

仿生高强韧轻质管结构的抗弯性能研究

辛嘉铭¹ 纪小刚^{1,2*} 孙榕¹ 苏义麟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:基于玻璃海绵中八角形结构和竹节中维管束特征,利用数字光处理技术(digital light processing, DLP)工艺设计并制备了两类仿生轻质高强韧平面结构及对应的管状支架结构;采用仿真与实验相结合的方法,聚焦分析仿生平面结构在受压过程中的极限载荷、破坏模式和吸能情况;基于三点弯曲力学性能试验结果并结合数值模拟选取抗弯性能最优的仿生平面结构,并对各平面结构对应的仿生轻质管进行抗弯性能研究。结果表明,与传统蜂窝管相比,所设计的仿玻璃海绵轻质管抗弯性能更强,验证了平面结构对比结果的可靠性。研究结果可为新型轻质高强韧支架的设计和制备提供指导与参考。

关键词:玻璃海绵;仿生轻质结构;三点弯曲;轻量系数;数字光处理工艺

中图分类号: TB34; TP391.73

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Bending Performance of Bionic High-strength and Lightweight Pipe Structures

XIN Jiaming¹ JI Xiaogang^{1,2*} SUN Rong¹ SU Yilin¹

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

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

Abstract: Based on the characteristics of octagonal structure in glass sponge and vascular bundle in bamboo segment, two kinds of bionic lightweight, high-strength and tough planar structures and corresponding tubular scaffolds were designed and prepared by DLP process. By combining simulation and experiments, the ultimate load, failure mode and energy absorption of bionic plane structures during compression were analyzed. Based on the experimental results of three-point bending mechanics properties and numerical simulation, the bionic plane structures with the best bending performance were selected, and the bionic light pipes corresponding to each plane structures were tested for bending performance. The results show that compared with the traditional honeycomb tube, the designed glass sponge light tube has stronger bending resistance, which verifies the reliability of the plane structure comparison results. The results may provide guidance and reference for the design and preparation of new lightweight high strength and toughness scaffolds.

Key words: glass sponge; bionic lightweight structure; three-point bending; light weight coefficient; digital light processing(DLP)

0 引言

在自然界中,各种生物结构有着不同的功能。经历了上亿年的进化和自然选择后,生物形成了各具特色的结构和性能。如玻璃海绵^[1-5]在进化过程中形成了高强高韧的轻质多孔结构,其优异的力学性能成为航空航天和生物医疗支架领域轻质、高强韧结构设计及优化的热点仿生对象。

玻璃海绵因独特的结构特性而具有多种优异

的力学性能。AIZENBERG等^[6]对玻璃海绵骨针结构进行研究后发现,其主骨架由横纵骨针交错而成,并通过 $\pm 45^\circ$ 螺旋骨针形成类棋盘结构。WEAVER等^[7]认为,玻璃海绵的骨针状结构并非简单的二维结构,而是由一根水平和三根呈 20° 夹角的骨针形成具有较小应力和较强韧性的结构。LI等^[8]利用弹性理论提出了一种受玻璃海绵结构启发的晶格结构,发现海绵启发晶格结构可以大大提高工程结构的力学性能,并且在增加材料冗余的情况下提高了强度。CHEN等^[9]研究了多孔玻璃海绵的断面结构,发现断裂

收稿日期:2024-04-03

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)

能量随层间传递而递减,材料韧性有所增加。SVEN 等^[10]仿照玻璃海绵、藻类植物等 7 种生物来设计圆管结构,与普通圆管比较力学性能并与有限元结果进行对比验证。CROCE 等^[11]揭示了海绵中硅沉积和骨针组织的详细机制。乔莉等^[12]研究了硅质海绵骨针的结构和力学性能,结果表明这种海绵骨针具有复杂的四级结构。LI 等^[13]通过模拟多孔玻璃海绵骨架的微观结构设计了三种不同的仿海绵结构,并将其作为夹芯层进行力学性能研究,得到抗压性和抗扭性较好的仿海绵夹芯结构。ZHAO 等^[14]仿照玻璃海绵独特的网状结构设计并制备了两种仿生支架,通过实验和有限元分析对其力学性能进行了深入研究。目前,许多关于玻璃海绵的研究都集中于其光纤的材料特性以及生长形态,而在其结构特性和力学性能方面的研究较少,且仿海绵结构仍存在改进空间。

本文借鉴上述仿生轻质管的研究方法,从玻璃海绵单元网格和竹节横截面微观结构角度出发,分别设计了两类仿生平面结构,采用数值模拟与三点弯曲实验相融合的研究方法,通过与传统蜂窝结构进行对比,聚焦分析仿生平面结构的弯曲性能并优选一种高强韧结构,讨论不同结构的极限载荷、破坏模式和能量吸收。进一步对该平面结构下的仿生轻质管进行抗弯性能研究,并与蜂窝结构进行弯曲性能对比,以评价所设计的仿生结构的抗弯能力,从而找到轻质高强韧的仿生结构。

1 单元构型的优化仿生设计

1.1 玻璃海绵结构及力学性能

玻璃海绵也被称为硅质维纳斯花篮,是一种生活在海底的古老生物。它的几何构型相当独特,像一个高脚杯或花瓶,其骨架由放射状的骨针组成。骨针晶莹剔透,交错排列,沿纵向、径向和螺旋形纤维方向有规律地排列。这种多孔结构具有很强的韧性、强度以及稳定性,因此可以稳固地与海底贴合,抵御洋流的侵袭并提供可靠的保障。

MORANKAR 等^[15]对干燥环境下玻璃海绵中心芯和分层区域的弹性模量和硬度进行测试,得到干燥环境下玻璃海绵中心芯平均弹性模量为 28.2 GPa,平均硬度为 3.4 GPa;分层区域平均弹性模量为 26.6 GPa,平均硬度为 2.9 GPa。硅质维纳斯花篮所表现出的轻质、高强度和良好柔韧性的基本特征为本文设计的仿生轻质管结构提供

