

一种具有增强力学可调性的3D打印拉胀结构的设计方法

张盟^{1,2} 徐嘉文^{1,2} 陈彦秋^{1,2} 刘禹^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 无锡 214122)

(2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 拉胀材料因其在变形下的新颖行为以及许多其他的材料特性(如抗断裂性、抗剪切性和能量吸收)而受到关注。将超弹性材料与拉胀结构相结合,它们的高度可变形的能力使设计具有增强力学可调性的结构成为可能。为此,提出了一种具有增强力学可调性的3D打印拉胀结构的设计方法。通过试验和数值分析,研究了所设计结构的面内压缩行为。结果表明,与传统的拉胀结构相比,具有拉胀结构的复合材料表现出了更高的刚度和增强的能量吸收性能。通过进一步调整正弦韧带的分布和振幅,生成了具有可调能量吸收、泊松比和变形模式的拉胀结构。展示了一种用于提高轻质结构的力学性能和能量吸收的设计方法。

关键词: 负泊松比; 3D打印; 拉胀结构; 复合材料; 能量吸收

中图分类号: TB324 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.07.013

0 引言

负泊松比的拉胀机械材料具有反直觉的变形行为^[1]。当纵向拉伸时,这种材料表现为横向扩张而不是收缩,反之亦然^[2]。其最显著的特点在于可通过对晶格的排列来人为地创造集体特征,而不是调整材料系统的内在特性^[3]。通过合理安排或调整结构参数^[4],拉胀晶格可以表现出不同寻常的性能,包括高度可拉伸性^[5]、加强的弯曲刚度^[6]、可调的抗剪切模量^[7]和增强的能量吸收性能^[8],在汽车^[9]、生物医学^[10]、柔性电子^[11]和航空航天工程^[12]中得到应用。

由正弦韧带组成的结构是一种典型的拉胀结构。2015年,KÖRNER等^[13]首次提出,正弦结构产生拉胀行为的基本机制是旋转,泊松比是韧带厚度和振幅的函数。随后报道了大变形对正弦韧带结构力学性能的影响^{[14]054002},研究表明,韧带的排列允许智能控制力学性能。WARMUTH等^[15]采用选择性电子束熔化法制备了三维正弦异形细胞结构,研究了韧带厚度和韧带振幅对细胞结构力学性能和变形行为的影响;在此基础上,NOVAK等^[16-17]通过改变正弦振幅来制备梯度铜合金的手性结构,从而产生不同的泊松比和力学性能,然后在铜合金晶格框架中填充硅树脂以增强其力学性能。SUNDARARAMAN等^[18]研究了与具有超临界振幅比的晶格拓扑变形(当受到压缩时)相关的压

缩和剪切刚度的阶跃变化。然而,通过在结构中合理分布不同振幅的正弦韧带来调节其力学性能的方法鲜有报道。

本研究开发了一个数字设计工具,以编程正弦拉胀材料(Sinusoidal Auxetic Material, SAM)在单轴压缩下的力学行为。采用集成的方法研究平面内行为,实现了从理论建模到3D打印的完整工作流程。研究了不同结构的力学性能:变形模式、能量吸收能力和泊松比。讨论了尺寸参数对吸能性能和泊松比的影响。

1 材料与方法

1.1 拉胀晶格的设计

研究的SAM模型为典型的缺失四手性结构,仅由四手性节点(左手和右手节点交替)组成^{[14]054002},如图1所示。图1中, A 为正弦线的振幅; d 为单个晶格的边长; t 为正弦线的厚度; $A_{0.5}$ 、 $A_{1.0}$ 、 $A_{1.5}$ 分别为振幅为0.5、1.0、1.5 mm的晶格。设计中正弦晶格结构的框架是由SE1700制成的;其内部空间设置为基体,由Ecoflex 00-30制成;两者形成增强复合材料(后者的流动性更好,能更有效地进行浇注填充,2种材料的黏度分别为542、3 Pa·s)。

本文开发了一种用于可视化和制造的计算机辅助设计工具,直写打印的路径生成器在Matlab软件中实现。CAD环境截图如图2所示。这样可以根据几

收稿日期: 2024-01-04 修回日期: 2024-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875253); 江苏省重点研发计划项目(BE2022069-2)

作者简介: 张盟,男,1999年生,四川德阳人,在读硕士研究生; 主要研究方向为3D打印、超材料; E-mail: 1780260080@qq.com。

刘禹(通信作者),男,1980年生,四川内江人,博士,教授,博士研究生导师; 主要研究方向为先进制造技术; E-mail: yuliu@jiangnan.edu.cn。

引用格式: 张盟,徐嘉文,陈彦秋,等. 一种具有增强力学可调性的3D打印拉胀结构的设计方法[J]. 机械强度, 2025, 47(7): 101-107.

ZHANG Meng, XU Jiawen, CHEN Yanqiu, et al. A design method of 3D printed auxetic structures with enhanced mechanical tunability[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(7): 101-107.

