

汽车防撞栏仿竹薄壁管结构的能量吸收特性^{*}

ENERGY ABSORPTION CHARACTERISTIC OF BIOMIMETIC BAMBOO THIN-WALLED TUBE STRUCTURE FOR CAR CRASH BARRIERS

张海燕^{**1} 周国华^{***2}

(1. 湛江科技学院 智能制造学院, 湛江 524094)

(2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

ZHANG HaiYan¹ ZHOU GuoHua²

(1. School of Intelligent Manufacturing, Zhanjiang University of Science and Technology, Zhanjiang 524094, China)

(2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

摘要 基于竹子的宏观、微观结构特征,提出了两种仿竹结构:带加强节的变壁厚薄壁管结构(Tube-a)和双圆带肋的仿竹薄壁管结构(Tube-b)。借助 Abaqus 工具对仿生结构在三点弯曲加载下的吸能特性进行了研究,并引入了常规圆管结构做对比分析。结果表明,Tube-b 的表现最佳,其峰值破碎力较圆管结构降低了约 18.396%,其比吸能和吸能效率分别提升了约 50.8%、38.797%。为进一步研究仿竹结构的吸能特性,探讨了加载角度、壁厚属性 α 及截面属性 β 等参数对 Tube-b 能量吸收特性的影响。发现在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 载荷下,Tube-b 的综合性能表现较佳;适当调节壁厚属性,可以提高 Tube-b 的吸能效率;适当调节截面属性,可以提高 Tube-b 的比吸能。该研究可为改善薄壁结构能量吸收特性的设计提供一定参考。

关键词 竹子 仿生 薄壁结构 有限元 吸能特性

中图分类号 O341

Abstract Based on the macroscopic and microscopic structural characteristics of bamboo, two bionic bamboo structures were proposed: a thin-walled tube with variable wall thickness with reinforcing joints (Tube-a) and a thin-walled bamboo-like tube with ribs in a double circle (Tube-b). The energy absorption characteristics of the bionic structures under three-point bending loading were investigated with the help of Abaqus tool, and the conventional circular tube structure was introduced for comparative analysis. The results show that Tube-b has the best performance, its peak crushing force is reduced by about 18.396% compared with the circular tube structure, and its specific energy absorption and energy absorption efficiency are improved respectively by about 50.8% and 38.797%. To further investigate the energy absorption characteristics of the bamboo-like structure, the effects of parameters such as loading angle, wall thickness property α and cross-section property β on the energy absorption characteristics of Tube-b were explored. It is found that the comprehensive performance of Tube-b is better under $0^\circ \sim 20^\circ$ loading; the energy absorption efficiency of Tube-b can be improved appropriately by adjusting the wall thickness property, and the specific energy absorption of Tube-b can be improved appropriately by adjusting the cross-section property. This study can provide some references for the design of improving the energy absorption characteristics of thin-walled structures.

Key words Bamboo; Bionic; Thin-walled structure; Finite element; Energy absorption property

Corresponding author: ZHANG HaiYan, E-mail: tsxk5376@163.com

The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52075185).

Manuscript received 20231010, in revised form 20231111.

^{*} 20231010 收到初稿, 20231111 收到修改稿。国家自然科学基金项目(52075185)资助。

^{**} 张海燕, 女, 1983 年生, 河北邢台人, 汉族, 湛江科技学院高级讲师, 主要研究方向为机械制造、汽车模具、新能源汽车。

^{***} 周国华, 男, 1989 年生, 广东广州人, 汉族, 华南理工大学讲师, 博士研究生, 主要研究方向为机械制造、特种旋压及零部件成形制造技术、材料成形及控制工程。

0 引言

薄壁结构作为多孔结构中的一种,具有轻量化、低成本以及较优的吸能特性,广泛应用于航空航天、车辆工程和国防军事等领域^[1-4]。在过去的研究中,相关学者就薄壁结构展开了诸多研究。人们主要从其基体材料和截面几何形状入手。在材料方面,如钢材、铝合金及复合材料等已经被众多研究人员应用于薄壁结构上^[5-6]。在截面几何形状方面,如圆形、三角形、方形及多边形等薄壁管结构也已被国内外研究人员进行了系列深入研究^[7-8]。

由于人工设计往往有所局限,近年来,为进一步提高薄壁结构的能量吸收性能,研究人员将目光转向了历经漫长进化生物样本众多的自然界。在自然界中,薄壁多孔结构的生物原型主要分为植物类和动物类两大块。其中,植物类主要包括木贼属植物、竹子、植物果实外壳等^[9-10];动物类主要包括动物角、蜂窝、昆虫外骨骼等^[11-12]。SHARMA D 等^[13]以曲霉菌为研究对象,提出了两种仿生薄壁管结构,并以晶胞长度、高度和加载类型为变量,进行了参数化研究。PALOMBINI F L 等^[14]基于竹子维管束结构的特殊几何形状,提出了仿生相应仿生结构,并分别探讨了该仿生管结构在轴向、横向和三点弯曲加载下的能量吸收能力。MOHAMMADI H 等^[15]分析了仿生蜂窝薄壁结构设计的主要影响因素,总结了提高仿生结构耐撞性的设计方法。范晓文等^[16]以骨单元的微观尺度上的结构特征为研究对象,提出了仿骨单元薄壁结构,并借助非线性模拟方法分析了仿生结构的变形模式和能量吸收特性,验证了仿生结构的有效性。王勇辉等^[17]借助荷叶