了生物模板。基于此,本文仿生设计了图 1 所示的单元网格构型。

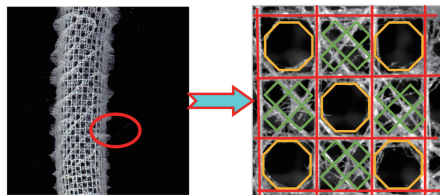


图 1 仿玻璃海绵单元网格构型

Fig.1 Imitated glass sponge cell grid configuration

1.2 竹节横切面结构及力学性能

天然生物材料因独特的结构和优异的力学性能而能够适应恶劣的生存环境。在竹子的宏观结构中,基本组织(作为基质)连接维管束,并由于维管束嵌入木质基质中而传递载荷。在微观结构水平上,竹子主要由纵向维管束和薄壁细胞组成。每个维管束由两个中空导管和韧皮部组成,所有导管和韧皮部都被纤维束包围。陈冠军等^[16]对福建 11 种具有经济价值和代表性的散生竹和丛生竹进行了力学性能测试,得到不同竹材的弦向弯曲模量和抗弯强度分别为 10.39~17.77 GPa 和 135.32~238.96 MPa。本文采用理想化的竹类维管束,仿生设计了图 2 所示的径管-管结构。

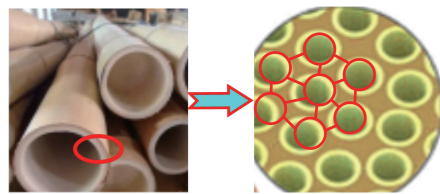


图 2 仿竹节横切面微观结构的径管-管结构

Fig.2 Diameter-tube structure mimicking the microstructure of bamboo section

1.3 单元网格构型的仿生设计

从上述对玻璃海绵及竹节横切面的微观结构出发,进行仿生平面结构的结构设计。玻璃海绵的放射状骨针结构是保证其结构韧性和轻质特性的重要因素,对骨针的八角形孔结构进行优化改进,每一个八角形孔被分成 5 个区域,将三角形、正方形、五边形、圆、椭圆孔分别填充在这 5 个区域内,代替原来的八角形孔构成新的单元。相邻两个子单元具有不同的组合构型并交替分布,通过图 1 中的玻璃海绵结构仿生设计了两种单元结构并通过阵列得到 P-I-1 和 P-I-2 结构,如图 3a、图 3b 所示,这样既保证了支架的强度,又达到了轻量化的目的;仿竹节圆管束结构仿照竹节横切面微观结构,其连接板的拐角位置由维管束连接,维管束呈三角形和正方形分布,维管束之间由连接板连接,连接板分别沿三角形边和 $\pm 45^\circ$ 方向排列,通过图 2 中的竹节横切面结构仿生设计了

两种单元结构并通过阵列得到 P-II-1 和 P-II-2 结构,如图 3c、图 3d 所示。

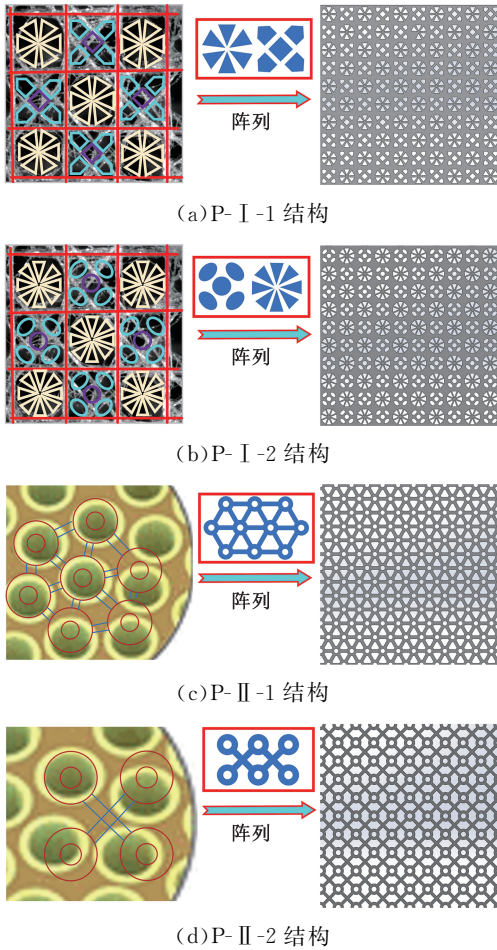


图 3 仿生单元网格构型

Fig.3 Biomimetic cell grid configuration

由于本文是对规则排列的复杂多孔仿生结构进行研究,且整体结构尺寸偏小,所以为了保证结构的整体性,本文采用 3D 打印技术进行试样的制备。仿生平面结构的孔隙尺寸较小,容易出现堵塞等问题,经过各类材料以及打印工艺的试验,最终本文选用一种高强韧的 PLA 光敏树脂材料,该光敏树脂是由生物基聚乳酸二元醇制得 PLA-PUA,通过对低聚物合成工艺、配方的探索和调整制成。成形技术采用数字光固化打印技术,将打印出的试样放入 95% 的工业酒精中清洗后,使用紫外线固化箱固化,成形效果如图 4 所示。

将上述设计的仿生单元网格进行阵列获得仿生平面结构,4 种仿生平面结构尺寸参数如图 5 所示。

本文以结构形态-仿生类型-类型编号的方式对各试样进行统一编号,见表 1。其中,P 表示平面结构,G 表示管结构;I 表示仿玻璃海绵结构,II 表示仿竹节横切面结构,FW 表示蜂窝结构。

