

基于藤壶仿生超材料的综合防护性能研究

刘磊, 王共冬*, 刘辰泽, 吕文为

(沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 沈阳 110136)

摘要: **目的** 为了满足未来航空航天、军工等领域防护装备在复杂作业环境下的综合防护性能需求, 设计一种能够抵挡爆炸、高速弹体侵彻的轻质、高强度综合防护材料。**方法** 受藤壶稳定的排列方式与几何结构启发, 以超材料、仿生材料为理念, 设计全新的仿藤壶梯度锥形管结构, 并以芯层的形式嵌入现有材料, 通过 ABAQUS 有限元仿真与实验结合验证其综合防护性能。**结果** 藤壶仿生超材料相较于传统蜂窝材料, 质量减小约 24%; 爆炸实验中背爆面爆炸极限应力降低约 17%, 胶泥凹陷深度降低约 7%; 冲击实验中后背板侵入位移减少约 57%, 胶泥凹陷深度降低约 83%, 具有更好的能量耗散效果。**结论** 藤壶仿生超材料相较于传统蜂窝材料不仅具备更高的轻量化性能, 其防爆炸、抗冲击的综合防护性能也得到有效提高。

关键词: 仿生超材料; 综合防护性能; 爆炸实验; 冲击实验; 有限元分析

中图分类号: TB34; O347.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0286-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.033

Comprehensive Protection Performance Based on Barnacle Bionic Metamaterials

LIU Lei, WANG Gongdong*, LIU Chenze, LYU Wenwei

(Aeronautics and Astronautics College, Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, Shenyang 110136, China)

ABSTRACT: The work aims to design a lightweight, high-strength comprehensive protection material that can withstand explosion and high-speed projectile penetration to meet the comprehensive protection performance requirements of future protective equipment in aerospace, military and other fields in complex operating environments. Inspired by the stable arrangement and geometric structure of barnacles, a new gradient conical tube structure modeled after barnacles was designed based on the concept of metamaterials and bionic materials, and embedded into the existing materials in the form of core layer. The comprehensive protection performance was verified by ABAQUS finite element simulation and experiment. Compared with traditional honeycomb materials, the mass of barnacle bionic metamaterials was reduced by about 24%. In the explosion experiment, the explosion limit stress of the back explosion surface was reduced by about 17%, and the depth of mud depression was reduced by about 7%. In the impact test, the backplane invasion displacement was reduced by about 57%, and the depth of mud depression was reduced by about 83%, which had a better energy dissipation effect. Compared with traditional honeycomb materials, barnacle bionic metamaterials not only have higher lightweight performance, but also have improved anti-explosion and anti-impact comprehensive protection performance.

KEY WORDS: bionic metamaterials; comprehensive protection performance; explosion experiment; impact experiment; finite element analysis

收稿日期: 2025-01-09

基金项目: 辽宁省重点研发计划 (2023JH2/101300234)

*通信作者

随着航空航天^[1-2]、船舶^[3-4]、军工等领域科技的不断发展, 传统材料已无法完全满足使用功能上的需求, 因此通过对各类材料的结构设计、组分调整以及拓扑优化等使材料具有优异的各向异性和高环境适应性已成为研究热点, 其中以仿生材料与超材料最具研究价值^[5]。近年来, 国内外学者从几何结构、胞元尺寸、堆叠与排列方式、材料组分^[6-15]等方向出发, 对超材料的力学性能展开了深入研究。于相龙等^[16]研究发现, 具备晶格结构超材料、负热膨胀超材料、手性/反手性结构超材料在功能性及稳定性方面具有较大优势; 杨德庆等^[17]建立的任意正泊松比超材料结构比传统多孔材料表现出更好的力学和轻量化性能; Dattelbaum 等^[18]制备的微型多孔聚合物材料使冲击波应力和波速降低一个数量级; Singh 等^[19]设计的具有 BCC、IWP、陀螺架构的混合铸铝 AlSi10Mg 超材料具有较大的能量吸收能力; Gao 等^[20]提出的新型负刚度与任晨辉^[21]设计的负刚度、负泊松比超材料结构, 相较于传统材料均具有更好的抗冲击能力。

与此同时针对仿生材料防护性能的研究^[22-28]也逐渐深入。Wu 等^[29]受珍珠母层结构启发而设计的多层交错复合板, 通过层间的连锁、摩擦和滑移现象有效提高能量吸收效率; 祝子浩等^[30]参照贝壳珍珠母层结构设计的砖-泥夹层抗爆炸冲击仿生材料的比吸能为传统实心板材的 16 倍; 覃凌云等^[31]基于结构仿生原理设计了仿贝壳、螯虾、竹子、马尾茎等结构的车辆乘员下肢防护装置, 可使假人下胫骨受冲击后轴向力峰值降低 66%; 葛俊洋^[32]借鉴毛蚶贝壳和雀尾螳螂虾螯棒制备的仿生强化结构与曹鑫^[33]设计的仿狗獾

牙齿结构的陶瓷梯度插板, 相较于传统材料, 其抗弹丸侵彻防护性能均大幅增加。

目前, 超材料、仿生材料的研究通常依据受到的主要载荷开展单一的防爆炸或抗冲击结构设计, 由于爆炸与高速冲击在载荷作用强度、冲击波传递形式等方面具有较大差异, 现有仿生超材料难以同时满足防爆炸与抗高速冲击的双重需求。鉴于此, 受藤壶外部稳定圆锥形结构及其紧密而交错有序的排布方式启发, 本文设计了一种新型的仿藤壶梯度锥型管结构, 并以芯层结构形式嵌入到现有材料之中形成新型仿生超材料, 通过有限元分析和冲击测试验证其综合防护性能, 以期对航空航天、军工防护材料发展提供设计新思路。

1 仿生超材料结构设计

藤壶在自然界中的生长排布方式如图 1a 所示, 基于自然界藤壶群体的高度差异性, 设计初始仿藤壶超材料模型中胞元单体存在 2 种高度, 其高度比为 10:9, 占总体数量比约为 1:1, 如图 1b 所示。藤壶由钙质壳、钙质基底、藤壶胶等组成, 如图 1c 所示, 外围的钙质壳为藤壶单体提供主要的承力支持, 因此设计仿藤壶结构的主体胞元为梯度锥型管结构, 其中锥型管结构厚度 t 为 2 mm, 上、下直径 R_1 、 R_2 分别为 8 mm 和 12 mm, 倾斜角度 θ 为 14° , 设计结果如图 1d 所示。同时本文设计六边形单胞内边长为 3.5 mm 的蜂窝结构对照组, 厚度为 2 mm, 2 种结构均由单胞点阵排列为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的芯层整体。