脉络的分支特征,提出了仿生薄壁结构,进一步地,还通过数值模拟对比了仿生结构和传统薄壁结构在三点弯曲下的性能。邓敏杰等^[18]注意到了植物茎秆优越的力学性能,并以马尾草为原型,提出了一种仿生薄壁结构,为进一步提升仿生结构的性能,还利用响应面法进行了优化设计。

竹子具有优秀的力学性能,能够适应各种复杂自然条件,其比刚度甚至强于常规金属材料。基于此,本文拟从宏观和微观两个尺度出发,对竹子的结构形貌特征进行观测;再将此类有助于增强结构吸能特性的特征提取出来,应用至薄壁管结构的设计中;并借助有限元方法来对比分析仿生竹结构与传统圆形薄壁结构的吸能特性;进一步地,通过参数化分析来研究加载角度、壁厚属性 α 及截面属性 β 对结构性能的影响。

1 结构设计及评估指标

1.1 仿竹薄壁结构设计

如图 1 所示,为基于宏观结构特征的仿竹薄壁结构设计过程。图 1(a)展示了自然界中的竹子。可以发现,竹子的纵横比惊人,但其依然能够抵抗自然界的极端风雨载荷。由图 1(b)可以发现,其纵截面结构与一般植物的空心结构不同,是由壁厚梯度变化的薄壁和起加强作用的竹节所组成的薄壁圆管结构。因此,在前述分析的基础上,提出了一种新型带加强节的变壁厚薄壁管结构(Tube-a),如图 1(c)所示。Tube-a 结构中,设置内圆直径 D_1 为 50 mm, D_2 为 55 mm, D_3 为 60 mm,壁厚 T_1 为 10 mm, T_2 为 5 mm, T_3 为 2.5 mm, t 为 2 mm。

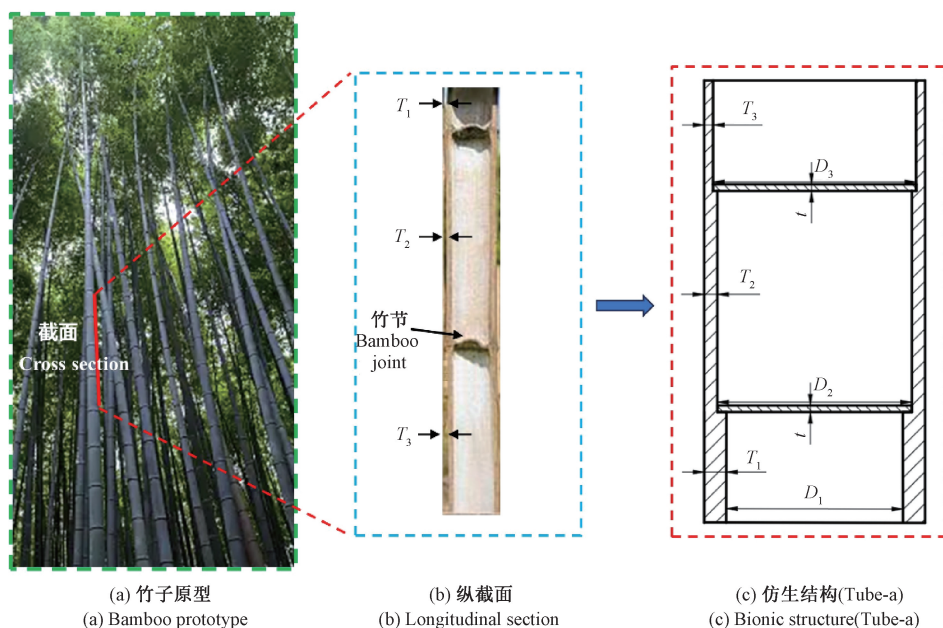


图 1 基于宏观结构特征的仿竹薄壁结构设计

Fig. 1 Design of bamboo-like thin-walled structures based on macrostructural features

如图 2 所示,为基于微观结构特征的仿竹薄壁结构设计过程。由图 2(b)可以发现,其横截面结构主要由竹子的基体组织和均匀分布的维管束组织组成。可以推测,这些独特的空心维管束是竹子具有高强度和

韧性的关键所在。基于此,提出了一种新型双圆带肋的仿竹薄壁管结构(Tube-b) 如图 2(c) 所示。Tube-b 结构中,设置外圆直径 d_1 为 65 mm, d_2 为 16 mm,壁厚 t_1 为 2.5 mm, t_2 为 1 mm。

