DOI: 10.11858/gywlxb.20261043

基于力学匹配设计的仿生薄壁-泡沫复合结构的分级能量吸收与动态响应

高丹丹[1], 闫 涅[1], 周 颖[2], 王 涛[1], 黄广炎[1]

（1. 北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081;
2. 清华大学航天航空学院应用力学实验室, 北京 100084）

摘要: 针对轻质防护结构对稳定承载与高效能量吸收协同提升的需求，提出了一种基于力学匹配的混合仿生薄壁-泡沫复合结构设计方法。利用增材制造技术，制备了 3 种构型的聚乳酸（polylactic acid, PLA）仿生壳体，并通过原位发泡构建聚氨酯泡沫填充复合结构。通过拉伸试验、准静态压缩试验及动态落锤冲击试验，研究发泡过程产生的热效应对 PLA 壳体性能及复合结构力学响应的影响。通过峰值力、平台力、比吸能、平均压溃力、压溃力效率等指标对结构耐撞性能进行定量评价。结果表明，发泡导致的热效应降低了 PLA 的弹性模量和强度，并提高延展性，从而改善壳体与泡沫之间的力学匹配。复合结构的平台力和平均压溃力显著提升，压溃模式由局部失稳转变为渐进堆叠坍塌，表现出稳定的分级吸能特征。动态冲击试验进一步验证了结构在高能冲击作用下的稳定承载和吸能能力。研究结果揭示了几何构型、材料匹配与热-力耦合效应协同作用下的结构吸能机制，为轻质仿生防护结构的设计与优化提供了新的思路。

关键词: 混合仿生设计; 增材制造; 薄壁-泡沫复合结构; 热-力耦合效应; 分级吸能

中图分类号: O341; O521.9; O347 **文献标志码:** A

在轻质防护与缓冲结构设计领域，实现高比吸能、稳定压缩响应与峰值载荷可控之间的协同优化始终是结构功能化设计的核心问题[1−4]。大量研究表明，高效吸能结构往往并非依赖单一材料强化，而是通过结构层级、材料差异与界面耦合实现多阶段能量耗散。自然界通过长期进化形成的多尺度结构体系为该问题提供了重要启示[5−7]。例如：蜂窝结构的规则多边形单元赋予其优异的比刚度和屈曲稳定性，逐层塌陷特征有利于形成稳定吸能平台[8−9]；马尾草内部沿轴向分布的强化组织显著提高整体抗弯与抗屈曲能力，使其在受载过程中保持连续稳定变形[10−11]；柚子皮与果肉之间的多孔缓冲层则通过孔壁渐进压缩与多尺度耗能机制延缓外壳破坏[12]。这些天然结构体现出共同的力学设计原则——通过不同层级结构之间的力学性能匹配，使能量沿特定路径逐级耗散。在工程结构中，这种结构-材料之间的力学匹配关系对于结构吸能特性与动态响应特性具有重要影响[13−14]。当外壳结构强度远高于内部填充材料强度时，结构易发生局部失稳或脆性断裂；而当填充材料的刚度过高时，则可能限制壳体变形，并导致峰值载荷显著升高。因此，通过匹配壳体结构与内部材料的力学性能，使其在受载过程中形成渐进协同变形，是仿生复合吸能结构设计的重要思路。

在可持续制造与绿色材料发展趋势下，聚乳酸（polylactic acid, PLA）因来源于可再生资源且具备可

* **收稿日期:** 2026-03-06； **修回日期:** 2026-04-13
基金项目: 国家自然科学基金（12572427, 12372333）; 创新研究群体项目（12221002）
第一作者: 高丹丹（1996—）, 女, 博士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: 3120235445@bit.edu.cn
通信作者: 周 颖（1997—）, 女, 博士, 助理研究员, 主要从事爆炸冲击防护研究.
E-mail: zhou_ying@tsinghua.edu.cn
王 涛（1990—）, 男, 博士, 教授, 主要从事爆炸冲击防护研究. E-mail: wang_tao@bit.edu.cn

降解特性，在包装缓冲与轻质防护领域受到广泛关注[15−16]。与传统石油基塑料相比，PLA 具有良好的加工适应性，适用于复杂仿生壳体结构的成形[17]。然而，PLA 相对较低的玻璃化转变温度，致使其力学行为对温度变化较为敏感。在玻璃化转变温度至热变形温度区间，材料韧性和变形能力会有所提高[18]。但是，对于尺寸相对较大的 3D 打印薄壁壳体结构，这种材料层面的优势在结构响应中往往难以充分体现。在压缩或低速冲击载荷作用下，结构响应通常更多地受几何构型和屈曲行为控制，导致单一 PLA 薄壁结构易发生局部脆性断裂，难以实现稳定、可控的渐进吸能过程。为改善薄壁结构的吸能特性，泡沫或多孔材料填充被广泛应用于复合结构设计中[19−21]。相关研究表明，填充材料不仅能够通过自身渐进压缩耗散能量，而且可以改变壳体的屈曲模式，并延缓整体的破坏过程。Ren 等[22] 通过在高强度纤维复合材料中包裹金属泡沫芯，显著提升了夹芯结构的抗冲击性能；Aala 等[23] 发现泡沫与金属管道之间的协同作用能够大幅提升整体吸能效率；Wu 等[24] 进一步揭示了聚氨酯（polyurethane, PU）泡沫填充蜂窝结构通过“自身压缩吸能-结构变形约束”的双重机制提升抗爆性能。以上研究表明，壳体结构与填充材料之间的力学协同作用是提升复合结构吸能特性的关键因素。

尽管如此，现有研究多集中于金属壳体或热稳定性较高的结构体系，而对于聚合物壳体-泡沫填充复合结构中的力学匹配设计问题仍缺乏系统研究。尤其在原位发泡过程中伴随的放热通常被视为制造过程中的附带现象，其对复合结构力学性能的潜在影响尚未得到充分关注。相比于金属结构，该过程对聚合物壳体的影响更为明显。从力学匹配角度来看，发泡热效应可能在发泡阶段动态调节壳体与泡沫之间的刚度差异，从而影响复合结构的协同变形行为。

基于上述背景，本研究将设计一种融合蜂窝几何优势与马尾草纵向强化特征的 PLA 薄壁壳体结构，引入类柚子皮多孔 PU 作为内填充材料，通过原位发泡构建混合仿生复合结构，借助准静态压缩和低速冲击试验，系统分析复合前后结构的力学响应特征、峰值调控行为及失效模式演化过程，重点从力学匹配设计角度揭示壳体结构与泡沫填充之间的协同变形机制及其对分级能量吸收行为的影响，以期揭示混合仿生结构中几何构型、材料匹配与热-力耦合之间的协同作用机制，为绿色轻质防护结构的设计与优化提供理论依据。

1　仿生薄壁-泡沫复合结构的设计与制备

1.1　仿生复合结构设计

基于蜂窝与马尾草结构的分级强化特征以及柚子皮结构的多孔缓冲机制，设计了一种薄壁-多孔混合仿生复合结构，其整体构型如图 1[25−28] 所示。为比较不同几何单元对结构力学响应的影响，设计了 3 种薄壁壳体结构，如图 1(b) 所示，分别为圆形双层结构（PLA-C2）、正六边形双层结构（PLA-H2）以及圆形-正六边形组合结构（PLA-CH）。3 种壳体的整体高度、底面积及实体底面积保持一致，保证了结构的初始质量基本相当，为后续不同构型之间的力学性能对比提供了统一的几何基准。

