

层级仿生三明治结构的能量吸收研究

冯雅¹, 赵志勇^{2a}, 方园^{2b}, 刘洋洋^{2a*}

(1. 绍兴职业技术学院 信息工程学院, 浙江 绍兴 312000;

2. 安徽农业大学 a. 工学院 b. 园艺学院, 合肥 230036)

摘要: **目的** 针对碰撞防护问题, 基于仿生设计理念, 提出一种层级仿生三明治吸能缓冲防护结构。**方法** 将生物材料的子层级结构特征融入三明治结构设计, 利用3D打印技术成功制备热塑性塑料仿生三明治试件。**结果** 进行10组准静态压缩试验测试, 结果表明, 该结构的比吸能最大值为5.48 J/g, 峰值载荷和平均压溃载荷最大值分别为25.77和16.21 kN, 压缩载荷效率最大值为0.67。相较于对照组, 具有子层级特征的仿生三明治结构在承载能力和能量吸收方面均显著提升。进一步研究发现, 随着结构厚度的增加, 比吸能、峰值载荷及平均压溃载荷呈上升趋势, 但压缩载荷效率随之降低。**结论** 子层级结构参数对力学性能的调控作用显著; 外廓尺寸调整不仅改变了结构的刚度特性, 还导致压缩载荷的非线性变化, 可为安全防护材料的力学仿生设计提供新的参考依据。

关键词: 仿生设计; 三明治结构; 吸能缓冲; 力学性能

中图分类号: TB33; TB34

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)07-0270-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.07.032

Energy Absorption of Layered Bionic Sandwich Structures

FENG Ya¹, ZHAO Zhiyong^{2a}, FANG Yuan^{2b}, LIU Yangyang^{2a*}

(1. College of Information Engineering, Shaoxing Vocational and Technical College, Zhejiang Shaoxing 312000, China;

2. a. College of Engineering, b. College of Horticulture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

ABSTRACT: In order to solve the problem in collision protection, the work aims to propose a layered bionic sandwich energy absorption and buffer protection structure based on the bionic design concept. The sub-layer structure of biomaterials was integrated into the sandwich configuration design, and the thermoplastic bionic sandwich samples were successfully prepared by 3D printing technology. After 10 groups of quasi-static compression tests, the results showed that the maximum specific energy absorption of the structure was 5.48 J/g, the maximum peak load and the maximum average crushing load were 25.77 and 16.21 kN, respectively, and the maximum compression load efficiency was 0.67. Compared with the control group, the bionic sandwich structure with sub-layer features had a significant increase in load carrying capacity and energy absorption. It was found that with the increase of structure thickness, the specific absorption energy, peak load and average crushing load increased, but the compression load efficiency decreased. The sub-layer structure parameters have a significant effect on mechanical properties. The adjustment of the outer dimension not only changes the stiffness characteristics of the structure, but also causes the nonlinear change of the compression load. This study provides a new reference for the mechanical bionic design of safety protection materials.

KEY WORDS: bionic design; sandwich structure; absorption and buffer; mechanical property

收稿日期: 2024-12-10

基金项目: 国家自然科学基金 (32401687)

*通信作者

目前, 轻质三明治夹芯结构广泛应用于航空航天、汽车、船舶等领域, 是未来材料科学与工程领域的重要研究方向。仿生三明治结构作为一种受自然界生物结构启发的设计, 具有轻质、高强度和优异的能量吸收特性, 在工程结构中的应用潜力日益凸显^[1-3]。

国内学者开展了三明治结构研究, 郝纪波等^[4]提出一种基于仿生獠牙分层结构设计理念的三角形伞状微结构 (TUCS) 负泊松比 (NPR) 三明治结构, 并通过准静态压缩试验验证力学模型及有限元仿真的准确性; 王海文等^[5]采用基于高垂直刚度叶表皮细胞壁的仿生三明治结构 (bio-ITCLC), 构建涤纶纤维层复合材料的仿生夹层结构模型, 分析冰雹形状、撞击速度及重复撞击对该结构力学行为及动态损伤的影响, 可知 bio-ITCLC 结构在冰雹撞击下呈现不同损伤模式, 且重复撞击会扩大累积损伤范围。以上研究证明三明治结构展现出良好的强度和抗变形能力, 可用于防护材料。Yu 等^[6]开发一种具有新型 BEP 芯结构的夹层板并进行四点弯曲试验, BEP 在试验中表现出较强的延展性; Chen 等^[7]通过 3 个基本形状单元 (曲线、圆和六边形) 构建仿生分形结构, 并研究受蛇形、竹子和蜂窝启发的分层自相似三明治结构的非线性力学响应; Zhang 等^[8]以红耳滑龟为原型, 对泡沫硅橡胶夹层结构进行仿生三明治结构设计, 结果表明, 该结构具有更好的抗冲击性, 更符合结构轻量化的要求。基于生物组织中的材料分布特性, 一些学者对具有填充材料的增强型轻质三明治结构胞元进行研究。Su 等^[9]提出一种同时具有矩形管和聚氨酯泡沫的三明治结构, 即矩形管包覆泡沫填充夹层结构, 以协同增强夹层结构, 外包矩形管加强了夹层结构, 避免整个结构在小应变下破坏; Tao 等^[10]提出一种增强型体心立方晶格三明治结构, 并分析几何参数和相对

