

文章编号 1672-6634(2023)04-0035-09

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2022120008

无模直写制备负泊松比多孔材料及其力学行为研究

陈煦芬, 杨炜沂

(西南交通大学 材料科学与工程学院、材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要 通过无模直写成型技术制备了具备负泊松比特性的周期胞元结构柔性多孔材料, 分别设置胞元结构角度、胞元周期以及基体材料性质作为实验变量, 结合单轴压缩和拉伸测试过程中样品的形变模式与应力-应变曲线特征, 分析讨论了各因素对周期胞元结构力学响应的影响。研究发现, 结构负泊松比效应主要取决于胞元结构角度, 而对于整体样品的弹性模量和能量吸收性能, 胞元周期为主要影响因素。

关键词 负泊松比; 多孔材料; 无模直写; 力学行为

中图分类号 TB383

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Study on the Influencing Factors of Mechanical Response of Three-Dimensional Negative Poisson's Ratio Porous Materials

CHEN Xufen, YANG Weiyi

(Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials (Ministry of Education), School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract 3D periodic cell structure porous samples with negative Poisson's ratio characteristics were created by direct writing. Combining with the deformation mode and stress-strain curve characteristics of the sample during uniaxial compression and tensile tests, the angle of cell structure, cell period, and matrix material properties were set as experimental variables to analyze and discuss the influence of each factor on the mechanical response of the periodic cell structure. It is found that the negative Poisson's ratio effect of structure mainly depends on the angle of the cell, and the period of a cell is the main influencing factor for the elastic modulus and energy absorption performance of the overall sample.

Key words Negative Poisson's Ratio; porous materials; direct-writing; mechanical response

1 引言

泊松比又称横向变形系数, 通常以 ν 表示, 用于表征材料在载荷作用下各垂直方向形变量之间的关系, 定义为载荷作用下的材料垂直载荷方向应变 ϵ_1 与沿载荷方向应变 ϵ_2 之比的负值, 即 $\nu = -\epsilon_1/\epsilon_2$ 。正泊松比材料在受到纵向压缩时发生横向膨胀, 受到拉伸时则伴随着横向收缩。而当材料的泊松比为负时, 在变形

收稿日期: 2022-12-17

基金项目: 中央高校基本科研项目(2682022ZTPY083); 四川省科技厅港澳台科技创新合作项目(2021YFH0163)资助

通讯作者: 杨炜沂, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 环境功能材料, E-mail: wyyang@swjtu.edu.cn.

过程中表现出相反的行为,这类材料被称为负泊松比材料或者拉胀材料^[1,2]。当多孔结构引入负泊松比特性时,既保留了多孔材料内部能量传递、裂纹扩展困难的特点,又基于负泊松比效应,材料在受压载荷作用时向施力部位收缩聚集,很大程度上缓解了多孔材料因低密度带来的力学性能牺牲,表现出更高的比强度、能量吸收率以及优良的抗压痕性、断裂韧性等^[3-6],因此这类材料在工业防护^[7-9]、航天航海^[10-13]、交通运输^[14,15]等领域受到了越来越多的关注。

泡沫、薄板、薄膜等^[1,4,7,16-18]人造负泊松比多孔材料较早得到研究和开发,并且已在工程上获得了一定的应用,但此类无序胞元结构或二维平面材料仍存在材料性能参数波动、应用范围窄等不足。相较而言,三维负泊松比结构更能充分发挥材料的耐冲击特性,周期性的有序拓扑结构能够实现多孔材料比强度和比刚度的提升^[3];此外,其性能参数的易调控和稳定性的优势也为超材料^[19-23]的发展提供了全新的方向。然而,周期性有序三维负泊松比多孔材料在构型上的复杂度使其制备难度大大提高。目前已有的三维负泊松比多孔材料设计性研究工作主要集中于理论分析、有限元模拟与刚性支架模型的验证^[12,17,21,23-28],与材料的实际应用仍有一段距离,因此负泊松比胞元结构的设计优化、制备工艺、性能参数调控等研究方向的协同进行,对于推动负泊松比多孔材料的发展具有重大意义。

性能影响因素的作用规律是研究胞元结构材料设计的关键内容。由于负泊松比效应来自于胞元在载荷作用下的特殊变形方式,因此胞元形状是三维多孔负泊松比材料设计时的首要考虑因素,结构的几何参数决定了胞元中力的传递方式和胞元壁的变形方式,进而极大影响着整体结构的力学响应;其次,作为胞元排列组合成的整体,胞元之间有着共同的结构顶点或胞元壁,胞元在受载荷作用时的应力分布和变形势必会受到相邻胞元的影响,因此胞元周期数也是多孔材料设计过程不可忽视的考察因素。

新型高效的材料构筑方法有利于辅助研究胞元结构设计优化以及实现材料结构参数的快速调控。无模直写 3D 打印技术是一种新型的三维成型技术,由计算机辅助控制系统、三维运动平台系统和浆料输出控制系统三部分构成,各系统控制打印浆料按照模型截面直接“书写”以建立模型,适用于多种复杂精细的三维结构,具有设备简单、成型快速的特点。本研究借助该项技术在制备复杂三维结构上独特的优势,研究三维负泊松比胞元对整体结构力学性能和行为的影响。实验采用双箭头结构^[29]作为研究对象,分别研究了几何参数(内凹角角度)、胞元周期数与基体材料性质对三维负泊松比多孔材料力学响应的影响规律展开研究,系统地分析了胞元结构样品的形变机制、弹性模量、能量吸收性能,以期为新型负泊松比结构材料的发展提供设计思路。

