爆 炸 与 冲 击
Explosion and Shock Waves
DOI：10.11883/bzycj-2026-0192

仿生多层环状波纹夹芯结构的耐撞性分析与优化*

黄 晗[1,2]，穆龙贵[1]，杨 波[1]，许述财[3,4]，宋家锋[4]，陈金宝[1,2]

（1. 南京航空航天大学航天学院，江苏 南京 211106；
2. 宇航空间机构全国重点实验室，上海 201100；
3. 清华大学车辆与运载学院，北京 100084；
4. 清华大学苏州汽车研究院，江苏 苏州 215134）

摘 要：为提高薄壁夹芯结构耐撞性，受雀尾螳螂虾指节微观结构中的正弦弯曲形态启发，提出了一种仿生多层环状波纹夹芯结构。通过准静态压缩试验验证了有限元模型的准静态压缩响应，在此基础上，系统开展了不同结构参数（芯层高度 A、芯层宽度 B 与壁厚 t）对结构耐撞性（最大载荷 F_{max}、比吸能 SEA 和压溃力效率 CFE）的影响分析，揭示了各结构参数的敏感区间及变形模式差异。结果表明：芯层高度过小时，夹芯结构难以形成稳定渐进折叠变形；结构耐撞性指标对壁厚 t 最为敏感，F_{max} 随 t 增大呈现快速增加趋势，而 SEA 和 CFE 虽同步增加，但增速递减。采用 Kriging 代理模型与多目标粒子群优化算法开展多目标优化，得到结构最优参数值：A=10.98 mm，B=10.32 mm，t=0.40 mm，对应的 F_{max} = 2.49 kN，SEA = 1.25 kJ/kg。验证结果表明，两项优化指标在该最优解的相对误差均小于2%，证明了优化结果的可靠性。本研究所提出的仿生多层环状波纹夹芯结构及其参数优化方法可为轻量化抗冲击防护结构的设计提供参考。

关键词：仿生薄壁结构；环状波纹夹芯；耐撞性；多目标优化；粒子群算法

中图分类号：O383 **国标学科代码：**13035 **文献标识码：**A

Crashworthiness analysis and optimization of a bionic multi-layer circular corrugated sandwich structure

HUANG Han[1,2]，MU Longgui[1]，YANG Bo[1]，XU Shucai[3,4]，SONG Jiafeng[4]，CHEN Jinbao[1,2]

(*1. College of Astronautics Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China; 2. National Key Laboratory of Aerospace Mechanism Shanghai 201100, China; 3. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Suzhou Automotive Research Institute, Tsinghua University, Suzhou 215134, Jiangsu, China*)

Abstract: To improve the crashworthiness of thin-walled sandwich structures, Inspired by the sinusoidal bending shape in the microstructure of *Odontodactylus scyllarus*, a bionic multi-layer circular corrugated sandwich structure (BMCCS) was proposed. The quasi-static compression response of the finite element (FE) model was established and verified by quasi-static compression tests. The relative error of specific energy absorption between simulation and test is below 1%. Based on the FE model, the influence of three factors (core height A, width B and wall thickness t) on structural crashworthiness (maximum load F_{max}, specific

*收稿日期： 2026-06-15 ； 修回日期： 2026-10-29 ；
基金项目：国家自然科学基金（12402404，52405321）；上海航天科技创新基金（SAST2022-016）
通信作者：黄 晗（1989— ），男，博士，副教授. E-mail: huanghan@nuaa.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿

energy absorption *SEA* and crushing force efficiency *CFE*) of BMCCS was systematically analyzed, each factor was set five levels, and seventy-five cases have been obtained. The sensitive interval of parameter configurations and the differences in deformation modes were investigated. The results show that the structure is difficult to form a stable progressive folding deformation when the core height is too small, and *SEA* is relatively high near A = 10 mm for the investigated cases with $t \geq 0.5$ mm. The F_{max} increases monotonously with the increase of B, but the increase rate gradually decreases. The effect of B on *SEA* is not significant compared with A. The structural crashworthiness index is most sensitive to the wall thickness t, and F_{max} shows a rapid growth trend with the increase of t, while *SEA* and *CFE* increase synchronously but the increase rate decreases. Based on Kriging surrogate model and multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm, multi-objective optimization was carried out to obtain a compromise set of size parameters of the structure using minimum distance method. The optimization results show that the optimal BMCCS has structural parameter values of A = 10.98 mm, B = 10.32 mm, t = 0.40 mm, corresponding to F_{max} = 2.49 kN, *SEA* = 1.25 kJ/kg. The verification results show that the relative errors of the two objectives F_{max} and *SEA* at this optimal solution are less than 2 %, which verified the reliability of the optimization results. The design of bionic multi-layer annular corrugated sandwich structure and its parameter optimization method proposed in this research can provide reference for the design of lightweight impact protection structure.

Keywords: bionic thin-walled structure; ring corrugated sandwich; crashworthiness; multi-objective optimization; particle swarm algorithm

薄壁和夹层吸能结构作为工程防护领域的关键部件，广泛应用于航空航天、轨道交通、汽车制造及军事防护等对轻量化与抗冲击性能有严格要求的领域[1][2]。在冲击载荷作用下，薄壁和夹层结构通过塑性变形、屈曲折叠及渐进压溃等机制耗散能量，从而有效保护人员与关键设备的安全。随着工程应用对结构性能要求的不断提高，如何在质量约束下实现更高的能量吸收效率，成为该领域持续关注的焦点问题。

自然界生物经过亿万年的演化，形成了众多具有优秀力学性能的多尺度层级结构。这些生物结构以其卓越的比强度、比刚度及能量吸收能力，为高性能工程结构的设计提供了丰富的灵感来源。近年来，仿生设计在薄壁吸能结构领域展现出巨大的应用潜力。在仿生薄壁管方面，研究者从竹子维管束结构、玻璃海绵骨架等生物原型中汲取灵感，提出了多种新型吸能构型。借鉴竹材维管组织的结构特征，研究者提出了具有纤维鞘瓣和中空特征的薄壁圆管设计，显著提升了结构的耐撞性能[3]。玻璃海绵单元胞中独特的双对角线增强构型也为薄壁多胞管的设计提供了重要参考[4]。受玻璃海绵对角双线性鲁棒方格晶格结构启发而设计的薄壁双线性管，展现出了优异的折叠能力[5]。Li 等[6]提出了一种基于交锁缝合与 Bouligand 排列穿孔的多重仿生设计策略，构建了模块化能量吸收系统，实现了吸能性能的灵活可调。此外，霍鹏等[7]以鹿角骨单位为仿生原型，系统研究了仿生薄壁管在斜向冲击条件下的耐撞性行为。Li 和 Xiao[8]设计了一种融合直管与锥管形态并内置仿生竹节隔板的混合薄壁管，利用外翻协同变形机制将比吸能较传统圆管提升 26%，并采用多目标优化实现了耐撞性能的最优参数配置。Huang 等[9]以螳螂虾螯为原型设计三角波纹夹层结构，经多目标优化获得了最优耐撞性参数。

仿生设计的理念同样推动着夹层结构的发展。在传统夹层结构方面，受 Origami 启发的 N 型波纹芯材为全复合材料夹层结构提供了新的设计范式，相较于传统 V 型波纹芯材显著提升了承载能力[10]。研究者对不同构型多层波纹夹芯板在冲击载荷下的耐撞性进行了系统分析与优化，发现芯层拓扑构型对能量吸收效率具有决定性影响[[11]-[12]]。金属正交波纹夹芯结构在动态冲击载荷下的理论分析与数值模拟揭示了材料应变率效应对结构响应的影响规律[13]。对于蜂窝夹层结构，研究者通过精细化建模揭示了嵌入件在拉拔和剪切载荷下的损伤演化机理[14]。Chen 等[15]通过 3D 打印技术构建了基于基本几何单元的分形自相似碳纤维增强复合夹芯结构，研究表明结构比例系数为 0.2 时具有最高的能量吸收率。在仿生夹层结构领域，Li 等[16]设计了仿生双向波纹点阵结构，通过增材制造技术制备

录用稿件，非最终出版稿

并系统研究了其在准静态压缩下的吸能行为。此外，Chen 等[17]以甲虫鞘翅为仿生原型，揭示了小梁-蜂窝芯层的协同机制——小梁约束蜂窝壁变形，蜂窝壁则反作用于小梁提供侧向支撑，形成 S 型整体屈曲模式以实现最佳压缩性能。Deng 等[18]受甲虫鞘翅结构与剪切增稠凝胶的粘弹性机制启发，提出了杂交软-结构相互作用超结构，实现了动态压溃性能的显著增强。受墨鱼骨分层隔室壁结构的启发，研究者设计了层状分层仿生点阵结构，与非分层结构和三周期极小曲面结构相比，该结构具有更高的比吸能[19]。Zhang 等[20]研究了不同芯层构型对全复合夹层结构吸能行为的影响，发现厚波纹芯材和高密度泡沫均有助于提高结构的抗压强度和比吸能。研究者利用多射流熔融增材制造技术制备了仿生夹层结构，并分析了波纹高度、直径及壁厚对其压缩性能的影响[21]。梯度异质结构策略近年来也被引入三维编织夹层复合材料设计，实现了应力响应的稳定化和能量的分阶段耗散[22]。在仿生夹层结构的低速冲击响应方面，研究者采用 3D 打印技术制备了具有 Xylotus 仿生晶格芯材的聚乳酸-微晶纤维素复合材料夹芯板，系统分析了其能量吸收特性[23]。另有研究对仿生蜂窝夹芯面板的能量吸收性能进行了表征，并系统探讨了仿生夹层结构的力学响应与参数影响规律[[24]-[25]]。Yang 等[26]提出了双向正弦波纹夹芯夹层结构，研究表明该结构在准静态载荷下能够显著降低初始峰值载荷并提升结构耐撞性。受螳螂虾指节微观结构启发，研究者设计了仿生夹芯结构，并通过多目标优化获得了较优的芯层几何参数组合[[27]-[28]]。在优化方法层面，研究者将机器学习技术应用于折纸超材料夹芯结构的低速冲击响应预测与多目标优化，实现了耐撞性能的高效寻优[29]。

环状夹芯结构可适配筒形构件内部的环形空间，并保留中心通道。对于穿透器内部精密组件的过载防护，可将其作为轴向缓冲构件的候选形式，本文将围绕上述潜在需求开展多层环状构型探索。已有研究将正弦波纹芯管布置于内、外圆管之间形成圆形夹芯管，并考察芯层几何参数对吸能响应的影响[1]，本研究则关注沿轴向分层组合的环状正弦芯层。