密度对夹层结构变形机理和力学性能的影响, 该结构能够有效降低晶格结构在节点处的应力集中, 提高结构的能量吸收能力。

本研究深入挖掘并进一步提升三明治夹芯复合结构的应用潜力, 通过将仿生子层级特征融入三明治结构设计, 利用增材制造技术成功制备热塑性塑料的仿生三明治结构, 并通过准静态压缩试验对其力学性能进行深入研究。

1 仿生结构设计

仿生设计通过模仿自然界中生物体的优化结构与功能, 开发出兼具高强度、高韧性以及轻质化等优异特性的新型力学结构。三明治夹芯复合结构作为一种典型的轻质材料, 为充分挖掘并进一步提升其应用潜力, 本研究提出一种创新性的设计思路, 即将仿生子层级特征融入三明治夹芯复合结构设计。

肌腱作为连接软组织肌肉与硬组织骨骼的重要结缔组织, 展现出高度的纤维化与结构特性, 其结构特征从微观至宏观层面均可细分为多个层级。基于此原理, 通过对三明治结构中的胞元进行子层级拓展, 在多余空间内生成新的子胞元, 从而衍生出一种新颖的仿生三明治结构, 见图 1, 其中图 1b 为三明治结构设计初始方案, 图 1c 为三明治结构仿生设计方案。为评估所提出的仿生三明治结构的力学性能, 本研究精心设计 10 组试件方案, 如图 2 所示。其中, 第 1~8 组试件均具备相同的外廓尺寸, 具体为长度 $L=40\text{ mm}$, 高度 $H=20\text{ mm}$, 宽度 $W=50\text{ mm}$, 这种设计确保各组试件在尺寸上的一致性, 便于后续进行准确的力学性能对比与分析。第 9~10 组对试件外廓尺寸进行 25% 的缩放处理, 以分析其尺度效应。