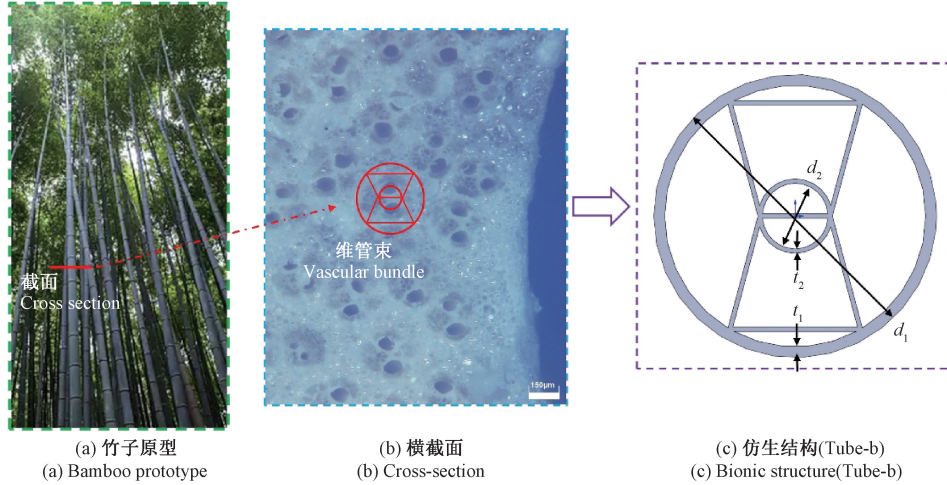


图 2 基于微观结构特征的仿竹薄壁结构设计

Fig. 2 Design of bamboo-like thin-walled structures based on microstructural features

1.2 吸能特性评估指标

为便于分析 Tube-a 结构和 Tube-b 结构的能量吸收特性,本研究引入了包括吸能总量 E_A 、比吸能 S_{EA} 、峰值破碎力 P_{CF} 、吸能效率 C_{FE} 等指标^[19-21]。

E_A 表示加载过程中结构吸收的总能量,计算式为

$$E_A = \int_0^{\delta} F(x) dx \quad (1)$$

式中, δ 为压头的有效加载位移; F 为瞬时冲击力。

S_{EA} 表示加载过程中, 每单位质量结构所吸收的能量, 计算式为

$$S_{EA} = \frac{E_A}{M} \quad (2)$$

式中, M 为结构的总质量。

P_{CF} 为加载过程中的峰值作用力, 计算式为

$$P_{CF} = \max \{ F(x) \} \quad (3)$$

C_{FE} 为加载过程中的稳定性, 计算式为

$$C_{FE} = \frac{M_{CF}}{P_{CF}} \quad (4)$$

式中, M_{CF} 为平均压缩力。

2 有限元模拟

2.1 有限元模型的建立

借助 Abaqus 有限元软件来分析仿生结构在准静态加载下的能量吸收特性。为便于对比分析, 还引入了常规圆管结构。3 种结构的轴向长度均设置为 600 mm, 圆管结构外圆直径为 65 mm, 壁厚为 5 mm。薄壁结构的材料选择了铝合金 6061T6, 其材料属性如表 1 所示。由于铝合金材料对于应变率不敏感, 故可

以忽略其影响。所建立的有限元模型如图 3 所示。刚性压头和固定支座均为刚性壳体单元。底部两固定支座之间的跨距为 450 mm。顶部的刚性压头仅保留竖直方向的自由度, 其上施加有竖直向下的 80 mm 位移载荷。各部件间的接触均定义为通用接触, 切向接触为罚接触, 系数为 0.3; 法向接触为硬接触。采用线性六面体单元 (C3D8R) 对各部件进行网格划分, 网格灵敏性分析结果如表 2 所示, 发现 2.5 mm 尺寸的网格兼具准确性和便捷性。网格划分方式为扫描, 采用沙漏控制结合中性轴算法进行划分^{[22]106546}。

表 1 铝合金 6061T6 的材料参数

Tab. 1 Material parameters of aluminum alloy 6061T6

参数 Parameter	数值 Value
弹性模量 Elastic modulus/GPa	70
泊松比 Poisson's ratio	0.3
密度 Density/(g/cm ³)	2.7
屈服强度 Yield strength/MPa	250

2.2 有限元模型的验证

为验证本研究中所建立有限元模型的有效性, 参考了文献[22]¹⁰⁶⁵⁴⁶ 中的三点弯曲准静态加载实验过程。其中, 加载结构为圆柱压头, 加载速度为 3 mm/min。待加载结构为薄壁圆管, 直径为 35 mm, 壁厚为 2 mm, 长度为 250 mm; 底部两支座跨距为 150 mm, 加载距离为 60 mm。对比该文献中的结构参数设置, 所得模拟结果与实验结果的对比情况如图 4 所示。

