

3D打印仿生多重管状吸能结构碳纤维增强复合材料及其力学性能

杨方鸿 付韞辰 钟佳明 张代军 信中华 关博文 王成博 叶璐 黄威

Structure and mechanical properties of 3D printed biomimetic multi-tubular carbon fiber reinforced composites

YANG Fanghong, FU Yunchen, ZHONG Jiaming, ZHANG Daijun, XIN Zhonghua, GUAN Bowen, WANG Chengbo, YE Lu, HUANG Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250108.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

仿羊角管状复合材料结构抗冲击性能

Impact resistance of horn-inspired tubular composite structure

复合材料学报. 2023, 40(4): 2365–2376 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220530.006>

3D打印纤维增强复合材料工艺和力学性能研究进展

Recent advances in 3D printed fiber reinforced composites: Processing technique and mechanical performance

复合材料学报. 2022, 39(9): 4196–4212 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220530.003>

光固化3D打印改性碳纤维/光敏树脂复合材料的制备与性能调控

Preparation and property regulation of modified carbon fiber/photosensitive resin composite for UV-curing 3D printing

复合材料学报. 2022, 39(10): 4509–4517 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211109.001>

3D打印连续碳纤维/聚醚酮酮复合材料工艺及其性能调控

Process and performance control of 3D printed continuous carbon fiber/poly(ether ketone ketone) composites

复合材料学报. 2023, 40(9): 5070–5084 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221215.002>

直写3D打印聚酰亚胺-氧化硅气凝胶复合材料

Direct-write 3D printing of polyimide-silica aerogel composites

复合材料学报. 2024, 41(4): 1879–1889 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230726.001>

连续纤维增强3D打印复合材料工艺缺陷及其失效行为研究进展

Research progress on process defects and failure behaviors of continuous fiber-reinforced composite materials via 3D printing

复合材料学报. 2024, 41(9): 4478–4501 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240026.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

3D 打印仿生多重管状吸能结构碳纤维增强复合材料及其力学性能



分享本文

杨方鸿^{1,2}, 付韞辰³, 钟佳明^{*3}, 张代军^{1,2}, 信中华^{1,2}, 关博文¹,
王成博^{1,2}, 叶璐^{1,2}, 黄威^{*3}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095;

3. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 本文基于马蹄、骨骼等自然界生物组织的管状吸能结构启发, 设计并制备了一种仿生多重管状结构的碳纤维增强复合材料。通过 3D 打印制造出具有多重管状结构的碳纤维增强复合材料, 并引入紫外光固化技术使柔性聚氨酯树脂在管状结构中固化而形成异质界面, 显著提升了材料的韧性和抗冲击能力。实验结果表明: 该仿生结构材料在静态压缩测试中展现出延长的屈服阶段和优异的变形恢复能力, 比强度和能量吸收密度可达 130.6 MPa/(g·cm⁻³) 和 44.6 J/g, 高于传统的蜂窝吸能结构; 在三点弯曲试验中表现出更长的塑性变形区域, 其断裂韧性为碳纤维板的 1.54 倍; 在冲击测试中, 裂纹扩展受限于管的分布, 并且通过异质界面破坏显著提高吸收能量, 避免材料发生灾难性破坏。该研究为复合材料的抗冲击设计提供了新的仿生策略, 尤其在国防、航空航天等需要高韧性、高强度材料的应用领域, 具有广泛的应用潜力和前景。

关键词: 仿生管状结构; 3D 打印; 碳纤维增强复合材料; 异质界面; 抗冲击性能

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)05-2567-11

Structure and mechanical properties of 3D printed biomimetic multi-tubular carbon fiber reinforced composites

YANG Fanghong^{1,2}, FU Yunchen³, ZHONG Jiaming^{*3}, ZHANG Daijun^{1,2}, XIN Zhonghua^{1,2},
GUAN Bowen¹, WANG Chengbo^{1,2}, YE Lu^{1,2}, HUANG Wei^{*3}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing 100095, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Inspired by energy absorbent natural tubular biological structures, a bionic multi-tubular carbon fiber reinforced composite was designed. This bionic material was fabricated using 3D printing and UV curing, incorporating heterogeneous interfaces to significantly enhance toughness and impact resistance. Experimental results demonstrate that the bionic structure material exhibits an extended yield phase and exceptional deformation recovery in static compression tests, with the specific energy absorption of 44.6 J/g and specific strength of 130.6 MPa/(g·cm⁻³). In three-point bending tests, the material shows a prolonged plastic deformation region. The fracture toughness is 1.54 times compared to carbon fiber reinforced composite. For impact tests, it effectively absorbs energy with restricted crack propagation, and the destruction of heterogeneous interface. This study provides biomimetic insights for the design of impact-resistant composite materials, especially in application fields

收稿日期: 2024-11-22; 修回日期: 2024-12-24; 录用日期: 2024-12-31; 网络首发时间: 2025-01-08 15:42:43

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250108.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (52305359)

National Natural Science Foundation of China (52305359)

通信作者: 钟佳明, 博士, 研究方向为仿生多尺度结构抗冲击涂层的关键技术 E-mail: jmzhong@hust.edu.cn;

黄威, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为仿生复合材料的多尺度力学性能研究 E-mail: mse_huangw@hust.edu.cn

引用格式: 杨方鸿, 付韞辰, 钟佳明, 等. 3D 打印仿生多重管状吸能结构碳纤维增强复合材料及其力学性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(5): 2567-2577.

YANG Fanghong, FU Yunchen, ZHONG Jiaming, et al. Structure and mechanical properties of 3D printed biomimetic multi-tubular carbon fiber reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(5): 2567-2577(in Chinese).

such as national defense and aerospace that require materials with high toughness and high strength, it demonstrates extensive application potential and promising prospects.

Keywords: bionic tubular structures; 3D printing; carbon fiber reinforced composites; heterogeneous interfaces; impact resistance

冲击载荷对结构材料构成了重大威胁，尤其在国防、汽车、体育和航空航天工程领域^[1-2]。纤维增强复合材料因其轻质、易于加工、高比模量、高比强度和良好的耐腐蚀性，被认为是最具潜力的结构材料之一，逐渐替代传统材料并广泛应用于各个领域。然而，纤维复合材料在一些冲击环境中可能会发生灾难性失效^[3-5]。因此，探索能够增强结构材料在各种载荷下的抗损伤能力的结构设计策略，具有重要的现实意义。

自然界为抗压和抗冲击材料的设计提供了丰富的灵感^[6-10]。经过数亿年的自然选择，生物体进化出拥有精巧结构的生物材料。这些材料通过自下而上的有序合成，形成了从原子到宏观尺度的多尺度结构特征，从而具备了独特的增韧机制，如裂纹扭曲、结构重定向、裂缝偏转和结构互锁等^[11-12]。因此，生物材料往往将高断裂韧性与高强度巧妙地结合起来。人们发现在自然界中，一些频繁受到冲击的生物结构，如人类牙齿^[13]、皮质骨^[14]、马蹄^[15]、竹子^[16]和公羊角^[17]等生物材料中，广泛存在一种特殊的多重管状结构。这种结构是否与上述生物材料优异的抗压抗冲击性能有关，其中的能量吸收机制值得深入研究。

