件改变,导致曲线出现多段波动。曲线中存在的多段波动现象与结构内部胞壁的接触密切相关,每一段波动都代表着结构内部自接触的发生。冲击初始,在轴向载荷下结构内部层与层之间的缝隙被压至密实,曲线在位置1处产生波动。在冲击载荷的作用下,胞壁绕结构中心轴线旋转并倾斜倒塌,当其与相邻单胞的胞壁或顶点发生接触时,产生应力集中,引发接触反作用力,导致后续曲线波动的产生。每次接触发生时,结构内部的约束条件突然变化,局部刚度增加。接触过程中形成的局部应力集中和反作用力使结构产生塑性铰,进一步促进能量耗散,提高吸能效率,从而导致力-位移曲线出现突升波动。随着冲击波的传递,新的接触不断发生,出现多个冲击峰值。冲击最后阶段,结构基本达到密实化状态,在冲击载荷的作用下,结构产生最后一次波动,此时结构的波动最为明显。波动在曲线中的位置与数量受单胞个数的影响,增加单胞个数,波动数量增加。随着结构单胞数量的增加,结构的孔隙率降低,结构内部的胞壁更容易发生自接触,从而加速塑性铰的形成。塑性铰数量的增加增强了结构的抗

冲击能力,因而结构的冲击力得到了增大。这种波动特征有助于增强能量吸收能力,通过优化结构几

何参数,可以有效利用曲线的波动效应,提高结构的吸能效率。

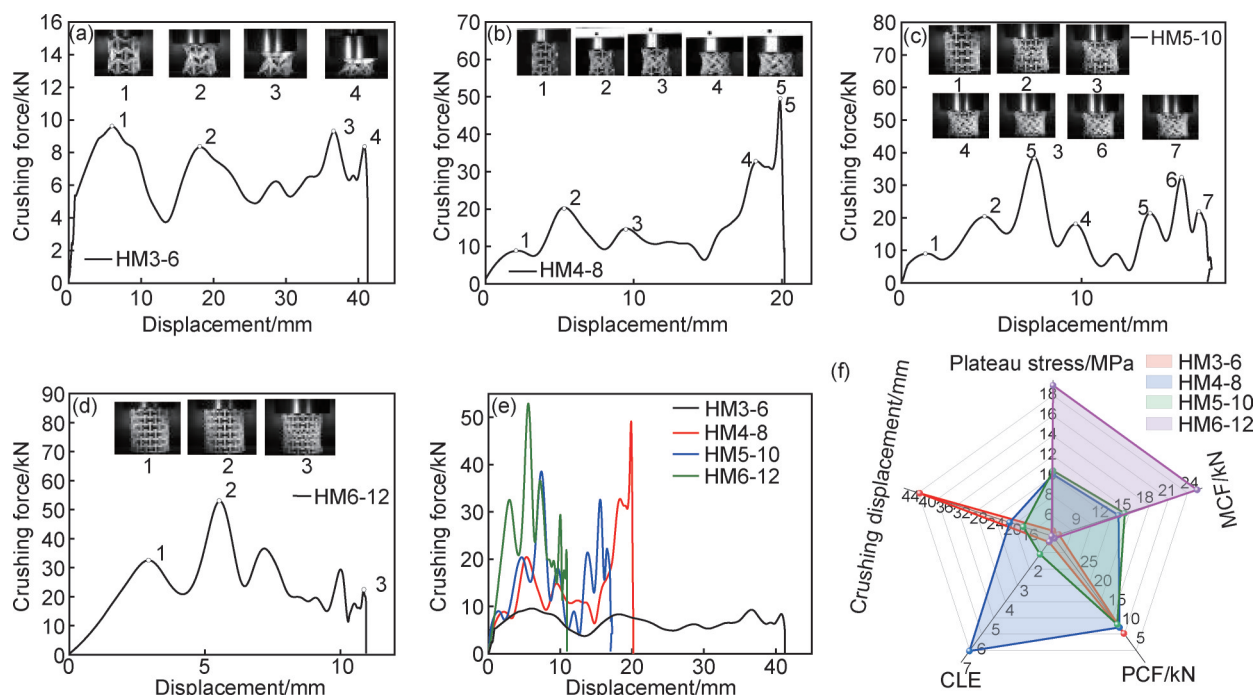


图8 10 m/s冲击力学行为

(a)HM3-6力-位移曲线;(b)HM4-8力-位移曲线;(c)HM5-10力-位移曲线;(d)HM6-12力-位移曲线;(e)力-位移曲线对比;(f)综合力学性能对比

