

引用格式: 王祎, 刘华, 杨嘉陵, 等. 3D打印高拉伸负泊松比超材料设计及力学行为[J]. 航空学报, 2025, 46(21): 532361.  
WANG Y, LIU H, YANG J L, et al. Design and mechanical behavior of 3D printed high tensile negative Poisson's ratio metamaterials[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(21): 532361 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2025.32361

中国飞机强度研究所建所60周年专刊

## 3D打印高拉伸负泊松比超材料设计及力学行为

王祎, 刘华, 杨嘉陵, 杨先锋\*

北京航空航天大学航空科学与工程学院强度与结构完整性全国重点实验室, 北京 100191

**摘要:** 聚焦于兼具负泊松比效应与高拉伸性能的剪纸超材料, 采用试验与数值模拟相结合的方法开展研究。通过HyperMesh建立参数化模型, 利用Ls-Dyna进行有限元仿真, 结合选择性激光烧结技术(SLS)制备尼龙PA2200试件, 开展准静态拉伸试验, 系统探究其力学行为及调控机制。研究表明单胞几何参数(级数、空隙宽度)对其力学性能具有显著调控作用, 三级结构(N3)相较于一级结构(N1)拉伸性能提升了413%, 最大负泊松比达-0.25; 空隙宽度减小可使负泊松比效应提升38%。材料呈现独特“勺型”泊松比演化规律, 高级数结构(N2、N3)的负泊松比效应可维持超100%应变范围。将设计拓展至三维管状结构, 发现其具有渐进强化-平缓失效等变形模式。本研究为可编程负泊松比高拉伸超材料的开发提供了理论与试验依据, 在柔性电子、航空航天等领域具有重要应用潜力。

**关键词:** 剪纸超材料; 负泊松比; 高可拉伸性; 3D打印; 有限元仿真

**中图分类号:** V214.9; O347 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6893(2025)21-532361-14

超材料以零/负泊松比、负折射率等区别于天然材料的特殊物理特性, 成为材料学、力学和工程学科等领域的研究热点<sup>[1]</sup>。超材料是人工设计构建的复合结构, 根据功能可分为电磁超材料、声学超材料、热材料和机械超材料等。其中机械超材料因其独特力学性能, 在众多工程领域展现出巨大的应用潜力。在机械超材料中具有负泊松比的材料, 即 Auxetics<sup>[2-3]</sup>, 表现出与传统材料不同的变形特性。传统材料在拉伸时横向收缩, 压缩时横向膨胀, 而 Auxetics 材料在拉伸时横向膨胀, 压缩时横向收缩。这种独特的负泊松比效应使得材料在剪切模量、断裂韧性、比吸能等力学性能方面具有显著优势, 在航空航天<sup>[4-5]</sup>、国防军事<sup>[6]</sup>、电子产业<sup>[7]</sup>和医疗设备<sup>[8]</sup>等领域

具有广泛的应用前景。

工程领域对材料性能的要求日益提高, 尤其是对具有高拉伸性材料的需求极其迫切<sup>[9]</sup>。在可穿戴电子设备和柔性电池等新兴领域, 需要材料能够承受超过100%应变的大变形, 以满足产品在复杂使用环境下的性能需求<sup>[10]</sup>。然而, 硅、金属和陶瓷等传统工程材料, 本质上具有刚性, 拉伸性较差等问题, 难以满足新兴领域的需求<sup>[11]</sup>。因此, 研发具有高拉伸性的结构成为材料研究的重要方向之一。

尽管负泊松比结构和高拉伸性结构各自的研究取得了一定进展, 但兼具负泊松比效应和高拉伸性的材料和结构研究相对较少<sup>[12]</sup>。在负泊松比结构研究方面, 目前主要集中在凹角模型、旋转多

收稿日期: 2025-06-02; 退修日期: 2025-06-27; 录用日期: 2025-07-22; 网络出版时间: 2025-09-02 08:49

网络出版地址: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2025/V46/I21/532361>

基金项目: 国家自然科学基金(12472376)

\*通信作者: E-mail: yangxf@buaa.edu.cn

边形模型、手性模型和剪纸模型等。凹角模型通过蜂窝凹进肋的弯曲变形产生负泊松比效应<sup>[13]</sup>；而旋转多边形模型借助于铰链连接机构<sup>[14-15]</sup>；手性模型源于其旋转对称的手性几何设计实现横向膨胀<sup>[16-17]</sup>，剪纸模型则利用孔隙形状的设计来实现负泊松比效应<sup>[18-19]</sup>。然而，受传统制造技术的限制，以往研究大多采用类橡胶材料，存在承受加载能力有限、有效应变范围小等问题。在高拉伸性结构研究方面，目前主要聚焦于材料层面而宏观结构层面的研究相对不足。虽然已有研究通过创新结构设计和制造技术，如三维纳米超材料结构、3D自由形式超材料结构等，实现了材料拉伸性能的提升，但仍无法完全满足工程实际需求<sup>[20]</sup>。因此，开发兼具负泊松比效应与高拉伸性的复合功能材料成为突破技术瓶颈的关键方向。

增材制造技术的兴起为这类材料的制备提供了变革性解决方案<sup>[21]</sup>。与传统制造方法相比，具有定制性强、复杂程度高、物料浪费少等优势，能够实现传统制造技术难以完成的复杂结构制造。增材制造技术依据成型技术原理进行划分的分类方式得到了广泛认可与应用<sup>[22]</sup>。按照该分类方式，增材制造技术涵盖多种类型。例如，熔融沉积成型技术通过将丝状材料加热熔融后，按照预定路径逐层堆积成型；选择性激光烧结技术(Selective Laser Sintering, SLS)，利用激光束对粉末材料进行选择性的烧结，使其逐层固化成三维实体；分层实体制造技术，把薄片材料逐层粘切并切割出所需形状；立体光固化技术以液态光敏树脂为原料，通过紫外线激光照射使其逐层固化成型；三维打印粘接成型技术，借助喷头将粘结剂喷射到粉末材料上，逐层粘接成型；数字光处理技术，利用数字微镜器件将光投影到液态树脂上，实现快速固化成型；多头喷射技术通过多个喷头同时喷射不同材料，实现复杂结构的快速制造。相较于其他3D打印技术，SLS技术由于打印材料多样化、打印成本低、无需建立支撑结构等诸多优点，成为其中最具发展前景的3D打印技术<sup>[23]</sup>。Beharic等<sup>[24]</sup>利用SLS技术制备出泊松比为-0.5的聚酰胺三维双箭头负泊松比结构。Yuan等<sup>[25]</sup>提出了有效评价及制备热塑性聚氨酯粉末的工艺方法，并通过SLS技术制备了三

维柔性屈曲晶体负泊松比结构。

本文提出一种新型的兼具负泊松比效应和高拉伸性的剪纸超材料，通过SLS打印技术进行结构制备，并通过试验和数值模拟相结合的方式对其力学性能展开深入研究。旨在突破现有材料性能的局限，为新型材料的开发和应用提供理论依据和技术支持，推动材料科学在多领域的创新发展，满足不断增长的工程实际需求。

## 1 试验研究

### 1.1 单胞设计

为实现负泊松比效应与高拉伸性协同，以剪纸工艺的可调控拓扑构型为基础，依据结构-力学关联：负泊松比源于单元受拉时“内凹-撑开”协同变形，高拉伸性依赖柔性连接与多自由度变形单元。以经典负泊松比机理为参考，结合剪纸特点设计“类内凹”单胞拓扑，通过阵列协同排布，使结构兼具负泊松比效应与高拉伸性，匹配柔性智能结构等应用需求。通过曲折镂空构建可延展路径，以单元间的协同变形来分散应力，同时借助负泊松比效应补偿拉伸变形空间。手性铰链超材料的基本单胞如图1所示。单胞横向尺寸为 $L_0$ ，实体宽度为 $b$ ，空隙宽度为 $t$ ，单胞最内圈的转接长度为 $l_1$ ，单胞间连接接头的长度为 $l_2$ ，宽度为 $w_0$ 。

