

负泊松比管状支架结构的压缩刚度特性分析

苏义麟¹ 纪小刚^{1,2*} 辛嘉铭¹ 牛国法¹

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: 负泊松比结构具有独特的结构特性以及高能量吸收、形变适应性好等力学性能, 被广泛应用于工程领域。针对负泊松比结构管状支架在工程应用中的性能优化问题展开研究, 通过结构设计与力学分析相结合的方法, 系统探究了管状支架的抗压性能。基于负泊松比结构特有的向内收缩变形特性, 设计制备了4种新型管状支架结构, 结合物理压缩试验和数值模拟, 通过分析应力分布和载荷位移曲线, 构建了峰值载荷、能量吸收量及压缩刚度等多维度评价体系。结果表明, FB-H结构在径向持续受压时稳定性最优, 抗压强度与FB-X结构和FB-S结构相比分别提高了42%和123%。轴向载荷下不同结构呈现出差异, FB-X和FB-S结构支架刚性高, 可适用于要求支撑稳定场景; FB-N和FB-H结构支架柔性好, 可适用于较大变形场景。

关键词: 管状支架; 负泊松比结构; 轴向压缩; 径向压缩; 压缩刚度

中图分类号: TB34; TP391.73

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Compressive Stiffness Characteristics of Tubular Support Structures with Negative Poisson's Ratio

SU Yilin¹ JI Xiaogang^{1,2*} XIN Jiaming¹ NIU Guofa¹

1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu, 214122

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Wuxi, Jiangsu, 214122

Abstract: Negative Poisson ratio structures were widely used in engineering because of their unique structural properties, high energy absorption and good deformation adaptability. The performance optimization of tubular supports was studied with negative Poisson ratio structure in engineering applications. Combining structural design and mechanics analyses, the compressive performance of tubular supports was systematically investigated. Based on the unique inward shrinkage deformation characteristics of negative Poisson's ratio structures, four new tubular stent structures were designed and prepared. By analyzing the stress distribution and load displacement curve through physical compression test and numerical simulation, a multi-dimensional evaluation system was constructed including peak load, energy absorption and compression stiffness. The results show that the stability of FB-H structure is the best under continuous radial pressure, and the compressive strength of FB-X structure and FB-S structure are increased by 42% and 123%, respectively. Different structures show differences under axial loads. The FB-X and FB-S brackets have high rigidity and are suitable for scenarios requiring support stability. The FB-N and FB-H brackets are flexible and suitable for large deformation scenes.

Key words: tubular stent; negative Poisson ratio structure; axial compression; radial compression; compression stiffness

0 引言

负泊松比结构相较于传统结构, 其独特的几何形状和力学性能使其在承受复杂载荷时表现出优异的稳定性和承载能力, 广泛应用于土木工程^[1]、航空航天^[2]、医疗器械^[3]等领域。管状支架

作为一种重要的工程构件, 需要在高径向支撑力与轴向柔韧性之间实现平衡, 传统结构受压时易发生径向塌缩失效。负泊松比结构在轴向拉伸时产生径向扩张特性, 可同步提高支架的周向稳定性和形变适应性, 这为管状支架的结构优化提供了方向。同时, 3D打印技术的发展让制造复杂负泊松比结构的管状支架成为可能, 为支架的优化设计提供了高效途径^[4]。目前, 国内外科研工作者对负泊松比结构和管状支架的抗弯疲劳性

收稿日期: 2025-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(52175234, 51105175); 江苏省“六大人才高峰”项目(JXQC-006)

能^[5]、压缩吸能性能^[6]、寿命预测^[7]以及轻量化设计^[8]方面进行了深入研究。

为计算负泊松比结构的准确泊松比、弹性模量和屈服应力, HEDAYATI等^[9]提出了一种适用于内凹六边形晶胞结构的解析关系式, 并应用于实际中, 设计了一种负泊松比网状结构用于跟腱断裂的术后恢复。RUAN等^[10]基于手性负泊松比结构结合振荡单元设计了一种新型负泊松比结构支架, 同时具有了两种结构的特性, 性能有了较大提高。ABBASLOU等^[11]结合内折、手性和反手性结构设计了一种新型拉胀结构血管支架, 并通过数值模拟验证了该结构具有良好的弯曲柔顺和压缩回弹性能。魏云波等^[12]研究了支架支撑单元夹角与支撑性能的关系并通过有限元方法研究了支架结构对支撑强度、回弹率和弯曲刚度的影响规律。李红霞等^[13]提出了考虑尺寸效应的理论模型, 并研究了支架筋膜厚度和宽度以及支撑单元曲率对支架力学性能的影响规律。马向南等^[14]针对一种新型组合蜂窝结构将方形管与圆形管组合, 通过试验与数值模拟验证了结构的变形与吸能特性。刘倩等^[15]在对支架支撑能力测评的研究中发现, 在压缩初期支撑力受金属覆盖率的影响, 到达压缩一定量后, 支撑能力会受到直径、壁厚等因素的影响。