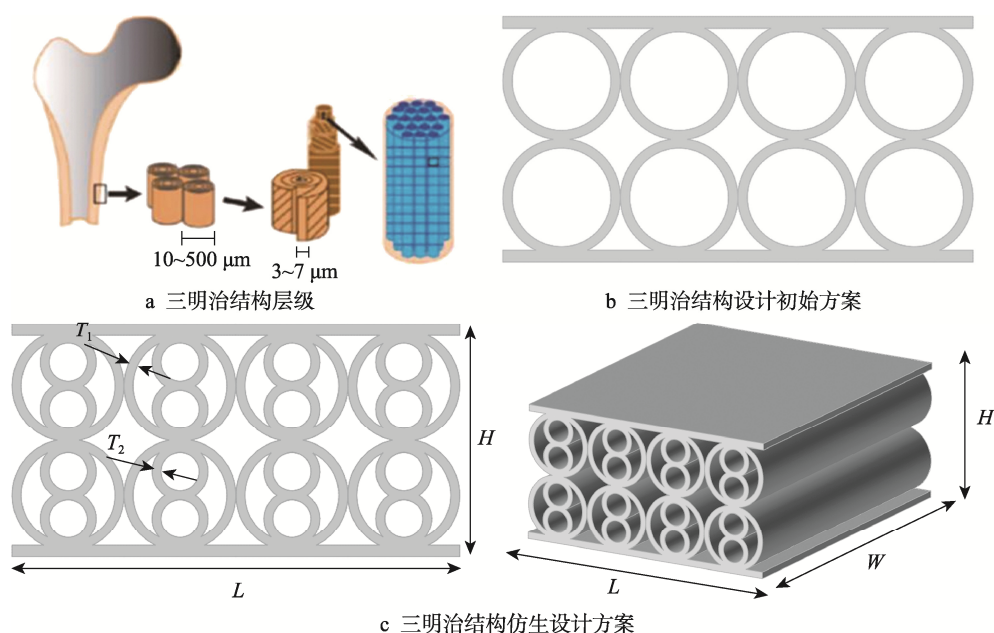


图 1 仿三明治结构仿生设计方案生结构设计
Fig.1 Bionic structure design

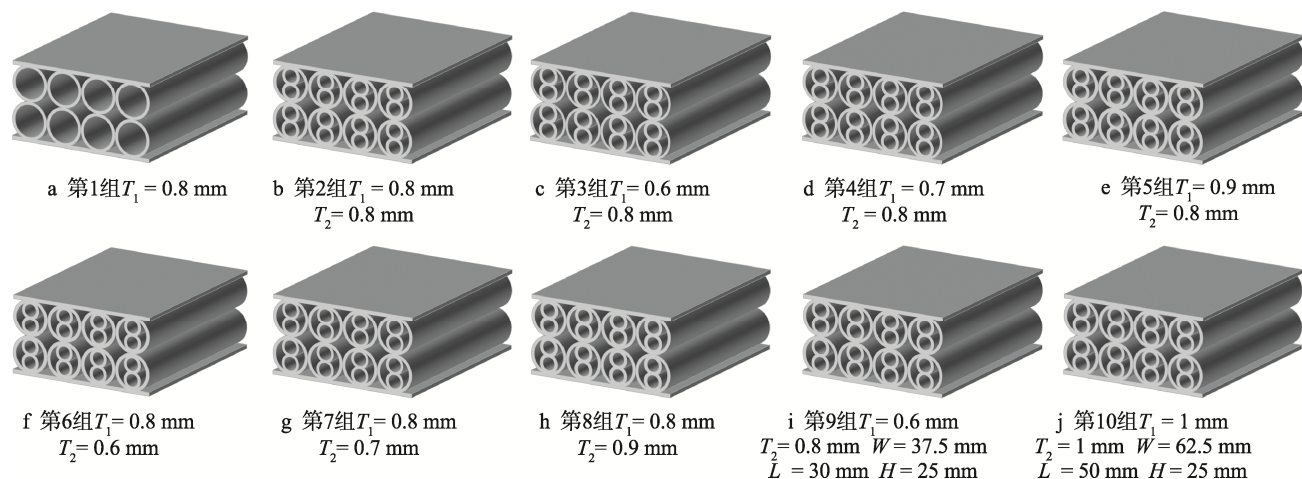


图 2 仿生三明治结构设计方案
Fig.2 Design scheme of bionic sandwich structures

2 制备与试验

由于 PETG (聚对苯二甲酸乙二醇酯-1,4-环己烷二甲醇酯) 的层间黏合性表现优异, 可有效避免分层或剥离现象, 从而显著增强结构件的整体强度和稳定性^[11], 可基于 3D 打印技术制备在外力下不易发生开裂或变形的结构件^[12-13], 因此本研究采用 PETG 作为仿生三明治结构的基体材料, 并使用 Bambu Lab X1 系列打印机进行制备, 喷嘴温度为 230 °C, 打印速度为 30 mm/s。打印完成后, 去除模型上的支撑部件, 并对模型的外表层进行细致的打磨处理, 以提高其精度和表面粗糙度, 确保打印的 PETG 模型具有较高的力学性能和优异的外观效果, 用于后续的压缩力学试验。仿生三明治结构制备如图 3 所示。

本研究使用深圳三思纵横科技股份有限公司的材料试验机进行仿生三明治结构的准静态压缩试验, 设定压缩速度为 5 mm/min, 将试件安装至压缩夹具, 确保安装准确无误后, 启动试验机对试件进行压缩。在压缩过程中, 试件的变形将通过工业相机实时记录, 同时试验机会自动收集应力-应变数据。当达到预设的压缩程度或试件失效时, 试验自动停止, 随后对收集的数据和图像记录进行分析, 以评估蜂窝结构的力学性能。

3 结果与分析

为了客观评价不同设计参数下的仿生三明治结构的压缩性能, 需运用一系列相关指标进行定量分析。本研究主要采用以下几项关键指标来评估结构的压缩性能^[14-16]: 能量吸收 (Energy Absorption, EA)、比吸能 (Specific Energy Absorption, SEA)、峰值压溃力 (Peak Crushing Force, PCF)、平均压溃力 (Mean Crushing Force, MCF) 以及压缩载荷效率 (Crush

Loading Efficiency, CLE), 计算分别见式 (1)~(4)。

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

式中: E_A 为评估能量吸收结构的重要指标, J, 结构吸收的能量越大, 能量吸收特性越强; $F(x)$ 为载荷, kN; x 为压缩位移, mm; $x_{\max}$ 为最大压缩位移, mm, 一般取压缩密实前的有效位移。

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

式中: S_{EA} 为单位质量吸收的能量, J/g, 表示结构吸收能量的潜能或效率; m 为结构的质量, g。

$$M_{CF} = \frac{E_A}{x_{\max}} \quad (3)$$

式中: M_{CF} 反映结构在压缩进程中的平均压溃载荷, kN。

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

式中: P_{CF} 反映结构在有效压缩过程中承受的峰值载荷, kN; C_{LE} 为平均压溃载荷与峰值载荷的比值, 反映结构在压缩进程中的载荷平稳程度。

对于具有优越的压缩力学性能以及能量吸收能力的轻质结构, 一般具有较高的能量吸收、比吸能、平均压缩载荷、压缩载荷效率及较低的峰值载荷。10 组试验测试得到的指标结果如表 1 所示, S_{EA} 最大值为 5.48 J/g, M_{CF} 最大值为 16.21 kN, P_{CF} 最大值为 25.77 kN, C_{LE} 最大值为 0.67。

图 3 中, 第 1 组与第 2 组被选定用于压缩性能的比较分析, 旨在凸显通过引入仿生子层级特征设计的三明治结构在提升压缩力学性能方面的潜在优势。仿生三明治结构力学性能比较见图 4。由图 4a 可知, 具备子层级特征设计的仿生三明治结构 (第 2 组) 相较于未采用子层级设计的对照组 (第 1 组), 展现出更高的承载水平, 表明本研究提出的设计策略在提升结构的力学承载能力方面具有显著成效。由图 4b 可