何输入参数对结构进行可视化,并自动生成G-code文件进行3D打印。

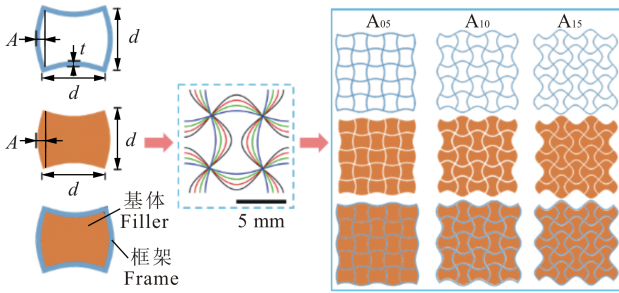


图1 正弦晶格模型图

Fig. 1 Diagram of the sinusoidal lattice model

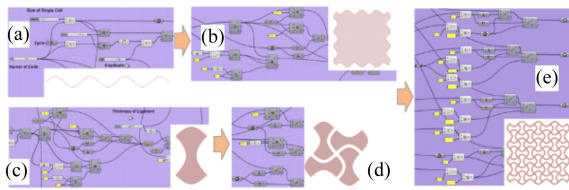


图2 正弦结构的计算机辅助设计流程图

Fig. 2 Flow chart of the computer aided design of the sinusoidal structure

1.2 墨水制备

本试验使用的聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 为 Dowsil SE1700 (Dow Chemical Inc.); 3-丁炔-1-醇 (Sigma-Aldrich Chemistry Inc.) 作为缓固剂以延长油墨的工作时间。为了便于样品与基底分离,将基底浸泡在含有 1% 三氯硅烷的乙醇溶液中 12 h。

SE1700 材料制备过程:将基料、交联剂和缓固剂按 100: 10: 1 的质量比装入胶杯中,并在行星搅拌器 (QM3SP2) 中以 1 500 r/min 的转速搅拌 5 min。然后,将混合物转移到 30 mL 注射器 (Nordson EFD) 中进行打印,并在离心机 (TG1650-WS) 中以 5 000 r/min 的转速离心 5 min 以除去混合物中的空气。

制备 Ecoflex (Smooth-On Inc.): 将相同质量的 Ecoflex 00-30 的 A 组分与 B 组分充分混合,并按上述同样的方法对混合物进行搅拌和脱气。

1.3 3D 打印过程

使用直接墨水写入 (Direct Ink Write, DIW) 这种基于挤压的三维打印方法来制造这些拉胀材料。然后,将装载的注射器安装到专门设计的三维 DIW 打印机 (最小分辨率为 5 μm) 上,该打印机由计算机控制的三轴移动平台组成。每个结构的打印路径都编译为参数化的 G 代码脚本。为展示方法,设计了 3 种具有相同单元数 (5 \times 5) 的参考架构,其原形尺寸为 25 mm \times 25 mm。

考虑到三维打印的各向异性,所有试样均沿同一方向打印,以避免层方向对材料机械性能的影响。打

印样品在 150 $^{\circ}\text{C}$ 下固化 1 h,冷却至室温后从基底上取下。

1.4 压缩测试方法

采用软件 COMSOL 6.0 a 进行有限元分析,分析结构在准静态压缩载荷作用下的力学响应。基于 Mooney-Rivlin 超弹性模型,将晶格模型的弹性应力-应变行为建模为超弹性材料。底板各方向固定,顶板除 y 方向 (单轴位移加载) 可上、下移动外,其余方向均固定。

室温下采用 ETM503B 型万能试验机进行准静态压缩试验。为获得 3D 打印材料的力学响应,使用放置在试验机前的摄像头记录结构的横向和纵向变形。对 3D 打印硅橡胶材料按照 ASTM D695 标准在单轴测试下进行力学测试以获取材料参数,如图 3 所示。将单轴压缩试验测得的载荷-位移曲线用于有限元分析中的材料特性,然后根据试样的测量尺寸转换为标称应力-应变行为。

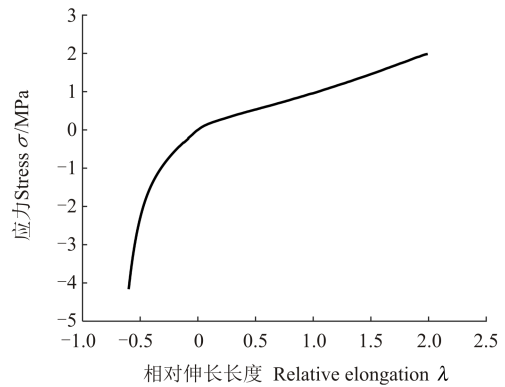


图3 材料的力学模型

Fig. 3 Mechanical model of the material

2 结果与讨论

能量吸收能力是晶格结构的关键性能指标。通过计算总能量吸收 (Energy Absorption, EA) 和比能量吸收 (Specific Energy Absorption, SEA) 来评价试件的能量吸收能力。定义 E_{EA} 为利用试件变形耗散的外载荷,可通过载荷-位移曲线计算:

$$E_{EA} = \int_0^d F(x) dx \quad (1)$$

式中, $F(x)$ 为压缩力; x 为加载位移。为了消除质量 m 的影响,给出了单位质量吸收能量的指标 E_{SEA} :

$$E_{SEA} = \frac{E_{EA}}{m} \quad (2)$$

图 4 所示为 A_{05} 结构韧带变形和未变形的场景。结构面内受压,载荷 P 和弯矩 M 通过平行于载荷方向的垂直韧带传递。在垂直韧带传递载荷后,载荷直接传递到相邻的 3 个韧带;然后开始旋转,旋转角度为 φ 。例如,具有较大振幅的晶格由于其相邻韧带之间