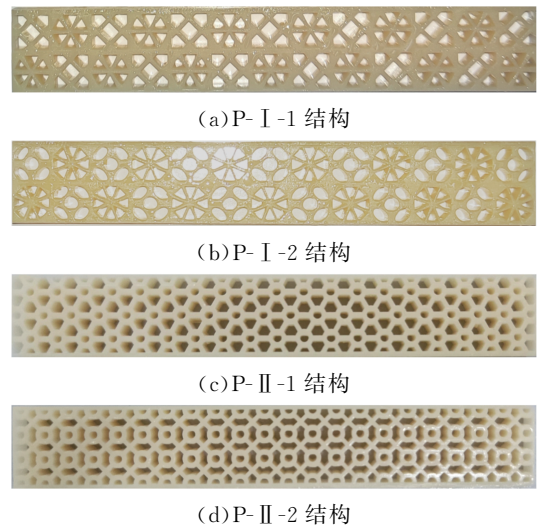


图 4 四种仿生平面结构成形效果

Fig.4 Four kinds of bionic plane structure forming effect

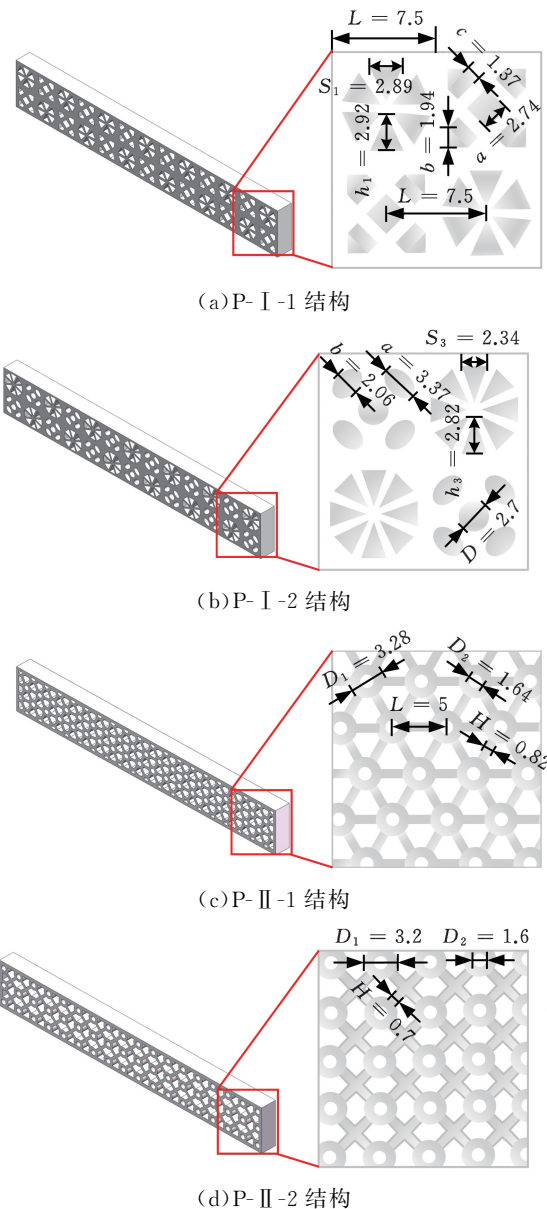


图 5 仿生平面结构的尺寸参数(mm)

Fig.5 Dimension parameters of bionic plane structure(mm)

表 1 实验试样编号

Tab.1 Fatigue test life of photosensitive resin splin

试样组态	结构形态	仿生样式
P-I-1	平面结构	玻璃海绵
P-I-2		玻璃海绵
P-II-1		竹节横切面
P-II-2		竹节横切面
G-I-1	管结构	玻璃海绵
G-I-2		玻璃海绵
G-II-1		竹节横切面
G-II-2		竹节横切面
G-FW		蜂窝

2 仿生平面结构的数值分析及性能研究

2.1 仿生平面结构应力分布影响分析

基于 1.3 节中的构型设计与尺寸参数, 分别建立图 5 所示的四种仿生平面结构, 并采用有限元仿真软件 ABAQUS/Explicit 进行数值模拟, 上下夹头设置为刚体, 并对上夹头选取参考点, 施加 10 mm 位移载荷, 同时固定下夹头, 以模拟三点弯曲实验过程, 如图 6 所示; 然后根据结构特征使用六面体单元进行仿生平面结构的网格划分, 进行求解计算。最后从后处理中导出仿真云图(图 7)与路径-应力曲线(图 8、图 9)。

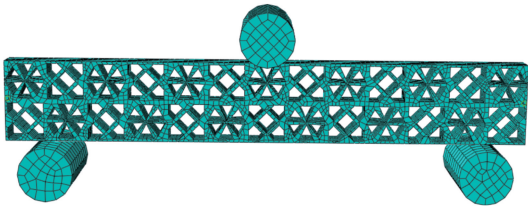


图 6 P-I-1 结构有限元模型

Fig.6 Simulated glass sponge structure I finite element model

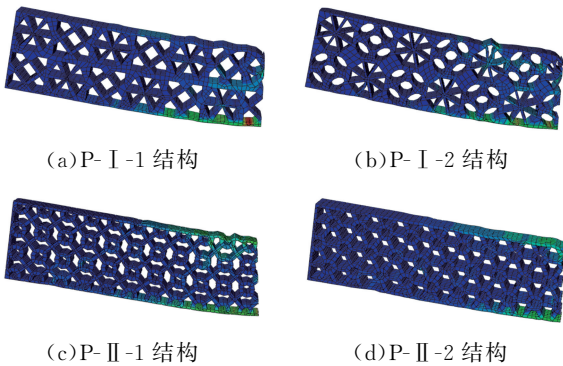
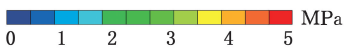