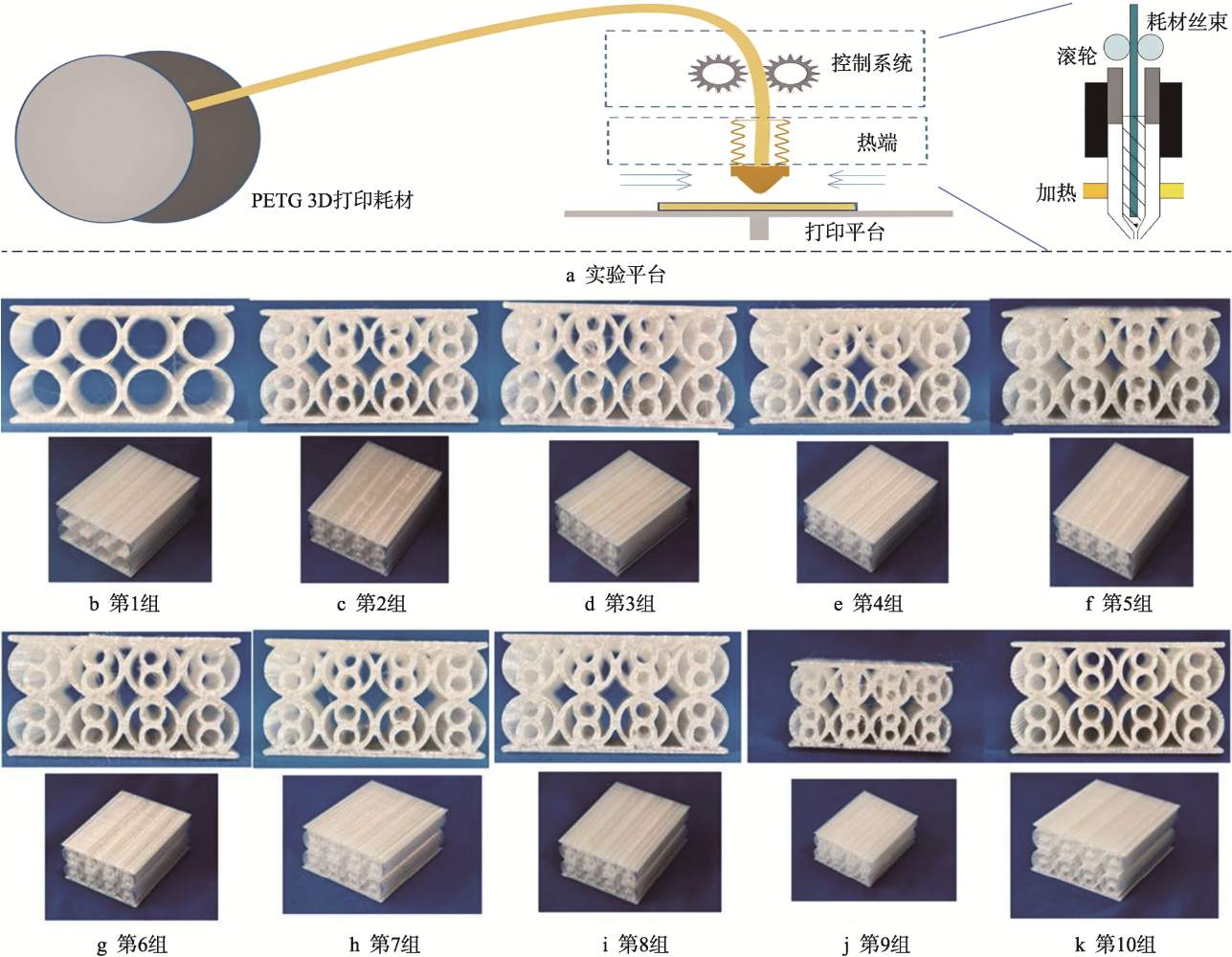


图 3 仿生三明治结构制备
Fig.3 Preparation of bionic sandwich structures

表 1 试验结果
Tab.1 Test results

试验组号	$S_{EA}/(J \cdot g^{-1})$	M_{CF}/kN	P_{CF}/kN	C_{LE}
1	2.37	2.90	4.46	0.65
2	4.24	7.71	13.27	0.58
3	3.51	5.90	8.84	0.67
4	4.33	7.57	13.14	0.58
5	4.89	9.25	16.08	0.58
6	3.08	5.14	7.88	0.65
7	3.93	6.85	10.93	0.63
8	5.48	10.51	18.87	0.56
9	5.12	5.06	10.11	0.50
10	5.36	16.21	25.77	0.63

知，子层级特征设计的仿生三明治结构在能量吸收方面优于对照组，进一步证明本研究提出的设计策略能

够有效改善压缩过程中的能量吸收效率。通过对比有无子层级特征设计的试验数据，有效验证了 3D 打印热塑性塑料仿生三明治结构在压缩力学方面的性能提升。

图 5 为不同设计参数下的力学性能。所有仿生三明治结构的载荷-位移曲线均呈现显著的三阶段特征：第 1 阶段为近似弹性阶段，此阶段载荷曲线迅速上升；第 2 阶段为平台应力阶段，此阶段载荷趋于稳定，未出现显著增减；第 3 阶段为压缩密实阶段，此阶段载荷曲线再次迅速上升。能量吸收曲线中，随着材料试验机的持续压缩，当进入压缩密实阶段转换点时，能量吸收率（即能量吸收曲线斜率）显著提升，表明材料正趋于密实状态，此阶段主要关注能量吸收率的变化，而非单纯评价能量吸收的绝对数值大小。