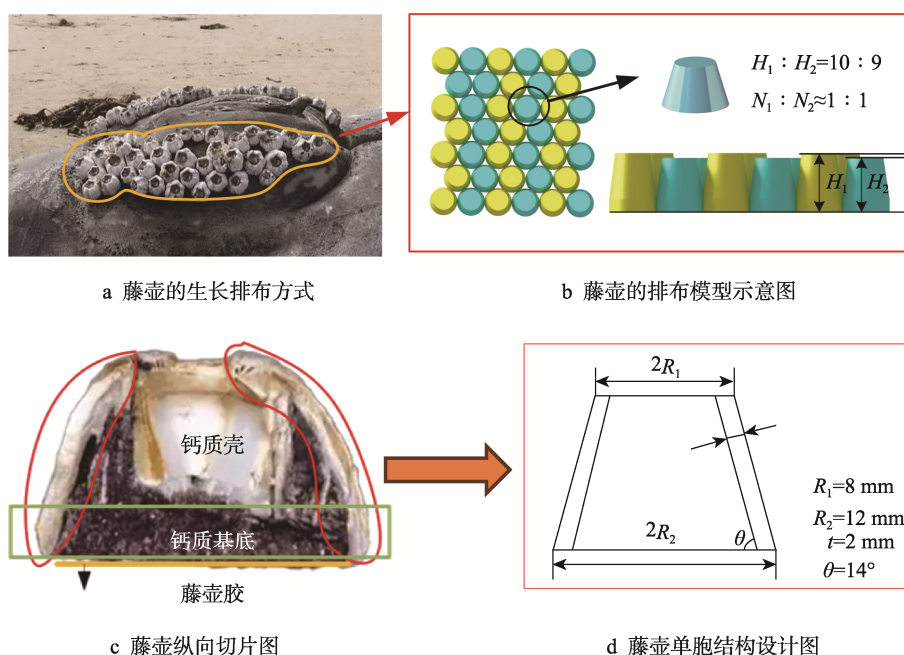


图 1 仿藤壶梯度锥型管结构示意图

Fig.1 Schematic diagram for structure of barnacle-inspired gradient conical tube

2 实验

2.1 实验试件制备

实验试件由前背板、仿生结构芯层、后背板、胶泥组成,如图 2 所示。前、后背板厚度为 2 mm,胶泥厚度为 50 mm,前、后背板及胶泥的横截面尺寸均为 120 mm×120 mm。前背板采用碳纤维复合材料通过热压罐成型工艺^[34]制备而成,碳纤维预浸料购自威海光威复合材料股份有限公司,型号为 T300/5208,体积分数为 60%,铺层顺序为 $[0/90]_{4s}$,铺层数量为 16 层;胶泥选用消防用防爆胶泥,购自廊坊西频宝节能科技有限公司;后背板采用 6061 铝合金板材,购自兴化市昌硕金属制品经营部。最终制备传统蜂窝材料试件质量为 102.77 g,藤壶仿生超材料试件质量为 77.76 g。

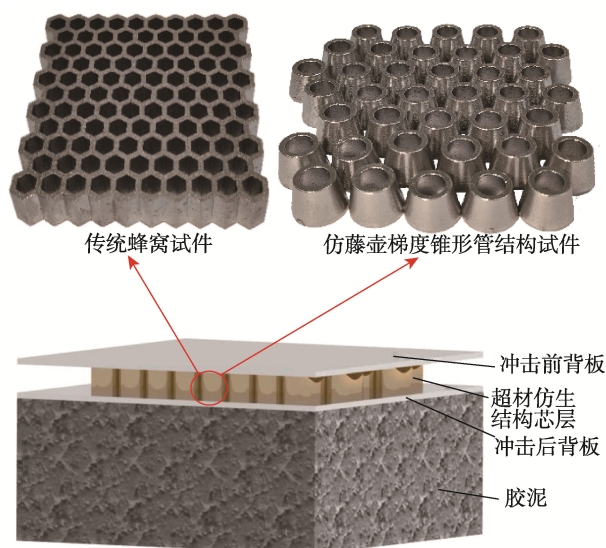


图 2 仿生超材料结构芯层防护材料示意图

Fig.2 Schematic diagram for core protection material of bionic metamaterial structure

2.2 仿真模型建立与验证

建立基于 TNT 炸药爆炸侵彻的有限元仿真模型,如图 3a 所示,在芯层结构上、下分别设置迎爆面板与背爆面板,背爆面板下方装配高度为 50 mm 的胶泥材料。采用时间为 1 ms 的显示动力学分析步,仿真设计炸药 TNT 当量为 168 g,起爆点距离迎爆面板 0.5 m。迎、背爆面板网格近似全局尺寸为 2 mm,胶泥网格近似全局尺寸为 5 mm,芯层近似全局尺寸为 1.5 mm。高速冲击仿真模型与爆炸冲击仿真一致,测试弹体外径为 25 mm,轴向长度为 60 mm,弹体采用刚体约束形式,并设置以 120 m/s 的初速度进行冲击。

为验证所建有限元模型的可靠性与合理性,选取不同的网格尺寸对模型进行重复爆炸实验,以验证网格尺寸的敏感性,绘制后背板应力-网格尺寸变化曲

线如图 3b 所示。由于网格尺寸的变化会产生过度扭曲现象,取 0.15 ms 时的后背板应力与位移作为参考,可见本文设置的网格尺寸在 $\pm 20\%$ 内变化时,应力仅在 1 MPa 范围内波动,表明有限元结果对网格尺寸具有低敏感性,有限元模型合理。

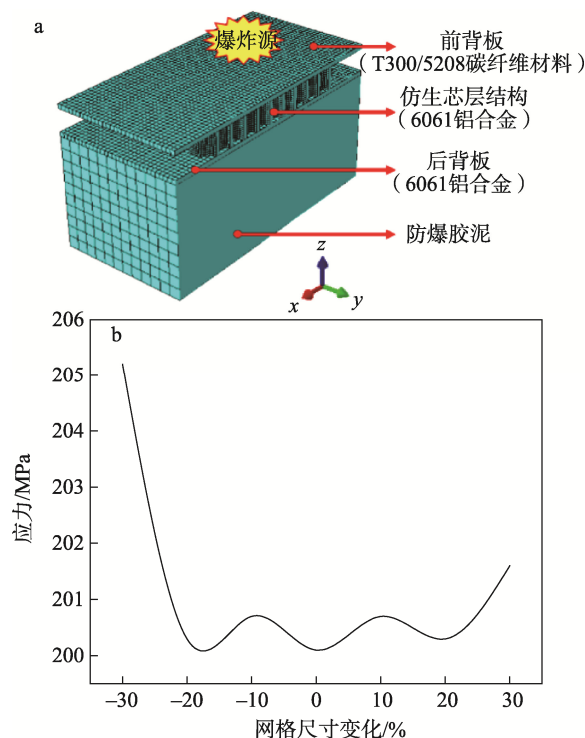


图 3 TNT 炸药爆炸侵彻仿真有限元模型 (a)、后背板应力-网格尺寸变化曲线 (b)