图 7 四种仿生平面结构的应力云图

Fig.7 Simulated glass sponge structure I finite element model

图 7 为有限元数值模拟获取的各仿生平面结构的应力分布云图, 由于结构与应力分布云图均呈对称分布, 故只截取一半云图展示效果。由图

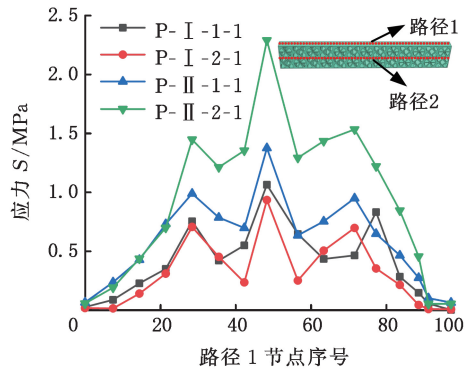


图 8 仿生平面结构路径 1 应力

Fig.8 Biomimetic plane structure path 1 stress

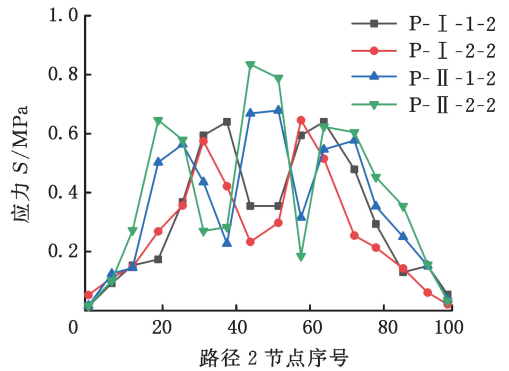


图 9 仿生平面结构路径 2 应力

Fig.9 Biomimetic plane structure path 2 stresses

7 加载 5 mm 位移情况下各仿生平面结构应力云图可以看出, 相比于中心区域, 试样上下边缘应力更大, 四种结构试样均在上下表面处产生应力集中, 且在上加载头下方产生最大应力。

为了更直观地比较四种仿生平面结构受弯后的应力响应, 同时结合结构中应力值较大的加载头下方区域以及应力值较小的中心区域, 分别选取上表面水平中心线(路径 1)、前表面水平中心线(路径 2)设置节点序号, 选取加载 3 mm 位移情况绘制路径-应力曲线, 如图 8、图 9 所示。

由路径 1 的对比可以看出, 与仿竹节横切面结构相比, 虽然仿玻璃海绵结构上表面加载头两侧区域有小范围的应力集中, 但其前表面中心区域应力更小, 其中 P-I-2 结构中心应力最小。分析表面应力分布特征可知, 在上表面中心线路径当中, 仿玻璃海绵结构呈较为明显的三峰状, 仿竹节横切面结构的三峰状并不明显而是接近单峰状; 中间的波峰均为加载头处的应力集中, 而其余两处应力集中则是仿玻璃海绵结构上表面的凸起褶皱导致; 其原因是仿玻璃海绵结构具有纵向支撑筋, 当试件上表面受到弯曲载荷被压缩时, 纵向支撑筋伴随上下表面的横向支撑筋发生形变, 上表面的横向支撑筋受弯曲载荷作用, 以加载头为圆心、自身为弧, 沿圆心到弧的射线方向发生形

变,使得纵向支撑筋之间的八面体单元上表面发生凸起,即结构上表面的褶皱。

相比于上表面边缘区域,结构中心区域应力更小,四种仿生平面结构的应力集中和整体应力均有明显减小;在路径 2 当中,仿玻璃海绵结构的应力明显比仿竹节横切面结构更小,其中 P-I-2 结构应力最小,P-II-2 结构应力最大。进一步观察路径 2 应力曲线可以看出,由于结构中点处仿玻璃海绵结构并未像路径 1 当中一样出现应力集中,故仿玻璃海绵结构的应力曲线呈双峰状,而仿竹节横切面结构应力曲线依然呈三峰状。这还是由于仿玻璃海绵结构具有纵向支撑筋,结合图 7 的等效应力云图不难发现,纵向支撑筋能够有效地连接横向支撑筋以及 $\pm 45^\circ$ 的仿海绵骨针支撑筋,使得各向支撑筋共同承载以减小应力集中,从而提高了仿玻璃海绵结构的抗弯性能,而仿竹节横切面结构缺少纵向支撑筋,故承载时在内部发生剪切变形而不出现褶皱,导致内部应力集中程度增加。

在结构尺寸相同的条件下,各结构的应力分布规律基本相似,各仿生平面结构在上下表面中心区域应力较大,在前表面中心区域应力较小。

将数值模拟出的结果与 2.2 节试验所得仿生平面结构的峰值破碎力进行比较(图 10),发现两种方式得到的结果差异吻合较好,证明通过数值模拟结构的峰值破碎力来类比分析仿生平面结构峰值破碎力具有一定的可靠性。

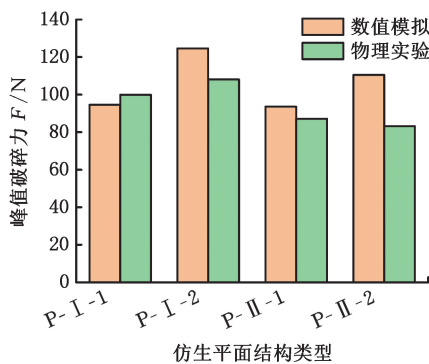


图 10 峰值破碎力对比

Fig.10 Comparison of peak crushing force

2.2 仿生平面结构的抗弯性能试验

本文采用 CTM2500 万能材料试验设备(最大荷重 10 kN,荷重精度 $\pm 0.01\%$,精度等级 0.5 级,位移分辨力 $0.03 \mu\text{m}$)进行三点弯曲试验。试验机通过施加位移来实现准静态加载,选择 2 mm/min 的恒定加载速度,当试件承载力突然减小且发出较大断裂噪声时判定为试件被破坏,结束试验。