的早期接触而抑制了其旋转变形。

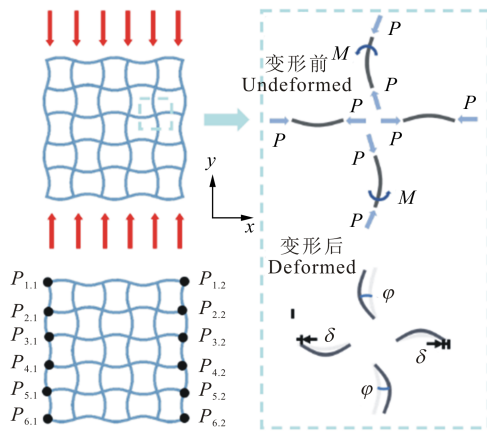


图4 晶格在压缩载荷作用下的变形与泊松比计算模型

Fig. 4 Calculation model of lattice deformation and Poisson ratio under compressive load

为减小局部晶格对试样变形的影响,通过在整体晶格边界处识别 12 个节点 $P_{i,j}$ 来研究变形变化,量化压缩试验过程中晶格的名义应变,并计算泊松比。等效泊松比的计算式为

$$\nu_i = -\frac{\varepsilon_i^x}{\varepsilon_i^y} = -\frac{\Delta X}{\Delta Y} \frac{D_y}{D_x} = -\frac{(X_{i,1} - X_{i,2})}{\Delta Y} \frac{D_y}{D_x} \quad (3)$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{i} \sum_{n=0}^i \nu_n \quad (4)$$

式中, ν_i 为每一对水平点的泊松比; ε_i^x 、 ε_i^y 分别为 X 、 Y 方向上的应变; ΔX 、 ΔY 分别为点在 X 、 Y 方向上的相对位移(其值为左右两点相对位移之和,但方向相反); D_x 、 D_y 分别为点在 X 、 Y 方向上的初始距离。

2.1 均匀振幅正弦结构

本节研究了不同振幅的均匀振幅正弦材料 (Uniform Amplitude Sinusoidal Material, UASM) 的准静态压缩行为,仪器的移动压头速度规定为 2 mm/min。图 5 所示为 3 种不同振幅的硅橡胶结构在压缩状态下的模拟和试验变形。

不同振幅结构在不同应变水平下的变形行为,都出现了横向收缩,主要原因是应变 $\varepsilon < 0.1$ 时从中心开始的旋转和韧带的弯曲。值得注意的是,晶格在小应变下显示出类似“X”的变形模式。这可能是由于晶格和压头在压缩表面上的摩擦抑制了晶格在上下边界的横向收缩。

图 6 所示为泊松比与振幅的关系。由图 6 可知,振幅越大,泊松比越小。不同振幅样品的应力-应变曲线如图 7 所示。当 $\varepsilon \leq 0.2$ 时, A_{05} 显示出更大的应力值;应力随着振幅的增大而减小,但 A_{10} 与 A_{15} 的差异并不明显。总体而言,模拟和试验之间具有较好的一致性。

为更全面地比较机械响应范围,评估了 3 种结构

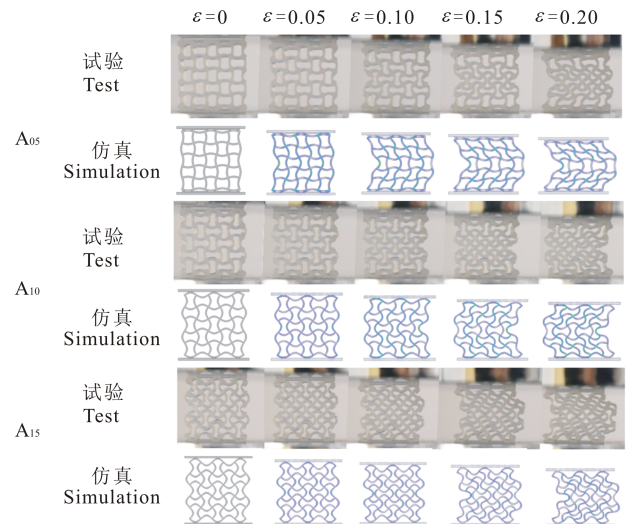


图5 试验和有限元模型在单轴压缩下的变形图

Fig. 5 Deformation diagrams of the test and the finite element model under uniaxis compression