受这些生物结构中的多重管状结构的启发，研究人员在制备高性能仿生多重管状结构材料方面做了许多尝试。Huang^[18]受马蹄结构的启发，设计出一种多重管状结构，发现其在准静态压缩过程中细管周围产生多裂纹，并在下一个多重管状结构处终止，从而提高了材料的抗压性能。徐菁等^[19]借鉴羊角的管状微结构，通过3D打印制备出仿生管状结构的碳纤维增强复合材料，证明其可以有效引导裂纹扭曲扩展，提升抗冲击性能。Gupta等^[20]则受人类皮质骨多重管状结构的启发，设计出管状水泥基材料，利用异质界面引导裂纹在平面内弯曲扩展，大幅提高了断裂韧性。

这些研究表明，仿生多重管状结构的设计是提升合成材料力学性能的有效策略。多重管状结构中的裂纹在遇到界面时常发生偏转，裂纹扩展路径因界面材料差异而改变，从而提高裂纹传播所需的能量^[21-22]。此外，裂纹在管道中的扩展路径也受管道的影响，每当遇到管道时，裂纹传播

会暂时中止，并需要更多能量重新启动^[23]。这种裂纹逐步扩展机制有效防止了脆性断裂，提高了材料的整体韧性。

此项研究受生物体内多重管状结构的启发，仿生设计了一种独特的多重管状结构，以提高碳纤维材料的能量吸收和抗冲击性能。首先，利用碳纤维3D打印技术制备出新颖的多重管状结构，其中多重管和开口结构设计能够有效引导裂纹沿复杂路径扩展，减少裂纹对材料的破坏。然后，通过紫外固化技术将光固化聚氨酯填充于多重管状结构中，形成稳定的异质材料界面，实现了高强度与高韧性的结合。最后，通过准静态和动态力学试验证实了仿生设计多重管状结构的优异特性，并揭示了其能量吸收机制。

1 实验材料及方法

1.1 生物样品染色及观测

马蹄样本来自野生贸易公司 (Pinedale, Wy, USA)。用2.5%戊二醛溶液固定另外3个相同尺寸的样品24 h。采用超薄切片机 (Leica EM UC6, Leica Microsystems Inc.) 制作样本薄片 (~1 μm 厚)，然后用甲苯胺蓝染色，以增加对比度。

通过光学显微镜 (VHX 1000 microscope, Keyence) 观察马蹄薄片样本及染色后马蹄的细微结构。通过场发射扫描电子显微镜 (JSM-7600F, JEOL) 观测马蹄砸断后的断面结构。

1.2 仿生样品制备

3D 仿生多重管状结构碳纤维板：利用Unigraphics NX软件构建3D打印仿生多重管状结构材料的模型，并将模型导入Mark-Charpy公司切片软件以设置打印参数。接下来，使用Mark Two 3D打印机采用熔融沉积制造技术，将短切碳纤维增强尼龙复合材料 (Onyx) 打印成预设设计的结构。同样地，构建与仿生多重管状结构材料整体尺寸一致的碳纤维增强复合材料的模型，并通过3D打印的方法进行样品制备，用于后续的对比较实验。

柔性聚氨酯树脂的制备及填入：按质量比60 : 36 : 4将双官能团聚氨酯丙烯酸酯、三丙二醇二丙烯酸酯和光引发剂二苯基-(2,4,6-三甲基苯甲

酰)氧磷 (TPO)，并搅拌 1 h 以获得均匀的溶液。使用滴管将混合液滴加至打印完成的碳纤维模型中。随后，使用 365 nm 紫外灯照射样品 1 min，使混合液充分固化，形成完整的仿生结构，并在材料间构建稳定的异质界面。所有原料均购自上海引昌新材料有限公司。

仿生管状复合材料的结构设计策略和制造工艺如图 1 所示。

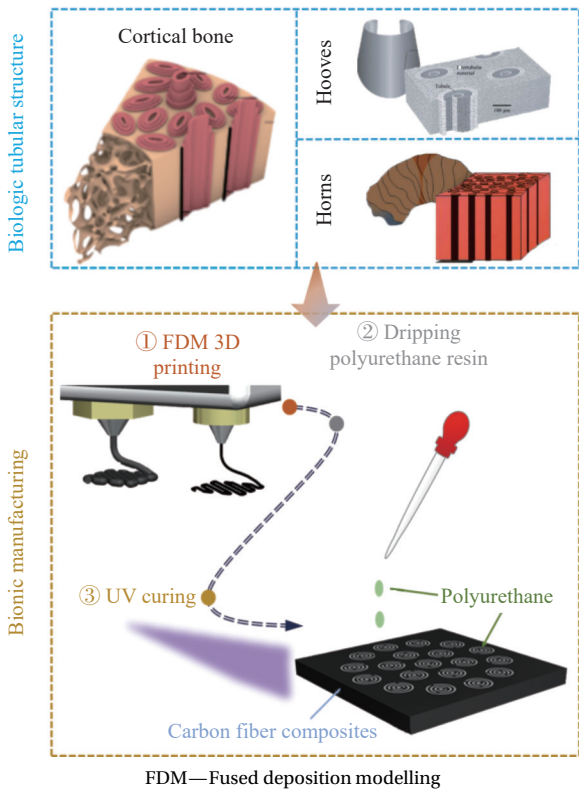


图 1 仿生管状复合材料的结构设计策略和制造工艺示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the structure design strategy and fabrication process of bionic structure composites

1.3 仿生材料形貌表征及性能测试

材料的形貌：首先使用移动电子设备对样品进行拍摄，其次通过超景深三维显微镜 (EasyZoom5 3D, Motic) 进一步观察其细微结构，并重构材料受冲击后的 3D 形貌。异质结构的微观界面通过场发射扫描电子显微镜进行详细分析。

材料的准静态、动态力学性能：材料的压缩测试和压缩-回复测试在材料力学性能测试机 (C45.105 EY, MTS Systems) 上进行，压缩与压缩-回复的试样尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm，压缩测试中以 2 mm/min 的速度对样品进行压缩，当压缩量到达 6 mm(样品变形 60%) 后停止；压缩-

回复测试中以 2 mm/min 的速度分别压缩样品 0.5 mm、1.5 mm 和 3 mm (变形 5%、15% 和 30%)，并以同样的速度回程。材料的冲击性能通过 Instron CEAST 9450 落锤冲击测试仪 (Instron 公司) 测试，冲击试样的尺寸为 50 mm×50 mm×5 mm，落锤质量为 5.392 kg，冲击速度为 2.35 m/s，冲击能量为 15 J。另外，使用 BGD 305 重型冲击试验器 (标格达精密仪器 (广州) 有限公司) 对同一冲击试样进行多次冲击测试，落锤质量为 1 kg，冲击的能量分别为 2 J、4 J、6 J、8 J 和 10 J。依据 ASTM E1820-21^[24] 标准制备三点弯曲试样，尺寸为 100 mm×20 mm×10 mm (图 2)，同样使用多材料力学性能测试机完成测试。所有力学性能测试均在室温下进行。

