

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0145

爆炸载荷下仿贝壳结构的动态响应*

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: 贝壳珍珠层是一种具有高强度和高韧性的天然材料, 这种优异的性能主要来源于多尺度、多层级的“砖泥”结构。本文受贝壳特殊结构的启发, 构建了仿贝壳砖泥结构的有限元模型, 并进行了爆炸实验。通过实验发现: 在爆炸冲量为 0.047 N·s 时, 试件发生灾难性破坏, 使得中心处发生掉落, 且伴随着试件夹持端的剪切破坏, 与数值模拟结果具有良好的一致性。在实验基础上, 对仿贝壳砖泥结构在爆炸载荷下的动态响应进行了数值模拟。研究发现, 在爆炸载荷下仿贝壳砖泥结构会产生五种不同的破坏模式, 包括: I, 结构整体无损伤; II, 结构前表面无明显破坏, 后表面发生破坏; III, 结构发生掉落型贯穿破坏, 夹持端无剪切破坏; IV, 结构发生小块掉落型贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏; V, 结构发生大块掉落型贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏。并且给出了不同破坏模式的临界阈值, 单层砖泥结构的破坏阈值为 0.019 N·s, 五层砖泥结构的破坏阈值为 0.047 N·s, 当冲量超过破坏阈值时, 试件发生灾难性破坏。研究分析了堆叠层数对仿生结构的力学响应, 在同一冲量下, 随着层数的增加, 结构的破坏模式发生改变, 由贯穿型破坏逐渐变为仅发生一定塑性变形。随着层数增加, 结构的损伤阈值增加。最后提出仿贝壳砖泥结构的增韧机理主要有裂纹偏转和微裂纹。

关键词: 砖泥结构; 爆炸载荷; 有限元模拟; 增韧机理

中图分类号: O342

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Dynamic response of nacre-like structure under explosion load

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: Shell nacre is a nature material with high strength and toughness, and the excellent performance is mainly derived from multi-scale, multi-hierarchy with “brick and mortar” structure. Inspired by the special structure of shell, a finite element model of nacre-like brick and mortar structures was created and the explosion experiment was carried out. In the experiment, the sample was destroyed catastrophically at the explosion impulse of 0.047 N·s, with the fall of the center. Additionally, shear failure existed around the clamping end of the specimen, which is in good agreement with the numerical simulation results. On this basis, the dynamic response of nacre-like brick and mortar models under explosive load was explored. Five different failure modes were analyzed, including: mode I, inelastic deformation without damage; mode II, partial damage with damage in the back surface; mode III, through-wall failure in the center of specimen; mode IV, through-wall failure in the center of specimen and shear failure at the clamping end; mode V, devastating damage with large drop through in the center and shear failure. The thresholds critical of different failure modes were obtained based on the simulation results. The threshold value for the one-layer brick and mortar structure was 0.019 N·s, and this value increased to 0.047 N·s

* 收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(11902215)

第一作者: 李志洋(1996—), 男, 硕士, lizhiyang365@163.com

通信作者: 雷建银(1989—), 男, 博士, leijianyin@tyut.edu.cn

for the five-layer brick and mortar structure. When the impulse exceeds the threshold value, catastrophic damage occurs. The effects of the number of stacked layers on the response of the brick and mortar models were analyzed. With the increase of the number of stacked layers, the failure mode of the structure changes from devastating damage to inelastic deformation. Additionally, the threshold value for brick and mortar structure under explosion load increased with the increase of the number of stacked layers. Finally, the toughening mechanism of nacre-like brick and mortar structure was given, including crack deflection and microcrack.

Keywords: brick and mortar structure; explosion load; finite element simulation; toughening mechanism

生物体经过亿万年的进化,经历了自然选择和优胜劣汰,进化出独特的多尺度和多层次微观结构,并且具有优异的综合性能,如骨骼、贝壳、竹子、树干等^[1-3]。从天然生物材料独特的宏微观结构获得灵感,对人工合成材料的设计有重要的指导和启示意义。

贝壳珍珠层是一种具有高强度和高韧性的天然材料,这种优异的性能主要来源于文石片与有机基质层自下而上堆砌而形成的多尺度、多层次的“砖泥”结构^[4-5]。珍珠层文石片与有机基质的交替排列是其高强度、高韧性的关键,其强韧化机制主要包括裂纹偏转^[6]、文石片拔出^[7]和有机质桥接^[8],许多学者开展了对其“砖泥”结构的研究。Yin 等^[9]制备出模仿珍珠质“砖和砂浆”排列的夹层玻璃,在保持透光率和高强度基本不变的同时,其抗冲击能力比夹胶玻璃和钢化玻璃提高了 2~3 倍。Nguyen-Van 等^[10]设计了不同类型的仿贝壳珍珠层波状层合板,并通过数值模拟研究其在爆炸载荷下的破坏模式,发现纤维/乙烯酯的波状层合板的抗爆性能要远优于平面复合材料板。Jia 等^[11]通过层压的方法生产出类贝壳珍珠层的氧化石墨烯基块体,研究结果表明,不同载荷下结构的界面载荷传递和失效模式将发生改变,随着压力的增加,复合材料由渐进破坏转变为灾难性破坏。Tan 等^[12]研究了基于生物灵感的类珍珠层陶瓷聚合物复合材料在循环压缩下的疲劳行为和损伤机制,研究发现仿生结构的破坏体现出阶梯状断裂行为,能够有效的提高其断裂韧性。武晓东等^[13]建立了一种仿贝壳珍珠层的铝/乙烯基复合材料的三维 Voronoi 有限元模型,并研究其在冲击载荷下的动态响应。结果表明,与规则图形相比, Voronoi 模型有着更好的力学性能和能量吸收。

