

受螳螂虾虾螯启发的仿生螺旋结构力学特性

齐迎春,张照辉,陈立新,王清扬,郭雪,于征磊,张志辉

(吉林大学工程仿生教育部重点实验室,长春 130022)

摘要:受螳螂虾虾螯微观 Bouligand 结构启发,本文以六边形、圆形、负泊松比、四边形 4 种胞元作为层间基础结构,建立了 4 种仿生螺旋结构以及 4 种对比结构。以热塑性聚氨酯材料为基材,运用 3D 打印技术进行结构制备。基于准静态压缩试验和数值模拟探究了上述 8 种结构的吸能性能。结果表明:4 种仿生螺旋结构的吸能特性较好,其中仿生六边形螺旋结构比吸能可达 531.65 mJ/g。与对应对比结构相比,4 种仿生螺旋结构比吸能分别提升 64.72%、32.39%、55.84%、25.14%,这表明层间螺旋堆叠分布有效增强了结构的吸能特性,结构变形破坏将会吸收更多的能量。

关键词:工程仿生学;螳螂虾虾螯;仿生螺旋结构;3D 打印;准静态压缩;吸能特性

中图分类号: TB17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)04-1474-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230636

Energy absorption characteristics of bionic helical structures inspired by mantis shrimp

QI Ying-chun, ZHANG Zhao-hui, CHEN Li-xin, WANG Qing-yang, GUO Xue,
YU Zheng-lei, ZHANG Zhi-hui

(Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Inspired by the microscopic Bouligand structure of mantis shrimp, this paper used four cells (hexagonal, circular, quadrilateral and negative Poisson's ratio) as interlayer basic structures, and established four bionic helical structures and four contrast structures. Using the thermoplastic polyurethane material as the base material, the above structures were fabricated by 3D printing technology. Based on the quasi-static compression tests and numerical simulations, the energy absorption performance of the above eight structures was investigated. The results showed that the energy absorption characteristics of the four bionic helical structures were better, and the specific energy absorption of the bionic hexagon helical structure could reach 531.65 mJ/g. Compared with the corresponding contrast structure, the specific energy absorption of the four bionic helical structures increased by 64.72%, 32.39%, 55.84% and 25.14% respectively, which indicated that the helical stacking distribution between layers effectively increased the energy absorption characteristics of the structures. The deformation and failure of the structures would

收稿日期: 2023-06-21.

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB4600500);国家自然科学基金面上项目(51975246);吉林省科技发展计划项目(20230508045RC);吉林省发改委项目(2023C041-4);重庆市科技项目(CSTB2022NSCQ-MSX0225).

作者简介:齐迎春(1979-),女,教授,博士.研究方向:仿生结构设计.E-mail: qiyc@jlu.edu.cn

通信作者:于征磊(1984-),男,教授,博士.研究方向:仿生结构设计.E-mail: zlyu@jlu.edu.cn

absorb more energy.

Key words: engineering bionics; mantis shrimp; bioinspired helical structures; 3D printing; quasi-static compression; energy absorption characteristics

0 引言

近年来,受自然界生物结构的启发,仿生结构发展迅速。得益于优异的吸能能力,一批诸如蜂窝结构、蜘蛛网结构、螺旋结构等被应用于交通运输、航空航天、装甲防护等领域。

作为一种常见的多孔材料,蜂窝具有质量轻、强度高、刚度高等良好的力学性能。目前,典型蜂窝结构主要有三角形蜂窝、四边形蜂窝、圆形蜂窝、负泊松比蜂窝等。Tan等^[1]在负泊松比蜂窝的基础上,结合分形设计,以正六边形和正三角形作为子结构,建立了两种分形负泊松比蜂窝结构RHH、RHT,在保持负泊松比特性的同时极大提高了结构的比吸能。于征磊等^[2]设计了简化的仿直蜂窝、仿斜蜂窝结构,研究了5种载荷工况下的结构承载特性。Yang等^[3]在三角形、四边形、六边形蜂窝等结构的基础上,提出了一种新型马蹄形铝蜂窝,有效提高了蜂窝结构的耐撞性能。Liang等^[4]以六边形蜂窝为基础结构,建立了7种不同尺寸参数的自相似分级蜂窝结构,试验结果表明:分级蜂窝结构具有变形模式稳定、多级吸能等优点,提出的参数化设计策略可为特定工程需求下结构的吸能过程调控提供参考。同样地,Zhang等^[5]基于蜘蛛网的生物几何六边形构造,在3种低阶分层结构的中心引入正六边形,建立了3种高阶分层结构,试验结果表明:分层结构破碎力波动较小,具有理想的变形模式和能量吸收能力。自然界中竹子具有良好的轴向力学性能,受竹子管壁微观结构的启发,Zhang等^[6]提出了一种具有结构层次的管状蜂窝结构。从实验、数值和理论3个方面对该结构的吸能性能进行了系统的研究,发现结构各项吸能指标受设计参数影响较大,平衡设计参数与结构吸能之间的关系可以获得较高吸能的结构。

自然界中,螺旋结构(Bouligand structure, BS)是一种奇特的轮廓,这类结构广泛存在于鱼类^[7,8]、虾类^[9,10]、螃蟹类^[11,12]、蝎子^[13,14]、甲虫^[15,16]等生物中,且具有高刚度、高强度、高延展性和高韧性的特点。巨骨舌鱼鳞片的胶原纤维片层中每