比强度和比能量吸收计算：

比强度 (SS) 为

$$SS = \frac{\sigma_1}{\rho} \tag{1}$$

其中： σ_1 是材料的屈服强度； ρ 是材料密度。

比能量吸收 (SEA) 定义为单位质量的能量吸收，其值为

$$SEA = \frac{EA}{m} \tag{2}$$

其中：EA 是能量吸收； m 是材料的质量。

能量吸收 (EA) 用于评估结构通过塑性变形消耗压缩能量的能力。可定义为

$$EA = \int_0^d F(x) dx \tag{3}$$

其中： $F(x)$ 是断裂过程中轴向冲击力与位移 x 的函数关系； d 是有效变形距离。

韧性计算：韧性材料的断裂韧性 (K_{Ic}) 可由 J 积分进行计算：

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{JE}{1-\nu^2}} \tag{4}$$

其中： E 是杨氏模量； ν 是泊松比。

J 积分由弹性部分和塑性部分组成：

$$J = J_{el} + J_{Pl} \tag{5}$$

J 积分弹性部分 J_{el} ：

$$J_{el} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} \tag{6}$$

应力强度因子 (K) 可以通过下列公式计算：

$$K = \frac{P_{Ic}S}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{7}$$

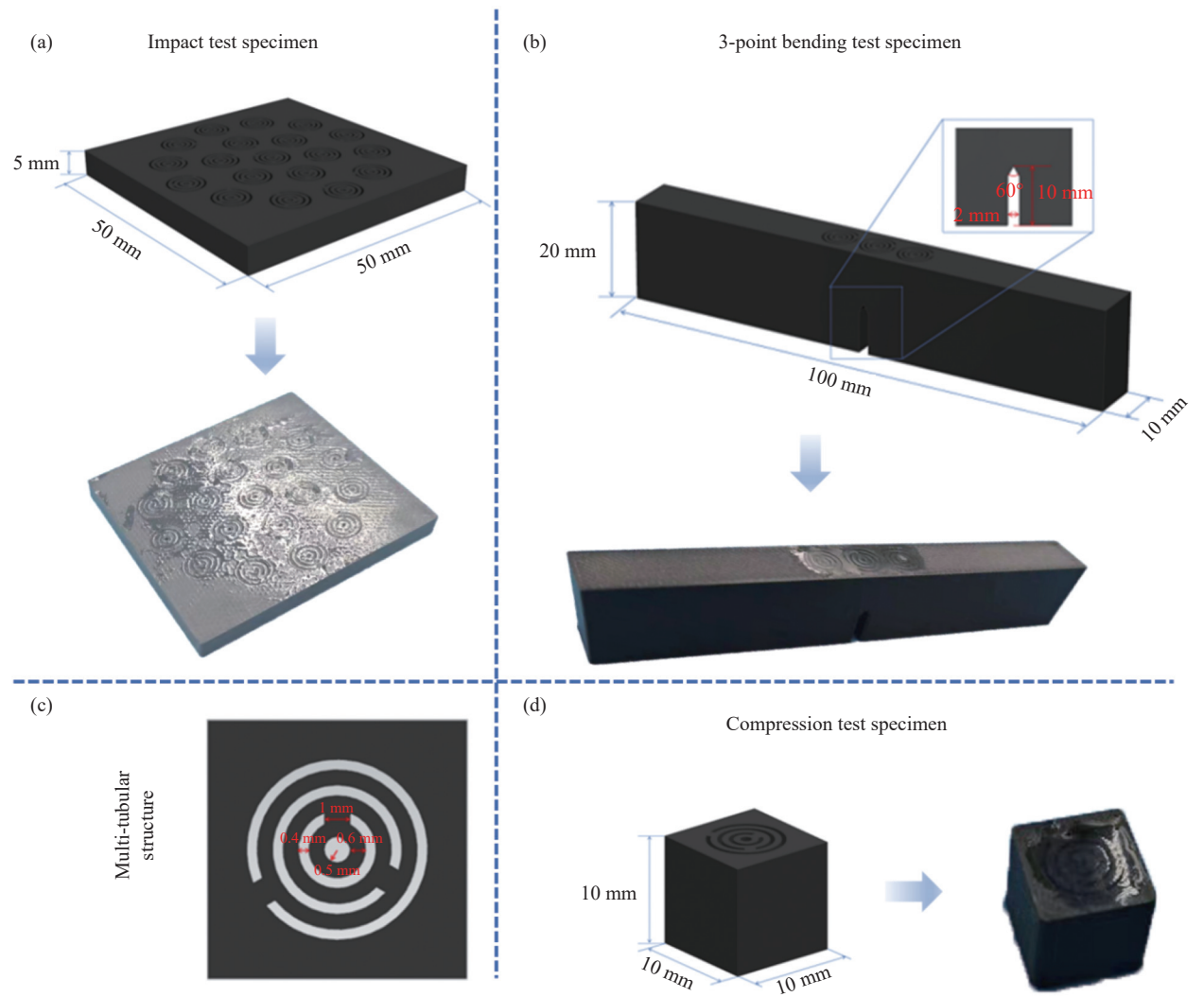


图2 仿生样品设计图和实物图: (a) 冲击测试样品; (b) 三点弯曲测试样品; (c) 管结构; (d) 压缩样品

Fig. 2 Design and actual images of different test samples: (a) Impact test sample; (b) Three-point bending test sample; (c) Multi-tubular structure; (d) Compression test sample

$$f\left(\frac{a}{W}\right)=\frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2}\left[1.99-\left(\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)\left(2.15-\frac{3.93a}{W}+2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right)\right]}{2\left(1+\frac{2a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}}\tag{8}$$

其中： P_{Ic} 是三点弯曲测试中的最大载荷； S 是支撑点间距离； B 为试件厚度； W 为试件宽度； a 为切口深度。

J 积分塑性部分 J_{Pl} ：

$$J_{Pl}=\eta\frac{A_{pl}}{B(W-a)}\tag{9}$$

其中： η 是一个与试样形状和裂纹几何相关的塑性系数； A_{pl} 是载荷-位移曲线中塑性变形区域下

的面积。

2 结果与讨论

2.1 生物样品观测及吸能机制研究

当一匹未佩戴马蹄铁的马以约 4 m/s 的速度在沥青路面上奔跑时，其减速度约为 56 g，产生的地面反作用力峰值在 11.5~16.1 N/kg 之间。马蹄作为一种典型的多重管状结构生物材料，需要频繁接触地面，并表现出优异的能量吸收能力。通过复现马蹄的微观结构及其吸能机制，有望为仿生材料的结构设计提供启示。

首先，通过光学显微镜对马蹄的微观结构进行了研究 (图 3(a))，结果表明其内部有密集分布的管道。为更深入观察该管道结构 (图 3(b))，对马蹄进行了简单染色处理，结果显示中空管道周