基于上述管状支架以及负泊松比结构的研究内容和研究方法, 本文以负泊松比结构为设计基础, 设计了4种负泊松比结构管状支架, 其中的内凹六边形和星形四边形这两种传统负泊松比胞体单元作为负泊松比结构的经典设计, 自20世纪90年代提出后, 被广泛应用于抗冲击、生物支架等领域。但受限于制造等方面的因素, 这两种结构尽管在单轴拉胀等力学方面表现优异, 但仍局限于传统内凹结构单一方向变形的限制且在节点处存在屈曲失稳导致的承载效率不足问题。通过结构嵌合技术, 将两种传统单元结构相结合, 进行了结构的拓扑优化, 意在优化设计多级内折的负泊松比结构来突破传统单一方向的限制, 从而提高结构的抗屈曲能力。

本文采用数值模拟与试验相结合的研究方式, 对比分析了4种结构在受压时表现出的结构支撑性, 探究了载荷位移曲线的变化趋势, 以峰值载荷、能量吸收、平均压缩力、压缩力效率为评价指标, 引入压缩刚度值来评估各支架的性能优劣, 探寻受到压缩载荷时性能最优的负泊松比管状支架结构。

1 负泊松比管状支架的设计制备及试验方法确立

1.1 负泊松比管状支架的结构设计

基于负泊松比结构的可调控变形特性, 本文采用复合拓扑构建方法, 通过多构型耦合与参数化重构以常见的负泊松比结构为基础设计了管状支架的单胞结构, 其中以内凹六边形和星形结构为基础单元, 使用结构嵌合复合构建的方法, 对几何棱角进行拆解, 加入星型结构进行模块化处理, 共得到4种负泊松比结构单元如图1所示, 各单元主体尺寸见表1。

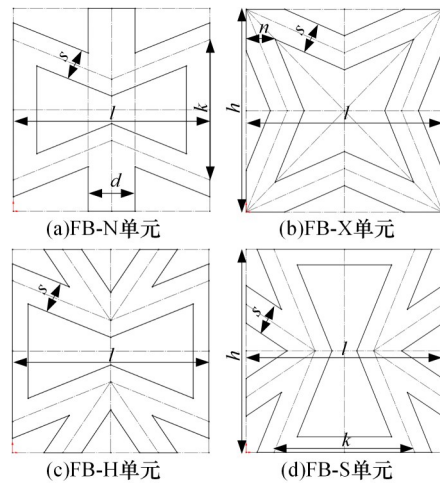


图1 负泊松比单元结构

Fig.1 Negative Poisson's ratio cell structure

表1 单元参数尺寸

Tab.1 Unit parameter size

	d	s	n	k	l	h
尺寸值/mm	1.5	1	1.23	4.5	2π	6.5

通过周期阵列对单胞进行三维扩展, 构建出具有空间连续性的 6×6 胞元网格。将网格结构包覆在直径 $D=6l/\pi=12\text{mm}$ 、长度 $L=6h+2=41\text{mm}$ 的圆柱实体表面, 通过向内蚀雕壁厚 $t=1\text{mm}$ 从而实现了从二维平面单元网格到三维管状支架的转变。4种负泊松比结构三维实体图见图2。

1.2 负泊松比管状支架试样的制备

使用数字光处理(digital light process, DLP)技术进行试验件实体的制备, 所选材料为一种高强韧性的生物基光敏树脂。为保证试验结果的准确性, 通过改变各胞体单元宽度 d 以及连接筋宽度 s 来保证管状支架结构的相对密度具有一致性, 均为58%。设备工艺参数选择分层厚度为0.02 mm, 底部层数为4, 抗锯齿等级为8, 曝光时间为6 s, 以提高机械强度同时避免堵塞孔隙。将打印完成后

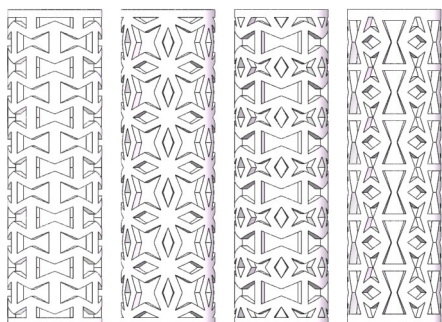


图2 负泊松比管状支架结构

Fig.2 Negative Poisson ratio tubular scaffold structure 的结构使用体积分数为95%的酒精清洗来去除未固化的树脂,同时将结构置于紫外线下进行二次固化以进一步提高力学性能。管状结构成形效果如图3所示。

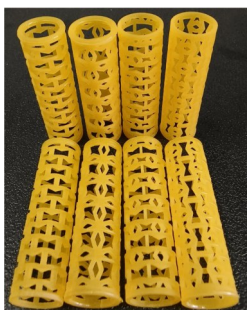
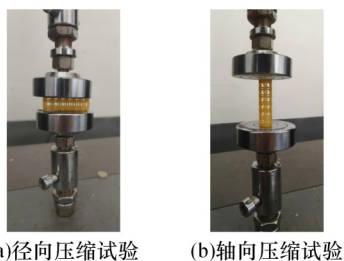