层纤维取向是一致的,但相邻片层之间是错位的,构成了Bouligand结构,根据加载环境,这类结构允许层间片层重新定向,以适应不同方向的负载,有效地增强了鳞片的延展性和韧性^[17]。Chen等^[18]利用环保的硅基纳米纤维和生物聚合物构建了非连续的Bouligand结构纳米复合材料,与天然Bouligand结构材料相比,该类材料具有优异的层间耦合能力、较高的应力传递效率和抵抗弯曲裂纹扩展的能力。从螳螂虾螯棒微观Bouligand结构中获得灵感,Zhang等^[19]制备了不同层间夹角的仿生螺旋结构,并对其力学性能及承载时的损伤破坏机理进行了研究,结果表明:螺旋层状结构的承载能力和能量吸收特性与层间螺旋角密切相关,在一定范围内,随层间角的减小,螺旋结构的强度先增大后减小,而当螺旋角为 12° 时,吸能最大。Yang等^[20]提出了一种基于甲壳类螺旋结构断裂特性和增韧机理的理论建模方法,结合仿生设计,建立了高碳纤维增强聚合物交叉层合板,对其断裂性能进行研究,结果表明:螺旋纤维的取向对结构的断裂性能有重要影响,驱动倾斜扭曲裂纹的扩展将会消耗更多能量。同样地,结合甲壳类动物外骨骼观察到的独特螺旋形形态,Cheng等^[21]设计了3种仿生螺旋结构和一种基础结构,对4个结构的力学性能进行评估,发现仿生结构的抗弯刚度和强度、横向剪切模量等均优于常规基础结构,自然启发螺旋结构具有很大的应用潜力。

本文以螳螂虾螯棒微观螺旋结构为研究对象,选取旋转角度 30° ,建立了4种仿生螺旋层状结构:仿生六边形螺旋结构(FZ)、仿生圆形螺旋结构(YZ)、仿生四边形螺旋结构(SZ)、仿生负泊松比螺旋结构(FBZ)以及4种层状对比结构:六边形结构(F)、圆形结构(Y)、四边形结构(S)、负泊松比结构(FB)。以热塑性聚氨酯材料为基材,运用3D打印技术进行结构制备,结合试验和数值模拟对结构力学性能进行综合分析,旨在寻求高比吸能、耐撞性优良的轻量化结构设计方案。

1 仿生结构设计及材料分析

1.1 仿生螺旋结构设计

作为一种肉食性海洋甲壳类动物,螳螂虾利用其锤状螯可轻易击碎软体动物外壳进行捕食,速度接近 23 m/s,且能承受上万次这样的冲击。相关研究表明^[9,10]:螳螂虾锤状螯棒结构由多相结合的取向晶体羟基磷灰石、无定形磷酸钙和碳酸盐的多相复合材料组成,其中由矿化几丁质纤维构成的螺旋(Bouligand)结构是该材料具有轻松抵御高能量冲击及阻碍裂纹扩展等性能的关键因素。如图 1(d)^[22]所示,进一步进行微观结构提取,发现螳螂虾螯微观结构是由螺旋形层状结构堆叠而成,每层间隔分布多个圆管形结构。

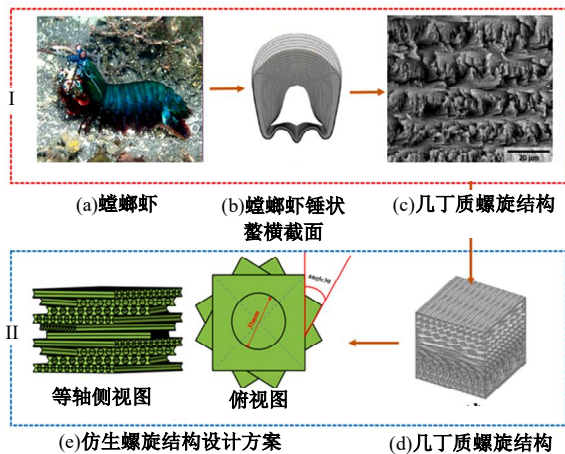


图 1 生物灵感启发的螺旋结构

Fig. 1 Bio-inspired bouligand structure

受BS启发,本文以六边形、圆形、四边形、负泊松比 4 种类型胞元作为层状基本结构,进行结构设计。如图 1(e)所示,以整体旋转六边形结构为例,将相邻层间角度设置为 30°,层数为 0~8 层,角度从 0°~210°。最终,建立了 4 种仿生螺旋结构 FZ、YZ、SZ、FBZ 以及 4 种对比结构 F、Y、S、FB。如图 2 所示,上述结构均设计为直径 33 mm、高度 41 mm 的圆柱,其中各层高度为 5 mm,4 种胞元基本尺寸设置为 4 mm,相邻层以及相邻胞元之间厚度为 1 mm。

1.2 材料性能测试

以热塑性聚氨酯材料为基材,运用 3D 打印技术进行结构制备,打印设备型号为 ZS500,每种模型均制备两个样件,共制备了 16 个压缩样件以及 2 个拉伸样件,打印工艺参数如下:切片厚度为 0.15 mm,填充间距为 0.2 mm,加工温度为 95 °C,激光功率为 44 W,激光速度为 4 m/s。

