

# 仿海螺壳交叉层状超材料的动态冲击响应与吸能性能\*

廖杨舟<sup>1</sup>, 王琄<sup>1</sup>, 张欢<sup>1</sup>, 武晓东<sup>1</sup>, 李志强<sup>1,2,3,4</sup>, 杨富丽<sup>2,5</sup>

(1. 太原理工大学航空航天学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 太原理工大学山西省力学基础学科研究中心, 山西 太原 030024;

4. 太原理工大学力学国家级实验教学示范中心, 山西 太原 030024;

5. 太原航空仪表有限公司, 山西 太原 030024)

**摘 要:** 针对传统体心立方晶格在动态冲击下极易发生全局灾难性失效的缺陷, 受天然海螺壳交叉层状微观结构启发, 本文旨在开发兼具极端轻量化与高效动态吸能特性的新型防护材料。基于高韧性树脂材料, 设计了引入节点约束梯度的单层仿生结构与结合正交堆叠策略的三层仿生交叉层状超材料, 并以传统体心立方晶格为基准对照组。采用落锤冲击试验系统开展了低速动态冲击实验, 同步结合高速摄影技术与显式动力学有限元仿真, 系统对比分析了三种拓扑结构在动态加载下的形变响应、应力波传递规律及失效演化过程。研究表明, 传统晶格表现出迅速贯穿的全局剪切带与破坏性的刚性触底现象; 单层仿生结构通过力学异质性显著提升了初始抗冲承载力, 但大变形后期仍存在整体软化; 三层仿生结构通过层间正交旋转构筑了宏观人工界面, 成功激发了界面阻断效应, 极大增加了裂纹扩展的空间曲折度。研究得出结论: 多维仿生协同设计使三层超材料的失效模式蜕变为以跨层变形滞后为特征的渐进式粉碎机制, 该结构有效消除了触底尖峰并在极限压缩内维持了漫长稳定的载荷平台, 展现出极致的冲击动能耗散表现, 为先进轻质抗冲击吸能结构的设计提供了新的思路。

**关键词:** 仿生设计; 交叉层状超材料; 落锤冲击; 失效机理; 能量耗散

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标识码: A

## Research on dynamic impact response and energy absorption performance of conch shell-inspired cross-laminated metamaterials

LIAO Yangzhou<sup>1</sup>, WANG Shen<sup>1</sup>, ZHANG Huan<sup>1</sup>, WU Xiaodong<sup>1</sup>, LI Zhiqiang<sup>1,2,3,4</sup>, YANG Fuli<sup>2,5</sup>

(1. College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

3. Shanxi Research Center of Basic Discipline of Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

4. National Demonstration Center for Experimental Mechanics Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

5. Taiyuan Aero-instruments Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China)

\*收稿日期: 2026-05-18; 修回日期: 2026-10-24;

基金项目: 山西省科技重大专项计划项目 (202301120401010)

第一作者: 廖杨舟 (2002—), 男, 硕士研究生, E-mail: yyzl423@gmail.com

通信作者: 武晓东 (1983—), 男, 博士, 副教授, E-mail: wuxiaodong@tyut.edu.cn

**Abstract:** Addressing the inherent defects of traditional body-centered cubic (BCC) lattices, which are highly prone to rapid, global catastrophic failure and dangerous stress localizations under dynamic impact, and profoundly inspired by the naturally occurring, highly toughened cross-layered microstructures found in seashells, this paper aims to develop a novel class of protective metamaterials that seamlessly combine extreme lightweight characteristics with highly efficient dynamic energy absorption capabilities. Based on the utilization of advanced high-toughness resin materials, a single-layer bionic structure featuring node-constrained spatial gradients and a sophisticated three-layer bionic cross-layered metamaterial employing an orthogonal stacking strategy were meticulously designed, with the traditional uniform BCC lattice serving as the baseline control group. Low-velocity dynamic impact tests were rigorously conducted using an advanced drop-weight impact testing system. This experimental approach was systematically combined with in-situ high-speed photography and highly detailed explicit dynamic finite element simulations to comprehensively compare and analyze the complex deformation responses, stress wave propagation patterns, and progressive failure evolution processes of the three distinct topologies under transient dynamic loading. The multifaceted results reveal that the traditional lattice exhibited rapidly penetrating global shear bands and highly destructive rigid bottoming phenomena, severely limiting its protective utility; the single-layer bionic structure significantly enhanced the initial impact-bearing capacity through engineered mechanical heterogeneity, but an overall structural softening still inevitably occurred in the later stages of large deformation; conversely, the three-layer bionic structure, precisely through interlayer orthogonal rotation, successfully constructed a macroscopic artificial interface, effectively triggering a profound interface-blocking effect and greatly increasing the tortuosity of crack propagation pathways. The study concludes that this multidimensional bionic collaborative design transforms the failure mode of the three-layer metamaterial into a highly desirable progressive crushing mechanism, distinctly characterized by a beneficial interlayer deformation lag. Ultimately, this hierarchical structure effectively eliminates hazardous bottoming peaks and reliably maintains a prolonged, stable load plateau even under extreme compression, exhibiting exceptional impact kinetic energy dissipation performance and providing a robust new idea for the future design of advanced, lightweight impact-resistant and energy-absorbing structural systems.

**Keywords:** bionic design; cross-layered metamaterials; drop hammer impact; failure mechanism; energy dissipation

## 1 引言

在航空航天和汽车工程等领域,轻质结构的冲击承载稳定性与能量吸收能力是防护设计的重要指标<sup>[1-3]</sup>。体心立方(body-centered cubic, BCC)晶格属于典型的弯曲主导型结构,其常见变形过程包括杆件弯曲、局部塑性屈曲、剪切带形成以及后续断裂<sup>[4-10]</sup>。BCC结构是否发生不稳定整体屈曲与相对密度、杆件长径比、边界约束和加载速率密切相关。因此,本文不将“全局同步屈曲”作为BCC晶格的普遍特征,而是重点讨论本研究几何参数和低速冲击条件下观察到的局部变形集中、剪切带扩展及压缩末端触底。

为了突破传统均匀晶格结构的性能瓶颈,近年来研究人员广泛从天然生物材料的微观构造中寻求力学增强灵感。自然界中的海螺壳(如 *Strombus pugilis*)通过其独特的交叉层状微观结构,巧妙利用层间取向差异和软硬相界面的模量失配机制,有效地实现了裂纹偏转与能量耗散,从而表现出卓越的断裂韧性。针对这一天然架构, Wu 等人近期利用 3D 打印技术成功复现了这种交叉层状架构,并证实了其在准静态压缩条件下具有优异的力学性能和渐进式失效特征<sup>[11]</sup>。后续的诸多学者也沿着仿生层级设计的思路,探索了不同节点约束和非均匀截面对晶格强度的影响。尽管如此,目前的现有研究多集中于准静态加载或低应变率工况<sup>[12-20]</sup>。考虑到实际工程防护中,结构不可避免地需要应对突发的动态载荷,而针对该类仿生交叉层状超材料在低速冲击(落锤)条件下的动态力学响应、应力波传递规律及动态失效机理的研究仍鲜有报道<sup>[21-25]</sup>。

基于上述研究现状,本文系统探究仿生交叉层状超材料在动态冲击下的力学响应与吸能增强机制。本研究基于高韧性树脂基体,设计并构建了三种宏观构型:作为基准对照的传统 BCC 晶格、引入节点约束梯度的单层仿生结构,以及结合层间旋转与正交堆叠策略的三层仿生结构。本文计划采用落锤

冲击实验,并结合 Abaqus 显式动力学有限元仿真,全面对比分析这三种结构在动态加载条件下的变形演化过程、吸能特性以及内部应力分布机制。通过深入剖析仿生结构如何利用局部异质性与跨层形变滞后机制来干预剪切带的扩展,本文期望能从理论与实验双重维度,论证多层旋转结构在动态冲击防护中的优越性,从而为新型抗冲击吸能超材料的开发提供科学依据与设计范式。