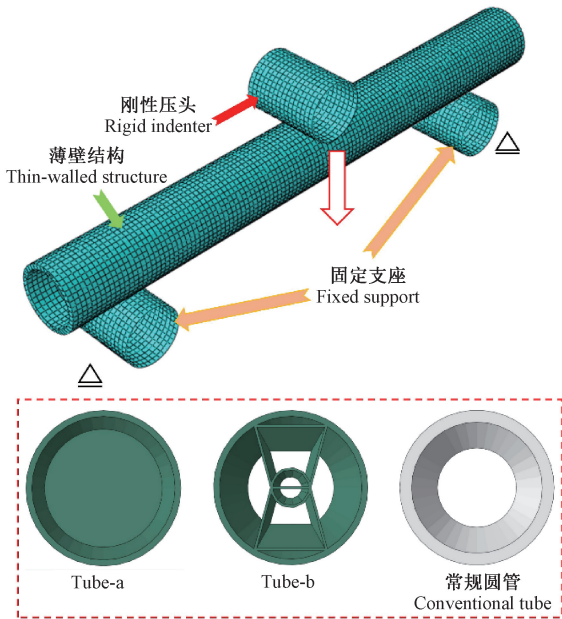


图 3 有限元模型

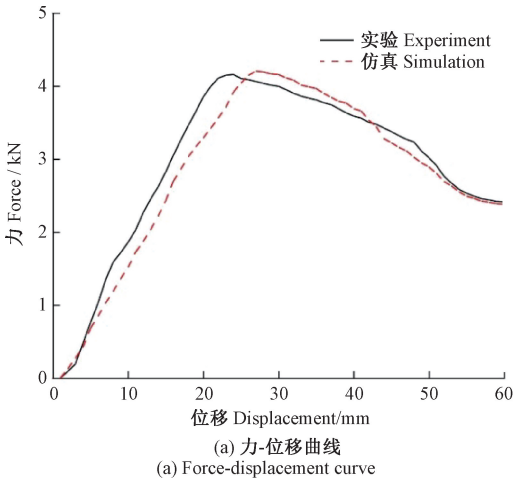
Fig. 3 Finite element model

表 2 网格灵敏性分析结果

Tab. 2 Results of mesh sensitivity analysis

网格尺寸 Mesh size/ mm	单元数 Number of element	最大力 Maximum force/kN	波动比 Fluctuation ratio /%
5	5 760	872.665	
4.5	9 443	877.029	-0.5
4	14 550	881.374	-0.7
3.5	19 494	883.168	-0.7
3	31 800	886.701	-0.4
2.5	45 360	887.587	0.1
2	84 600	889.362	0.2

显然,仿真结果的力-位移曲线与实验结果的吻合度较高。此外,实验与仿真在压头和支座处的变形也是十分接近的。仿真与实验的最大差异为 4.57%,小于 5%,这在工程中是允许的。因此,使用上述有限元模型来研究



仿竹薄壁结构的能量吸收特性是合理且有效的。

3 仿竹结构吸能性能分析

3.1 评估指标对比分析

图 5 所示为仿竹薄壁结构 Tube-a 和 Tube-b 与常规圆管结构在三点弯曲加载下的吸能性能对比结果。图 5 表明,两种仿竹薄壁管结构的总体性能均优于传统圆管结构。其中,Tube-a 和 Tube-b 的 P_{CF} 较传统圆管结构分别降低了约 3.104% 和 18.396%; S_{EA} 较传统圆管结构分别提升了约 7.009% 和 50.8%; C_{FE} 较传统圆管结构分别提升了约 25.564% 和 38.797%。可见,Tube-b 对结构吸能性能的提升更为显著。

3.2 变形模式分析

三点弯曲下的变形结果如图 6 所示,各分图中上半部分为正向视图,下半部分为 X 平面视图切割结果。由图 6(a) 可以发现,常规圆管结构在三点弯曲测试时,随着压头的下移,其底部向两侧拉伸,顶部向中间挤压。随着压头的进一步下压,其底部和顶部的变形趋势进一步增加。尤其在其顶部由于变形挤压加剧,出现了一些变形褶皱。由图 6(b) 可以发现,Tube-a 结构在三点弯曲测试时的变形模式和常规圆管结构相似,不同之处在于,褶皱出现阶段要早于常规圆管结构,且在最终阶段的屈曲变形更剧烈。这印证了前述评估指标对比分析中 Tube-a 的各项指标要优于常规圆管结构。从图 6(c) 可以发现,Tube-b 结构在三点弯曲测试时的变形模式与常规圆管结构也相似。其不同在于:褶皱出现阶段较早且数量较多;最终屈曲变形更剧烈;应力集中现象较前两者不明显。由此可以推测,这就是 Tube-b 吸能性能提高较显著且吸能效率较高的原因。因此,可以认为本研究提出的仿竹薄壁结构是有效提高结构吸能特性的方法。

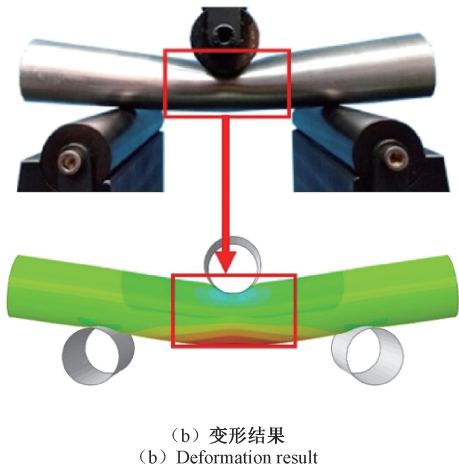


图 4 实验与仿真结果的对比

Fig. 4 Comparison of experiment and simulation result

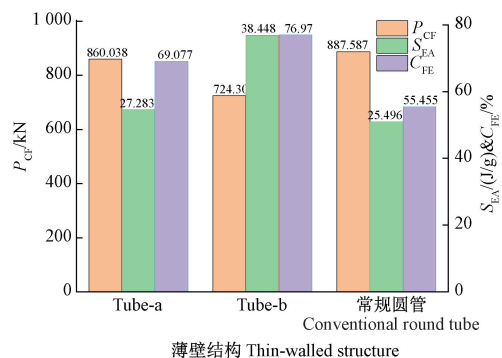


图 5 不同结构性能对比

Fig. 5 Comparison of the performance of different structures

4 参数研究

为更深入地了解仿竹薄壁结构在三点弯曲测试下的吸能特性,对其进行参数化分析是十分必要的。又由于 Tube-b 对结构吸能性能的提升更为显著,故以其为研究对象。以图 2 中的结构布置为参考,用 α 来表示壁厚属性,定义 $\alpha = t_1/t_2$;用 β 来表示截面属性,定义 $\beta = d_1/d_2$ 。本节拟研究加载角度、壁厚属性 α 和截面属性 β 的影响。