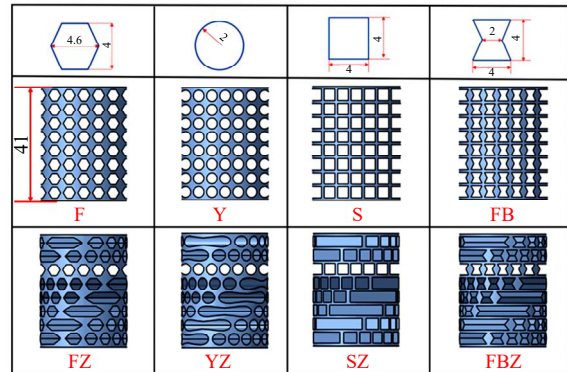


图 2 仿生螺旋结构及其对比结构

Fig. 2 Bionic bouligand structure and its contrast structure

采用万能拉伸试验机 DDL100 对结构压缩性能和拉伸性能分别进行测试。试验设置为准静态压缩试验和准静态拉伸试验,试验速度分别设置为 2,5 mm/min。为获取材料参数,对拉伸样件进行试验,通过固定样件一端,另一端以指定速度移动,直至拉伸样件断裂,具体拉伸曲线及试验设置如图 3 所示。

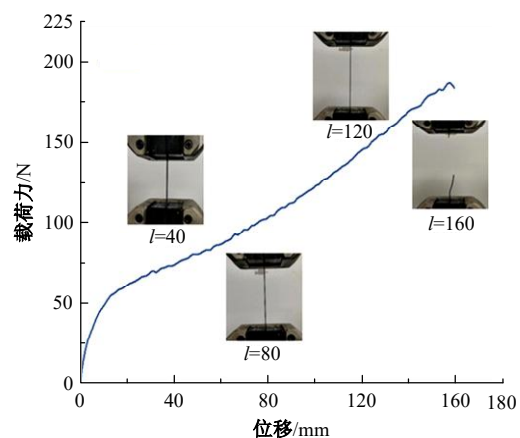


图 3 拉伸试验曲线及拉伸试验设置

Fig. 3 Tensile test curve and tensile test setting

具体的热塑性聚氨酯材料参数如下:密度为 1.1 g/cm³,弹性模量为 30 MPa,屈服强度 8 MPa,泊松比为 0.33。

1.3 有限元模型建立

本文利用有限元软件 LSDYNA 进行显式计算分析。为了复刻准静态压缩试验设置,建立图 4(a)所示的有限元分析模型。压缩样件底部被固定在刚性墙上,上端设置有匀速向下移动的刚性平板,压缩距离设置为 12 mm。压缩样件与刚性平板之间设置为面面接触,以防止网格穿透,静摩擦系数与动摩擦系数均设置为 0.3,以模拟真实

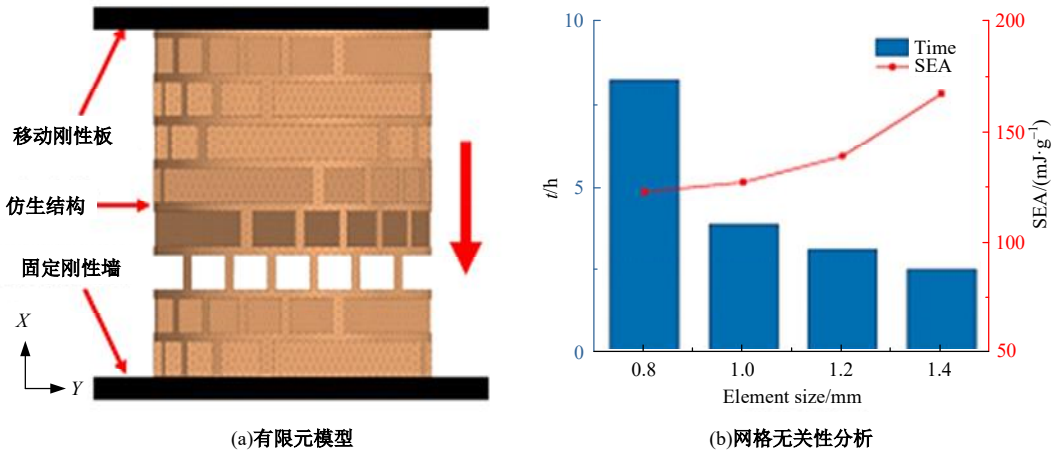


图 4 有限元模型和网格无关性分析

Fig. 4 Finite element model and grid-independent analysis

压缩试验。选用四面体网格对结构进行划分,以SZ结构为例,选取0.8、1、1.2、1.4 mm 4种网格尺寸进行无关性分析,如图4(b)所示,当网格尺寸由1.4 mm到0.8 mm,结构的比吸能开始下降,并在1 mm时趋于收敛,考虑到计算成本,最终确定网格尺寸为1 mm进行后续数值模拟。

1.4 分析评价指标

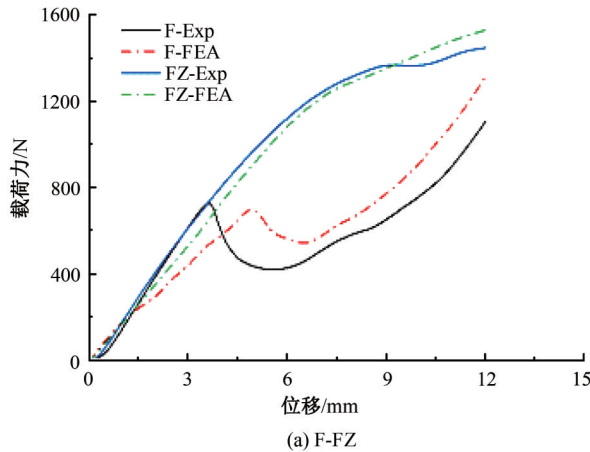
为了评价螺旋结构和对比结构的力学性能,采用两种分析指标对其进行分析,分别为吸能(Energy absorption, EA)、比吸能(Specific energy absorption, SEA)。