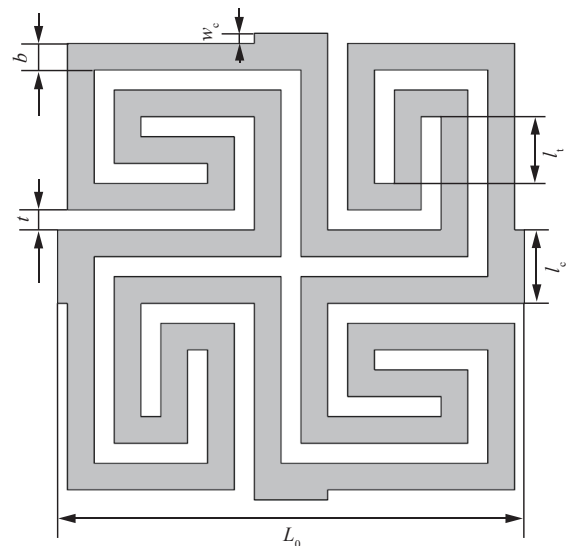


图1 单胞几何

Fig. 1 Geometry of the unit cell

以  $N_i(i=1,2,3)$  表征级数变量,则单胞的几何参数之间的关系为

$$(4N_i + 1)b + 4N_it + l_t = L_0 \quad (1)$$

转接长度  $l_t$  为

$$l_t = L_0 - (4N_i + 1)b - 4N_it \quad (2)$$

连接接头长度  $l_c$  和宽度  $w_c$  分别为

$$l_c = 2b + t \quad (3)$$

$$w_c = t/2 \quad (4)$$

计算单胞相对密度时,将其分解为1个等宽度连通体和4个连接接头。等宽度连通体面积为  $S_1$ ,接头总面积为  $S_2$ 。

对于等宽度联通体,宽度为  $b$ ,中轴线总长度  $C$  为

$$C = 8N_i(l_t + b) + 4(4N_i^2 + 1)(b + t) \quad (5)$$

连通体面积  $S_1$  为

$$S_1 = Cb \quad (6)$$

接头总面积  $S_2$  为

$$S_2 = 4l_c w_c \quad (7)$$

则单胞总面积  $S$  为

$$S = S_1 + S_2 \quad (8)$$

单胞相对密度  $\bar{\rho}$  为

$$\bar{\rho} = \frac{S}{L_0^2} = \frac{[8N_i(l_t + b) + 4(4N_i^2 + 1)(b + t)]b + 4l_c w_c}{L_0^2} \quad (9)$$

将实体宽度  $b$  和空隙宽度  $t$  无量纲化为

$$\bar{b} = \frac{b}{L_0} \quad (10)$$

$$\bar{t} = \frac{t}{L_0} \quad (11)$$

无量纲后的单胞相对密度可表示为

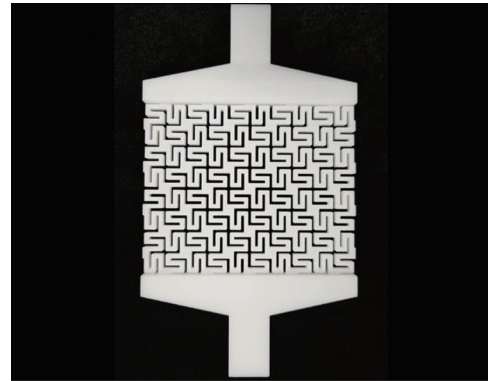
$$\bar{\rho} = (4 - 16N_i^2)\bar{b}^2 + (8 - 16N_i^2)\bar{b}\bar{t} + 2\bar{t}^2 + 8N_i\bar{b} \quad (12)$$

### 1.2 结构制备

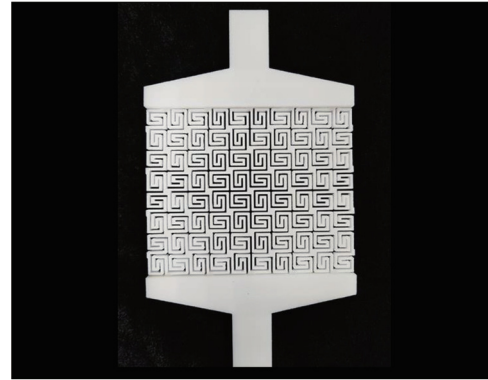
本文利用精度为 0.1 mm 的 EOS P396 增材制造设备,采用选择性激光烧结法制备了所有手性铰链超材料。选用尼龙 PA2200 粉末作为原料粉末。在 3D 打印机中实现了功率为 70 W、激光束直径为 120  $\mu\text{m}$  的圆盘激光器。利用 EOS

P396 增材制造设备的脉冲激光以 6 m/s 的速度扫描几何模型的横截面,将尼龙 PA2200 粉末在搭建平台中熔融固化成所需的结构,直至完成整个打印过程。

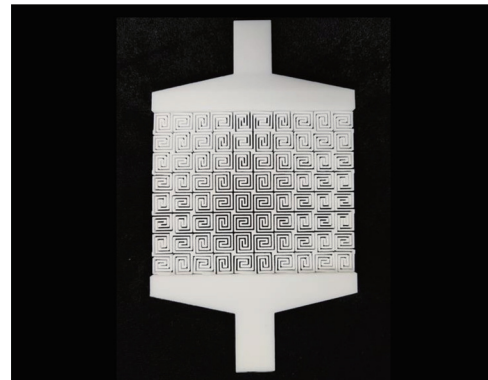
为更清晰地区分手性铰链超材料,根据单胞在单轴拉伸载荷作用下可以自旋转展开的级数将其命名为“ $N_i$ ”。图 2 给出了制备的 3 个剪纸超



(a) N1



(b) N2



(c) N3

图 2 不同几何参数的超材料结构

Fig. 2 Metamaterial structures with different geometric parameters

材料模型。模型面外厚度为5 mm,单胞尺寸为21 mm × 21 mm,模型在拉伸方向上为4个单胞,垂直于拉伸方向上为5个单胞,即模型整体尺寸为105 mm × 84 mm × 5 mm。同时设计夹头与模型一体打印制造以便于载荷的加载。为了保证试验重复性,每组超材料结构制作3个相同的样品。

为获得尼龙PA2200母材的本构关系,采用EOS P396设备打印了标准拉伸试样,激光加工方法与超材料结构相同。采用ASTM D638标准试样尺寸进行拉伸试验,测试了尼龙PA2200试样的力学性能。尼龙PA2200试样的应力-应变曲线如图3所示。

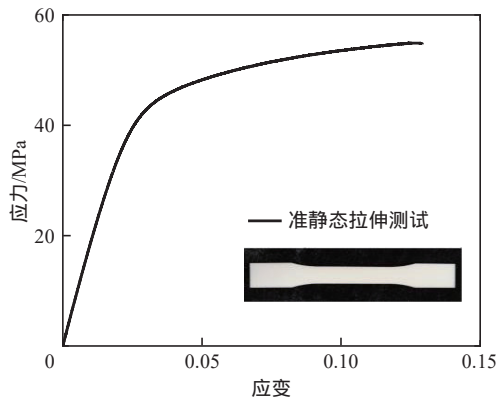


图3 尼龙PA2200的单轴拉伸应力应变曲线

Fig. 3 Uniaxial tensile stress-strain curve of nylon PA2200

### 1.3 试验测试

针对不同几何参数的手性铰链超材料进行了准静态拉伸试验研究其变形模式和拉伸率。试验机采用5 kN量程的MTS万能电子拉伸试验机(见图4),所有样品均以 $0.002 \text{ s}^{-1}$ (10 mm/min)的恒定应变速率加载。试验的输出结果为载荷-位移曲线,输出频率为0.1 fps,保护载荷设置为4 kN以确保载荷在试验机量程范围内。试验中止方式为手动控制,即试件拉伸断裂时手动停止试验。试验机记录上夹头的反作用力和位移,同时由摄像机捕获样品在拉伸过程中的变形过程和破坏模式。为统计和可重复性,对每个样品进行了3次重复测试。