图3 管状支架结构实体模型

Fig.3 Solid model of tubular scaffold structure

1.3 试验方法的选择

本文采用平面压缩法探究支架的抗压支撑性,试验原理如图4所示。选择CTM-2500万能材料试验机(最大载荷1000 N,载荷精度 $\pm 0.01\%$,精度等级为0.5级)进行压缩。通过施加位移来进行准静态压缩,恒定加载速度设定为2 mm/min,压缩至支架连接筋产生断裂,试验结束。



(a)径向压缩试验 (b)轴向压缩试验

图4 试验原理图

Fig.4 Experimental schematic diagram

1.4 负泊松比管状支架结构抗压性能评价指标

为了更好地评判支架的抗压支撑性,引入以下评价指标:

1)峰值载荷 F_{\max} 指结构在破坏前能承受的最大载荷,数值越高说明抗压能力越强。

2)能量吸收量 U 表示压缩过程中管状结构

从开始受压到压缩位移达到某一点时所吸收的能量,计算公式为

$$U = \int_0^{\delta} F d\delta \quad (1)$$

式中: F 为瞬时压缩力; δ 为瞬时压缩位移。

3)平均压缩力 F_a 表示压缩过程中的压缩力平均值^[14],平均压缩力高表示结构能更好地承受持续负载,计算公式为

$$F_a = \frac{U}{\delta} \quad (2)$$

4)压缩力效率 λ 反映能量转换的效率,效率高说明结构在承受载荷时能更有效地分散载荷,减少能量损耗,结构更稳定,用以评价结构的受载均匀性,公式为

$$\lambda = \frac{F_a}{F_{\max}} \quad (3)$$

5)压缩刚度 K 指管状支架发生弹性变形时单位变形所需的载荷,反映其抵抗压缩变形的能力,表达式为

$$K = \frac{F}{\delta} \quad (4)$$

2 负泊松比管状支架结构的抗压性能数值模拟

2.1 负泊松比管状支架结构的有限元模型建立

为了研究负泊松比结构管状支架的抗压支撑性能,使用有限元仿真软件Abaqus/Explicit对上述结构进行数值模拟。首先使用三维建模软件建立负泊松比管状结构支架的三维模型,将其导入仿真软件。材料选择为生物基光敏树脂,按照GB/T 1040.2—2022标准,使用3D打印机制备哑铃型试样,对该试样使用万能材料试验机进行拉伸试验,3次试验得到该材料的应力应变图见图5。由此得出,所选材料弹性模量为78 MPa,拉伸强度为55 MPa,断裂伸长率10%,泊松比0.4。

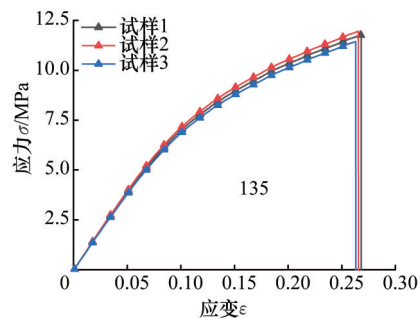


图5 材料试样应力应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of material specimen

进行数值模拟时,将管状支架结构置于上下两圆板之间,圆板设置为刚体,对有限元结构进行网格划分,设置近似全局尺寸0.5,曲率控制最大

偏移因子为 0.1,最小尺寸为全局尺寸比例的 0.1 倍,为保证精度,网格选择 C3D10M 单元。对下圆板设置固定约束,支架边界条件设置为与上下刚体圆板存在摩擦接触,上圆板施加位移载荷对支架进行压缩,设置准静态压缩速率 0.04 m/s。有限元模型网格划分如图 6 所示。

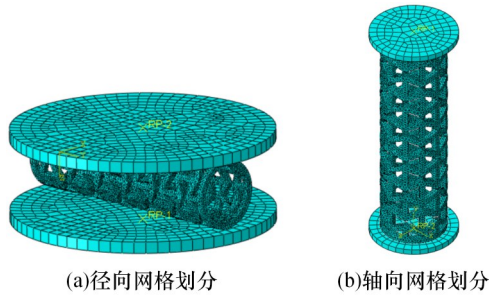


图 6 有限元仿真网格划分示意图

Fig.6 Finite element simulation grid division diagram

2.2 负泊松比管状支架结构径向压缩仿真模拟

按照上述步骤将有限元前处理设置完成后,使用 Explicit 动力显式求解器对负泊松比管状支

架的径向压缩过程进行求解运算。在进行数值模拟时设定总压缩位移量为 8 mm,通过数值模拟仿真可以得出负泊松比结构管状支架在径向压缩时的载荷位移曲线,如图 7 所示。图 8 显示了 4 种负泊松比结构管状支架在压缩位移达到总压缩位移各百分比时的应力变化。