在薄壁壳体内部填充多孔材料时，复合结构的防护能力在很大程度上取决于壳体与泡沫材料之间的力学匹配关系。已有研究[29−31] 表明，当泡沫材料的平台应力与壳体结构的屈曲应力处于相近量级时，泡沫能够在壳体屈曲过程中提供有效侧向支撑，从而抑制局部失稳，并促进结构发生稳定的渐进坍塌，提高整体吸能能力。相反，当泡沫强度过低时，其难以对壳体提供有效约束；当泡沫强度过高时，则可能导致结构整体刚度过大，降低能量吸收效率。

多孔泡沫材料在压缩过程中表现出典型的平台变形阶段，其平台应力与泡沫相对密度之间满足 Gibson-Ashby 模型[32]，即

$$\sigma_{\mathrm{pl}} = C\sigma_{\mathrm{s}}\left(\frac{\rho^{*}}{\rho_{\mathrm{s}}}\right)^{3/2} \tag{1}$$

式中：σ_{pl} 为泡沫的平台应力，C 为与泡沫微结构相关的常数，σ_{s} 为泡沫基体材料的屈服强度，ρ^{*} 为泡沫密度，ρ_{s} 为固体基体密度。

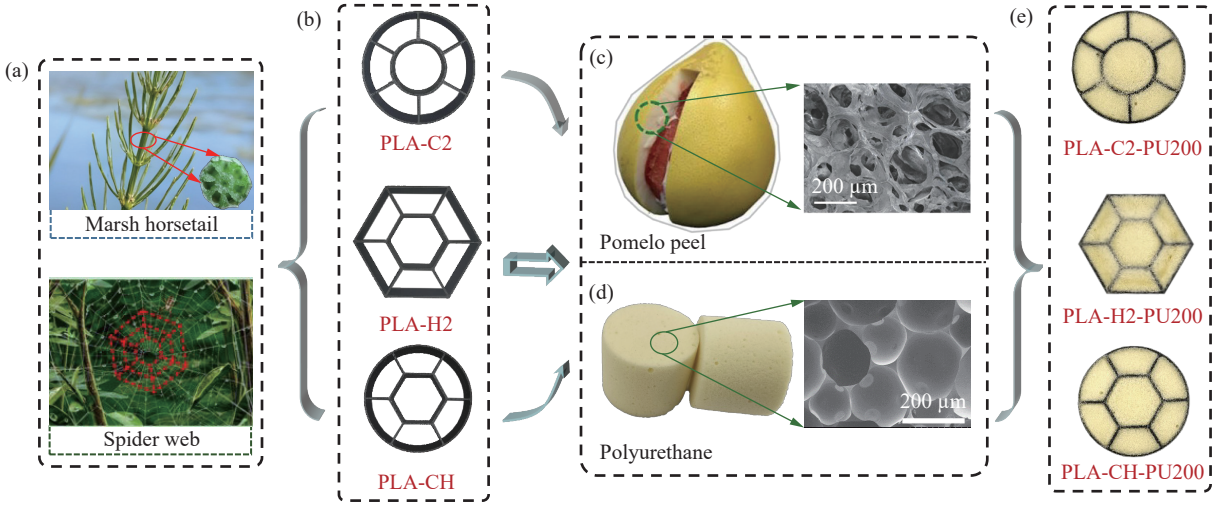


图 1　仿生复合结构设计示意图: (a) 马尾草和蜘蛛网结构[25–27], (b) 3D 打印的薄壁壳体, (c) 柚子皮结构及微观示意图[28], (d) 聚氨酯试样及扫描电镜图像, (e) 基于混合仿生的复合结构实物

Fig. 1　Schematic diagram of the biomimetic composite structure design: (a) marsh horsetail and spider web structures[25–27]; (b) 3D-printed thin-walled shells; (c) pomelo peel structure and microscopic schematic[28]; (d) polyurethane specimen and scanning electron microscope (SEM) images; (e) physical image of hybrid bionic composite structure

对于薄壁壳体结构, 其平均压溃力(mean crushing force, MCF)通常与材料强度及几何参数相关, 可采用经典薄壁结构理论进行估算, 其表达式[33] 为

$$p_{\mathrm{m}} \approx \sigma_{\mathrm{m}} t^{3/2} D^{1/2} \tag{2}$$

式中: p_{m} 为平均压溃力, σ_{m} 为壳体材料强度, t 为壳体厚度, D 为结构特征尺寸。为定量表征泡沫材料与壳体结构之间的协同作用, 可进一步引入力学匹配系数 λ

$$\lambda = \frac{p_{\mathrm{m}}}{A\sigma_{\mathrm{pl}}} \tag{3}$$

式中: A 为壳体内部有效受压面积。

基于上述力学匹配原则, 并兼顾结构稳定性与可制造性, 进行复合结构设计: 控制壳体厚度约为 1.5 mm, 选用密度为 200 kg/m^3 的 PU 进行填充, 使壳体的平均压溃承载能力与泡沫的平台应力处于相近的量级, 从而在压缩过程中形成壳体屈曲与泡沫压缩的协同吸能。壳体的具体几何参数列于表 1, 其中: R_1 为外层圆形薄壁结构半径, R_2 为内层圆形薄壁结构半径, l_1 为外层正六边形薄壁结构边长, l_2 为内层正六边形薄壁结构边长, t_1 为圆形薄壁壳体厚度, t_2 为正六边形薄壁壳体厚度, ρ_{PU} 为 PU 的密度。通过原位发泡工艺制备 3 种复合结构, 即 PLA-C2-PU200、PLA-H2-PU200 和 PLA-CH-PU200, 复合结构的壳体尺寸与 PLA-H2、PLA-CH、PLA-C2 保持一致。3 种壳体结构内部的有效填充空间基本一致, 保证 3 种结构的泡沫填充量在相近水平, 由此得到复合结构的总质量分别为 (70.9±0.10) g、(72.6±0.12) g 和 (70.7±0.35) g。该设计使不同结构之间的质量差异保持在极小范围内, 从而使几何构型成为影响结构力学响应的主要因素, 为后续分析不同构型对结构的压溃行为、能量吸收特性及失效模式的影响奠定基础。

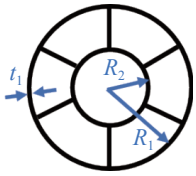
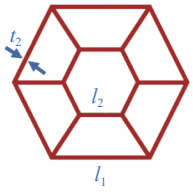
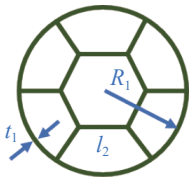
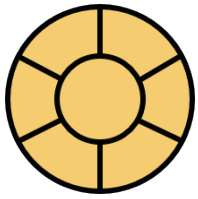
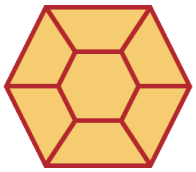
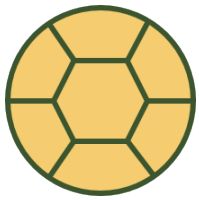
1.2　增材制造薄壁壳体成型工艺