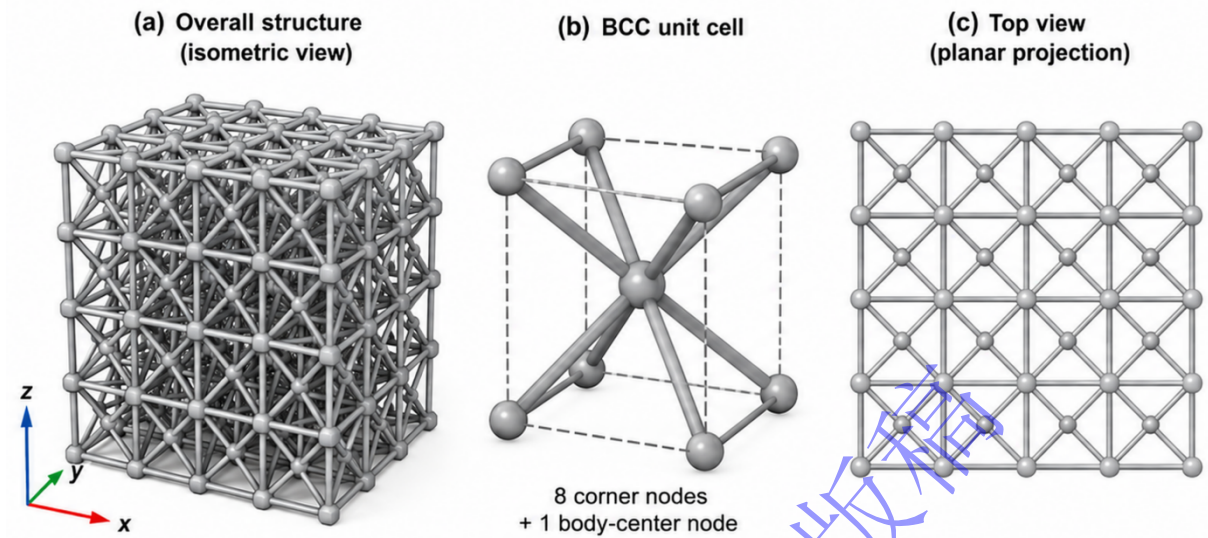
## 2 实验

### 2.1 模型结构设计

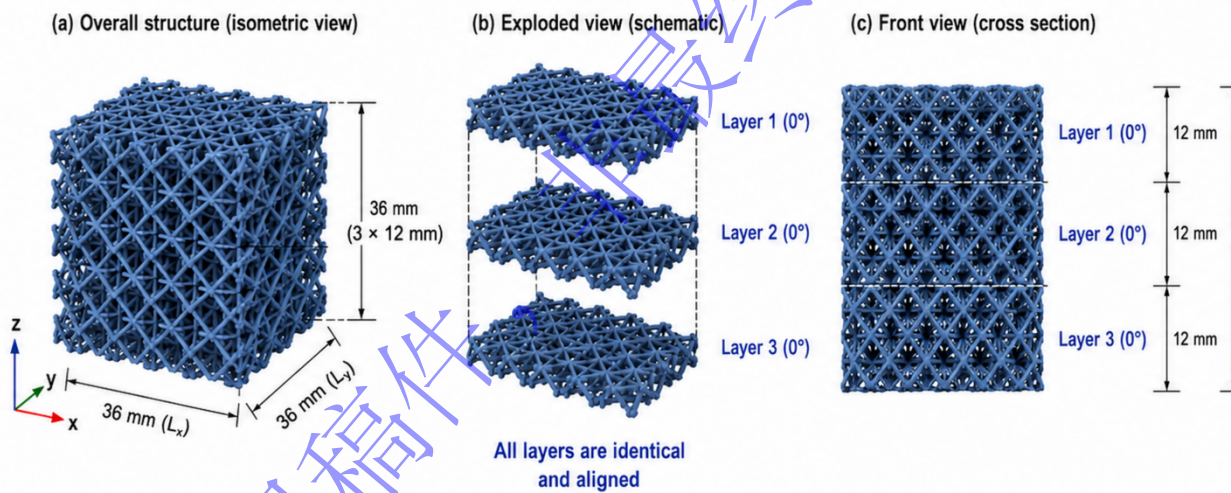
受天然海螺壳内部交叉层状微观结构的启发,本研究设计并构建了具有不同拓扑特征的机械超材料模型,以探索区域特殊性与整体周期性对材料抗冲击性能的协同增强机制。作为基准对照组,传统的体心立方(BCC)晶格模型由标准的 BCC 基本单胞在三维空间中呈简单周期性阵列组装而成,该模型中所有杆件与节点具有相同的几何尺寸与约束分布。同时,本研究基于海螺壳软硬相界面的模量失配原理(节点较多的结构为硬相,节点较少的结构为软相<sup>[11]</sup>),设计了仿生超材料。在基本单胞的设计阶段,通过对特定节点引入“约束梯度”以及非对称的一阶细长杆件(“节点约束梯度”不是外加边界约束,而是指在单胞内部通过改变节点配位数、相邻杆件长度及连接方向,使局部转动刚度和位移约束由强到弱呈空间变化),打破了传统晶格的力学均匀性。随后,将这些经过仿生修饰的基本单胞在平面内进行阵列,构建出包含特定交叉层状纹理的单层宽层结构。该设计在微观上重现了天然贝壳中由于层片取向差异而产生的交叉层状阻力,从而在受载时能够有效引导应力分布并延缓裂纹扩展[26-30]。

然而,单层仿生结构的区域特殊性与长程周期性仅局限于一维方向。为了进一步实现多维空间内的力学强化,本研究在其基础上开发了三层仿生超材料,如图 1 所示。该宏观模型采用了“旋转宽层堆叠”策略,由三个单层宽层按照特定的空间取向自下而上复合而成:顶层与底层镜像,而中间层则相对顶层进行了 90°的正交旋转。这种巧妙的“三明治”式堆叠构型不仅在宏观上人为制造了层间界面,还将局部的交叉层状特性扩展到了多维空间。最终构成的三维宏观块体同时兼具了局部区域的特殊性与整体架构的周期性,这种多尺度协同设计在内部构筑了极具空间曲折度的能量传递路径,旨在有效阻断并缩短剪切带的跨层传播,从而将材料在冲击下的失效机制由灾难性崩塌转化为渐进式的跨层滞后耗能模式。

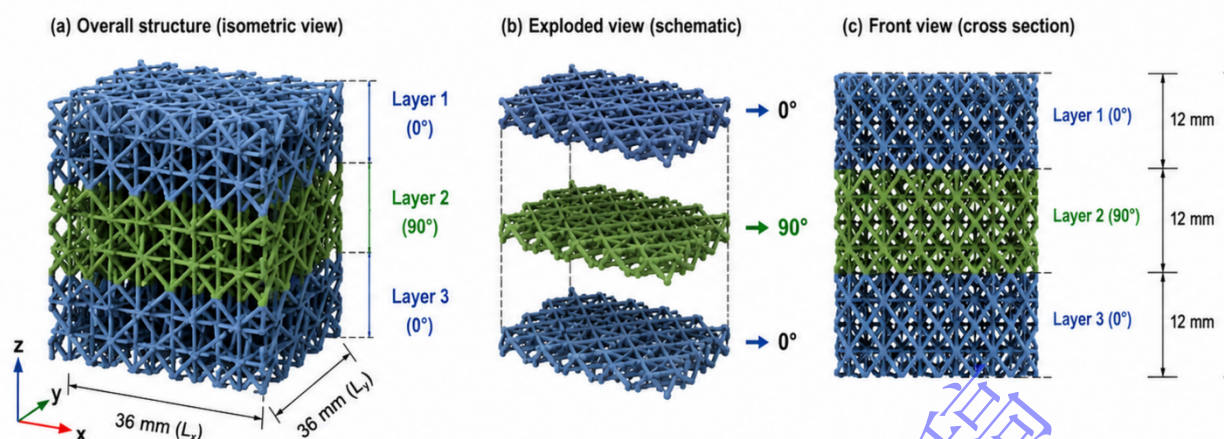
本文所用 ST1400 光敏树脂为高韧性体系,其断后伸长率与断裂韧性在光固化树脂中处于较高水平,同时也进行了退火增韧处理;试样在冲击下出现的碎裂主要源于晶格层面的应力集中与杆件失稳所引发的结构性破坏,而非单纯的基体脆性。三种模型结构可以视作边长为 36 mm 的正方体,每层厚 12 mm,共三层,构成模型结构的细杆为圆截面,直径是 1.2 mm,相对密度按实体体积与外包络体积之比计算,约为 0.18。



(a) BCC



(b) Single-layer biomimetic structure



(c) Three-layer biomimetic structure

图 1 结构模型设计示意图

Fig.1 Schematic diagram of structural model design

## 2.2 实验装置

为了评估并对比不同拓扑特征的晶格结构在动态加载条件下的力学响应与吸能特性，本研究采用 INSTRON 9350 落锤冲击试验系统开展了低速动态冲击实验。实验的具体参数严格标定如下：落锤冲击系统的总质量配置为 6.105 kg，设定的初始冲击接触速度为 1.15 m/s。根据系统的初始动能转化，该加载条件为试样提供了约 4.0 J 的冲击初始能量（能量为锤头到达试样上表面的能量）。根据材料的准静态压缩性能评估，4.0 J 的能量输入能够确保结构进入屈服阶段并发生明显的塑性变形，以此来评估结构在承受临界冲击载荷时的能量吸收率和峰值力控制能力。锤头是圆形平底冲头如图 2 所示，冲击面是直径为 80 mm 的圆形，锤头砸到试样上为整体冲击。