近 20 年来,增材制造技术取得了快速的发展,这种技术可以快速而精密地制造出任意形状的零件,解决许多过去难以制造的复杂结构零件的成型,同时能更好的契合多材料结构制备需求。Liu 等^[14]受红鲍鱼层状结构的启发,利用多材料 3D 打印构建了层状和非层状类珍珠晶复合材料试样,并进行拉伸和三点弯曲断裂试验,发现层状非层状珍珠状复合材料的刚度、强度和韧性分别提高了 55%、143% 和 176%。马骁勇等^[15]利用光固化 3D 打印技术制备了仿贝壳复合材料,采用准静态拉伸试验和有限元模拟相结合的方法研究了文石片长宽比与材料弹性模量间的关系,研究发现材料微观排布对宏观力学性能及破坏模式有很大的影响。刘英志等^[16]构建了仿贝壳砖泥结构有限元模型,研究了其在落锤冲击载荷下的动态响应,研究结果表明三层仿贝壳砖泥结构具有最大比吸能,且冲击速度、锤头类型均对其力学性能有很大的影响。Gu 等^[17]通过增材制造模仿了三维海螺壳结构,并通过落锤实验和有限元方法研究其抗冲击性能,结果表明,与单层结构和单一刚性结构相比,添加第二层交叉层状结构可以分别提高 70% 和 85% 的冲击性能。Jia 等^[18]利用 3D 打印制造了仿生架构梁,通过动态三点弯曲试验发现其动态性能远远超过其组成成分,同时依据实验结果设计了多种仿生混合梁,进一步提高了柔性、强度和韧性等。Ko 等^[19]通过 3D 打印设计并制造了 Voronoi 图类似珍珠的层状复合材料,并进行了三点弯曲试验,结果表明结构的吸能比单一材料结构大 11%。对于仿贝壳砖泥结构,多数研究集中在静态拉压和动态三点弯,而对于其在高应变率和爆炸载荷下的动态响应研究较少。

本文基于天然贝壳珍珠层砖泥排列的结构特点,构建仿贝壳砖泥结构的有限元模型,利用 LS-DYNA 有限元软件模拟其在爆炸载荷下的动态力学响应,通过爆炸实验验证有限元模型的有效性,重点研究堆叠层数、爆炸冲量对仿贝壳砖泥结构的影响,并且探讨其增韧机理。

1 几何模型和材料参数

本文所构建的仿贝壳砖泥结构, 与刘英志等^[16]所构建的结构类似: 首先, 建立单层砖、泥的单胞模型, 如图 1 所示, 其中绿色为仿贝壳砖泥结构对应的“砖”结构, 其大小为 1 mm 正方体, 紫色为仿贝壳砖泥结构对应的“泥”结构, 其厚度为 0.1 mm; 随后将其组装在一起得到单层仿贝壳砖泥结构的胞元尺寸为 2.2 mm×2.2 mm×1.0 mm。对于多层仿贝壳砖泥结构来说, 相邻每层之间均为对中排布, 相隔两层结构相同, 并且层与层间均排布 0.1 mm 的泥材料。以三层单胞模型为例, 其胞元尺寸为 2.2 mm×2.2 mm×3.2 mm。将单胞模型沿面内两方向阵列得到仿贝壳砖泥结构的整体模型, 其平面尺寸为 100 mm×100 mm, 如图 2 所示。本文研究 1~5 层的仿贝壳砖泥结构在动态载荷下的力学响应, 探索层数对仿贝壳砖泥结构的影响。

天然贝壳珍珠层是一种多材料结构, 其结构是由体积分数较大的无机相碳酸钙(砖材料)及体积分数较小的有机基质(泥材料)组成, 其中无机相碳酸钙是一种强度高但非常脆的材料, 而有机质是一种可塑性好的材料。VeroWhite Plus 弹性模量较大, 而且具有较大的承载能力用以替代生物材料的无机相, 以弹性模量较小且可变形能力好的 Tango Plus 材料替代有机基质^[16-17]。

2 实验及有限元验证

2.1 实验结构及装置

使用 3D 打印机打印了堆叠层数为 5 的仿贝壳砖泥结构(如图 3 和图 4 所示), 尺寸为 100 mm×100 mm×5.4 mm。本文研究了其在爆炸载荷下的力学响应, 爆炸实验装置如图 4 所示, 炸药为球形硝酸铵炸药, 炸

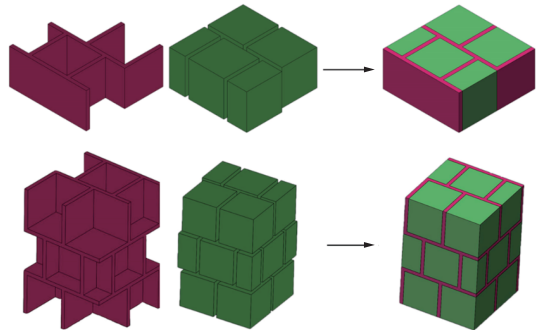


图 1 仿贝壳砖泥结构的单层和多层胞元建模
Fig. 1 Single-layer and multi-layer cell construction process of nacre-like brick and mortar structure