为评估不同设计参数对仿生三明治结构压缩力学性能的影响，本研究针对 T_1 和 T_2 在 0.6~0.9 mm 下，分析第 2~8 组试件的试验结果，如图 6~7 所示。结果显示，随着厚度的增加， S_{EA} 、 M_{CF} 和 P_{CF} 整体呈显

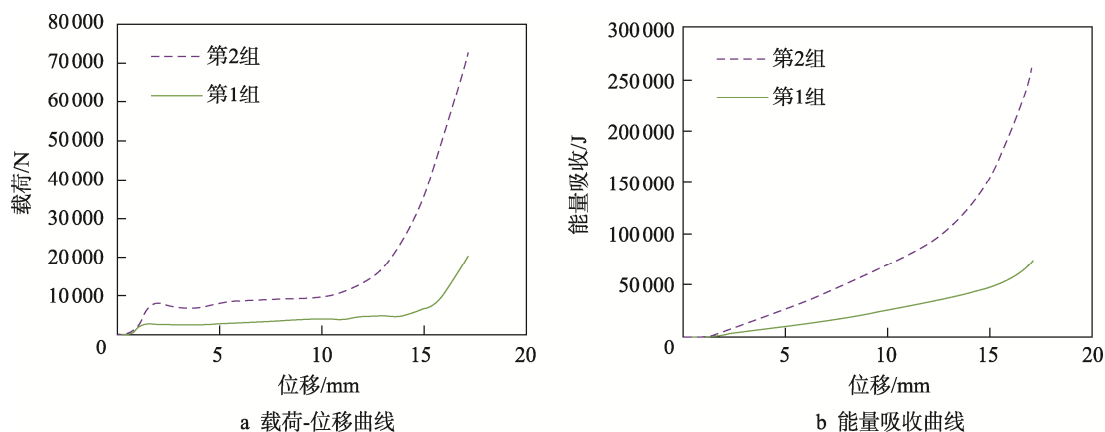


图4 仿生三明治结构力学性能比较

Fig.4 Comparison of mechanical properties of bionic sandwich structures

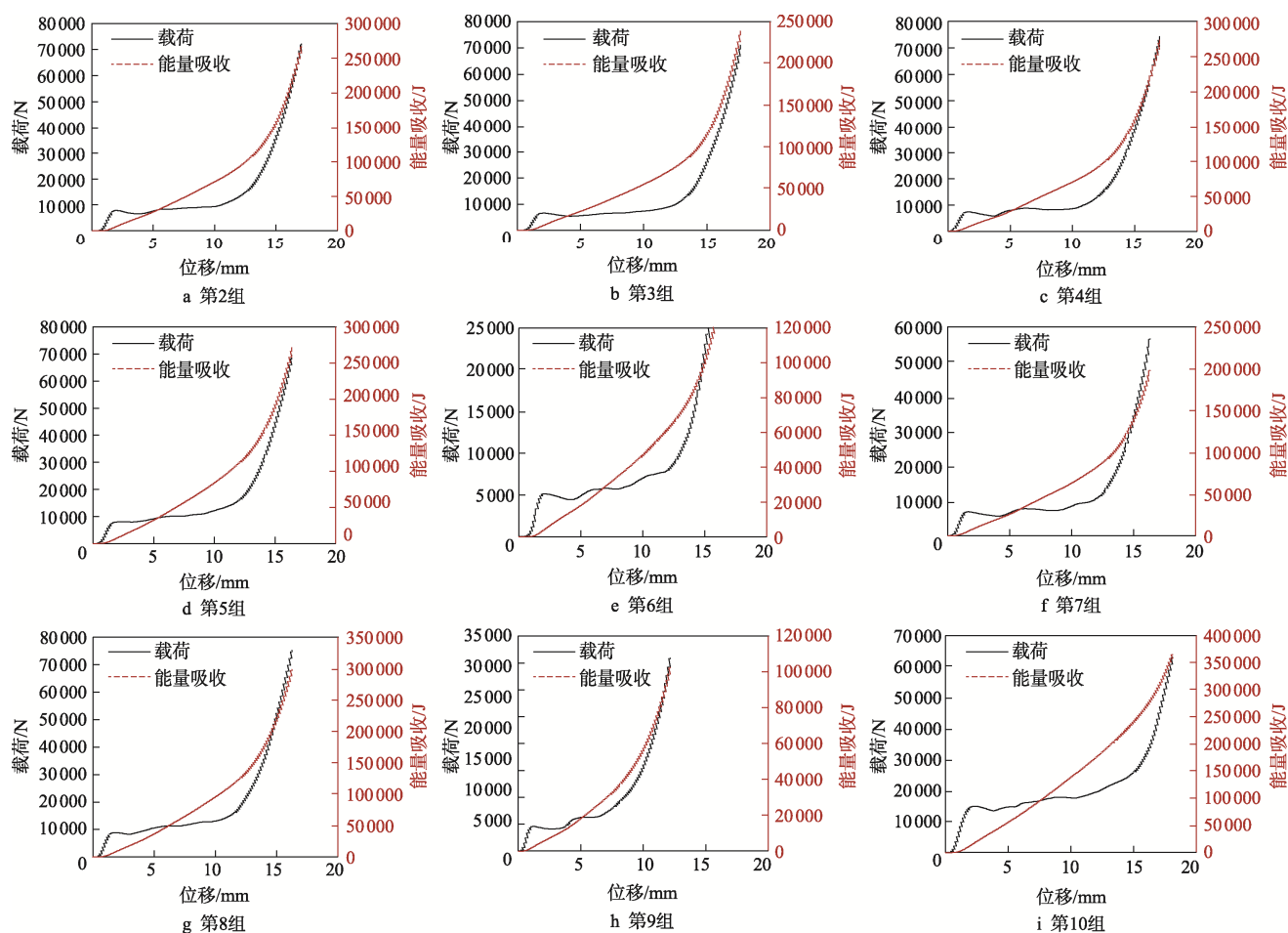


图5 不同设计参数下的力学性能

Fig.5 Mechanical properties under different design parameters

著上升趋势,而 C_{LE} 则呈下降趋势,这表明增加厚度参数来提升材料用量,虽然可以增强能量吸收潜力和承载能力,但也会降低碰撞效率。进一步观察发现,当 T_1 从 0.6 mm 增加到 0.9 mm 时, S_{EA} 从 3.5 J/g 提升至 4.89 J/g,增幅达 39.1%; T_2 在相同厚度变化范围内, S_{EA} 从 3.08 J/g 显著增加到 5.48 J/g,增幅高达 77.9%,说明子层级特征的结构参数 T_2 在调控更广

泛力学性能响应方面具有更大潜力。尽管调节不同位置的厚度参数同样会引起 P_{CF} 的上升,但通过合理平衡各设计参数的组合,可以实现针对不同性能指标需求的优化设计。