本研究中复合结构壳体的制备流程与前期工作[27] 保持一致。制备方法简述如下: 以 PLA(密度 (1.25±0.05) g/cm^3, 深圳光华伟业股份有限公司)为原料, 采用熔融沉积成型技术, 通过商用 3D 打印机(Bambu Lab A1, 拓竹科技)完成薄壁结构的制备。为保证试样制备的一致性和试验的可重复性, 所有结构均采用相同的 3D 打印工艺参数: 填充率 100%, 打印层厚 0.1～0.2 mm, 打印速度 200 mm/s, 填充速度 250 mm/s, 表面速度 100 mm/s, 顶面/底面速度 200 mm/s, 并保持相同的打印温度和材料条件。此外,

打印路径由切片软件自动生成，打印方向沿结构高度方向逐层堆叠，以保证结构的几何精度。打印结束后，试样随热床自然冷却至室温后取下备用。

表 1　6 种仿生结构及其参数

Table 1　Parameters of six bionic structures

Sample type	Structure	Parameters	Physical mass/g
PLA-C2		R_1=40.92 mm R_2=20.46 mm t_1=1.50 mm	42.10±0.20
PLA-H2		l_1=45.00 mm l_2=22.50 mm t_2=1.42 mm	44.90±0.25
PLA-CH		R_1=40.92 mm l_2=22.50 mm t_1=1.50 mm	43.20±0.10
PLA-C2-PU200		ρ_{PU}=200 kg/m^3	70.90±0.10
PLA-H2-PU200		ρ_{PU}=200 kg/m^3	72.60±0.12
PLA-CH-PU200		ρ_{PU}=200 kg/m^3	70.70±0.35

1.3　原位发泡复合结构制备

壳体打印成型后，采用原位发泡工艺制备 PU-壳体复合结构。发泡的具体过程如下：将 AB 料（廊坊澳洋保温材料有限公司）按照质量比 1∶1 调配并混合，采用电动搅拌器快速搅拌，直至混合物即将起发时，立即将其倒入待填充的壳体空腔中。在此过程中，搅拌的均匀程度对泡沫的密度及后续收缩性具有重要影响。浇注完成后，将复合结构置于模具中压实，静置 1 h 后脱模。共制备了 3 种复合结构，如图 1(e) 所示，其中“PU200”代表 PU 的密度为 200 kg/m^3。

2　试验方法

2.1　材料及复合结构的准静态力学性能测试

采用 Instron 5985 电子万能材料试验机分别开展 PLA 哑铃状试样在常温下和加热后的准静态拉伸测试和准静态单轴压缩测试，如图 2(a) 和图 2(b) 所示。样条的拉伸测试设置如下：借助泡沫箱和温度传感器对试样进行加热处理，如图 2(c) 所示。常温和加热后试样的加载速率均为 2 mm/min，通过视频引伸计记录样条测试段的变形，从而获得 PLA 材料在拉伸条件下的应力-应变数据。单轴压缩试验设置如下：加载速率设为 3 mm/min（对应的应变率为 1×10^{-3} s^{-1}），未预设压缩位移，压缩持续进行，直至试样被压至密实段后停止，通过相机实时记录各试件的变形过程。

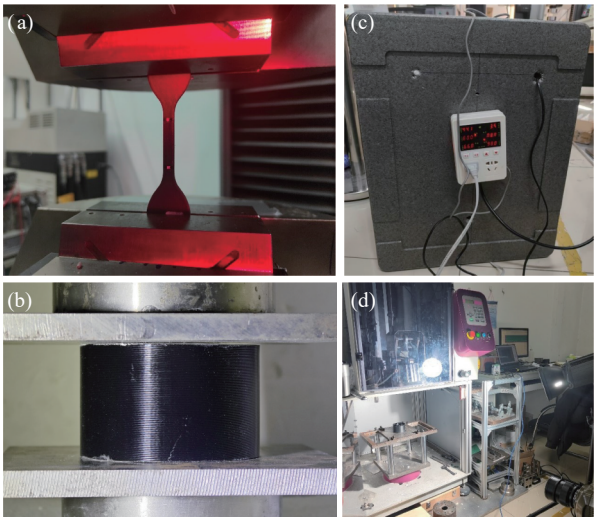


图 2　现场测试布局: (a) PLA 试样的准静态拉伸测试, (b) 仿生结构的准静态压缩测试, (c) 试样加热装置, (d) 动态落锤测试

Fig. 2　Layout of on-site testing: (a) quasi-static tensile testing of PLA specimen; (b) quasi-static compression testing of biomimetic structures; (c) specimen heating apparatus; (d) dynamic drop-weight testing

为评估不同结构的力学性能，选取比吸能（specific energy absorption, SEA）、峰值力（peak crushing force, PCF）、MCF 以及压溃力效率（crush force efficiency, CFE）作为评价指标[34−35]，具体计算公式为

$$E_{\mathrm{sa}}=\frac{E_{\mathrm{a}}}{m}=\frac{1}{m}\int_0^d F(x)\mathrm{d}x \tag{4}$$

$$p_{\mathrm{m}}=\frac{E_{\mathrm{a}}}{d}=\frac{1}{d}\int_0^d F(x)\mathrm{d}x \tag{5}$$

$$\eta_{\mathrm{CF}}=p_{\mathrm{m}}/p_{\mathrm{c}} \tag{6}$$

式中：E_{sa} 为比吸能，E_{a} 为总吸能，d 为总的压溃距离，$F(x)$ 为轴向压缩力，m 为测试试样的质量，η_{CF} 为压溃力效率，p_{c} 为峰值力。

2.2　仿生结构的落锤冲击试验测试

室温下，采用 CEAST 9350 落锤冲击试验机对仿生结构开展低速平板冲击测试，试验装置如图 2(d) 所示。通过调节落锤质量（7.45 和 15.00 kg）和冲击速度（4.05、5.18 和 7.33 m/s），实现冲击能量分别为 60、100 和 200 J。试验时，试样置于完全固定的刚性底板上。利用 Phantom V710 高速摄像机（美国 AMETEK）搭配尼康短焦镜头，以 16000 幅/秒的采样率和 25 μs 的曝光时间实时记录试样在不同冲击条件下的失效模式。

3　结果与讨论

3.1　PLA 热处理效应与 PU 泡沫力学性能

PLA 的玻璃化转变温度通常在 55～70 ℃ 区间[36–37]。在原位发泡复合过程中，密度为 200 kg/m^3 的 PU 发泡反应伴随显著放热，局部温度可在短时间内升至 120～150 ℃，并持续数分钟。该温度已明显超过 PLA 的玻璃化转变温度范围，因此，有必要评估热效应对 PLA 力学性能的影响。为此，对哑铃状 PLA 试样进行准静态拉伸试验。试样分为未经热处理（PLA-S1～PLA-S3）和经加热处理（Heat-PLA-S1、Heat-PLA-S2）2 组，所有试验均在室温下进行，其应力-应变曲线如图 3(a) 所示。