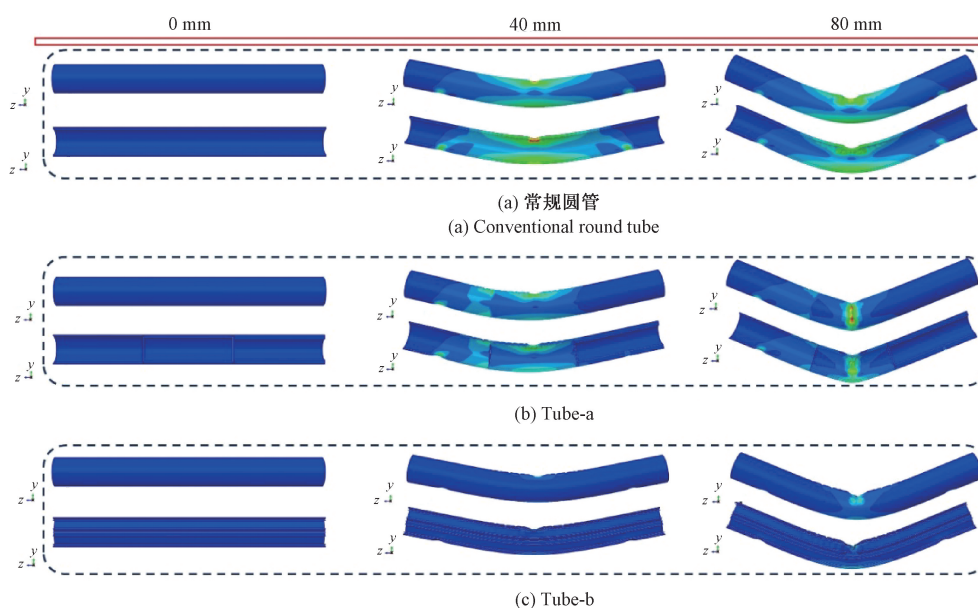


图 6 不同结构在三点弯曲下的变形模式

Fig. 6 Deformation patterns of different structures under the three-point bending

4.1 加载角度的影响

以图 2(c) 中的截面布置为基准 0° , 逆时针方向为加载角度变换方向。壁厚属性 α 和截面属性 β 分别保持原始值 2.5 和 4.1 不变。图 7、图 8 分别展示了不同角度影响下结构的吸能特性及其变形模式。由图 7 可以发现,当加载角度增加至 20° 的过程中,其 C_{FE} 先增后减,而其 S_{EA} 、 M_{CF} 、 P_{CF} 均先减后增。结合图 8 中的变形结果可知,这主要是因为在该过程中应力集中面积先增后减,使得 C_{FE} 相应变化。而结构中变形褶皱的数量先减后增,使其吸能能力也随之变化。严重的屈曲变形引发较大的 P_{CF} 。当加载角度增加至 40° 时,其 P_{CF} 不断上升,而其 S_{EA} 、 M_{CF} 、 C_{FE} 均不断下降。结合变形结果可知,这主要是因为在该过程中产生了较大的屈曲变形,从而引发了较高的 P_{CF} ,导致 C_{FE} 下降。而结构中的褶皱数量减少,导致了吸能效果较差。综合上述分析可得,Tube-b 结构的最佳加载角度在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 。

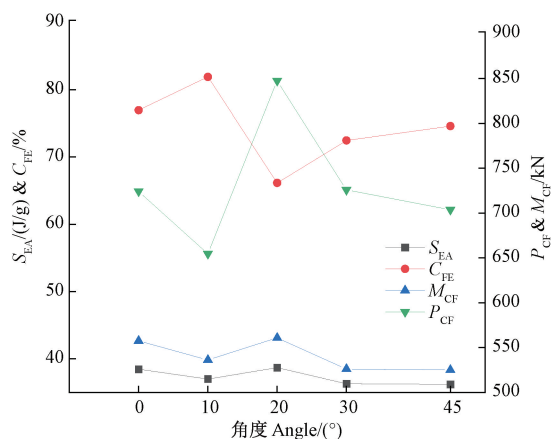


图 7 不同角度对结构性能的影响

Fig. 7 Effect of different angles on structural performance

4.2 α 的影响

以壁厚属性 $\alpha = 1.5$ 为起始点,增量步长为 0.5,增加至 $\alpha = 3.5$ 时结束。加载角度和截面属性 β 分别保持原始值 0° 和 4.1 不变。图 9、图 10 分别展示了不