2 实验

2.1 实验原料与仪器设备

去离子水,无水乙醇、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、固化剂、钛酸钡(BTO,99.9%分析纯)。高速离心机(TGL-16,山东百欧医疗科技有限公司)、3D 打印机(ZCC2000 型,厦门智创诚科技有限公司)、精密点胶机(AD-983 型,东莞市长安金锋五金机械厂)、无油静音空气压缩机(EWS06 型,浙江永源机电制造有限公司)、电子万能试验机(INSTRON)等。

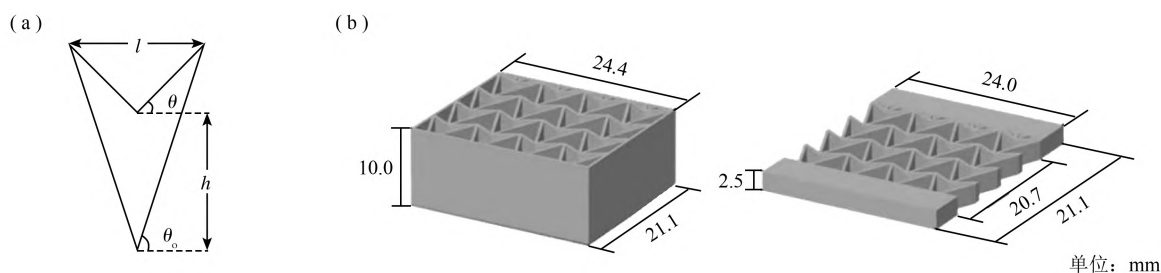


图1 胞元(a)结构参数和(b)样品尺寸示意图($l=5.20$ mm; $h=6.00$ mm; θ 。用于固定和变量参数之间的协调)

2.2 样品制备

2.2.1 模型构建与变量设置。实验采用的胞元结构参数示意以及周期样品尺寸如图1所示,其中,胞元宽

高(l, h)和样品尺寸为固定。为分别探究结构在压缩载荷和拉伸载荷下的力学响应,样品分设压缩样品与拉伸样品两类。本文对胞元周期样品力学响应的探究围绕结构与材料两方面展开,分别设置胞元角度 θ 、胞元周期 T 和基体材料固体粉末质量分数 w 三组变量,胞元结构样品不同变量参数设置如表1所示,样品模型根据此参数信息进行构建和打印切片处理。

表1 胞元结构样品不同变量参数设置

实验组	变量	参数值				
①	$\theta/(^{\circ})$	-49	0	30	45	60
②	T	4	5	6	7	8
③	w	0%	30%	50%	70%	

2.2.2 直写成型。样品制备选择 PDMS 1700 作为直写浆料,这是一种流变性质非常适合无模直写的材料^[30],在完全固化后具有良好的柔性和弹性,能够在较小的应力水平发生响应,且实时反映出结构内部的应力变化。由此,测试中样品连续直观的形变过程便于分析样品胞元结构的形变模式。

实验组①、②的直写浆料为 PDMS 与固化剂按质量比 10 : 1 充分混合,第③组的直写浆料以同质量比例的 PDMS 与固化剂为基体材料,分别添加不同质量分数的刚性陶瓷粉末充分混合,本文采用的是钛酸钡粉。将混合完全的浆料填入打印料筒后,在 4 000 r/min 的转速下离心 15 min 脱去气泡,以打印角度为变量和质量分数为变量的样品组统一采用内径尺寸为 260 mm 的针头;打印周期为变量的样品组则采用内径尺寸为 160 mm 的针头。不同型号针头打印对应的切片参数和打印参数如表 2 所示。

表2 不同型号针头打印对应的切片参数和打印参数

针头内径/mm	切片层高/mm	填充率	打印速度/(mm · min ⁻¹)	填充降速比率	气压/kPa
260	0.3	100%	600~780	30%	151~200
160	0.2	100%	1 080	30%	151

打印完成后,将样品在 80 ℃ 下恒温加热 1 h 完全固化,PDMS 在固化后无明显体积收缩或结构变形,对照模型尺寸和样品尺寸,其误差小于 5%。图 2 是由内径为 260 mm 的针头在如表 2 所示的打印参数下,制备的切片层高为 0.3 mm 的样品照片,可以发现,固定参数下打印的浆料层尺寸均匀,垂直打印方向堆积平均打印层宽度约为 297.8 mm,水平打印方向胞元壁平均宽度约为 320.6 mm,打印尺寸误差在 10% 以内,打印层垂直方向和水平方向宽度不一致,主要是由于打印速率和气压参数设置以及直写过程中浆料层之间的堆积挤压作用。

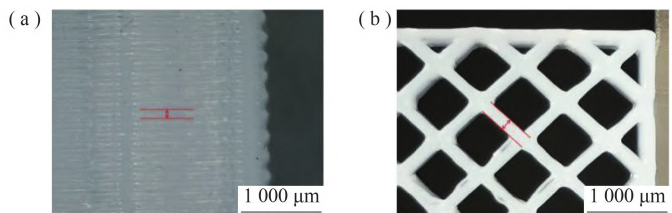


图2 PDMS 样品打印层显微图像 (a)打印垂直方向;(b)打印水平方向

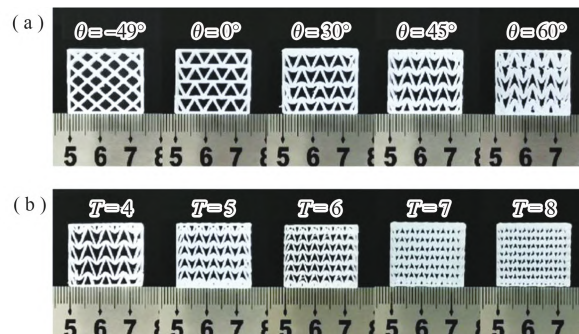


图3 不同变量组的 PDMS 压缩样品 (a)角度变量组;(b)胞元周期变量组

另外,直写成型的 PDMS 样品打印层之间结合紧密,不同于熔融沉积制造的逐层打印固化,凝胶浆料直写的优势在于浆料层之间同步固化,层与层之间由于不同步固化收缩产生的应力 and 结合缺陷的问题可以忽略。统一的打印参数保证了同组样品的胞元壁宽度一致。图 3 是结构参数和胞元周期为变量的压缩样品,各样品胞元结构清晰,样品变量参数符合模型设置值,故实际样品和模型尺寸误差不会影响对样品力学性能