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

式中: $F(x)$ 为破碎力; x 为瞬时破碎位移; d 为有效破碎位移。

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

式中: M 为结构的总质量。SEA 值越高,能量吸收越好。

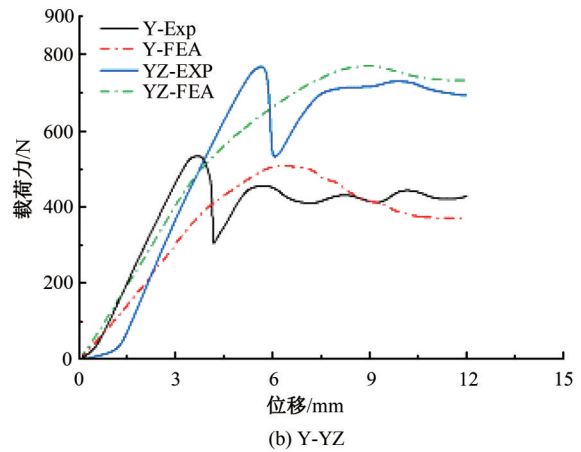


2 仿生螺旋结构性能分析

2.1 仿生螺旋结构力学特性分析

为了研究所建立结构样件的力学特性,对上述8组模型进行准静态压缩试验,得到每个模型样件的载荷力位移曲线。准静态压缩试验及有限元分析载荷力位移曲线如图5所示。

如图5所示,仿真曲线与试验曲线拟合较好。在4种类型的结构中,螺旋结构的载荷力位移曲线均明显高于对比结构,这表明螺旋结构具有较好的力学特性。如图5(a)所示,FZ结构从压缩初始就表现出比F结构较大的载荷力。如图5(b)所示,对于Y、YZ结构,试验曲线在达到峰值之后出现突然下降,这是由于结构压缩过程出现局部断裂,可能是结构打印过程存在缺陷,断裂区域位置成型质量较差,而仿真曲线没有考虑压缩过程中的断裂,仿真曲线与试验曲线表现出相似的趋势。如图5(c)所示,S结构在达到峰值之后,载荷力开始下降,而SZ结构出现多个峰值,结合变形



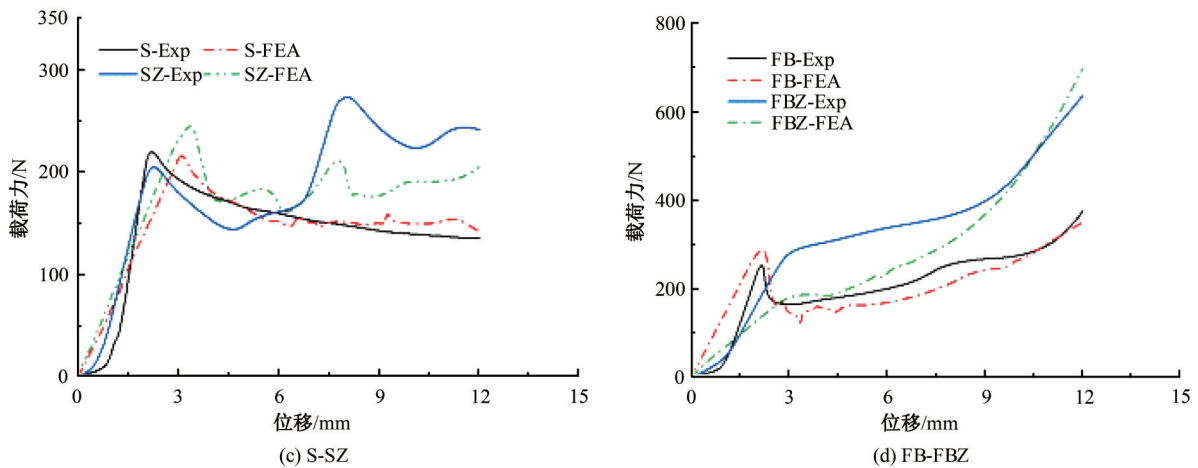


图 5 试验和仿真力位移曲线

Fig. 5 Force displacement curves of tests and simulations

模式分析,这是由于SZ结构变形过程出现层间依次坍塌,导致载荷力位移曲线出现多个峰值,整体上SZ结构力学特性优于S结构。如图5(d)所示,FB结构达到峰值后,出现平台期,载荷力平稳波动直至出现小幅上升,而FBZ的“平台期”出现斜率较小的力增长,随着压缩过程的进行,力继续增长,FBZ结构在压缩位移达到3 mm附近后,载荷力开始明显高于FB结构。整体来说,与对比结构相比,仿生螺旋结构具有较大的载荷力。