本研究深入探讨不同外廓尺寸对仿生三明治结构压缩力学性能的影响,展示了第 2 组、第 9 组及第 10 组试件的试验结果,如图 8 所示。第 9 组和第 10

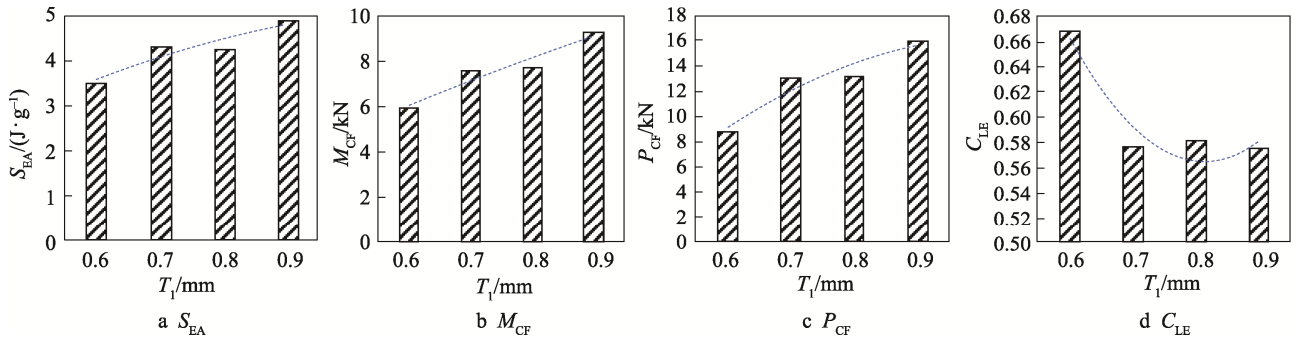


图 6 不同 T_1 下的压缩力学性能
Fig.6 Compressive mechanical properties at different T_1

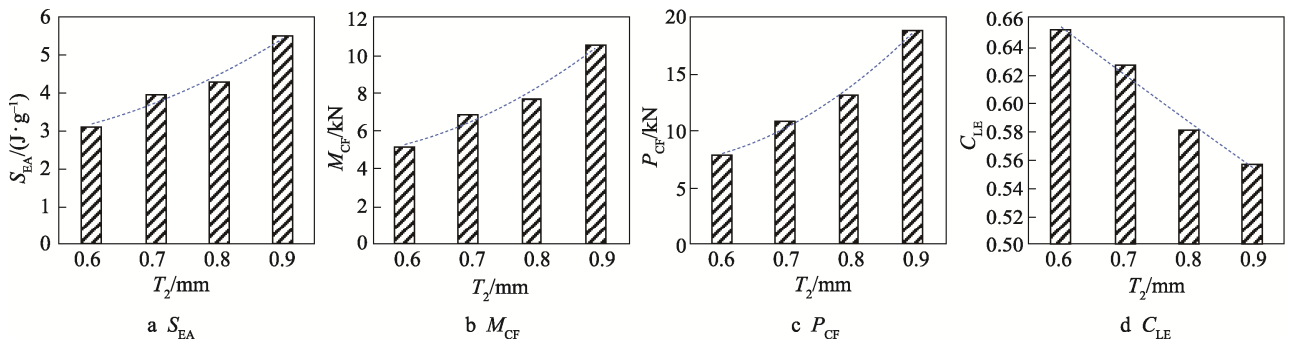


图 7 不同 T_2 下的压缩力学性能
Fig.7 Compressive mechanical properties at different T_2

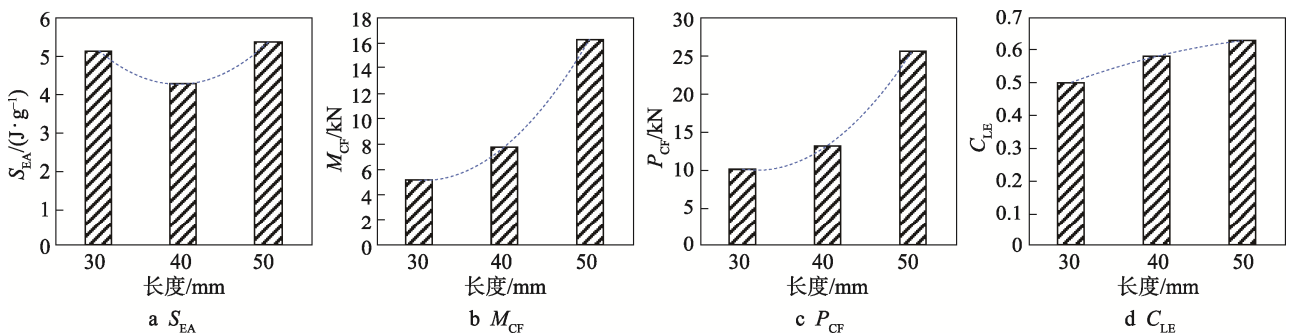


图 8 不同长度下的压缩力学性能
Fig.8 Compressive mechanical properties at different length

组试件的外廓尺寸相较于第 2 组分别向上、向下调整 25%，研究结果显示，随着外廓尺寸的增加，各项性能指标的变化均呈现非线性特征。 S_{EA} 在 4.24~5.36 J/g 之间波动，变化率为 26.4%； M_{CF} 从 5.1 kN 显著增至 11.1 kN，变化率高达 218%； P_{CF} 在 10.1~16.2 kN 之间变化，变化率为 61.4%； C_{LE} 在 0.5~0.63 之间变化，变化率为 26%。需要注意，外廓尺寸的变化对 M_{CF} 和 P_{CF} 的影响尤为显著，这主要是因为外廓尺寸的调整改变了仿生三明治结构整体的刚度特性，进而直接影响压缩过程中的载荷分布与大小。

