

高压物理学报

爆炸载荷下仿贝壳Voronoi砖泥结构的动态响应

陈鑫康 李志洋 雷建银 刘志芳

Dynamic Response of Nacre-Like Voronoi Brick and Mortar Structure under Explosive Load

CHEN Xinkang, LI Zhiyang, LEI Jianyin, LIU Zhifang

引用本文:

陈鑫康, 李志洋, 雷建银, 等. 爆炸载荷下仿贝壳Voronoi砖泥结构的动态响应[J]. 高压物理学报, 2024, 38(6):064108. DOI: 10.11858/gywlb.20240772

CHEN Xinkang, LI Zhiyang, LEI Jianyin, et al. Dynamic Response of Nacre-Like Voronoi Brick and Mortar Structure under Explosive Load[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(6):064108. DOI: 10.11858/gywlb.20240772

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240772>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击载荷下仿贝壳砖泥结构的动态响应

Dynamic Response of Nacre-Like Brick and Mortar Structure under Impact Load

高压物理学报. 2022, 36(1): 014202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210790>

冲击载荷下仿贝壳珍珠层Voronoi结构的动态力学响应

Dynamic Responses of Nacre-Like Voronoi Structure under Impact Loading

高压物理学报. 2020, 34(6): 064201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200559>

新型仿竹薄壁圆管的设计与吸能特性分析

Design and Energy Absorption Characteristic Analysis of a New Bio-Bamboo Thin-Walled Circular Tube

高压物理学报. 2021, 35(5): 054205 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210710>

爆炸载荷下中空钢化夹层玻璃的动态响应

Dynamic Response of Hollow Tempered Laminated Glass under Explosive Load

高压物理学报. 2021, 35(6): 064102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210764>

爆炸载荷下舱内泡沫铝夹芯结构的动态响应特性

Dynamic Response Characteristics of Aluminum Foam Sandwich Structure under Explosion Load in Cabin

高压物理学报. 2022, 36(2): 024103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210849>

TC4钛合金空心结构风扇叶片的鸟撞动力学响应及损伤失效

Dynamic Response and Damage Failure Behavior of TC4 Titanium Alloy Hollow Fan Blade

高压物理学报. 2022, 36(5): 054103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220546>

爆炸载荷下仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的动态响应

陈鑫康, 李志洋, 雷建银, 刘志芳

(太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 基于贝壳多尺度、多层级的砖泥结构, 构建仿贝壳 Voronoi 砖泥结构。通过将 3D 打印、爆炸实验和数值模拟相结合, 探索仿贝壳 Voronoi 砖泥结构在爆炸载荷下的动力学响应, 研究 Voronoi 单元尺寸和层内软材料厚度对结构变形破坏模式和能量吸收的影响。实验结果表明: 在 40 g 球形乳化炸药作用下, 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的前面板中心处出现了向四周蔓延的径向裂纹, 后面板出现小块材料脱落。在此基础上, 建立了有限元模型, 并验证了其有效性。随着药量的增加, 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构主要分为塑性变形、前后面板裂纹、小块材料脱落、结构整体贯穿破坏伴随夹持端剪切破坏 4 种破坏模式。研究发现: 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构中硬材料的水平正应力远大于垂直正应力, 层间软材料的剪应变大于层内软材料的剪应变。层间软材料的比吸能远大于硬材料的比吸能, 约为硬材料的 1.8~2.3 倍; 随着 Voronoi 单元尺寸的增大, 层内软材料的比吸能增大了 45.6%; 随着层内软材料厚度增加, 层内软材料的比吸能增大了 31.1%, 允许结构进一步的塑性变形。研究结果为仿生结构设计提供了一定的技术依据。

关键词: 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构; 爆炸实验; 动力学响应; 比吸能

中图分类号: O341; O521.9

文献标志码: A

经过亿万年的自然选择, 生物材料进化出了独特的多尺度和多层级的宏、微观结构, 这些生物材料及结构具有优异的抗冲击性能和能量吸收能力。受生物材料及结构的启发, 近年来科研人员针对仿生结构开展了诸多研究, 在民用和军事防护领域得到广泛应用。这些抗冲击生物结构由非常复杂的软硬材料以及规则排列的层状几何结构组成, 正是这些层状几何结构赋予了它们高强度、高韧性和高抗冲击性^[1-4]。

贝壳珍珠层是天然的防护结构, 其内部独特的砖和砂浆结构^[5-6] 是其具有优异性能的主要原因, 与其他组成材料^[7-8] 的力学性能相比, 复合结构的断裂韧性和抗冲击性得到大幅提升^[9]。刘英志等^[10] 利用 3D 打印设备构建了仿贝壳砖泥模型, 采用实验与有限元模拟相结合的方式研究了其在落锤冲击下的动态响应, 发现在不同堆叠层数下, 3 层仿贝壳砖泥结构具有最大的比吸能, 比单层结构提高了 10.8%。Padole 等^[11] 通过研究软体动物外壳制作了不同类型的仿生结构, 发现珍珠层结构具有最好的抗冲击性、韧性和能量耗散性能。Yadav 等^[12] 模拟软体动物外壳制备了多种不同结构, 通过实验研究发现, 仿生层状结构具有更好的抗冲击性能。此外, 科研工作者还研究了软材料强度^[13]、硬材料倾斜角^[14] 和硬材料纵横比^[15] 对仿贝壳砖泥结构抗冲击性的影响, 发现硬材料的纵横比和软材料的体积分数是影响结构强度和韧性的重要因素^[16]。