图2 落锤装置 INSTRON 9350

Fig.2 Drop hammer device INSTRON 9350

在测试过程中, 3D 打印试样被居中放置于试验机底部的水平刚性承载平台上, 以模拟实际工程

中低端受限的边界条件。冲击过程中的瞬态抗力通过试验系统集成的压电式力传感器进行高频实时采集,并结合内置的光电位移传感器同步记录压缩冲程,从而精确获取试样在整个受载周期内的力-时间与力-位移历史数据。此外,为了直观地阐明并对比不同晶格结构的动态变形过程及失效机理,实验同步配备了 I-SPEED 高速摄像机系统,拍摄帧率为  $10000\text{ s}^{-1}$ ,空间分辨率为  $1024\times 768$  像素。该系统布置于试样正侧方,全程捕捉了落锤冲击过程中的瞬态大变形序列,为后续详细分析结构的应力波传递、宏观剪切带演化以及渐进式粉碎特征提供了关键的高频图像证据。

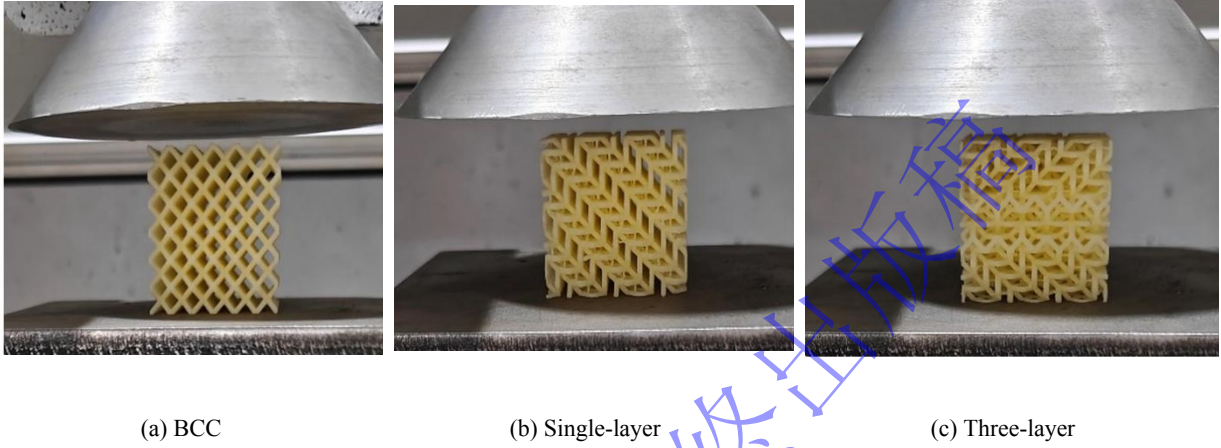


图3 试样照片  
Fig.3 Sample photograph

## 2.3 结果

### 2.3.1 曲线分析

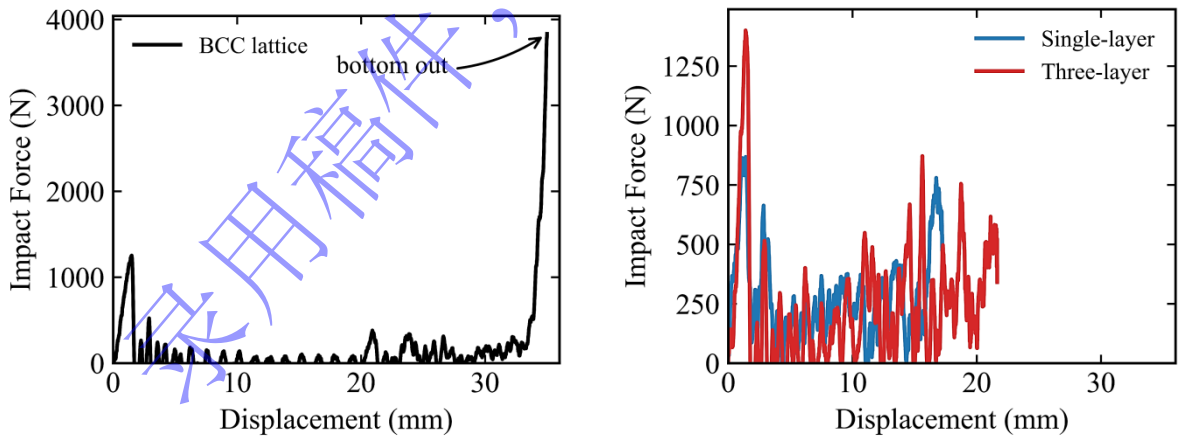
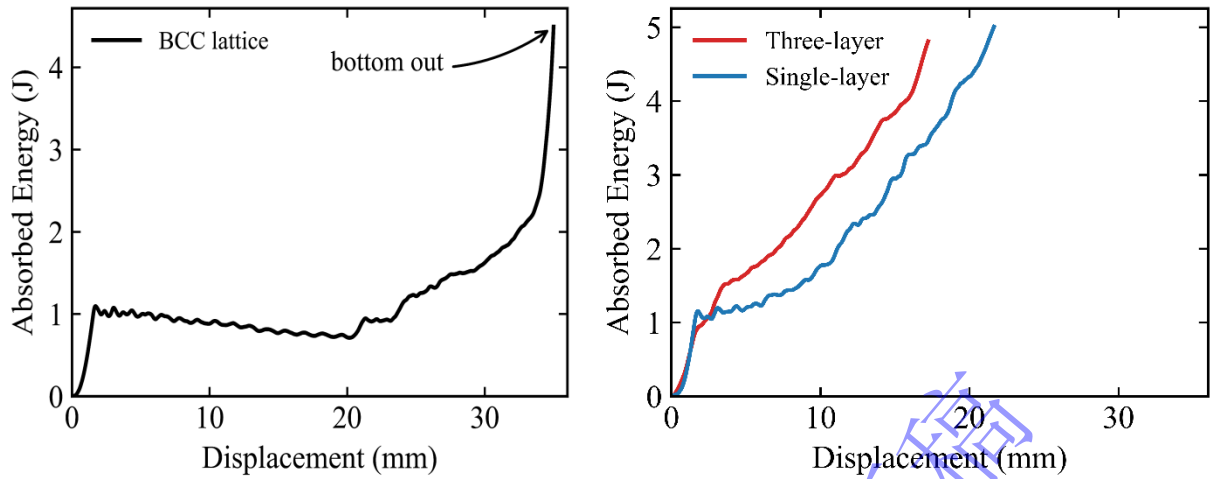


图4 位移载荷曲线  
Fig.4 Force-Displacement curve



(a) Energy-Displacement curve of BCC experimental data (b) Energy-Displacement curve of single-layer and three-layer experimental data

图 5 能量-位移曲线

Fig.5 Energy-Displacement curve

表 1 低速冲击响应定量对比

Table 1 Quantitative comparison of low-velocity impact responses

| 结构   | 名义相对密度 | 初始峰值力/kN | 有效吸能/J | 比吸能/(J·kg <sup>-1</sup> ) | 吸能效率/% |
|------|--------|----------|--------|---------------------------|--------|
| BCC  | 0.18   | 1.25     | 1.50   | 149                       | 26     |
| 单层仿生 | 0.18   | 0.87     | 5.19   | 496                       | 99     |
| 三层仿生 | 0.18   | 1.40     | 5.30   | 515                       | 93     |

图 4 和图 5 动态落锤冲击实验揭示了 BCC 晶格、单层仿生超材料以及三层仿生超材料在力-位移和能量-位移响应特征上的明显差异，具体的响应指标如表 1 所示。在动态冲击载荷作用下，传统的 BCC 晶格表现出极具破坏性的力学响应，其特征为极低的初始承载能力以及随后的灾难性失效。从位移载荷曲线中可以明显观察到，BCC 结构在前约 34 mm 的压缩位移内几乎无法提供有效的结构抗力，未能有效耗散冲击锤的动能，这最终导致了压缩冲程末端严重的“刚性触底”现象，并在瞬间产生了高达约 4788 N 的致命破坏性峰值力。这种力学脆弱性的根本原因在于 BCC 晶格的全局结构均匀性。由于晶格内部所有杆件具有几乎相同的塑性屈服能量阈值，一旦达到屈服点，主剪切带便会在整个架构中不受阻碍地迅速贯穿扩散，引发屈服后应力的剧烈下降和结构完整性的丧失。