Fig.3 Simulation finite element model (a) and rear backplane stress-mesh size curve (b) of TNT explosive penetration

2.3 冲击实验设计

高速冲击测试采用筒内径较大、发射弹体控制稳定的飞机适航性鸟撞冲击测试平台的高压空气炮(购自南京迪飞斯动高压技术有限公司)发射弹体,高速冲击测试设备示意图如图 4 所示。物理弹体直径为 50 mm,柱体部分结构沿轴向长度为 30 mm,空气炮气罐初始压强为 0.105 MPa,使弹体到达试件表面附近时速度达到 120 m/s。

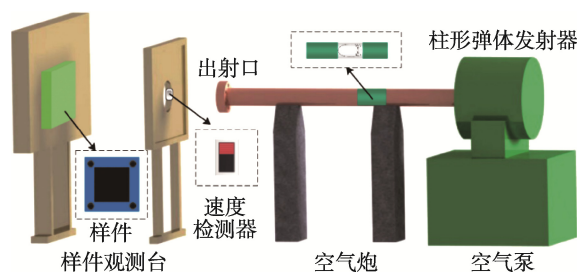


图 4 高速冲击测试设备示意图

Fig.4 Schematic diagram of high-speed impact test equipment

3 结果与讨论

3.1 爆炸实验结果与分析

由于结构参数设计并非该结构的最优参数,分别针对锥型管倾斜角 θ 与高低管高度比 r 对仿藤壶梯度锥型管结构进行多尺度参数优化设计,通过有限元数字化仿真验证设计参数的合理性。优化实验设计中, $\theta=(70+2i)^\circ$, $i=1,2,3,4,5,6,7$; $r=0.4+0.1i$, $i=1,2,3,4,5,6$,优化结果如图5所示。

由图5a可知,随着锥型管倾斜角的增大,藤壶仿生超材料背爆面板的爆炸极限应力最小值在 80° 或 73° 附近;由图5b可知,倾斜角为 73° 的背爆面板出现小范围严重破损,因此取 80° 为倾斜角 θ 的最优参数。由图5c可知,梯度锥型管 $r>0.6$ 的爆炸极限应力曲线呈先下降后上升趋势,曲线极小值拐点稳定在 $0.8\sim 0.9$,虽然 $r<0.6$ 时爆炸极限应力有所下降,但由于胞元较大的高度差使得前背板支撑力不足,因此取具有更小应力的 $r=0.9$ 为最优参数。

以背爆面板与胶泥接触面上的平均最大应力(以下称为爆炸极限应力)作为判断防护能力的首要依据,材料的防护性与爆炸极限应力成反比,传统蜂窝材料与藤壶仿生超材料装配体仿真应力云图、胶泥凹陷程度仿真位移云图如图6所示。爆炸冲击波经过芯

层的防护作用后,在传统蜂窝材料的背爆面板出现大面积的应力集中现象,但藤壶仿生超材料的背爆面板应力集中面积较小,如图6a~b所示。传统蜂窝材料背爆面板虽出现较为严重的损伤,但其芯层结构的整体破坏程度却小于藤壶仿生结构,表明仿生结构依托自身结构特征在爆炸作用后发生更大的塑性变形与损伤,从而有效消耗爆炸冲击波能量;而蜂窝结构耗散能力较弱,来自爆炸冲击的部分能量未经蜂窝结构耗散直接传入背爆面板,导致应力上升。藤壶仿生超材料背爆面板爆炸极限应力为194.5 MPa,较传统蜂窝材料的233.9 MPa降低约17%。传统蜂窝材料背爆面板后方胶泥凹陷深度最高达到5.14 mm,且整体凹陷较为集中,而藤壶仿生超材料的胶泥凹陷深度最高为4.76 mm,相比传统蜂窝材料降低约7%。以上分析均表明藤壶仿生超材料的防护能力优于传统蜂窝材料。

结合单胞元在爆炸冲击过程中的受力及变形情况,对2种结构能量耗散机理进行分析,不同芯层结构单胞爆炸应力云图如图7所示。由图7a可知,传统蜂窝结构在爆炸冲击载荷作用下整体受力较为明显,蜂窝两侧受力大于中心区域,结构在爆炸冲击作用下逐层发生上凸型破损,结构外层部分大面积剥离蜂窝主体结构,结构主体受损严重。由于传统蜂窝侧壁为竖直的封闭式结构,冲击能量由迎爆面板沿蜂窝