天然的贝壳珍珠层内部片剂随机分布, Tran 等^[17] 开发了模拟贝壳珍珠层内部 Voronoi 形状的程序, 并构建了仿贝壳 Voronoi 结构, 通过拉伸实验和数值模拟从变形机制和能量耗散角度研究了仿贝壳复合材料的力学性能, 发现增大材料黏性和结合力有助于减少复合材料的塑性损伤, 提高能量耗散能

* 收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(12372363, 12272254); 山西省自然科学基金(202203021211170)

作者简介: 陈鑫康(1997—), 男, 硕士, 主要从事材料冲击动力学行为研究. E-mail: 2107874508@qq.com

通信作者: 雷建银(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料冲击动力学行为研究. E-mail: leijianyin@tyut.edu.cn

力。Wu 等^[18]通过对仿贝壳 Voronoi 结构施加预应力提高结构的力学性能, 落锤实验和数值模拟结果表明: 存在一个临界预应力 12.5 MPa, 使得结构片剂滑动增强并且整体耗能增大; 但当预应力过大时, 结构完整性减弱, 结构耗能下降并发生整体破坏。另外, 界面强度同样是影响仿贝壳 Voronoi 结构力学性能的重要因素^[13]。在对仿贝壳 Voronoi 结构力学性能的探索过程中, Wang 等^[19]发现, 仿贝壳 Voronoi 结构仅在冲击速度较低范围内表现出优越的抗冲击性能, 而当冲击速度超过临界值时, 其抗冲击性能相对于层合结构较弱, 随后将此现象推广到不同材料和不同尺寸的仿贝壳结构中。Ko 等^[20]通过改变 Voronoi 单元尺寸和层间软材料厚度设计了 11 种试样, 落锤实验和有限元模拟结果表明: 随着 Voronoi 单元尺寸增大, 失效模式为脆性断裂, 仿贝壳砖泥结构的抗冲击性降低; 增厚层内软材料, 则结构塑性变形增大。同时他们还分析了关键参数对抗冲击性的影响, 并对结构进行了进一步优化设计^[21]。

以上研究表明, 仿贝壳结构在低速冲击载荷下展现了良好的力学性能, 通过优化砖泥结构, 提高了其抗冲击性能。然而, 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构在爆炸载荷下的变形失效及能量吸收机理方面的研究却很少。为了掌握仿贝壳 Voronoi 砖泥结构在爆炸载荷下的力学响应, 本研究将利用 3D 打印技术制备试样并进行爆炸实验; 基于 LS-DYNA 有限元软件建立仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的有限元模型, 并进行数值模拟, 通过与实验结果对比, 验证有限元模型的有效性; 在此基础上, 研究炸药药量对仿贝壳 Voronoi 砖泥结构变形破坏模式的影响, 讨论仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的堆叠层数、Voronoi 单元尺寸、层内软材料厚度对其抗爆性能的影响, 最后研究其能量吸收和变形机制。

1 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构爆炸实验

1.1 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构试件制备

为体现天然贝壳结构多尺度的特性, 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构由高强低韧的硬材料和低强高韧的软材料组成。硬材料由随机 Voronoi^[22]模型自动生成, 尺寸为 100 mm×100 mm×2 mm, 如图 1(a)所示。Voronoi 单元尺寸为 10 mm, 单元之间采用厚度为 0.8 mm 的软材料填充, 如图 1(b)所示。为体现天然贝壳结构的多层级特性, 将单层结构在面外方向交错排布, 并在层与层之间填充厚度为 0.5 mm 的软材料, 最终形成 3 层仿贝壳 Voronoi 砖泥结构如图 1(c)所示, 其中: 白色部分为软材料结构, 蓝色部分为硬材料结构。

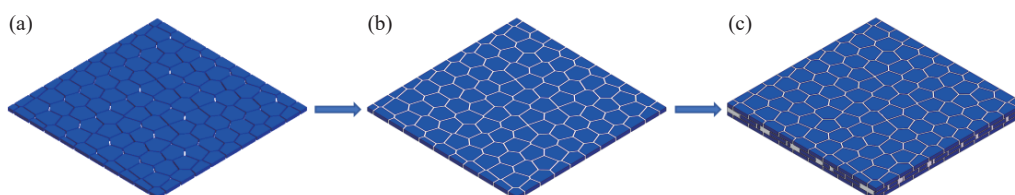


图 1 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的构建流程: (a) 单层硬材料, (b) 单层仿贝壳 Voronoi 砖泥结构, (c) 3 层仿贝壳 Voronoi 砖泥结构

Fig. 1 Construction flowchart of nacre-like Voronoi brick and mortar structures: (a) single layer of stiff material; (b) single layer of nacre-like Voronoi brick and mortar structure; (c) three layers of nacre-like Voronoi brick and mortar structure

1.2 爆炸装置

采用 Objet Connex 260 型 3D 打印机打印 3 层堆叠的仿贝壳 Voronoi 砖泥结构试样, 硬材料为 Vero White 刚性材料, 软材料为 Tango Plus 橡胶材料^[10], 如图 2 所示。爆炸实验采用 40 g 球形乳化炸药, 炸药距离试样中心 150 mm。实验中, 试样的 4 条边通过上、下夹具固定, 4 个角通过螺栓固定, 其有效受载尺寸为 60 mm×60 mm。