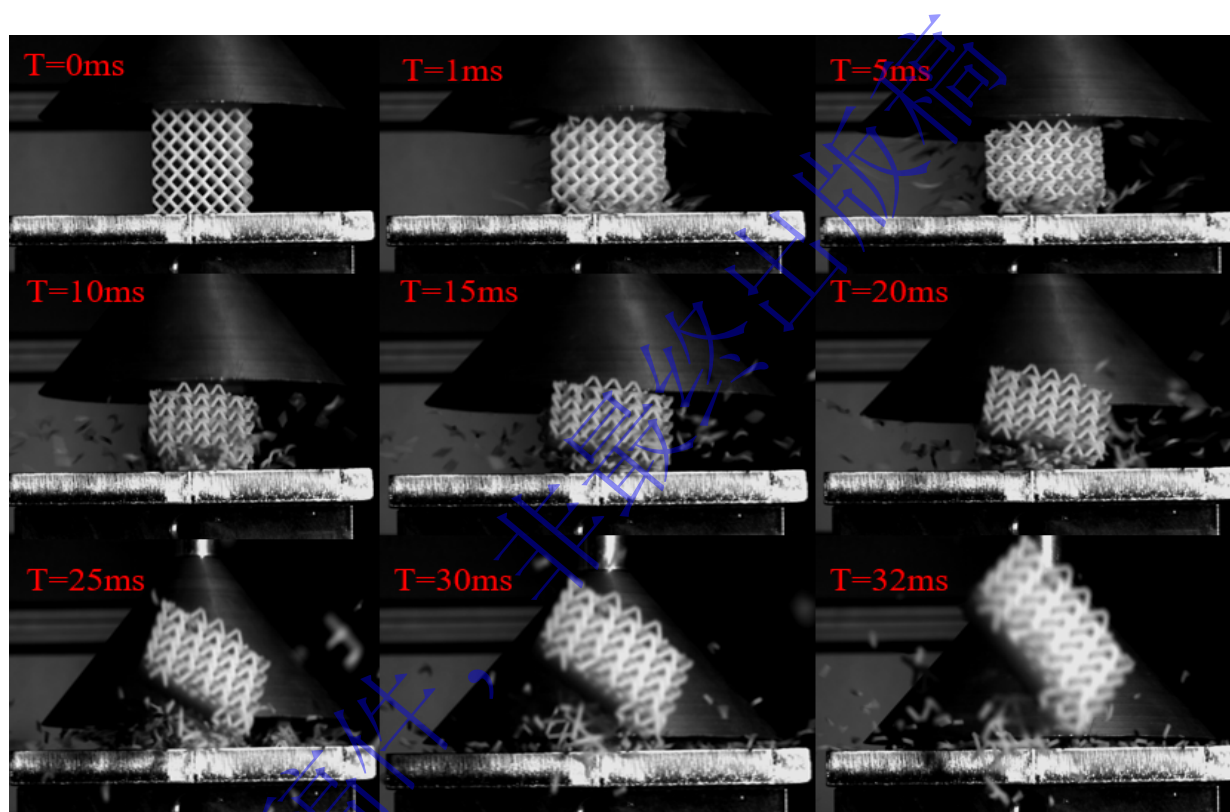
相比之下，单层仿生超材料展现出了显著提升的初始抗冲击性能，其峰值承载力达到约 868 N，并在达到约 20 mm 的结构极限前吸收了约 5.19 J 的能量。这种较 BCC 晶格更为优异的性能，直接归功于其打破了全局结构均匀性的仿生架构设计。通过引入节点约束梯度，相邻杆件的均匀屈服阈值被刻意离散化。在冲击压缩过程中，这种节点异质性在力学机制上等效于天然海螺壳中软硬相交替的界面模量失配现象，能够有效地引导变形序列并促使内部微裂纹发生偏转。然而，由于单层设计中的区域特殊性和长程周期性仅局限于一维方向，其在剧烈冲击下维持稳定载荷平台的能力最终会随位移增加而耗尽，导致结构在压缩中段发生整体失效。

三层仿生超材料通过旋转宽层堆叠将交叉层状增强策略扩展至多维空间，在所有测试模型中展现出了最为卓越且稳健的动态抗冲击性能。三层仿生模型的位移载荷曲线不仅表现出高达约 1400 N 的极高初始峰值力，而且在直至物理压缩极限的整个过程中，始终维持着一个漫长且具有波幅波动的稳

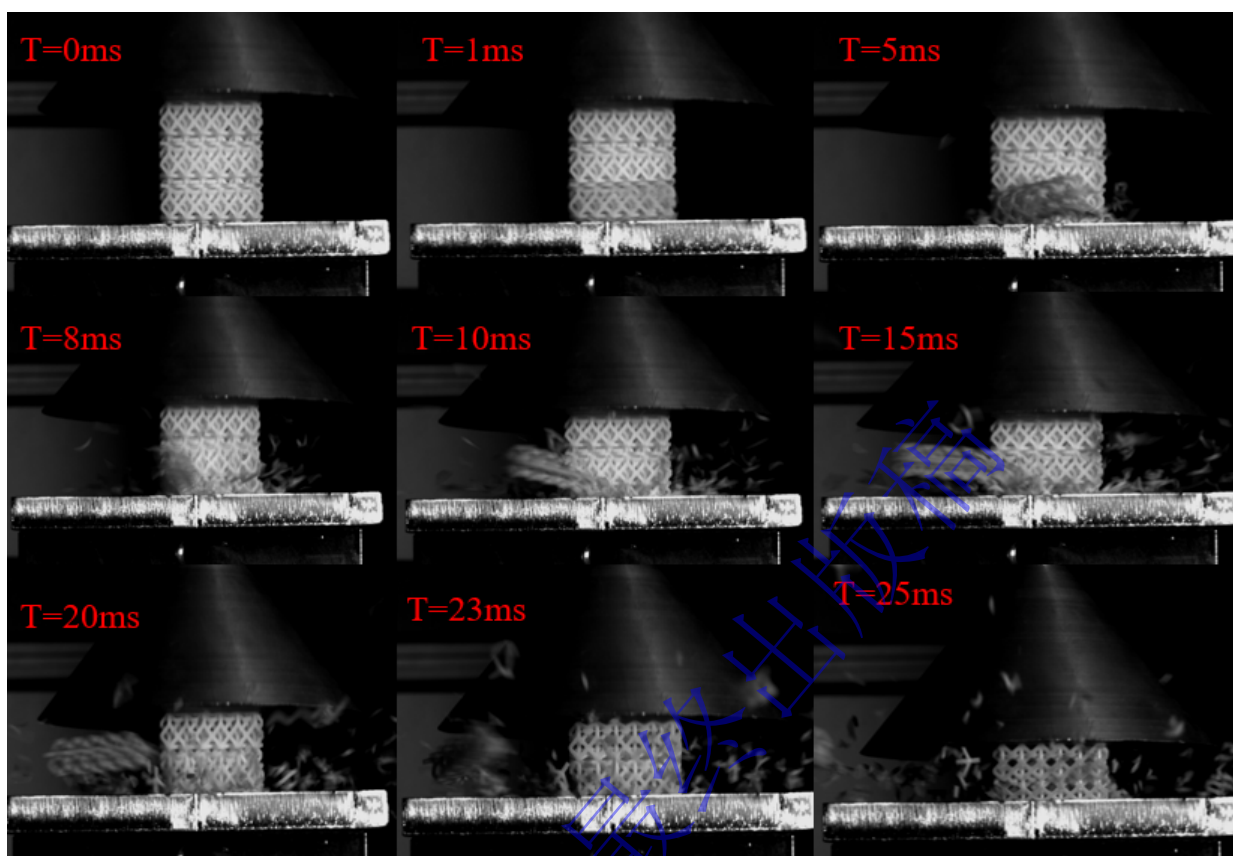
定载荷平台区，消除了 BCC 晶格中出现的灾难性触底尖峰。这种显著更高的能量吸收能力源于相邻宽层正交旋转和镜像堆叠所形成的人工宏观界面。该现象与本文第 3.3 节的应力分布结果一致：不同阶次杆件之间固有的交叉角度与宽层的旋转方向相配合，在材料内部构筑了极大的空间曲折度。这种多维曲折的能量传递路径能够有效地阻断并缩短正在扩展的剪切带，将其严格限制在特定的牺牲层内。