在上述仿生薄壁管与夹层结构的研究进展中，正弦波纹结构因其独特的几何特性而备受关注。然而，现有关于螳螂虾鳌启发设计的正弦夹层结构研究多集中于平面阵列或正交排布构型，对于受曲面约束的环状正弦波纹夹层结构在低速冲击下的渐进屈曲机制与参数耦合效应仍有待深入探讨。因此，本文受雀尾螳螂虾虾鳌微观结构特征启发，设计了一种新型环状波纹夹芯结构（Circular Corrugated Sandwich structure，CCS），并进一步提出了多层环状仿生波纹夹芯结构（Bionic Multi-layer Circular Corrugated Sandwich structure，BMCCS）。通过建立有限元模型，系统研究了芯层高度 A、芯层宽度 B 及芯层壁厚 t 对其低速冲击耐撞性的影响规律；进一步结合 Kriging 高斯回归元模型与多目标粒子群优化算法（MOPSO），对上述关键结构参数进行优化[[30]-[31]]。本文未考虑环状与平面构型的直接对照，不据此量化环状构型本身的吸能收益或判定两类构型的性能优劣，以期为高性能仿生吸能结构的设计和工程应用提供数值参考。

1 夹层结构仿生设计与仿真方案

1.1 夹层结构仿生设计

自然界中，许多生物经过长期进化形成了兼具轻质、高强度与优异抗冲击性能的结构。其中，雀尾螳螂虾的虾鳌因其卓越的抗冲击吸能特性而备受关注。如图 1 所示，虾鳌（图 1(a)）结构可承受高达 700 N 的瞬时冲击力而不发生严重破坏[[32]-[33]]。显微 CT 与扫描电镜分析表明（图 1(b)），虾鳌冲击区域内部呈现出周期性排列的正弦弯曲纤维结构，这种正弦微结构由振幅 A 与波长 λ 两个主要几何参数表征，其等效杨氏模量随 A/λ 的增大而提高[34]。相关研究表明，正弦弯曲纤维有助于分散应力、减弱应变局部化，并容许更大的损伤前变形，从而改善吸能能力和损伤容限[34]。受此启发，研究者已开发出平板型双向正弦芯层夹层结构，显著提升了比能量吸收并降低了初始峰值力[26]。该生物原型还具有层级组织及形态比差异，为多层芯层设计提供启发。在前期单层正弦夹芯结构研究[28]基础上，本文拟进一步探索轴向多层环状组合，为后续分级缓冲设计提供构型基础。

录用稿件，非最终出版稿

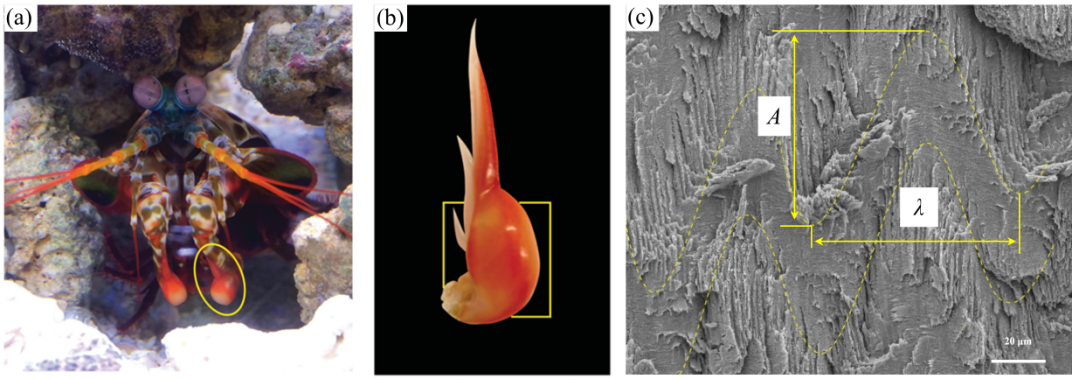


图 1 雀尾螳螂虾虾鳌的形态特征与微观结构[34]

Fig.1 Morphological characteristics and microstructure of the cheliped of the *Odontodactylus scyllarus*[34]

然而，现有仿生正弦波纹芯层多集中于平面阵列或正交排布构型，针对曲面约束下环状正弦波纹芯层的耐撞性能尚缺乏系统研究。为了探索曲面约束对正弦芯层渐进屈曲行为的影响，本文将该生物原型映射至圆柱坐标系，提出一种多层环状仿生波纹夹芯结构（BMCCS），如图 2 所示。其中，BMCCS 单层由仿生波纹夹芯、环状上隔板和下隔板组成。芯层由多个沿圆周方向均匀分布的胞元构成，每个胞元的截面呈正弦波形。胞元的形状由高度 A、内圆弧长度 λ 以及芯层宽度 B（外半径与内半径之差）表征，BMCCS 层数设为 5 层。内圆弧 λ 固定为 20 mm，每层胞元数量为 10，由此确定环状半径为 100/π　mm。在此基础上，本文将系统探究芯层高度 A、宽度 B 及壁厚 t 对结构耐撞性能的影响。构型设计还借鉴了波纹弹簧的周向起伏形式[35]，采用沿圆周排布的正弦芯层，并通过隔板沿轴向组合成多层环状结构。

环状布局可保留中心通道，适配筒形仪器内部的环形空间，多层芯层与隔板沿轴向组合，可配置压溃行程，并为后续分级缓冲设计提供基础。潜在用途包括精密组件过载缓冲、环形限位及小型设备着陆缓冲。保持周向胞元数不变时，局部周向波长随半径增大，使 A/λ 沿径向减小，形成几何形态比渐变。各模型轴向各层采用相同的 A，因此轴向没有梯度变化，轴线梯度变化将在后续研究中展开。

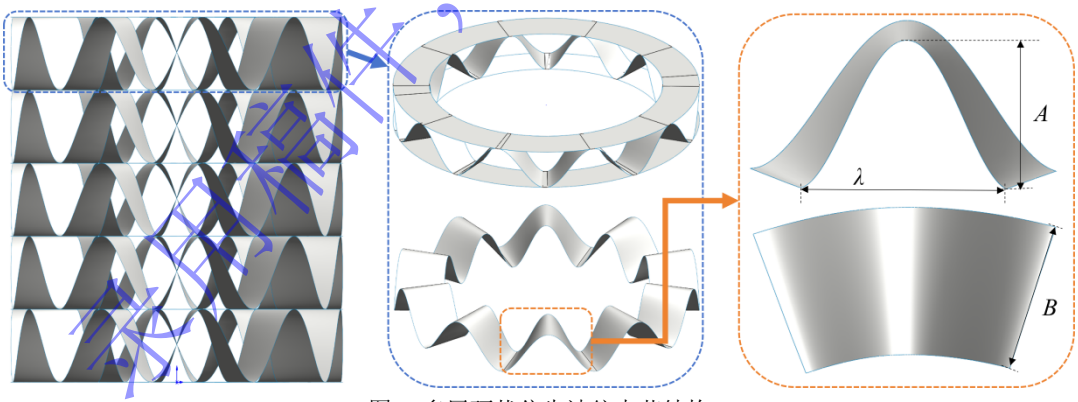


图 2 多层环状仿生波纹夹芯结构

Fig.2 Multi-layer Circular bionic corrugated sandwich structure

1.2 仿真方案与耐撞性指标

为系统揭示仿生多层环状波纹夹芯结构（BMCCS）的几何参数对其耐撞性能的影响规律，分别选取芯层高度 A、芯层宽度 B 以及壁厚 t 作为变量。在各自取值范围内 A=5～25　　mm，B=10～30 mm，t=0.1～0.9 mm，每个因素等间距 5 个水平，共计 125 个仿真模型。改变 A 会同时改变单层高度和 5 层结构的初始总高度 H_0，由于部分低芯层高度工况在压缩位移超过 0.7H_0 后继续压缩时载荷出现快速增加，呈现致密化特征。因此选取 0.7H_0 作为统一评价终点，可减小后段快速增载对各工况耐撞性指标比较的影响。在相同相对压缩程度下评价，而非采用相同绝对位移，所得参数效应包含胞

元构型、整体高度及绝对压缩行程变化的共同影响。本文选取以下三个常用耐撞性指标：最大载荷（$F_{\max}$）、比吸能（*SEA*）和压溃力效率（*CFE*），用于评价不同几何参数（高度 *A*、宽度 *B*、壁厚 *t*）下结构的耐撞性能。

能量吸收表示结构在压缩过程中吸收的总能量，即力-位移曲线下的积分面积，比吸能为单位质量结构所吸收的能量，用于衡量材料结构的质量效率：

$$EA=\int_0^d F(x)\mathrm{d}x,\quad SEA=\frac{EA}{m} \tag{1}$$

式中，$F(x)$为瞬时压缩力，d=0.7H_0为指标评价终点的压缩位移，m 为结构的总质量。*SEA* 值越高，表示结构在相同质量下吸能能力越强。

压溃力效率反映了结构在压缩过程中载荷的平稳程度。本文将其定义为平均载荷 F_{avg} 与压缩过程中出现的最大载荷 $F_{\max}$ 之比：

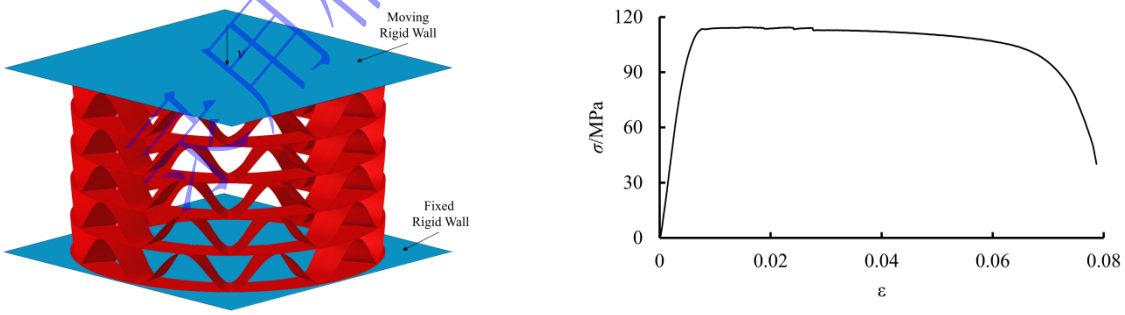
$$CFE=\frac{F_{\mathrm{avg}}}{F_{\max}},\quad F_{\mathrm{avg}}=\frac{EA}{d} \tag{2}$$

CFE 越接近 1，表明载荷波动越小，结构吸能过程越平稳。$F_{\max}$ 可能出现在初始屈服阶段，也可能出现在后续折叠或密实阶段，采用该定义可更全面地反映结构在整个压缩行程中的载荷波动特性。