规律的探究。

3 测试与结果分析

3.1 机械性能测试

考虑到试验效率和捕获的试样应变图像准确性要求,单轴压缩实验和拉伸试验的恒定应变速率分别为 $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 和 $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,样品最终压缩应变为 0.25,拉伸直至试样拉断,以下应力-应变曲线均为名义应力-应变曲线。

3.1.1 单轴压缩测试。各变量组的样品单轴压缩测试应力-应变曲线和对应过程中的压缩形变情况如图 4 所示,其中样品形变图分别选取压缩应变 $\epsilon_y = 0.02, 0.08, 0.20$,能够较好地反映出不同阶段的形变情况,且整个阶段样品未被压实,能够保证应力-应变曲线所反映的信息与胞元力学行为相关。

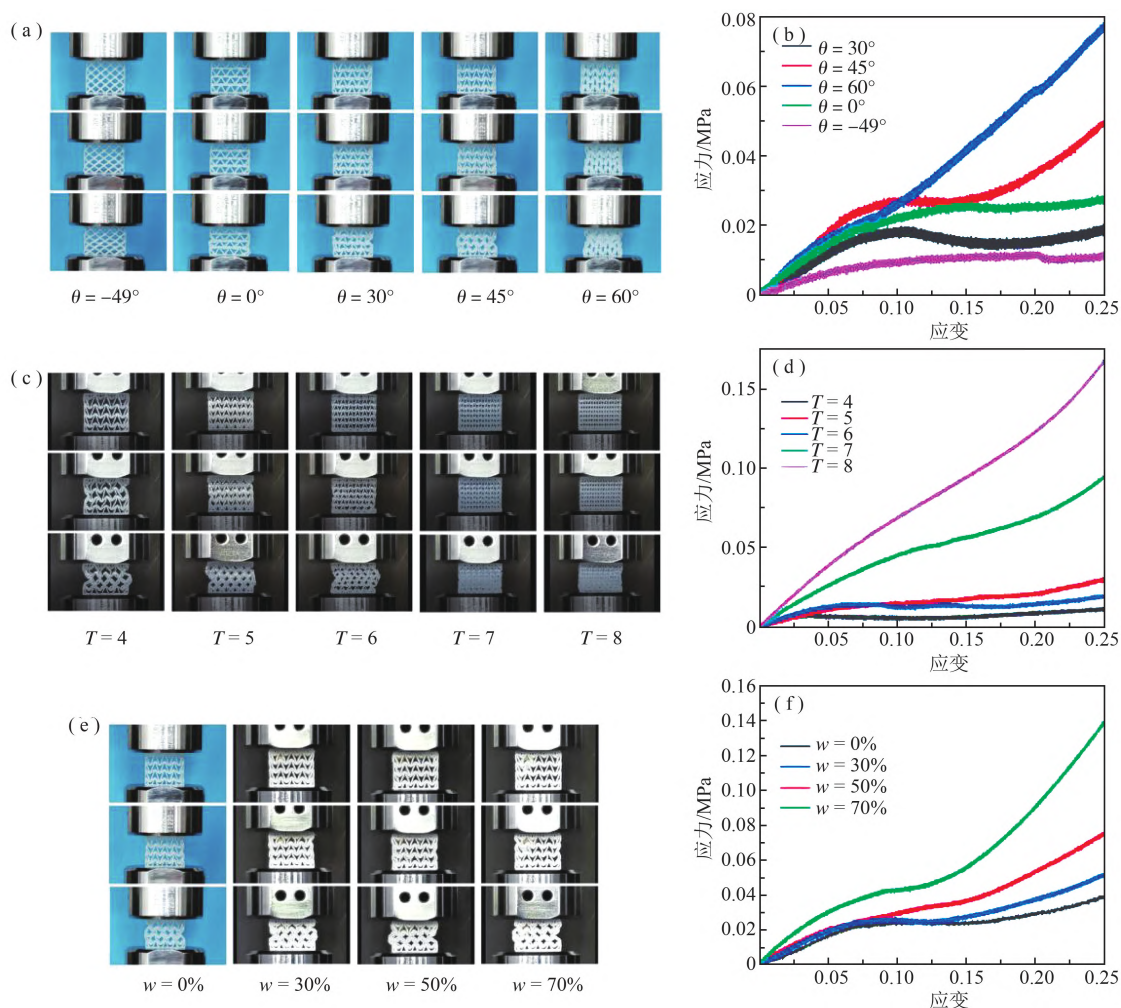


图 4 不同变量组的样品单轴压缩形变情况及名义应力-应变曲线。角度变量样品压缩(a)形变和(b)应力-应变曲线;周期变量样品压缩(c)形变和(d)应力-应变曲线;混粉质量分数变量样品压缩(e)形变和(f)应力-应变曲线

由图 4(a,b)可以发现,胞元结构角度作为变量时,内凹胞元样品无论是形变情况还是应力-应变曲线均与非内凹胞元样品表现出较大差别。在压缩载荷作用下,样品的纵向压缩过程也表现出不同的形变模式, $\theta = -49^\circ$ 的样品发生横向膨胀,而 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的样品在中部横向收缩,呈现出受压收缩的负泊松比特性。对应地,由应力-应变曲线可以看出,当压缩应变达到 0.06 左右, $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的内凹胞元结构样品的曲线开始产生应力平台, $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ 时尤为明显, $\theta = 60^\circ$ 的曲线由于胞元壁之间夹角小,较小纵向应变时即发生部分胞元壁相互接触,曲线便快速上升,仅小应变范围内表现出平台阶段。