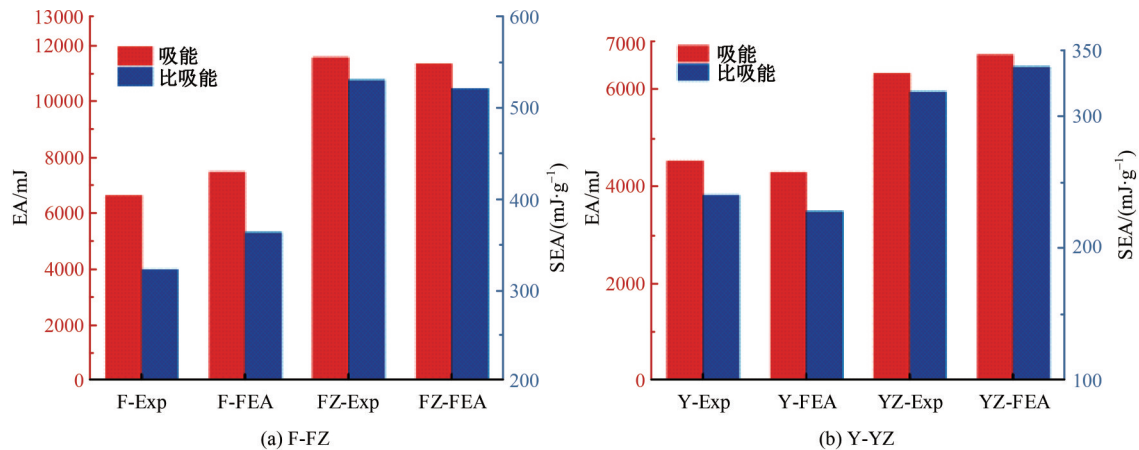
如图6所示,分析了4种仿生螺旋结构及4种对比结构的吸能和比吸能情况,可以看出试验和仿真所得结果相差不大。如图6(a)所示,F结构的吸能为6 652.14 mJ,比吸能为322.76 mJ/g,FZ结构的吸能为11 568.80 mJ,比吸能为531.65 mJ/g,与F结构相比,FZ结构比吸能提升64.72%,这表明螺旋结构的吸能特性得到了极大提升。如图6(b)所示,Y结构的吸能为4 544.65 mJ,比吸能为240.84 mJ/g,YZ结构的吸能为6 348.38 mJ,比吸能为318.85 mJ/g,与Y结构相比,YZ结构比

吸能提升32.39%。同样地,由图6(c)(d)可知,SZ结构比吸能为135.33 mJ/g,FBZ结构比吸能为185.39 mJ/g,与S、FB结构相比,SZ、FBZ结构比吸能分别提升25.14%、55.84%,以上分析结果均证明了仿生螺旋结构设计的可行性。与对应对比结构相比,FZ结构比吸能提升最大,其次为FBZ、YZ、SZ,其中FZ结构比吸能最大,为4种类型结构中的最优结构。

2.2 仿生螺旋结构变形分析

为了分析结构的压缩变形情况,本文记录了所有结构样件在准静态压缩试验过程中($\epsilon=0.1、0.2、0.3$)的变形情况,并与有限元仿真的Von Mises云图进行了对照,仿生结构样件变形如图7所示。

如图7所示,F结构在中间位置出现相互正交的变形区域;FZ结构遵循整体屈曲变形,其压缩过程中也伴随着局部正交变形区域的出现。Y结构在 $\epsilon=0.2$ 时在上部首先变形的区域出现断裂,之后在其对称下部区域产生变形,仿真结构变形与之类似,但未考虑断裂;YZ结构整体变形,随