可以观察到，加热处理后 PLA 的力学行为发生显著变化。相比于未加热条件下典型的线弹性阶段后迅速脆性断裂的响应特征，加热后试样的延展性明显增强。材料的弹性模量和极限强度均有所降低，同时，应变显著增加，断裂应变可达到约 100%。此外，拉伸过程中出现了较为平缓的应力平台阶段，表明材料由原始的脆性主导破坏转变为更具延展性的塑性变形机制。该力学响应模式的变化与 PLA 在热作用下由玻璃态向高弹态转变密切相关。

图 3(b) 给出了 200 kg/m^3 的 PU 泡沫的准静态压缩应力-应变曲线。4 组重复试验（PU200-S1～PU200-S4）数据表现出良好的一致性，说明泡沫材料的制备工艺稳定。压缩应力-应变曲线呈现出典型的泡沫压缩 3 阶段特征：初始线性弹性阶段、稳定的平台阶段以及最终的密实阶段。随着加载持续，泡沫内部孔隙逐渐压缩并发生壁面屈曲，能量在相对稳定的应力水平下持续耗散；当孔隙被充分压实后，材料进入密实阶段，应力迅速上升，并伴随局部破坏。平台阶段特征表明，PU 泡沫具有良好的缓冲与能量吸收能力。

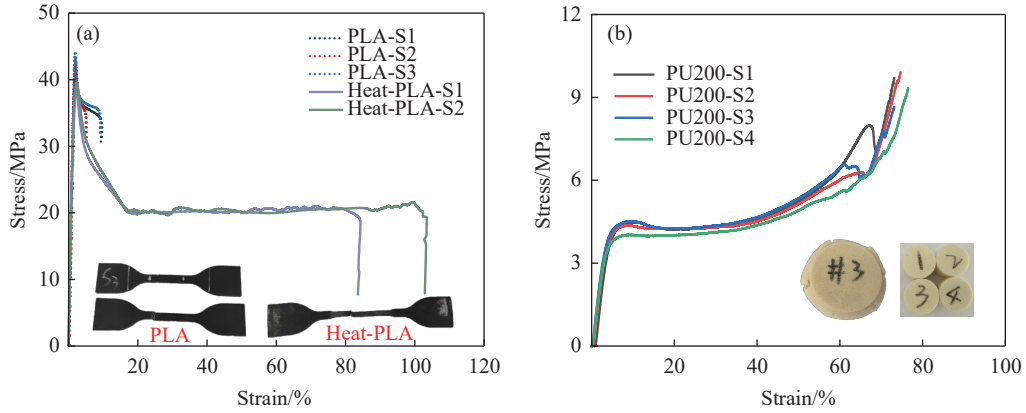


图 3　PLA 和 PU 基础材料的应力-应变曲线：(a) PLA 试样在常温和加热工况下准静态拉伸的应力-应变曲线, (b) PU 试样准静态压缩的应力-应变曲线

Fig. 3　Stress-strain curves for PLA and PU: (a) stress-strain curves for quasi-static tensile testing of PLA specimens under ambient and heated conditions; (b) stress-strain curves for quasi-static compression testing of PU specimens

3.2　准静态压缩下复合结构的力学行为

为评估温度对壳体结构压缩行为的影响，在填充泡沫之前分别对未加热与加热处理后的壳体结构进行了准静态压缩测试，其力-位移曲线如图 4(a) 所示。未加热结构表现出显著差异：PLA-C2 的峰值强度最高，PLA-H2 最低，PLA-CH 介于两者之间。这种差异源于受力路径的不同。圆形双层结构能够形成连续环向受力通道，延缓局部失稳；而正六边形结构在棱角处易产生应力集中，更早触发局部屈曲。经加热处理后，3 种结构的峰值力和压缩模量均明显降低，但强度趋势保持一致，说明热效应主要通过降低材料刚度和强度水平影响整体承载能力，而结构的宏观受力路径仍由几何构型主导。

在当前结构尺寸下，加热处理后结构的峰值力显著降低，而平台阶段的平均承载水平变化不明显。这种“削弱初始峰值-维持平台承载”的响应特征，使结构在压缩过程中的载荷上升更加平缓，有利

于降低初始冲击集中效应。结合 3.1 节的材料性能结果可知，PLA 在热作用下由脆性主导向延展性增强转变，这种材料层级的软化行为为壳体压溃过程由突发断裂向渐进变形演化提供了基础。

复合结构的准静态压缩行为如图 4(b) 所示。与未填充壳体相比，3 种复合结构的强度差异明显缩小，压缩曲线呈现出更长且更稳定的平台阶段，平台力显著提高。以 PLA-C2（图 4(a)）和 PLA-C2-PU200（图 4(b)）在压缩过程中的失效形式为例，无填充时，结构表现出了整体的屈曲变形，壳体明显断裂；填充泡沫后，复合结构出现了逐层堆叠现象，其稳定平台响应与壳体的渐进屈曲叠加，从而延长能量耗散区间，并抑制早期结构失稳。整体而言，温度软化与内部支撑的耦合作用使结构响应由局部失稳主导向协同渐进压溃转变，为后续冲击条件下的峰值调控与吸能提升奠定了结构基础。

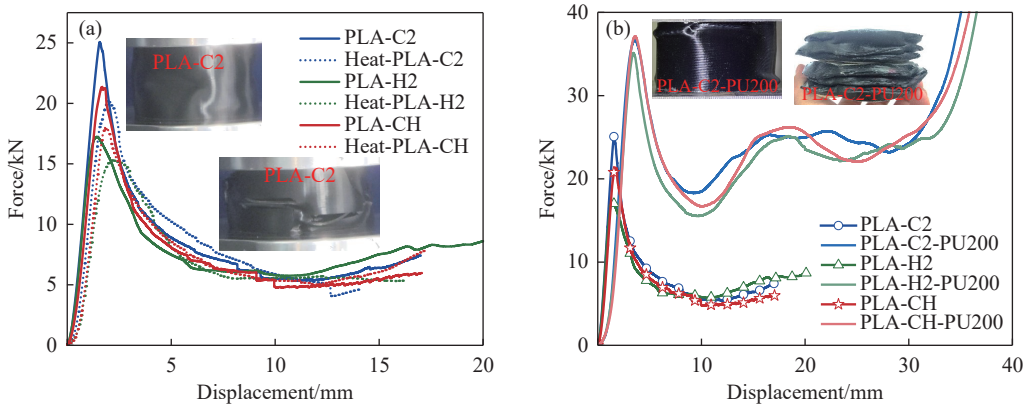


图 4　仿生结构的力-位移曲线：(a) 壳体结构在常温和加热工况下的力-位移曲线，(b) 复合结构的力-位移曲线

Fig. 4　Force-displacement curves of biomimetic structures: (a) force-displacement curves of the shell structure under ambient and heated conditions; (b) force-displacement curves of the composite structures