确定胞元结构相同(选择 $\theta = 45^\circ$,胞元壁形变过程和样品负泊松比效应易于观察),探究胞元周期数对样品力学响应的影响。如图 4(c,d)所示,在同等压缩应变下,小周期数的样品在压缩时胞元结构形变明显,

相比于大周期数的样品表现出更大程度的横向收缩;对比周期变量压缩样品的应力-应变曲线,同一应变时, $T=4,5,6$ 的样品所对应的应力均较小,而随着周期数的增大,即 $T=7,8$ 时,样品对应的应力明显增大,应力平台由平坦变陡。

当胞元结构参数与周期确定($\theta=45^\circ, T=4$)时,探究了基体材料性质对样品力学响应的影响,如图4(e, f)所示。各样品胞元结构形变过程相似,且在压缩载荷下发生横向收缩的幅度接近,但其抗压能力随着浆料混粉质量分数的增大有明显的增强,曲线均呈现应力平台。

3.1.2 单轴拉伸测试。图5为不同变量组样品拉伸应变 $\epsilon_y=0.40$ 时的形变情况和应力-应变曲线。各样品在拉伸过程中胞元壁不发生弯曲,胞元形状的变化未呈现阶段性,对应地,样品的拉伸应力应变关系基本呈线性。

随着拉伸应变的增大, $\theta=-49^\circ$ 和 0° 的样品在中部发生明显的横向收缩,而 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的样品横向尺寸无明显变化,可见内凹胞元结构具有一定的拉胀效果。同样地,胞元结构相同时($\theta=45^\circ$),周期数不同或者材料性质不同的样品在受拉时胞元结构的形变过程相似,如图5(b, c)所示,均未发生明显的横向收缩,说明具有拉伸膨胀的负泊松比特性,但在同等应变下,大尺寸胞元的样品形变更为显著。此外,胞元周期数对样品的拉伸应力-应变曲线有着明显的影响,样品受拉伸载荷时表现出的弹性模量也随着胞元周期数的增加呈增大趋势[图5(e)],而当胞元形状和周期都相同时($\theta=45^\circ, T=4$),曲线在伸长阶段趋于重合[图5(f)]。

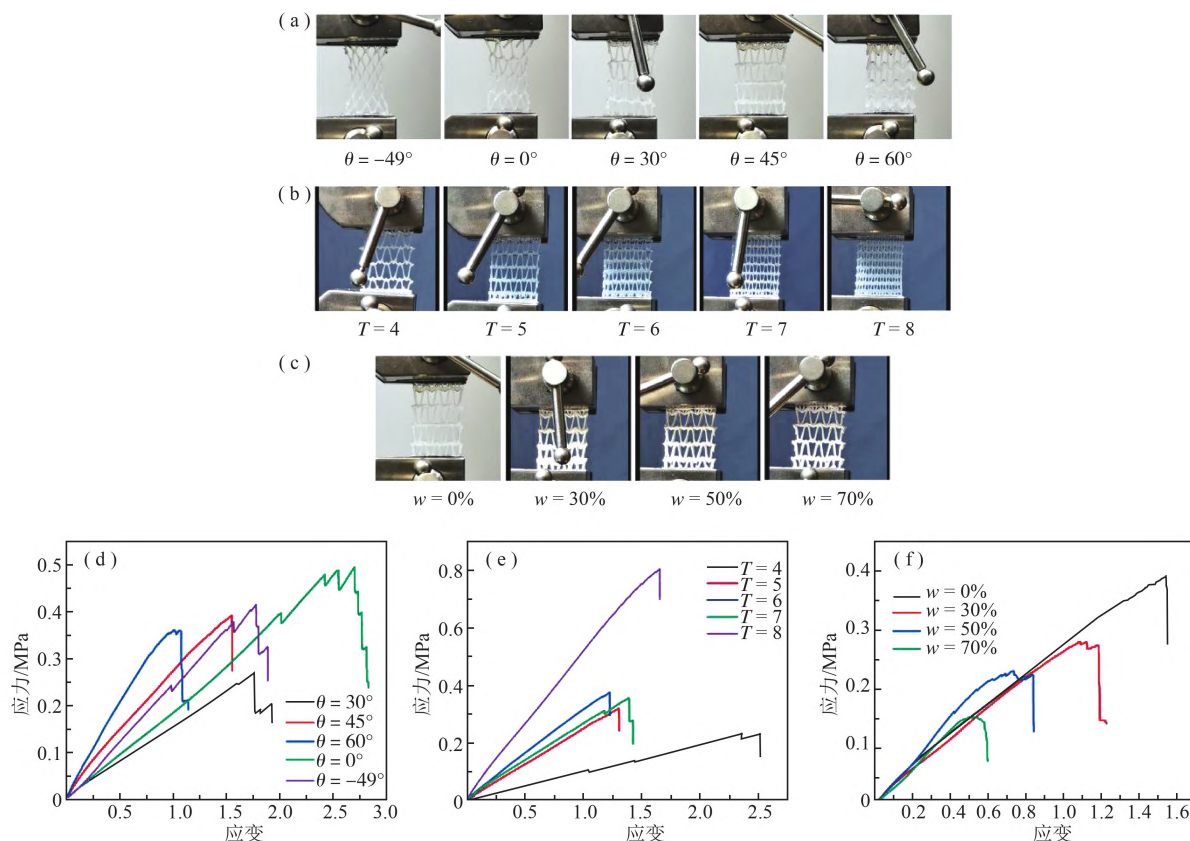


图5 不同变量组的样品单轴拉伸形变情况及名义应力-应变曲线;角度变量样品拉伸(a)形变和(d)应力-应变曲线;周期变量样品拉伸(b)形变和(e)应力-应变曲线;混粉质量分数变量样品拉伸(c)形变和(f)应力-应变曲线