(a) F-FZ

(b) Y-YZ

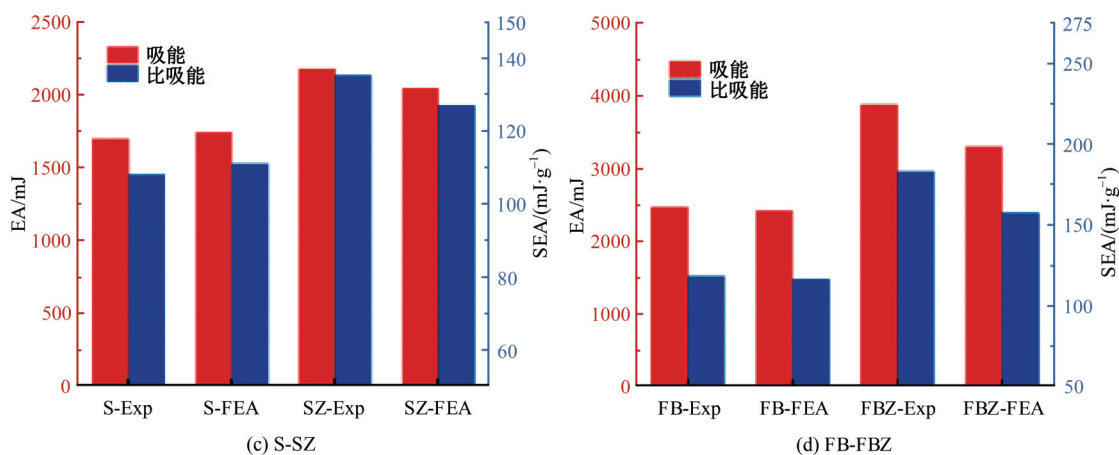


图 6 试验和仿真吸能与比吸能

Fig. 6 Energy absorption and specific energy absorption of tests and simulations

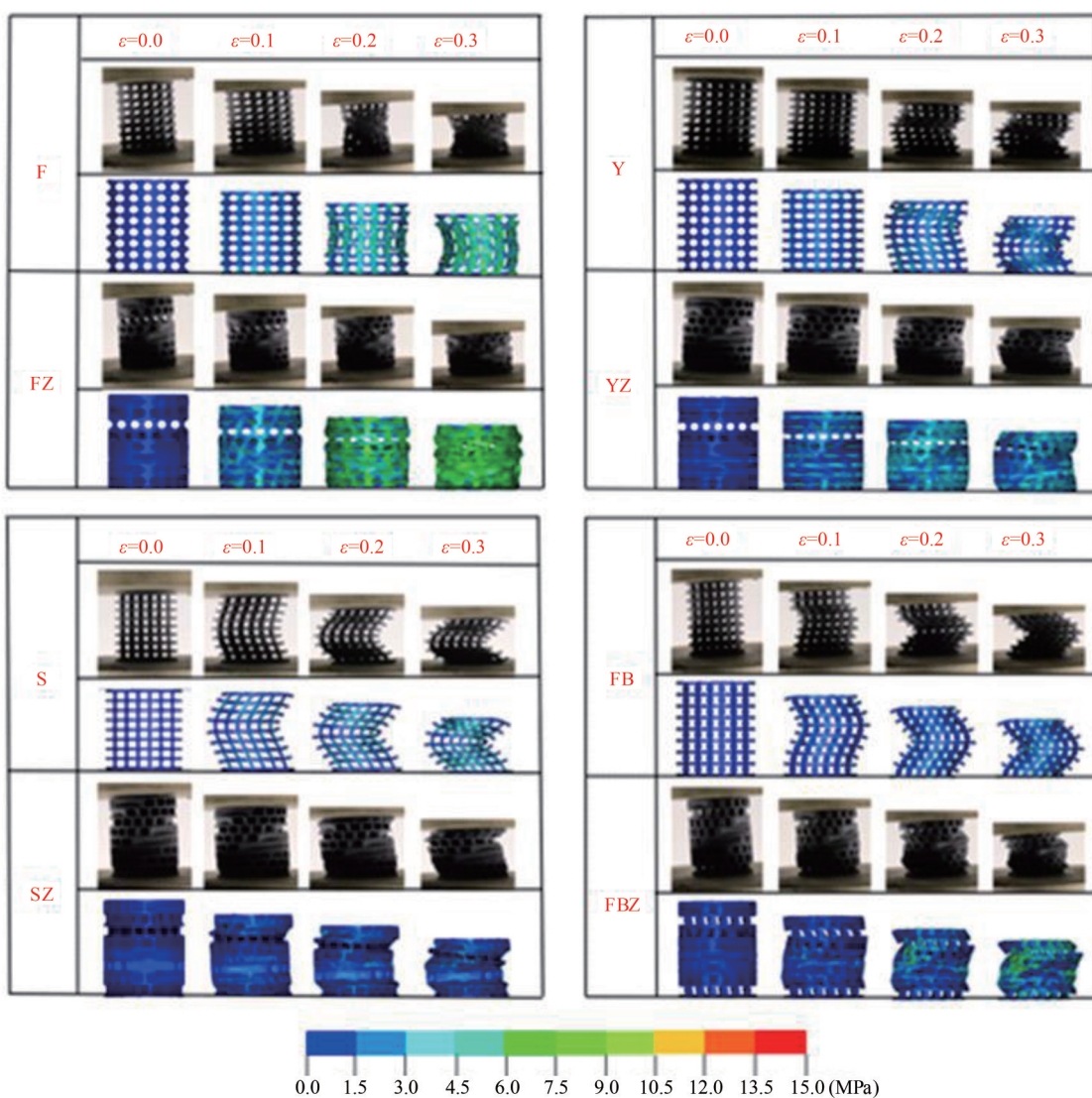


图 7 仿生结构变形模式

Fig. 7 Biomimetic bouligand structure deformation model

着压缩过程的进行,向一侧坍塌变形。S 结构在变形初始阶段向右侧坍塌变形,随后结构上下对

称变形,最终结构上下表面出现翘曲,仿真分析因结构底部区域固定,仅上部出现翘曲现象,但二者

变形较为相似;SZ结构变形过程出现层间逐次变形,与试验相比,仿真变形层位置有所不同,这可能与结构实际打印成型质量有关,由于层间依次变形,导致载荷力-位移曲线出现多个峰值。FB结构变形与上述S结构较为相似,即向一侧坍塌,上下区域对称变形;FBZ结构整体屈曲变形。综上,与对比结构相比,得益于层间螺旋堆叠排列,仿生螺旋结构变形过程中避免了一些特殊变形的出现:Y、S、FB中的上下对称变形区域以及F结构的大面积正交变形区域,仿生螺旋结构变形较为均匀,有效增强了结构的承载能力。对于上述4种类型结构,在整个变形时间段内,仿真与试验变形基本吻合,验证了本文有限元模型的准确性。

通过上述试验结果发现,仿生螺旋结构具有较好的承载特性,为设计具有较高吸能和抗冲击特性的仿生结构提供了设计参考。

2.3 仿生螺旋结构变角度分析

为了对比仿生螺旋结构在不同层间角度下

的性能,将每个仿生螺旋结构设置3个梯度(15°、30°、45°)进行仿真实验,压缩位移均设置为12 mm。

图8为4种仿生螺旋结构在3种层间螺旋角度下的载荷力位移曲线。如图8(a)所示,3个结构在压缩初始阶段表现出相似的载荷力,随后FZ-45°结构表现出最大的载荷力。如图8(b)所示,3个仿生圆形螺旋结构表现出相似的载荷力位移曲线。如图8(c)所示,仿生四边形螺旋结构整体载荷力大小变化相似,然而由于层间螺旋角度的不同,3个结构峰值出现的时间不同。如图8(d)所示,FBZ结构在较低层间螺旋角度下表现出较高的载荷力。

图9分析了上述结构的吸能情况。在3个旋转角度下,FZ、YZ、SZ、FBZ结构最佳吸能角度分别为45°、30°、45°和15°。整体来说,FZ结构吸能效果最好,其次为YZ、FBZ、SZ。