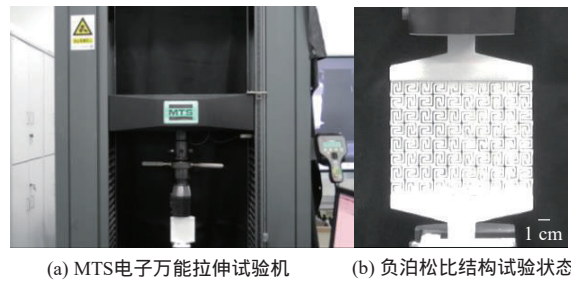


图4 负泊松比结构的准静态拉伸试验设置

Fig. 4 Quasi-static tensile test setup for structures with negative Poisson's ratio

图5为3组手性铰链超材料结构的载荷-位移曲线,试验获得的载荷-位移曲线具有良好的重复性。随着级数的增加,结构的载荷-位移响应发生变化。根据变形模式的不同,将3种响应分别定义为:① N1渐进强化响应② N2渐进强化J型过渡响应③ N3J型响应。

对于N1,在拉伸初始小位移范围内,载荷随位移增加而上升,此时结构处于弹性变形阶段。随着位移进一步增加,曲线斜率逐渐增大,说明结构刚度不断增大,结构表现出强化特征。载荷和刚度随着位移表现出平滑的渐进变化,定义为渐进强化响应。N2相较于N1的弹性阶段明显提升,在前50 mm(应变~60%)的过程中均表现为载荷随位移近似线性增加。随后结构刚度瞬间增大,载荷迅速上升,强化阶段呈现突变特征。N3曲线初始斜率较小,处于相对柔软且易变形状态,随后曲线斜率缓慢增大,结构刚度增加,后期曲线斜率趋于稳定,载荷随位移以相对稳定的速率增加,结构表现出较高剪切稳定的刚度。N3的载荷-位移曲线呈现出典型的“J型”响应行为。N3的载荷-位移曲线初始阶段斜率较小,呈现柔软易变形特性。随着位移增加,曲线斜率逐渐增大,刚度稳步提升。在拉伸后期斜率显著增加,刚度的硬化特征,形成典型的“J型”响应。这种强化特征源于N3更细密的单元结构在拉伸后期的协同受力,使应力分散更均匀,刚度持续提升而非短暂突变,与N2的阶段性的突变成鲜明对比。

图6给出了N1结构在准静态拉伸试验中的变形过程。在拉伸初始阶段,不同单胞的韧带相互接触,形成接触“铰点”,允许相邻单胞间的相对转动。随着进一步拉伸,韧带绕铰点转动,

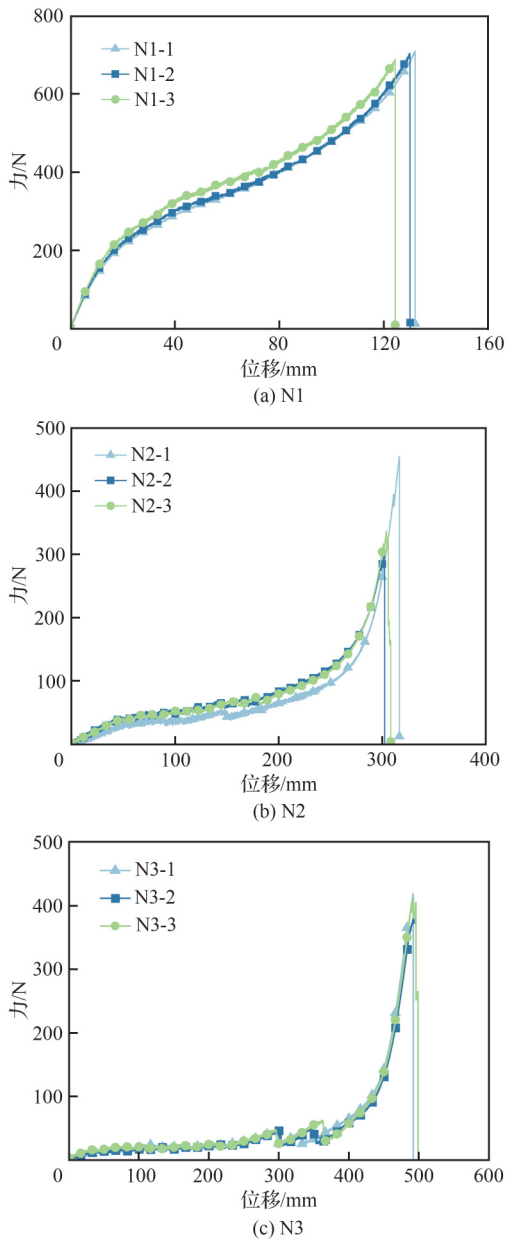


图5 不同级数负泊松比结构的准静态拉伸载荷-位移曲线

Fig. 5 Force-displacement curves for the different structures of negative Poisson's ratio under quasi-static tensile loading

结构发生弯曲变形,从紧凑状态逐渐张开。铰点的协同运动使各单胞的变形相互关联,这种联动效应使得结构在横向产生膨胀,即负泊松比效应。随着拉伸应变增加,单元由初始的弯曲变形主导模式逐渐过渡到拉伸变形主导模式,相邻单胞韧带的接触铰点位置不断移动直

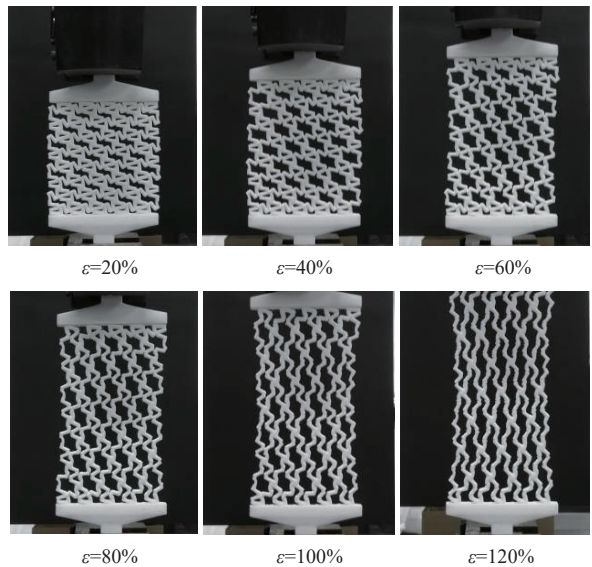
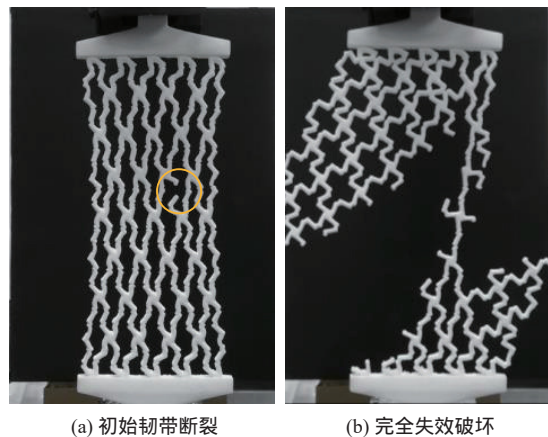


图6 N1结构的准静态拉伸变形过程

Fig. 6 Quasi-static tensile deformation process of N1 structure

至相邻铰点完全脱离接触,各单胞围绕内部的接头铰点变形。这种变形模式的转变使得结构内部应力得以释放,结构横向收缩,出现正泊松比行为。在拉伸变形主导阶段,结构应力分布更加均匀,通过单元的伸长来承担应力,降低了应力集中。

图7为N1超材料的失效破坏模式,由图7(a)可知,当单胞韧带完成展开伸直,在结构中心出现第1个韧带断裂,随后多个韧带迅速断裂,结构出现对角线断裂带,直至结构完全失效破坏,丧失承载能力。对于N2和N3的失效模式,初



(a) 初始韧带断裂 (b) 完全失效破坏

图7 N1结构的失效破坏模式

Fig. 7 Failure mode of N1 structure

始失效模式与N1相似,为局部韧带的初始断裂。然而在韧带的裂纹扩展失效模式有所不同,N1表现出集中式对角线的脆性断裂,断裂过程伴随更多的应力释放波动,N2和N3表现出横向的拉伸断裂,断裂带分布更加广泛,表现出韧性断裂特征。