根据 GB/T 9341—2008/ISO 178 : 2001 设

计仿生平面结构的三点弯曲试件尺寸。试件总长 $l=97.5 \text{ mm}$,宽度 $b=15 \text{ mm}$,厚度 $h=5.1 \text{ mm}$,支承跨距 $L=80 \text{ mm}$,同时,为了保证对比结果的科学性与准确性,将四种仿生平面结构的相对密度均控制为 52%来进行三点弯曲力学性能实验。绘制载荷-位移曲线如图 11 所示,图 12 中的弯曲变形过程与载荷-位移曲线相对应。

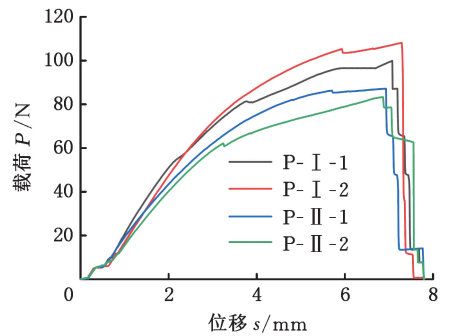


图 11 四种仿生平面结构载荷-位移曲线

Fig.11 Four kinds of load-displacement curves of bionic planar structures

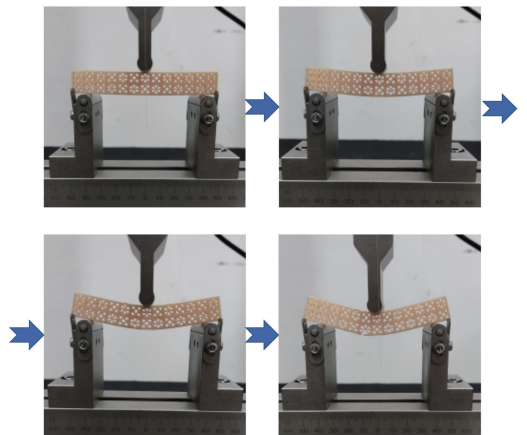


图 12 仿生平面结构的弯曲变形过程

Fig.12 The bending deformation process of bionic plane structure

由实验结果可以看出,两类仿生平面结构的曲线形状比较类似,因此,提取其典型的载荷-位移曲线,如图 13 所示。

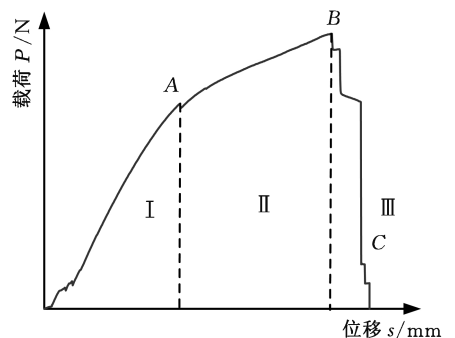


图 13 仿生平面结构三点弯曲典型载荷-位移曲线

Fig.13 Typical load-displacement curve of bionic plane structure at three point bending

根据载荷-位移曲线和试验过程中试件的破坏状态,仿生平面结构三点弯曲的破坏过程可以分为以下 3 个阶段:

1) 线性变形阶段 OA 。试验起始阶段载荷主要由上表面横向支撑筋承担,载荷-位移曲线大致成线性。随着位移的加载,载荷主要由上下表面共同承担,而变形主要是由结构整体弯曲变形引起的,在该状态下试样内部单元结构保持基本稳定,未出现明显的剪切变形情况。

2) 单元结构损伤阶段 AB 。随着位移的不断加载,载荷增长开始变缓,并逐步达到极限载荷,结构单元内部出现剪切变形,导致承载能力增速下降。此时两类仿生结构的破坏模式出现差异,仿玻璃海绵结构中,其加载头下方正对的八面体单元开始剪切撕裂,同时其上表面中心的两侧位置出现凸起褶皱;而仿竹节横切面结构中,加载头下方的相邻单元出现坍塌变形,与上下加载头接触的表面处产生凹陷。

3) 下表面损伤开裂阶段 BC 。当载荷达到结构的极限承载点 B 后,下表面横向支撑筋中点处开始出现微裂缝,导致其承载能力快速下降。随着位移的不断增加,微裂缝逐步扩展形成裂缝而后被完全破坏,发生断裂。在微裂缝扩展的过程中,载荷会由快速减小变为缓慢减小甚至微小攀升,这是由于仿生平面结构在内部的各向支撑筋以及单元内部结构在不断发生断裂,直到试样完全断裂失去承载能力,载荷降为零。

对比四种不同仿生平面结构的破坏模式并基于图 11 的载荷-位移曲线数据发现,在试件尺寸基本一致的情况下,峰值破碎力差距比较明显,承载变形能力相近。P-I-1 结构的峰值破碎力较 P-II-1 结构峰值破碎力高 14.7%,P-I-2 结构的峰值破碎力较 P-II-2 结构峰值破碎力高 29.9%,这表明在结构尺寸一定的条件下,仿玻璃海绵结构承载能力更高,且承载变形能力与仿竹节横切面结构相当。

2.3 仿生平面结构的结构优选

为了比较四种仿生平面结构的综合效果,从抗弯性能角度出发,分别求解出四种仿生平面结构的能量吸收 U 、峰值破碎力 F_{\max} 、平均破碎力 F_{mean} :