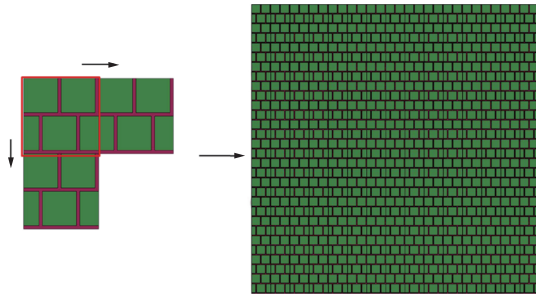


图 2 仿贝壳砖泥结构整体建模
Fig. 2 Overall model building processes of nacre-like bricks and mortar structures

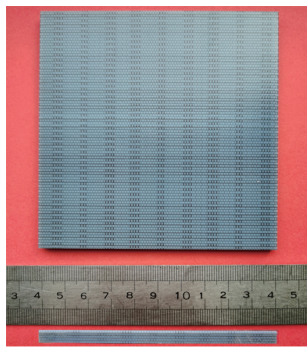


图 3 五层仿贝壳砖泥结构实验样品
Fig. 3 Front view of the five-layer nacre-like brick and mortar structure experimental piece

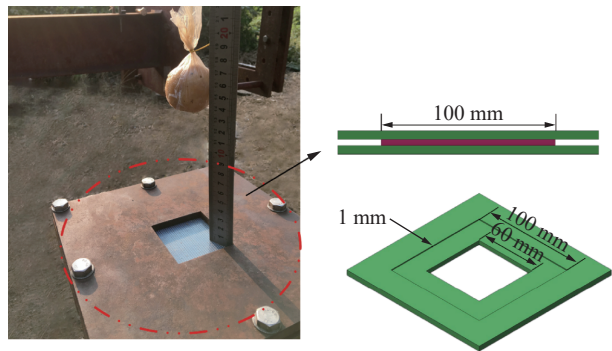


图 4 爆炸实验装置
Fig. 4 Explosion experimental device

药中心距离试件中心 150 mm, 试样被两块盖板夹持在中间, 夹持的宽度为 20 mm, 上下盖板内测均有 1 mm 的凹槽, 这使得试件可以更好地被固定, 而后通过 8 个螺栓将上下盖板及试件紧固在固定支架上, 实验过程中试件的受载面积为 60 mm×60 mm。

2.2 有限元模型

采用有限元软件 LS-DYNA 建立仿贝壳砖泥结构进行有限元分析, 为了节约模拟计算时间, 采用 1/4 模型进行计算。仿贝壳结构有限元模型尺寸为 40 mm×40 mm×5.4 mm, 夹持板的宽度为 10 mm, 厚度为 4 mm, 模型的有效作用载荷尺寸与实验中一致, 为 30 mm×30 mm。图 5 为有限元模型, 其中硬质和软质材料采用 C3D8 实体单元, 网格大小为 0.25 mm, 值得注意的是, 层间软材料厚度为 0.1 mm, 在保持其面外厚度为 0.1 mm 的同时, 将其面内尺寸设置为 0.25 mm; 对于上下夹持板也采用 C3D8 实体单元, 网格大小

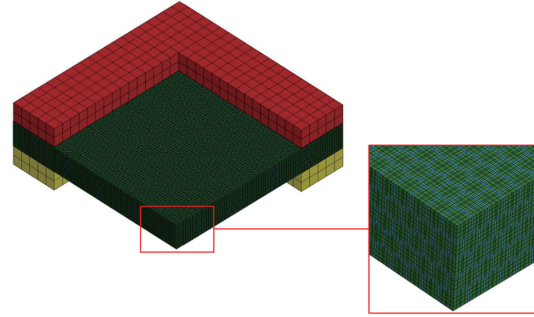


图 5 有限元模型

Fig. 5 Diagram of FE model

分别为 2 mm。分别采用 MAT 89 (PLASTICITY-POLYMER) 和 MAT 269 (BERGSTROM-BOYCE-RUBBER) 来模拟生物材料中硬、软质材料, 并且分别采用失效力、失效应变来控制其失效; 选用 MAT 20 (RIGID) 来模拟夹持夹板^[16]。有限元模拟中, 采用 LOAD-BLAST-ENHANCED 施加爆炸载荷, 有限元中 TNT 的药量为实验中硝酸铵乳化炸药药量乘以 0.693^[20]。对上下夹持板与软硬材料整体间采用 AUTOMATIC-SURFACE-TO-SURFACE 接触, 其中静摩擦因数为 0.2, 动摩擦因数为 0.1。软硬材料之间采用 TIEBREAK-SURFACE-TO-SURFACE 接触, 其失效参数为 45 MPa。软硬材料整体设置了 AUTOMATIC-SINGLE-SURFACE 和 ERODING-SINGLE-SURFACE 接触来保证计算的收敛性。

2.3 模型验证

图 6 为 TNT 炸药药量为 14 g 下 (实验中硝酸铵乳化炸药药量为 20 g) 实验结果与有限元模拟结果图。从实验结果来看, 仿贝壳砖泥结构在中心处断裂, 发生了灾难性破坏, 使得中心处发生掉落; 而且试件夹持端四周均存在剪切破坏。在有限元数值模拟中, 在试件中心处发生灾难性的掉落破坏, 在夹持端发生明显的剪切破坏。在实验中, 结构中心处掉落尺寸约为 45.5 mm×33.7 mm, 剪切端破坏长度为 42.1 mm; 在 1/4 有限元模拟中, 结构中心处掉落尺寸为 18.5 mm×13.5 mm, 且夹持板夹持处存在剪切裂纹, 长度为 21.4 mm, 从而说明有限元结果的有效性。