1.3 有限元模型建立与验证

为了分析仿生多层环状波纹夹芯结构的耐撞性能，采用 Hypermesh 建立了有限元模型，如图 3(a)所示，并通过 LS-DYNA 进行求解。模型中芯层采用四节点 Belytschko-Tsay 壳单元（ELFORM=2），面内单点积分，厚度方向设置 5 个积分点（NIP=5）以准确捕捉塑性弯曲行为。芯层结构材料选用 AL1060，其本构采用双线性弹塑性模型（*MAT24），具体参数设置为：密度 ρ=2700 kg/m³，弹性模量 E=69 GPa，泊松比 μ=0.33，屈服强度 σ_{y}=90 MPa；隔板采用刚体材料（*MAT_RIGID，MAT20）。接触方面，芯层与隔板之间通过共享节点理想连接，定义“自动面-面接触”；芯层自身定义“自动单面接触”以模拟折叠过程中的自接触，胶接主要用于固定芯层与隔板，压缩吸能主要由芯层压溃实现，故未显式建立胶层模型。下隔板六个自由度全约束，上隔板通过刚性墙以 5 m/s 的初速度向下压缩夹层结构。

Song 等报道了 1060 铝的实测拉伸应力—应变曲线，见图 3(b)，其屈服强度为 85.9 MPa[36]；He 等研究中 1060 铝板的屈服强度为 95.3 MPa[37]。本文屈服强度 90 MPa 处于上述研究之间，上述文献仅作取值对照，图 3(b)为文献试样的实测曲线。



(a) BMCCS finite element model　　(b) Literature-reported experimental tensile curve of 1060 aluminum[36]

图 3 BMCCS 有限元模型与材料文献参考曲线

Fig.3 Finite element model of the BMCCS and literature-reported tensile curve

为验证有限元模型的网格无关性，采用四种网格尺寸（0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm 和 0.6 mm），在相同边界及加载条件下开展准静态压缩仿真。四种网格尺寸对应的 *SEA* 分别为

录用稿件，非最终出版稿

202.97、204.89、210.42 和 211.32 J/kg。结果表明，相邻网格间的 *SEA* 相对误差分别为：0.6 mm-0.5 mm 为 0.43%，0.5 mm-0.4 mm 为 2.62%，0.4 mm-0.3 mm 为 0.94%，所有误差均小于 5%，满足网格无关性要求。力-位移曲线（图 4）显示，四条曲线整体走势一致，其中 0.5 mm 与 0.6 mm 曲线几乎重合。综合考虑计算精度与效率，并确保能准确捕捉正弦波纹芯层的折叠变形，后续所有仿真模型均将采用 0.5 mm 的网格尺寸。

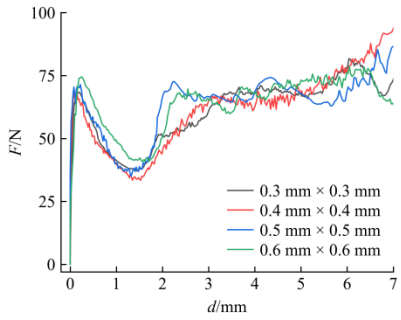


图 4 不同网格尺寸下的载荷随位移变化曲线

Fig.4 Load-displacement curves under different mesh sizes

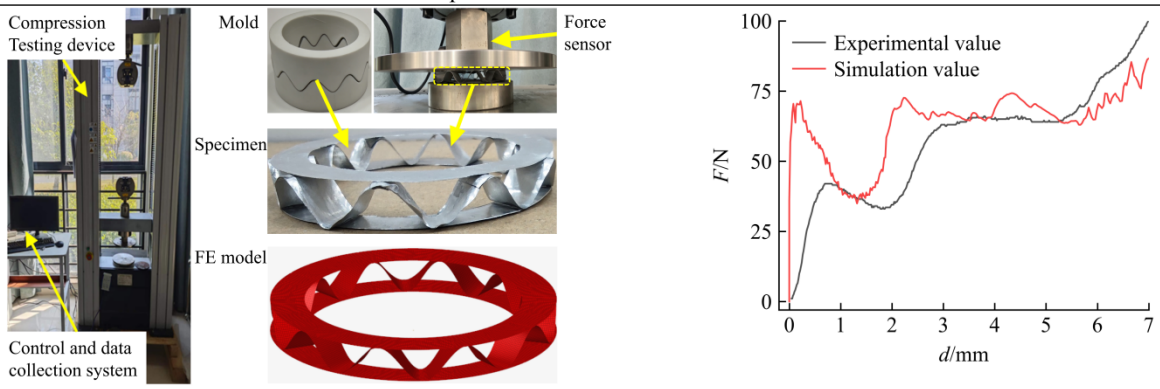
如图 5(a)所示，采用 3D 打印制备模具，模具内圆弧 λ=20mm，芯层高度 A=10 mm，宽度 B=10 mm。采用厚度为 0.1 mm 的铝箔逐个压制正弦环形芯层，其端部搭接后采用艾高金属专用透明快干胶闭环，再将芯层与上下环形隔板胶接，自然干燥后开展试验。胶接主要用于定位并防止芯层与隔板脱离，类似的芯层—面板胶接组装方法也用于三角波纹铝夹芯试件[26]。在拉伸试验机上开展准静态压缩试验，加载速度为 20 mm/min，压缩位移为结构总高度的 70%，试验机同步记录力-位移曲线，试验曲线取两组重复试验的平均结果，并沿用原数据的离散累计吸能处理。试件采用薄铝箔主要是考虑其延展性和成形便利性，用于构型的探索性验证；实际应用可根据防护需求选用更高强度的材料。

单层准静态验证模型采用 33.3 mm/s 加载速度，约为试验速度的 100 倍，以缩短显式计算时间。芯层动能与内能的最大比值约为 2.16%，低于本文采用的 5%准静态能量检查阈值[38]，因此采用该加速工况与准静态试验对照。

为了进行有限元仿真模型验证，在 Hypermesh 中建立与试验几何完全一致的 BMCCS 有限元模型，并将仿真结果与试验结果对比。由图 5(b)可知，仿真与试验的力-位移曲线整体趋势一致，均经历了线弹性段、屈服平台段及密实段。但仿真的初始峰值载荷明显高于试验值，可能与仿真采用加速加载有关，较高的加载速度可能使初始峰值偏大。在比吸能方面，试验与仿真的 *SEA* 分别为 209.03 J/kg 和 210.42 J/kg，相对误差为 0.66%。综上，所建立的有限元模型具有良好的预测精度，可用于后续多工况仿真分析。

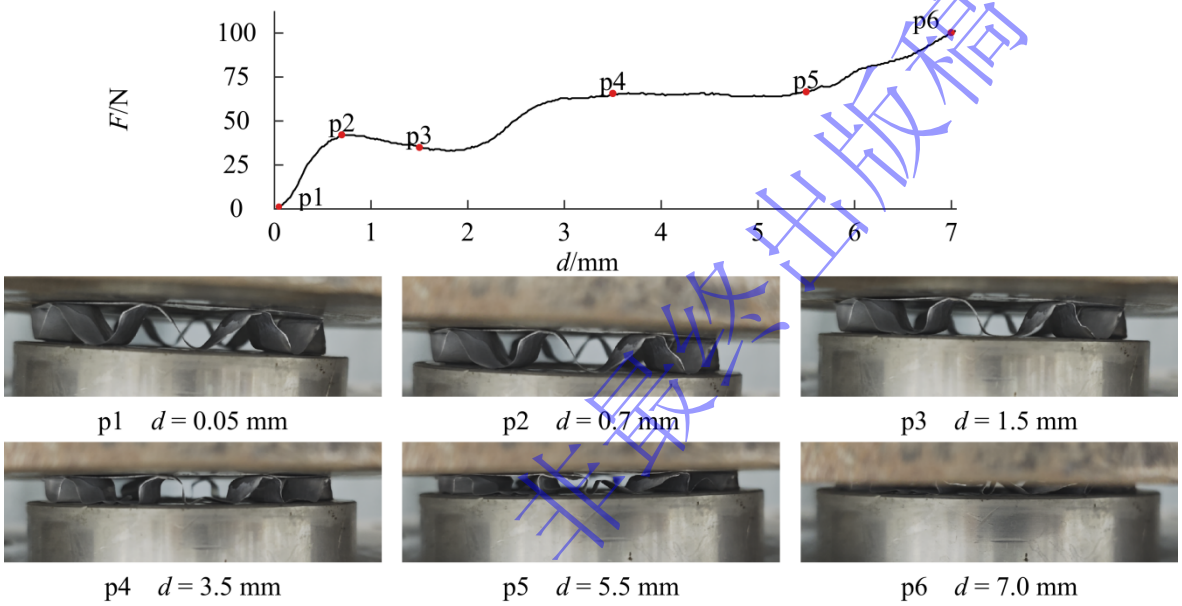
为进一步对应载荷响应与试件变形过程，图 5(c)从一段画面连续、可完整观察压溃过程的试验视频中提取 6 个关键帧。帧位移由加载速度和视频时间估算，仅与两次试验平均载荷曲线作阶段对应，不代表严格逐点同步。初始阶段试件保持完整；约 0.7 mm 处出现首个局部峰值并开始屈曲；约 1.5 mm 后峰值回落并发生后屈曲；约 3.5～5.5 mm 进入平台折叠和折叠堆积阶段；约 7 mm 时芯层高度显著降低并进入密实化。

录用稿件，非最终出版稿



(a) Specimen preparation and testing environment

(b) Experimental and simulation results



(c) Experimental load response and deformation sequence

图 5 试件制备、有限元模型验证及试验变形过程

Fig.5 Specimen preparation, FE validation and experimental deformation sequence

2 仿真结果分析

2.1 变形模式分析

为探究芯层几何参数对 BMCCS 轴向压缩下渐进屈曲行为的影响，本节分别围绕芯层高度 A、芯层宽度 B 与芯层壁厚 t 开展单因素参数分析。探究 A 的影响时，B=20 mm、t=0.5mm；探究 B 的影响时，A=15 mm、t=0.5 mm；探究 t 的影响时，A=15 mm、B=20 mm。如图 6 所示，显示了各参数变化下结构屈曲、局部失稳及胞元变形规律，图中颜色表示位移大小，单位为 mm。根据图示主导形态，将变形分为 I 类整体近均匀压缩型、II 类近似对称折叠型和 III 类局部非对称变形型，并在图中标注。

（1）芯层高度 A 对变形的影响

如图 6（a）所示，在所示压缩状态下，A=5 mm 对应 I 类整体近均匀压缩型，正弦胞元整体高度较低，以整体压扁为主，明显折叠较少；A=10、15 mm 对应 II 类近似对称折叠型，呈“几”字形变形，多层芯层共同参与较规整的折叠，弯折主要分布于波峰、波谷附近；A=20、25 mm 对应 III 类局部非对称变形型，局部扭曲和大幅弯折更突出，环向变形均匀性下降。三类的区别在于上述形态何者占主导，而非是否存在层间协同或局部弯折。