为进一步阐释仿生三明治结构的压缩力学响应特

性，展示所有试件在压缩测试后的变形模式，见图 9。由图 9 可知，相较于对照组（第 1 组），具备子层级特征设计的仿生三明治结构呈现更广泛的塑性变形区域以及更稳定且渐进的塑性坍塌模式。当三明治结构承受的外部能量与最小能量变形模式相匹配时，塑性变形随之启动。稳定的塑性变形模式对于促进结构以渐进方式吸收能量具有积极作用，能以有序且可控的方式逐步发生形变，从而更有效地吸收并分散冲击压缩能量^[17]。这种变形模式有效规避突发且剧烈的形变，减少能量的反射与回弹，进而提升能量吸收效率。同时，该变形模式还可避免材料过早失效或过度形变，提高材料的利用效率。

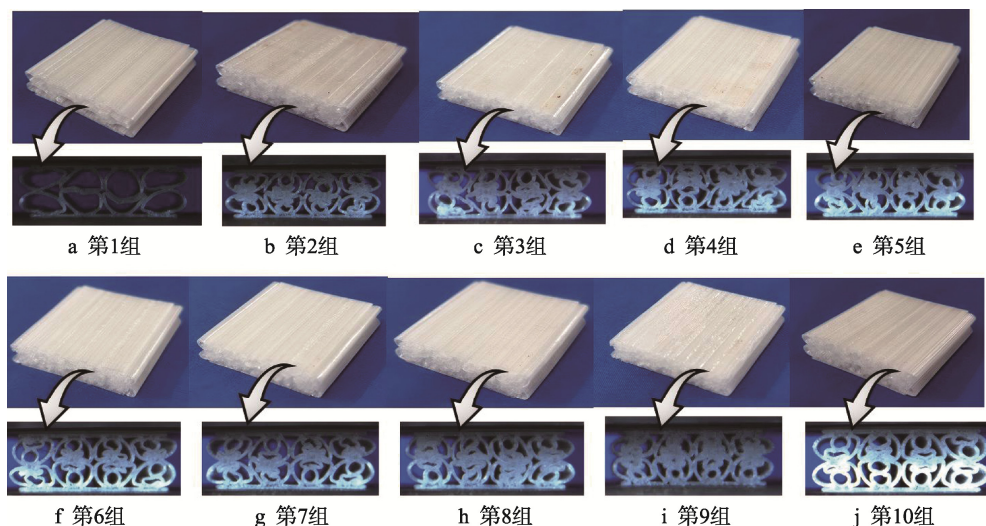


图 9 试件压缩变形模式

Fig.9 Compression deformation mode of samples

4 结论

本研究创新性地将仿生子层级特征融入三明治结构设计,并利用3D打印技术制备以PETG为基体材料的仿生三明治结构,通过准静态压缩试验测试得出以下结论。

1) 具备子层级特征设计的仿生三明治结构在压缩力学性能上得到显著提升,相较于对照组在抗冲击性能上表现较好,在承载能力和能量吸收方面均表现出明显优势。

2) 厚度的增加导致 S_{EA} 、 M_{CF} 和 P_{CF} 上升, C_{LE} 下降。当 T_1 从 0.6 mm 增加到 0.9 mm 时, S_{EA} 从 3.5 J/g 提升至 4.89 J/g,增幅达 39.1%; T_2 在相同厚度变化范围内, S_{EA} 从 3.08 J/g 增加到 5.48 J/g,增幅高达 77.9%,可见 T_2 对力学性能调控具有更大潜力。