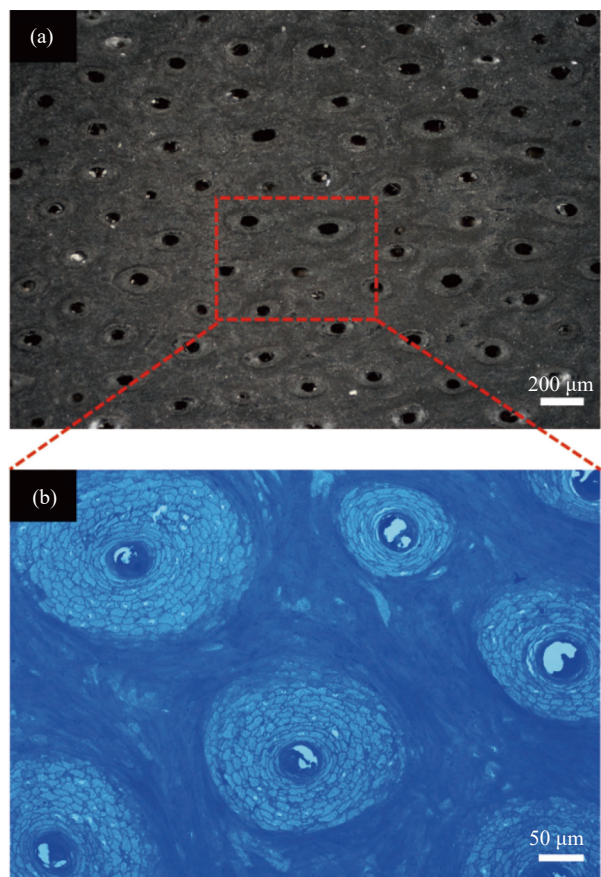


图 3 光学显微镜下的马蹄形貌：(a) 原始马蹄样品；
(b) 染色后的马蹄薄片

Fig. 3 Morphology of the horse hoof under optical microscope:
(a) Original hoof sample; (b) Stained hoof sample

围堆积了多层管壁，管壁由多层角质细胞堆叠而成，并且管壁所占据的空间远大于中空管道。

使用扫描电子显微镜对马蹄断裂样品的断面结构进行了观察(图 4)。在 72 倍放大倍率下，可以清晰地观察到样品中多重管状结构的分布。当马蹄结构受到破坏时，裂纹首先在较脆弱的多层管壁界面产生，并逐步向相邻的管扩展。然而，由于管的阻碍，裂纹无法继续扩展，导致样品中只出现小而多的微裂纹，而未形成贯通的裂纹破坏。当放大倍率增加至 7 200 倍时，多层管壁间的界面破坏清晰可见，层与层之间出现纤维桥接，这种多层管壁间的破坏显著增强了马蹄的能量吸收能力。

2.2 仿生样品结构及性能研究

采用 3D 打印及紫外光固化的方法制备了具有精细多重管状结构的仿生碳纤维材料。在光学显微镜下观察发现，碳纤维增强复合材料被打印成圆形管壁结构，短切碳纤维在混合场光线下清晰

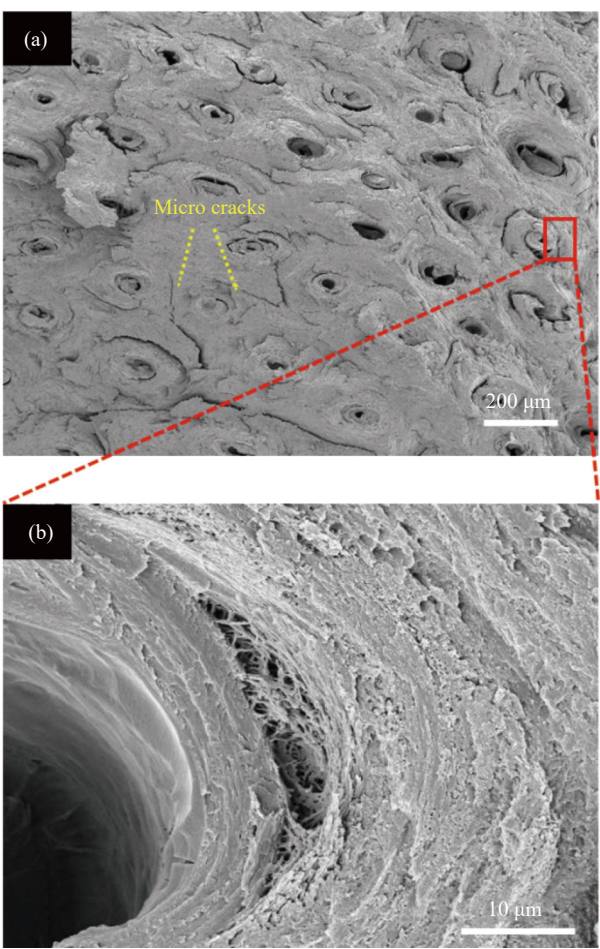


图 4 马蹄砸断后的扫描电镜图像：(a) 微裂纹扩展；
(b) 多层管壁间的纤维桥接

Fig. 4 SEM images of the fractured horse hoof: (a) Microcrack propagation; (b) Fiber bridging between multi-layered tubular walls

可见；光固化聚氨酯树脂则填充在多重管的空隙中(图 5(a))，与碳纤维增强复合材料交替构成仿生结构。为验证该仿生材料内部结构的完整性，对样品进行切割并在显微镜下观察其内部结构，结果表明树脂填充均匀良好(图 5(b))。其中，碳纤维增强复合材料层宽度为 0.6 mm，光固化聚氨酯层宽度为 0.4 mm。进一步通过扫描电子显微镜(放大倍数 20 000 倍)观察仿生材料的界面，清晰地观察到异质材料的连接情况(图 5(c))。具体而言，在右侧分界线以上，熔融沉积成型(FDM)打印的碳纤维增强复合材料表现出点状密堆积的结构；在左侧分界线以下，光固化聚氨酯形成平滑表面。在界面过渡区，点状结构显著减少，展现出良好的界面过渡。以上结构表征结果表明，仿生设计的多重管状结构已经得到了完美实现，且异质材料之间达到优良的界面结合效果。

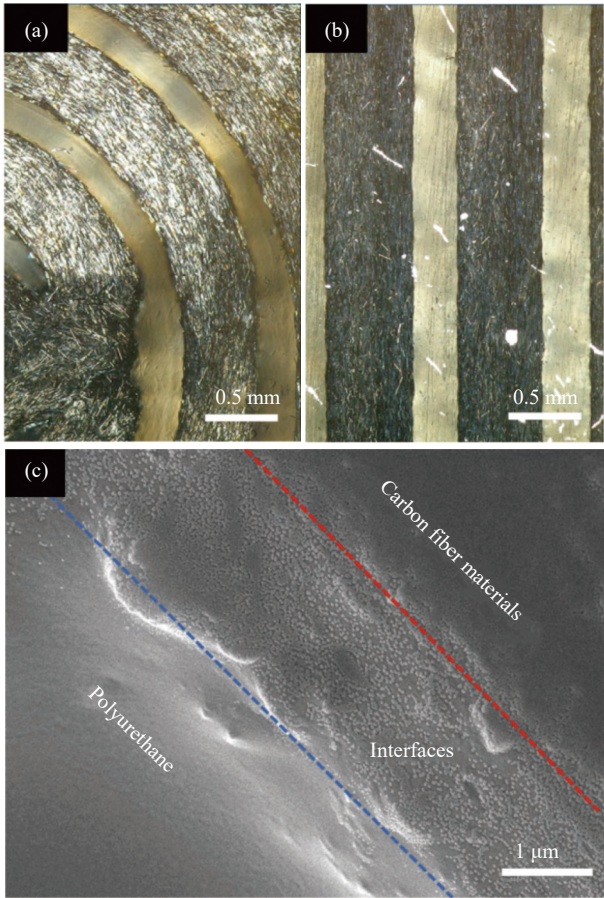


图5 仿生碳纤维材料的结构表征: (a) 圆形管壁结构; (b) 内部填充结构; (c) 异质材料界面结构

Fig. 5 Structural characterization of the biomimetic carbon fiber material: (a) Circular tubular wall structure; (b) Internal filling structure; (c) Heterogeneous material interface structure