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

式中: δ 为位移; F 为载荷。

$$F_{\text{mean}} = U/\delta \quad (2)$$

韧性是结构材料在断裂前吸收能量和进行塑

性变形的能力^[16],包括断裂韧性和冲击韧性。生物医疗支架在服役过程中,长期经受复杂载荷作用,极易发生断裂失效,因此,研究具有良好抗断裂韧性的仿生轻质管结构对生物医疗支架的发展极具意义。断裂韧性的评价指标分为 J 积分和能量吸收 U 等。

三点弯曲试验是检验各类材料弯曲力学性能的实验方法,其原理为:将试样放到上下夹头之间,呈横梁状态,上夹头在跨度中心以恒定速度向下加载,直到试样断裂或达到规定的形变量,测出该过程中上夹头施加的力。最终获得载荷-位移曲线,通过载荷位移曲线可以得到 F_{\max} 、 U 来表征仿生平面结构的断裂韧性,并计算得出 F_{mean} ,即整个弯曲过程中试样承受的平均载荷。

需要指出的是,通常来讲我们希望获得一种具有较高强度同时质量也较轻的仿生结构,因此仿生平面结构不仅需要具有较好的抗弯性能,而且需要具有轻质的特性,如果质量过大则会限制其应用范围。传统上采用比强度来表征结构的轻量化性能,而本文参照德国工业设计中的指标,引入轻量系数来表征结构的轻量化性能,求解四种仿生平面结构的轻量系数 N_{LW} 。比强度 p 是指结构的断裂强度 σ_b 与表观密度之比,其中表观密度的定义是结构的质量除以表观体积 V ,即

$$p = \frac{\sigma_b}{\rho} = \frac{\sigma_b V}{m} \quad (3)$$

轻量系数的定义是结构所承受的最大载荷 Q_{\max} 除以质量 m ,由此可见轻量系数 N_{LW} 与比强度之间存在关系,即

$$N_{LW} = Sp/V \quad (4)$$

四种平面结构的计算结果见表 2。由于本文所施加的载荷为三点弯曲试验下的载荷,故将轻量系数 N_{LW} 进一步定义为 N_{LW-B} (bending),表示结构在承受三点弯曲载荷下的轻量系数。

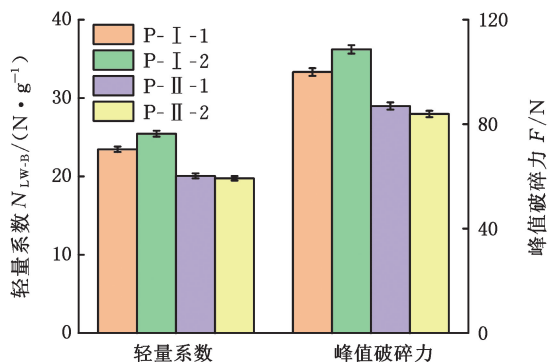
表 2 四种仿生平面结构相关计算结果

Tab.2 Correlation results of four bionic planar structures

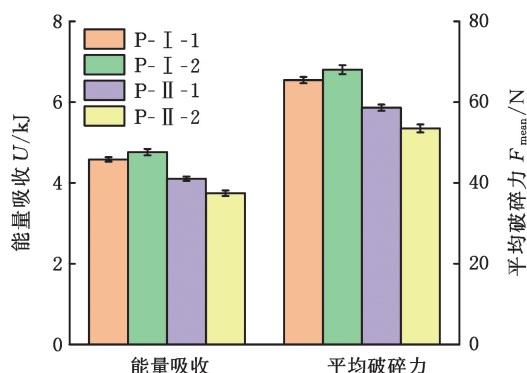
	P-I-1 结构	P-I-2 结构	P-II-1 结构	P-II-2 结构
峰值破碎力 F/N	99.9	108.6	86.9	83.9
轻量系数 $N_{LW-B}/(N \cdot g^{-1})$	23.5	25.4	20.1	19.7
平均破碎力 F_{mean}/N	65.5	68.0	58.6	53.5
能量吸收 U/kJ	4.58	4.76	4.10	3.74

为了更直观地反映结构的性能参数,结合表 1 绘制四种仿生平面结构性能对比图(图 14)。由上述分析与计算并结合图 14 可知,P-II-2 结构峰值破碎力较小,导致其轻量系数并不理想,且其能量吸收较其他结构也最低;而 P-I-2 结构在峰值破碎力、能量吸收和轻量系数中有明显优势,且平

均破碎力也能满足设计所需,同时在弯曲过程中变化比较平稳。这意味着 P-I-2 结构在满足轻量化设计需求的同时,其结构具有更强的断裂韧性与抗弯性能,因此确定 P-I-2 结构为最优仿生结构。



(a)轻量化系数与峰值破碎力



(b)能量吸收与平均破碎力

图 14 四种仿生平面结构综合性能对比

Fig.14 Comparison of comprehensive properties of four bionic planar structures

3 仿生轻质管结构的抗弯性能试验

3.1 仿生轻质管构型设计与制备

将上述设计的平面仿生结构卷曲形成圆管结构,实现了从二维平面单元网格到三维仿生轻质管的构型转变,过程如图 15 所示,卷曲后的仿生轻质管结构的尺寸参数如下:直径 $D = 4.5/\pi$ mm,壁厚 $t = 1$ mm,长度 $h = 4.5$ mm。成形效果如图 16 所示。G-FW 的结构图示与尺寸参数如图 17 所示。

3.2 仿生轻质管结构的抗弯性能分析

本文以工程实践当中常见的蜂窝结构作为对比参照结构,分析比较所设计的两类仿生轻质管结构的抗弯性能。为了保证对比结果的科学性与准确性,将五种管结构的相对密度均控制在 50% 来进行三点弯曲力学性能实验,并绘制载荷-位移曲线,如图 18 所示。