3.3　仿生复合结构的耐撞性分析

借助 2.1 节中的式 (4)～式 (6)，对图 4(b) 中的曲线进行积分与统计分析，分别计算了不同结构的 PCF、平台力、SEA、MCF 和 CFE，结果如图 5 所示。从图 5(a) 可以看出，复合结构的平台力提升幅度显著高于 PCF 的提升幅度。PCF 主要反映结构在压缩初期的屈曲与局部失效行为，而平台力则表征结构在稳定压溃阶段的持续承载能力。若填充材料仅通过提高整体刚度发挥作用，则通常会导致 PCF 与平台力同步提升，且 PCF 的增幅可能更明显。然而，本研究结果显示，平台力的增幅高于 PCF，说明复合体系并未单纯强化初始刚度，而是在压溃过程中改善了结构在稳定承载阶段的力学响应。结合图 4(a) 可以进一步理解该现象。在原位发泡产生的热效应作用下，壳体结构的峰值强度有所降低，而平台阶段承载能力的变化较小，结构的整体刚度相对减弱。这在一定程度上缓和了初始屈曲响应，使壳体与泡沫之间更容易形成协同变形关系。因此，在复合结构中表现为 PCF 的增长幅度小于平台力的增长幅度，体现出原位发泡复合结构在力学匹配方面的优势。这种“平台增强而峰值受控”的响应特征，使得 CFE 显著提高（图 5(d)），表明结构受力更加均匀，载荷波动减小。

如图 5(b) 所示，从 SEA 指标来看，复合结构表现出显著优势，相较于填充结构，复合结构的 SEA 提升 256.43%～297.99%。若能量吸收提升完全来源于 PU 泡沫本身，则 SEA 的提升应与泡沫质量占比呈近似线性关系。然而，试验结果显示，SEA 呈现超比例增长趋势，说明在压溃过程中形成了额外的耗能路径。这些附加耗能机制包括：壳体渐进屈曲与泡沫孔壁压缩的同步演化、界面摩擦耗能以及内部径向约束对壳体失稳路径的调控。由此可见，吸能性能的显著提升来源于壳体软化后与泡沫支撑之间的协同作用，而非单一材料贡献。进一步从 CFE 角度分析，无填充结构的压溃位移为 13.60 mm，复合结构增至 31.68 mm，复合后结构的 CFE 由 36% 提高至 63%，如图 5(d) 所示。通常 CFE 低于 40% 时结构以局部失稳为主，稳定性较差，而 CFE 超过 60% 则表明压溃过程更加稳定，耐撞性能得到明显改善[38]。

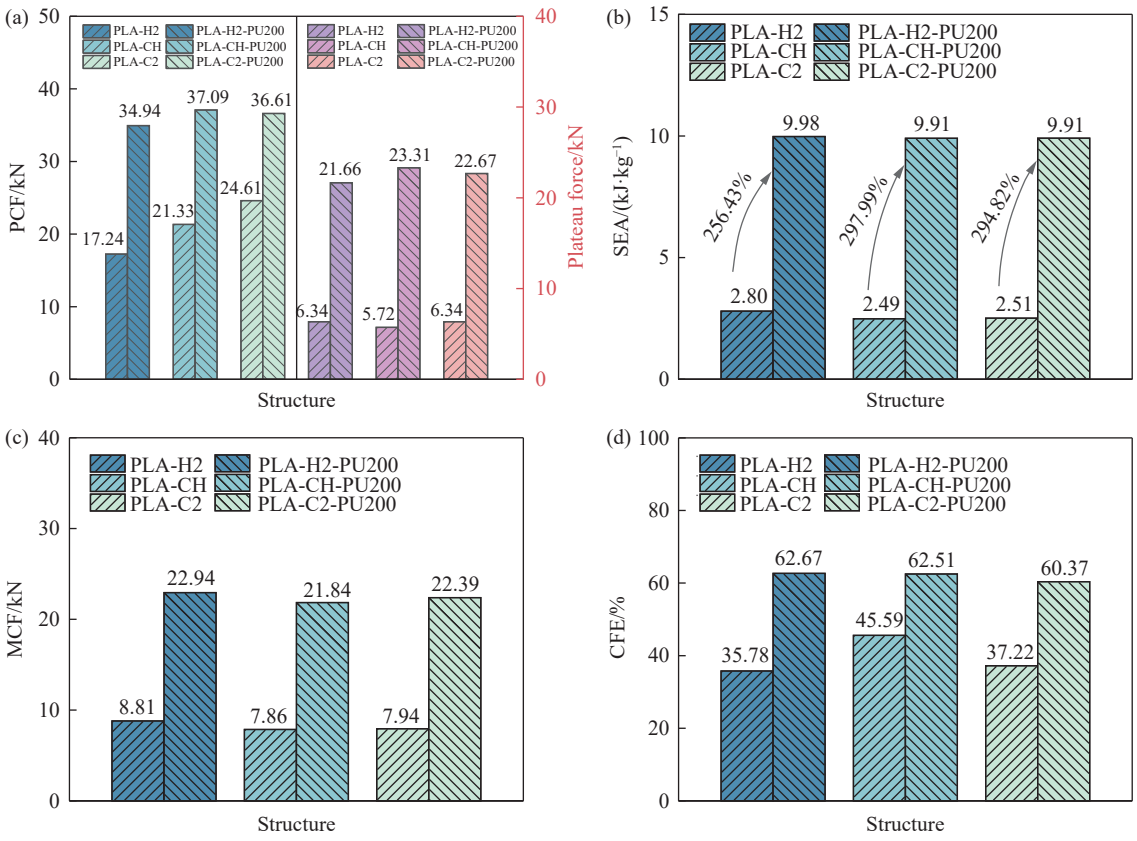


图 5　仿生结构的耐撞性分析: (a) 峰值力和平台力, (b) 比吸能, (c) 平均压溃力, (d) 压溃力效率

Fig. 5　Impact resistance analysis of the biomimetic structure: (a) peak crushing force and plateau force; (b) specific energy absorption; (c) average crushing force; (d) crushing force efficiency

3.4　分级吸能与力学匹配协同机制

为进一步揭示复合结构性能提升的内在机制, 对仿生结构在准静态压缩下的宏观失效形式进行对比分析, 如图 6 所示。在未填充 PU 泡沫条件下, 结构失效呈现出典型的局部失稳主导特征。加载初期, 壳体在结构中间部位首先形成明显的塑性铰, 随后试样向内或向外发生局部凹陷, 说明压缩变形集中于单一薄弱区域。随着加载持续, 局部弯曲应变迅速累积, 在壳体中部形成贯穿裂缝, 并伴随碎片脱落。这种“单点触发-局部扩展-脆性断裂”的演化路径, 与 3.3 节中较低的 CFE 相对应, 表明结构压溃过程由峰值主导, 载荷集中且稳定性不足。