以上拉伸应力-应变曲线能够反映出多孔胞元结构样品的断裂过程,拉伸样品整体的断裂是多个胞元壁断裂的共同结果,这些断裂往往不是同时进行的,主要集中于断裂后期,因此临近断裂时曲线呈现锯齿状。由于制备过程中存在打印参数的动态调节和潜在的环境干扰,导致了部分胞元壁存在横截面尺寸的差异或含有灰尘、杂质、气孔等缺陷,这些部位往往容易产生应力集中,率先发生断裂,因此,同种浆料制备的平行样品发生断裂时,对应的应变大小与最大拉伸强度也可能存在参差,但对伸长阶段的曲线几乎无影响。而当基体材料中混合陶瓷粉末质量分数不同时,样品在断裂韧性上表现出相对明显的规律,混粉含量高的样品达到

断裂时,应变和断裂强度都低于混粉含量低的样品。

3.2 分析与讨论

3.2.1 负泊松比效应。关于多孔材料的泊松比测量,本实验中采用了数字图像相关法对样品的轮廓位移进行分析。在单轴测试过程中,拍摄记录下样品在不同应变时的照片,其中,对于单轴压缩试验,记录样品 $\epsilon_y = 0.00, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$ 时的样品形变图像;对于单轴拉伸试验,记录样品在 $\epsilon_y = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 时的形变图像。随后,测量矩形样品中间层结构的轮廓位移,计算样品在达到不同纵向应变时对应的横向应变,又根据公式 $\nu_{xy} = -\epsilon_x / \epsilon_y$ 计算获得试样在各应变水平下对应的泊松比,以此绘制样品的 $\nu_{xy} - \epsilon_y$ 关系曲线对于不同的测试模式,计算时均以纵向应变 ϵ_y 为正。

简单边界条件下的杆件模型力学分析结果表明^[25,26],胞元的泊松比值仅与胞元形状有关,而与胞元周期数和柔性材料基体性质无关。但实际实验中,对照分析图 6(a~f)可以直观地发现,无论在单轴压缩还是拉伸时,胞元角度 θ 对于样品泊松比值的影响都最为显著,同组各参数拟合线分布最为分散,其次是胞元周期这一因素,柔性基体材料性质的影响最小。角度 θ 作为变量时,内凹胞元结构样品(即 $\theta \geq 0^\circ$)在各应变下的泊松比均为负值,且随着 θ 的增大,样品在同等纵向应变下具有更小的泊松比[图 6(a)],这一规律和理论一致。内凹胞元结构随着 θ 的增大,样品在同等纵向应变时胞元壁的弯曲程度也增大,因此表现出更为明显的横向收缩,而在拉伸载荷下,大的内凹角有相对长时间转动到水平位置,在该阶段内,样品都能够显现出负泊松比效应。

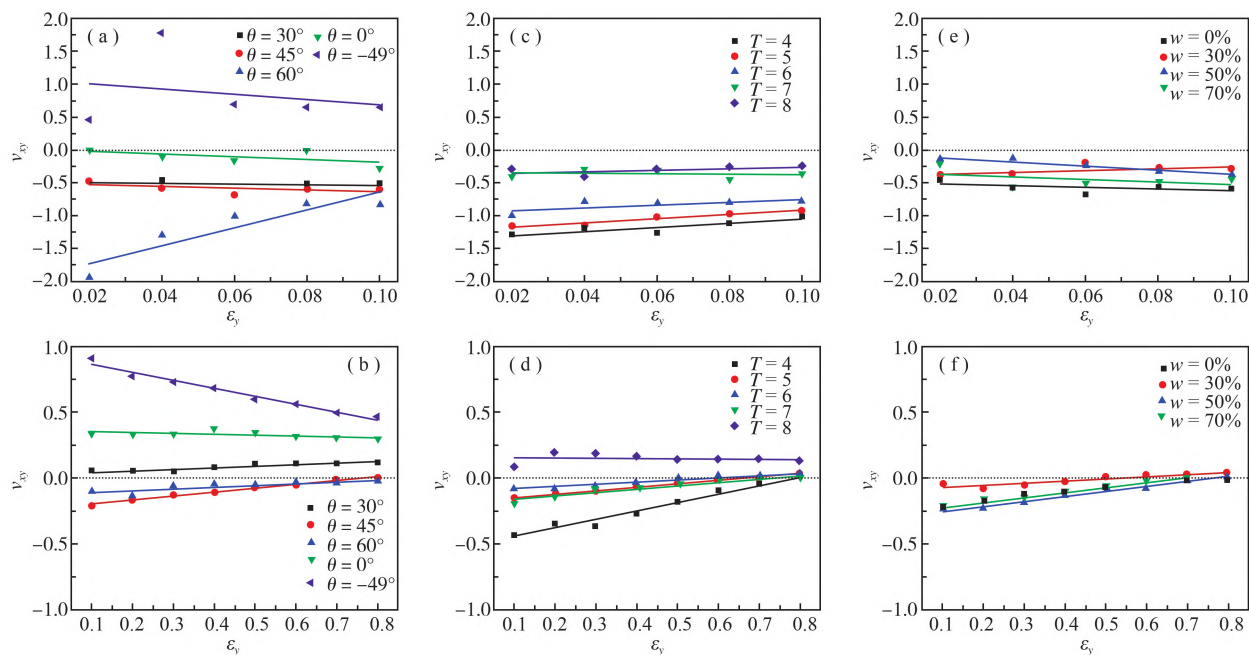


图 6 各变量组的样品在不同测试模式下的 $\nu_{xy} - \epsilon_y$ 关系曲线(直线由计算点拟合得到)(a)角度变量-单轴压缩;