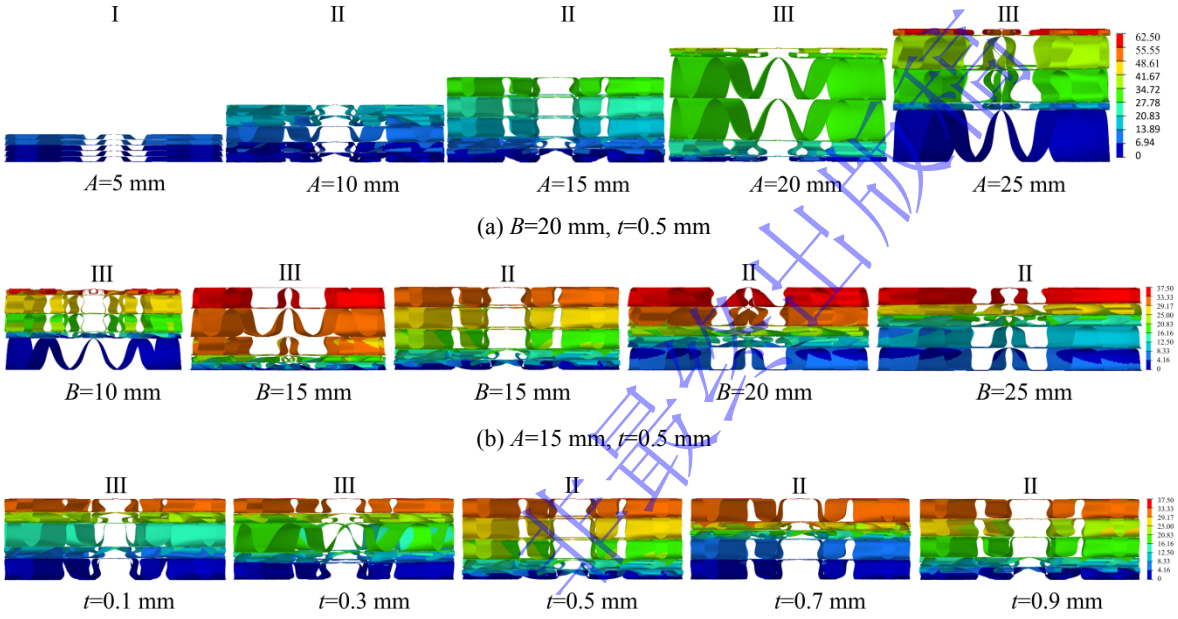
录用稿件，非最终出版稿

（2）芯层宽度 B 对变形的影响

如图 6（b）所示，在所示压缩状态下，B=10、15 mm 对应 III 类局部非对称变形型，较小径向有效宽度下的局部变形集中和胞元倾斜较明显；B=20、25、30 mm 对应 II 类近似对称折叠型，多层芯层共同参与折叠，图示形态较规整。较大 B 工况仍以折叠为主，未归为 I 类整体近均匀压缩型。倾斜和扭曲仅用于描述 III 类的具体表现，不另设类别。

（3）芯层壁厚 t 对变形的影响

如图 6（c）所示，在所示压缩状态下，t=0.1、0.3 mm 对应 III 类局部非对称变形型，薄壁芯层抗弯能力较弱，图示大幅弯折、扭曲及非对称变形集中较明显；t=0.5、0.7、0.9 mm 对应 II 类近似对称折叠型，较规整的多层折叠占主导。II 类中仍可存在局部弯折，但其非对称局部化不占主导。



(a) B=20 mm, t=0.5 mm

(b) A=15 mm, t=0.5 mm

(c) A=15 mm, B=20 mm

图 6 不同参数下 50%H_0 压缩状态的变形模式

Fig.6 Deformation modes at 50%H_0 under different parameters

综上，芯层高度、径向宽度及壁厚通过改变胞元刚度和变形空间影响主导压溃形态。上述分类对应图示 50%压缩状态，不同形态中可共存局部弯折。相比简单薄壁管，环状多胞芯层的弯折与接触过程更为复杂，本文尚未建立统一的理论吸能模型。图 7 给出 B=15 mm、t=0.5 mm 时 A=10、15、25 mm 的代表性载荷曲线，展示至 70%H_0。三条曲线均经历初始峰值及后屈曲响应，其中 A=10 mm 在初始峰值后具有较长的相对平台段，可为后文载荷平稳性分析提供直观对照。

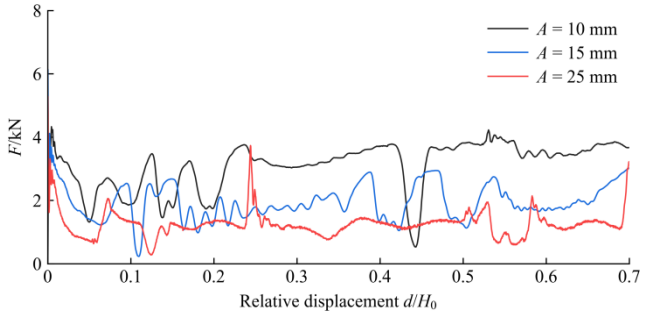


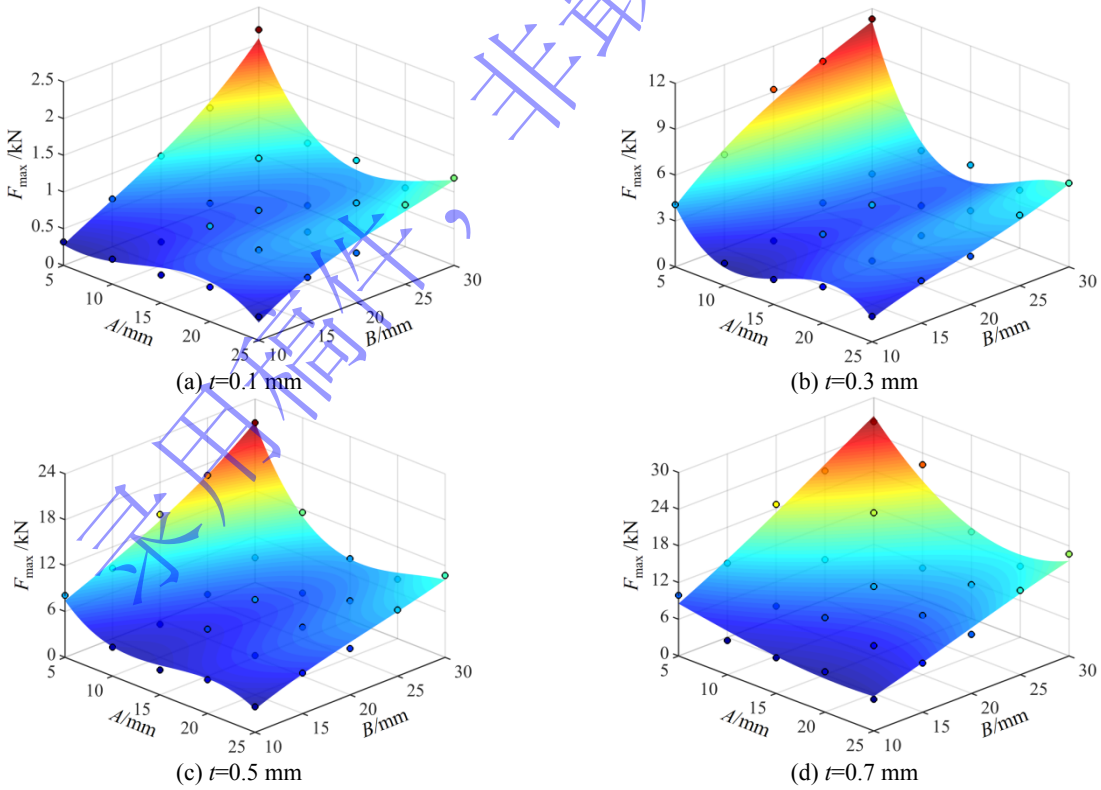
图 7 不同芯层高度下的代表性载荷曲线（B=15 mm，t=0.5 mm）

Fig.7 Representative load curves at different core heights (B=15 mm, t=0.5 mm)

2.2 最大载荷 F_{max}

不同壁厚 t 条件下，最大载荷 F_{max} 随芯层高度 A 和芯层宽度 B 的变化规律如图 8 所示。由图 8 可知，随着 A 的增大，F_{max} 平均变化率为-5.44%。但在不同区间内，其变化趋势存在明显差异，A 从 5 mm 增至 10 mm 时，F_{max} 的平均变化率为-30.99%，呈现大幅下降趋势；从 10mm 到 25 mm 时，F_{max} 平均变化率变为 3.08%，小幅回升。由此可见，F_{max} 随 A 增大而减小的趋势，主要由 A 从 5 mm 到 10 mm 阶段的显著下降所引起。这是因为当 A=5 mm 时，芯层过低无法形成有效的渐进折叠，载荷随压缩位移持续上升，导致 F_{max} 异常偏高；而当 A 从 10 mm 增至 25 mm 时，F_{max} 的平均变化率转为正值，尽管变化幅度较小，但 F_{max} 随 A 增大而呈现缓慢增加趋势。主要原因是在此高度范围内，最大载荷主要来源于初始峰值载荷，且初始峰值载荷随 A 增大而略有增加，符合预期。因此，在实际设计中，考虑 F_{max} 时，应避免使用过低的芯层（A=5 mm），而将芯层高度控制在 10 mm 以上，推荐优先选用 A=10~20 mm，该区间内 F_{max} 变化平缓且数值较低。

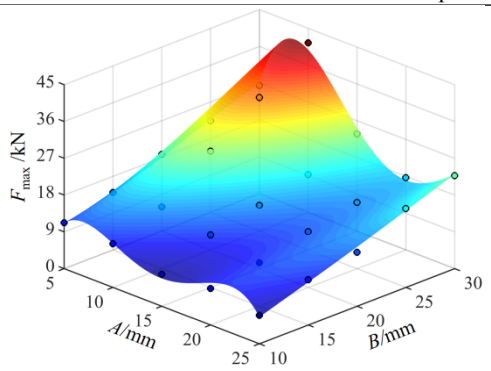
图 8 表明 F_{max} 随芯层宽度 B 的增加，整体呈显著上升趋势，总平均变化率达 31.21%，可见增大芯层宽度可有效提升结构极限承载能力。当 B=10~15 mm 时，F_{max} 平均变化率最高（48.43%），此时芯层径向刚度提升最为显著，曲面约束对局部屈曲的抑制作用快速增强，结构承载能力增幅最大；当 B 由 15 mm 增至 30 mm 时，F_{max} 平均变化率出现下降，承载能力提升速率逐步放缓。这是由于较小宽度区间内，芯层径向有效截面面积较小，结构易发生局部屈曲失稳，增大 B 可快速改善径向承载均匀性、抑制胞元非对称屈曲，因此 F_{max} 对 B 变化高度敏感；随 B 持续增大，芯层径向刚度已处于较高水平，进一步增加宽度对抑制屈曲、提升整体承载能力的效应减弱，导致 F_{max} 增幅逐渐降低，说明芯层宽度是调控结构极限承载能力的关键几何参数。因此，设计时若需控制最大载荷，应优先选用较小的芯层宽度，如 B=10~15 mm；若结构承载能力要求较高，则可适当增大 B。



(a) t=0.1 mm　(b) t=0.3 mm

(c) t=0.5 mm　(d) t=0.7 mm

录用稿件，非最终出版稿



(e) t=0.9 mm

图 8 不同壁厚 t 条件下，最大载荷 F_{max} 随芯层高度 A 和芯层宽度 B 的变化规律

Fig.8 The F_{max} varies with layer height A and width B under different wall thickness t conditions.