### 2.3.2 变形过程

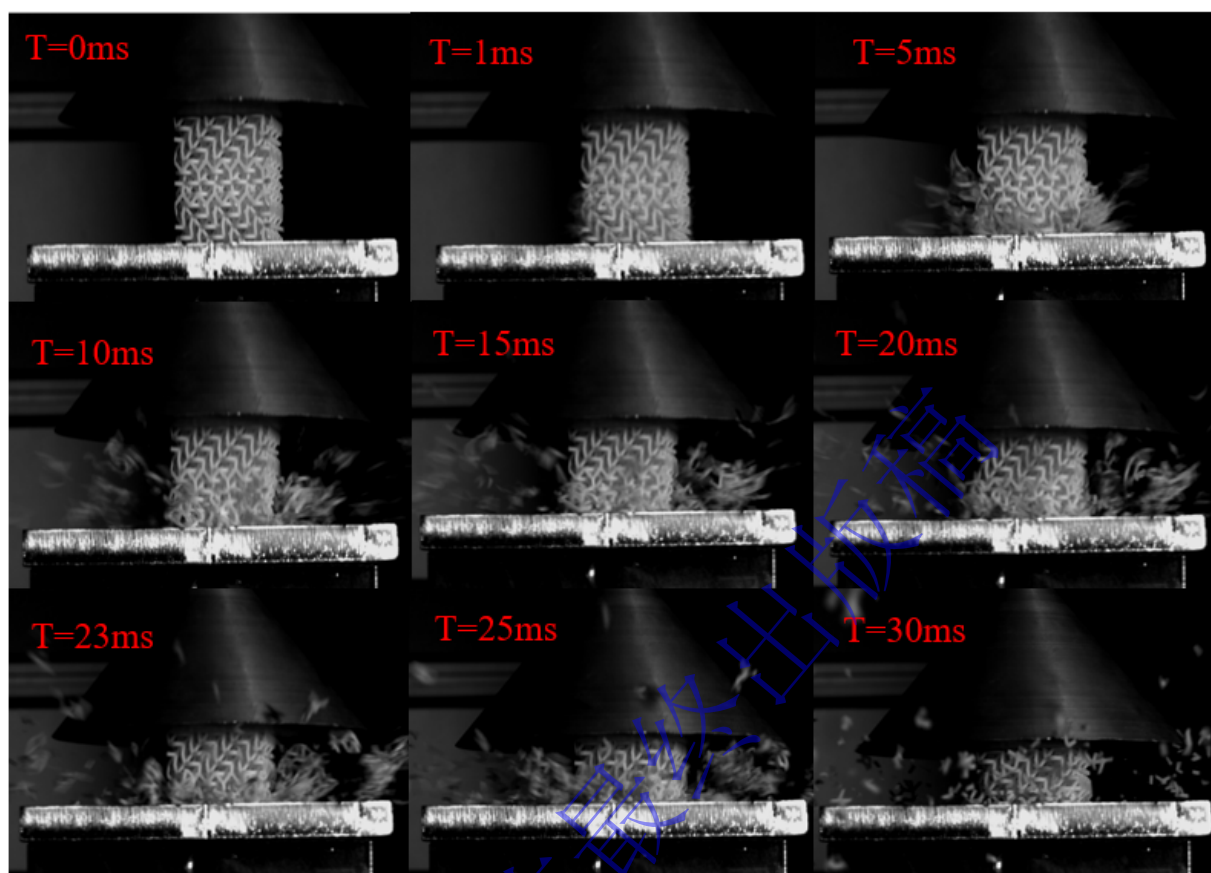
为了进一步阐明不同晶格结构的失效机理，本研究对落锤冲击过程中的高速摄影图像及实验后的试样最终形貌进行了详细分析。图 6(a)，图 6(b)，图 6(c)分别直观展示了 BCC、单层、三层在受到冲击时的动态变形与破坏特征。



(a) BCC deformation process



(b) Single-layer deformation process



(c) Three-layer deformation process

图 6 变形过程

Fig.6 Deformation process

从最终的破坏模式来看，BCC 晶格表现出典型的灾难性剪切失效特征。如图 6 所示，该结构未能实现有效的逐层压溃，而是在整体屈曲后沿对角线方向迅速发生断裂，碎片拼接后呈现出明显的“X”形剪切带。在冲击过程中，伴随着巨大的结构解体声，大量体积较大的断裂块飞出，这种不稳定的失效模式导致结构瞬间丧失承载力，使得落锤直接穿透试样并猛烈撞击底座，发生了完全的致密化。

与之形成鲜明对比的是，两种仿生结构均表现出了更为可控的“层逐层”渐进式粉碎机制，这种模式有利于能量的持续耗散。其中，单层仿生结构在受压过程中逐渐崩解，产生的碎块体积较 BCC 晶格显著减小。实验数据计算表明，该结构在吸收了冲击能量后，仍保留了约 16.1 mm 的剩余高度，这意味着底层结构尚未完全破坏，成功避免了刚性触底。

值得注意的是，三层仿生结构展现出了最优异的材料利用率与破碎特征。得益于层间旋转设计对裂纹扩展的抑制作用，其粉碎程度更为彻底，产生的碎屑比单层结构更为细小。这种高度碎片化的现象表明结构内部发生了更广泛的微裂纹扩展，从而通过增加新的自由表面能来耗散更多冲击动能。与单层结构类似，三层结构最终也以约 16 mm 的剩余高度成功拦截了落锤，且在保持底层完整性的同时，实现了比单层结构更高的平台反力，验证了其在有限变形空间内的高效防护能力。

### 3 有限元模拟

#### 3.1 材料属性

为了准确探究仿生拓扑结构对机械超材料动态抗冲击性能的内在影响，并充分激发复杂晶格架构

在受载时的大变形吸能潜力，本研究中的所有测试模型（包括传统 BCC 晶格、单层仿生结构及三层仿生超材料）均采用统一的商用高韧性光敏树脂 ST1400。

表 2 材料属性  
Table 2 Material Parameters

| 材料     | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 杨氏模量<br>/MPa | 泊松比  | 屈服应力/MPa | 断裂伸长率/% | 损伤起始等效塑性<br>应变 |
|--------|--------------------------|--------------|------|----------|---------|----------------|
| ST1400 | 1.2                      | 1998         | 0.35 | 45       | 43      | 0.407          |

在 Abaqus/Explicit 显式动力学有限元分析模型中，为了在虚拟环境中真实复现高韧性树脂在落锤冲击下的非线性大变形与渐进式撕裂物理过程，本研究将实验获取的材料拉伸数据严格转化为真实应力与真实塑性应变，作为数值计算的底层输入。基体材料被理想化为各向同性的弹塑性连续体，遵循 von Mises 屈服准则以及各向同性硬化法则来描述其屈服后的长程塑性流动与应变强化行为。鉴于高韧性材料具有显著的抗拉扯与抗断裂能力，本研究在定义材料的延性损伤模型时，赋予了其较高的损伤萌生等效塑性应变阈值（设定为 0.45，参考了该材料单轴拉伸下的基础断裂应变，随后在此基础上，通过不断微调有限元模型中的损伤阈值，直至仿真输出的力-时间曲线与落锤冲击实验数据实现最佳吻合）。试样碎片化由细杆弯曲、节点应力集中、打印缺陷及多轴应力状态共同导致，宏观脆性外观不等同于树脂本体无塑性，因此采用延性损伤模型具有合理性。同时，结合基于断裂能量演化的线性刚度退化定律，该模型能够精确模拟高韧性杆件在受到极度挤压和扭曲时，从局部颈缩、刚度渐进软化，直至最终物理删除的延缓失效过程。网格类型为 C3D4，尺寸是 0.2 mm，落锤与试样之间相互作用的类型为“通用接触”，摩擦系数为 0.2。这种高度贴合高韧性聚合物物理真实的设定，有效地保障了数值模型在模拟 BCC 晶格的瞬间坍塌致密化，以及三层仿生结构长程波动的平台区时，均能输出与物理实验高度吻合的力学响应轨迹，为全面剖析多维仿生设计的抗冲击优越性奠定了极其坚实的计算力学基础。

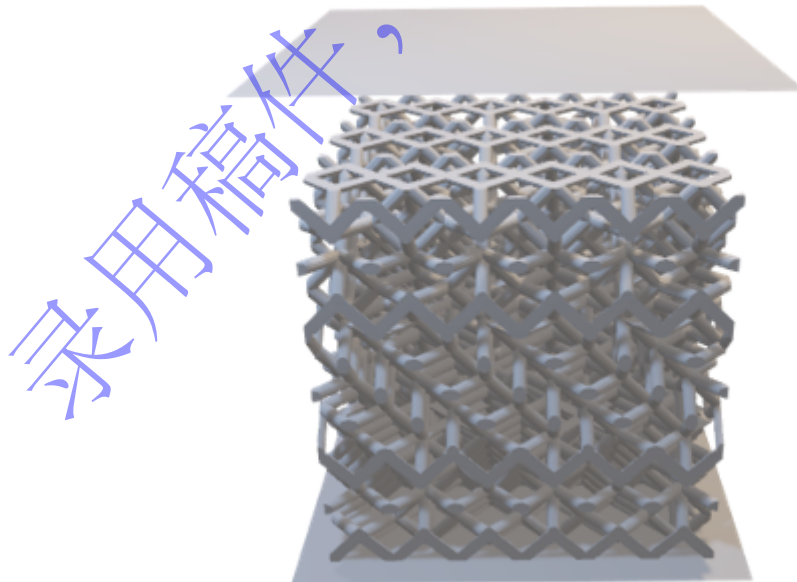
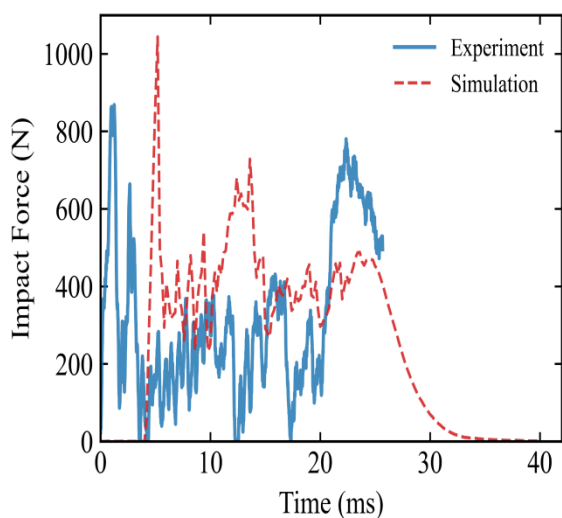
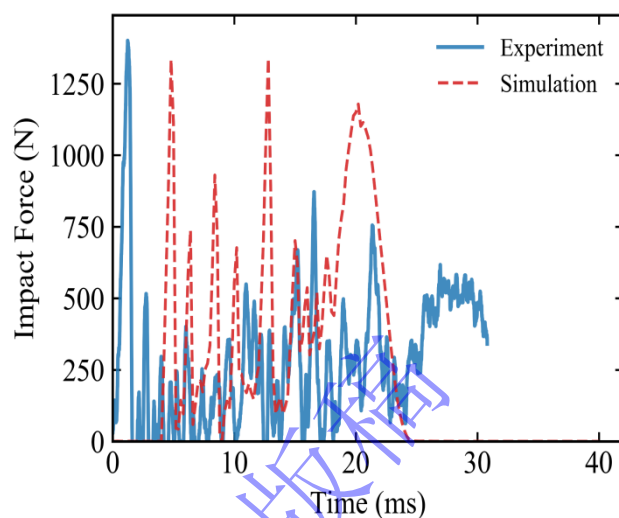