## 2 有限元仿真

### 2.1 有限元模型设置

为了进一步研究结构的力学特性和负泊松比行为,采用有限元软件Ls-Dyna进行准静态拉伸模拟。图8为准静态拉伸载荷作用下的有限元模型。由于结构的面内应变远大于面外应变,故而采用平面应变壳单元进行简化建模以提高计算效率。采用双线性弹塑性模型,对尼龙PA2200的单轴拉伸应力-应变曲线进行了杨氏模量和屈服应力计算。材料密度 $\rho=1.14 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比 $\nu=0.4$ ,弹性模量 $E=1.8 \text{ GPa}$ ,屈服应力 $\sigma_y=40 \text{ MPa}$ 。将结构底端节点集设置固支约束,将单胞顶端节点集施加匀速位移加载。为避免穿透或交叉,设置二维单面自接触。接触界面的静摩擦系数和动摩擦系数分别设置为0.3和0.2<sup>[26]</sup>。这一参数的选取主要是基于研究对象的材料特性和接触状态分析,为了合理捕捉韧带接触时的力传递与能量耗散过程。

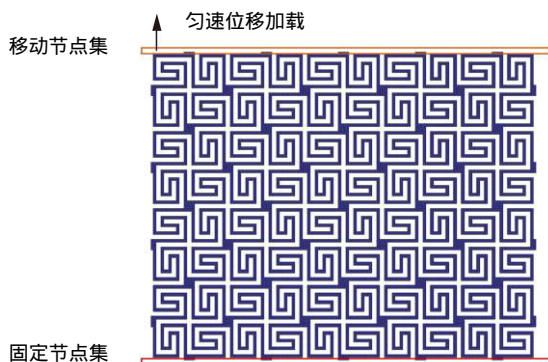


图8 手性铰链超材料的有限元模型

Fig. 8 FE model of the chiral hinge lattice

### 2.2 网格敏感性分析

为获得合理的网格单元尺寸,基于N1结构

的有限元模型进行了网格敏感性分析。使用HyperMesh软件进行网格划分,在单胞韧带宽度方向上分别设置2、3、4和5层网格,对应的网格尺寸为1 mm、0.667 mm、0.5 mm和0.4 mm。图9为N1超材料在不同网格单元尺寸下的载荷-位移曲线。可以看出当网格尺寸设置为0.5 mm(即宽度方向上设置4层网格)时有限元模型收敛。因此,选定韧带宽度上划分4层网格作为模型划分依据。

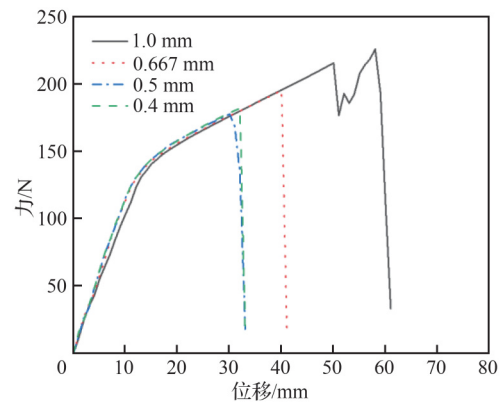


图9 不同网格单元尺寸的N1超材料载荷-位移曲线

Fig. 9 Force-displacement curves of the N1 lattice with different mesh element size

### 2.3 有限元模型验证

为了验证有限元模型的可靠性,采用与上述试验试样对应的几何变量对手性铰链超材料进行了有限元仿真。将仿真结果与试验结果进行对比,如图10所示,有限元模拟得到的载荷-位移曲线与试验结果展示出良好的一致性。同时在有限元仿真中,采用平面应变壳单元进行计算,完全忽略面外变形,仅计算面内变形,而N1的面内刚度大于N2和N3超材料结构,使用平面应变壳单元进行计算时的误差略大于N2和N3超材料结构。

图11为N1和N2超材料在不同应变下试验与有限元模拟的变形模式对比,可以发现变形模式吻合良好,有限元仿真可以准确捕获韧带弯曲和拉伸变形过程。因此,有限元模型可以有效反映不同几何参数下手性铰链超材料的力学特性和变形模式的有效性。

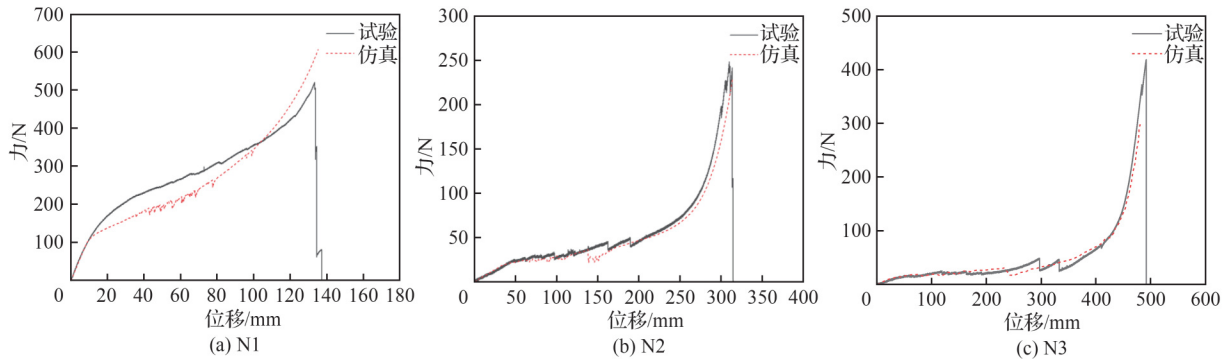


图 10 试验和仿真的载荷-位移曲线对比

Fig. 10 Comparison of force-displacement curves between experiments and FE simulations

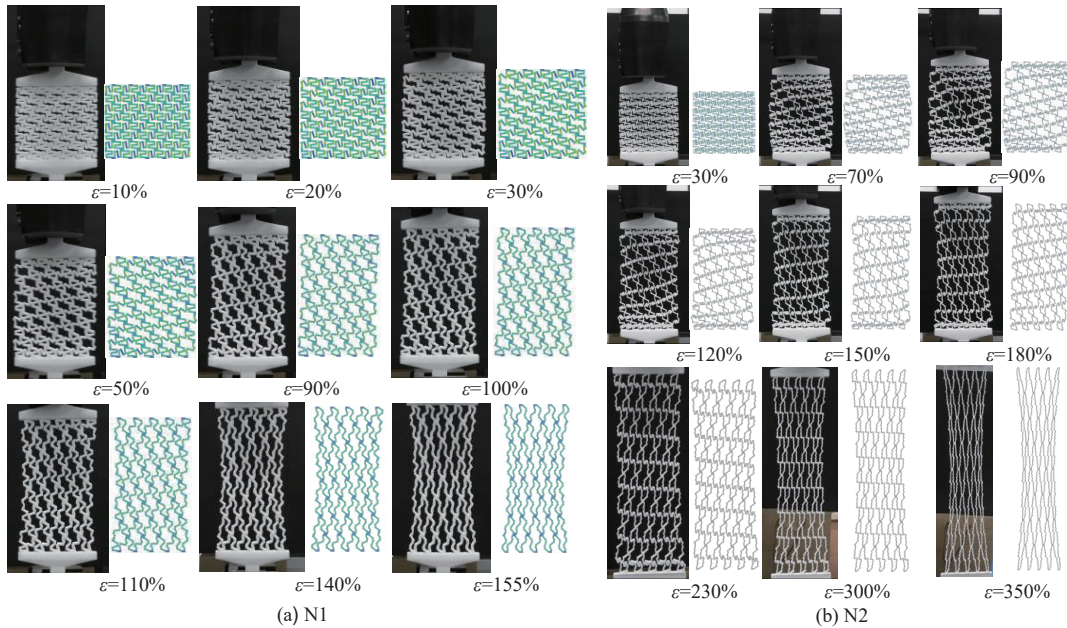


图 11 试验和仿真的变形模式对比

Fig. 11 Comparison of deformation modes between experiments and FE simulations

### 3 讨论

#### 3.1 结构级数的影响

本节通过试验和数值模拟来研究级数对手性铰链超材料的变形模式和响应的影响,通过控制结构的相对密度 $\bar{\rho} \sim 60\%$  以确保无关因素对结果没有干扰作用。表1给出了相同相对密度下改变级数的3个模型的单胞的基本参数。