随着芯层壁厚 t 的增加，F_{max} 整体呈明显上升趋势，总平均变化率达 161.83%，表明增大芯层壁厚可大幅提升结构极限承载能力，是决定结构最大承载能力的核心几何参数。从分段平均变化率可知，t 对 F_{max} 的提升效应呈现快速衰减的阶段性特征：在 t=0.1~0.3 mm 区间内，F_{max} 平均变化率高达 443.58%，这是因为该阶段芯层壁厚较薄，正弦胞元抗弯刚度极低，结构易发生局部屈曲失稳，小幅增加壁厚可显著提升胞元抗弯性能，有效抑制局部失稳，因此极限承载能力对壁厚变化较为敏感；当 t 由 0.3 mm 增大至 0.9 mm 时，F_{max} 平均变化率降至 67.91%，承载能力提升速率放缓。结合前文芯层胞元变形模式分析可知，薄壁区间内芯层抗弯刚度处于较低水平，结构失稳风险高，壁厚增加对提升刚度与承载能力的效果显著；随壁厚持续增大，芯层抗弯刚度显著提升，结构整体承载模式趋于稳定，进一步增加壁厚对抑制屈曲、提升承载力的效果逐步减弱。综上所述，壁厚 t 对 F_{max} 具有决定性影响。在实际设计中，壁厚的选取应综合考虑最大载荷、比吸能及载荷平稳性，不宜仅为降低最大载荷而采用过小壁厚，若结构承载能力要求较高，可适当增加壁厚。

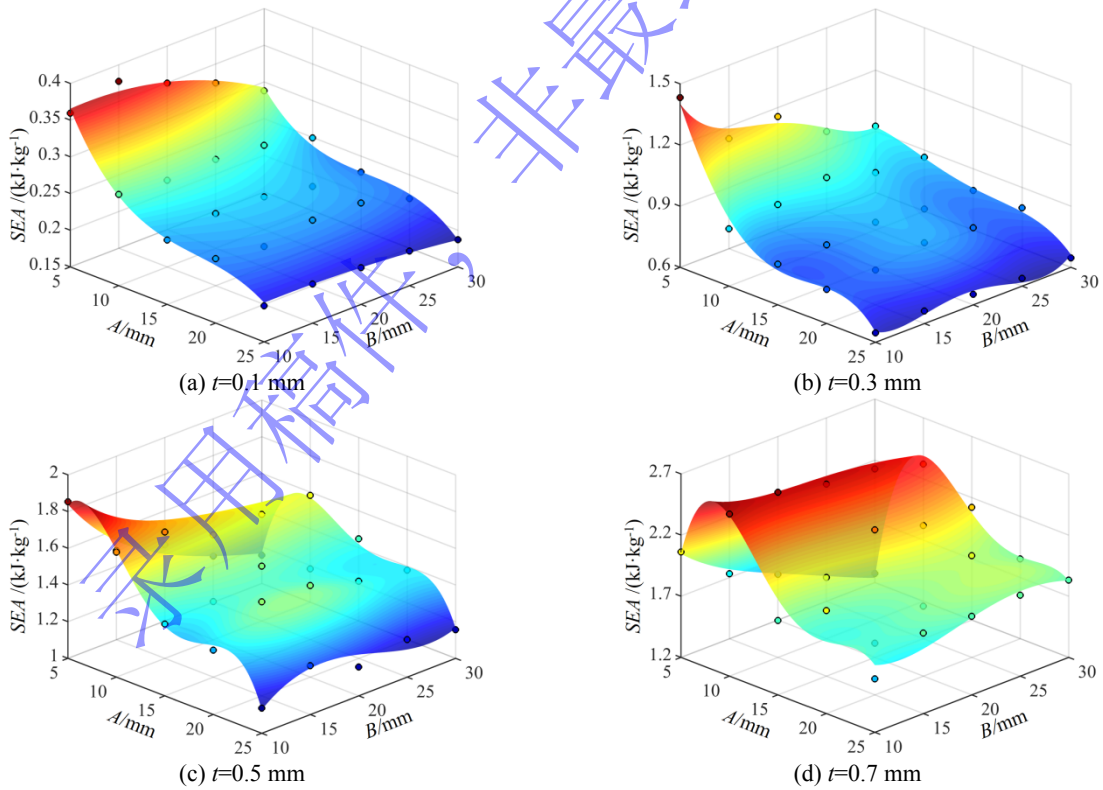
2.3 比吸能 *SEA*

图 9 显示了不同壁厚 t 条件下比吸能 *SEA* 随芯层高度 A 和芯层宽度 B 的变化规律。随着 A 的增加，*SEA* 整体上呈现先增后减的趋势。当 A 从 5 mm 增至 10 mm 时，*SEA* 平均变化率上升 28.25%；随后从 10 mm 到 25 mm 时的 *SEA* 平均变化率下降至 9.94%。正是这种“先急剧上升，后缓慢持续下降”的相互抵消，导致了整体变化率趋近于零（-0.39%）。*SEA* 从 5 mm 到 10 mm 上升幅度与后续累计降幅基本相当，原因是 A=5 mm 时芯层过于低矮，压缩过程中几乎没有发生折叠，芯层材料未能充分发挥塑性变形潜力，导致 *SEA* 处于较低水平。当 A 增至 10 mm 后，芯层获得了足够的变形空间，能够形成稳定的折叠模式，在质量增加有限的前提下大幅提升了能量吸收，从而使得 *SEA* 增大。当 A 增至 15 mm 以上时，总吸能 *EA* 增加有限，而结构质量随 A 增加更明显，因此 *SEA* 呈现了持续下降趋势。可以发现 A 对 *SEA* 的影响与壁厚 t 密切相关，呈现两种明显规律：当壁厚较小（t≤0.3 mm）时，*SEA* 随 A 增大而单调减小，这是由于此时芯层本身的吸能能力有限，增加高度主要带来质量增加，反而降低了比吸能；当壁厚较大（t≥0.5 mm）时，*SEA* 呈现先增加后减小的趋势，峰值出现在 A=10 mm 附近。这是因为，对于中等及以上壁厚，较低的芯层（A=5 mm）无法形成折叠，吸能能力差；而适中的芯层（A=10 mm）能够发生折叠，在质量增加不大的条件下显著提升吸能；继续增大 A 至 15 mm 以上时，质量增加带来的负作用超过吸能增益，导致 *SEA* 逐渐减小。综上所述，在 t≥0.5 mm 的所考察工况中，若以提高比吸能为设计目标，可优先考虑 A=10 mm 附近的芯层高度。

由图 9 可知，随着芯层宽度 B 由 10 mm 增大至 30 mm，*SEA* 总体平均变化率为-1.55%，表明增大芯层宽度对结构比吸能无显著提升效应。从分段平均变化率来看，B 对 *SEA* 的影响表现出阶段性差异：在 B=10~20 mm 区间内，*SEA* 平均变化率为 0.20%，此阶段 *SEA* 增加幅度极小；当 B 由 20 mm 增大至 30 mm 时，*SEA* 平均变化率降至-3.30%。结合芯层几何结构分析可知，在较小宽度区间

内，增大 B 虽提升了结构总能量吸收，但芯层质量同步增加，二者增幅基本持平，导致 SEA 变化微弱；中等宽度区间内，结构屈曲模式趋于稳定，有效塑性变形占比提升，SEA 小幅提高；而在大宽度区间，芯层径向承载面积显著增大，整体刚度偏高，正弦胞元的折叠变形能力下降，质量增加速率超过能量吸收提升速率，最终导致 SEA 随 B 增大明显减小。同时，SEA 随 B 增大的整体变化趋势保持一致，仅衰减幅度存在差异，表明芯层宽度超过临界值后，单位质量吸能增益显著衰减，过大的芯层宽度不利于提升单位质量吸能效率。因此，在实际设计中，建议将芯层宽度 B 控制在 10~20 mm，以兼顾吸能效率与其他性能需求。

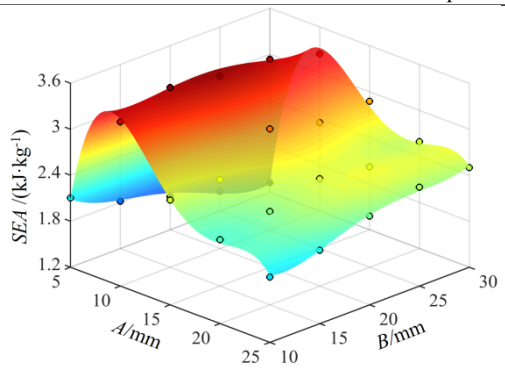
图 9 表明，芯层壁厚 t 由 0.1 mm 增大至 0.9 mm 时，SEA 整体呈显著上升趋势，总平均变化率达 92.78%，表明增大芯层壁厚可有效提升结构单位质量吸能能力，壁厚是调控结构质量吸能效率的关键几何参数。从分段平均变化率可知，t 对 SEA 的提升呈现明显的阶段性衰减特征：在 t=0.1~0.3 mm 区间内，SEA 平均变化率高达 235.03%，原因是该阶段芯层壁厚极薄，结构整体抗弯刚度不足，易发生局部非对称失稳，塑性折叠变形不充分，吸能效率较低，小幅提升壁厚即可显著增强胞元抗弯性能，优化屈曲变形模式，使正弦芯层的塑性耗散行为充分发挥，因此 SEA 对壁厚变化高度敏感；当 t 由 0.3 mm 增大至 0.9 mm 时，SEA 平均变化率降至 45.36%，这是由于随着 t 的增加，结构质量增加较快，因此比吸能增速减缓。结合变形分析，薄壁区间内芯层抗弯刚度偏低，失稳倾向性强，壁厚增量能够快速改善结构屈曲模式，单位质量吸能增益显著；随壁厚进一步增大，芯层刚度显著提升，结构逐步由柔性屈曲向刚性承载过渡，正弦胞元的塑性折叠空间被压缩，同时结构质量增加速率加快，导致比吸能的增加趋势逐步减弱。因此，综合考虑载荷限制与轻量化要求，推荐在满足最大载荷约束的前提下，尽可能选取中等壁厚 t=0.5~0.7 mm 以获得较高的 SEA 增益。