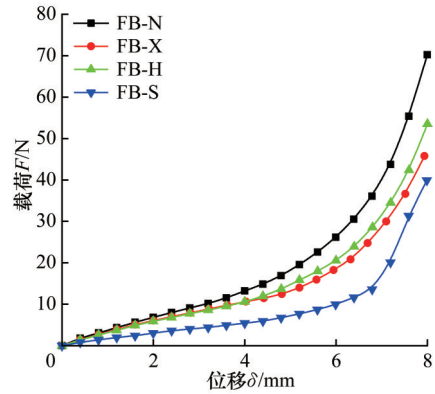


图 7 径向压缩数值模拟载荷-位移曲线

Fig.7 Numerical simulation of load-displacement curve in radial compression

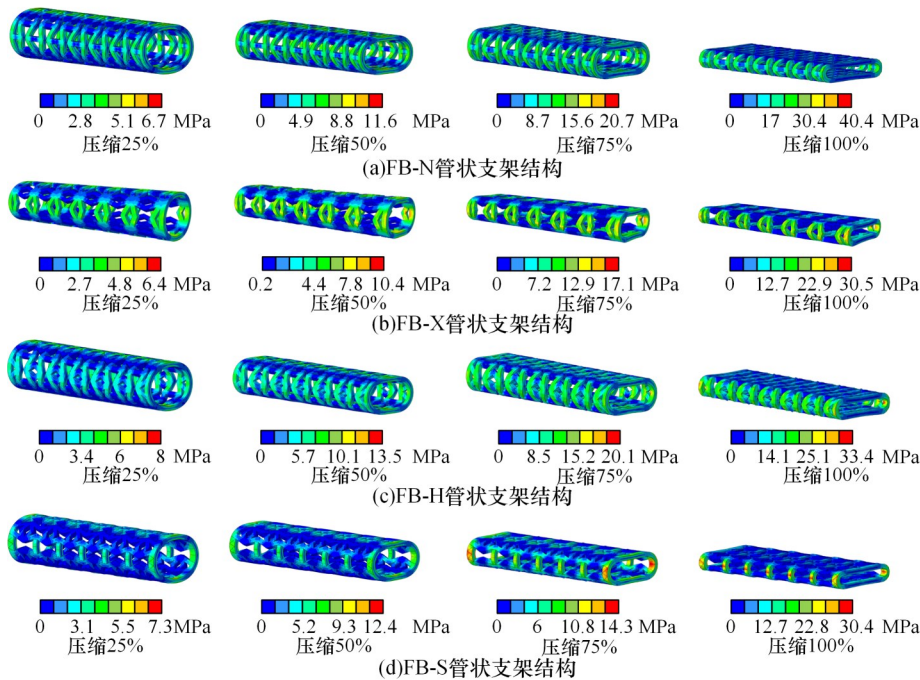


图 8 4 种结构在不同径向压缩位移下的应力分布

Fig.8 Stress distribution of 4 structures under different radial compression displacements

载荷-位移曲线显示了 4 种结构在相同压缩路径下的力学响应与承载能力。根据曲线可以看出,4 种结构在压缩相同位移时的载荷位移曲线趋势相同。在压缩 0~4 mm 时,载荷随压缩量增加而缓慢增加,呈近似线性增长,此时支架整体处于弹性变形状态;结合压缩 25% 和压缩 50% 的应力云图可以看出,此时应力集中于管状支架与刚体的接触部位和左右两侧,应力分布均匀,尚未发生塑性屈服,且变形以弹性弯曲为主,未出现明

显的局部屈曲现象。在压缩位移增至 4~6 mm 时,非线性变形特征显现,载荷增加趋势加快;结合压缩 75% 的应力云图可以看出,此时管状支架与压缩刚体的接触面积因局部塌陷而逐渐减小,应力由接触面向两侧扩展,部分高应力区域开始出现材料屈服,但整体结构仍保持连续性。在压缩 6~8 mm 时,塑性变形加剧,应力高度集中于支架左右两侧节点区域,形成明显的应力集中带,此时支架因局部失效和单元断裂进入失效阶段,

载荷曲线斜率陡增并达到峰值,管状支架的应力集中分布于左右两侧,载荷急剧增加,同时伴随有微观裂纹的萌生与扩展,导致结构承载能力逐渐下降。

对比4种负泊松比结构管状支架在径向受压后的应力云图可以看出,在压缩初始阶段,4种胞体单元均未发生较大变形,但也存在细微的差异。其中由于FB-N与FB-H结构的内六边形单元排布方式垂直于加载截面,连接筋处在径向受压时成横向连接,内凹六边形的结构优越性使得在受压时应力形成X形应力分布带,应力分散至更多区域,左右顶点处应力分布优于另两种结构,从而降低了局部应力峰值,但由于其密集的周期性分布使得整体应力更大;FB-X与FB-S结构在变形处的面积分布较小,因此会使得应力集中但是结构的变形使得结构载荷消散导致应力较小,随着施加载荷位移的增加,这种效果发生得更加明显,最终使得前两种结构的载荷大于后二者,应力分布优于后二者。