Fig.8 Mechanical behavior of 10 m/s impact

(a)HM3-6 force-displacement curve;(b)HM4-8 force-displacement curve;(c)HM5-10 force-displacement curve;(d)HM6-12 force-displacement curve;(e)comparison of force-displacement curves;(f)comparison of integrated mechanical properties

仅对结构冲击力曲线进行分析无法准确评判ACH结构的最优参数化设计,因此需要结合实验数据进行深入计算与分析,以全面评估ACH结构的综合力学性能。常用的评价指标包括平台应力(platform stress)、平均压缩力(mean crushing force, MCF)、峰值载荷(peak crushing force, PCF)与压缩位移(crushing displacement)^[19-21]。其中,平台应力与平均压缩力值越高,表明ACH结构的抗冲击性能越好;而峰值载荷越低、压缩位移越大则更有助于被冲击物体的保护。此外,为更直观地反映结构在压缩过程中的载荷平滑性,计算了压缩力效率(crushing load efficiency, CLE),其定义为平均压缩力与峰值应力的比值^[5]。一般来说, CLE值越大,表明在相同水平的瞬时大载荷作用下,蜂窝结构能更有效地吸收能量。图9为计算的平台应力与峰值载荷,单胞数量可显著增强结构的平台应力,但峰值载荷也会随之提高。图8(f)展示了4种结构在落锤冲击后的综合性力学性能分析结果,为ACH结构参数化优化提供了可靠依据。对比来看,结构HM4-8的综合力学性能最优,在具备较好的抗冲击性能的同时,对被冲击物体具有良好的保护效

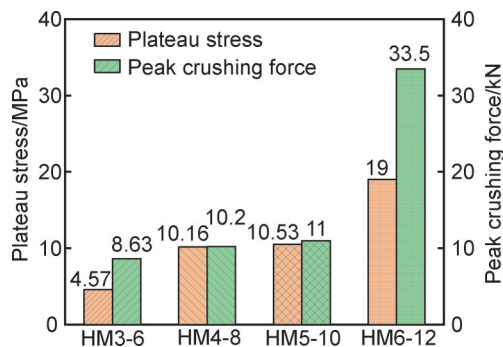


图9 平台应力与峰值载荷

Fig.9 Plateau stress and peak crushing force

果。相较之下,结构HM3-6与HM6-12的综合力学性能表现差。具体而言,结构HM6-12抗冲击能力较好,但压缩力效率较低、峰值载荷较高,不利于对被冲击物体的保护;而结构HM3-6的压缩位移较大,缓冲时间较长,但抗冲击性能较差。

综合分析表明,适当增加ACH结构单胞数量可以显著提高结构的平台应力与比吸能,同时实现变形的稳定性和均匀化,增强材料的吸能能力及平台应力的稳定输出。然而单胞数量的增加会导致结构的压

缩位移减小,影响缓冲性能。因此在优化 ACH 结构时,需要综合考虑其力学性能指标,以平衡抗冲击性能、吸能能力和缓冲效果之间的关系,实现结构的性能优化。

2.3 能量吸收性能

图 10 为落锤冲击实验得到的冲击能量-时间变化曲线,实验的冲击能由落锤冲击试验机测得。当冲击锤头开始接触试样后,锤头的动能开始向 ACH 结构试样传递,能量吸收迅速增加。随着结构中单胞个数的增多,冲击能量增长的速率也在增大,结构的初始抗冲击性能提高。当冲击锤头的速度降为零时,冲击过程结束,能量变化趋于平稳阶段。在此阶段,结构的耗能能力接近饱和,变形模式已达到极限,进一步施加冲击载荷不会显著增加能量吸收。能量曲线较为平滑,说明冲击过程中能量分散较为均匀,结构表现出较稳定的耗能特性。在冲击过程中冲击锤头的部分动能被蜂窝结构的变形以及冲击锤头与试样之间的摩擦所耗散和吸收。除了这些被耗散和吸收的能量外,其他能量是导致锤头反弹的能量。结构 HM4-8 在冲击过程中表现出良好的能量吸收性能。初始吸能速率较高,能够在冲击瞬间迅速吸收能量,从而有效保护主体结构;与其他结构相比,总吸能较高,达到 304 J,表现出优异的吸能性;此外,变形过程稳定,能量吸收过程表现出较好的稳定性与连续性,可有效延缓结构的变形和失效进程。综合分析表明,结构 HM4-8 在能量吸收性能方面表现优异,具有广泛的应用潜力。