采用准静态力学性能测试来研究仿生结构对材料抗压性能的影响。首先,将仿生结构样品与碳纤维增强复合材料样品分别以 2 mm/min 的速率进行压缩(图 6(a))。在初始的弹性变形阶段,两种样品的曲线接近,碳纤维板和仿生结构材料的模量分别为 1 585 MPa 和 1 197 MPa。由于柔性聚氨酯树脂的填充,仿生结构材料的屈服应力较低,为 52.9 MPa。随着应变增加,两种样品均经历屈服阶段和应变硬化阶段。相较之下,仿生多重管状结构材料的屈服阶段显著延长,有着更长的平台期(平台应变达到 60%)。压缩后的样品显微图(附图 S1)显示,随着压缩程度的增加,碳纤维增强复合材料逐渐压实,而仿生结构样品则呈现出多层断裂的形貌。因此,推测仿生结构材料在屈服阶段后期曲线的明显波动及延长的现象,与其多层管壁间的层间断裂密切相关。仿生结构材料的逐层断裂不仅能够吸收大量能量,还显著

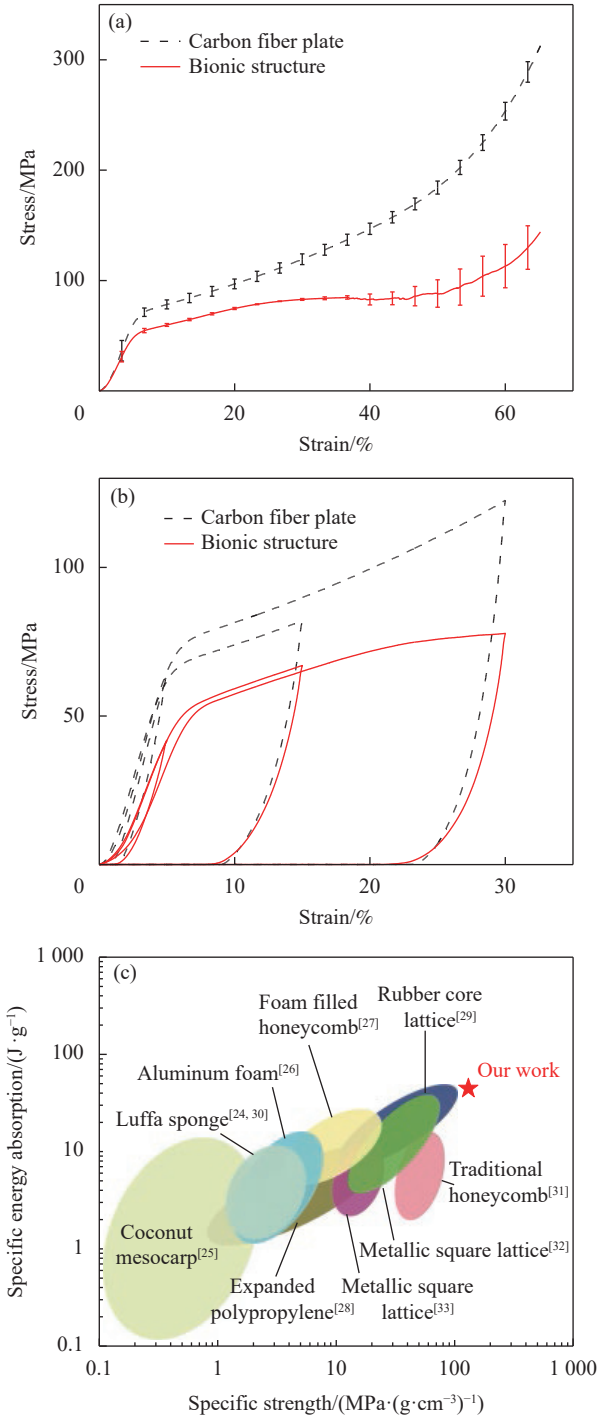


图6 (a) 静态压缩测试中应力-应变曲线; (b) “压缩-回复”曲线; (c) 仿生材料与其他典型材料的比较

Fig. 6 (a) Stress-strain curves in static compression testing; (b) “Compression-recovery” curves; (c) Comparison of bionic materials and other typical materials

延长了应力平台期,这表明其在准静态压缩载荷下具有更优越的能量吸收性能。

采用“压缩-回复”测试来进一步探究仿生结构对材料抗压性能的影响(图 6(b), 附图 S2)。在万能

材料试验机上，将两种材料分别压缩至 5%、15% 和 30% 应变后释放。不同材料回复后位移(附表 S1)表明，仿生结构材料在相同条件下比碳纤维板表现出更大的位移回复能力。根据压缩曲线计算其比能量吸收(44.6 J/g)和比强度(130.6 MPa/(g·cm⁻³))，并与其他典型材料进行对比(附表 S2)^[25-39]，发现其性能较优异(图 6(c))。

采用三点弯曲试验研究仿生结构对材料韧性的影响(图 7)。在初始的弹性变形阶段，两种材料均表现出力随位移线性增加的趋势。由于内部填充柔性聚氨酯，仿生结构材料的刚度相对碳纤维板较低。进入塑性变形阶段后，碳纤维板迅速达到峰值力约 168 N，而此时仿生结构材料尚未达到最大力值。随后，仿生结构材料缓慢增加至峰值力约 160 N，并在峰值力后呈现长而平缓的塑性变形区域(斜率接近 0)。根据 ASTM E1820 标准^[24]进行计算，仿生结构材料的断裂韧性显著增加，约为 13.2 MPa·m^{1/2}，是碳纤维板断裂韧性的 1.54 倍。总体而言，仿生结构材料在峰值力接近碳纤维板的情况下，显著扩展了塑性变形区域，表现出优良的韧性。

仿生管状结构材料在三点弯曲测试下表现出更显著的变形，符合其力-位移曲线显示出延长的塑性变形区域(图 8)。这种较大的弯曲变形能力表明仿生材料在极限应力条件下具有更高的柔韧性，与其优异的抗破坏性能相关。为进一步探索两种材料在弯曲测试后的破坏机制，通过光学显微镜对仿生结构材料和碳纤维增强复合材料的裂