图 7 仿真时的压缩模型  
Fig.7 Compression model during simulation

### 3.2 有限元数据有效性



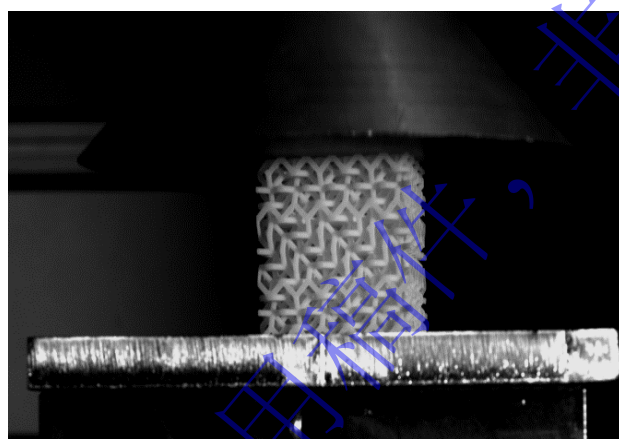
(a) Force-time comparison diagram of single-layer simulation data and experimental data



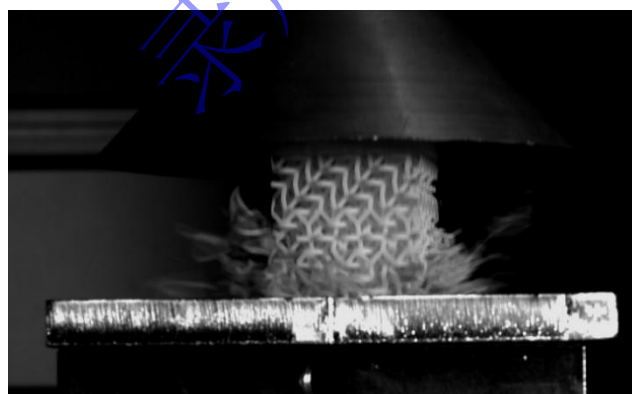
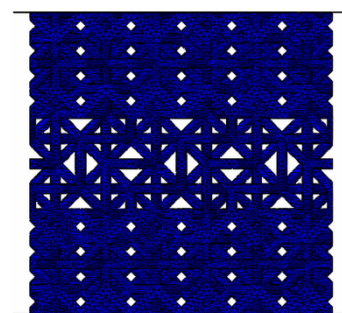
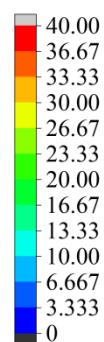
(b) Force-time comparison diagram of three-layer simulation data and experimental data

图 8 单层结构和三层结构的仿真数据与实验数据的力-时间对比图

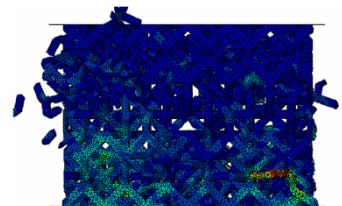
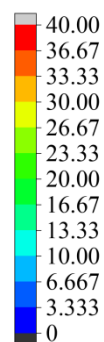
Fig.8 Force-time comparison charts of single-layer and three-layer simulation data and experimental data



von Mises stress / MPa



von Mises stress / MPa



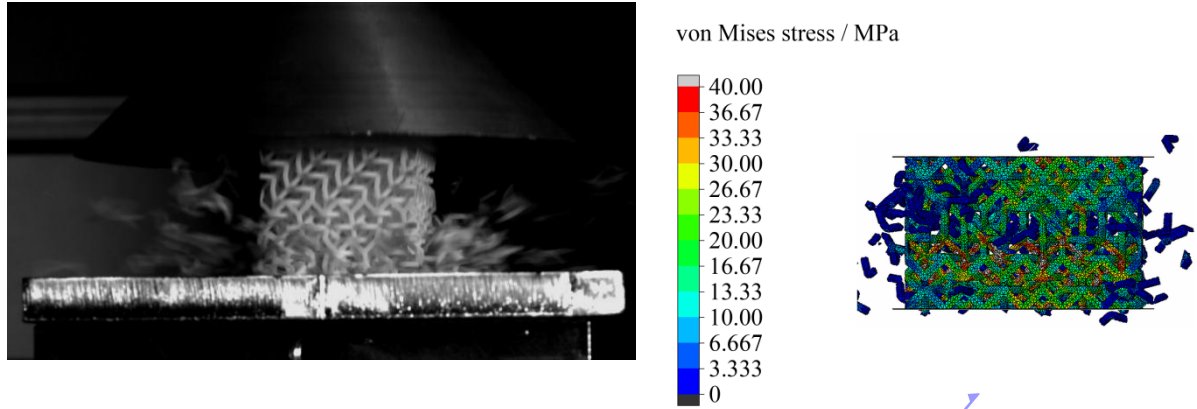


图9 实物照片与应力云图对比

Fig.9 Comparison between physical photographs and stress contour plots

为了验证所建立的三维显式动力学有限元（**finite element analysis, FEA**）模型在模拟复杂结构遭受动态冲击时的准确性与可靠性，本研究将三层仿生超材料、单层仿生超材料模型在落锤冲击下的仿真力-时间曲线与真实的物理实验数据进行了系统性的对比分析。从各组模型的验证结果可以直观地观察到，有限元仿真在冲击压缩的初始阶段展现出了较高的预测精度，精准地捕捉到了所有测试结构的线弹性刚度响应以及向塑性屈服阶段过渡的临界行为。单层与三层仿生结构在受击瞬间展现出的优异初始承载力仿真曲线均与实验轨迹保持了高度的演化一致性。具体而言，模型成功预测了仿生结构的第一波峰值冲击力，准确还原了受击材料在将落锤动能转化为内部应变能过程中的宏观力学反馈，证明了所采用的材料本构模型与接触算法能够真实反映该聚合物材料的瞬态冲击力学特征。

更为重要的是，该有限元模型凭借高精度的网格划分与严谨的非线性力学设定，再现了三种拓扑结构截然不同的屈服后失效演化与大变形特征如图 10 至图 12 所示。对于单层仿生结构，仿真准确反映了其在达到临界峰值载荷后，因内部局部剪切带的迅速贯穿而引发的承载力骤降趋势。对于本研究重点提出的三层仿生超材料，仿真曲线不仅在受力峰值上高度贴合，而且极具保真度地重现了由内部交叉层状几何特征、裂纹偏转路径以及跨层变形滞后所共同激发的长程载荷波动平台区。而在传统 BCC 晶格的模拟中，有限元模型不仅真实反映了其前中期近乎零抵抗的灾难性全局坍塌过程，更极其生动地预测了冲程末端由于网格完全致密化并剧烈撞击刚性底座而引发的“刚性触底”现象。仿真曲线在对应物理极限位移处呈现出的理论瞬态反力垂直飙升，从数值计算的角度印证了物理实验中测得的毁灭性破坏尖峰。

尽管在局部瞬态峰值力上，仿真结果相较于实验测量值呈现出一定程度的轻微过估，但这一偏差在显式动力学有限元分析中是极其典型且在理论上完全合理的。这种数值上的“刚度过估”现象主要归因于有限元模型采用了理想化的几何拓扑与绝对刚性的边界条件，而未包含真实 3D 打印物理试样内部固有的微观制造缺陷——例如层间微孔隙、表面微观粗糙度以及光敏树脂在逐层固化过程中的局部各向异性等。这些物理世界中难以避免的微观瑕疵往往会作为应力集中点，促使实验样件比理想数学模型更早地发生局部微屈服或萌生微裂纹。综合来看，这种微小的数值偏差并不影响对材料整体动态响应机制的定性分析与定量分析。无论是瞬时冲击力的演化趋势、结构软化规律，还是平台区的波动特征，仿真结果与实验数据的高度吻合均强有力地证明了本研究所构建的有限元模型具有出色的有效性与预测精度，从而为后续深入探究不同仿生几何参数对吸能机制的微观影响提供了极其坚实且可信的数值分析基础。