针对不同级数的手性铰链超材料进行准静态拉伸模拟研究,为直观反映结构的拉伸性能,将载荷-位移曲线转化为名义应力-应变曲线,如

表 1 单胞基本参数

Table 1 Basic parameters of a single unit-cell

基本参数	N1	N2	N3
$b/\text{mm}$	2.0	1.2	0.88
$t/\text{mm}$	1.5	0.9	0.66
$\bar{\rho}/\%$	60.88	58.49	57.83

图12所示。曲线并非理想状态下的平滑模样,其上散布着些毛刺。造成该现象的原因是模型面外厚度偏薄,致使整体结构强度欠佳。当处于单轴拉伸载荷时,模型进行自旋转展开动作时,整体结构会产生轻微抖动,该抖动使得载荷出现间歇性释放,本质上等同于一定程度的力卸载,反

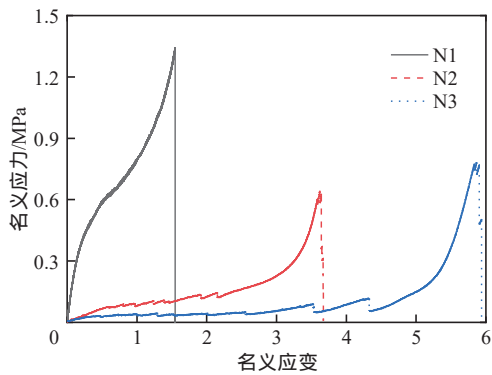


图 12 不同级数手性铰链超材料应力应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves of chiral hinge lattices with different levels

映在力-位移曲线上就呈现出不同程度向下凸出的毛刺形态。进一步剖析 N2 和 N3 结构的应力-应变响应,可清晰分辨出 3 个典型阶段:起始的弹性阶段,材料受力时表现出常规的弹性形变特性;紧接着进入因结构具备卓越延展性而催生的第 2 阶段,此阶段以带有“之”字型变化特征的长平台形态为显著标志,体现出结构独特的延展性能;最终步入硬化阶段,结构应力在较窄的应变区间内急剧攀升。

试件的拉伸刚度和断裂参数如图 13 所示。不同级数模型的断裂应变均超过 100%,证明了手性铰链结构具有高拉伸性。N1 手性超材料的拉伸刚度约 1.64 MPa, N2 与 N3 拉伸刚度几乎一致,接近 0.08 MPa。在相同密度的情况下,结构的拉伸性大大依赖于级数,从一级结构 N1 到

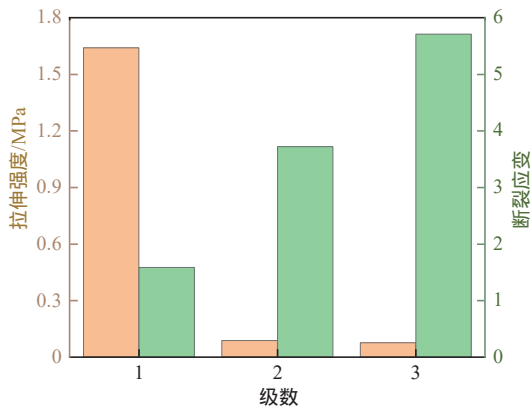


图 13 不同级数手性铰链超材料的拉伸刚度和断裂应变

Fig. 13 Tensile stiffness and fracture strain of chiral hinge lattices with different levels

二级结构 N2,模型的拉伸性提高了 205%,从一级结构 N1 到三级结构 N3,拉伸性能提高了 413%。在工程应用中可在相同材料利用率的情况下,通过增加模型级数的方式来提高其拉伸性能。

基于仿真结果对手性超材料结构的泊松比变化开展分析,将超材料左右最外层节点的横向位移设置为历程输出,右侧位移与左侧位移差的最大值定义为当前状态下的横向距离。以当前状态下的横向距离与超材料初始横向尺寸对比计算结构的泊松比变化如图 14 所示。手性超材料的泊松比变化呈现“勺”型趋势,即泊松比从 0 开始逐渐减小为负值到最大负泊松比,随后负泊松比数值减小直至转变为正泊松比,随后泊松比逐渐增大直至拉伸断裂。N1 的最大负泊松比为 -0.088, N2 的最大负泊松比为 -0.183, N3 的最大负泊松比为 -0.250,随着级数的增加,模型的负泊松比效应愈发明显,同时模型表现出负泊松比效应的应变范围也得到了显著的提升。注意到 N2 和 N3 结构表现出负泊松比的应变范围已超过 100%,表明结构在超拉伸应变范围内均能表现为负泊松比行为,结构具有良好的横纵向变形协同特性。

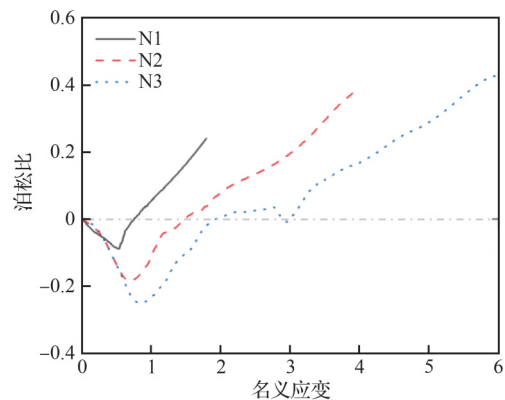


图 14 不同级数手性铰链超材料的泊松比变化曲线

Fig. 14 Poisson's ratio variation curves of the chiral hinge lattices with different levels

### 3.2 空隙宽度的影响

本节采用有限元仿真探究空隙宽度对超材料变形模式和拉伸响应的影响。出于对计算效

率的考虑对原始模型进行优化调整,模型采用了 $3 \times 5$ 单胞,即拉伸方向上设置3个单胞,垂直于拉伸方向上设置5个单胞。为便于区分不同的模型,引入“NiTj”这一命名规则。其中,j的取值与归一化空隙宽度的数值大小呈反向关联,具体而言,随着 $\bar{l}$ 递增,j的数值相应递减。例如,模型N1T1为在N1结构下,归一化空隙宽度 $\bar{l}$ 取值最大的特定模型,以确保研究过程中的模型管理与数据解读的便捷性。表2给出了N1结构归一化空隙宽度参数化分析的参数设置。

表2 N1不同归一化空隙宽度的参数设置

Table 2 Parameter Settings for different normalized gap widths in N1

模型	N1T1	N1T2	N1T3	N1T4
$\bar{l}$	0.060	0.050	0.043	0.033

通过开展数值模拟得到不同韧带宽度下N1超材料结构的应力-应变响应和拉伸刚度分别如图15和图16所示。为确保仿真结果的可比性,控制仿真拉伸应变加载至200%进行对比分析。空隙宽度并不会改变结构的响应模式,N1结构在不同空隙宽度下均表现为渐进强化模式。随着空隙宽度的增大,结构的拉伸刚度逐渐降低。

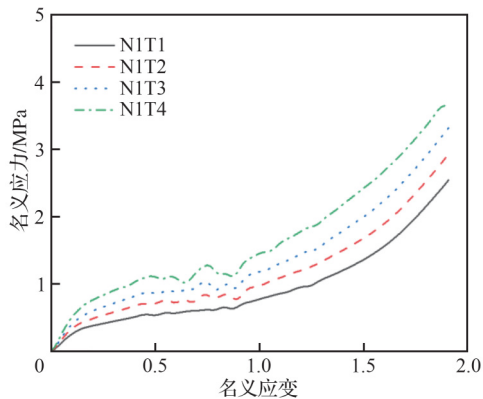


图15 不同空隙宽度N1超材料的应力应变曲线  
Fig. 15 Stress-strain curves of the N1 lattices with different gap widths