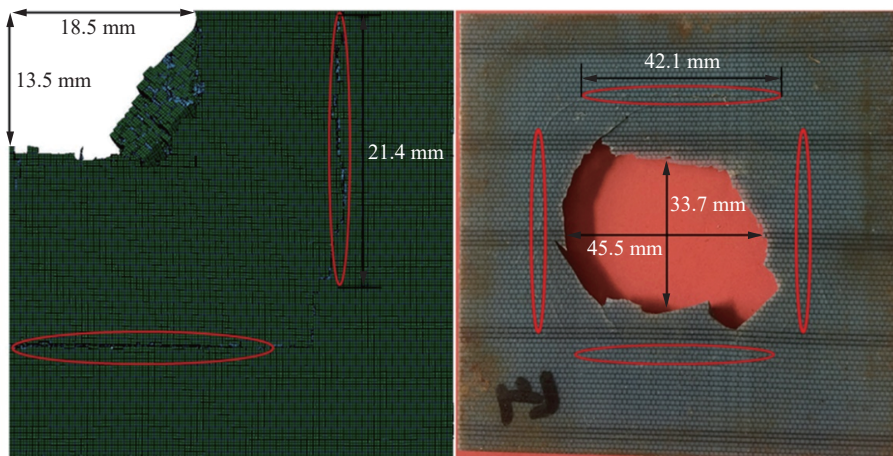


图 6 试验与数值模拟结果图

Fig. 6 Test and numerical simulation results

图 7 给出了五层仿贝壳砖泥结构模型在 TNT 炸药药量为 14 g 情况下的能量曲线, 伪应变能 (Hourglass Energy) 只占总能量的 3.6%, 而外力做功大于系统的内能与系统动能之和, 这是由于在有限元模拟过程中材料加入破坏准则使得网格删除而导致能量的损耗。

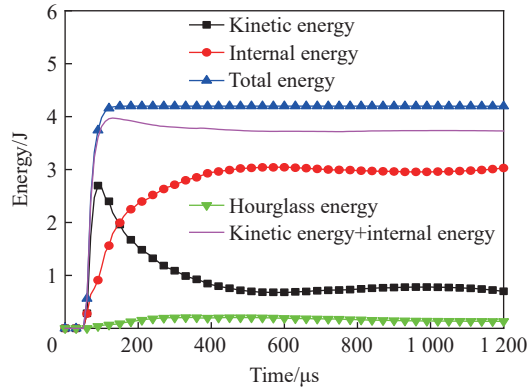


图 7 冲击波作用能量时程

Fig. 7 History of shock wave energy

3 结果与讨论

3.1 破坏模式

冲量作为冲击波的基本参数, 超压 (Δp)-时间 (t) 关系曲线所包含的面积称为冲击波比冲量 i_m , 根据萨多夫斯基^[21] 理论:

$$i_m = \begin{cases} \int_0^t \Delta p(t) dt = A^{**} \sqrt[3]{W^2}/R & \bar{R} > 0.5 \\ 15W/R^2 & \bar{R} < 0.25 \end{cases} \quad (1)$$

式中: A^{**} 为常数, $34 \leq A^{**} \leq 36$; W 为炸药质量, kg; R 为炸药与试件的距离, m; $\bar{R} = R/\sqrt[3]{W}$ 。

为了研究仿贝壳砖泥结构在不同药量下破坏模式, 分别对五层仿贝壳砖泥结构在 TNT 炸药药量为 3.5、7、8.75、10.5、14 g, 冲量分别为 0.019、0.030、0.035、0.039、0.047 N·s 时进行数值模拟, 通过数值模拟结果发现, 不同药量下仿贝壳砖泥结构的破坏模式可以分为如下 5 种, 分别为:

- I, 结构整体无损伤, 仅发生塑性形变, 如图 8 所示;
- II, 结构前表面无明显破坏, 后表面发生破坏, 如图 9 所示;
- III, 结构发生掉落型贯穿破坏, 夹持端无剪切破坏, 如图 10 所示;
- IV, 结构发生小块掉落型贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏, 如图 11 所示;
- V, 结构发生大块掉落型贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏, 如图 12 所示。