相比之下, 复合结构的失效模式发生显著改变。当载荷超过峰值后, 试样并未出现明显的贯穿裂纹, 而是逐渐发生屈曲变形。变形不再集中于单一区域, 而是沿结构高度方向逐步扩展。随着加载的持续, 壳体出现层层堆叠的渐进压溃现象, 塑性铰数量随变形发展逐渐增加, 但未形成突发性断裂, 整体呈现出更为稳定和连续的耗能过程。这一失效模式的转变主要源于材料力学性能的演化以及泡沫填充所提供的物理约束。首先, 原位发泡过程中的热效应使 PLA 壳体温度超过其玻璃化转变温度, 导致材料由高模量、低延展性的玻璃态转变为模量降低、延展性增强的高弹态。基体模量的降低削弱了壳体在压缩初期的刚性约束, 缓解了局部应力集中; 而延展性的提升则提高了壳体弯曲变形的容许应变, 从而延缓了裂纹的萌生。

与此同时, PU 泡沫在壳体内部形成连续支撑, 对壳体内壁提供径向约束。值得注意的是, 加热软化后的 PLA 模量水平与 PU 泡沫的压缩刚度更为匹配, 两者之间的刚度差异减小, 从而削弱了“刚-软”材料组合中常见的界面应力集中问题。在模量相对匹配的条件下, 壳体与泡沫在压缩过程中能够协同变形: 壳体发生屈曲时, 泡沫孔壁同步压缩并提供支撑, 延缓了壳体的局部屈曲; 而泡沫进入密实阶段

前，其渐进压溃过程持续吸收能量，使壳体不至于在局部区域发生突发断裂。

因此，复合结构中观察到的“逐层堆叠-渐进坍塌”现象本质上来源于壳体软化后与泡沫支撑之间的力学匹配与耦合作用。该协同机制改变了结构原有的失效路径，使压溃行为由局部脆断主导转向稳定渐进主导。这一失效模式的演化趋势，与 3.3 节中平台力显著提升、CFE 由 36%～46% 提高至 60%～63% 的结果形成内在一致性，共同验证了混合仿生复合体系在结构层级上的协同优化效果。

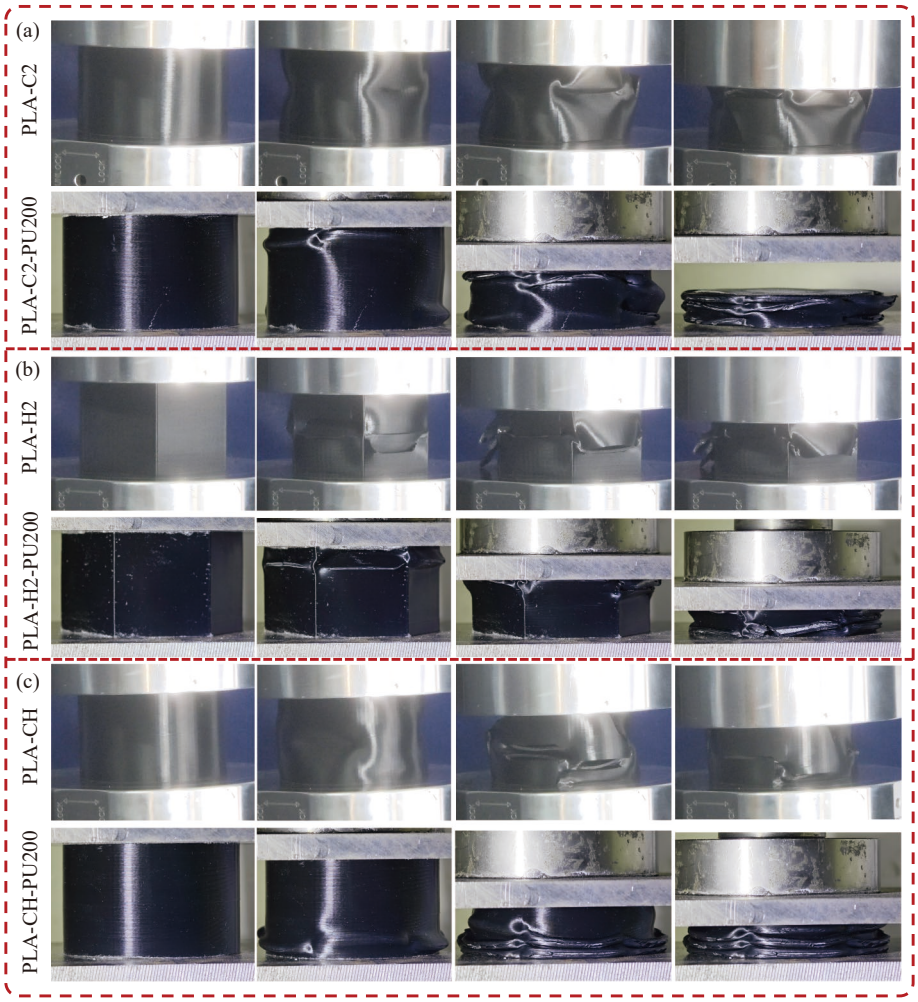


图 6　仿生结构在准静态压缩下的宏观失效形式

Fig. 6　Macro-scale failure modes of biomimetic structures under quasi-static compression

3.5　冲击载荷下复合结构的动态响应

对 6 种仿生结构进行了动态落锤冲击测试，结果如图 7 所示。从图 7(a) 可以看到，在未填充条件下，不同几何构型的仿生结构的动态响应存在明显差异。在相同冲击能量作用下，PLA-C2 的抗冲击能力优于 PLA-H2，而 PLA-CH 处于两者之间。这一趋势与准静态压缩结果保持一致，说明在未填充状态下，结构的抗冲击性能同样主要受几何构型控制。相比之下，复合结构之间的动态响应差异显著减小，表明泡沫填充削弱了几何构型对整体冲击响应的主导作用。泡沫在冲击过程中提供内部支撑，限制壳体内壁的径向坍塌，使结构响应由几何主导转变为材料-结构协同作用。

在不同冲击能量条件下，如图 7(b)～图 7(d) 所示，复合结构表现出明显的能量分级响应特征。当冲击能量为 60 和 100 J 时，复合结构未出现明显的宏观破坏，说明在该能级下，冲击能量主要通过壳体弹塑性变形与泡沫孔壁渐进压缩进行耗散，结构仍处于可控变形阶段。此时，冲击力-位移曲线通常呈

现单峰或宽平台特征，未发生明显载荷骤降，说明内部未形成贯穿性失效路径。泡沫的渐进压缩与壳体的稳定屈曲相互耦合，使冲击能量在较长时间范围内释放，从而降低瞬时冲击响应。当冲击能量提升至 200 J 时，复合结构出现不同程度的失效。此时，输入能量已超过结构的渐进耗能上限，壳体发生更大幅度的塑性变形甚至局部断裂。同时，泡沫进入密实化阶段，其承载能力迅速提升。由于泡沫密实后刚度急剧增大，壳体与泡沫之间的变形不匹配加剧，在界面处引发应力集中，最终触发结构整体破坏。