结构FB-X和FB-S在受压时载荷通过中心节点传递,连接筋处在径向受压时成纵向连接,单元间缺乏协同变形能力,使得应力集中于节点处,且结构在受压时容易发生变形使得载荷消散导致应力较小。FB-N和FB-H结构在受压初始阶段通过星形单元弹性变形吸收能量,随着压缩位移增加内凹六边形结构参与承担载荷,整体形成层级结构提高了刚度,因此承受的应力要略高于FB-X和FB-S结构。

2.3 负泊松比管状支架结构轴向压缩仿真模拟

通过数值模拟对4种负泊松比结构管状支架进行轴向压缩,设置总压缩位移量为4mm,得到管状支架的载荷-位移曲线如图9所示,图10为压缩4mm过程中达到不同百分比压缩位移对应的应力变化云图。

对比分析FB-X、FB-S、FB-N和FB-H 4种负

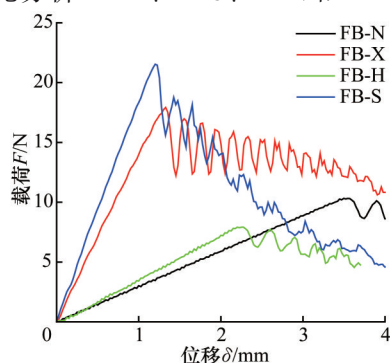


图9 轴向压缩数值模拟载荷-位移曲线

Fig.9 Load-displacement curve for numerical simulation of axial compression

泊松比管状结构的轴向压缩力学行为可知,自接触发生前后的应力分布与变形响应呈现显著差异。在结构自接触前,由于负泊松比结构的特点,在轴向受载后会出现径向收缩变形,应力均匀分布,发生自接触后结构单元相互挤压接触,使应力集中于接触部位。通过轴向压缩应力云图可以清晰观察到负泊松比结构管状支架在受压过程中的力学响应特征。

加载初始阶段,即图中压缩25%到50%,由于负泊松比结构特有的横向收缩效应,支架在承受轴向压力时呈现出与传统结构相反的变形模式,其径向尺寸随着轴向应变的增加而逐渐减小,此时外部载荷均匀分散,应力分布均匀,最大应力集中在单元节点附近,但未超过结构极限发生巨大变形。当轴向压缩位移继续增加,图中压缩至75%时,结构开始出现明显的自接触现象。相邻的负泊松比结构单元由于径向的收缩从而产生几何干涉,原本分布均匀的应力也开始逐渐出现应力集中。随着压缩应变持续增加,结构会进入非线性变形阶段,图中压缩100%,此时多级单元结构都会发生屈曲变形,结构完整性遭到破坏,标志着结构进入失效状态。在压缩未发生失稳阶段,4种结构都展现出负泊松比特性,直径都会发生收缩,其中FB-N和FB-H结构由于内凹六边形内折边垂直于载荷施加的方向会使得内折更加明显,从而在压缩变形时出现更大的压缩位移而不产生结构自接触导致失稳变形。FB-X和FB-S结构中的星形结构存在支撑,使轴向的压缩位移明显变小直至发生失稳,因而轴向位移量会小于前两种结构。通过观察4种结构的轴向压缩载荷-位移曲线得出,在结构失稳破坏前的斜率变化较小,因此可以将其变化看作线弹性变形。

3 负泊松比管状支架结构的抗压性能试验及分析

3.1 负泊松比管状支架结构径向压缩试验

本节通过径向压缩试验探究了负泊松比结构管状支架的力学响应特性与失效机制,通过试验获取了负泊松比结构管状支架在承受径向载荷时的受力情况及变形方式。使用1.2节制备的试验试样,采用准静态加载模式对4种结构支架进行径向压缩试验,以载荷骤降点为结构失效判据,当样件的载荷位移曲线出现峰值之后持续下降时,判定试验样件失去承载能力,试验结束。