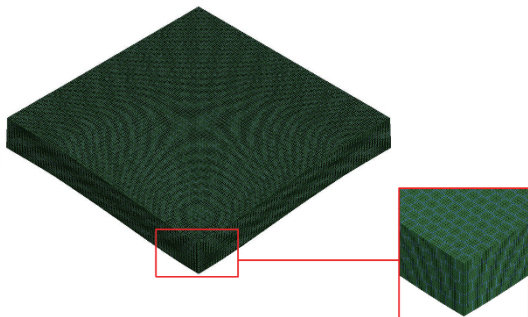


图 8 失效模式 I, 非弹性形变

Fig. 8 Failure mode I, inelastic deformation

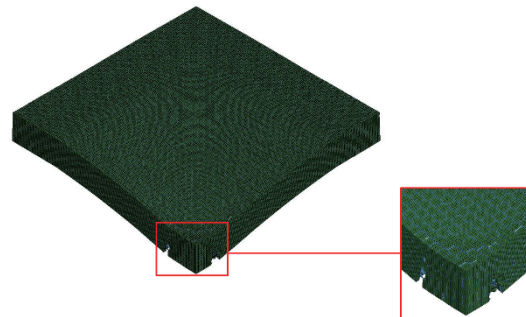


图 9 失效模式 II, 局部损伤

Fig. 9 Failure mode II, partial damage

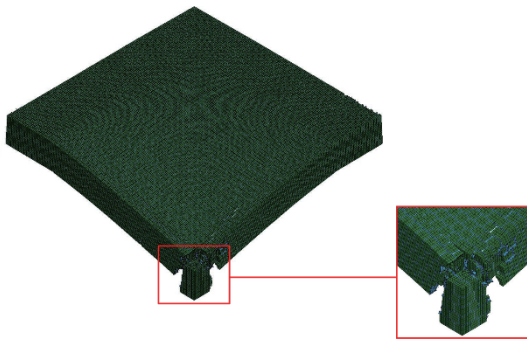


图 10 失效模式 III, 贯穿损伤

Fig. 10 Failure mode III, through-wall damage

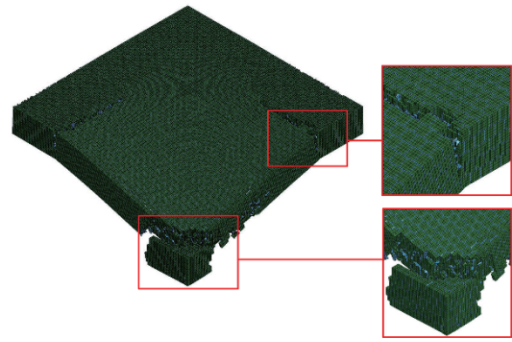


图 11 失效模式 IV, 贯穿及剪切损伤

Fig. 11 Failure mode IV, through-wall and shear damage

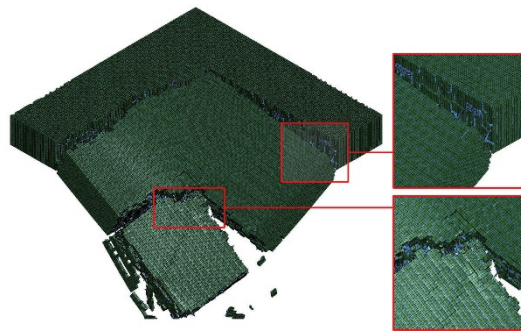


图 12 失效模式 V, 破坏式损伤

Fig. 12 Failure mode V, devastating damage

研究发现,随着爆炸冲量的增加,结构破坏模式也随之改变。当冲量小于 $0.019 \text{ N}\cdot\text{s}$, 结构无破坏, 仅发生一定的形变, 随着炸药药量不断地增加, 结构开始发生破坏, 当冲量大于 $0.030 \text{ N}\cdot\text{s}$, 结构会发生一定的损伤, 其承载能力会降低。当冲量大于 $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$, 结构发生毁灭性损伤, 造成其承载力的消失。

图 13 和图 14 分别显示了冲量为 $0.030 \text{ N}\cdot\text{s}$ 以及 $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$ 时五层砖混结构的应力云图。如图 13 所示, 在 $t=70 \mu\text{s}$ 时, 爆炸冲击波传递至面板中心, 为典型的球形波。 $t=90 \mu\text{s}$ 时, 应力波传递至夹持板固定处, 由于试件的厚度相比于试件的长度不能忽略, 因此试件后面板应力波到达夹持处时间要迟于前面板。当 $t=260 \mu\text{s}$ 时, 后面板中心处硬材料应力值达到破坏阈值, 结构在后面板中心处发生拉伸破坏, 而结构在夹持端并未达到破坏极限。随着冲量继续增加, 当冲量达到 $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$ 时, 如图 14 所示, $t=60 \mu\text{s}$ 时, 爆炸冲击波传递至面板中心, $t=70 \mu\text{s}$ 时, 应力波传递至夹持板固定处, $t=300 \mu\text{s}$ 时, 试件中心以及夹持端处硬材料应力值达到破坏阈值, 因此在试件的中心处发生破坏, 夹持端发生剪切破坏。

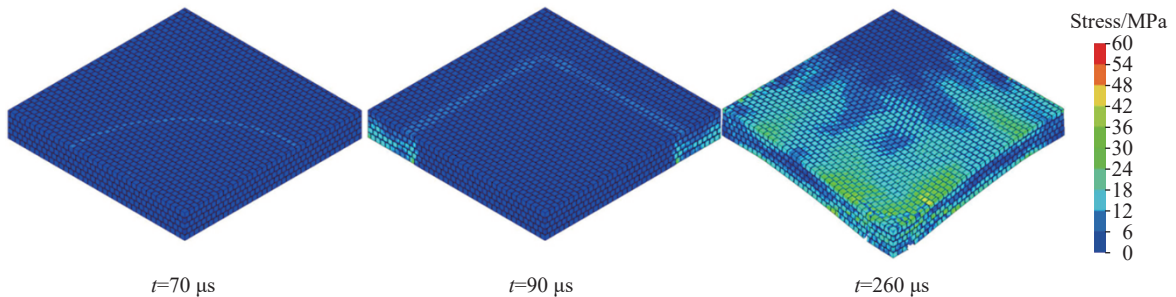


图 13 五层结构在冲量 $0.030 \text{ N}\cdot\text{s}$ 下的有效应力分布

Fig. 13 Distribution of effective stress of five-layer structure under impulse of $0.030 \text{ N}\cdot\text{s}$