(b)角度变量-单轴拉伸;(c)周期变量-单轴压缩;(d)周期变量-单轴拉伸;

(e)混粉质量分数-单轴压缩;(f)混粉质量分数-单轴拉伸

而对于角度 θ 相同,周期 T 不同的样品,理论上各样品拟合线基本接近,但相较于混粉质量分数变量组,如图 6(c~f)所示,胞元周期不同的样品在单轴测试中表现出的泊松比 ν_{xy} 随着 T 的增加而减小,基体混粉质量分数则对样品的泊松比无特别的影响规律。结合周期变量组样品的形变模式来看,造成这一差异的主要原因是胞元之间有着共同的结构顶点,打印过程中浆料容易在这些位置堆积。随着胞元周期数的增大,胞元尺寸减小,浆料堆积导致的胞元壁增粗对于小尺寸胞元结构的影响便不可忽视,此时胞元顶点处堆积的浆料对胞元壁的弯曲响应行为阻碍作用更为明显,故相同载荷条件下,大周期样品的胞元形变程度小,即样品负泊松比效应随胞元周期增大而减弱。

除了胞元角度 θ 和周期 T 对样品负泊松比的影响规律,由各样品的拟合线我们还可以发现,随着纵向应变水平的提高,样品的 $|\nu_{xy}|$ 趋向于 0。结合样品在单轴测试中的形变情况可发现,压缩测试中,随着纵向

应变的增加,胞元内凹角由于受到上层弯曲胞元壁的挤压,角度 θ 也在增大,同时胞元壁相互接触,这些过程都会促使样品横向收缩变困难,即 $|v_{xy}|$ 减小;纵向拉伸时,组成 θ 的胞元壁对折线的转折点产生牵引,驱使 θ 增大,折线结构趋向水平,胞元结构的横向尺寸增大, v_{xy} 随着纵向应变的增大趋向于0;对于非内凹胞元结构,胞元壁在载荷作用下向拉伸方向转动,样品发生横向收缩,且随着应变增大,各胞元壁转动幅度减小, v_{xy} 随着纵向应变的增大也趋向于0。

3.2.2 应力应变关系。分析单轴测试过程能够发现,样品在单轴测试下的应力应变关系取决于胞元在不同载荷下的变形机制。内凹胞元结构的单轴压缩应力-应变曲线呈现出明显的应力平台,结合内凹胞元在不同应变下的形变情况和对应的应力-应变曲线(图4),可以根据曲线形状将整个压缩过程的分为弹性变形、屈服平台和致密化三个阶段。

(1) 弹性变形阶段:结构整体受压程度小,胞元内各处的应力水平均较低,胞元壁的响应方式以绕胞元顶点转动为主,基本不发生弯曲,这一阶段的应力应变接近线性关系,应力随着应变的增大而增大。

(2) 屈服平台阶段:随着载荷作用增大,胞元壁屈服,发生明显的弯曲变形,并围绕胞元顶点转动,该阶段胞元孔隙体积较大,胞元壁弯曲转动相对自由,因此应力随应变的增大没有明显的提高,呈现平台现象。

(3) 致密化阶段:随着应变的进一步增加,相邻胞元壁发生接触,并相互抑制弯曲变形和转动行为,此后可视作相接触的胞元壁协同变形,孔隙开始均匀减小,样品逐渐被压实,所受应力随应变的增加迅速增大。

对比胞元结构角度不同的样品压缩应力-应变曲线可以发现, $\theta=30^\circ$ 、 45° 时相比于 $\theta=60^\circ$ 时具有更明显的屈服平台阶段,这是由于 $\theta=60^\circ$ 的胞元结构孔隙体积小,胞元壁之间角度小,容易在小幅度弯曲后发生接触,所以样品在经过短暂的屈服平台阶段后快速进入致密化阶段。

内凹负泊松比结构在压缩载荷下,表现出不同于非负泊松比胞元的应力-应变曲线形状,但在单轴拉伸应力-应变曲线上并未体现出明显的区别。这是由于在拉伸过程中,不同于压缩时胞元壁既有绕胞元公共点旋转的形变模式,又有自身发生弯曲的形变模式,样品的胞元壁在拉伸载荷作用下均以围绕胞元公共点旋转和弹性伸缩为主要响应方式,始终保持均匀的形变状态直至发生断裂,全过程不会像受压缩时一样发生整体结构的扭曲。

为更直观地了解各参数变量对样品力学性能的影响规律,根据样品名义应力-应变曲线的初始线性区域计算得出弹性模量和能量吸收情况如图7(a~f)所示。实验所测应变为线应变,故以下弹性模量均指杨氏模量是通过拟合应力-应变曲线弹性变形阶段数据得到线性关系后,根据公式 $E=\sigma/\epsilon$ 计算得出;用应力-应变曲线在0~0.25的应变区间内的应力积分值评估样品的能量吸收性能。

根据胞元杆件模型^[26],非负泊松比结构胞元壁转向垂直于压缩载荷的方向,而负泊松比胞元结构的胞元壁转向于沿载荷方向,整体胞元产生对抗载荷的形变趋势,所以负泊松比胞元结构通常会具有更优的抗压缩和抗拉伸能力,即表现出更高的弹性模量和能量吸收性能。如图7(a)所示,当角度 θ 较小时,内凹负泊松比胞元结构对样品弹性模量的影响并不突出,甚至低于非负泊松比胞元,图7(b)中各样品的能量吸收情况也类似。推测是由于当角度 θ 较小或为负时,胞元壁与载荷方向夹角大,从而易于转动,小应变范围内其转动方向对胞元力学性能的影响无明显差异。但总体来说,角度 θ 增大,负泊松比结构胞元壁向载荷方向转动的趋势增大,表现出了内凹胞元结构的弹性模量和能量吸收性能随 θ 提高的规律。可以发现,对于非负泊松比胞元结构,胞元结构几何参数对样品弹性模量和能量吸收能力的影响并不突出;而对于负泊松比胞元,当 θ 增大时,内凹胞元结构的弹性模量与能量吸收性能有着显著的提高,通过改变胞元结构几何参数来调整三维负泊松比多孔材料的力学行为和力学性能是一种有效的手段。