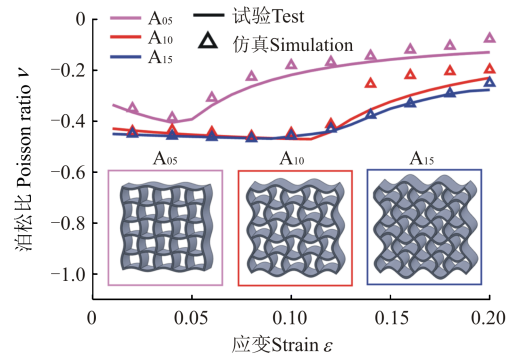


图6 不同结构的应变-泊松比曲线

Fig. 6 Strain-Poisson ratio curves of different structures

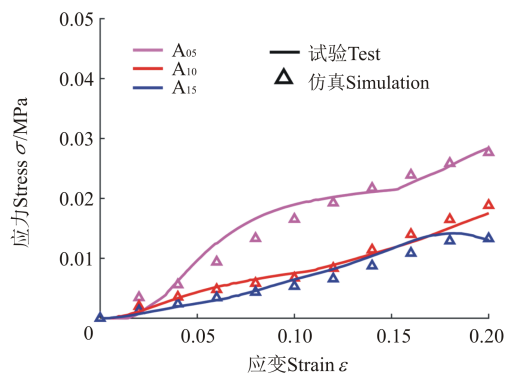


图7 不同结构的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of different structures

在 ε 高达 0.6 时的变形行为,如图 8 所示。开始时,应力几乎随施加的应变线性增加。随着压缩位移增大,结构发生屈曲,应力-应变曲线出现平台区。最后, UASM 的这些韧带发生接触,应力-应变曲线出现致密化。韧带的振幅越小, UASM 的刚度越高。这可以解释为,由于单个韧带的初始弯曲度较高,弯曲刚度降低,所以通过弯曲产生 EA 的能力变小。如图 9 所示,低幅值 A_{05} 有着最高的 SEA 值。

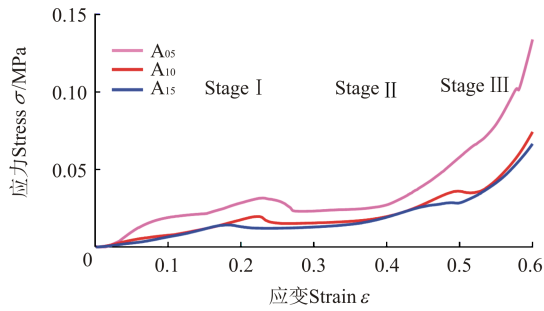


图 8 不同结构在 $\epsilon=0.6$ 下的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of different structures under $\epsilon=0.6$

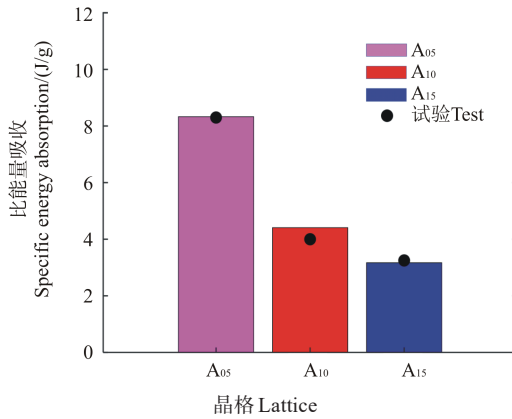


图 9 3种结构的SEA比较

Fig. 9 SEA comparison of the three structures

2.2 正弦拉胀复合材料

通常,拉胀结构由于其孔隙率而具有相对较低的密度。因此,它们具有比传统结构更低的刚度和承载能力。因此,提出正弦拉胀加强复合(Sinusoidal Auxetic Reinforced Composites, SARC)材料,SARC材料由2种材料组成,其拉胀框架为SE 1700,软基体材料为Ecoflex 00-30,如图10所示,拉胀框架为半透明色,填充基体为紫色。作为比较,本小节还制造了不含拉胀框架的纯填充材料(Pure Infilled Material, PIM)。

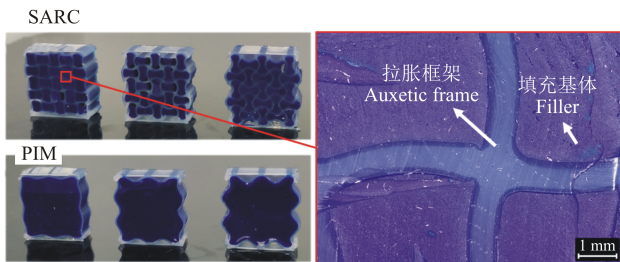
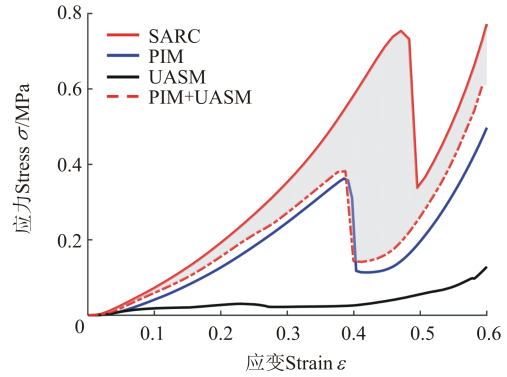