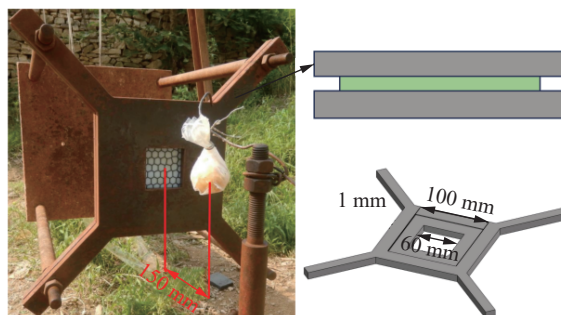


图 2 爆炸实验装置及试样

Fig. 2 Explosion experimental device and sample

1.3 实验结果

图3给出了试样在爆炸载荷作用下前后面板的最终失效形貌,红色虚线描绘了前后面板出现的裂纹。由图3可知,试样在前面板中心处出现大量穿过硬材料的径向裂纹,同时伴有裂纹偏转现象;在后面板处有小块材料脱落,脱落面积为 120.95 mm^2 ,材料脱落处附近产生了大量径向裂纹,裂纹长度比前面板更长。

2 有限元数值模拟

2.1 有限元模型的建立

利用有限元软件LS-DYNA971对仿贝壳Voronoi砖泥结构在爆炸载荷作用下的破坏模式和吸能机理进行数值模拟。如图4所示,模型由仿贝壳Voronoi砖泥结构和上、下夹具组成,硬材料采用网格尺寸为 0.5 mm 的8节点六面体实体单元(C3D8)划分,软材料采用网格尺寸为 0.5 mm 的4节点四面体实体单元(C3D4)划分,上、下夹具采用网格尺寸为 2 mm 的8节点六面体实体单元(C3D8)划分。硬材料模型采用MAT89(PLASTICITY-POLYMER),并设置 60 MPa 的失效力控制材料失效;软材料模型采用MAT269(BERGSTROM-BOYCE-RUBBER),通过失效应变(1.0)控制软材料的失效^[14]。上、下夹具采用MAT-RIGID材料模型^[10],下方夹具约束全部自由度,上方夹具约束 x 、 y 方向自由度,并且为保证夹具与砖泥结构之间不会分离,对上方夹具施加 300 kPa 压力^[20]。爆炸载荷采用LOAD-BLAST-ENHANCED施加,有限元中TNT的药量为实验中球形乳化炸药药量的 69.3% ^[23]。上、下夹具与仿贝壳Voronoi砖泥结构之间采用自动面面接触(AUTOMATIC-SURFACE-TO-SURFACE),静摩擦因数为0.2,动摩擦因数为0.1;软硬材料之间采用TIEBREAK接触(TIEBREAK-SURFACE-TO-SURFACE),失效参数为 45 MPa ^[10]。

2.2 模型验证

采用与实验相同的炸药药量进行数值模拟,模拟结果如图5所示,黄色虚线为仿贝壳Voronoi砖泥结构中出现的裂纹。由图5可知:结构试件未发生穿透;前面板出现由中心穿过硬材料向四周扩散的径向裂纹,部分径向裂纹到达中心Voronoi块边缘的软材料处停止继续扩展;后面板出现小块材料掉落和沿着软材料扩展的径向裂纹。材料脱落面积为 124.60 mm^2 ,与实验结果的相对误差为3%,验证了有限元模型的有效性和可行性。裂纹扩展和材料脱落位置的差异是由于无法避免的载荷偏移及非理想的固定边界条件造成的。

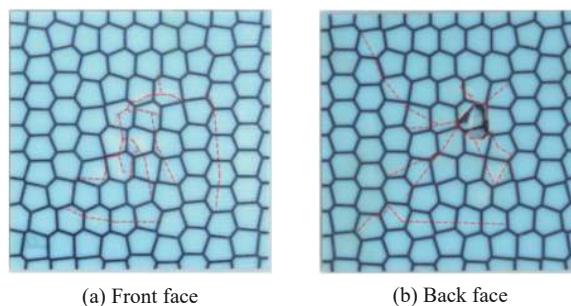


图3 爆炸实验结果

Fig. 3 Explosive experimental result

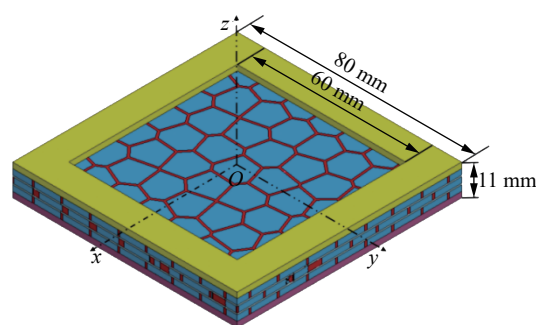


图4 仿贝壳Voronoi砖泥结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the nacre-like Voronoi brick and mortar structure