图17给出了N1超材料不同空隙宽度的泊松比变化曲线。由图可知,N1T1、N1T2、N1T3和N1T4这4种结构的最大负泊松比分别达到

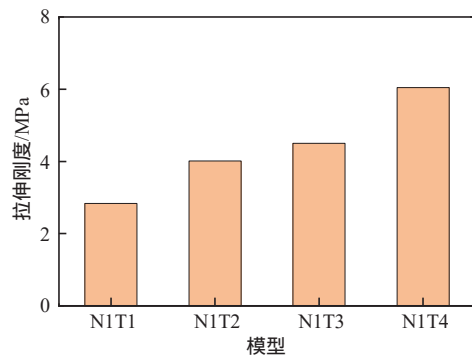


图16 不同空隙宽度N1超材料的拉伸刚度  
Fig. 16 Tensile stiffness of the N1 lattices with different gap widths

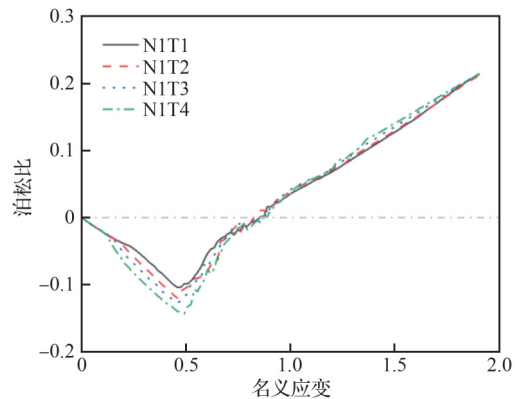


图17 不同空隙宽度N1超材料的泊松比变化曲线  
Fig. 17 Poisson's ratio variation curves of the N1 lattices with different gap widths

-0.103 8、-0.118 5、-0.125 8和-0.143 3。数据表明从N1T1结构到N1T4结构,最大负泊松比显著提升38%。结果充分验证了通过调整 $\bar{l}$ 的数值,能够有效调控负泊松比效应。进一步分析可知,结构的刚度与负泊松比效应之间存在显著的耦合关系,即改变 $\bar{l}$ 的数值,会对结构的刚度和泊松比变化产生影响。

依据表3开展数值模拟得到不同韧带宽度下N2超材料结构的应力应变响应、拉伸刚度和泊松比变化分别如图18、图19和图20所示。控制仿

表3 N2不同归一化空隙宽度的参数设置

Table 3 Parameter setting for different normalized gap widths in N2

模型	N2T1	N2T2	N2T3	N2T4
$\bar{l}$	0.060	0.050	0.043	0.033

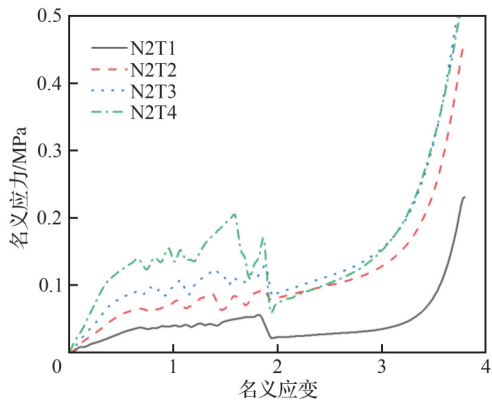


图 18 不同空隙宽度 N2 超材料的应力应变曲线  
Fig. 18 Stress-strain curves of the N2 lattices with different gap widths

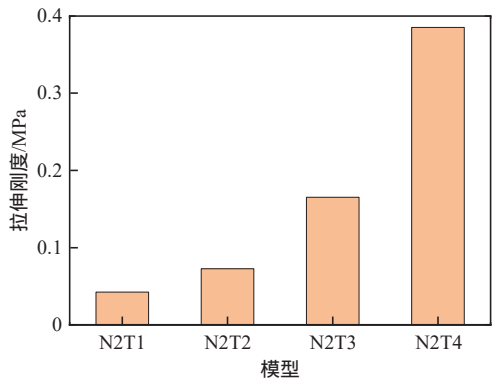


图 19 不同空隙宽度 N2 超材料的拉伸刚度  
Fig. 19 Tensile stiffness of N2 lattices with different gap widths

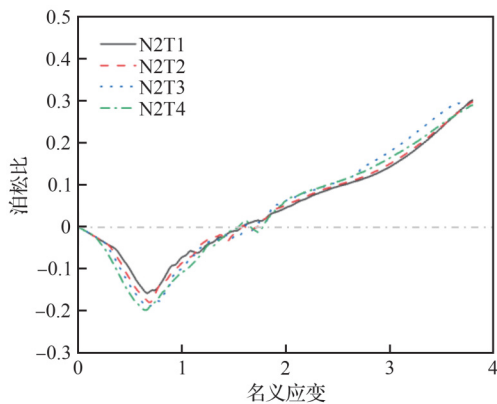


图 20 不同空隙宽度 N2 超材料的泊松比变化曲线  
Fig. 20 Poisson's ratio variation curves of N2 lattices with different gap widths

真拉伸应变加载至 400% 进行对比分析。在应变约 200% 时, 结构出现明显的应力下降, 原因是单

胞间形成的接触位置发生分离产生了应力释放。随着  $\bar{\epsilon}$  增大, 结构的应力振荡情况逐渐降低, 说明结构的稳定性增加。结构的拉伸刚度随着  $\bar{\epsilon}$  增大逐渐降低, 结构的延展性增加, 泊松比变化范围减小。N2T1 的最大负泊松比为 -0.1578, N2T2 的最大负泊松比为 -0.1789, N2T3 的最大负泊松比为 -0.1922, N2T4 的最大负泊松比为 -0.1984。从 N2T1 结构到 N2T4 结构最大负泊松比提升了 25%。

### 3.3 三维管状设计

三维单胞是在二维单胞的基础上进行周向弯曲形成, 弯曲角度取决于周向阵列单胞个数。以 N1 级数超材料为例, 给出 3D 管状超材料几何模型和参数示意图如图 21 所示。

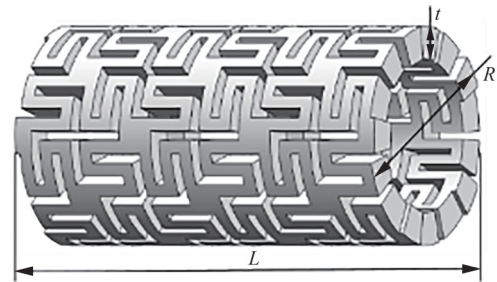


图 21 3D 管状超材料几何模型及几何参数示意图  
Fig. 21 Geometric model and parameters of 3D tubular lattice

周向分布的单胞个数记为  $m$ , 轴向分布的层数记为  $n$ , 管状模型的外径记为  $R$ , 轴向总长度为  $L$ , 管壁厚度为  $t$ , 2D 单胞的横向尺寸为  $L_0$ 。几何参数间的关系如下:

$$R = \frac{mL_0}{2\pi} \quad (13)$$

$$L = nL_0 \quad (14)$$

记拉伸变形后三维管状超材料的外径为  $R'$ , 轴向总长度记为  $L'$ , 拉伸载荷为  $F$ 。管状模型的名义应变、名义应力和泊松比计算公式如下:

$$\epsilon_{\text{nominal}} = \frac{L' - L}{L} \quad (15)$$

$$\sigma_{\text{nominal}} = \frac{4F}{\pi [R^2 - (R - t)^2]} \quad (16)$$

$$\nu = \frac{R' - R}{R} \quad (17)$$

本节研究的管状超材料为周向分布5个单胞即单胞弯曲角度为 $72^\circ$ ,轴向分布3个单胞,即管状超材料外径为16.71 mm,轴向长度为63 mm,管壁厚度为5 mm。制备工艺与二维超材料相同,制备得到N1、N2、N3管状超材料如图22所示。