图 10 试验样品

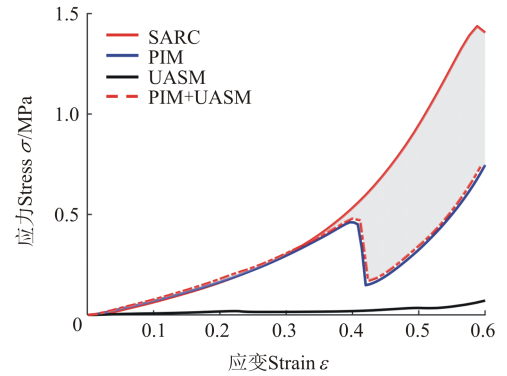
Fig. 10 Test sample

对6个SARC样品进行准静态压缩,最大压缩应变为0.6,得到了图11所示的应力-应变曲线。进行材料填充后,由于结构的侧向滑移, A_{05} 和 A_{10} 结构的应力突然地下降,甚至由于结构整体倒塌, A_{15} 中的应力降至0。灰色区域是SARC材料与单框架结构和填充物(红色虚线)的和之间的EA增强值。虽然只测试了3

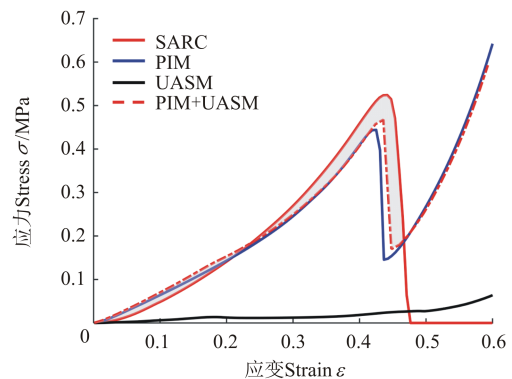
个不同振幅的样品,但灰色区域表明,所有SARC材料的SEA都有不同程度的增强。结果表明,将这2种材料结合在一起可提供额外的刚度并增强能量吸收能力。如图12所示,填充得到的SARC材料使UASM的弹性模量和能量吸收能力分别平均提高了19倍和4.37倍;使用UASM后,PIM性能分别提高了82%和56%。



(a) A_{05}



(b) A_{10}



(c) A_{15}

图 11 SARC 材料的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of SARC material

2.3 参数化研究

为深入研究晶胞的参数对机械性能的影响,本小节对晶胞进行了参数化研究。

2.3.1 壁厚影响

3种型号的壁厚变量 t 设计为0.6、0.7、0.8 mm(分别用 T_6 、 T_7 、 T_8 表示)。图13所示为泊松比和比能量吸收性能比较。对于相同的振幅 A 的结构,不同的

厚度 t 会使泊松比曲线出现偏差,但其整体的变化趋势一致。结果表明,相比于壁厚,振幅是设计泊松比和比能量吸收性能的重要参数。

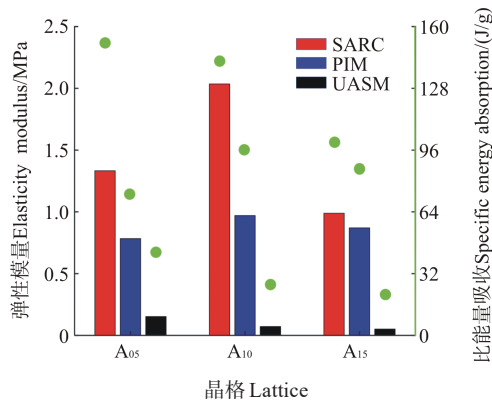
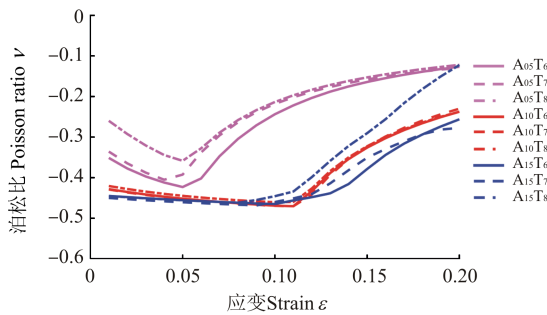
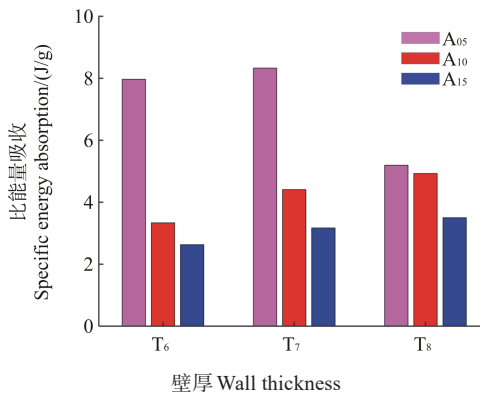