(a) t=0.1 mm　(b) t=0.3 mm

(c) t=0.5 mm　(d) t=0.7 mm

录用稿件，非最终出版稿



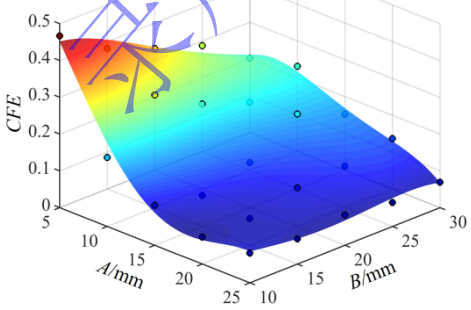
(e) t=0.9 mm

图 9 不同壁厚 t 条件下，比吸能 SEA 随芯层高度 A 和芯层宽度 B 的变化规律

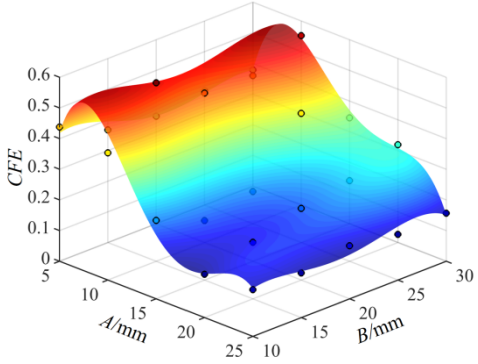
Fig.9 The SEA varies with layer height A and width B under different wall thickness t conditions.

2.4 压溃力效率 CFE

图 10 为不同壁厚 t 条件下，压溃力效率 CFE 随芯层高度 A 和芯层宽度 B 的变化规律。通过对比不同 A 下各工况的 CFE 值，发现整体上 CFE 随 A 增大而下降，总体平均变化率为-14.69%。当 A 从 5 mm 增至 10 mm 时，CFE 平均上升 9.86%，而随后从 10 mm 增至 25 mm 时，CFE 的平均变化率下降 22.88%。这种“先上升后下降”的规律，是由最大载荷与平均载荷在不同高度区间内的变化速率差异所导致。在 A 从 5 mm 增至 10 mm 阶段，尽管最大载荷与平均载荷均下降，且下降幅度几乎相等（相差仅 1.05%），但 CFE 却上升了 9.86%。这是因为在该区间内，平均载荷的相对降幅略小于最大载荷（即最大载荷下降得更快），导致 CFE 上升；当 A 从 10 mm 增至 25 mm 时，平均载荷持续大幅下降，而 F_{max} 转为缓慢增加，导致 CFE 减小。当 A=5 mm 时，CFE 的变化范围较大，在 0.20~0.76 之间，且随 t 增大而明显提高。表明在低芯层条件下，较大的壁厚能够显著改善载荷平稳性，平均载荷更接近最大载荷；当 A=10 mm 时，CFE 整体水平有所提升，尤其在中等壁厚区域（t=0.5 mm~0.7 mm）出现较高值。这是因为此时芯层开始形成稳定屈曲折叠，载荷曲线呈现较长的平台段（图 7），平均载荷相对较高。但当壁厚继续增加至 0.9 mm 时，CFE 反而下降至 0.59，说明此时后期折叠堆积导致载荷上升速度较快；当 A=15 mm 时，CFE 整体下降，大部分情况下低于 0.65，且薄壁小宽度下 CFE 极低，这是因为随着芯层高度增加，初始峰值载荷成为最大载荷，且后续载荷波动较小，但平均载荷因折叠单一而偏低，导致 CFE 下降；当 A≥20 mm 时，CFE 进一步下降，几乎均低于 0.6，且薄壁条件下常低于 0.2。这表明过高芯层虽然使最大载荷稳定在初始峰值载荷，但平均载荷随高度增加而显著降低，从而降低了 CFE。因此，若以载荷平稳性为目标，应将芯层高度控制在 A=10 mm 附近，并配合中等以上壁厚（t≥0.5 mm）以维持较高的平均载荷。

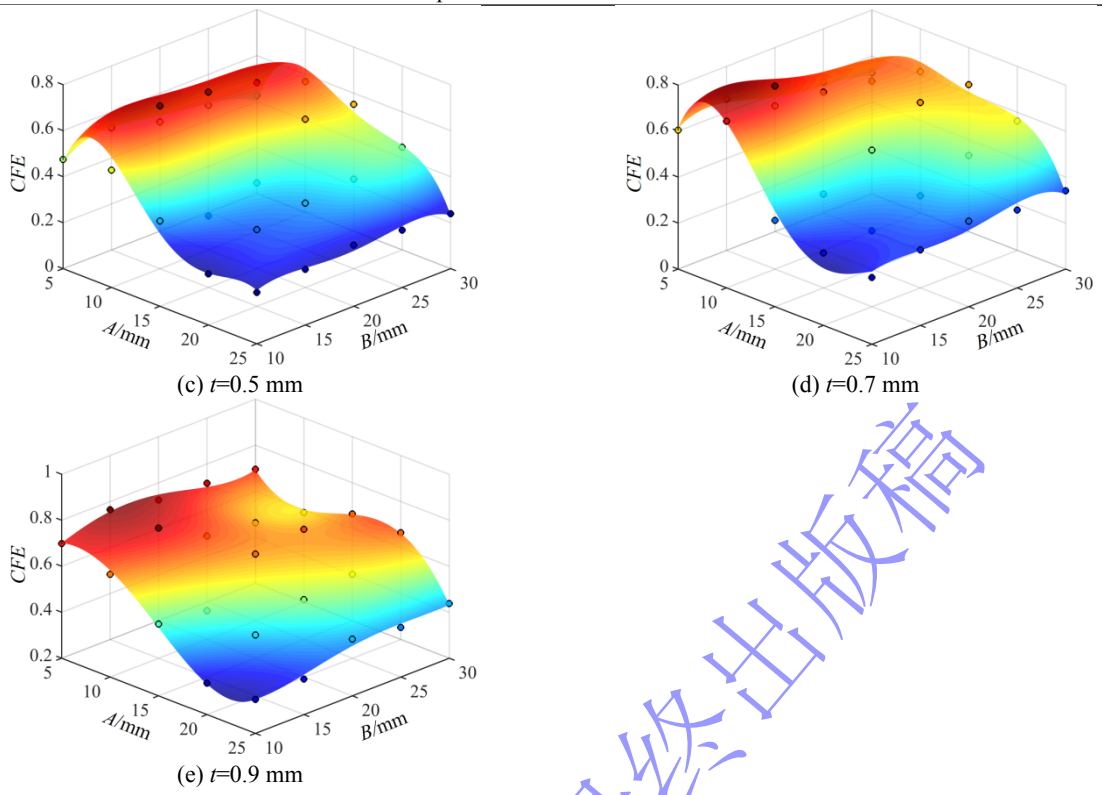


(a) t=0.1 mm



(b) t=0.3 mm

录用稿件，非最终出版稿



(c) t=0.5 mm　　(d) t=0.7 mm

(e) t=0.9 mm

图 10 不同壁厚 t 条件下，压溃力效率 *CFE* 随芯层高度 A 和芯层宽度 B 的变化规律

Fig.10 The *CFE* varies with layer height A and width B under different wall thickness t conditions.

由图 10 可知，随芯层宽度 B 由 10 mm 增大至 30 mm，结构 *CFE* 总平均变化率达 6.71%，表明增大芯层径向有效承载宽度能够有效改善载荷平稳性，提升结构压溃过程的载荷稳定性。从分段平均变化率可知，B 对 *CFE* 的提升效应存在显著的阶段性衰减特征：当 B 由 10 mm 增大至 20 mm 时，*CFE* 平均变化率为 9.22%，这是因为芯层宽度较低时，结构易发生局部非对称屈曲变形，压溃过程中载荷波动剧烈，适度增大 B 能够有效改善径向承载力分布均匀性，抑制局部集中失稳行为，缩小最大载荷与平均载荷的差值，进而显著提升载荷平稳性；当 B 由 25 mm 增大至 30 mm 时，*CFE* 平均变化率仅为 0.91%，表明继续拓宽芯层宽度对提升载荷平稳性的作用基本趋于饱和。值得注意的是，在芯层高度 A=20 mm~25 mm 区间内，*CFE* 随芯层宽度 B 增大呈现逐步增大的变化特征。这是由于过高的芯层高度导致结构局部屈曲失稳，*CFE* 数值极低；随着 B 逐步增大，整体压溃平稳性得到一定改善，*CFE* 随之小幅提升，但受高芯层高度带来的失稳效应制约，该区间 *CFE* 整体数值仍处于偏低水平。结合变形模式分析，在小宽度区间内（B=10 mm），芯层径向刚度不足，变形模式以局部非对称屈曲失稳为主；随着 B 持续增大，结构径向刚度提升，变形模式逐步转变为渐进屈曲，载荷波动大幅减弱；当宽度超过临界值后，结构整体承载模式趋于稳定，进一步增大宽度对改善载荷均匀性的效果减弱。同时，在不同 A 和 t 的组合下，*CFE* 随 B 增大的提升趋势基本保持一致，说明芯层宽度是调控结构压溃载荷平稳性的关键几何参数。因此，从载荷平稳性角度出发，可通过合理增大芯层宽度改善压溃过程的载荷波动，提升缓冲吸能过程的稳定性，在实际设计中，建议将 B 控制在 15 mm~20 mm，以获得较高的 *CFE* 且避免宽度过大带来的效率衰减。

随着芯层壁厚 t 增加，*CFE* 整体呈显著上升趋势，平均变化率达 45.66%，表明增大芯层壁厚可有效改善缓冲吸能过程的载荷平稳性。与芯层宽度 B 类似，t 对 *CFE* 的提升效应呈现明显的阶段性衰减特征：在 t=0.1 mm~0.3 mm 区间内，*CFE* 平均变化率高达 100.88%，该阶段芯层壁厚极薄，抗弯刚度不足，结构易发生局部非对称屈曲失稳，压溃过程中载荷波动剧烈，而小幅增加壁厚即可显著增强胞元抗弯性能，抑制局部集中失稳行为，优化径向承载力分布，大幅提升载荷平稳性。当 t