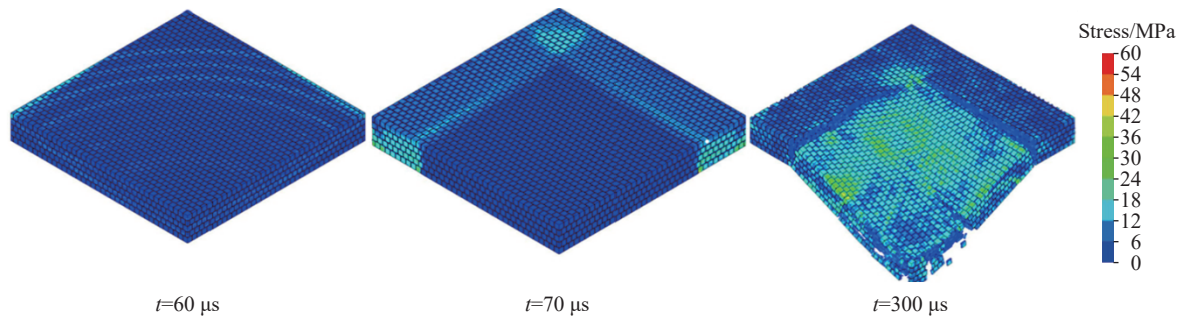


图 14 五层结构在冲量 0.047 N·s 下的有效应力分布

Fig. 14 Distribution of effective stress of five-layer structure under impulse of 0.047 N·s

3.2 层数影响

为研究层数对仿贝壳砖泥结构的影响, 分别对 1~5 层的仿贝壳砖泥结构在冲量 0.019 N·s 下进行了有限元模拟。从图 15 中可以发现, 层数对破坏模式的影响很大, 单层试件破坏模式为 V 型: 结构发生大块掉落型贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏; 双层试件破坏模式为 IV 型: 结构发生小块掉落型贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏; 三层试件的破坏模式为 III 型: 结构发生掉落型贯穿破坏, 夹持端无剪切破坏, 四层试件的破坏模式为 II 型: 结构前表面无明显破坏, 后表面发生破坏; 五层试件的破坏模式为 I 型: 结构整体无损伤, 仅发生塑性形变。可以发现在相同的冲量下, 随着堆叠层数的增加, 结构的破坏模式由开始的灾难性破坏到只发生一定变形, 结构的抗爆性能随着层数的增加有显著的提升; 同时发现, 在一定炸药药量下, 随着堆叠层数的增加, 结构的后面板挠度逐渐减小。

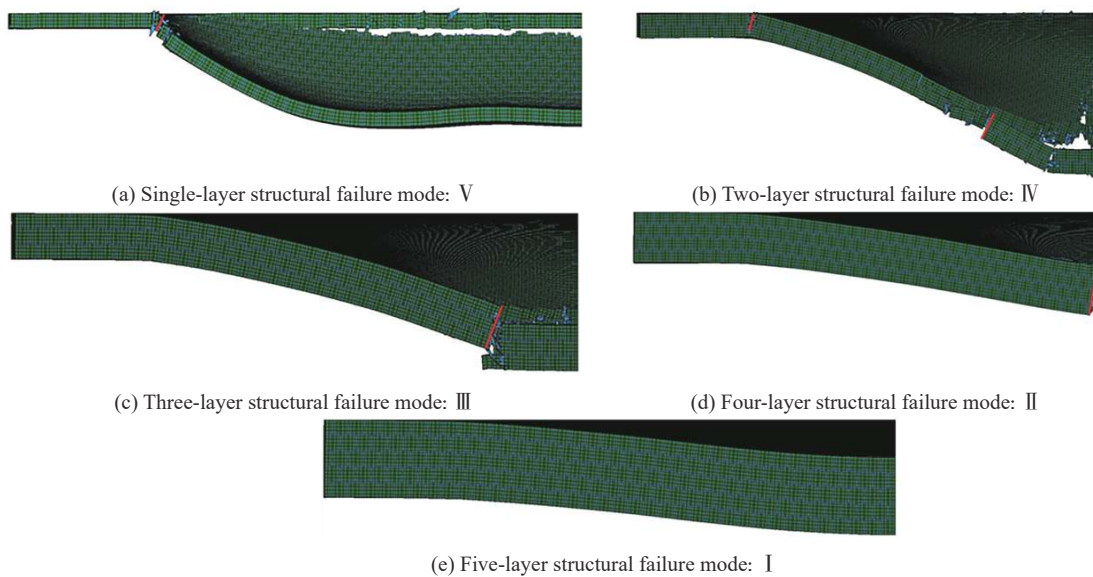


图 15 不同堆叠层数的破坏模式图

Fig. 15 Failure modes at different stacking layers

为了比较不同层数的仿贝壳砖泥结构在不同药量下的动态响应结果, 分别对不同层数的仿贝壳砖泥结构在冲量为 0.019、0.030、0.035、0.039 和 0.047 N·s 下进行数值模拟, 并分析其破坏模式。其结果如表 1 所示,

根据不同层数的仿贝壳砖泥结构在不同炸药药量下的动态响应结果来看, 当结构的破坏模式到达 V 型时, 认为结构不能承载。在同一冲量下, 随着层数的增加, 结构的破坏模式发生改变, 例如: 在冲量

为 $0.019 \text{ N}\cdot\text{s}$ 时, 1~5 层结构的破坏模式分别呈现 V 型、IV 型、III 型、II 型、I 型。在同一层数下, 随着冲量的增加, 结构的破坏模式增加, 例如: 当结构为 5 层时, 随着冲量由 $0.019 \text{ N}\cdot\text{s}$ 增加到 $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$ 时, 结构的破坏模式从开始的 I 型破坏, 逐步演变为 V 型破坏。而且当层数增加时, 结构的损伤阈值增加, 例如: 单层结构在冲量达到 $0.019 \text{ N}\cdot\text{s}$ 时不能承载, 三层结构在冲量达到 $0.035 \text{ N}\cdot\text{s}$ 时不能承载, 五层结构在冲量达到 $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$ 时不能承载。值得注意的是, 随着药量或冲量的增加, 其破坏模式均是夹持端发生更严重的剪切破坏, 结构中心发生大块掉落型贯穿破坏, 不会出现其他的破坏模式。