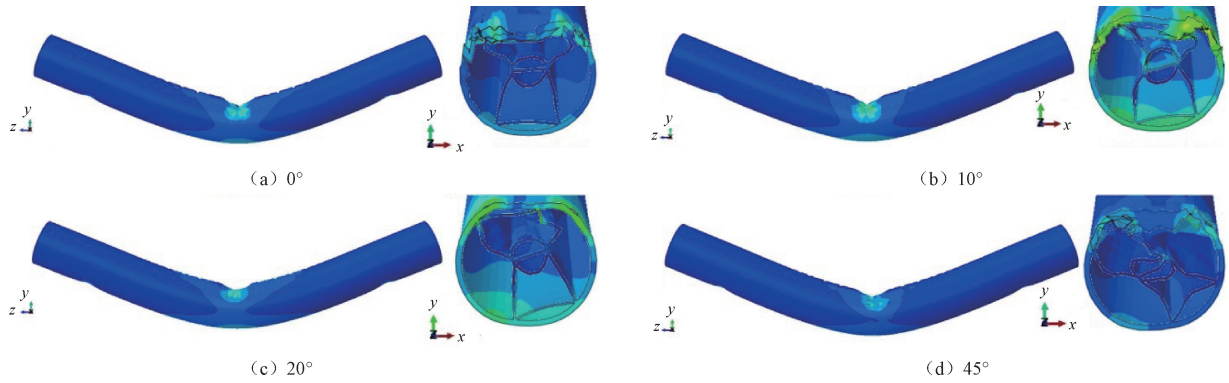


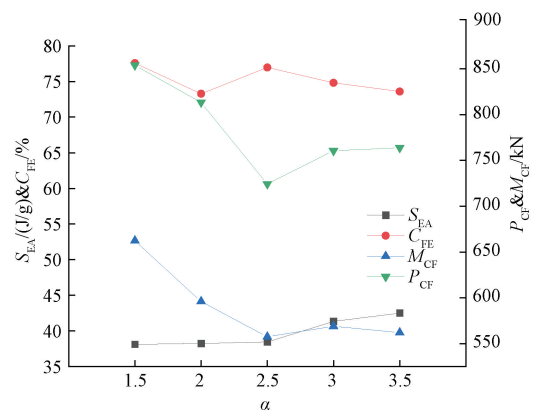
图 8 不同角度影响下结构的变形模式

Fig. 8 Deformation patterns of structures under the influence of different angles

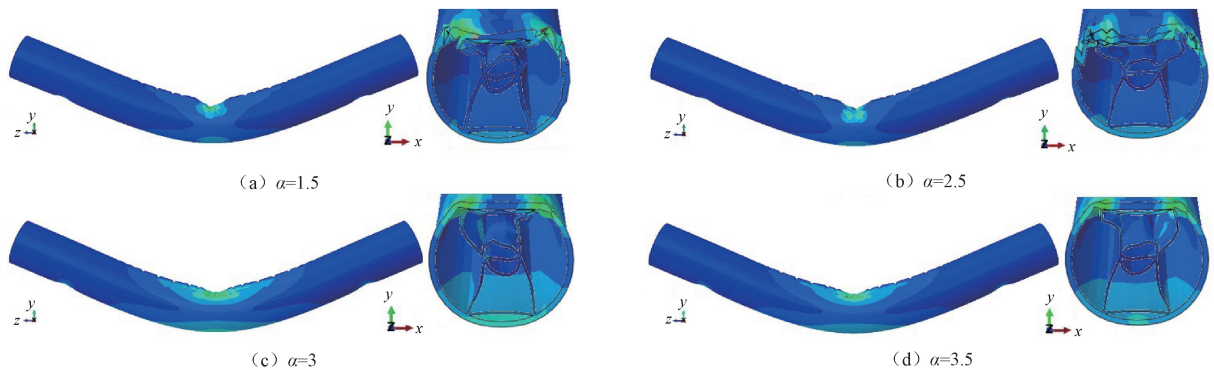
同 α 影响下结构的吸能特性及其变形模式。由图 9 可以发现。在 α 增加至 2.5 的过程中,其 P_{CF} 先减后增,其 S_{EA} 不断增加,而其 M_{CF} 、 C_{FE} 均不断下跌。结合图 10 中的变形结果可知,在 α 增加至 2.5 的过程中,其屈曲程度先减后增,导致 P_{CF} 相应变化,过大的 P_{CF} 会降低 C_{FE} 。而由于屈曲程度的加深和结构质量的减少导致其 S_{EA} 不断增加。在 α 增加至 3.5 的过程中,其 P_{CF} 呈下降趋势,而其 S_{EA} 、 M_{CF} 、 C_{FE} 均呈上涨趋势。结合图 10 可知,这主要是因为在该过程中屈曲程度在减缓,导致 P_{CF} 下降,进而使得 C_{FE} 上涨。而该过程中结构质量的减少和褶皱数量的增加导致了 S_{EA} 、 M_{CF} 增加。综合上述分析可得,合理增大壁厚属性 α 能够有效提升 Tube-b 的吸能特性。