负泊松比管状支架结构径向试验压缩过程如

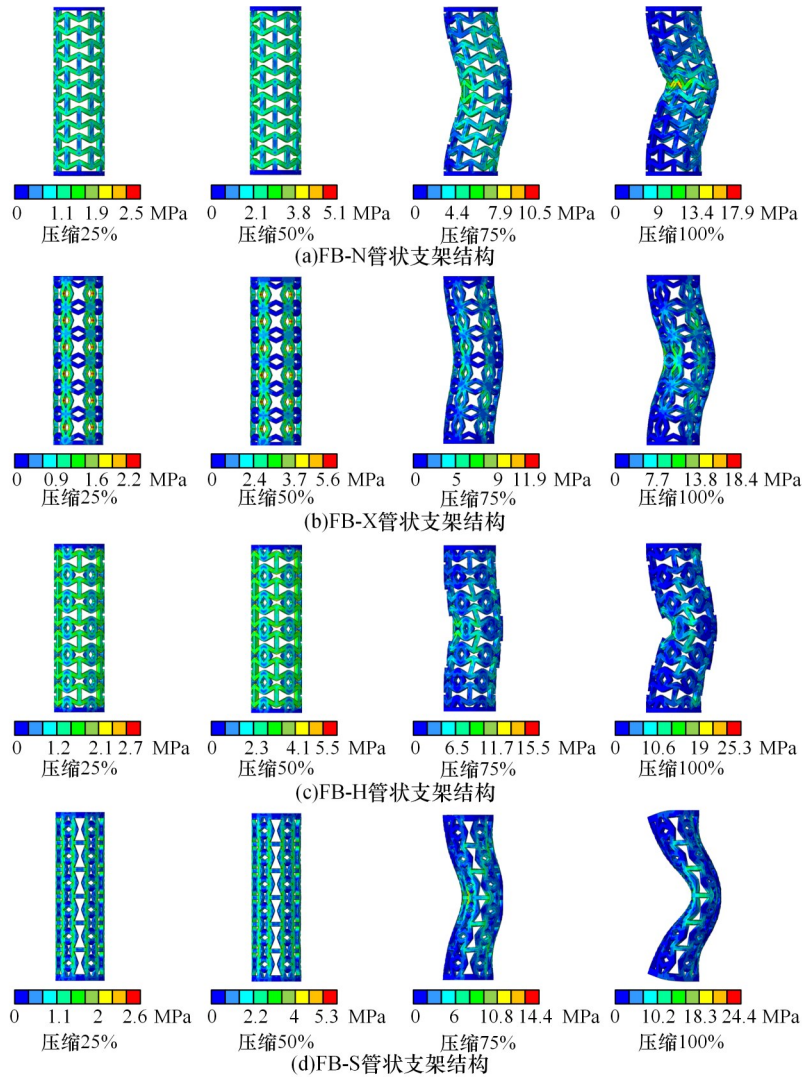


图 10 4种结构在不同轴向压缩位移下应力分布

Fig.10 Stress distribution of 4 structures under different axial compression displacements

图 11 所示。为减小误差,进行 3 次压缩试验取其平均值,通过压缩试验得出 4 种管状支架的径向载荷-位移曲线见图 12,图中的 H 点为试样破坏点。将试验结果所得的载荷位移曲线与 2.2 节仿真数据图 7 进行对比分析,可以看出试验结果与仿真结果具有一致性,4 种结构的管状支架承受径向载荷后,均经历线性弹性变形、非线性塑性变形及失稳破坏三个阶段。试验与仿真结果共同表明,FB-H 结构表现出最优异的径向承载性能,其极限载荷要显著高于其他结构。在变形能力方面,FB-S 结构的极限位移最大,具有最好的径向变形适应性。

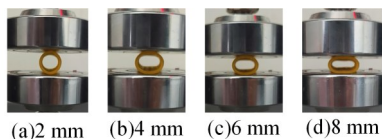


图 11 径向压缩试验过程

Fig.11 Radial compression test process

根据载荷位移曲线与 1.4 节中的指标计算公式得出支架的各评价指标如表 2 所示。在径向受载时,负泊松比结构管状支架存在弹性与塑性两种变形模式,此时压缩刚度在计算时仅考虑支架变形处于弹性阶段的载荷与位移,弹性变形点在图 12 中显示为 T 点之前。

表 2 径向受载下 4 种结构管状支架参数

Tab.2 Parameters of 4 kinds of tubular support structures under radial load

	FB-N	FB-X	FB-H	FB-S
峰值载荷 F_{max}/N	40.5	38.3	43.8	26.7
平均压缩力 F_a/N	15.8	15.4	16.1	8.5
压缩力效率 λ	39%	40.2%	36.8%	31.8%
能量吸收量 U/J	0.138	0.139	0.134	0.077
压缩刚度 $K/(N \cdot mm^{-1})$	5.0	3.4	4.6	1.7

由表 2 的评价指标数值可以明确得到,FB-H 结构拥有最大抗压强度,并且具有最大的载荷承受能力;FB-N 和 FB-H 结构的破坏点载荷与平均

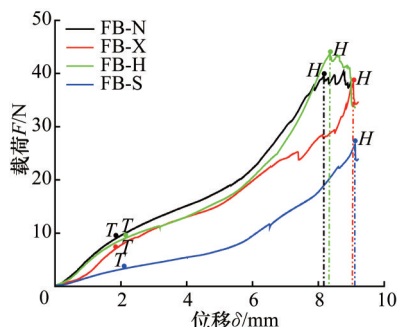


图 12 径向压缩载荷-位移曲线

Fig.12 Radial compression load-displacement curve
 压缩力均显著高于其他结构;FB-S结构抗压强度最低,在压缩位移相同时,FB-H结构的抗压强度比FB-S结构提高了123%;而FB-N和FB-H结构在持续受压时表现良好,表现出更好的延展性和吸能特性。结合试验结果与2.2节仿真过程图可知,各结构径向受压支撑性能差异是结构单元不同导致的。FB-H和FB-N结构的横向连接筋通过应力传递实现更均匀的载荷分布,而FB-X和FB-S结构的纵向连接会导致应力集中从而使承载效率降低。试验结果与仿真相互验证了单元构型对结构刚度、强度及吸能特性的影响作用。