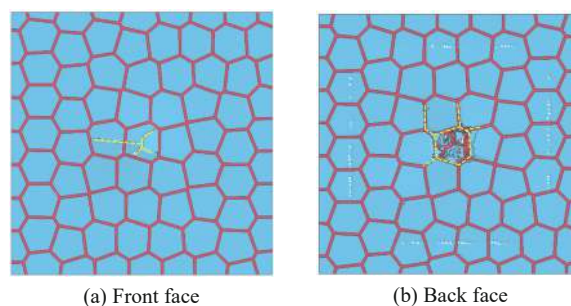


图5 试样1的数值模拟结果

Fig. 5 Simulation results of sample 1

3 结果与讨论

3.1 有限元模拟中仿贝壳 Voronoi 砖泥结构设计

共设计了 11 个仿贝壳 Voronoi 砖泥结构试样进行有限元数值模拟, 相关几何参数见表 1。试件 1~试件 4 用于研究药量对 Voronoi 砖泥结构的影响; 在此基础上, 通过改变堆叠层数设计了试件 5~试件 7; 通过改变结构中 Voronoi 单元的尺寸设计了试件 8 和试件 9; 通过改变结构层内软材料厚度设计了试件 10 和试件 11。

表 1 试样的几何参数
Table 1 Geometrical parameters of samples

Sample No.	Voronoi cell size/mm	Soft material thickness/mm	Number of plies	Mass of emulsion explosive/g	Volume fraction of soft material/%
1	10	0.8	3	40	27.3
2	10	0.8	3	20	27.3
3	10	0.8	3	30	27.3
4	10	0.8	3	50	27.3
5	10	0.8	1	40	11.9
6	10	0.8	2	40	21.7
7	10	0.8	4	40	25.4
8	14	0.8	3	40	22.8
9	18	0.8	3	40	20.1
10	10	1.2	3	40	29.9
11	10	1.6	3	40	35.5

3.2 炸药药量对结构破坏模式的影响及破坏机理

针对 3 层仿贝壳 Voronoi 砖泥结构, 通过试样 1~试件 4 的有限元模拟研究不同炸药药量对变形失效模式的影响, 模拟结果如图 6 所示。随着炸药药量的增加, 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的变形破坏模式发生了变化。药量为 20 g 时, 砖泥结构无破坏, 主要发生塑性变形; 药量增加到 30 g 时, 砖泥结构发生了破坏, 前面板和后面板开始出现径向裂纹; 药量达到 40 g 时, 前面板径向裂纹长度增长、数量增多, 后面板则出现小块材料脱落; 药量达到 50 g 时, 结构发生灾难性破坏, 中心处出现大范围贯穿脱落, 夹持端出现剪切破坏。综合上述结果, 可将结构的破坏模式分为 4 类: I 类破坏中, 结构整体无损伤, 仅发生塑性变形, 如图 6(a) 所示; II 类破坏中, 前面板未发生明显破坏, 后面板出现径向裂纹, 如图 6(b) 所示; III 类破坏中, 结构小块脱落, 夹持端未发生剪切破坏, 如图 6(c) 所示; IV 类破坏中, 结构发生贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏, 如图 6(d) 所示。

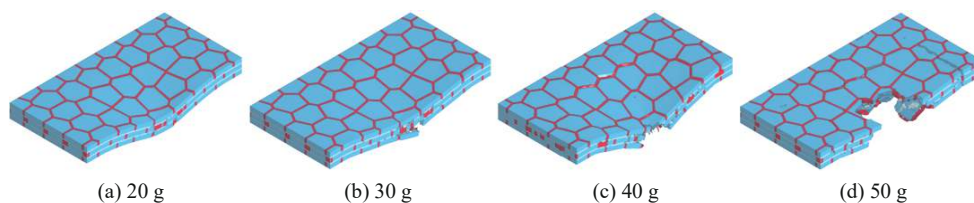


图 6 不同炸药药量下仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的破坏模式

Fig. 6 Damage modes of nacre-like Voronoi brick and mortar structure under different explosive charges

图 7 给出了试样 2 在爆炸载荷下的应力、应变云图。结构在水平方向受到正应力 σ_{xx} 、 σ_{yy} 和 σ_{zz} , 由于结构具有对称性, 图 7(a) 和图 7(b) 中仅显示了正应力 σ_{xx} 和 σ_{zz} 。由图 7(a) 可知, 结构第 1 层中的硬材

料受压应力的作用, 而第 3 层受拉应力的作用, 并且中心与夹持端的应力较大, 表明结构上下面板的中心与夹持端先达到硬材料的破坏极限, 所以炸药量继续增大后, 结构中心处发生贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏, 与前述实验结果一致。硬材料的水平正应力 σ_{xx} 大于垂直正应力 σ_{zz} , 表明爆炸过程中, 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构硬材料片剂存在 xy 平面上的相对滑动^[22]。当结构发生变形, 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构层沿水平方向相对滑动, 进而导致软材料中产生剪切应力 σ_{xz} 、 σ_{yz} 和剪切应变 ε_{xz} 、 ε_{yz} ^[22]。由图 7(c) 和图 7(d) 可知, 应变主要集中在软材料中心部位, 层间软材料的 ε_{xz} 较大。当炸药药量增加时, 破坏首先发生在软材料中心, 层间软材料会与硬材料脱粘形成分层。