图 12 SARC 材料的机械性能比较

Fig. 12 Comparison of mechanical properties of SARC material



(a) 泊松比-应变曲线
(a) Poisson ratio-strain curves



(b) SEA 比较

(b) Comparison of SEA

图 13 壁厚对机械性能的影响

Fig. 13 Effect of the wall thickness on mechanical properties

2.3.2 各向异性振幅的影响

每个晶胞结构都是由横向和纵向两个方向共 4 条韧带组成。在本小节中研究了横/纵向振幅不一致结构的机械性能,构建了图 14 所示的一组结构(其中 $X_{05}Y_{10}$ 表示,沿压缩方向的韧带振幅为 0.5 mm,垂直于压缩方向的韧带振幅为 1 mm)。图 14 展示了 $\epsilon = 0.2$ 时单轴压缩试验模拟后的变形图。

图 15 展示了结构在 $\epsilon = 0.2$ 时的泊松比变化。含

有 Y_{00} 的结构没有表现出明显的拉胀行为,但有效地避免了横向屈曲,使结构的变形更加可控。这是由于水平韧带阻止了晶胞的旋转。然而,较小的泊松比会产生更大的不稳定性,如包含 X_{05} 的结构。由图 15 可知,该方法可以得到泊松比相似但变形不同的结构,如 $X_{10}Y_{05}$ 和 $X_{15}Y_{10}$;或压缩后变化差异较大的结构,如 $X_{05}Y_{10}$ 和 $X_{15}Y_{10}$;或泊松比几乎恒定的结构,如 $X_{15}Y_{05}$ 。改变横/纵向的振幅可以控制结构的变形和泊松比在 $-1 \sim 0$ 的范围内。

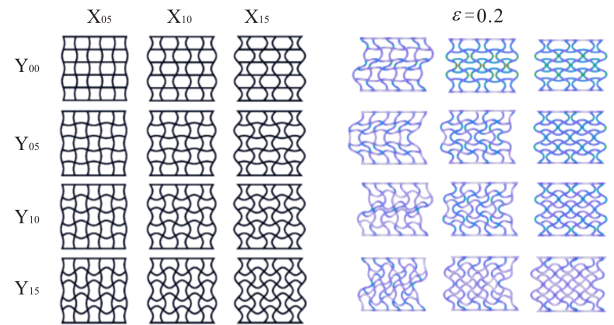


图 14 各向异性振幅结构的变形对比

Fig. 14 Deformation comparison of anisotropic amplitude structures

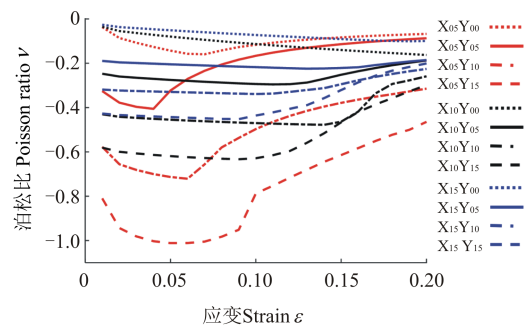


图 15 各向异性结构的泊松比-应变曲线

Fig. 15 Poisson ratio-strain curves of anisotropic structures

振幅改变对结构的能量吸收能力的影响如图 16 所示。只改变 X 振幅 ($X_{15}Y_{00}$ 与 $X_{05}Y_{00}$),SEA 值可以增加 1 倍,或者几乎相同的 SEA 值 ($X_{05}Y_{15}$ 与 $X_{10}Y_{15}$),只改变 Y 向振幅也可以达到相同的效果。因此,该方法可以智能地控制结构的能量吸收性能。

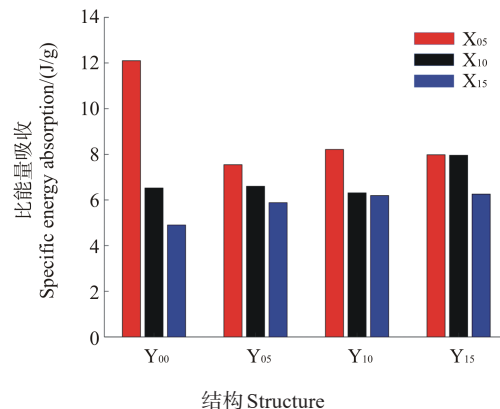


图 16 各向异性结构的 SEA 比较

Fig. 16 SEA comparison of anisotropic structures

2.3.3 多振幅组合

然而,较小的泊松比往往会牺牲结构的稳定性。为了改善这一问题,提出由多种振幅组合而成的正弦结构。如图 17 所示,将 $X_{05}Y_{05}$ 和 $X_{15}Y_{05}$ 模型组合为 $X_{0515}Y_{05}$,并将变形较稳定的 $X_{15}Y_{05}$ 放在结构中间,将泊松比较小的 $X_{05}Y_{05}$ 分布在左右两侧。结果表明,与原始结构相比,组合后的结构能有效提高结构的稳定性,使泊松比值更低且结构更稳定。