录用稿件，非最终出版稿

由 0.3 mm 增大至 0.9 mm 时，*CFE* 平均变化率降至 27.26%，载荷平稳性的提升速率逐步放缓。从屈曲变形与塑性耗散机制来看，薄壁区间内芯层抗弯刚度偏低，容易出现失稳，增加壁厚能够改变结构屈曲模式，使芯层塑性折叠变形更加均匀，有效降低载荷波动幅度；随壁厚持续增大，芯层刚度显著提升，结构屈曲模式趋于稳定，最大载荷与平均载荷的差值逐渐缩小，进一步增加壁厚对改善载荷均匀性的效果减弱。因此，建议在满足最大载荷约束的前提下，选取中等偏大壁厚（如 t=0.5 mm~0.7 mm），以兼顾冲击载荷的平稳性。

3 多目标参数优化

为实现仿生波纹芯层夹层结构的耐撞吸能潜力，实现较低最大载荷与高轻量化吸能效率的协同最优，本节基于 Kriging 代理模型与多目标粒子群优化算法，对芯层几何参数开展系统化优化设计。选取芯层高度 A、芯层宽度 B、芯层壁厚 t 为优化设计变量。结合前文全参数仿真结果，初步分析可知：当壁厚 t=0.1 mm 时，结构稳定性差、比吸能和压溃力效率较低，故壁厚范围选取时以 0.3 mm 为最小边界值。本研究以最小化最大载荷 $F_{\max}$ 及最大化比吸能 *SEA* 为核心优化目标，兼顾峰值载荷控制与轻量化吸能效率，$F_{\max}$ 和 *SEA* 分别反映峰值载荷与单位质量吸能，相关夹芯结构优化研究也采用这两个目标[9][28]。*CFE* 用于前文评价载荷波动，未将其作为优化目标或约束。优化数学模型如下：

$$\begin{cases} \min:\left[F_{\max}\left(A,B,t\right),-SEA\left(A,B,t\right)\right] \\ s.t.\,5\ \text{mm}\le A\le 25\ \text{mm},10\ \text{mm}\le B\le 30\ \text{mm},0.3\ \text{mm}\le t\le 0.9\ \text{mm} \end{cases} \tag{3}$$

式中，$F_{\max}(A,B,t)$为最大载荷，最小化该指标可降低冲击下载荷，减小瞬时过载对防护对象的损伤；-*SEA*(A,B,t)为比吸能的负值，最小化该值等同于最大化比吸能，提升结构单位质量吸能效率，实现结构的轻量化设计。

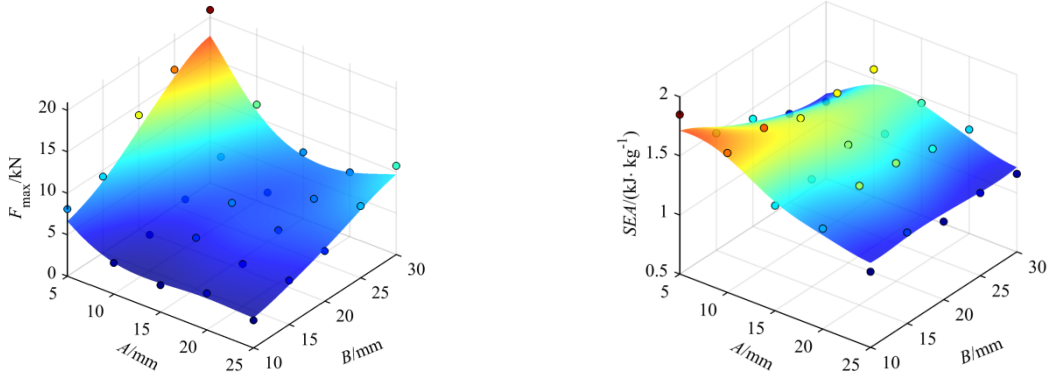
3.1 试验设计与代理模型

直接采用有限元仿真进行多目标迭代优化会产生极高的计算成本，因此基于试验构建代理模型，替代有限元模型实现高效、精准的寻优计算。采用 Kriging 代理模型拟合设计变量与耐撞性能指标的非线性映射关系，该模型基于高斯随机过程理论，对非线性、小样本数据的拟合精度与泛化能力优异[39]，能够精准表征结构几何参数与耐撞性能间的复杂关联规律，是结构耐撞性优化领域的主要代理模型。以芯层几何参数 A、B 和 t 为输入变量，以最大载荷 $F_{\max}$ 和比吸能 *SEA* 为输出响应，构建 Kriging 高斯回归代理模型。为定量评价代理模型的拟合误差，采用平均相对误差 ε_a 与均方根误差 s_e 两项指标进行评价，计算公式如下：

$$\varepsilon_a=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left|\frac{f_{fea,i}\left(x\right)-f_{a,i}\left(x\right)}{f_{fea,i}\left(x\right)}\right|\times 100\%\ ,\qquad s_e=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}\left(f_{fea,i}\left(x\right)-f_{a,i}\left(x\right)\right)^2}{k}} \tag{4}$$

式中，$f_{fea,i}(x)$为有限元仿真值；$f_{fa,i}(x)$为代理模型预测值；k 为样本数量。精度验证结果中，$F_{\max}$ 和 *SEA* 的平均相对误差 ε_a 分别为 9.73%和 7.34%，均方根误差 s_e 处于较低水平，分别为 1.57 kN（$F_{\max}$）和 0.17 kJ/kg（*SEA*），表明构建的 Kriging 高斯回归代理模型能够拟合两项优化指标的变化趋势。选取中间壁厚 t = 0.5 mm，在 A、B 各 5 个水平的组合上展示 $F_{\max}$ 与 *SEA* 的代理预测曲面及 25 个有限元样本点，如图 11 所示。散点属于建模样本，用于直观展示拟合效果。

录用稿件，非最终出版稿



(a) Maximum load F_{max} (b) Specific energy absorption *SEA*

图 11 t=0.5 mm 时 F_{max} 与 *SEA* 的 Kriging 代理曲面及有限元样本点

Fig.11 Kriging surrogate surfaces and FE sample points for F_{max} and *SEA* at t=0.5 mm

3.2 优化结果分析

采用多目标粒子群优化（MOPSO）算法对上述 Kriging 模型进行全局寻优。MOPSO 由 Coello 等提出，其核心思想是引入 Pareto 支配关系和外部存档机制来处理多目标优化问题[40]。在算法迭代过程中，采用自适应网格法对外部存档进行维护，以保证 Pareto 前沿解的多样性[41]。

经迭代计算，得到 Pareto 最优解集。解集分布规律表明，最大载荷 F_{max} 与比吸能 *SEA* 存在显著的正相关制约关系，即提升比吸能通常会导致最大载荷增大，降低最大载荷会造成吸能效率下降（图 12），无单一参数组合可实现两项指标同步最优，采用最小距离法选取最优解，该方法已广泛应用于多目标优化问题的决策过程中[42]。

优化后获得的最优几何参数为：A=10.98 mm，B=10.32 mm，t=0.40 mm；对应耐撞性能指标值分别为 F_{max}=2.49 kN 和 *SEA*=1.25 kJ/kg。为验证优化结果与代理模型的可靠性，将该几何参数代入原有限元模型开展仿真分析，对比代理模型预测值与有限元仿真真实值。结果显示，最大载荷相对误差为 1.27%，比吸能相对误差为 0.63%，两项优化指标在该最优点的相对误差均小于 2%。综上所述，所获得的最优参数组合在有效控制最大载荷的同时，保证了结构具备较高的比吸能，可作为 BMCCS 结构设计的推荐方案。

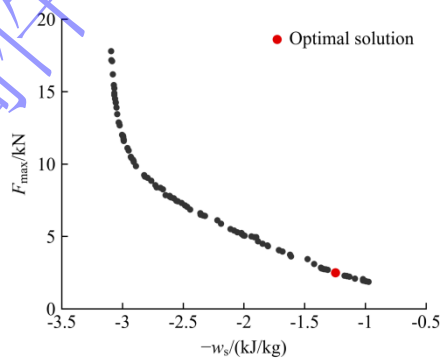


图 12 Pareto 前沿解

Fig.12 Solutions on the Pareto front

4 结 论

本文基于雀尾螳螂虾虾鳌指节的微观结构特征，设计了一种新型仿生多层环状波纹夹芯结构（BMCCS），开展了芯层高度 A、芯层宽度 B 及壁厚 t 对最大载荷 F_{max}、比吸能 *SEA* 及压溃力效率

录用稿件，非最终出版稿

CFE 的影响分析，并基于 Kriging 代理模型与多目标粒子群优化算法进行了结构的多目标优化设计。本文主要结论如下：

（1）几何参数对结构耐撞性能具有显著调控作用。芯层壁厚对承载能力、吸能效率与载荷平稳性影响最为突出，壁厚增大可显著提升结构刚度与吸能水平，但比吸能的增速随壁厚增大而减缓；芯层高度与宽度通过改变胞元变形模式影响吸能特性，中等高度与适中宽度区间更有利于实现结构的渐进压溃变形。

（2）芯层高度 A 对耐撞性能具有显著影响。当 A=5 mm 时，结构无法形成稳定的折叠，载荷随压缩位移持续上升，导致 F_{max} 偏高；当 A≥10 mm 后，变形以折叠模式主导，F_{max} 显著降低。在 t≥0.5 mm 的工况中，A=10 mm 附近时 *SEA* 较高；芯层宽度 B 增大时，F_{max} 单调上升，总平均变化率为 31.21%，但增加速率随宽度增加而逐渐减缓。*SEA* 对 B 不敏感，仅在 B>20 mm 后出现约 3%的轻微下降。A 较大时，*CFE* 随 B 增大而上升，但在 B≥25 mm 后增益趋于饱和；壁厚 t 是控制耐撞性能最敏感的参数。F_{max} 随 t 增大而增加，总平均变化率为 161.83%，*SEA* 和 *CFE* 也随 t 增大而显著提升。然而，过大的壁厚会急剧增加结构质量和冲击载荷，因此需在轻量化、低载荷与高吸能效率之间权衡。

（3）基于 Kriging 代理模型与 MOPSO 算法的多目标优化获得了 Pareto 前沿。采用最小距离法选取的最优解为：A=10.98 mm，B=10.32 mm，t=0.40 mm，对应 F_{max}=2.49 kN，*SEA*=1.25 kJ/kg。有限元验证显示，F_{max} 和 *SEA* 的相对误差分别为 1.27%和 0.63%，表明该最优解的代理模型结果与有限元结果相近。

综上所述，本文提出的仿生多层环状波纹夹芯结构具有良好的能量吸收能力，通过合理的参数匹配可实现低冲击载荷与高吸能效率的协同优化。未来可进一步研究多层梯度分布、复合填充材料等对结构耐撞性能的影响。本研究前期已开展单层双向空间波纹夹芯结构研究，后续研究将考虑其三维多层拓展。

参考文献

[1] ZHOU J F, ZOU M, NG B F, et al. Emerging sinusoidal structures for energy absorption: mechanisms, optimizations and applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 306: 112759. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112759.