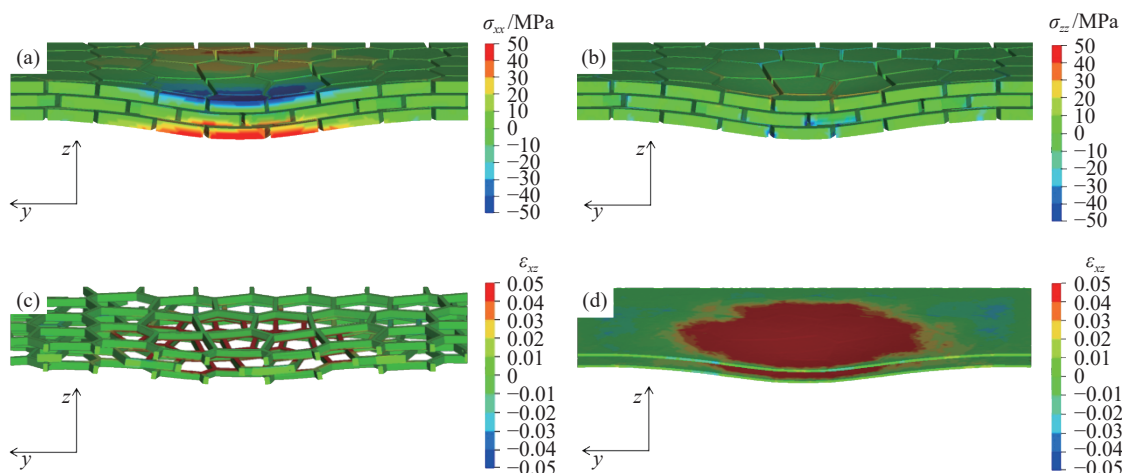


图 7 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的应力和应变云图: (a) 硬材料水平正应力, (b) 硬材料垂直正应力, (c) 层间软材料的剪切应变, (d) 层内软材料的剪切应变

Fig. 7 Stress and strain contour plots of nacre-like Voronoi brick and mortar structure: (a) horizontal normal strain of the stiff material; (b) vertical normal stress of the stiff material; (c) shear strain of the interlaminar soft material; (d) shear strain of the intralaminar soft material

3.3 堆叠层数对结构破坏模式的影响

为研究堆叠层数对仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的影响, 采用与实验一致的载荷(即乳化炸药为 40 g, 爆炸距离为 150 mm)对试样 5~试样 7 进行有限元模拟, 结果如图 8 所示。只有 1 层砖泥结构时, 结构发生贯穿型破坏, 夹持端发生剪切破坏; 当有 2 层砖泥结构时, 由于层间软材料的存在, 与单层结构时相比, 2 层结构的整体变形较大, 吸收了更多的能量; 当有 3 层砖泥结构时, 有小块结构掉落, 夹持端未发生剪切破坏, 前面板出现由中心向四周蔓延的径向裂纹; 当有 4 层砖泥结构时, 砖泥结构仅发生塑性变形。综上所述, 随着堆叠层数的增加, 结构的变形模式由开始的灾难性破坏转变为塑性变形, 结构的抗爆性能逐渐提高。

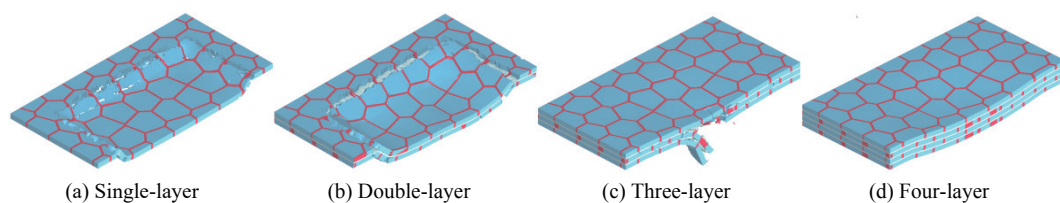


图 8 不同堆叠层数仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的破坏模式

Fig. 8 Damage modes of nacre-like Voronoi brick and mortar structure with different layer numbers

3.4 Voronoi 单元尺寸对结构破坏模式的影响

选取试样 1(单元尺寸 10 mm)为参照, 保持层内软材料厚度不变, 改变 Voronoi 单元尺寸得到试样 8(单元尺寸 14 mm)和试样 9(单元尺寸 18 mm), 研究 Voronoi 单元尺寸对其抗爆性能的影响。由图 9

可知, Voronoi 单元尺寸从 10 mm 增大到 14 mm 时, 结构中的小块材料脱落现象消失, 裂纹分布更加广泛, 且裂纹数量增多, 前后面板产生的裂纹偏转程度加大, 裂纹扩展路径增加, 出现了更大的断裂面积, 有助于提高爆炸过程中结构的吸能。当 Voronoi 单元尺寸增大到 18 mm 时, 结构中的裂纹直接穿过硬材料, 而不再只沿着胞元边界蔓延, 与文献 [20] 中的结果吻合。综上所述, Voronoi 单元尺寸对结构的抗爆性能有显著影响, 随着 Voronoi 单元尺寸增大, 结构中硬材料的体积分数增加, 使得结构整体刚性增强; 在此炸药药量下, 结构仅产生了一定数量的裂纹而不发生穿透, 抗爆性能有所增强。然而, 随着炸药药量增加, Voronoi 单元尺寸的增大会使结构发生整体脆性破坏, 从而导致结构的抗爆性能下降。