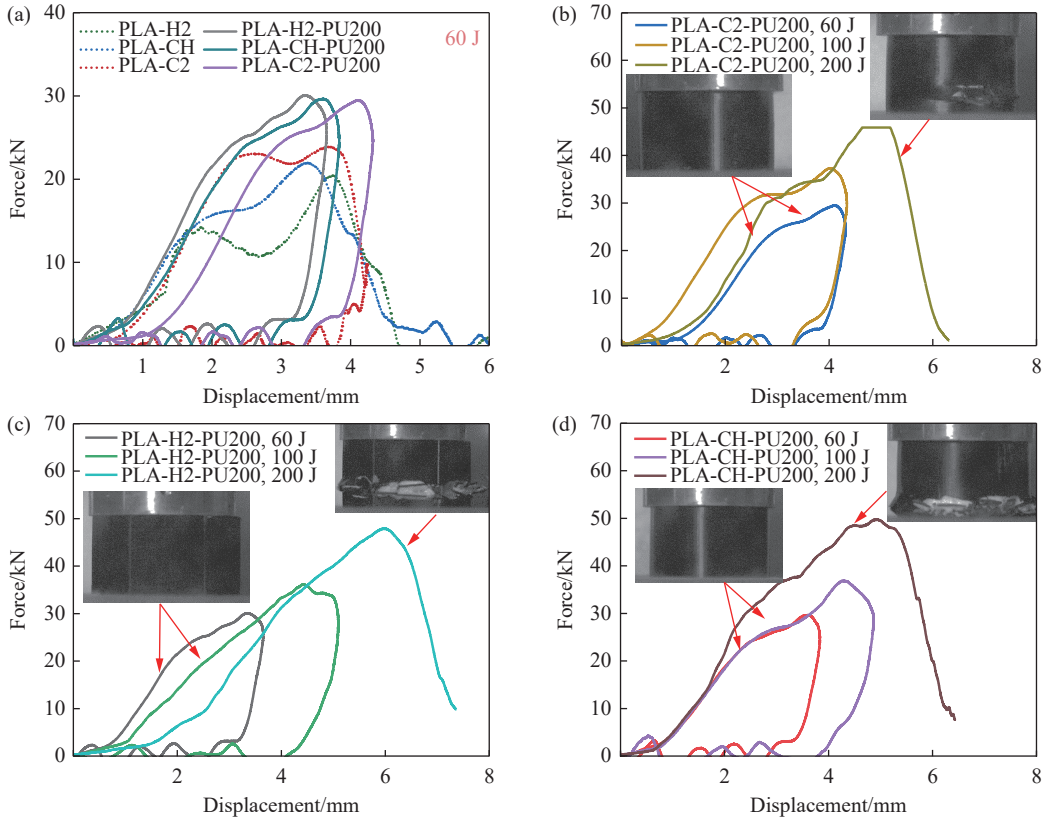


图 7　仿生结构在低速落锤冲击下的力-位移曲线

Fig. 7　Force-displacement curves of the biomimetic structures under low-velocity impact

4　结　论

围绕 3D 打印仿生薄壁-多孔复合结构的力学性能演化规律，开展了材料性能表征、准静态压缩与动态冲击试验研究，从材料匹配特性、结构承载特征及失效模式演化等层面揭示了复合结构的协同增强机制，得到如下主要结论。

(1) 发泡热效应显著改变了 PLA 壳体材料的力学响应特征，弹性模量和峰值强度降低而延展性提高，材料变形行为由脆性断裂向稳定塑性变形转变，优化了壳体与 PU 泡沫之间的力学匹配关系，为后续协同压溃行为奠定了材料基础。

(2) PU 填充后，复合结构的平台力和 MCF 显著提升，且平台力增幅高于 PCF 增幅，SEA 提升 256.43%～297.99%，CFE 提高至 60%～63%。结构压溃模式由局部集中失稳转变为逐层渐进堆叠，塑性铰沿轴向分布更加均匀，结构表现出稳定的分级能量吸收特征。

(3) 动态落锤冲击结果表明，不同冲击能量条件下结构的力学响应趋势与准静态压缩结果总体一致。未填充结构之间仍存在明显的构型差异，而复合结构的响应差异明显减小，整体承载特征趋于稳定。

与传统泡沫填充薄壁结构主要依赖结构几何优化或材料强化提升吸能性能的设计思路不同，本研究在结构设计中充分考虑了原位发泡过程产生的热效应对 PLA 壳体力学性能的影响。试验结果表明，

发泡过程中的热效应在一定程度上降低了壳体模量并提高了延展性，从而减小壳体与泡沫之间的刚度差异，促进结构由局部失稳向较为稳定的渐进堆叠塌缩模式转变，为聚合物基仿生薄壁-泡沫复合结构设计提供了新的认识。需要指出的是，本研究仅针对低速冲击条件及单一密度泡沫填充情况，对于更高应变率条件以及不同密度泡沫与壳体之间力学匹配关系的影响仍有待进一步研究。

参考文献：

[1] 侯泽凯, 栾云博, 雷科明, 等. 基于珍珠层和凤凰螺内部结构的混合仿生设计 [J]. 高压物理学报, 2024, 38(5): 054204.
HOU Z K, LUAN Y B, LEI K M, et al. Hybrid bionic design based on the internal structures of nacre and strombus gigas shell [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(5): 054204.

[2] JUNAEDI H, KHAN T, ABD-ELAZIEM W, et al. Optimization of circular hole patterns on crashworthiness of polyurethane foam-filled CFRP rectangular tubes [J]. Results in Engineering, 2025, 26: 104805.

[3] 李家雨, 付宇彤, 李元庆, 等. 增材制造仿生结构的力学性能优化及其功能设计研究进展 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4435−4456.
LI J Y, FU Y T, LI Y Q, et al. Research progress on mechanical performance optimization and functional design of additive manufactured biomimetic structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 4435−4456.

[4] 王志华, 李世强, 李鑫, 等. 轻质多孔金属及其夹芯结构力学行为的研究进展 [J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(3): 492–503.
WANG Z H, LI S Q, LI X, et al. Advances in studies of the mechanical behavior of cellular metallicmaterials and structures [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(3): 492–503.

[5] HUANG W, SHISHEHBOR M, GUARÍN-ZAPATA N, et al. A natural impact-resistant bicontinuous composite nanoparticle coating [J]. Nature Materials, 2020, 19(11): 1236–1243.

[6] ZHUANG Z Q, QIAN Z H, WANG X, et al. Bioinspired structural composite flexible material with high cushion performance [J]. Advanced Science, 2024, 11(5): 2304947.

[7] NEPAL D, KANG S, ADSTEDT K M, et al. Hierarchically structured bioinspired nanocomposites [J]. Nature Materials, 2023, 22(1): 18–35.

[8] 于鹏山, 刘志芳, 李世强. 新型仿生蜂窝结构的设计与耐撞性能分析 [J]. 高压物理学报, 2022, 36(1): 014204.
YU P S, LIU Z F, LI S Q. Design and crashworthiness analysis of new bionic honeycomb structure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(1): 014204.

[9] 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.

[10] XIAO Y Y, YIN H F, FANG H B, et al. Crashworthiness design of horsetail-bionic thin-walled structures under axial dynamic loading [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2016, 12(4): 563–576.

[11] 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): 034202.
DENG M J, LIU Z F. Design and crashworthiness study based on horsetail bionic thin-walled structure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(3): 034202.

[12] ZHANG Z, SONG B, FAN J X, et al. Design and 3D printing of graded bionic metamaterial inspired by pomelo peel for high energy absorption [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2023, 2(1): 100068.