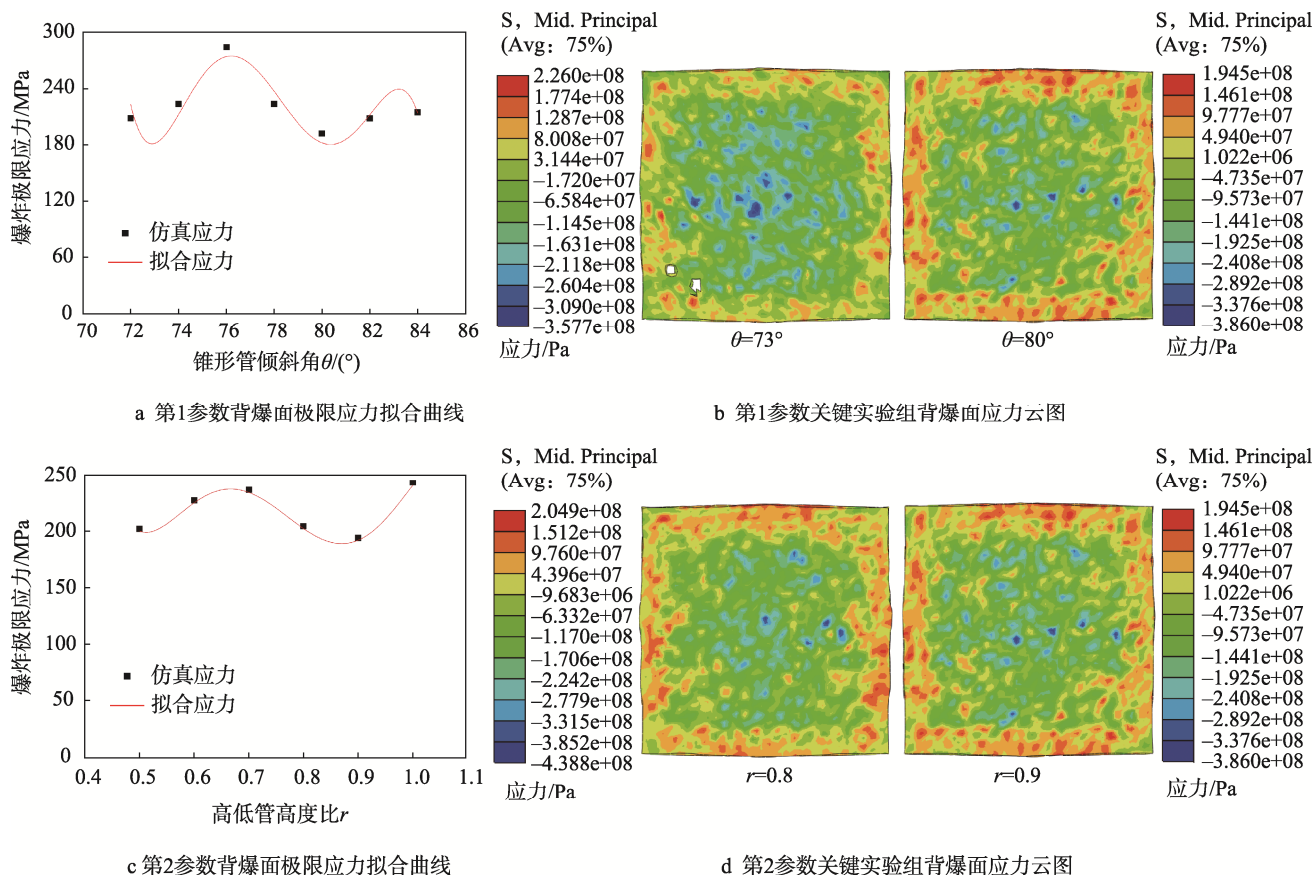


图5 仿藤壶梯度锥形管结构参数优化结果

Fig.5 Optimization results of structural parameters of barnacle-inspired gradient conical tube