### 3.3 应力分布与失效机理

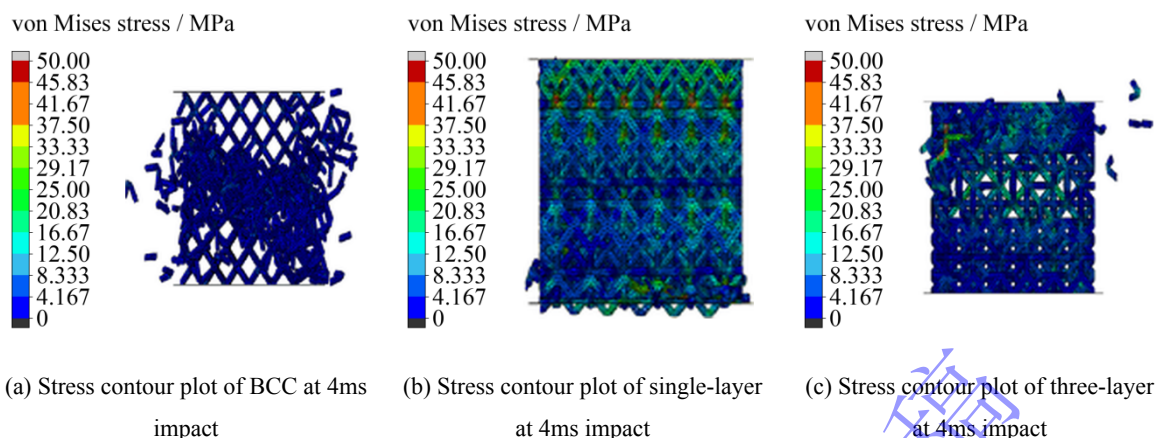


图 10 冲击 4ms 时的应力云图  
Fig.10 Stress contour plot at 4ms impact

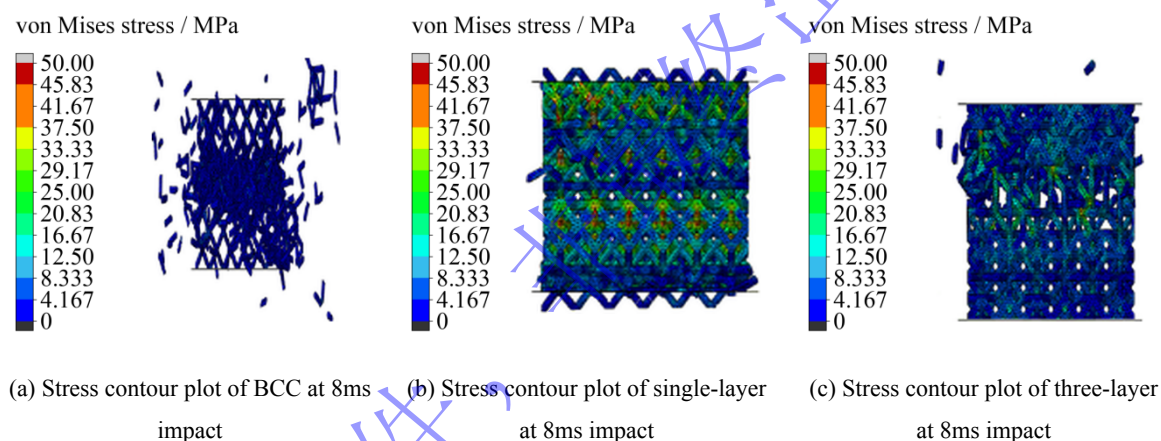


图 11 冲击 8ms 时的应力云图  
Fig.11 Stress contour plot at 8ms impact

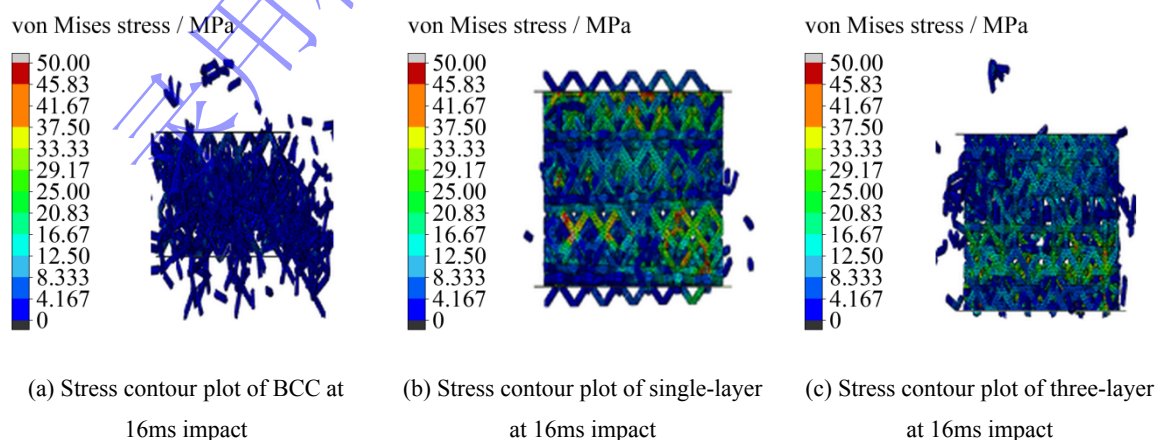


图 12 冲击 16ms 时的应力云图

Fig.12 Stress contour plot at 16ms impact

图 10 到图 12 展示了三种晶格结构在相同时间节点 ( $T=4\text{ ms}, 8\text{ ms}, 16\text{ ms}$ ) 下的应力云图演化过程。通过横向对比可以发现, 不同结构在同一时刻的形变量存在巨大差异, 直观揭示了两者的抗冲击刚度的本质区别。

对于 BCC 晶格, 其在加载初期便表现出典型的结构失稳特征。随着冲击的进行 ( $T=4\text{ ms}$ ), 应力迅速沿对角线方向传递, 虽然形成了“X”形的应力传递路径, 但大部分区域的应力水平并未达到材料的屈服上限 (在  $50\text{ MPa}$  标度下呈现蓝色或绿色)。这表明 BCC 的细长支柱在材料充分发挥塑性性能之前, 就已发生了过早的弹性屈曲。到了冲击末期 ( $T=16\text{ ms}$ ), 这种不稳定的变形模式导致结构发生了过度的整体塌陷 (净压缩量高达  $29.4\text{ mm}$ ), 并发生了灾难性的触底失效。仿真结果从微观机理上证实: BCC 的失效源于结构刚度的快速丧失而非材料强度的不足, 这与实验中观察到的结构沿对角线瞬间崩解及碎块飞溅现象高度吻合。

与之形成鲜明对比的是, 仿生结构通过独特的微观架构有效地调控了内部应力的分布。对于单层仿生结构, 应力传递不再局限于单一的对角线路径, 而是通过节点网络逐层向下传递, 呈现出明显的层级特征。单层结构成功抑制了大规模连续剪切带的形成, 取而代之的是多条平行的局部剪切带, 这些剪切带相互作用并产生了具有自强化效应的交叉层状阻力。这种分布模式虽然避免了宏观剪切带的直接贯穿, 但由于层间取向单一, 裂纹扩展路径相对平直, 能量耗散效率仍有提升空间。而三层仿生结构则进一步优化了这一机制, 展现出了最优异的应力分散能力。仿真云图清晰地显示, 当上层传递下来的高应力波到达层间界面时, 由于中间层引入了  $90^\circ$  的旋转取向, 原本沿支柱传递的应力流被迫改变方向, 分散到了更广阔的区域。

这种由层间旋转引入的“界面阻断效应”是三层结构抗冲击性能提升的关键物理机制。三层仿生超材料的变形模式从全局同步坍塌转变为一种以显著跨层变形滞后为特征的渐进式、阶层式失效行为。当某一宽层正在经历严重的塑性变形和局部压溃时, 其相邻的旋转层由于空间取向的差异而表现出明显的变形滞后, 从而继续提供强大的结构支撑和持续的能量耗散。层间界面的取向不匹配迫使裂纹或剪切带在扩展时必须不断改变路径, 从而在结构内部形成了曲折的破坏通道。这种机制有效地抑制了局部应力集中的向下快速扩展, 迫使结构动员更多的内部单元参与塑性变形以协调局部位移。因此, 三层结构在宏观上表现为稳定的渐进式压溃, 其应力云图中的高应力区分布更加均匀且广泛。这不仅解释了该结构为何能维持长而平稳的应力平台, 也从机理上证实了通过引入层间旋转策略, 可以显著提高材料的体积利用率, 从而在有限的变形空间内实现最大的能量吸收。