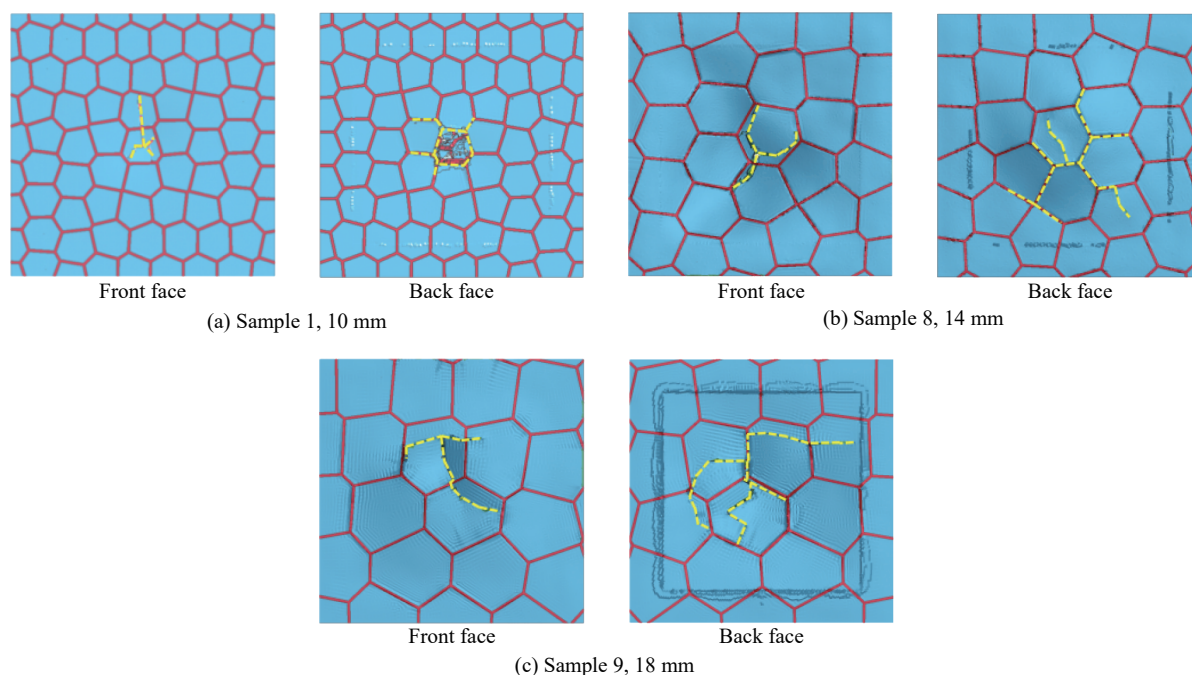
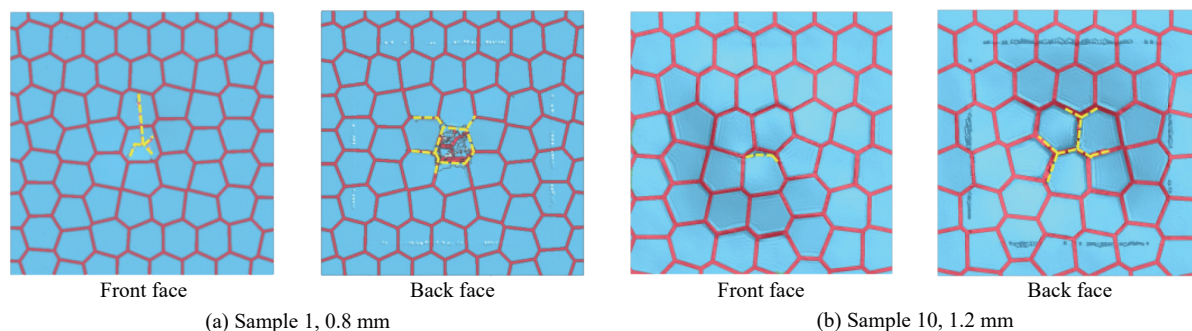


图 9 不同 Voronoi 单元尺寸试样的破坏模式

Fig. 9 Damage modes of samples with different Voronoi element sizes

3.5 层间软材料厚度对结构破坏模式的影响

选取试样 1 为参照, 将层内软材料厚度增至 1.2 和 1.6 mm, 分别得到试样 10 和试样 11, 模拟试样在爆炸载荷下的力学响应, 研究层内软材料厚度对结构抗爆性能的影响。由图 10 可知, 当层内软材料厚度由 0.8 mm 增加到 1.2 mm 时, 结构能够继续发生塑性变形, 后面板材料脱落现象消失, 前面板软材料上出现径向裂纹; 当软材料厚度增加到 1.6 mm 时, 软材料未发生破坏, 所有裂纹集中在硬材料上, 这是由于较厚的软材料“允许”更大的塑性变形, 该过程中硬材料已经达到了破坏极限, 结构承载能力降低。



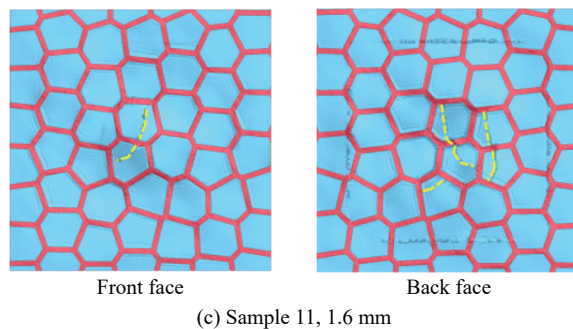


图 10 不同软材料厚度试样的破坏模式

Fig. 10 Damage modes of samples with different thickness of soft material

3.6 Voronoi 砖泥结构的吸能分析

仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的比吸能(E_{SA})为^[24]

$$E_{SA} = \frac{E_A}{M} \quad (1)$$

式中： E_A 为仿贝壳 Voronoi 砖泥结构吸收的总能量； M 为仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的质量，由于软、硬材料的密度相同，且所有结构的总体积相同，质量恒定为 0.054 kg。