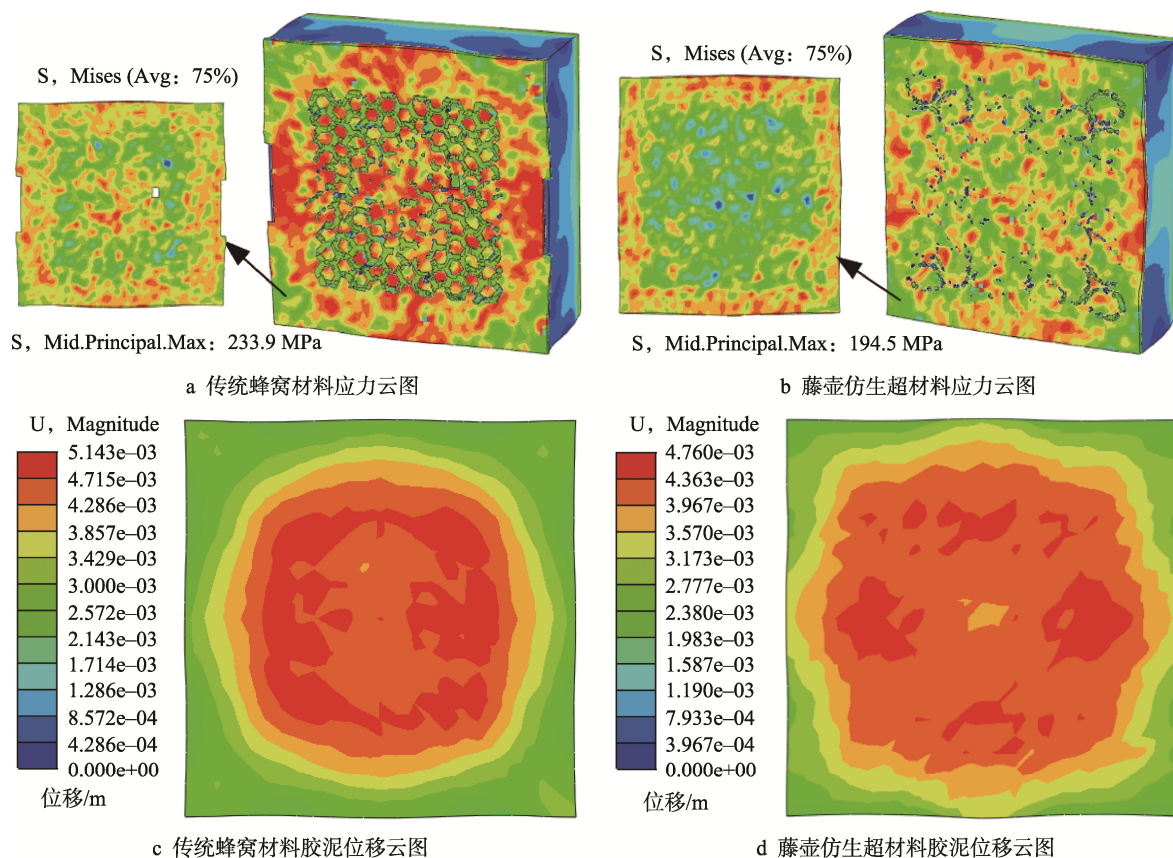


图 6 TNT 炸药爆炸侵彻仿真结果
Fig.6 Simulation results of TNT explosive penetration

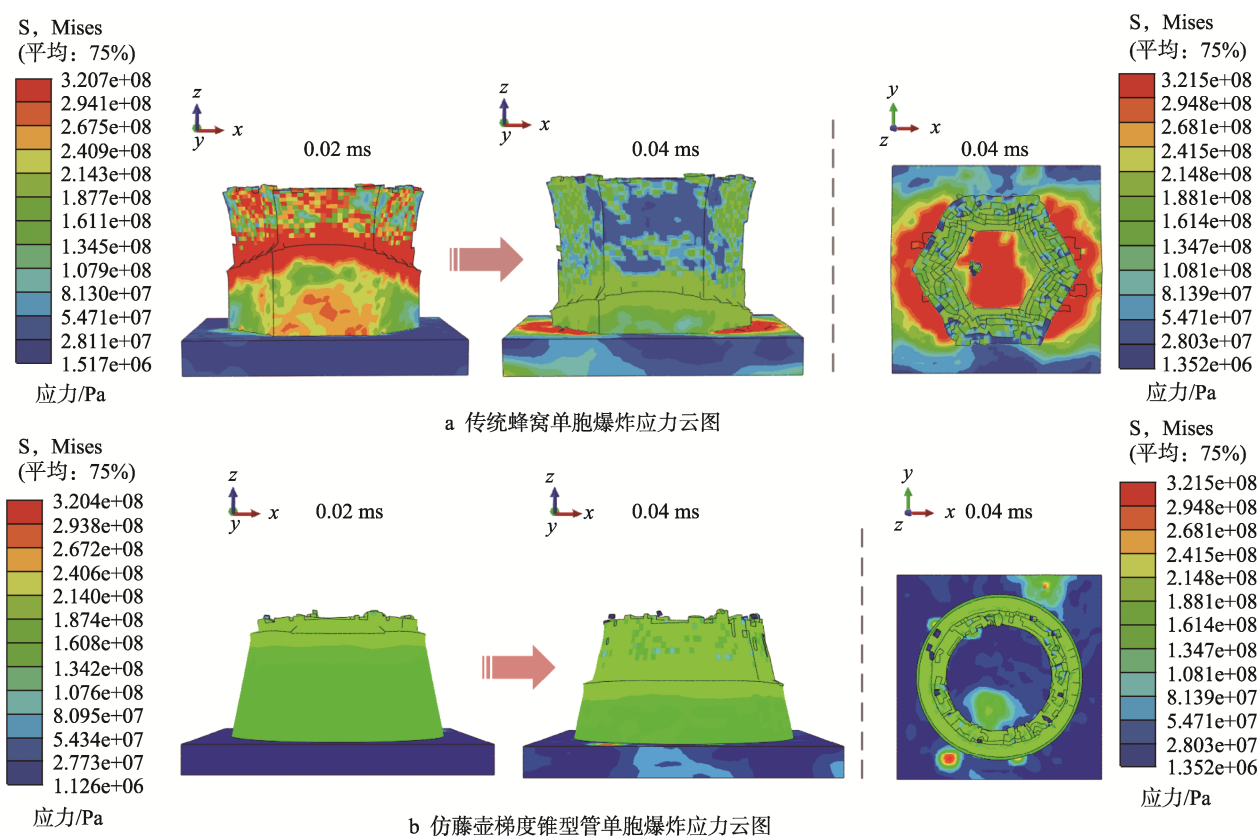


图 7 TNT 炸药爆炸侵彻单胞应力云图
Fig.7 Stress contour for single cells of TNT explosive penetration

侧壁直接传至背爆面板, 因此背爆面板云图中出现大面积的高应力分布现象, 结构总体防护能力相对较弱。图 7b 中仿藤壶梯度锥型管总体应力分布较传统蜂窝更均匀, 且由于锥型管上窄下宽的结构特征, 来自爆炸冲击波的能量在传递过程中作用在锥型管横截面上的圆环面积逐渐增大, 仿藤壶梯度锥型管结构的防护效果逐渐稳定, 因此整体结构在受爆炸冲击后逐层破损的速度相比传统蜂窝更缓慢, 背爆面板的应力分布较均匀, 局部应力集中面积较小。

取传统蜂窝与藤壶仿生超材料的迎、背爆面板中心位置绘制仿真应力-时间曲线, 如图 8 所示。由图 8 可知, 冲击能量到达迎爆面板后产生沿 z 轴的纵向位移, 由于芯层结构的支撑作用, 迎爆面板内产生较大应力; 仿生芯层因承受不了巨大的冲击能量受到破坏, 芯层单元网格被删除, 使得前背板与芯层之间产生间隙, 迎爆面板失去支撑导致应力降低; 随后迎爆面板进一步侵入并作用于未破坏的芯层, 使防护材料的迎爆面板应力呈现波动趋势, 这也是在 0.04、0.06 ms 时迎爆面板的应力低于背爆面板的原因。能量进入芯层结构后被大量耗散, 因此背爆面板应力相比迎爆面板变化趋势更加平稳, 整体应力水平更低。由图 8a 可知, 由于传统蜂窝结构侧壁无孔, 能够与迎、背爆面板紧紧贴合, 能量沿蜂窝不同侧壁方向的传递及耗散效果一致, 蜂窝对爆炸冲击输入的能量只有整体减弱作用而无附加耗散能力, 因此传统蜂窝材料迎、背爆面板的应力曲线变化趋势基本相同。图 8b 中, 藤壶仿生超材料背爆面板应力相比传统蜂窝更加平稳, 进一步证实该材料具备较好的 TNT 爆炸侵彻防护性能。

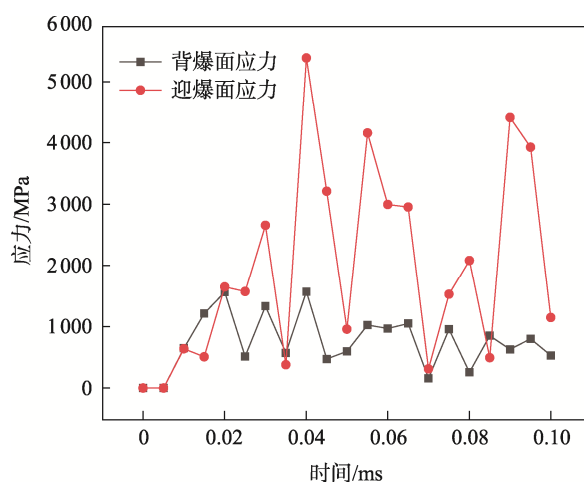
3.2 冲击实验结果与分析

在高速冲击防护性能分析中, 胶泥作为受保护对

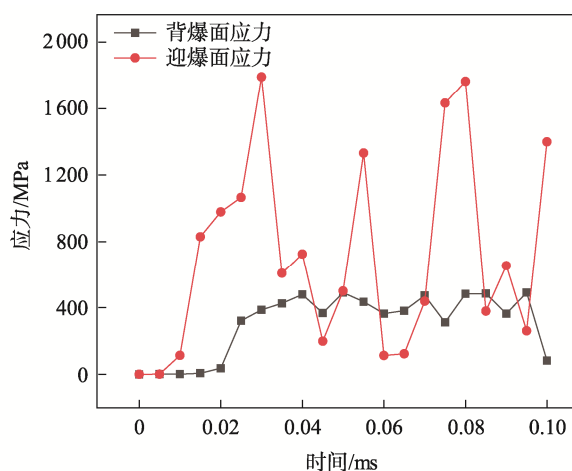
象装配于后背板之后, 其受力情况与损伤程度直接代表被保护结构的安全性; 防护材料后背板直接与被保护对象接触, 其损伤情况同样对防护性能有较大影响, 两者均为评估冲击防护性能的重要依据。高速冲击测试中试件损伤形貌及其对应的仿真云图如图 9 所示。图 9a~b 为防爆胶泥 C 扫图及仿真位移云图, 可知传统蜂窝材料的胶泥出现大面积的凹陷, 藤壶仿生超材料胶泥的仿真位移云图和 C 扫图中显示的胶泥凹陷区域位置基本一致; 对比位移云图中的最大形变量可知, 传统蜂窝材料胶泥最大变形量为 8.64 mm, 而藤壶仿生超材料胶泥最大变形量为 1.44 mm, 约降低 83%, 表明在冲击能量到达胶泥前, 仿藤壶梯度锥型管芯层吸收了更多冲击能量。

由图 9c~d 可知, 传统蜂窝材料后背板的凹陷非常明显, 达到 19.02 mm, 且在极限应力与藤壶仿生超材料后背板基本相同的情况下产生更大面积的红色高应力区域及更为严重的损伤 (图中白色空洞区域), 基本集中在冲击中心位置。藤壶仿生超材料后背板的红色高应力区域不仅面积更小且更为分散, 表明其具备良好的能量分散能力, 其后背板侵入位移仅为 8.25 mm, 较传统蜂窝材料降低约 57%。