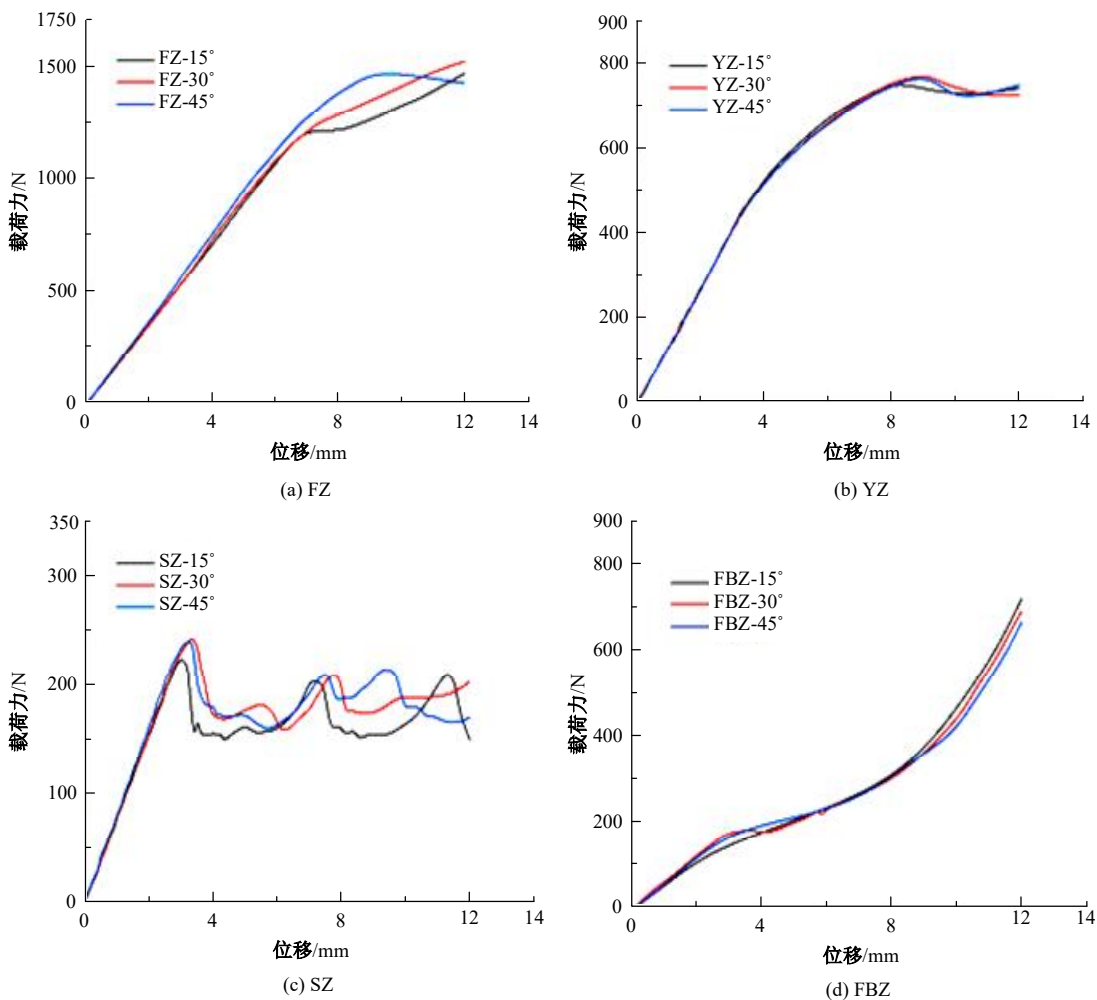


图8 仿真多角度力位移曲线

Fig. 8 Multi-angle force displacement curves of simulations

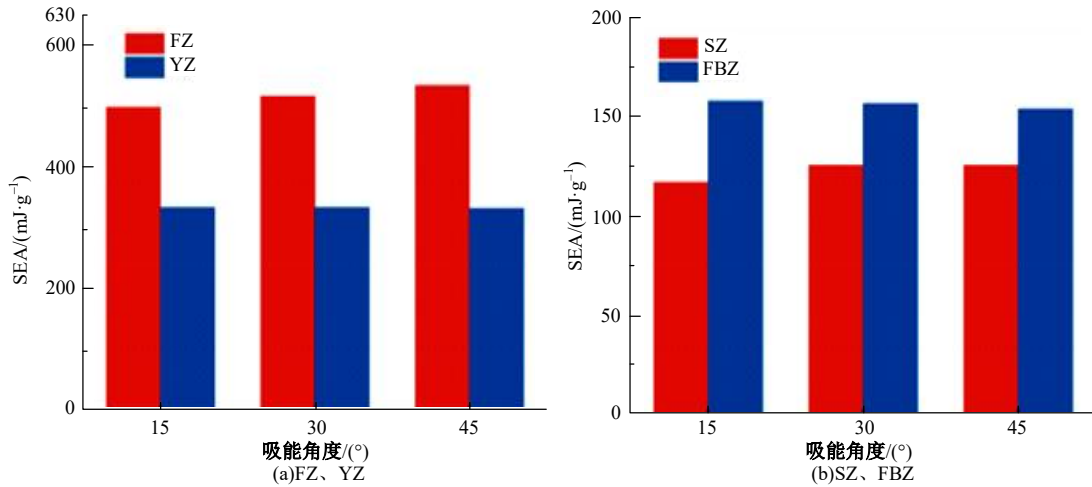


图9 多角度结构比吸能

Fig. 9 Multi-angle structure specific energy absorption

上述试验发现,仿生螺旋结构在不同层间角度下的吸能具有一定差异,未来会针对上述4种构型进行更多旋转角度梯度设计,旨在获得性能更为优异的结构。

3 结论

(1)4种类型的仿生螺旋结构均表现出优于4种对比结构的吸能性能,这表明层间螺旋堆叠分布有效增强了结构的吸能特性,结构变形破坏将会吸收更多的能量。

(2)FZ结构性能最好,比吸能最大,可达531.65 mJ/g,其次为YZ、FBZ、SZ结构,且与对应对比结构相比,4种仿生螺旋结构比吸能分别提升64.72%、32.39%、55.84%、25.14%。

(3)4种仿生螺旋结构在不同层间螺旋角度下的吸能具有一定差异,FZ、YZ、SZ、FBZ结构最佳吸能角度分别为45°、30°、45°和15°。本文仿生螺旋结构设计思路可为建立轻质、高强、高比吸能仿生结构提供参考。

参考文献:

[1] Tan H L, He Z C, Li K X, et al. In-plane crashworthiness of re-entrant hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio[J]. *Composite Structures*, 2019, 229: No. 111415.

[2] 于征磊, 信仁龙, 陈立新, 等. 仿蜂窝防护结构的承载特性[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2021, 51(3): 1140-1145.

Yu Zheng-lei, Xin Ren-long, Chen Li-xin, et al. Load bearing characteristics of honeycomb protection

structure[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(3): 1140-1145.

[3] Yang X F, Sun Y X, Yang J L, et al. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructure [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 125: 1-11.

[4] Liang H Y, Hao W Q, Xue G L, et al. Parametric design strategy of a novel self-similar hierarchical honeycomb for multi-stage energy absorption demand[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 217: No. 107029.

[5] Zhang Y, Wang J, Wang C H, et al. Crashworthiness of bionic fractal hierarchical structures[J]. *Materials & Design*, 2018, 158: 147-159.

[6] Zhang W, Yu T X, Xu J. Uncover the underlying mechanisms of topology and structural hierarchy in energy absorption performances of bamboo-inspired tubular honeycomb[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2022, 52: No. 101640.

[7] Yang W, Chen Irene H, Bernd G, et al. Natural flexible dermal armor[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(1): 31-48.

[8] Quan H C, Yang W, Eric S, et al. Novel defense mechanisms in the armor of the scales of the "living fossil" coelacanth fish[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(46): No. 1804237.

[9] 韩铖. 仿生轻质抗冲击结构材料的设计、制备与性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2018.

Han Cheng. Research on bio-inspired lightweight anti-impact structure and its mechanical analysis[D]. Nanjing: College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and As-

- tronautics, 2018.
- [10] Meng Q H, Gao Y, Shi X H, et al. Three-dimensional crack bridging model of biological materials with twisted Bouligand structures[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 159: No. 104729.