3.3 增韧机制

贝壳是组织高度分级的复合结构, 它独特的结构有利于引导裂纹沿结构单元界面在三维方向上扩展来消散裂纹能量, 在保持硬度和强度的同时, 具有非常好的韧性。

(1) 裂纹偏转

裂纹偏转是贝壳珍珠层中最常见的一种裂纹扩展现象, 裂纹首先沿着无机相组织间的有机层扩展一段距离, 然后发生偏转, 或者转移到相邻其他有机层中扩展, 或者穿过无机相, 再转移到另一有机层中扩展。这种裂纹的频繁偏转必然造成扩展途径的延长, 从而吸收更多的能量, 并且当裂纹从一个利于裂纹发展的方向转向另一个不利于裂纹发展的方向扩展时, 将导致扩展阻力的明显增加^[22]。

如图 16 所示, 五层结构在冲量 $0.039 \text{ N}\cdot\text{s}$ 下的破坏模式图, 裂纹偏转主要发生在软硬材料的结合面, 在面内方向和面外方向, 裂纹先是硬材料的界面扩展, 在到达硬材料胞元的端面时, 裂纹突然发生 90° 转向, 沿着硬材料胞元另一个垂直方向上的界面继续扩展, 在遇到邻近的硬材料胞元时, 裂纹继续转向, 在结构表面形成锯齿形的扩展路径。

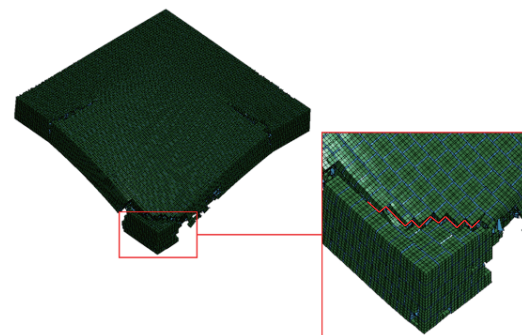
(2) 微裂纹

微裂纹的增韧机理为通过微裂纹的形成来分散主裂纹尖端能量从而提高了材料韧性。即微裂纹在扩展和形成新的微裂纹过程中消耗部分能量, 而达到宏观增韧效果。对于仿贝壳砖泥结构, 可以发现微裂纹主要集中在后面板。如图 17 所示, 五层结构在冲量 $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$ 下的结构损伤, 由于珍珠质独特的“砖和砂浆”结构, 软硬材料结合的界面比较薄弱, 在外力的作用下, 这些界面会开裂, 形成主裂纹而产生破坏, 而在

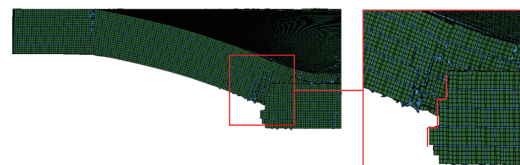
表 1 不同层级结构在不同药量下的动态响应

Table 1 Dynamic response of structure with different layers to different explosive charges

冲量/(N·s)	1 layer	2 layers	3 layers	4 layers	5 layers
0.019	V	IV	III	II	I
0.030	V	V	IV	III	II
0.035	-	V	V	IV	III
0.039	-	-	V	V	IV
0.047	-	-	-	V	V



(a) Diagram of in-plane crack deflection



(b) Diagram of out of plane crack deflection

图 16 5 层结构在冲量 $0.039 \text{ N}\cdot\text{s}$ 下的裂纹偏转

Fig. 16 Crack deflection of five-layer structure under impulse of $0.039 \text{ N}\cdot\text{s}$

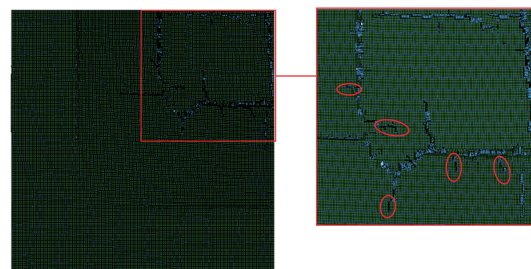


图 17 五层结构在冲量 $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$ 下的微裂纹

Fig. 17 Microcracks of five-layer structure under impulse of $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$

主裂纹周围萌生了许多微裂纹, 这些微裂纹耗散了更多的能量, 使得仿贝壳砖泥结构拥有了很好的韧性。

4 结 论

受贝壳生物材料优异力学性能启发, 构建了仿贝壳砖泥结构的有限元模型, 利用 LS-DYNA 有限元软件模拟了其在爆炸载荷下的动态力学响应, 而后将有限元数值模拟结果与爆炸试验结果进行了对比, 验证了有限元模型的有效性。在此基础上, 对于仿贝壳砖泥结构进行了不同冲量和不同层数下的爆炸数值模拟, 主要结论如下。

(1) 对于五层仿贝壳砖泥结构在不同药量下的数值模拟结果可以发现, 试件的破坏主要由试件中心掉落和四周夹持端试件剪切破坏组成。结构的破坏模式可以分为 5 种情况: I, 结构整体无损伤; II, 结构前表面无明显破坏, 后表面发生破坏; III, 结构发生掉落型贯穿破坏, 夹持端无剪切破坏; IV, 结构发生小块掉落型贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏; V, 结构发生大块掉落型贯穿破坏, 夹持端发生剪切破坏。