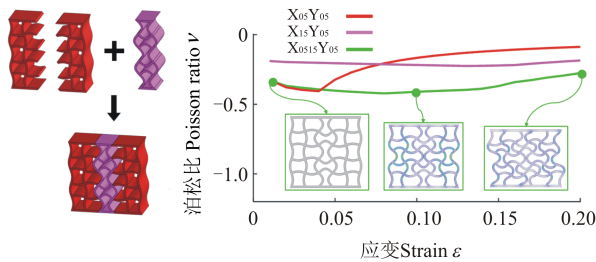


图 17 多振幅组合结构的泊松比-应变曲线

Fig. 17 Poisson ratio-strain curves of multiple amplitude sinusoidal structures

通过调整沿压缩方向的韧带的振幅分布,可以得到一系列屈曲方向可控的结构,如图 18 所示,屈曲方向总是从低振幅一侧指向高振幅一侧。

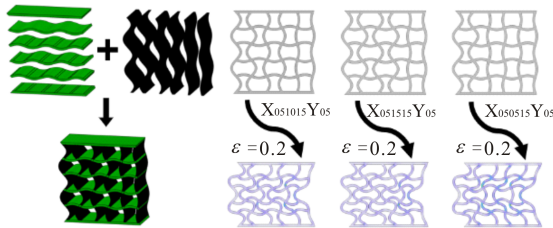
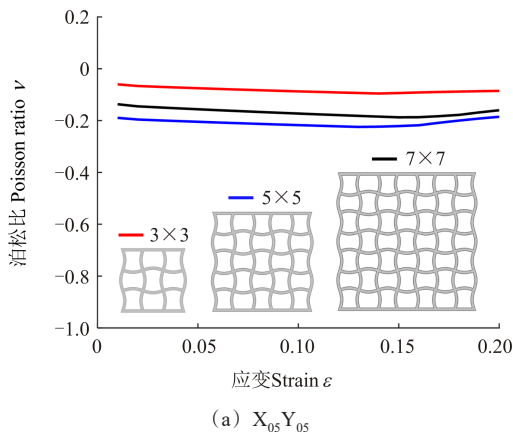


图 18 多振幅组合结构的变形对比

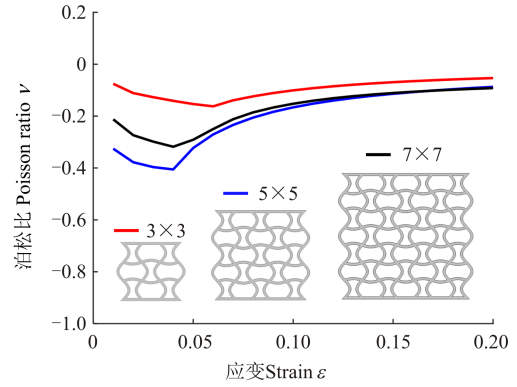
Fig. 18 Deformation comparison of multiple amplitude sinusoidal structures

2.3.4 晶格数量的影响

在本小节中,考虑了 9、25、49 个晶格数量的结构,其对应的孔隙率分别为(结构由左至右), $X_{05}Y_{05}$: 66.45%、69.30%、70.50%; $X_{15}Y_{05}$: 63.14%、66.59%、67.94%。如图 19 所示,3 种排列方式会使泊松比出现偏差,但变化趋势几乎保持一致;且对于具有相同振幅的结构,其孔隙率越接近,泊松比值越接近。



(a) $X_{05}Y_{05}$



(b) $X_{15}Y_{05}$

图 19 不同晶格数量对 2 种结构泊松比的影响

Fig. 19 Effect of different number of cells on the Poisson ratio for two structures

3 结论

本研究提出了一种如何改善轻质晶格结构的机械性能和能量吸收的简便设计方法。通过调整正弦韧带的分布和振幅,可生成具有可调能量吸收、泊松比和变形模式的拉胀结构。对 DIW 制备的正弦手性拉胀结构进行压缩试验以进行验证。得出以下主要结论:

1)合理的晶格排列不仅可以调节单轴压缩下的刚度,还可以通过防止 UASM 的侧向屈曲来增加结构的稳定性,从而使硅橡胶结构具有不同的变形模式和差异性的力学性能。

2)压缩条件下,SARC 材料的整体能量吸收能力明显大于纯填充材料和等振幅正弦材料的总和。复合材料具有更高的刚度和更强的能量吸收能力。

3)相比于改变韧带厚度 t ,调整韧带振幅能更有效地调节结构的泊松比和能量吸收能力。水平振幅低至 0 时,泊松比会始终保持在 0 附近,但能有效防止结构侧向屈曲。