3) 随着外廓尺寸的增加,各项性能指标的变化均呈现非线性特征。 S_{EA} 在 4.24~5.36 J/g 之间波动,变化率为 26.4%; M_{CF} 从 5.1 kN 显著增至 11.1 kN,变化率高达 218%; P_{CF} 在 10.1~16.2 kN 之间变化,变化率为 61.4%; C_{LE} 在 0.5~0.63 之间变化,变化率为 26%。具备子层级特征设计的仿生三明治结构在压缩测试后呈现稳定且渐进的塑性变形模式,有效提升能量吸收效率,可提高载荷工况下的碰撞防护性能,同时避免材料过早失效或过度形变。

鉴于该仿生三明治结构展现出显著的参数可设计性,未来研究可通过进一步优化参数并结合具体应用场景,实现更为精准与高效的力学性能定制设计。

参考文献:

- [1] 曹忠亮, 杨思鑫, 朱昊, 等. 轻质复合材料仿生夹芯结构研究进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(14): 24-37.
- [2] CAO Z L, YANG S X, ZHU H, et al. Research Progress on Biomimetic Sandwich Structures of Lightweight Composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(14): 24-37.
- [3] VAHIDIMANESH B, FARROKHABADI A, SHAHVARI R, et al. Experimental and Numerical Investigation of Damage in Multilayer Sandwich Panels with Square and Trapezoidal Corrugated Cores under Quasi-Static Three-Point Bending[J]. Engineering Structures, 2024, 318: 118715.
- [4] CHENG Y Q, LIU K, LI Y, et al. Experimental and Numerical Simulation of Dynamic Response of U-Type Corrugated Sandwich Panels under Low-Velocity Impact[J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110492.
- [5] 郝纪波, 赵颖, 李云伍, 等. 基于仿生獠牙分层理念的夹芯板电池箱优化设计[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2024, 48(4): 422-433.
- [6] HAO J B, ZHAO Y, LI Y W, et al. Optimization Design of Battery Box with Sandwich Panel Based on Bionic Badger Teeth Layering Concept[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2024, 48(4): 422-433.
- [7] 王海文, 徐丹, 陈墨林, 等. 冰雹形状及重复加载对叶表皮细胞壁仿生结构撞击损伤影响分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43(3): 227-232.
- [8] WANG H W, XU D, CHEN M L, et al. Effect of Hail Shape and Repeated Loading on Impact Damage of Bionic Cell Wall Structure of Leaf Epidermis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(3): 227-232.
- [9] YU X D, ZHANG Q C, SILVA R J D, et al. The Bending of 3D-Printed Bio-Inspired Sandwich Panels with Wavy Cylinder Cores[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205: 110492.

- 112538.
- [7] 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.
- [8] ZHANG D, DONG H, GUO D B, et al. Effect of Core Layer Parameters on the Mechanical Properties of Biomimetic Foamed Silicone Rubber Sandwich Structures Against Low-Velocity Impact[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, 143: 105931.
- [9] SU M M, MA Q X, ZHANG A, et al. Mechanical Properties of Sandwich Structures with Different Webs Enhanced by Filling Polyurethane Foam and Encasing Rectangular Tube[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 40: 110058.
- [10] TAO C L, WANG Z, ZHAO R, et al. Design of Lattice Metamaterials under the Equal Strength Concept and Research on the Mechanical Properties of Their Sandwich Structures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 205: 112498.
- [11] FALLAH A, SALEEM Q, KOC B. Assessment of Mechanical Properties and Shape Memory Behavior of 4D Printed Continuous Fiber-Reinforced PETG Composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 181: 108165.
- [12] 李华雄, 王晖, 刘璇. 响应面法优化 PLA 材料 3D 打印试件力学性能[J]. *塑料科技*, 2024, 52(10): 130-135.
- LI H X, WANG H, LIU X. Optimization of Mechanical Properties of PLA 3D Printed Specimens by Response Surface Method[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(10): 130-135.
- [13] 邵剑锋, 巢曷轩, 马思齐, 等. 3D 打印 C-PEEK 的仿生结构设计和力学行为分析[J]. *航天制造技术*, 2024(5): 65-73.
- SHAO J F, CHAO B X, MA S Q, et al. Bionic Structure Design and Mechanical Behavior Analysis of 3D Printed C-PEEK[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2024(5): 65-73.
- [14] XU X, ZHANG Y, WANG X, et al. Searching Superior Crashworthiness Performance by Constructing Variable Thickness Honeycombs with Biomimetic Cells[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 235: 107718.
- [15] XU P, GUO W N, YANG L T, et al. Crashworthiness Analysis of the Biomimetic Lotus Root Lattice Structure[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 263: 108774.
- [16] XU X, ZHANG Y, WANG J, et al. Crashworthiness Design of Novel Hierarchical Hexagonal Columns[J]. *Composite Structures*, 2018, 194: 36-48.
- [17] XU X, LI C C, HUANG C Q, et al. Cushioning Performance Design of Meta-Sandwich Structures Inspired by Kirigami[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, 18(1): e2285894.