为研究 Voronoi 单元尺寸、层内软材料厚度对结构各组分吸能能力的影响，分别计算了不同 Voronoi 单元尺寸、层内软材料厚度的 3 层砖泥结构在 40 g 球形乳化炸药下各部分的比吸能，结果见表 2。由表 2 可知，层间软材料的最大比吸能约为硬材料的 1.8~2.3 倍。当 Voronoi 单元尺寸增大时，软材料的体积分数从 27.3% 下降到 20.1%，其中层内软材料的比吸能上升了 45.6%，而层间软材料的比吸能上升了 2.2%，硬材料的比吸能下降了 4.4%，表明 Voronoi 单元尺寸对各组分的能量吸收有一定的影响。分析其原因发现，随着 Voronoi 单元尺寸的增大，单个 Voronoi 片剂与层间软材料的接触面积增大，当结构发生变形时，层内软材料的能量吸收增加，而 Voronoi 单元尺寸的改变对层间软材料和硬材料的吸能能力影响较弱。层内软材料的厚度从 0.8 mm 增加到 1.4 mm 的过程中，软材料的体积分数从 27.3% 增大至 34.3%，结构在爆炸载荷作用下发生了更大的塑性变形，且塑性变形主要发生在 Voronoi 砖泥结构层内，因此，层内软材料的比吸能增大了 31.1%，硬材料的比吸能增大了 11.3%，而层间软材料的比吸能下降了 9.1%，说明改变层内软材料厚度对层间软材料比吸能的影响较大。这是由于软材料的厚度增加，使得层内软材料的体积分数增加，相应的吸能呈现上升趋势。当层内软材料厚度增加到 1.6 mm 时，层内软材料厚度对结构变形的缓冲吸能作用更明显，层内软材料的比吸能增加了 5.2%，而硬材料与层间软材料的比吸能分别下降了 6.3% 和 2.5%。

表 2 不同单元尺寸、层内软材料厚度的 3 层砖泥结构各组分的比吸能

Table 2 E_{SA} of each component of 3-layer structure with different element size and soft material thickness

Cell size/mm	Soft material thickness/mm	Volume fraction of soft material/%	E_{SA} of interlaminar soft material/(J·kg ⁻¹)	E_{SA} of intralaminar soft material/(J·kg ⁻¹)	E_{SA} of stiff material/(J·kg ⁻¹)
10	0.8	27.3	138.1	37.9	63.7
12	0.8	24.6	138.5	43.5	61.6
14	0.8	22.8	138.5	44.9	61.0
16	0.8	22.1	138.5	46.2	60.9
18	0.8	20.1	141.1	55.2	60.9
10	1.0	29.6	124.6	46.5	63.0
10	1.2	29.9	124.2	47.8	65.6
10	1.4	34.3	125.6	49.7	70.9
10	1.6	35.5	122.5	52.3	66.4

4 结 论

利用 3D 打印技术制备了 3 层仿贝壳 Voronoi 砖泥结构, 并进行了爆炸实验。采用 LS-DYNA 有限元软件建立了仿贝壳 Voronoi 砖泥结构有限元模型, 模拟了爆炸载荷下仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的动态响应, 通过与实验结果对比, 验证了有限元模型的有效性。通过有限元模型研究了炸药药量、结构堆叠层数、Voronoi 单元尺寸和层内软材料厚度对结构变形破坏模式和吸能性能的影响, 得到如下主要结论。

(1) 随着药量的增加, 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构的变形模式由塑性变形变化为前后面板出现裂纹, 结构发生小块掉落, 最终发展为结构中心处大块掉落和贯穿伤害, 夹持端发生剪切破坏。

(2) 随着 Voronoi 单元尺寸的增大, 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构中径向裂纹增多, 裂纹扩展路径变长; 随着层内软材料厚度的增加, 形成了更多的径向裂纹, 耗散和吸收了更多的能量。

(3) 仿贝壳 Voronoi 砖泥结构中层间软材料的比吸能最大, 为硬材料的 1.8~2.3 倍; Voronoi 单元尺寸增加时, 层内软材料的比吸能增大; 层内软材料的厚度增加时, 层内软材料的比吸能也相应增大。

参考文献:

- [1] RKHALAF M, SUNESARA A, ASHRAFI B, et al. Toughness by segmentation: fabrication, testing and micromechanics of architected ceramic panels for impact applications [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 158: 52–65.
- [2] LIU P, ZHU D J, YAO Y M, et al. Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system [J]. *Materials & Design*, 2016, 99: 201–210.
- [3] DIMAS L S, BRATZEL G H, EYLON I, et al. Tough composites inspired by mineralized natural materials: computation, 3D printing, and testing [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(36): 4629–4638.
- [4] GRUNENFELDER L K, SUKSANGPANYA N, SALINAS C, et al. Bio-inspired impact-resistant composites [J]. *Acta Biomaterialia*, 2014, 10(9): 3997–4008.
- [5] GU G X, TAKAFFOLI M, HSIEH A J, et al. Biomimetic additive manufactured polymer composites for improved impact resistance [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2016, 9: 317–323.
- [6] BARTHELAT F. Nacre from mollusk shells: a model for high-performance structural materials [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2010, 5(3): 035001.
- [7] CORNI I, HARVEY T J, WHARTON J A, et al. A review of experimental techniques to produce a nacre-like structure [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2012, 7(3): 031001.
- [8] 赵赫威, 郭林. 仿贝壳珍珠母层状复合材料的制备及应用 [J]. *科学通报*, 2017, 62(6): 576–589.
ZHAO H W, GUO L. Synthesis and applications of layered structural composites inspired by nacre [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(6): 576–589.
- [9] GU G X, SU I, SHARMA S, et al. Three-dimensional-printing of bio-inspired composites [J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2016, 138(2): 021006.
- [10] 刘英志, 雷建银, 王志华. 冲击载荷下仿贝壳砖泥结构的动态响应 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(1): 014202.
LIU Y Z, LEI J Y, WANG Z H. Dynamic response of nacre-like brick and mortar structure under impact load [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(1): 014202.
- [11] PADOLE M, GHARDE S, KANDASUBRAMANIAN B. Three-dimensional printing of molluscan shell inspired architectures via fused deposition modeling [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(34): 46356–46366.
- [12] YADAV R, GOUD R, DUTTA A, et al. Biomimicking of hierarchal molluscan shell structure via layer by layer 3D printing [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(32): 10832–10840.
- [13] WU K J, ZHENG Z J, ZHANG S S, et al. Interfacial strength-controlled energy dissipation mechanism and optimization in impact-resistant nacreous structure [J]. *Materials & Design*, 2019, 163: 107532.
- [14] GU G X, TAKAFFOLI M, BUEHLER M J. Hierarchically enhanced impact resistance of bioinspired composites [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(28): 1700060.
- [15] WU X D, MENG X S, ZHANG H G. An experimental investigation of the dynamic fracture behavior of 3D printed nacre-like composites [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, 112: 104068.
- [16] RITCHIE R O. The conflicts between strength and toughness [J]. *Nature Materials*, 2011, 10(11): 817–822.

- [17] TRAN P, NGO T D, GHAZLAN A, et al. Bimaterial 3D printing and numerical analysis of bio-inspired composite structures under in-plane and transverse loadings [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 108: 210–223.
- [18] WU K J, SONG Y H, ZHANG X, et al. A prestressing strategy enabled synergistic energy-dissipation in impact-resistant nacre-like structures [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(6): 2104867.
- [19] WANG J, HU D Y, ZHANG Z Q, et al. Anti-impact performance of bionic tortoiseshell-like composites [J]. *Composite Structures*, 2023, 303: 116315.
- [20] KO K, JIN S, LEE S E, et al. Impact resistance of nacre-like composites diversely patterned by 3D printing [J]. *Composite Structures*, 2020, 238: 111951.
- [21] KO K, LEE S, HWANG Y K, et al. Investigation on the impact resistance of 3D printed nacre-like composites [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 177: 109392.
- [22] WEI Z Q, XU X H. Gradient design of bio-inspired nacre-like composites for improved impact resistance [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 215: 108830.
- [23] 李志洋, 雷建银, 刘志芳. 爆炸载荷下仿贝壳结构的动态响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(8): 083101.
LI Z Y, LEI J Y, LIU Z F. Dynamic response of nacre-like structure under explosion load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(8): 083101.
- [24] CHEN B C, ZOU M, LIU G M, et al. Experimental study on energy absorption of bionic tubes inspired by bamboo structures under axial crushing [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 115: 48–57.

Dynamic Response of Nacre-Like Voronoi Brick and Mortar Structure under Explosive Load

CHEN Xinkang, LI Zhiyang, LEI Jianyin, LIU Zhifang

(*Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China*)

Abstract: Inspired by the brick and mortar structure of multi-scale and multi-hierarchy, a nacre-like Voronoi brick and mortar structure was created. Afterwards, the dynamic response of nacre-like Voronoi brick and mortar structure under explosive load was explored by combining 3D printing, explosion experiments, and numerical simulations. The influence of the Voronoi unit cell size and the thickness of the intralaminar soft material on the damage mode as well as the energy absorption of the structure was analyzed. Under the spherical emulsion explosive charge of 40 g, the radial cracks appeared on the front face of the nacre-like Voronoi brick and mortar structure and then spread around, while small pieces of fragments fell off the back panel. A finite element model was built and showed good agreement with the experimental results. The damage modes of nacre-like Voronoi brick and mortar structures under different explosive charges include plastic deformation, cracks occurred on the front and back face, small pieces of material falling off, damage of whole structure accompanied with shear failure at the gripper end. The horizontal normal stress of the stiff material is much larger than the vertical normal stress. Meanwhile, the shear strain in the interlaminar soft material is much larger than that in the intralaminar soft material. The specific energy absorption is 1.8–2.3 times larger in the interlaminar soft material than that in the stiff material. With the increase of the Voronoi unit cell size, the specific energy absorption of the interlaminar soft material increases by 45.6%. As the thickness of the intralaminar soft material increases, the specific energy absorption of the intralaminar soft material increases by 31.1%. This study may provide some definite reference for the design of biologically inspired structures.

Keywords: nacre-like Voronoi brick and mortar structure; explosion test; dynamic response; specific energy absorption