对于胞元结构相同,周期不同的样品,在压缩试验和拉伸试验中,随着胞元周期的增加,内凹双箭头结构样品的弹性模量都有明显的提高趋势,同时也表现出更优的能量吸收性能,见图7(c,d)。胞元周期的增大,胞元尺寸减小,胞元壁的长径比增大,胞元内的应力更均匀,同一胞元壁上的中部与两端所受的应力差值减小,因此造成大周期数结构样品中的胞元壁的形变更困难,同等纵向应变下,周期大的结构胞元壁转动和弯曲的程度更小,表现出弹性模量与能量吸收性能的增强。此外,随周期数的增加,胞元间结构顶点数增加,对胞元壁形变的束缚作用增强,也促使样品在试验中表现出更高的强度和能量吸收能力。

图 7(e,f)为混粉样品的弹性模量与能量吸收情况。在单轴压缩试验中,混粉比例的提高使得样品的弹性模量与能量吸收性能有着明显的提升。但在单轴拉伸试验中,混粉比例对于样品的弹性模量和能量吸收性能无明显的影响。推测认为,BTO 颗粒分散在固化的 PDMS 中,颗粒与颗粒之间结合力弱,PDMS 交联形成整体,当受到压缩载荷作用时,样品由于负泊松比效应向中心收缩,颗粒之间、颗粒与 PDMS 之间相互挤压,样品内部结构紧密,随着粉末含量的增加,颗粒之间相互作用逐渐成为主导,因此刚度高于 PDMS 的颗粒使样品表现出更高的模量和能力吸收性能。而当样品受到拉伸载荷时,随着 PDMS 的弹性变形增大,BTO 颗粒逐渐分散,应力-应变曲线本质上表现的仍是 PDMS 材料的力学性能,因此混粉样品与纯 PDMS 样品的弹性模量和能量吸收性能相近;而且,由于柔性 PDMS 和刚性 BTO 颗粒的模量差距大,拉伸过程中两种材料应变不同容易导致接触界面的分离并成为裂纹源,表现为高混粉比例的样品在较低的拉伸应变下即发生断裂。

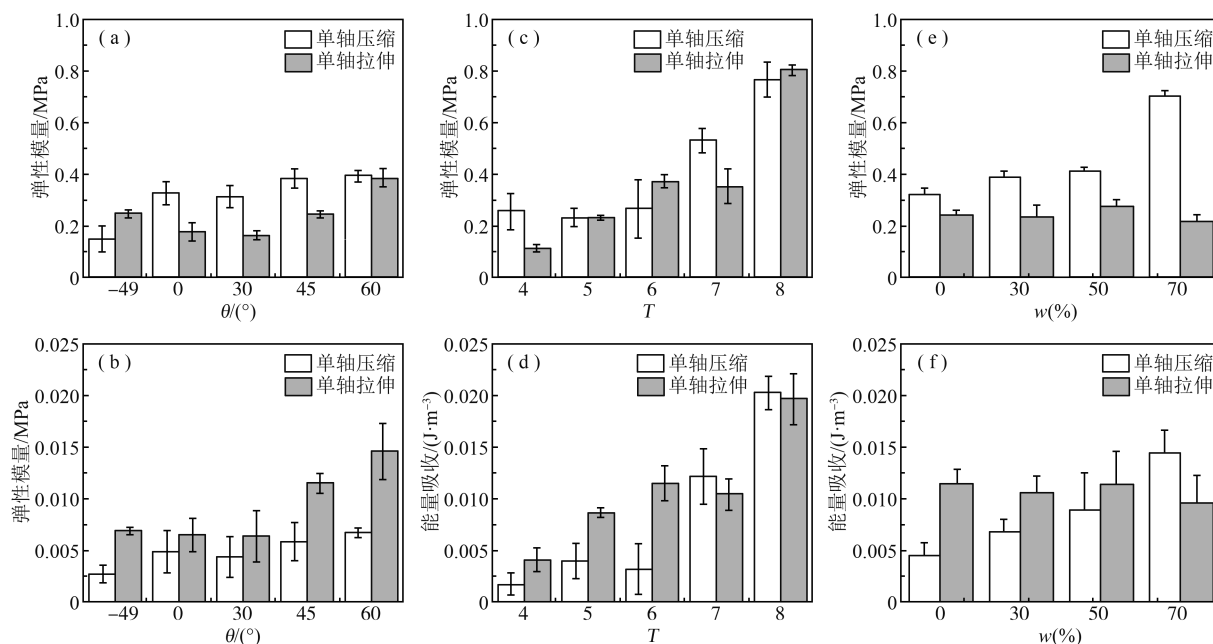


图 7 各变量组的样品在不同测试模式下弹性模量和能量吸收情况(a)角度变量-弹性模量;(b)角度变量-能量吸收;(c)周期变量-弹性模量;(d)周期变量-能量吸收;(e)混粉质量分数-弹性模量;(f)混粉质量分数-能量吸收