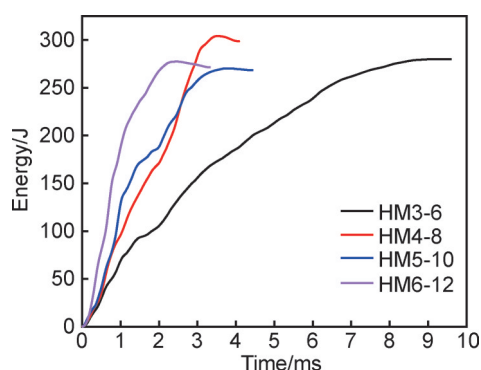


图 10 冲击能量-时间变化曲线

Fig.10 Curves of impact energy-time

2.4 与其他结构对比

为了更全面地评估 ACH 结构的能量吸收性能,本节重新建立了有限元模型,并通过调整模型参数设置,与不同质量的蜂窝结构进行对比分析。将上面板质量设置为 500 kg,冲击速度设定为 10 m/s。在模拟过程中,通过对应力-应变曲线进行计算得到试样的比

吸能值。同时,参考了文献中的蜂窝结构的力学性能数据,对比分析了不同质量结构的比吸能特性。图 11^[22-24]汇总了不同增强型蜂窝结构的质量(m)与比吸能(specific energy absorption)之间的关系。分析结果表明,ACH 结构在能量吸收性能方面具有明显优势,具有较高的吸能效率,同时兼具良好的轻量化特性。此外,实验数据进一步揭示,随着结构中单胞数量的增加,ACH 结构的吸能能力显著提升。这一研究结果为增强型蜂窝结构的优化设计提供了新的思路,表明 ACH 结构在满足轻量化需求的同时,能够显著提高其能量吸收性能,为相关领域的工程应用提供了参考依据。

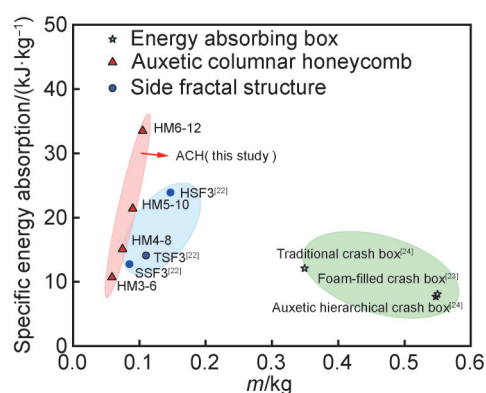


图 11 不同蜂窝结构比吸能随质量变化的 Ashby 图

Fig.11 Ashby diagram of the specific energy absorption of different honeycombs with mass change

3 结论

(1)通过引入负泊松比特性,ACH 结构表现出一种压缩-扭转耦合式变形机制,该机制不仅促进了结构的径向收缩,还有效提高了结构在冲击载荷下的能量吸收和变形稳定性。研究发现,结构的扭转角与单胞数量呈负相关,合理设计单胞数可优化其能量吸收效率,并提高结构的抗冲击能力。

(2)单胞数量对 ACH 结构抗冲击性能影响显著,随着单胞数量的增加,ACH 结构的抗冲击能力、平台应力和比吸能均有所提高,平台应力最多可提高 3.16 倍。然而,单胞数量的增加也会导致结构的压缩位移减小,从而影响其缓冲效果。因此,在优化设计时,需要综合考虑单胞数量对抗冲击性能、吸能能力和缓冲效果之间的平衡。