由图 9e~f 可知, 因弹体能量损耗, 实验测试中的藤壶仿生结构芯层的损伤程度不及仿真模拟中严重。由于传统蜂窝材料在实际冲击测试中弹体产生偏移, 其芯层结构未出现仿真结果中中心区域完全被弹体击溃的现象, 但其总体凹陷与仿真结果中的变形基本一致, 高于藤壶仿生超材料。仿藤壶梯度锥型管结构的芯层损伤形貌与仿真结果中的损伤形式类似, 表现为在受弹体冲击区域范围集中凹陷, 且弹体未完全穿透芯层结构。基于以上分析可知, 相较于传统蜂窝材料, 藤壶仿生超材料具有更高的冲击防护性能。

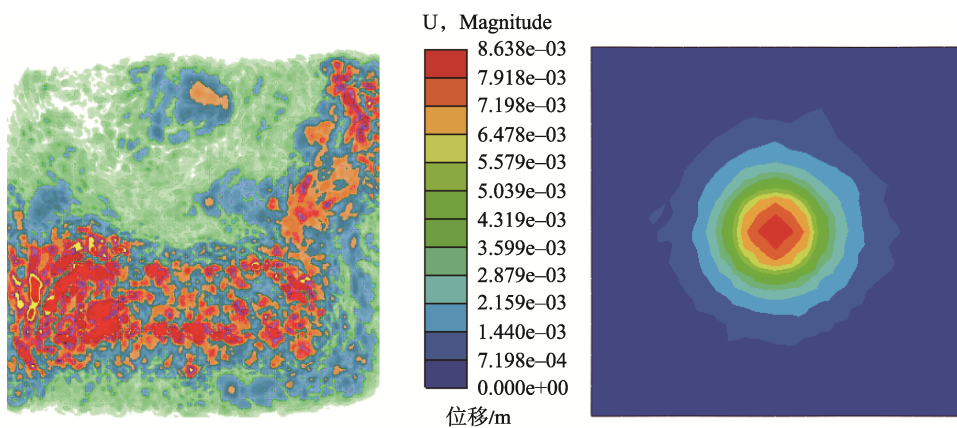


a 传统蜂窝材料迎/背爆面板应力曲线

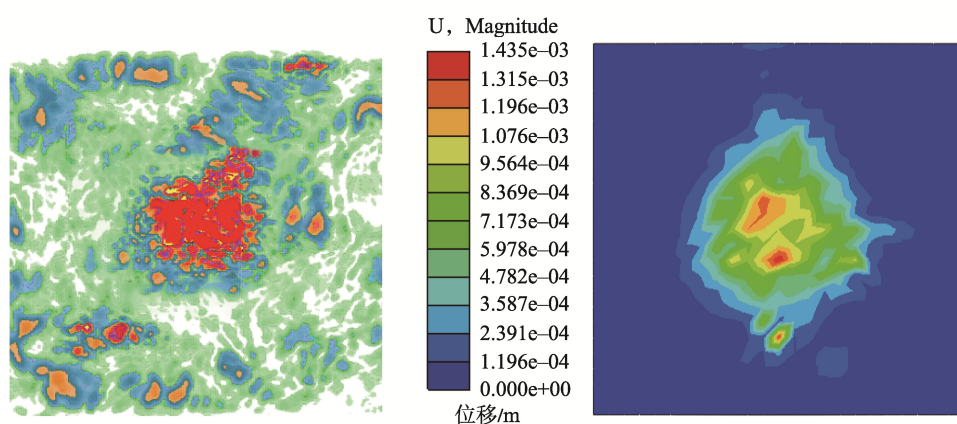


b 藤壶仿生超材料迎/背爆面板应力曲线

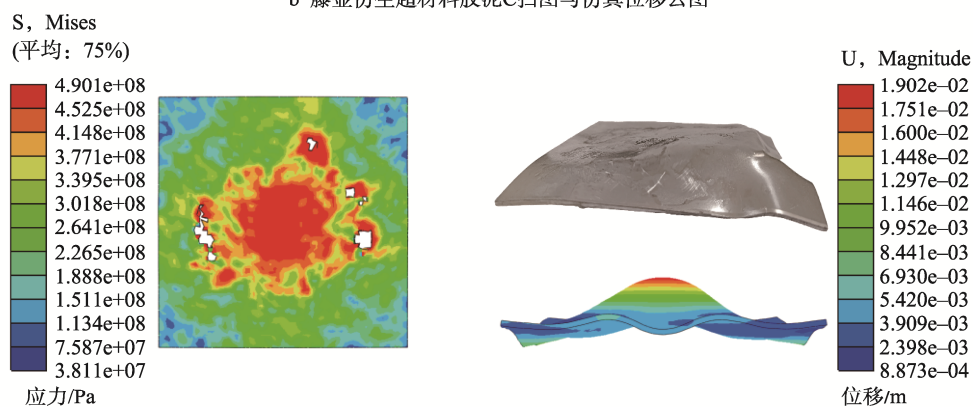
图 8 仿真应力-时间曲线
Fig.8 Simulate stress-time curves