4 结论

通过无模直写技术制备不同参数的柔性胞元结构材料,系统分析系列样品在单轴试验过程中的形变行为和应力-应变曲线,探究负泊松比胞元结构力学响应的影响因素。实验结果表明,不同参数变量的结构样品力学响应存在差异的本质是胞元形变机制不同,非内凹胞元几乎不表现出负泊松比效应,内凹胞元的胞元角度、周期、基体材料性质以及服役模式都是不可忽视的因素,其中,结构的负泊松比效应取决于胞元的内凹角角度,内凹角越大负泊松比效应越显著;胞元周期的增加会弱化结构样品的负泊松比效应,但对于力学性能的提升效果突出,除了通过周期参数来调整结构样品的力学性能,也可以通过改变基体材料性质实现。

参 考 文 献

- [1] NOVAK N, VESENJAK M, REN Z. Auxetic cellular materials-a review[J]. Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2016, 62(9): 485-493.
- [2] EVANS K E, NKANSAH M A, HUTCHINSON I J, et al. Molecular network design[J]. Nature, 1991, 353(6340): 124-124.
- [3] DESHPANDE V S, FLECK N A. Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(36-37): 6275-6305.
- [4] LI J E, WANG B L. Effect of negative Poisson's ratio on the fracture mechanics parameters due to mechanical and thermal loads[J]. International Journal of Engineering Science, 2020, 150: 103256.
- [5] ZHANG J, LU G, YOU Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A re-

- view[J]. *Composites Part B: Engineering*,2020,201: 108340.
- [6] LI T,SUN J,LENG J,et al. Quasi-static compressive behavior and energy absorption of novel cellular structures with varying cross-section dimension[J]. *Composite Structures*,2023,306: 116582.
- [7] WANG Y C,LAKES R. Analytical parametric analysis of the contact problem of human buttocks and negative Poisson's ratio foam cushions[J]. *International Journal of Solids and Structures*,2002,39(18): 4825-4838.
- [8] REN X,SHEN J,TRAN P,et al. Auxetic nail: Design and experimental study[J]. *Composite Structures*,2018,184: 288-298.
- [9] ZHONG R,REN X,ZHANG X Y,et al. Mechanical properties of concrete composites with auxetic single and layered honeycomb structures[J]. *Construction and Building Materials*,2022,322: 126453.
- [10] ANURAG C,ANVESH C K,KATAM S. Auxetic materials[J]. *International Journal of Engineering Trends and Technology*,2015,5(2): 156-160.
- [11] 杨德庆,马涛,张梗林. 舰艇新型宏观负泊松比效应蜂窝舷侧防护结构[J]. *爆炸与冲击*,2015,35(2): 243-248.
- [12] GAO Q,LIAO W H,WANG L. On the low-velocity impact responses of auxetic double arrowed honeycomb[J]. *Aerospace Science and Technology*,2020,98: 105698.
- [13] WEI L,ZHAO X,YU Q,et al. In-plane compression behaviors of the auxetic star honeycomb: Experimental and numerical simulation[J]. *Aerospace Science and Technology*,2021,115: 106797.
- [14] JANUS-MICHALSKA M,JASIŃSKA D,SMARDZEWSKI J. Comparison of contact stress distribution for foam seat and seat of auxetic spring skeleton[J]. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*,2013,18(1): 55-72.
- [15] TAN H,HE Z,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.
- [16] LAKES R S,ELMS K. Indentability of conventional and negative Poisson's ratio foams[J]. *Journal of Composite Materials*,1993,27(12): 1193-1202.
- [17] HE C,LIU P,GRIFFIN A C. Toward negative Poisson ratio polymers through molecular design[J]. *Macromolecules*,1998,31(9): 3145.
- [18] WANG H,LI X,LI P,et al. δ -Phosphorene: a two dimensional material with a highly negative Poisson's ratio[J]. *Nanoscale*,2017,9(2): 850-855.
- [19] WAGNER M,CHEN T,SHEA K. Large shape transforming 4D auxetic structures[J]. *3D printing and Additive Manufacturing*,2017,4(3): 133-142.
- [20] 李思明,胡雨洁,方镁淇,等. 具有形状记忆功能的负泊松比结构材料的研究进展[J]. *服装学报*,2020,5(4): 290-299.
- [21] YANG H,JIANG W,LI M,et al. Multi-material 3D double-V metastructures with tailorable Poisson's ratio and thermal expansion[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*,2021,210: 106733.
- [22] WANG M,WU H,YANG L,et al. Structure design of arc-shaped auxetic metamaterials with tunable Poisson's ratio[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*,2022: 1-11.
- [23] WANG J X,LIU X,YANG Q S,et al. A novel programmable composite metamaterial with tunable Poisson's ratio and bandgap based on multi-stable switching[J]. *Composites Science and Technology*,2022,219: 109245.
- [24] CHOI J B,LAKES R S. Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis[J]. *International Journal of fracture*,1996,80: 73-83.
- [25] HU L,YOU F,YU T. Effect of cell-wall angle on the in-plane crushing behaviour of hexagonal honeycombs[J]. *Materials & Design*,2013,46: 511-523.
- [26] GAO Q,WANG L,ZHOU Z,et al. Theoretical, numerical and experimental analysis of three-dimensional double-V honeycomb[J]. *Materials & Design*,2018,139: 380-391.
- [27] GUO M F,YANG H,MA L. Design and analysis of 2D double-U auxetic honeycombs[J]. *Thin-Walled Structures*,2020,155: 106915.
- [28] PAGLIOCCA N,UDDIN K Z,ANNI I A,et al. Flexible planar metamaterials with tunable Poisson's ratios[J]. *Materials & Design*,2022,215: 110446.
- [29] LARSEN U D,SIGNUND O,BOUWSTA S. Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio[J]. *Journal of microelectromechanical systems*,1997,6(2): 99-106.
- [30] ZHU P,YANG W,WANG R,et al. Direct writing of flexible barium titanate/polydimethylsiloxane 3D photonic crystals with mechanically tunable terahertz properties[J]. *Advanced Optical Materials*,2017,5(7): 1600977.

(责任编辑:蒲锡鹏)