- [11] Lian J, Wang J. Microstructure and mechanical anisotropy of crab cancer magister exoskeletons[J]. *Experimental Mechanics*, 2014, 54(2): 229-239.
- [12] Ma C L, Gu D D, Lin K J, et al. Selective laser melting additive manufacturing of cancer pagurus's claw inspired bionic structures with high strength and toughness[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 469: 647-656.
- [13] Kellersztein I, Cohen S R, Bar-On B, et al. The exoskeleton of scorpions' pincers: structure and micro-mechanical properties[J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 94: 565-573.
- [14] Israel G, Israel K, Daniel W H. Nested helicoids in biological microstructures[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):No. 224.
- [15] Yang R G, Zaheri A, Gao W, et al. AFM identification of beetle exocuticle: bouligand structure and nano-fiber anisotropic elastic properties[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(6): No. 1603993.
- [16] Lee N, Berthelson P R, Nguyen V, et al. Microstructure and nanomechanical properties of the exoskeleton of an ironclad beetle[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, 16(3): No. 036005.
- [17] Zimmermann E A, Gludovatz B, Schaible E, et al. Mechanical adaptability of the Bouligand-type structure in natural dermal armour[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: No. 2634.
- [18] Chen S M, Wu K J, Gao H L, et al. Biomimetic discontinuous Bouligand structural design enables high-performance nanocomposites[J]. *Matter*, 2022, 5(5): 1563-1577.
- [19] Zhang X Y, Luan Y B, Li Y C, et al. Bioinspired design of lightweight laminated structural materials and the intralayer/interlayer strengthening and toughening mechanisms induced by the helical structure[J]. *Composite Structures*, 2021, 276:No. 114575.
- [20] Yang F, Xie W H, Meng S H. Crack-driving force and toughening mechanism in crustacean-inspired helicoidal structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2021, 208: 107-118.
- [21] Cheng L, Thomas A, Glancey James L, et al. Mechanical behavior of bio-inspired laminated composites [J]. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(2): 211-220.
- [22] 韩奇钢, 石绍迁, 徐凯强, 等. 仿螳螂虾螯结构/功能的玄武岩纤维增强复合材料碟簧研究[J]. *塑性工程学报*, 2020, 10(27): 77-82.
- Han Qi-gang, Shi Shao-qian, Xu Kai-qiang, et al. Study on basalt fiber reinforced composite disc spring of bionic structure/function of dactyl club of mantis shrimp[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 10(27): 77-82.