观察图 18 的载荷位移曲线可以发现,五种管

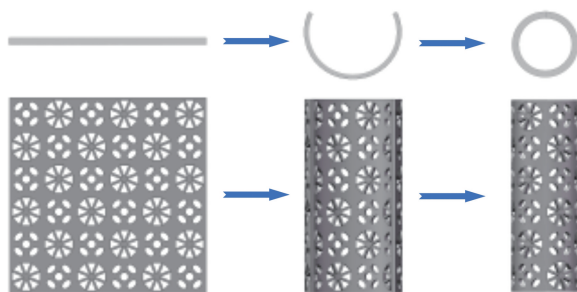


图 15 二维平面结构与仿生轻质管结构的转换原理
Fig.15 The conversion principle of two-dimensional planar structure and bionic lightweight pipe structure



图 16 仿生轻质管结构成形效果

Fig.16 Bionic light pipe structure forming effect

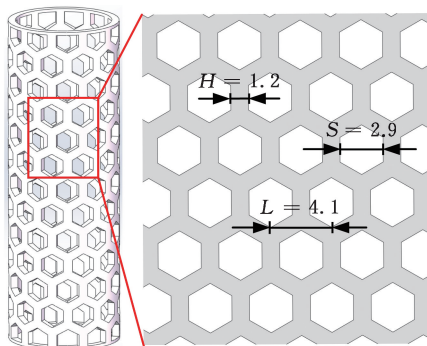


图 17 G-FW 结构及尺寸参数

Fig.17 G-FW Structure and dimensions

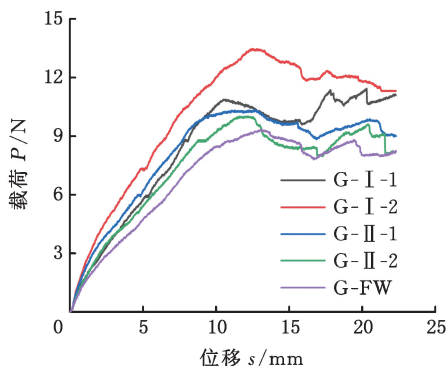


图 18 仿生轻质管结构载荷-位移曲线

Fig.18 Load-displacement curve of bionic lightweight pipe structure

结构的变化趋势基本一致,可将三点弯曲试验所得的载荷-位移曲线分为三项:第一项描述的是试

样在线性变形段,第二项描述的是其内部结构逐渐变形断裂段(或应力平台段),第三项是其载荷二次上升段。

图 19 中的弯曲过程与载荷-位移曲线相对应,首先,随着位移的加载,仿生轻质管单元内部的网格结构发生屈曲变形,上管壁与加载头由点接触变为面接触,且接触面积逐渐增加并逐渐达到极限载荷,此时起支撑作用的是 Z 向上未与加载头贴合的管壁单元。随着弯曲位移的继续增大,屈曲网格结构会进一步形变且出现断裂,载荷会先逐步减小而后又开始上升,进入二次上升段。结合图 19 中的弯曲过程可知,此时恰为仿生轻质管结构的上半圆管壁与加载头完全贴合后逐渐开始接触下半圆管壁,因此上下半管壁同时承载弯曲载荷作用,导致载荷值上升。

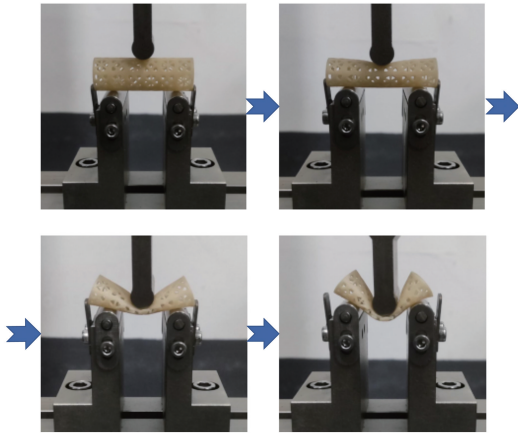


图 19 仿生轻质管结构的弯曲变形过程

Fig.19 The bending deformation process of bionic lightweight pipe structure

3.3 优选仿生结构的试验验证

参照 2.3 节中的性能指标,绘制仿生轻质管结构的性能对比图,如图 20 所示。将获得的载荷-位移曲线与 2.2 节中仿生平面结构的载荷-位移曲线对比后不难发现,在峰值破碎力方面,仿玻璃海绵结构与仿竹节横切面结构的差距被进一步拉

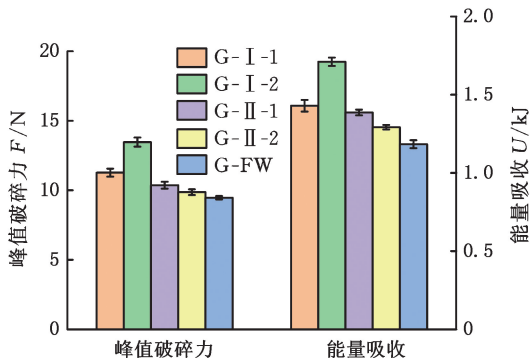


图 20 仿生轻质管结构性能对比

Fig.20 Biomimetic lightweight pipe structure performance comparison

开;G-I-2 结构较 G-II-1 结构提高了 29.9%,较 G-II-2 结构提高了 36.5%,较 G-FW 结构提高了 42.3%。在能量吸收方面:G-I-2 结构较 G-II-1 结构提高了 23.4%,较 G-II-2 结构提高了 32.4%,较 G-FW 结构提高了 44.4%。因此在管结构的抗弯性能中 G-I-2 结构优于传统蜂窝结构,同时在与其它仿生轻质管结构的对比中也具有明显优势,这与 2.3 节中平面结构优选结果相对应。综上,仿生轻质管的抗弯性能对比结果证明了第 2 节平面结构优选分析的可靠性。