[2] BIRMAN V, KARDOMATEAS G A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142: 221-240. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.027.

[3] LIU Y S, QI Y C, SUN H, et al. Bionic design of thin-walled tubes inspired by the vascular structure of bamboo[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 186: 110689. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110689.

[4] LI Y S, HU D Y, YANG Z Y. Crashworthiness design of a sponge-inspired multicell tube under axial crushing [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 244: 108070. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.108070.

[5] LIU Y S, ZOU M, QI Y C, et al. Bionic design of thin-walled bilinear tubes with excellent crashworthiness inspired by glass sponge structures [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2024, 19(4): 046018. DOI: 10.1088/1748-3190/ad580a.

[6] LI J X, SUI C, SANG Y N, et al. A multi-bionic design strategy for modular energy absorption system based on interlocking suture integrated with Bouligand-like arranged perforations [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205: 112553. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112553.

[7] 霍鹏, 许述财, 范晓文, 等. 鹿角骨单位仿生薄壁管斜向冲击耐撞性研究 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(11): 113102. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0035.

HUO P, XU S C, FAN X W, et al. Oblique impact resistance of a bionic thin-walled tube based on antler osteon [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(11): 113102. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0035.

录用稿件，非最终出版稿

[8] LI P F, XIAO J M. Crashworthiness design and multi-objective optimization of bionic thin-walled hybrid tube structures [J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2024, 139(1): 999-1016. DOI: 10.32604/cmes.2023.044059.

[9] 黄晗, 许述财, 陈姮. 仿生波纹夹层结构耐撞性分析及优化[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(8): 083102. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0275.
HUANG H, XU S C, CHEN H. Crashworthiness analysis and optimization of bionic corrugated sandwich structures[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(8): 083102. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0275.

[10] WANG Z X, CHEN X J, TIAN S B, et al. An origami-inspired N-type core for all-composite sandwich construction: enhanced mechanical performance and failure mechanisms [J]. Composite Structures, 2026, 377: 119903. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119903.

[11] SHU C F, HOU S J, ZHANG Y X, et al. Crashworthiness analysis and optimization of different configurations multi-layered corrugated sandwich panels under crush loading [J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2021, 23(7): 2901-2922. DOI: 10.1177/1099636220909755.

[12] SEFIDI M, TAGHIPOOR H, DAMGHANI NOURI M. Experimental crashworthiness analysis of corrugated-core sandwich panels under impact loading [J]. Ships and Offshore Structures, 2024, 19(12): 2190-2203. DOI: 10.1080/17445302.2024.2329864.

[13] 朱源, 张建勋, 秦庆华. 金属正交波纹夹芯结构的动态压缩响应 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(1): 013101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0038.
ZHU Y, ZHANG J X, QIN Q H. Dynamic compressive response of metal orthogonal corrugated sandwich structure [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(1): 013101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0038.

[14] LIU P, SU Y J, LIU S H, et al. Refined modeling and damage behavior of honeycomb sandwich structure with insert under pull-out and shear loading [J]. Applied Composite Materials, 2026, 33: 80. DOI: 10.1007/s10443-026-10454-5.

[15] CHEN Y L, JIN Z Y, KANG W B, et al. 3D printed bio-inspired self-similar carbon fiber reinforced composite sandwich structures for energy absorption [J]. Composites Science and Technology, 2024, 248: 110453. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110453.

[16] LI B, LIU H, ZHANG Q, et al. Crushing behavior and energy absorption of a bio-inspired bi-directional corrugated lattice under quasi-static compression load [J]. Composite Structures, 2022, 286: 115315. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115315.

[17] CHEN J X, ZHANG X M, OKABE Y, et al. Beetle elytron plate and the synergistic mechanism of a trabecular-honeycomb core structure [J]. Science China Technological Sciences, 2019, 62: 87-93. DOI: 10.1007/s11431-018-9290-1.

[18] DENG J Q, LIU T, CHEN L M, et al. A hybrid soft-structure interaction metastructure combining bio-inspired sandwich structure with shear stiffening gel for advanced dynamic crushing performance [J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 306: 112831. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112831.

[19] CUI C Y, CHEN L, FENG S, et al. Novel cuttlebone-inspired hierarchical bionic structure enabled high energy absorption [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 186: 110693. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110693.

[20] ZHANG W X, ZHOU J, WANG J Z, et al. The effect of core configurations on the energy-absorbing behaviour of all-composite sandwich structures [J]. Structures, 2025, 77: 108821. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108821.

[21] TAGHIZADEH S, MACCONI L, CONCLI F. Structural integrity and mechanical characterization of novel lightweight bio-inspired composite sandwich panels additively manufactured using multi jet fusion [EB]. Research Square, 2025. DOI: 10.21203/rs.3.rs-7497852/v1.

[22] GUO J Z, ZHOU Q, YUAN Y H, et al. Bioinspired gradient heterostructured 3D woven sandwich composites: Design strategy and energy absorption [J]. Composite Structures, 2026, 383: 120165. DOI: 10.1016/j.compstruct.2026.120165.

[23] KUMAR J H, RAMAKRISHNAN R, ELKASEER A, et al. Low-velocity impact behavior of 3D printed sandwich composite with polylactic acid–micro-crystalline cellulose bio-inspired xylotus lattice core: energy absorption and crashworthiness [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2026, 35(1): 133-152. DOI: 10.1007/s11665-025-11518-6.

[24] HA N S, LU G X, XIANG X M. Energy absorption of a bio-inspired honeycomb sandwich panel [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54: 6286-6300. DOI: 10.1007/s10853-018-3163-x.

[25] CHEN N, WANG R X, YANG X, et al. Mechanical response and parameter optimization of bionic sandwich energy absorption structure with double sinusoidal corrugated level dislocation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2025, 239(14): 7108-7118. DOI: 10.1177/09544070241309398.

[26] YANG X F, MA J X, SHI Y L, et al. Crashworthiness investigation of the bio-inspired bi-directionally corrugated core sandwich panel under quasi-static crushing load [J]. Materials & Design, 2017, 135: 275-290. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.09.040.

录用稿件，非最终出版稿

[27] YAN Q H, HUANG H, XU S C, et al. Crashworthiness analysis and multi-objective optimisation of a multilayer bio-inspired sandwich structure under impact load [J]. International Journal of Crashworthiness, 2025, 30(6): 659-673. DOI: 10.1080/13588265.2025.2492963.

[28] HUANG H, YANG X T, YAN Q H, et al. Crashworthiness analysis and multiobjective optimization of bio-inspired sandwich structure under impact load [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 172: 108840. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108840.

[29] 韩思豪, 李春雷, 苏步云, 等. 机器学习驱动的折纸超材料夹芯结构低速冲击响应预测及多目标优化[J]. 爆炸与冲击, 2026, 46(5): 051441. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0282.

HAN S H, LI C L, SU B Y, et al. Machine learning-driven low-velocity impact response prediction and multi-objective optimization of origami metamaterial sandwich[J]. Explosion and Shock Waves, 2026, 46(5): 051441. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0282.

[30] 陈万芬, 王宇嘉, 林炜星. 组合加点准则的代理辅助多目标粒子群优化[J]. 电子科技, 2022, 35(12): 26-34, 56. DOI: 10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2022.12.004.

CHEN W F, WANG Y J, LIN W X. Surrogate assisted multi-objective particle swarm optimization based on combined infill sampling criterion[J]. Electronic Science and Technology, 2022, 35(12): 26-34, 56. DOI: 10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2022.12.004.

[31] MUKHTAR A, MD YASIR A S H, MOHAMED NASIR M F. A machine learning-based comparative analysis of surrogate models for design optimisation in computational fluid dynamics[J]. Heliyon, 2023, 9(8): e18674. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18674.

[32] PATEK S N, KORFF W L, CALDWELL R L. Deadly strike mechanism of a mantis shrimp[J], Nature, 2004, 428(6985): 819-820. DOI:10.1038/428819a.

[33] WEAVER J C, MILLIRON G W, MISEREZ A, et al., The stomatopod dactyl club: a formidable damage-tolerant biological hammer[J], Science, 2012, 336 (6086): 1275–1280. DOI: 10.1126/science.1218764.

[34] YARAGHI N A, GUARÍN-ZAPATA N, GRUNENFELDER L K, et al. A sinusoidally architected helicoidal biocomposite[J]. Advanced Materials, 2016, 28(32): 6835-6844. DOI: 10.1002/adma.201600786.

[35] 姜旭涛, 黄志辉, 陈坤亮. 基于 HyperMesh 和 ANSYS 的波形弹簧变形规律及力学性能研究[J]. 西华大学学报（自然科学版）, 2023, 42(2): 91-97. DOI: 10.12198/j.issn.1673-159X.4376.

JIANG X T, HUANG Z H, CHEN K L. Research of deformation law and mechanical properties of wave spring based on HyperMesh and ANSYS[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2023, 42(2): 91-97. DOI: 10.12198/j.issn.1673-159X.4376.

[36] SONG Y H, XU Y, CHEN J X, et al. Flexural properties of aluminum middle-trabecular beetle elytron plates with a large height-to-thickness ratio core[EB]. Research Square, (2023-11-13). DOI: 10.21203/rs.3.rs-3590246/v1.

[37] HE Y, YANG L, DANG J, et al. Evaluation of shear and peel strength of Al1060 single-lap and T-lap joints produced by rotated clinching process with twin rotating punches[J]. Materials, 2022, 15(12): 4237. DOI: 10.3390/ma15124237.

[38] BAROUTAJI A, GILCHRIST M D, SMYTH D, et al. Analysis and optimization of sandwich tubes energy absorbers under lateral loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 82: 74-88. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.01.005.

[39] MARREL A, IOOSS B. Probabilistic surrogate modeling by Gaussian process: A review on recent insights in estimation and validation[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2024, 247: 110094. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110094.

[40] COELLO COELLO C A, TOSCANO PULIDO G, SALAZAR LECHUGA M. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279. DOI: 10.1109/TEVC.2004.826067.

[41] LI L, LI G P, CHANG L. A many-objective particle swarm optimization with grid dominance ranking and clustering[J]. Applied Soft Computing, 2020, 96: 106661. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106661.

[42] CHIU W Y, YEN G G, JUAN T K. Minimum Manhattan distance approach to multiple criteria decision making in multiobjective optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2016, 20(6): 972-985. DOI: 10.1109/TEVC.2016.2564158.

（责任编辑　爆炸与冲击）

录用稿件，非最终出版稿