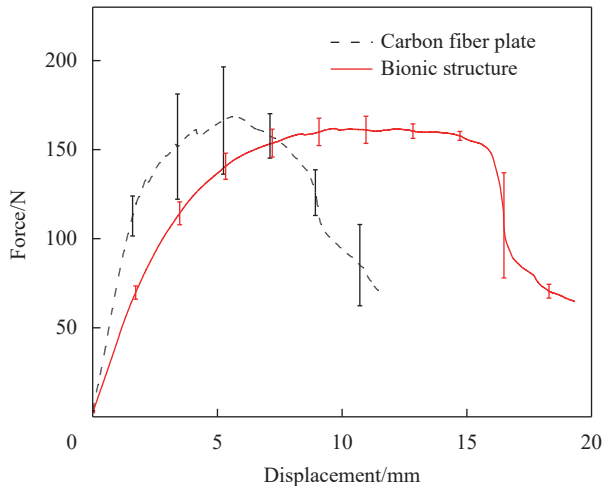


图 7 三点弯曲测试中两种材料的力-位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curves of two materials in three-point bending tests

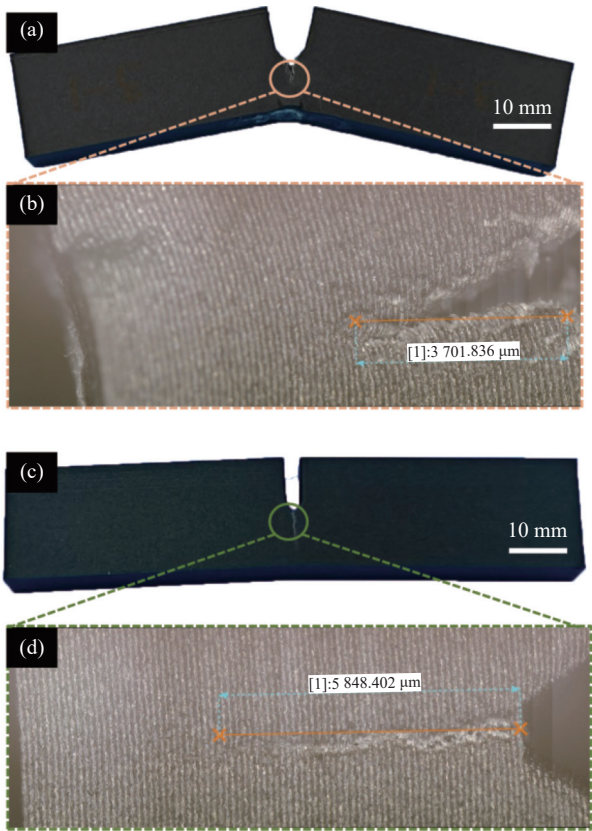


图 8 三点弯曲后图片：((a), (b)) 仿生管状结构材料；((c), (d)) 碳纤维板

Fig. 8 Images after three-point bending: ((a), (b)) Biomimetic structure material; ((c), (d)) Carbon fiber plate

纹形态进行了观察。结果显示，仿生结构材料中的裂纹较短，并且裂纹扩展受到明显限制，表现出较小的灾难性裂纹扩展倾向。这种行为与碳纤维增强复合材料形成鲜明对比，后者在应力作用下容易产生裂纹并迅速扩展，导致裂纹的贯通发展。仿生结构材料中的多重管状结构带来了大量异质界面，大幅增加了其能量耗散，展现出优异的韧性。

采用落锤冲击测试评估仿生结构对材料抗冲击性能的影响(图 9)。碳纤维板及仿生结构材料制备成 50 mm×50 mm 冲击试样，在 15 J 的落锤下进行冲击。在初始阶段，两条曲线都表现出力随着位移的线性增长趋势，碳纤维板的曲线较陡峭，显示出更高的刚度。碳纤维板的峰值力接近 4 500 N，在大约 2 mm 的位移时达到峰值力；而仿生结构材料的峰值力较低(~3 500 N)，在大约 7 mm 的位移时达到。在达到峰值力后，碳纤维板具有一段 3 mm 位移的裂纹扩展区域，其间通过纤维板的分层和断裂等模式吸收冲击能量。而

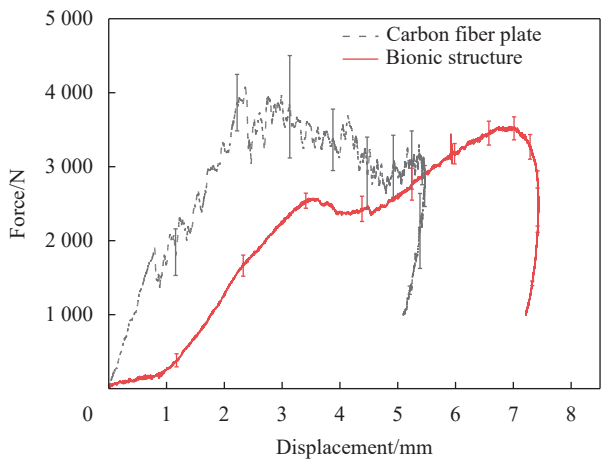


图9 冲击测试中两种材料的力-位移曲线

Fig. 9 Force-displacement curves of two materials in impact tests

同样的冲击能量，仿生结构材料则主要通过大幅的塑性变形来吸收，其内部产生的裂纹破坏远少于碳纤维板。

冲击过后，样品通过电子设备拍摄样品的外观形貌 (图 10(a)~图 10(d))，并通过超景深三维显微镜来重构冲击过后的三维图像。表征分析显示，碳纤维板在 15 J 冲击下产生了显著的损伤，出现连通裂纹和穿孔现象；而仿生结构材料在冲击区域中心的管壁附近出现多个小裂纹，且裂纹止于周围其他多重管状结构。观察多重管内部结构，聚氨酯与短切纤维复合材料在多重管壁附近出现明显分离，从而增强了冲击能量吸收。通过上述的吸能方式，使仿生结构材料没有发生类似于碳纤维板的灾难性破坏。虽然仿生结构材料在受到冲击后产生的较大程度的塑性变形可能会损伤被保护的对象，但是由于其受到的冲击力是缓慢增长的，这降低了结构产生高减速度的可能性，使整体结构更加稳定，有利于提高抗冲击性能。

为了清晰展示仿生设计碳纤维板在冲击过程中裂纹的扩展情况，我们对同一试样进行了多次冲击测试，冲击能量分别设置为 2 J、4 J、6 J、8 J 和 10 J。每次冲击后，使用显微镜观察试样表面的结构变化 (图 10(e)、图 10(f))。在前两次冲击 (2 J 和 4 J) 中，仿生设计碳纤维板未出现明显变化；第三次冲击 (6 J) 后，试样冲击中心的管状结构中开始出现聚氨酯与碳纤维界面的分离，同时多层管壁上出现裂纹；在最后一次冲击 (10 J) 后，聚氨酯与碳纤维的界面分离更加显著，并且在相邻的多层管结构之间观察到了裂纹的形成。因此，我们认为随着冲击能量的增加，异质材料界面的