3.2 负泊松比管状支架结构轴向压缩试验

通过轴向压缩试验与仿真对负泊松比管状支架的力学性能与变形机制进行对比分析。图13所示为轴向压缩试验过程,该过程与2.3节中的仿真结果相吻合,试验过程的载荷-位移曲线见图14,图中H点为支架结构失效点。

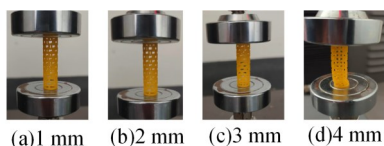


图 13 轴向压缩试验过程

Fig.13 Axial compression test process

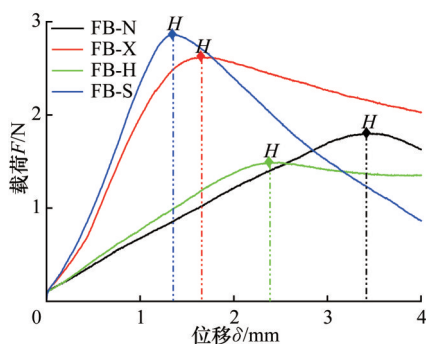


图 14 轴向压缩载荷-位移曲线

Fig.14 Axial compression load-displacement curve

通过观察轴向压缩的载荷-位移曲线,4种结构在失效前均可看作线弹性变形,因此压缩刚度

可用失效点处的极限载荷与压缩位移进行计算。各评价指标如表3所示。

表 3 轴向受载下4种结构管状支架参数

Tab. 3 Parameters of 4 kinds of tubular support structures under axial load

	FB-N	FB-X	FB-H	FB-S
峰值载荷 F_{max}/N	1.79	2.62	1.49	2.86
平均压缩力 F_a/N	1.07	1.05	0.86	1.49
压缩力效率 λ	59.8%	40.1%	57.7%	52.1%
能量吸收量 U/mJ	3.82	2.77	2.03	2.01
压缩刚度 $K/(N \cdot mm^{-1})$	0.51	1.49	0.63	2.12

对比分析试验所得载荷-位移曲线与仿真结果可以看出,在轴向受载时载荷位移曲线趋势也都相吻合,FB-N和FB-H结构的极限结构失效点对应的位移明显大于FB-X和FB-S结构,表现出优异的延展性和变形适应能力,能够在结构单元发生破坏前承受更大的轴向位移。其中FB-N结构的位移比FB-S结构高出165%,比FB-X结构高出105%。同时,FB-X和FB-S结构拥有更高的瞬时抗压强度。

由表3参数分析可知,高K值结构的失效极限载荷较大,同时结构失效的压缩位移较小,结构刚度大,柔顺性较弱;低K值结构的压缩位移大,结构失效时的极限载荷较小,结构柔顺性较好,刚度差。试验与仿真结果一致表明,轴向压缩性能的优劣取决于结构本身的刚度与延展性的相互关系。

3.3 负泊松比管状支架结构的压缩刚度分析

通过上述仿真与试验的分析验证,结合各结构管状支架压缩时的压缩刚度值可知,在弹性变形阶段压缩刚度K值直接反映了结构在压缩时抵抗变形的能力,同时与结构的抗压强度与能量吸收存在一定的相互关系,高K值弹性阶段吸收能量较多,但塑性变形晚,总体吸能效率可能较低,例如径向受压下的FB-N和FB-X结构。低K值更易发生大变形,通过结构屈曲、折叠等对能量进行耗散,整体吸能效率高,例如轴向受压下的FB-H和FB-S结构。然而二者的关系并不是简单负相关,需要结合极限位移指标来对性能的统一性进行评判。

在设计负泊松比结构时,调节压缩刚度K值,可控制负泊松比结构的单元变形顺序,避免峰值应力集中,提高吸能均匀性;同时结合K值的敏感区域,设计负泊松比结构时使高刚度区维持整体性,低刚度区主导能量耗散,从而实现负泊松比结构的性能优化。

4 结论

1)通过结构衍生与优化设计了多种负泊松比管状支架结构。在径向受载时,管状支架结构都表现出良好的力学特性,其径向压缩都分为弹性变形、塑性变形、整体失效三阶段,为负泊松比结构支架的设计提供了参考。

2)径向受载情况下,FB-N和FB-H结构的负泊松比管状支架结构综合性能较优。其中FB-H在持续受压工况下最稳定,瞬时抗压强度与其他相比分别提高了42%和123%,刚性强,平均压缩力更为稳定,因此适用于径向支撑要求稳定的场景。

3)在轴向受载时,FB-N结构的可压缩位移相较于FB-S结构高出165%,相较于FB-X结构高出105%。FB-S结构的瞬时抗压强度最高,相较于FB-H结构提高了92%,相较于FB-N结构提高了60%,FB-X和FB-S结构更适用于较大载荷工况。

4)构建了支架抗压性能的评价体系,引入了压缩刚度 K 值,用以评价管状支架在压缩载荷下抵抗弹性变形的能力: K 值高,支架刚性高,适用于要求支撑稳定场景; K 值低,支架柔性更好,适用于较大变形场景。