4 结论

1) 本文基于对玻璃海绵与竹节横切面结构的观察,仿生设计了四种单元构型,通过对单元构型的周期阵列获取不同的仿生平面结构,再通过对仿生平面结构卷曲形成仿生轻质管结构。

2) 仿生平面结构与生物基树脂的相互结合展现出优异的力学特点。在三点弯曲轴向加载下,共经历了线性形变、弹性屈曲和损伤开裂三个变形阶段。

3) 在相同尺寸参数的不同结构条件下,G-I-2 结构表现出来的抗弯性能以及轻量化指标最为良好,在相同的加载条件下,其吸能性以及轻量化系数均为最优,同时,实验结果证明了有限元分析的准确性和可靠性。

4) 建立了抗弯性能的评价机制,对抗弯性能分析的结果表明,本文所设计的仿生轻质管结构的抗弯性能优于传统蜂窝结构,且与仿生平面结构的结果相一致,佐证了仿生平面结构优选的可靠性。本文初步完成了仿生轻质管结构弯曲性能的分析工作,后续将继续探究其压缩、回弹性能。

参考文献:

- [1] HE Meng, LI Yan, YIN Jie, et al. Compressive Performance and Fracture Mechanism of Bio-inspired Heterogeneous Glass Sponge Lattice Structures Manufactured by Selective Laser Melting[J]. Materials & Design, 2022, 214:110396.
- [2] DROZDOV A L, ANDREYKIN N A, DOROFEEV A G. Structure and Physico-chemical Properties of Organosilicon Crystal-like Composite Spicules of the Glass Sponge Hyalonema Sieboldi[J]. Materials Research Bulletin, 2018, 105:372-376.
- [3] BIRKBAK M E, GUIZAR-SICAIROS M, HOLLER M, et al. Internal Structure of Sponge Glass Fiber Revealed by Ptychographic Nanotomography

- [J]. *Journal of Structural Biology*, 2016, 194(1): 124-128.
- [4] LUO Rong, LI Zhangpeng, WU Xianzhang, et al. Super Durable Graphene Aerogel Inspired by Deep-sea Glass Sponge Skeleton[J]. *Carbon*, 2022, 191: 153-163.
- [5] WEAVER J C, MILLIRON G W, ALLEN P, et al. Unifying Design Strategies in Demosponge and Hexactinellid Skeletal Systems[J]. *The Journal of Adhesion*, 2010, 86(1):72-95.
- [6] AIZENBERG J, WEAVER J C, THANAWALA M S, et al. Skeleton of Euplectella SP. Structural Hierarchy from the Nanoscale to the Macroscale[J]. *Science*, 2005, 309(5732):275-278.
- [7] WEAVER J C, AIZENBERG J, FANTNER G E, et al. Hierarchical Assembly of the Siliceous Skeletal Lattice of the Hexactinellid Sponge Euplectella Aspergillum [J]. *Journal of Structural Biology*, 2007, 158(1):93-106.
- [8] LI Quanwei, SUN Bohua. Optimization of a Lattice Structure Inspired by Glass Sponge[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2023, 18(1):016005.
- [9] CHEN Poyu, McKITTRICK J, MEYERS M A. Biological Materials; Functional Adaptations and Bioinspired Designs[J]. *Progress in Materials Science*, 2012, 57(8):1492-1704.
- [10] SVEN B, FARID D, LIAN Ding, et al. Bio-inspired Design to Support Reduced Energy Consumption via the ‘Light Weighting’ of Machine System Elements [J]. *International Journal of Modeling and Optimization*, 2015, 5(1):82-89.
- [11] CROCE G, FRACHE A, MILANESIO M, et al. Structural Characterization of Siliceous Spicules from Marine Sponges [J]. *Biophysical Journal*, 2004, 86(1):526-534.
- [12] 乔莉, 冯庆玲, 王晓红, 等. 硅质海绵骨针的结构及力学性能[J]. *无机材料学报*, 2008, 23(2):337-340.
- QIAO Li, FENG Qingling, WANG Xiaohong, et al. Structure and Mechanical Properties of Silica Sponge Spicule[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2008, 23(2):337-340.
- [13] LI Longhai, GUO Ce, CHEN Yiting, et al. Optimization Design of Lightweight Structure Inspired by Glass Sponges (Porifera, Hexactinellida) and Its Mechanical Properties[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, 15(3):036006.
- [14] ZHAO Wei, HUANG Zhipeng, LIU Liwu, et al. Bionic Design and Performance Research of Tracheal Stent Based on Shape Memory Polycaprolactone [J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 229:109671.
- [15] MORANKAR S, KUMAR A, LUKTUKE A, et al. Influence of Hydration on the Micromechanical Properties of Silica Spicules from the Venus Flower Basket (Euplectella Aspergillum) [J]. *JOM*, 2023, 75(9):3816-3826.
- [16] 陈冠军, 袁晶, 余雁, 等. 竹材顺纹抗压性能的种间差异及其影响因子研究[J]. *木材加工机械*, 2018(6):23-27.
- CHEN Guanjun, YUAN Jing, YU Yan, et al. Study on Interspecific Differences of the Compression Performance Parallel to the Grain of Bamboo and Its Influencing Factors[J]. *Wood Processing Machinery*, 2018(6):23-27.

(编辑 陈勇)

作者简介: 辛嘉铭, 男, 1999年生, 硕士研究生。研究方向为CAD/CAM、轻质管结构等。发表论文1篇。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等。发表论文40余篇。E-mail: bhearts@jiangnan.edu.cn.

本文引用格式:

辛嘉铭, 纪小刚, 孙榕, 等. 仿生高强韧轻质管结构的抗弯性能研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(2):333-341.

XIN Jiaming, JI Xiaogang, SUN Rong, et al. Study on Bending Performance of Bionic High-strength and Lightweight Pipe Structures[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(2):333-341.