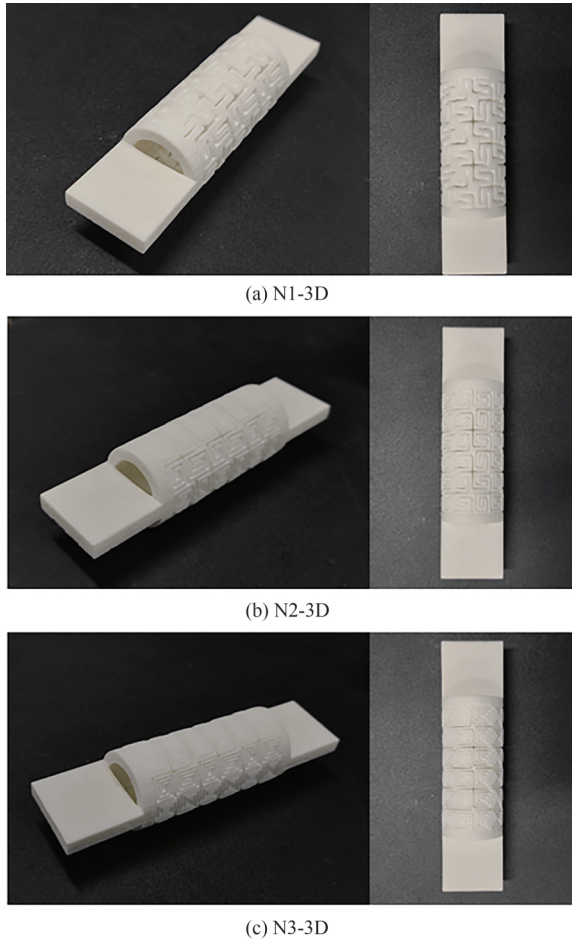


图22 3D管状超材料试验  
Fig. 22 Examples of 3D tubular lattices

对3D打印制备的管状超材料样品进行准静态拉伸试验,加载速率设置为 $7.5 \text{ mm/min}$ (应变率 $0.002 \text{ s}^{-1}$ ),拉伸得到的载荷-位移曲线如图23所示。通过摄像机记录不同级数管状超材料结构的变形过程如图24所示。对于3D管状超材料结构,随着级数的变化,变形模式发生比二维更加明显的差异变化。将N1-3D超材料变形模式定义为“渐进强化-平缓失效”模式,N2-3D超材料变形模式定义为“波动累积-突发失效”模式,

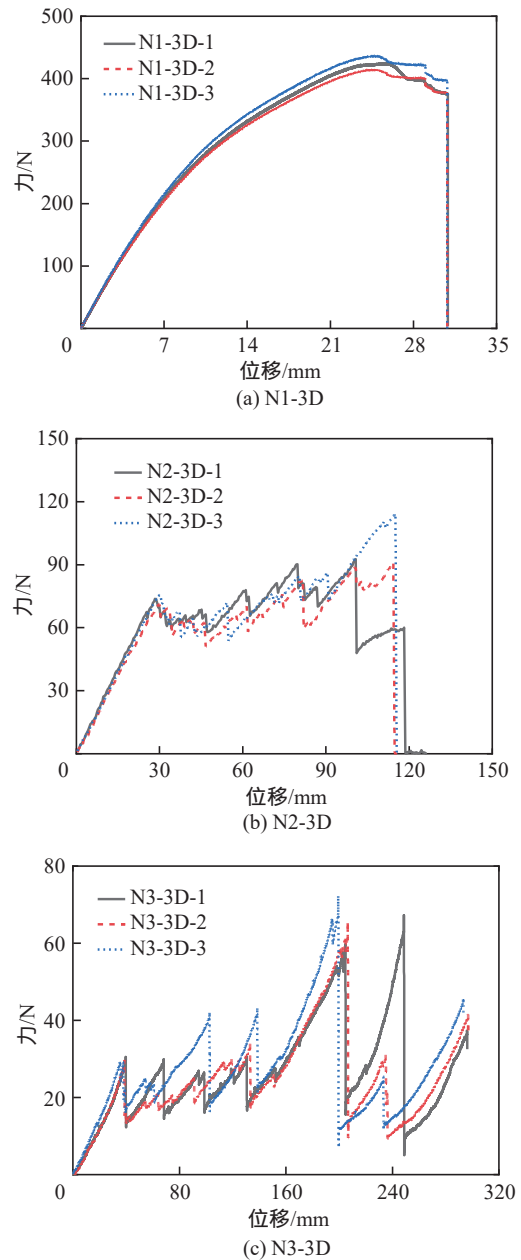


图23 不同级数的3D管状超材料载荷-位移曲线  
Fig. 23 Force-displacement curves of 3D tubular lattices with different levels

N3-3D超材料变形模式定义为“循环起伏-韧性失效”模式。

N1-3D的载荷-位移曲线整体上升趋势较为平滑,载荷随位移逐渐增加,呈现出渐进强化的特征。达到峰值力后曲线下降相对平缓,表明结构失效过程较为缓和,未出现急剧的承载能力丧失,故命名为“渐进强化-平缓失效型”。N2-3D的载荷位移曲线在上升过程中存在较多波动,说

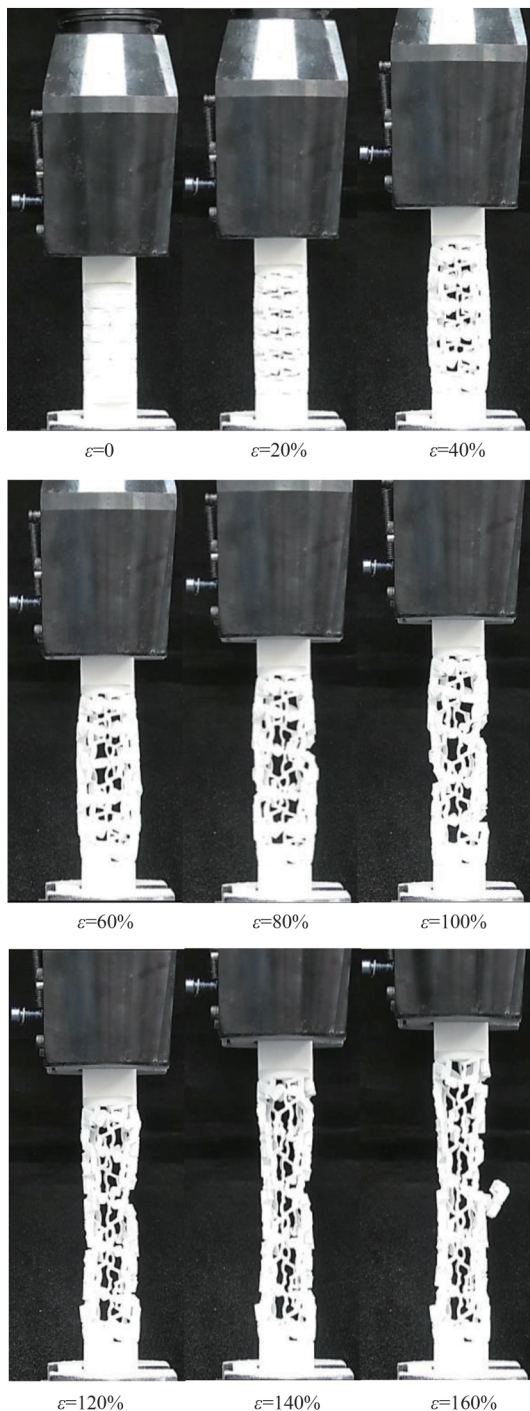


图 24 N2-3D 超材料变形模式

Fig. 24 Deformation mode of N2-3D tubular lattice

明在变形过程中结构内部不断有微观变化和能量的累积与释放。这些波动的累积最终导致结构在某一位移点突发失效,载荷快速下降,因此命名为“波动累积-突发失效型”。N3-3D 载荷位移曲线呈现多次循环起伏的形态,相较于 N2-3D