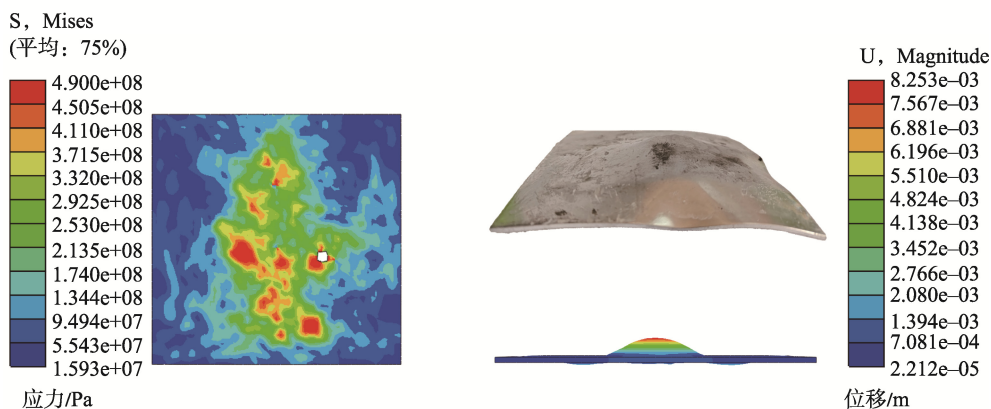
a 传统蜂窝材料胶泥C扫图与仿真位移云图



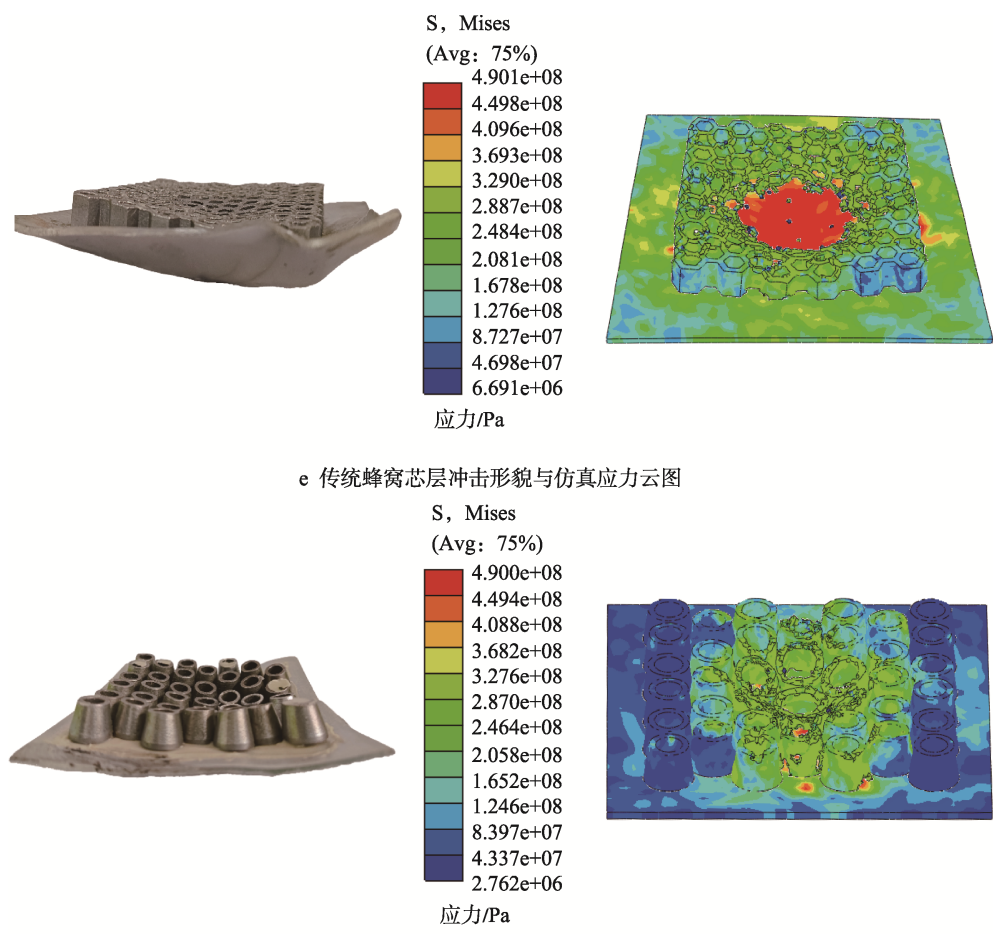
b 藤壶仿生超材料胶泥C扫图与仿真位移云图



c 传统蜂窝材料后背板冲击形貌仿真云图与实物图



d 藤壶仿生超材料后背板冲击形貌仿真云图与实物图



e 传统蜂窝芯层冲击形貌与仿真应力云图

f 藤壶仿生芯层冲击形貌与仿真应力云图

图 9 冲击实验结果
Fig.9 Impact test results

4 结语

借鉴藤壶稳定圆锥形结构及其排布方式,设计一种以仿藤壶梯度锥型管为芯层的新型仿生超材料,并进行爆炸侵彻及抗冲击防护性能的有限元分析与实验,得出以下结论。

- 1) 藤壶仿生超材料具有更小的质量,比传统蜂窝材料减小约 24%。
- 2) 在爆炸侵彻实验中,相较于传统蜂窝材料,藤壶仿生超材料背爆面爆炸极限应力为 194.5 MPa,降低约 17%;胶泥凹陷深度最高为 4.76 mm,降低约 7%;能量耗散效果相对较好,背爆面云图中无大面积的大应力分布现象。
- 3) 在冲击实验中,藤壶仿生超材料胶泥凹陷深度相较于传统蜂窝材料降低约 83%,且后背板具有更小的损伤面积,后背板侵入位移减少约 57%,可见该材料具有更高的抗爆炸侵彻和高速冲击的综合防护性能。

参考文献:

[1] 唐见茂. 航空航天材料发展现状及前景[J]. 航天器环

境工程, 2013, 30(2): 115-121.
TANG J M. Development Status and Prospect of Aerospace Materials[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2013, 30(2): 115-121.
[2] 胡建星, 刘兴华, 王永滨, 等. 压扭超材料填充柱壳撞击固壁的动态力学行为研究[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(5): 20-28.
HU J X, LIU X H, WANG Y B. et al. Study on Dynamic Mechanical Behavior of Compression-Torsional Metamaterial-Filled Column Shell Impacting Solid Wall[J]. Aerospace Return and Remote Sensing, 2023, 44(5): 20-28.
[3] NIAN Y Z, WAN S, WANG X, et al. Study on Crashworthiness of Nature-Inspired Functionally Graded Lattice Metamaterials for Bridge Pier Protection Against Ship Collision[J]. Engineering Structures, 2023, 277: 115404.
[4] 夏利福. 舰船超材料结构设计方法与性能分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
XIA L F. Design Method and Performance Analysis of Ship Metamaterial Structure[D]. Shanghai: Shanghai