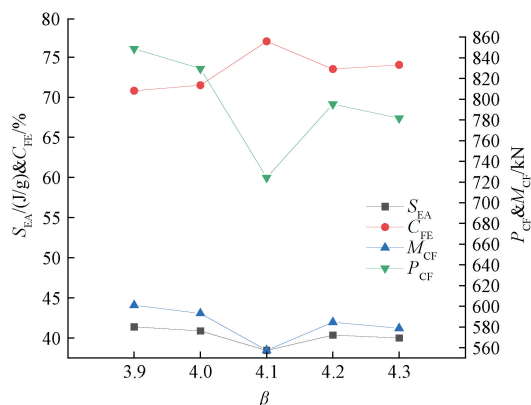
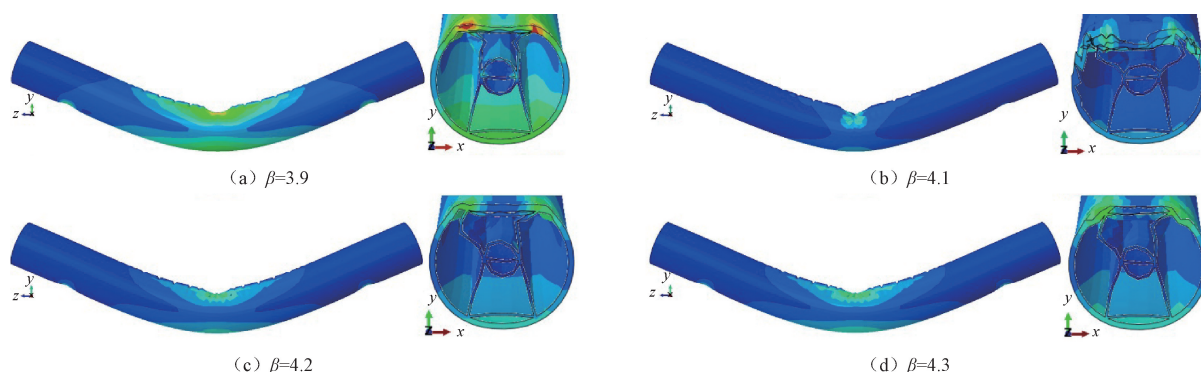
4.3 β 的影响

以截面属性 $\beta=3.9$ 为起始点,增量步长为 0.1,增加至 $\beta=4.3$ 时结束。加载角度和壁厚属性 α 分别保持原始值 0° 和 2.5 不变。图 11、图 12 分别展示了不同 β 影响下结构的吸能特性及变形模式。由图 11 可以发现。在 β 增加至 4.1 的过程中,其 P_{CF} 呈上涨趋势,而其 S_{EA} 、 M_{CF} 、 C_{FE} 均呈下跌趋势。观察图 12 可知,这主要是因为在此过程中结构中的屈曲变形

图 9 不同 α 对结构性能的影响Fig. 9 Effect of different α on structural performance

加剧,导致了较大的 P_{CF} ,进而使得 C_{FE} 下跌。又由于结构中的褶皱数量减少, S_{EA} 、 M_{CF} 也出现下跌。在 β 增加至 4.3 的过程中,其 P_{CF} 先降后升,而其 S_{EA} 、 M_{CF} 、 C_{FE} 均先升后降。结合图 12 可知,此过程中,结构中的屈曲变形先加剧后渐缓,导致 P_{CF} 相应变化,使得 C_{FE} 反向变化。而结构中的褶皱数量先多后少,使得 S_{EA} 、 M_{CF} 出现先升后降。综合上述分析可得,适当减小截面属性 β 能够有效提升 Tube-b 的吸能特性。

图 10 不同 α 影响下结构的变形模式Fig. 10 Deformation patterns of structures under the influence of different α

图 11 不同 β 对结构性能的影响Fig. 11 Effect of different β on structural performance图 12 不同 β 影响下结构的变形模式Fig. 12 Deformation patterns of structures under the influence of different β

1) 设计了两种新型仿竹薄壁结构, 其性能均优于常规圆管结构。其中, Tube-a 的 P_{CF} 较圆管结构降低了约 3.104%, 其 S_{EA} 、 C_{FE} 分别提升了约 7.009%、25.564%。Tube-b 的 P_{CF} 较圆管结构降低了约 18.396%, 其 S_{EA} 、 C_{FE} 分别提升了约 50.8%、38.797%。

2) 参数化分析表明, Tube-b 结构的最佳加载角度在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 。

3) 壁厚属性 α 和截面属性 β 对 Tube-b 的吸能特性影响显著, 合理增大壁厚属性 α 以及适当减小截面属性 β 均可有效提升结构的吸能特性。

参考文献 (References)

- [1] SIDDIQUE S H, HAZELL P J, WANG H, et al. Lessons from nature: 3D printed bio-inspired porous structures for impact energy absorption: a review [J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103051.
- [2] YAO R Y, PANG T, ZHANG B, et al. On the crashworthiness of thin-walled multi-cell structures and materials: state of the art and prospects [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 189: 110734.
- [3] 马梓鸿, 张慧乐, 孙泽玉, 等. 负高斯曲率曲面薄壁管吸能特性研究 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(11): 51-63.
MA ZiHong, ZHANG HuiLe, SUN ZeYu, et al. Study on energy absorption characteristics of thin-walled tubes with negative Gaussian curvature [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 51-63

5 结论

本研究以竹子独特的空心薄壁结构为研究对象, 分别从宏、微观两个观测尺度出发, 分别设计出了带加强节的变壁厚薄壁管结构 (Tube-a) 和双圆带肋的仿竹薄壁管结构 (Tube-b)。借助有限元工具 Abaqus 建立了两种仿生结构和对比常规圆管在三点弯曲下的仿真模型, 并验证了其有效性。进一步地分析了加载角度、壁厚属性 α 和截面属性 β 对仿生结构性能的影响。主要结论如下:

- (In Chinese).
- [4] 徐少强, 李伟伟, 李琳. 自相似仿生层次多胞薄壁管的耐撞性研究及优化 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41(12): 1852-1859.
XU ShaoQiang, LI WeiWei, LI Lin. Research and optimization on crashworthiness of self-similar bionic multi-cell thin-walled tube [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(12): 1852-1859 (In Chinese).
- [5] 孙煜洲, 杨卓然, 夏炎, 等. 杨桃启发的仿生星形薄壁结构耐撞性研究 [J]. 机械强度, 2024, 46(1): 40-47.
SUN YuZhou, YANG ZhuoRan, XIA Yan, et al. Research on crashworthiness of bionic pentacle thin-walled structure inspired by carambola [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(1): 40-47 (In Chinese).
- [6] 韩登安, 徐丹, 叶仁传, 等. 冰雹载荷下基于碳纤维增强复合材料的腔棘鱼鳞双螺旋仿生结构的撞击损伤分析 [J]. 高压物理学报, 2022, 36(4): 164-172.
HAN DengAn, XU Dan, YE RenChuan, et al. Analysis on damage of double-helicoidal carbon fiber reinforced polymer bionic structure inspired by coelacanth scales under hail load [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(4): 164-172 (In Chinese).
- [7] 陈碧敏, 黄小娣. 梯度蜂窝力学行为及其多目标优化设计 [J]. 机械强度, 2024, 46(1): 107-114.
CHEN BiMin, HUANG XiaoDi. Mechanical behavior of graded honeycomb and its multi-objective optimal design [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(1): 107-114 (In Chinese).
- [8] 申红侠, 王超. 690MPa 高强度钢薄壁方形截面轴压构件承载力直接强度法研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51(18): 47-52.

- SHEN HongXia, WANG Chao. Study on direct strength method for the ultimate carrying capacity of 690MPa high-strength steel thin-walled square box section centric compression member [J]. Building Structure, 2021, 51(18): 47-52 (In Chinese).
- [9] 刘飞明, 雷建银, 乔力, 等. 木贼属植物仿生薄壁结构的耐撞性优化[J]. 高压物理学报, 2022, 36(5): 139-149.
- LIU FeiMing, LEI JianYin, QIAO Li, et al. Crashworthiness optimization of horsetail-bionic thin-walled structures [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(5): 139-149 (In Chinese).
- [10] 徐向聪, 高佳丽, 郝云波. 304 不锈钢多层梯度点阵结构压缩性能及梯度率影响研究[J]. 机械强度, 2023, 45(6): 1318-1325.
- XU XiangCong, GAO JiaLi, HAO YunBo. Research on compressive performance of 304 stainless steel multi-layer gradient lattice and gradient rate influence [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(6): 1318-1325 (In Chinese).
- [11] 徐菁, 李岩, 付昆昆. 仿羊角管状复合材料结构抗冲击性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2365-2376.
- XU Jing, LI Yan, FU KunKun. Impact resistance of horn-inspired tubular composite structure [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2365-2376 (In Chinese).
- [12] 李兴山, 乔捷, 李明昊. 仿生机器鱼框架机构动力学分析与轻量化设计[J]. 机械强度, 2023, 45(5): 1199-1204.
- LI XingShan, QIAO Jie, LI MingHao. Dynamics analysis and lightweight design of bionic robotic fish frame mechanism [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(5): 1199-1204 (In Chinese).
- [13] SHARMA D, HIREMATH S S. Design of euplectella aspergillum based bionic thin tubes for impact absorbing application under different loading conditions [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 3790-3810.
- [14] PALOMBINI F L, DE ARAUJO MARIATH J E, DE OLIVEIRA B F. Bionic design of thin-walled structure based on the geometry of the vascular bundles of bamboo [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 155: 106936.
- [15] MOHAMMADI H, AHMAD Z, PETRU M, et al. An insight from nature: honeycomb pattern in advanced structural design for impact energy absorption [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 22: 2862-2887.
- [16] 范晓文, 杨欣, 许述财, 等. 仿骨单位薄壁结构轴向和斜向耐撞性研究[J]. 载人航天, 2020, 26(2): 142-151.
- FAN XiaoWen, YANG Xin, XU ShuCai, et al. Study on crashworthiness of thin-walled structure based on osteon under axial and oblique loads [J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(2): 142-151 (In Chinese).
- [17] 王勇辉, 何强, 顾航. 仿荷叶脉络薄壁管耐撞性能研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2022, 36(1): 59-66.
- WANG YongHui, HE Qiang, GU Hang. Research on crashworthiness of thin-walled tubes imitating lotus leaf vein [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 36(1): 59-66 (In Chinese).
- [18] 邓敏杰, 刘志芳. 仿马尾草薄壁结构的设计与耐撞性研究[J]. 高压物理学报, 2022, 36(3): 108-117.
- DENG MinJie, LIU ZhiFang. Design and crashworthiness study based on horsetail bionic thin-walled structure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(3): 108-117 (In Chinese).
- [19] ZHANG L W, BAI Z H, ZHANG Q, et al. On vibration isolation performance and crashworthiness of a three-dimensional lattice metamaterial [J]. Engineering Structures, 2023, 292: 116510.
- [20] SHI L, TU F Q, LUO Y J. Energy absorption characteristics of the bionic lotus petiole structure under transverse load [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 187: 110748.
- [21] ZHAO Y F, CHEN L C, LI W F, et al. Improving energy absorption of bidirectional self-locked structures and systems inspired by origami crease [J]. European Journal of Mechanics, A/Solids, 2023, 100: 104977.
- [22] SONG J F, XU S C, LIU S F, et al. Design and numerical study on bionic columns with grooves under lateral impact [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 148: 106546.