(3)通过对比不同 ACH 结构的冲击力学性能,结构 HM4-8 展现出优异的性能。其具有较高的抗冲击能力、稳定的变形模式和较高的能量吸收效率,能够

在冲击过程中提供有效保护,适用于高效能量吸收与冲击缓解的工程应用。ACH结构在实际应用中的潜力巨大,尤其在轻量化设计和冲击防护领域具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] Huang W Z, Zhang Y, Xu X L, et al. Multi-stage perfect load-bearing behavior for tandem honeycomb by face-centered hierarchical strategy[J]. *Engineering Structures*, 2024, 315: 118441.
- [2] 乔及森, 孔海勇, 苗红丽, 等. 梯度铝蜂窝夹芯板的力学行为[J]. *材料工程*, 2021, 49(3): 167-174.
- Qiao J S, Kong H Y, Miao H L, et al. Mechanical behavior of gradient aluminum honeycomb sandwich panels[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(3): 167-174.
- [3] Liu Y, Wang T, Chen H Y, et al. Impact behaviors of additively manufactured metals and structures: a review[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 191: 104992.
- [4] Wei L L, Zhao X, Yu Q, et al. A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 149: 106623.
- [5] Xiang J W, Du J X, Li D C, et al. Numerical analysis of the impact resistance in aluminum alloy bi-tubular thin-walled structures designs inspired by beetle elytra[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(22): 13247-13260.
- [6] Huang F L, Zhou X W, Zhou D, et al. Crashworthiness analysis of bio-inspired hierarchical circular tube under axial crushing[J]. *Journal of Materials Science*, 2023, 58(1): 101-123.
- [7] Wang Z G, Tian H Q, Lu Z J, et al. High-speed axial impact of aluminum honeycomb-experiments and simulations[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 56: 1-8.
- [8] Chen Z Y, Li J H, Wu B S, et al. Enhanced mechanical properties of re-entrant auxetic honeycomb with self-similar inclusion[J]. *Composite Structures*, 2024, 331: 117921.
- [9] Guo M F, Yang H, Ma L. Design and analysis of 2D double-U auxetic honeycombs[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 155: 106915.
- [10] Gohar S, Hussain G, Ali A, et al. In-plane bending performance of novel negative Poisson's ratio structures and its enhancement through the application of shape optimization method[J]. *Composite Structures*, 2023, 322: 117357.
- [11] Zhu D F, Wei Y C, Shen X Y, et al. A novel elliptical annular re-entrant auxetic honeycomb with enhanced stiffness[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 262: 108732.
- [12] Zhang J J, Lu G X, You Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: a review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 201: 108340.
- [13] Andrew J J, Ubaid J, Hafeez F, et al. Impact performance enhancement of honeycombs through additive manufacturing-enabled geometrical tailoring[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 134: 103360.
- [14] 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 meso-structure[J]. *Composite Structures*, 2019, 226: 111219.
- [15] Zhu Y L, Gao D F, Shao Y B, et al. A novel prefabricated auxetic honeycomb meta-structure based on mortise and tenon principle[J]. *Composite Structures*, 2024, 329: 117782.
- [16] Habib F N, Iovenitti P, Masood S H, et al. Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5/6/7/8): 2369-2380.
- [17] Zhang D, Jiang D, Fei Q, et al. Experimental and numerical investigation on indentation and energy absorption of a honeycomb sandwich panel under low-velocity impact[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2016, 117/118: 21-30.
- [18] Feng H, Ma J, Chen Y, et al. Twist of tubular mechanical metamaterials based on waterbomb origami[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 9522.
- [19] Zhang X M, Xie J, Chen J X, et al. The beetle elytron plate: a lightweight, high-strength and buffering functional-structural bionic material[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4440.
- [20] Yuan S Q, Chua C K, Zhou K. 3D-printed mechanical metamaterials with high energy absorption[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(3): 1800419.
- [21] Gao Z P, Xia F K, Li J H, et al. Axial compression of multi-cell hexagonal tubes with novel hierarchical architectures: numerical and theoretical analyses[J]. *Composite Structures*, 2023, 318: 117079.
- [22] Zhang Y, He N, Song X, et al. On impacting mechanical behaviors of side fractal structures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 146: 106490.
- [23] Hao P, Du J X. Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb column thin-walled structure under impact loading[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 79: 301-308.
- [24] Tan H L, He Z C, Li E, et al. Crashworthiness design and multi-objective optimization of a novel auxetic hierarchical honeycomb crash box[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 64(4): 2009-2024.

基金项目:国家自然科学基金项目(52063017);沈阳材料科学国家研究中心-有色金属加工与再利用国家重点实验室联合基金(18LHPY007)

收稿日期:2024-12-10;**录用日期:**2025-02-21

通讯作者:乔及森(1973—),男,教授,博士,主要从事金属结构轻量化设计与先进连接技术研究,联系地址:甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号兰州理工大学材料科学与工程学院(730050),E-mail:qiaojisen@lut.edu.cn

(本文责编:齐书涵)