(2) 详细的分析了层数对的仿贝壳砖泥结构在动态载荷下力学响应的影响。随着层数的增加, 在同一冲量为 $0.019 \text{ N}\cdot\text{s}$ 时, 试件的破坏模式由单层的 V 型大块掉落型贯穿破坏, 逐渐降低为五层的 I 型仅发生一定塑性变形。五层砖泥结构的破坏阈值为 $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$, 当冲量超过 $0.047 \text{ N}\cdot\text{s}$ 时, 试件发生灾难性破坏。

(3) 研究发现材料微观结构对仿生材料的宏观力学性能有很大的影响, 仿贝壳砖泥结构的增韧机制主要有裂纹偏转和微裂纹。但是由于本文的局限性, 缺乏对这两种增韧机理的定量描述, 这也是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] LIU Z Q, MEYERS M A, ZHANG Z F, et al. Functional gradients and heterogeneities in biological materials: design principles, functions, and bioinspired applications [J]. *Progress in Materials Science*, 2017, 88: 467–498. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.04.013.
- [2] JIA Z A, YU Y, WANG L F. Learning from nature: use material architecture to break the performance tradeoffs [J]. *Materials & Design*, 2019, 168: 107650. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107650.
- [3] 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.
- [4] JI B H, GAO H J. Mechanical properties of nanostructure of biological materials [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, 52(9): 1963–1990. DOI: 10.1016/j.jmps.2004.03.006.
- [5] CHEN P Y, LIN A Y M, LIN Y S, et al. Structure and mechanical properties of selected biological materials [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2008, 1(3): 208–226. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2008.02.003.
- [6] 侯东芳, 周根树, 郑茂盛. 贝壳珍珠层断裂过程的原位观察及其增韧机制分析 [J]. *材料科学与工程学报*, 2007, 25(3): 388–391. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2812.2007.03.016.
HOU D F, ZHOU G S, ZHENG M S. In situ SEM observation of crack propagation and analysis of the toughening mechanism in nacre [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2007, 25(3): 388–391. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2812.2007.03.016.
- [7] 侯东芳, 周根树, 郑茂盛. 不同取向贝壳材料力学性能的压痕法研究 [J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2006, 28(3): 246–249. DOI: 10.3969/j.issn.1672-948X.2006.03.016.
HOU D F, ZHOU G S, ZHENG M S. Research of mechanical proprieties of nacre using indentation method [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2006, 28(3): 246–249. DOI: 10.3969/j.issn.1672-948X.2006.03.016.
- [8] 梁艳, 赵杰, 王来, 等. 贝壳的力学性能和增韧机制 [J]. *机械强度*, 2007, 29(3): 507–511. DOI: 10.3321/j.issn:1001-9669.2007.03.031.
LIANG Y, ZHAO J, WANG L, et al. Mechanical properties and toughening mechanisms of mollusk shell [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 29(3): 507–511. DOI: 10.3321/j.issn:1001-9669.2007.03.031.
- [9] YIN Z, HANNARD F, BARTHELAT F. Impact-resistant nacre-like transparent materials [J]. *Science*, 2019, 364(6447):

- 1260–1263. DOI: 10.1126/science.aaw8988.
- [10] NGUYEN-VAN V, WICKRAMASINGHE S, GHAZLAN A, et al. Uniaxial and biaxial bioinspired interlocking composite panels subjected to dynamic loadings [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107023. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107023.
- [11] JIA H M, LI Y C, LUAN Y B, et al. Bioinspired Nacre-like GO-based bulk with easy scale-up process and outstanding mechanical properties [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 132: 105829. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105829.
- [12] TAN G Q, YU Q, LIU Z Q, et al. Compression fatigue properties and damage mechanisms of a bioinspired nacre-like ceramic-polymer composite [J]. *Scripta Materialia*, 2021, 203: 114089. DOI: 10.1016/J.SCRIPMAT.2021.114089.
- [13] 武晓东, 张海广, 王瑜, 等. 冲击载荷下仿贝壳珍珠层 Voronoi 结构的动态力学响应 [J]. *高压物理学报*, 2020, 34(6): 064201. DOI: 10.11858/gywlb.20200559.
- WU X D, ZHANG H G, WANG Y, et al. Dynamic responses of nacre-like Voronoi structure under impact loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(6): 064201. DOI: 10.11858/gywlb.20200559.
- [14] 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.
- [15] 马骁勇, 梁海弋, 王联凤. 三维打印贝壳仿生结构的力学性能 [J]. *科学通报*, 2016, 61(7): 728–734. DOI: 10.1360/N972015-00263.
- MA X Y, LIANG H Y, WANG L F. Multi-materials 3D printing application of shell biomimetic structure [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(7): 728–734. DOI: 10.1360/N972015-00263.
- [16] 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. DOI: 10.11858/gywlb.20210790.
- LIU Y Z, LEI J Y, WANG Z H. Dynamic response of nacre-like brick and mortar structure under impact load [J]. *Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(1): 014202. DOI: 10.11858/gywlb.20210790.
- [17] GU G X, TAKAFFOLI M, BUEHLER M J. Hierarchically enhanced impact resistance of bioinspired composites [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(28): 1700060. DOI: 10.1002/adma.201700060.
- [18] 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.
- [19] KO K, JIN S, LEE S E, et al. Bio-inspired bimaterial composites patterned using three-dimensional printing [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 594–603. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.02.008.
- [20] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual [R]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [21] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用 [M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987: 124–131.
- HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use [M]. XIONG J G, trans. Beijing: Science Press, 1987: 124–131.
- [22] 贾贤. 天然生物材料及其仿生工程材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 26–32.

(责任编辑 王小飞)