的小幅波动不同,结构在变形中经历了多次局部的强化与弱化过程。同时,其达到最终失效时经历了较长的变形阶段,故命名为“循环起伏-韧性失效型”。图 24 给出了 N2-3D 管状超材料结构的“波动累积-突发失效”的变形过程。在初始弹性阶段,整体变形均匀,周向 5 个单胞同步展开且无明显的局部变形,对应于载荷-位移曲线的平缓上升段。当应变达到 70% 时,不分单胞韧带开始弯曲并与相邻单胞接触,产生了局部摩擦导致力的波动,对应载荷-位移曲线的锯齿状波动形状。随着应变进一步增加,中间层的单胞连接接头塑性变形加大,载荷的波动幅度增大,反映出内部应力的反复累积与释放。当应变到达 150% 时,中间层连接接头的褶皱处萌生出裂纹,裂纹沿着周向快速扩展,当主裂纹贯穿整个管壁时载荷骤降,呈现“突发断裂”特征,与载荷位移曲线中的陡峭下降段对应。最终断裂面呈现 45° 斜向分布,穿过 3 个轴向单胞的连接接头,端口处可见明显的塑性撕裂痕迹,说明失效前结构经历了充分的塑性变形累积,展现出“波动累积”的能量释放过程。

#### 4 结 论

本文通过试验和数值模拟相结合的方法,系统研究了 3D 打印剪纸超材料的力学性能和变形机制,主要结论如下:

1) 通过调控单胞几何参数(级数和空隙宽度)可实现对材料力学性能的有效调控,其中三级结构(N3)较一级结构(N1)拉伸性能提升了 413%,最大负泊松比达到 -0.25,且随空隙宽度减小,负泊松比效应可提升 38%。

2) 材料在拉伸过程中表现出独特的“勺型”泊松比演化规律,由初始零值逐渐转为负值,最终恢复正值且高等级结构(N2、N3)的负泊松比效应可维持超过 100% 的应变范围。

3) 不同级数结构呈现渐进强化、J 型响应等典型力学行为,三维管状结构进一步展现出渐进强化-平缓失效、波动累积-突发失效等新颖的变形模式。

4) 研究发展的参数化设计方法和三维管状结构设计,为开发具有可编程力学性能的超

材料提供了新思路,在航空航天轻量化结构、柔性电子器件等领域具有重要应用价值。

本工作为兼具负泊松比效应和高拉伸性能的超材料设计提供了仿真和试验依据,拓展了此类材料在工程领域的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] FAN J X, ZHANG L, WEI S S, et al. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends[J]. *Materials Today*, 2021, 50: 303-328.
- [2] REN X, DAS R, TRAN P, et al. Auxetic metamaterials and structures: a review[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2): 023001.
- [3] 任鑫, 张相玉, 谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展[J]. *力学学报*, 2019, 51(3): 656-687.  
REN X, ZHANG X Y, XIE Y M. Research progress in auxetic materials and structures [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(3): 656-687 (in Chinese).
- [4] XIN X Z, LIU L W, LIU Y J, et al. 4D printing auxetic metamaterials with tunable, programmable, and reconfigurable mechanical properties[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(43): 2004226.
- [5] ZHANG Y, REN X, HAN D, et al. Static and dynamic properties of a perforated metallic auxetic metamaterial with tunable stiffness and energy absorption[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 164: 104193.
- [6] MA M H, WU Y D, YU Y L, et al. Ballistic resistance of biomimetic ceramic composite armor: An integrated analysis of impact dynamics and structural response [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2024, 240: 104209.
- [7] KIM W, BANG J, YANG Y, et al. Highly stretchable and conductive kirigami-like double-layer electrodes for motion-insensitive wearable electronics[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 283: 111655.
- [8] LI X, WANG Q S, YANG Z Y, et al. Novel auxetic structures with enhanced mechanical properties [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2019, 27: 59-65.
- [9] ROGERS J A, SOMEYA T, HUANG Y G. Materials and mechanics for stretchable electronics [J]. *Science*, 2010, 327(5973): 1603-1607.
- [10] ZHOU W X, YAO S S, WANG H Y, et al. Gas-permeable, ultrathin, stretchable epidermal electronics with porous electrodes[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 5798-5805.
- [11] BAO Z N, CHEN X D. Flexible and stretchable devices [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4177-4179.
- [12] MUTH J T, VOGT D M, TRUBY R L, et al. 3D printing: Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers (adv. mater. 36/2014)[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(36): 6202.
- [13] GIBSON L J, ASHBY M F, SCHAJER G S, et al. The mechanics of two-dimensional cellular materials [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1982, 382(1782): 43-59.
- [14] GRIMA J N, EVANS K E. Auxetic behavior from rotating squares[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(17): 1563-1565.
- [15] GRIMA J N, EVANS K E. Auxetic behavior from rotating triangles[J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(10): 3193-3196.
- [16] LAKES R. Deformation mechanisms in negative Poisson's ratio materials: Structural aspects[J]. *Journal of Materials Science*, 1991, 26(9): 2287-2292.
- [17] ROSSITER J, TAKASHIMA K, SCARPA F, et al. Shape memory polymer hexachiral auxetic structures with tunable stiffness[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(4): 045007.
- [18] GRIMA J N, GATT R. Perforated sheets exhibiting negative Poisson's ratios[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2010, 12(6): 460-464.
- [19] TANG Y C, YIN J. Design of cut unit geometry in hierarchical kirigami-based auxetic metamaterials for high stretchability and compressibility[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2017, 12: 77-85.
- [20] PARK J, WANG S D, LI M, et al. Three-dimensional nanonetworks for giant stretchability in dielectrics and conductors[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 916.
- [21] HUANG S H, LIU P, MOKASDAR A, et al. Additive manufacturing and its societal impact: A literature review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(5): 1191-1203.
- [22] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.
- [23] 党乐, 张梦雨, 成艳娜, 等. 3D打印技术在复合材料中的应用与发展 [J] *科技创新与应用*, 2022, 12(24): 166-169.  
DANG L, ZHANG M Y, CHENG Y N, et al. The application and development of 3D Printing Technology in Composite Materials [J]. *Technology Innovation and Application*, 2022, 12(24): 166-169 (in Chinese).
- [24] BEHARIC A, RODRIGUEZ EGUIR, YANG L. Drop-weight impact characteristics of additively manufactured

- sandwich structures with different cellular designs[J]. *Materials & Design*, 2018, 145: 122-134.
- [25] YUAN S Q, SHEN F, BAI J M, et al. 3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization[J]. *Materials & Design*, 2017, 120: 317-327.
- [26] LI B, LIU H, ZHANG Q, et al. Crushing behavior and energy absorption of a bio-inspired bi-directional corrugated lattice under quasi-static compression load[J]. *Composite Structures*, 2022, 286: 115315.

(责任编辑: 张晗)

## Design and mechanical behavior of 3D printed high tensile negative Poisson's ratio metamaterials

WANG Yi, LIU Hua, YANG Jialing, YANG Xianfeng\*

*National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

**Abstract:** This paper focuses on the origami metamaterials with both negative Poisson's ratio effect and high tensile performance. The research is conducted by combining experiments and numerical simulations. Parametric models are established using HyperMesh, and finite element simulations are carried out with Ls-Dyna. Nylon PA2200 specimens are fabricated by Selective Laser Sintering (SLS), and quasi-static tensile tests are performed to systematically investigate their mechanical behavior and regulation mechanism. The research shows that the unit cell geometric parameters (level, gap width) have a significant regulatory effect on the material properties: the tensile performance of the three-level structure (N3) is 413% higher than that of the one-level structure (N1), and the maximum negative Poisson's ratio reaches  $-0.25$ ; reducing the gap width can increase the negative Poisson's ratio effect by 38%. The material exhibits a unique "spoon-shaped" Poisson's ratio evolution law, and the negative Poisson's ratio effect of the high-level structures (N2, N3) can be maintained over a strain range of more than 100%. When the design is extended to three-dimensional tubular structures, it is found that they have novel deformation modes such as progressive strengthening and smooth failure. This study provides theoretical and experimental basis for the development of programmable negative Poisson's ratio high-tensile metamaterials, which have important application potential in fields such as flexible electronics and aerospace.

**Keywords:** paper-cutting metamaterials; negative Poisson's ratio; high stretchability; 3D printing; finite element simulation

**Received:** 2025-06-02; **Revised:** 2025-06-27; **Accepted:** 2025-07-22; **Published online:** 2025-09-02 08:49

**URL:** <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2025/V46/I121/532361>

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (12472376)

\* **Corresponding author.** E-mail: yangxf@buaa.edu.cn