4)合理的正弦韧带分布可以定制力学性能,甚至可以将泊松比降低到-1。

参考文献 (References)

- [1] EVANS K E, NKANSAH M A, HUTCHINSON I J, et al. Molecular network design[J]. Nature, 1991, 353: 124.
- [2] REN X, DAS R, TRAN J P, et al. Auxetic metamaterials and structures: a review[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27 (2): 023001.
- [3] JIANG S, LIU X J, LIU J P, et al. Flexible metamaterial electronics [J]. Advanced Materials, 2022, 34(52): e2200070.
- [4] BERTOLDI K, VITELLI V, CHRISTENSEN J, et al. Flexible mechanical metamaterials [J]. Nature Reviews Materials, 2017, 2 (11): 17066.
- [5] KABIR S, KIM H, LEE S. Characterization of 3D printed auxetic sinusoidal patterns/nylon composite fabrics [J]. Fibers and

- Polymers,2020,21(6):1372-1381.
- [6] LI T T, WANG L F. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials [J]. *Composite Structures*,2017,175:46-57.
- [7] RADMAN A, HUANG X, XIE Y M. Topology optimization of functionally graded cellular materials [J]. *Journal of Materials Science*,2013,48(4):1503-1510.
- [8] WANG J, LUO X B, WANG K, et al. On impact behaviors of 3D concave structures with negative Poisson's ratio [J]. *Composite Structures*,2022,298:115999.
- [9] WANG Y L, WANG L M, MA Z D, et al. A negative Poisson's ratio suspension jounce bumper [J]. *Materials & Design*, 2016, 103:90-99.
- [10] BABAEE S, SHI Y C, ABBASALIZADEH S, et al. Kirigami-inspired stents for sustained local delivery of therapeutics [J]. *Nature Materials*,2021,20(8):1085-1092.
- [11] 侯运优,张婕. 3D 打印弹性蜂窝结构的实验和数值模拟研究[J]. *机械强度*,2023,45(5):1259-1264.
HOU Yunyou, ZHANG Jie. Experimental and numerical simulation of elastic honeycomb structures by 3D printing [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2023, 45 (5) : 1259-1264. (In Chinese)
- [12] ZHOU G, MA Z D, LI G Y, et al. Design optimization of a novel NPR crash box based on multi-objective genetic algorithm [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*,2016,54(3):673-684.
- [13] KÖRNER C, LIEBOLD-RIBEIRO Y. A systematic approach to identify cellular auxetic materials [J]. *Smart Material Structures*, 2015,24(2):025013.
- [14] STREK T, JOPEK H, WOJCIECHOWSKI K W. The influence of large deformations on mechanical properties of sinusoidal ligament structures[J]. *Smart Material Structures*,2016,25(5):054002.
- [15] WARMUTH F, OSMANLIC F, ADLER L, et al. Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting[J]. *Smart Material Structures*,2017,26(2):025013.
- [16] NOVAK N, KRSTULOVIĆ-OPARA L, REN Z, et al. Compression and shear behaviour of graded chiral auxetic structures [J]. *Mechanics of Materials*,2020,148:103524.
- [17] NOVAK N, KRSTULOVIĆ-OPARA L, REN Z, et al. Mechanical properties of hybrid metamaterial with auxetic chiral cellular structure and silicon filler [J]. *Composite Structures*, 2020, 234: 111718.
- [18] SUNDARARAMAN V, O'DONNELL M P, CHENCHIAH I V, et al. Stiffness tailoring in sinusoidal lattice structures through passive topology morphing using contact connections [J]. *Materials & Design*,2023,226:111649.

A design method of 3D printed auxetic structures with enhanced mechanical tunability

ZHANG Meng^{1,2} XU Jiawen^{1,2} CHEN Yanqiu^{1,2} LIU Yu^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

(2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: Auxetic materials have garnered attention due to their novel behavior under deformation and numerous other material properties, such as fracture resistance, shear resistance, and energy absorption. By integrating hyperelastic materials with auxetic structures, the highly deformable capability enables the design of structures with enhanced mechanical tunability. To this end, a design methodology for 3D printed auxetic structures with improved mechanical adjustability was proposed. The in-plane compressive behavior of the designed structures was investigated through test and numerical analyses. The results demonstrate that, compared to conventional auxetic structures, the composite material with auxetics structures exhibits higher stiffness and enhanced energy absorption performance. By further adjusting the distribution and amplitude of sinusoidal ligaments, auxetic structures with tunable energy absorption, Poisson ratio, and deformation modes were generated. This study presents a design approach for improving the mechanical properties and energy absorption of lightweight structures.

Key words: Negative Poisson ratio; 3D printing; Auxetic structure; Composites; Energy absorption

Corresponding author: LIU Yu, E-mail: yuliu@jiangnan.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (51875253); Jiangsu Provincial Key Research and Development Program (BE2022069-2)

Received: 2024-01-04 Revised: 2024-02-03