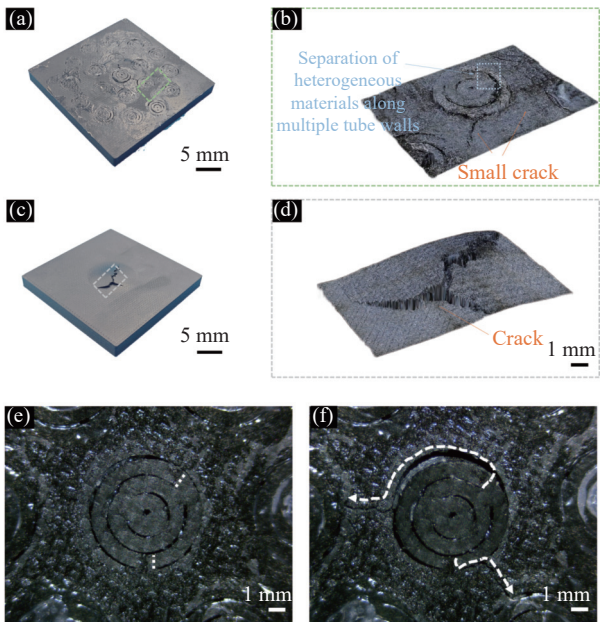


图 10 仿生结构材料 ((a), (b)) 和碳纤维板 ((c), (d)) 在 15 J 冲击后的裂纹及损伤情况; (e) 多次冲击测试中仿生结构材料第 3 次 (e) 和第 5 次 (f) 冲击后的显微图片

Fig. 10 Crack formation and damage in the biomimetic structure material ((a), (b)) and carbon fiber plate ((c), (d)) after 15 J impact; Micrographs of bionic structural material after the third (e) and the fifth (f) impact in multiple impact test

分离程度逐渐加剧，多层管壁上的裂纹呈曲折扩展趋势，最终在相邻管结构间终止。总之，仿生结构材料展现出类似生物多重管状结构的吸能机制，显著提升了材料的抗冲击性能。

3 结论

轻质、高吸能、抗冲击结构材料在国防、航空航天及运动健康等领域至关重要。如何提升材料的抗冲击及能量吸收性能一直是防护和结构材料的研究重点之一。自然界的结构材料如骨、马蹄和羊角等通过多重管状微结构的引入提升了材料的韧性及能量吸收性能。鉴于此，本文探索了马蹄多重管状微结构及其中主要裂纹扩展模式，并基于此提出了一种仿生多重管状结构碳纤维增强复合材料设计和制造方法，旨在改善复合材料的能量吸收性能和抗冲击能力。结合 3D 打印与紫外光固化技术成功制备了具有多重管结构和复杂异质界面的复合材料。相对于传统 3D 打印复合材料，此仿生复合材料具备更加优异的准静态能量吸收及抗低速冲击的性能。具体结论如下：

(1) 准静态压缩测试表明，仿生材料展现出显著延长的屈服阶段和平台阶段，验证了柔性聚氨

酯填充及多重管状结构设计对抗压吸能性能的关键作用;

(2) 三点弯曲测试显示, 仿生材料的峰值力接近传统碳纤维板, 但其塑性变形能力显著增强, 韧性大幅提高, 展现了优异的抗裂纹扩展性能;

(3) 冲击测试结果进一步表明, 与传统碳纤维板相比, 仿生材料在更大位移下达到峰值力, 且受到的冲击损伤较小, 能量吸收能力显著增强;

(4) 结构分析揭示, 多重管状结构通过有效阻止裂纹扩展和引入异质界面破坏, 显著提升了裂纹传播所需的能量, 验证了仿生设计的结构优化机制。

综上所述, 本文从自然界多重管状结构中获得灵感, 系统设计并验证了新型仿生碳纤维增强复合材料的吸能特性和抗冲击性能。这一成果为复合材料的结构优化提供了新的设计思路, 并展示了其在国防、航空航天及其他高性能需求领域的应用潜力。

参考文献:

[1] GU G X, TAKAFFOLI M, BUEHLER M J. Hierarchically enhanced impact resistance of bioinspired composites[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(28): 1700060.

[2] DALILI N, EDRISY A, CARRIVEAU R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2): 428-438.

[3] 王安妮, 刘晓刚, 岳清瑞. 碳纤维增强树脂基复合材料及其拉索抗低速冲击性能综述 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5049-5061.

WANG Anni, LIU Xiaogang, YUE Qingrui. Low-velocity impact resistance of carbon fiber reinforced polymer composite and its cables: A review[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(11): 5049-5061(in Chinese).

[4] 张辰, 饶云飞, 李倩倩, 等. 碳纤维-玻璃纤维混杂增强环氧树脂复合材料低速冲击性能及其模拟 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(1): 165-176.

ZHANG Chen, RAO Yunfei, LI Qianqian, et al. Low-velocity impact behavior and numerical simulation of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(1): 165-176(in Chinese).

[5] NING F, CONG W, QIU J, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 80: 369-378.

[6] RITCHIE R O. The conflicts between strength and tough-

ness[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(11): 817-822.

[7] HUANG W, RESTREPO D, JUNG J, et al. Multiscale toughening mechanisms in biological materials and bioinspired designs[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1901561.

[8] BARTHELAT F, YIN Z, BUEHLER M J. Structure and mechanics of interfaces in biological materials[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1: 16007.

[9] WEGST U G K, BAI H, SAIZ E, et al. Bioinspired structural materials[J]. *Nature Materials*, 2015, 14: 23-36.

[10] EDER M, AMINI S, FRATZL P. Biological composites—Complex structures for functional diversity[J]. *Science*, 2018, 362(6414): 543-547.

[11] CHEN P Y, MCKITTRICK J, MEYERS M A. Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs[J]. *Progress in Materials Science*, 2012, 57(8): 1492-1704.

[12] MEYERS M A, CHEN P Y, LIN A Y M, et al. Biological materials: Structure and mechanical properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2008, 53(1): 1-206.

[13] NALLA R K, KINNEY J H, RITCHIE R O. Effect of orientation on the in vitro fracture toughness of dentin: The role of toughening mechanisms[J]. *Biomaterials*, 2003, 24(22): 3955-3968.

[14] NALLA R K, KINNEY J H, RITCHIE R O. Mechanistic fracture criteria for the failure of human cortical bone[J]. *Nature Materials*, 2003, 2: 164-168.

[15] MCKITTRICK J, CHEN P Y, TOMBOLATO L, et al. Energy absorbent natural materials and bioinspired design strategies: A review[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2010, 30(3): 331-342.

[16] GONG S, NI H, JIANG L, et al. Learning from nature: Constructing high performance graphene-based nanocomposites[J]. *Materials Today*, 2017, 20(4): 210-219.

[17] LEE S, NOVITSKAYA E E, REYNANTE B, et al. Impact testing of structural biological materials[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2011, 31(4): 730-739.

[18] HUANG W. Impact resistant and energy absorbent natural keratin materials: Horns and hooves [D]. San Diego: University of California San Diego, 2018.

[19] 徐菁, 李岩, 付昆昆. 仿羊角管状复合材料结构抗冲击性能 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(4): 2365-2376.