## 4 结论

本文受天然海螺壳交叉层状微观结构的启发, 设计了基于高韧性树脂的仿生交叉层状机械超材料。通过落锤冲击实验与高保真显式动力学有限元仿真, 系统揭示了不同拓扑结构在动态加载下的形变响应与能量耗散机制。主要结论如下:

(1) 传统 BCC 晶格的灾难性失效机制: 受限于“全局结构均匀性”, BCC 晶格在动态冲击下极易发生全局同步塑性屈曲, 主剪切带迅速贯穿整个三维架构。这种极不稳定的变形模式导致结构瞬间丧失承载力, 并在压缩末端发生极具破坏性的“刚性触底”现象与反力尖峰。

(2) 单层仿生结构的单向增强与局限性: 通过引入节点约束梯度打破了结构的力学均匀性, 有效诱导多条局部剪切带交错摩擦, 激发出显著的交叉层状阻力。这一机制有效改善了结构初期的受载响应与能量耗散能力, 且底层结构在冲击后得以保留, 成功避免了 BCC 晶格那种灾难性的刚性触底现象。然而, 受限于一维异质性, 其在面对持续的大变形深度压缩时, 依然会发生中后期的整体失效与承载力软化, 无法维持长效的稳定载荷平台。

(3) 三层仿生结构的多维协同增韧与吸能机制: 针对 BCC 晶格的灾难性坍塌与单层结构后期的承载软化, 三层结构通过宽层正交旋转与堆叠策略构筑了人工层间界面, 将交叉层状增强机制拓展至

多维空间。该设计引发的“界面阻断效应”极大地增加了裂纹扩展的空间曲折度,迫使剪切带被截断并严格限制在局部牺牲层内。受此机制驱动,三层结构的失效模式蜕变为以“跨层变形滞后”为特征的渐进式粉碎。相比前两者,三层结构不仅材料破碎更为充分(微裂纹扩展更广泛),更在整个大变形历程中维持了漫长且稳定的高水平载荷平台,有效抑制了破坏性的触底尖峰,以最优异的能量耗散表现验证了其在极端工况下的防护潜力。

## 参考文献

- [1] ZHANG N, LI R W, WU H. Assessment on concrete constitutive models for numerical simulations of vehicular collisions with RC bridge piers [J]. Structures, 2023, 53: 1582-1599. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.05.037.
- [2] 王海生, 张锦华, 陈力, 等. 落石冲击砂垫层的动力响应数值分析 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(6): 86-96, 212. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.06.012.
- WANG H S, ZHANG J H, CHEN L, et al. Numerical investigation on the dynamic responses of rockfall impact onto a sand cushion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 86-96, 212. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.06.012.
- [3] 时圣波, 王韧之, 唐佳宾, 等. 复合点阵结构强爆炸冲击载荷下的损伤机理与动态响应特性 [J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(6): 062201. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0430.
- SHI S B, WANG R Z, TANG J B, et al. Failure mechanism and dynamic response of a composite lattice structure under intense explosion loadings [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(6): 062201. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0430.
- [4] NASIM M, GALVANETTO U. Mechanical characterisation of additively manufactured PA12 lattice structures under quasi static compression [J]. Materials Today Communications, 2021, 29: 102902. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102902.
- [5] MENG L, ZHONG M Z, GAO Y S, et al. Impact resisting mechanism of tension-torsion coupling metamaterials [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 272: 109100. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2024.109100.
- [6] 张振华, 钱海峰, 王媛欣, 等. 球头落锤冲击下金字塔点阵夹芯板结构的动态响应实验 [J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(6): 888-894. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0888-07.
- ZHANG Z H, QIAN H F, WANG Y X, et al. Experiment of dynamic response of multilayered pyramidal lattices during ball hammer collision loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(6): 888-894. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0888-07.
- [7] LI Q M, MAGKIRIADIS I, HARRIGAN J J. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids [J]. Journal of Cellular Plastics, 2006, 42(5): 371-392. DOI: 10.1177/0021955x06063519.
- [8] 黄正平, 张锦云, 张汉萍, 等. 后坐冲击模拟实验装置工作机理研究 [J]. 北京理工大学学报, 1994, 14(4): 371-377. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.1994.04.008.
- HUANG Z P, ZHANG J Y, ZHANG H P, et al. Working principles of a setback-shock simulator [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1994, 14(4): 371-377. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.1994.04.008.
- [9] 高立龙, 牛余雷, 王浩, 等. 典型炸药柱的 400 kg 落锤撞击感度特性分析 [J]. 含能材料, 2011, 19(4): 428-431. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.017.
- GAO L L, NIU Y L, WANG H, et al. Analysis of impact sensitivity characteristics for typical explosive cylinder [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 428-431. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.017.
- [10] HE W J, LI Y N, BAO P, et al. Utilizing surface modification in coating technology to enhance the efficiency of CL-20 desensitization [J]. FirePhysChem, 2024, 4(1): 72-79. DOI: 10.1016/j.fpc.2023.10.002.
- [11] WU H, CHEN J, DUAN K, et al. Three dimensional printing of bioinspired crossed-lamellar metamaterials with superior toughness for syntactic foam substitution [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(36): 42504-42512. DOI: 10.1021/acsami.2c12297.
- [12] ANDERSON S R, DUBÉ P, KRAWIEC M, et al. Promising CL-20-based energetic material by cocrystallization [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(5): 783-788. DOI: 10.1002/prep.201600065.
- [13] YANG L F, SHI X R, LI C Z, et al. Microfluidic assisted 90% loading CL-20 spherical particles: enhancing self-

- sustaining combustion performance [J]. *Defence Technology*, 2023, 22: 176-184. DOI: 10.1016/j.dt.2021.12.004.
- [14] HOFFMAN R L. Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions: I. Observation of a flow instability [J]. *Transactions of the Society of Rheology*, 1972, 16(1): 155-173. DOI: 10.1122/1.549250.
- [15] SELVER E. Impact and damage tolerance of shear thickening fluids-impregnated carbon and glass fabric composites [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(14): 669-688. DOI: 10.1177/0731684419842648.
- [16] WARREN J, COLE M, OFFENBERGER S, et al. Hypervelocity impacts on honeycomb core sandwich panels filled with shear thickening fluid [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 150: 103803. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103803.
- [17] GALINDO-ROSALES F J, RUBIO-HERNÁNDEZ F J, SEVILLA A. An apparent viscosity function for shear thickening fluids [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011, 166(5/6): 321-325. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2011.01.001.
- [18] FU Y, YU X, DONG X, et al. Investigating the failure behaviors of RC beams without stirrups under impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 137(3): 103432. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103432.
- [19] FUJIKAKE K, LI B, SOEUN S. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(8): 938-950. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000039.
- [20] 刘剑超, 姚冬旭, 宋世千, 等. 隔振器抗振动冲击性能试验研究 [J]. *机电工程技术*, 2021, 50(10): 261-264. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2021.10.064.
- LIU J C, YAO D X, SONG S Q, et al. Experimental study on anti vibration and impact performance of vibration isolator [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2021, 50(10): 261-264. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2021.10.064.
- [21] FU H C, ERKI M A, SECKIN M. Review of effects of loading rate on reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(12): 3660-3679. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:12(3660).
- [22] WAN T, LIU Y, ZHOU C X, et al. Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: a review [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 62(3): 11-24. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.05.039.
- [23] WANG N Z, CHEN X, AO L I, et al. Three-point bending performance of a new aluminum foam composite structure [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(2): 359-368. DOI: 10.1016/s1003-6326(16)64088-8.
- [24] 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. DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2017.03.030.
- WANG Z H, LI S Q, LI X, et al. Advances in studies of the mechanical behavior of cellular metallic materials and structures [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2017, 48(3): 492-503. DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2017.03.030.
- [25] XIAO Y, LI B, FUJIKAKE K. Behavior of reinforced concrete slabs under low-velocity impact [J]. *ACI Structural Journal*, 2017, 114(3): 643-658. DOI: 10.14359/51689565.
- [26] JIA Z A, YU Y, HOU S Y, et al. Biomimetic architected materials with improved dynamic performance [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 125: 178-197. DOI: 10.1016/j.jmps.2018.12.015.
- [27] LIU F, LI T T, JIA Z A, et al. Combination of stiffness, strength, and toughness in 3D printed interlocking nacre-like composites [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 35: 100621. DOI: 10.1016/j.eml.2019.100621.
- [28] 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. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107496.
- [29] GUO H Y, YUAN H, ZHANG J X, et al. Review of sandwich structures under impact loadings: experimental, numerical and theoretical analysis [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 196: 111541. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111541.
- [30] WU X W, GUO H Y, ZHANG J X. Bi-surface induction in biomimetic multi-gradient foam-filled tubes with enhanced energy absorption: theory, experiment, and simulation [J]. *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME*, 2025, 92(5): 051010. DOI: 10.1115/1.4068061.