[13] TIAN L X, ZHAN N, HE H H, et al. A bioinspired design approach for biomechanically matched tracheal stents [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2024, 19(1): e2437510.

[14] 叶建华, 徐欢, 韦铁平, 等. 复合负泊松比人工骨材料胞元结构参数与力学性能的匹配 [J]. 机械工程材料, 2024, 48(6): 93–101.
YE J H, XU H, WEI T P, et al. Matching of cell structural parameters and mechanical properties of composite negative Poisson’s ratio artificial bone materials [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2024, 48(6): 93–101.

[15] ZHANG Y H, ZHANG J M, ZHAO X L, et al. Mechanical behaviors regulation of triply periodic minimal surface structures with crystal twinning [J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103036.

[16] 唐鹿. 3D 打印 PLA 复合材料的制备及其在包装领域的应用 [J]. 包装工程, 2025, 46(21): 52–58.
TANG L. Preparation of 3D printed PLA composites and their application in packaging field [J]. Packaging Engineering, 2025,

46(21): 52–58.

[17] 李倩, 顾佳晨, 唐海原, 等. 基于拓扑优化的 3D 打印聚乳酸材料的轻量化结构设计 [J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(7): 76–84.
LI Q, GU J C, TANG H Y, et al. Lightweight structure design of 3D printed polylactic acid materials based on topology optimization [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(7): 76–84.

[18] 王秦峰. 聚乳酸的热性能研究 [J]. 上海化工, 2019, 44(2): 14–16.
WANG Q F. Study on thermal properties of poly(lactic acid) [J]. Shanghai Chemical Industry, 2019, 44(2): 14–16.

[19] WANG H, XIE S C, FENG Z J, et al. Mechanical properties of rigid and flexible polyurethane foam *in-situ* foamed Nomex honeycomb [J]. Composite Structures, 2023, 322: 117365.

[20] 周颖, 黄广炎, 王涛, 等. 多孔聚氨酯基复合削爆屏障的防护性能 [J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(10): 105101.
ZHOU Y, HUANG G Y, WANG T, et al. Blast mitigation performance of porous polyurethane-based composite explosion-proof barrier [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(10): 105101.

[21] 贾时雨, 王成, 徐文龙, 等. 环形复合内衬头盔冲击波防护性能研究 [J]. 兵工学报, 2025, 46(1): 60–69.
JIA S Y, WANG C, XU W L, et al. Protective performance of helmet with annular composite liner [J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(1): 60–69.

[22] REN J W, ZHOU Y L, QIANG L S, et al. Enhancing impact resistance of metallic foam core sandwich constructions through encasing high-strength fibrous composites [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 196: 111546.

[23] AALA F, GHOLIPOUR Y, SAMADI D. Experimental investigation of novel reinforced composite panels made of cold-rolled galvanized sheets filled with foamed concrete and fire-resistance polyurethane foam [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022: 6412974.

[24] WU W, LIU Y, YAN J B, et al. Blast performance of polyurethane foam-filled auxetic honeycomb sandwich beams [J]. Composite Structures, 2024, 338: 118104.

[25] HA N S, LU G X. A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 181: 107496.

[26] QI C, JIANG F, YANG S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: a review [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 227: 109393.

[27] GAO D D, YAN H, ZHOU Y, et al. Buckling evolution and energy dissipation of 3D-printed second-order fractal bio-inspired structures [J]. Acta Mechanica Sinica, 2026.

[28] YANG B S, CHEN W H, ZHOU X H, et al. Strong and crack-resistant hydrogel derived from pomelo peel for highly sensitive wearable sensors [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431: 134094.

[29] HÖLTTÄ K, TANG V, SEERING W P. Modularizing product architectures using dendrograms [J]. 2000, 24: 509–534.

[30] BARZIGAR S S, AHMADI H, LIAGHAT G. An analytical investigation on the crushing behavior of thin-walled tubes filled with a foam with strain hardening region [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 182: 110169.

[31] GE J, LUO T Y, QIU J. Experimental investigation of the dynamic responses of thin-walled and foam-filled steel tubes subjected to repeated impacts [J]. Materials, 2024, 17(5): 1018.

[32] GIBSON L J, ASHBY M F. Material properties [M]//GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 52−92.

[33] ALEXANDER J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading [J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1960, 13(1): 10–15.

[34] HUSSEIN R D, RUAN D, LU G X, et al. Crushing response of square aluminium tubes filled with polyurethane foam and aluminium honeycomb [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 110: 140–154.

[35] 黄翠萍, 邓小林. 圆形手性多胞管轴向冲击下的耐撞性分析 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(3): 034107.
HUANG C P, DENG X L. Crashworthiness analysis of circular chiral multicellular tubes under axial impact [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(3): 034107.

[36] SLAVKOVIĆ V, HANŽELIČ B, PLESEC V, et al. Thermo-mechanical behavior and strain rate sensitivity of 3D-printed polylactic acid (PLA) below glass transition temperature (T_g) [J]. Polymers, 2024, 16(11): 1526.

[37] AMAYA J B, VACA G. Determination of time and concentration conditions affecting polylactic acid (PLA) production [J]. Polymers, 2025, 17(15): 2009.

［38］ HA N S, LU G X. Thin-walled corrugated structures: a review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 157: 106995.

Hierarchical Energy Absorption and Dynamic Response of Bionic Thin-Walled-Foam Composite Structures Based on Mechanical Matching Design

GAO Dandan[1], YAN Hao[1], ZHOU Ying[2], WANG Tao[1], HUANG Guangyan[1]

（1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*; 2. *Applied Mechanics Laboratory*, *School of Aerospace Engineering*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*）

Abstract: To achieve the synergistic improvement of load-bearing stability and energy absorption in lightweight protective structures, a bio-inspired thin-walled-foam composite structure based on mechanical matching design was proposed. Three configurations of polylactic acid (PLA) bio-inspired shells were fabricated via additive manufacturing, and subsequently filled with polyurethane foam through an *in-situ* foaming process. Tensile tests, quasi-static compression tests, and drop-weight impact tests were conducted to investigate the foaming-induced thermal effects on the mechanical properties of the PLA shells and the structural response of the composites. Crashworthiness was evaluated using peak crushing force (PCF), plateau force, specific energy absorption (SEA), mean crushing force (MCF), and crushing force efficiency (CFE). Results show that the temperature rise during foaming reduces the elastic modulus and strength of PLA while improving its ductility, thereby enhancing the mechanical compatibility between the shell and foam. Consequently, the composite structures exhibit significantly increased plateau force and MCF, and their collapse mode transforms from local instability to progressive stacked crushing, leading to stable hierarchical energy absorption. Dynamic impact tests further demonstrate the superior load-bearing and energy absorption performance of the composite structures under high-energy impact. The results highlight the synergistic role of geometric configuration, material matching, and thermal-mechanical coupling in regulating the energy absorption behavior, providing guidance for the design of lightweight bio-inspired protective structures.

Keywords: hybrid biomimetic design; additive manufacturing; thin-walled-foam composite structures; thermal-mechanical coupling effect; hierarchical energy absorption