- Jiao Tong University, 2019.
- [5] 张潇. 仿生材料的细观结构设计与力学性能调控[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- ZHANG X. Meso-Structural Design and Mechanical Properties Control of Bionic Materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [6] HU W X, CAO X F, ZHANG X Q, et al. Deformation Mechanisms and Mechanical Performances of Architected Mechanical Metamaterials with Gyroid Topologies: Synchrotron X-Ray Radiation In-Situ Compression Experiments and 3D Image Based Finite Element Analysis[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 44: 101229.
- [7] WU W J, LIU P, KANG Z. A Novel Mechanical Metamaterial with Simultaneous Stretching- and Compression-Expanding Property[J]. *Materials & Design*, 2021, 208: 109930.
- [8] 严效男. 金属/陶瓷异质点阵结构设计与冲击防护性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- YAN X N. Design of Metal/Ceramic Heterolattice Structure and Study on Impact Protection Performance[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [9] 安超超. 微结构调控下拉胀多孔材料的冲击动力学性能研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- AN C C. Study on Impact Dynamics of Tensile Porous Materials under Microstructure Control[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [10] 杨德庆, 吴秉鸿, 张相闻. 星型负泊松比超材料防护结构抗爆抗冲击性能研究[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(6): 122-133.
- YANG D Q, WU B H, ZHANG X W. Study on Explosion and Impact Resistance of Star-Shaped Negative Poisson's Ratio Metamaterial Protective Structure[J]. *Explosion and Impact*, 2019, 39(6): 122-133.
- [11] 李奇奇. 局域共振型超材料的碰撞冲击载荷衰减与关键参数设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- LI Q Q. Impact Load Attenuation and Key Parameter Design of Local Resonance Metamaterials[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [12] 罗放, 杨德庆. 连续爆炸冲击下负泊松比超材料防护结构性能研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(2): 74-78.
- LUO F, YANG D Q. Study on the Performance of Negative Poisson's Ratio Metamaterial Protective Structure under Continuous Explosion Impact[J]. *Vibration and Shock*, 2022, 41(2): 74-78.
- [13] 程乾, 尹剑飞, 温激鸿, 等. 极小曲面力学超材料抗冲吸能特性分析[J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(7): 43-50.
- CHENG Q, YIN J F, WEN J H, et al. Analysis of Impact Energy Absorption Characteristics of Ultramaterials with Minimal Surface Mechanics[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(7): 43-50.
- [14] 李锁斌, 魏儒义, 周安安, 等. 超结构夹芯板及其低宽频振动带隙机理[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(4): 77-85.
- LI S B, WEI R Y, ZHOU A A, et al. A New Sandwich Type Metamaterial Plate and Its Mechanism of Low-Frequency Broad Vibration Band Gap[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(4): 77-85.
- [15] SAURABH S, GUPTA A, CHOWDHURY R, et al. Impact of Parametric Variation to Achieve Extreme Mechanical Metamaterials through Topology Optimization[J]. *Composite Structures*, 2023, 326: 21.
- [16] 于相龙, 周济. 力学超材料的构筑及其超常新功能[J]. *中国材料进展*, 2019, 38(1): 14-21.
- YU X L, ZHOU J. Mechanical Metamaterials: Architected Materials and Unexplored Properties[J]. *Materials China*, 2019, 38(1): 14-21.
- [17] 杨德庆, 秦浩星. 基于功能基元拓扑优化法的任意正泊松比超材料结构设计[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(7): 819-829.
- YANG D Q, QIN H X. Metamaterials Design with Arbitrary Poisson's Ratio by Functional Element Topology Optimization[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(7): 819-829.
- [18] DATTELBAUM D M, IONITA A, PATTERSON B M, et al. Shockwave Dissipation by Interface-Dominated Porous Structures[J]. 2020, 10(7): 075016.
- [19] SINGH A, AL-KETAN O, KARATHANASOPOULOS N. Hybrid Manufacturing of AlSi₁₀Mg Metamaterials: Process, Static and Impact Response Attributes[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 7457-7469.
- [20] GAO R J, GUO S, TIAN X Y, et al. A Negative-Stiffness Based 1D Metamaterial for Bidirectional Buffering and Energy Absorption with State Recoverable Characteristic[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 169: 108319.
- [21] 任晨辉. 船舶负刚度超材料与结构的设计方法和性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- REN C H. Study on Design Method and Performance of Ship Negative Stiffness Metamaterials and Structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [22] 邢运, 杨嘉陵. 动物进化的抗冲击策略及其仿生机理研究[J]. *力学进展*, 2021, 51(2): 295-341.
- XING Y, YANG J L. Research Progress of Im-

- Impact-Resistance Strategies and Biomimetic Mechanism in Animal Evolution[J]. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(2): 295-341.
- [23] 邢运, 张桥, 杨先锋, 等. 仿生梯度圆环防护系统的耐撞性设计[J]. *航空学报*, 2022, 43(6): 484-498.
XING Y, ZHANG Q, YANG X F, et al. Crashworthiness Design of Bionic Gradient Ring Protection System[J]. *Acta Aeronautica Sinica*, 2022, 43(6): 484-498.
- [24] 孙自强, 刘川, 金映丽, 等. 仿生缓冲器的等效刚度与抗冲击性能分析[J]. *沈阳工业大学学报*, 2022, 44(5): 536-540.
SUN Z Q, LIU C, JIN Y L, et al. Analysis of Equivalent Stiffness and Impact Resistance of Bionic Buffer[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2022, 44(5): 536-540.
- [25] CAI Z B, LI Z Y, DING Y, et al. Preparation and Impact Resistance Performance of Bionic Sandwich Structure Inspired from Beetle Forewing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 161: 490-501.
- [26] 黄小桐. 基于仿生原理的柔性防护装具优化设计与试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
HUANG X T. Optimal Design and Experimental Study of Flexible Protective Equipment Based on Bionic Principle[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [27] 马帅. 仿生鳞甲防暴防护服的发展现状及关键技术分析[J]. *中国设备工程*, 2023(8): 208-210.
MA S. Development Status and Key Technology Analysis of Bionic Scale Armor Anti-Riot Protective Clothing[J]. *China Equipment Engineering*, 2023(8): 208-210.
- [28] 马帅, 罗雷. 基于 GQFD 的仿生鳞甲防护服能力需求分析[J]. *中国个体防护装备*, 2023(1): 40-47.
MA S, LUO L. Analysis on the Capability Demand of Bionic Scale Armor Protective Clothing Based on GQFD[J]. *Personal Protective Equipment in China*, 2023(1): 40-47.
- [29] WU G, WANG X, WANG Y T, et al. Blast Response of Bioinspired Nacre-Like Staggered Composite Plates Combined with Steel and Polyurea[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 180: 104719.
- [30] 祝子浩, 史金飞, 杨柳, 等. 仿贝壳珍珠母层仿生结构设计及抗冲击性分析[J]. *河南科技*, 2021, 40(18): 28-31.
ZHU Z H, SHI J F, YANG L, et al. The Bionic Structure Design and Impact-Resistant Analysis of Shell-Like Mother-of-Pearl Layer[J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(18): 28-31.
- [31] 覃凌云, 杨书仪, 戴巨川, 等. 爆炸冲击下乘员下肢保护装置仿生设计与优化[J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(3): 95-103.
TAN L Y, YANG S Y, DAI J C, et al. Bionic Design and Optimization of Occupant Lower Limb Protection Device under Explosion Impact[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(3): 95-103.
- [32] 葛俊洋. 受毛蚶贝壳和螳螂虾螯棒启发的仿生防弹装具强化结构设计与分析[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
GE J Y. Design and Analysis of Reinforced Structure of Bionic Bulletproof Equipment Inspired by Cockle Shells and Praying Mantis Shrimp Sticks[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [33] 曹鑫. 基于獠牙分层结构的仿生防弹插板设计与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
CAO X. Design and Research of Bionic Bullet-Proof Inserts Based on Badger Tooth Layered Structure[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [34] 王召召, 潘利剑, 庄恒飞, 等. 热压罐/真空辅助组合工艺成型复合材料及其质量评价[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(增刊 2): 78-81.
WANG Z Z, PAN L J, ZHUANG H F, et al. Quality Estimation of Product Manufactured by the Autoclave/VARI Process[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(Sup.2): 78-81.