参考文献:

- [1] ZHAO Guoqi, FAN Yichang, TANG Can, et al. Preparation and Compressive Properties of Cementitious Composites Reinforced by 3D Printed Cellular Structures with a Negative Poisson's Ratio[J]. *Developments in the Built Environment*, 2024, 17: 100362.
- [2] LI Qinyu, AINSWORTH O, ALLEGRI G, et al. Assessing the Mechanical and Static Aeroelastic Performance of Cellular Kirigami Wingbox Designs[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 143: 108716.
- [3] WANNIARACHCHI C T, ARJUNAN A, BAROUTAJI A, et al. 3D Printed CoCrMo Personalised Load-bearing Metascaffold for Critical Size Tibial Reconstruction[J]. *Annals of 3D Printed Medicine*, 2024, 15: 100163.
- [4] KHALAJ R, TABRIZ A G, OKEREKE M I, et al. 3D Printing Advances in the Development of Stents[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2021, 609: 121153.
- [5] JIANG Huan, ZIEGLER H, ZHANG Zhennan, et al. Bending Behavior of 3D Printed Mechanically Robust Tubular Lattice Metamaterials [J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 50: 102565.
- [6] ZHANG Chong, XIAO Sihang, QIN Qinghua, et al. Tunable Compressive Properties of a Novel Auxetic Tubular Material with Low Stress Level[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 164: 107882.
- [7] BONFANTI A, SYNGELLAKIS S, BHASKAR A. Structural Analysis of Cyclically Periodic Rings and Its Application to the Mechanics of Balloon Expandable Stents [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020,

- 185/186: 46-56.
- [8] HAN Dong, ZHANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Light-weight Auxetic Tubular Metamaterials: Design and Mechanical Characteristics[J]. *Composite Structures*, 2023, 311: 116849.
- [9] HEDAYATI R, YOUSEFI A, DEZAKI M L, et al. Analytical Relationships for 2D Re-entrant Auxetic Metamaterials: an Application to 3D Printing Flexible Implants [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, 143: 105938.
- [10] RUAN Xiaoli, YUAN Weixing, HU Yiqun, et al. Chiral Constrained Stent: Effect of Structural Design on the Mechanical and Intravascular Stent Deployment Performances [J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 148: 103509.
- [11] ABBASLOU M, HASHEMI R, ETEMADI E. Novel Hybrid 3D-printed Auxetic Vascular Stent Based on Re-entrant and Meta-trichiral Unit Cells; Finite Element Simulation with Experimental Verifications[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 105742.
- [12] 魏云波, 赵丹阳, 王敏杰, 等. 高径向支撑性可生物降解聚合物血管支架结构设计与其力学性能分析[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(9): 1098-1107.
- [13] WEI Yunbo, ZHAO Danyang, WANG Minjie, et al. Design and Mechanics Analysis of Biodegradable Polymer Vascular Stents with High Radial Supporting Property[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(9): 1098-1107.
- [13] 李红霞, 谭忠, 王锡昉, 等. 考虑尺寸效应的聚合物血管支架力学性能[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(5): 946-952.
- [14] LI Hongxia, TAN Zhong, WANG Xiyang, et al. Mechanical Properties of Polymeric Vascular Stents Considering Size Effect[J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2023, 38(5): 946-952.
- [14] 马向南, 黄庚强, 孙逸飞, 等. 组合蜂窝结构的面内压缩及吸能性能[J]. *武汉理工大学学报*, 2023, 45(12): 1-7.
- [15] MA Xiangnan, HUANG Gengqiang, SUN Yifei, et al. In-plane Compression and Energy Absorption Performance of the Combined Honeycomb Structures[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2023, 45(12): 1-7.
- [15] 刘倩, 雷丽萍, 曾攀, 等. 血管支架径向支撑能力的数值模拟和实验研究[J]. *中国医疗器械杂志*, 2010, 34(3): 175-179.
- LIU Qian, LEI Liping, ZENG Pan, et al. Numerical and Experimental Study of Radial Support Capacity of Intravascular Stent [J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2010, 34(3): 175-179.

(编辑 王旻玥)

作者简介: 苏义麟,男,2001年生,硕士研究生。研究方向为CAD/CAM、管状支架结构等。E-mail: 17658130826@163.com。纪小刚*(通信作者),男,1977年生,教授。研究方向为逆向工程、计算机辅助设计技术、柔弹性材料增材制造。发表论文50余篇。E-mail: bhearts@jiangnan.edu.cn。

本文引用格式:

苏义麟,纪小刚,辛嘉铭,等. 负泊松比管状支架结构的压缩刚度特性分析[J]. *中国机械工程*, 2026, 37(3): 538-545.

SU Yilin, JI Xiaogang, XIN Jiaming, et al. Analysis of Compressive Stiffness Characteristics of Tubular Support Structures with Negative Poisson's Ratio[J]. *China Mechanical Engineering*, 2026, 37(3): 538-545.