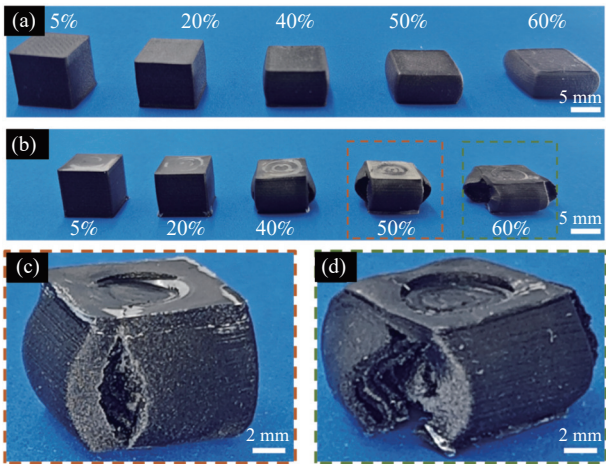
XU Jing, LI Yan, FU Kunkun. Impact resistance of horn-inspired tubular composite structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(4): 2365-2376(in Chinese).

[20] GUPTA S, MOINI R. Tough cortical bone-inspired tubular architected cement-based material with disorder[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(52): 2313904.

[21] GUSTAFSSON A, WALLIN M, ISAKSSON H. The influence of microstructure on crack propagation in cortical bone at the mesoscale[J]. *Journal of Biomechanics*, 2020, 112:

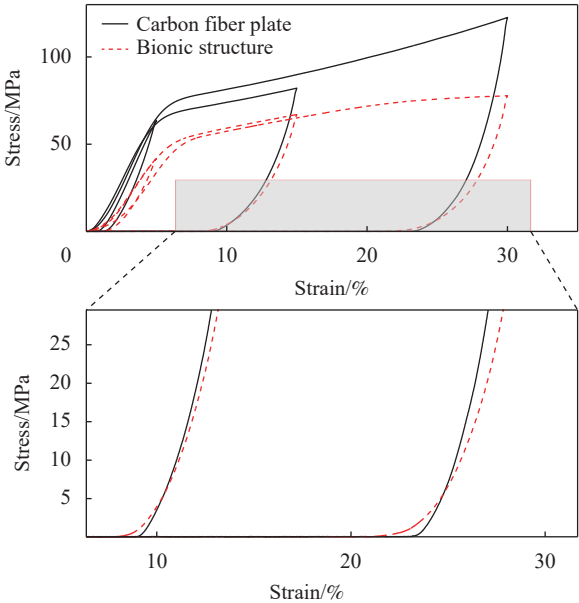
- 110020.
- [22] ZIMMERMANN E A, LAUNEY M E, BARTH H D, et al. Mixed-mode fracture of human cortical bone[J]. [Bio-materials](#), 2009, 30(29): 5877-5884.
 - [23] HUANG W, ZAHERI A, JUNG J Y, et al. Hierarchical structure and compressive deformation mechanisms of bighorn sheep (*Ovis canadensis*) horn[J]. [Acta Biomaterialia](#), 2017, 64: 1-14.
 - [24] ASTM International. Standard test method for measurement of fracture toughness: ASTM E1820-21[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
 - [25] ZHANG X, ZHANG H. Theoretical and numerical investigation on the crush resistance of rhombic and kagome honeycombs[J]. [Composite Structures](#), 2013, 96: 143-152.
 - [26] ZHANG X, HU H H. Crushing analysis of polygonal columns and angle elements[J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2010, 37: 441-451.
 - [27] KIM H S. New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency[J]. [Thin-Walled Structures](#), 2002, 40: 311-327.
 - [28] ZHANG X, ZHANG H. Numerical and theoretical studies on energy absorption of three panel angle elements[J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2012, 46: 23-40.
 - [29] LU G X, YU T X. Energy absorption of structures and materials[M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2003: 73-74.
 - [30] QIAO J, CHEN C. In-plane crushing of a hierarchical honeycomb[J]. [International Journal of Solids and Structures](#), 2016, 85-86: 57-66.
 - [31] SHEN J, XIE Y M, HUANG X, et al. Mechanical properties of Luffa sponge[J]. [Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials](#), 2012, 15: 141-152.
 - [32] XUAN T N, HOU S, LIU T, et al. A potential natural energy absorption material—Coconut mesocarp: Part A: Experimental investigations on mechanical properties[J]. [International Journal of Mechanical Sciences](#), 2016, 115-116: 564-573.
 - [33] IDRIS M I, VODENITCHAROVA T, HOFFMAN M. Mechanical behaviour and energy absorption of closed-cell aluminium foam panels in uniaxial compression[J]. [Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing](#), 2009, 517: 37-45.
 - [34] LIU Q, FU J, WANG J, et al. Axial and lateral crushing responses of aluminum honeycombs filled with EPP foam[J]. [Composites Part B: Engineering](#), 2017, 130: 236-247.
 - [35] WEN F F, QIAN Y F, GAO Y, et al. 3D woven tubular composites with bamboo-structures for enhanced energy absorption: Designing, manufacturing and performance analysis[J]. [Polymer Composites](#), 2024, 45(9): 8282-8295.
 - [36] ZUHRI M, LIAO Y, WANG Q Y, et al. The energy absorbing properties of bamboo-based structures[J]. [Journal of Sandwich Structures and Materials](#), 2019, 21: 1032-1054.
 - [37] TAN S, CAI X, LI W, et al. Cancellous bone-like polyurethane foam: A porous material with excellent properties for ultra-high energy absorption[J]. [ACS Applied Polymer Materials](#), 2024, 6(4): 2232-2242.
 - [38] NGOC S H, THONG M P, CHEN W, et al. Energy absorption characteristics of bio-inspired hierarchical multi-cell bi-tubular tubes[J]. [International Journal of Mechanical Sciences](#), 2023, 251: 108260.
 - [39] YANG J, GU D, LIN K, et al. Optimization of bio-inspired bi-directionally corrugated panel impact-resistance structures: Numerical simulation and selective laser melting process[J]. [Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials](#), 2019, 91: 59-67.

附录：



附图 S1 样品压缩过后的图片：(a) 碳纤维样品；(b) 仿生结构样品；
(c) 仿生结构样品压缩到 50%；(d) 仿生结构样品压缩到 60%

Fig. S1 Images of compressed samples: (a) Carbon fiber sample;
(b) Biomimetic structure sample; (c) Biomimetic structure sample
compressed to 50%; (d) Biomimetic structure
sample compressed to 60%



附图 S2 “压缩-回复” 曲线及其放大图

Fig. S2 Compression-recovery curves and its magnified view

附表 S1 压缩-回复实验中碳纤维样品与仿生结构样品在不同压缩程度下的回复率

Compress	Recovery rate/%	
	Carbon fiber sample	Biomimetic structure sample
5%	74.8	77.8
15%	39.8	46.0
30%	22.9	29.3

附表 S2 之前报道的生物启发材料的比能量吸收 (SEA) 总结

Table S2 Summary of specific energy absorption (SEA) of previously reported bioinspired materials			
Bionic object	Materials	SEA/(J·mg ⁻¹)	Ref.
Bamboo	Polyethylene+Epoxy resin	6.37	[34]
Bamboo	Bamboo tubes+Polypropylene+Polylactide	26	[35]
Bone	Polyurethane foam+Carbon blacks	15.7	[36]
Bone	Aluminium alloy Al-6063-T5	25.26	[37]
Mantis shrimp	AlSi10Mg	51	[38]
Horse hoof	Carbon fiber reinforced composite+Polyurethane	44.6	Our work