高压物理学报

# 冲击载荷下仿贝壳珍珠层Voronoi结构的动态力学响应

武晓东 张海广 王瑜 孟祥生

# Dynamic Responses of Nare-Like Voronoi Structure under Impact Loading

WU Xiaodong, ZHANG Haiguang, WANG Yu, MENG Xiangsheng

引用本文:
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/gywlxb.20200559
WU Xiaodong, ZHANG Haiguang, WANG Yu, et al. Dynamic Responses of Nare-Like Voronoi Structure under Impact Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(6):064201. DOI: 10.11858/gywlxb.20200559

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200559

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

陶瓷和仿珍珠母陶瓷/聚脲复合结构的冲击损伤对比

Comparison of Impact Damage between Ceramic Structure and Nacre-Like Ceramic/Polyurea Composite Structure

高压物理学报. 2020, 34(2): 024201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190808

3D打印贝壳仿生复合材料的拉伸力学行为

Tension Mechanical Behavior of 3D Printed Composite Materials Inspired by Nacre

高压物理学报. 2020, 34(1): 014102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190768

冲击载荷下$Al_2O_3$陶瓷的失效与破碎特性

Failure and Fracture Characteristics of $Al_2O_3$ Ceramics under Impact Loading

高压物理学报. 2019, 33(5): 054202 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180695

孔洞排布对PMMA多孔材料冲击响应行为的影响

Effect of Voids Arrangement on Behavior of PMMA Cellular Materials on Impact Loading

高压物理学报. 2020, 34(5): 054202 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200542

3D打印浆砌层合结构复合材料层间断裂韧性的数值模拟

Numerical Simulation on Interlaminar Fracture Toughness of 3D Printed Mortar Laminated Composites

高压物理学报. 2020, 34(4): 044206 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190827

晶体塑性有限元在材料动态响应研究中的应用进展

Advances in the Study of Dynamic Response of Crystalline Materials by Crystal Plasticity Finite Element Modeling

高压物理学报. 2019, 33(3): 030108 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190725

**DOI:** 10.11858/gywlxb.20200559

# 冲击载荷下仿贝壳珍珠层 Voronoi 结构的动态力学响应

武晓东[1,2], 张海广[2], 王 瑜[2], 孟祥生[2]

(1. 中国辐射防护研究院核应急与核安全研究所, 山西 太原 030009;
2. 太原理工大学机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 贝壳珍珠层复合结构是一种有效的抗压结构系统, 微观上具有 Voronoi 随机结构, 具有良好的力学特性。为了研究仿贝壳珍珠层 Voronoi 结构在冲击载荷下的动态力学响应, 建立了一种铝/乙烯基复合材料的三维 Voronoi 模型。首先, 应用随机 Voronoi 技术建立仿贝壳珍珠层 Voronoi 随机模型, 然后在随机多边形铝片之间引入黏结层, 模拟黏结和分层过程, 从最大变形、损伤分布和耗散能量等方面探讨 Voronoi 片板模型在弹丸冲击荷载作用下的力学性能, 并与规则片板模型进行对比分析。结果显示: Voronoi 结构更有利于冲击能量的扩散与吸收, 减小应力集中, 更好地发挥能量共享机制; 而规则模型的冲击损伤主要集中在弹丸冲击点附近区域。最后讨论了黏结层厚度和分块尺寸对 Voronoi 模型力学性能的影响, 结果表明: 分块尺寸对 Voronoi 模型抗冲击性能的影响很小; 黏结层对损伤耗散能和塑性能的影响很明显, 黏结层越薄, 模型的抗冲击性能越好。

**关键词:** 贝壳珍珠层; Voronoi 结构; 动力学响应; 冲击载荷; 有限元分析

**中图分类号:** O347.1 **文献标识码:** A

仿贝壳珍珠层复合材料作为新型复合材料, 有着优异的力学性能, 不仅具有很高的强度, 而且具有很好的韧性, 近年来引起了学术界的不断关注[1−6]。很多发达国家非常重视贝壳结构材料和仿生材料研究, 如美国等国家设置了专门的经费来研究贝壳生物材料的仿生设计和性能, 用于装甲防弹衣和防爆装置。贝壳珍珠层复合材料的优异力学性能与其微观结构密切联系, 为此研究人员对珍珠质的微观结构特征(体积分数、片剂长宽比、重叠长度等)进行了深入分析, 试图将其与模型的力学性能联系起来[7−12]。Dutta 等[13] 研究了珍珠层中裂纹的萌生规律, 评估了重叠长度对裂纹尖端驱动力的影响。Kotha 等[14] 的研究显示, 低纵横比的文石片可以制造出具有高韧性的复合材料。Barthelat 等[15] 发现, 珍珠层没有实现稳定状态的裂纹扩展, 并将其归因于片层拔出增韧机制。其他学者也发现珍珠层内部和外部韧化机制阻止了裂纹的扩展[16−21]。

Barthelat 等[15] 通过观察发现, 在每层贝壳珍珠层中, 平板的排列与 Voronoi 图相似, 从一个红色鲍鱼标本的光学图像中可以看到每个贝壳层压板都有矿物片的随机分布, 并与其他珍珠层成键。基于这些光学图像, 他们生成了一个由两层贝壳的平板结构组成的几何模型, 用于有限元分析。自 1907 年 Shamos 和 Hoey 提出分治算法的最初定义和描述之后, Voronoi 图便成为众多学科的中心主题之一。Voronoi 图所具有的自然描述性和操纵能力, 使其获得了广泛应用[22−24]。尽管 Voronoi 图对科学和工程中的各种应用具有重大的潜在影响, 但是在很多领域包括仿生结构领域, Voronoi 结构对材料力学性能的影响还未得到透彻的理解, 为此本工作将探讨 Voronoi 结构的随机性对仿贝壳珍珠层结构力学性能的影响。

* **收稿日期:** 2020-05-21; **修回日期:** 2020-06-12
**基金项目:** 国家自然科学基金(11702185); 山西省高校创新科技计划(173230113-S)
**作者简介:** 武晓东(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事复合材料动力学研究. E-mail: wuxiaodong@tyut.edu.cn

为了研究仿贝壳珍珠层 Voronoi 随机模型结构的动态力学响应，首先建立一种铝/乙烯基复合材料结构的三维 Voronoi 模型，然后对模型在弹丸冲击载荷下的动态力学性能进行有限元模拟分析，最后讨论黏结层厚度和 Voronoi 模型分块尺寸对模型抗冲击力学性能的影响。

## 1　Voronoi 随机模型生成

利用文献 [25] 给出的随机 Voronoi 技术生成 Voronoi 随机模型。图 1 描述了仿贝壳珍珠层随机 Voronoi 结构的生成技术。图 1(a) 显示了由网格组成的 Voronoi 初始构型，每个网格内都包含 1 个站点；站点可以在圆内随机移动，如图 1(b) 所示，站点位置$(x,y)$由极坐标控制方程决定

$$x = x_0 + r\cos\theta, \quad y = y_0 + r\sin\theta \tag{1}$$

式中：$(x_0,y_0)$为网格内站点的参考位置；$r$为$(0,R)$之间的随机值，$R$为圆的半径；$\theta$为$(0,2\pi)$之间的随机值。通过站点的随机移动，最终形成新的随机 Voronoi 图，如图 1(c) 所示。新生成的 Voronoi 图由一个无限大的区域组成，采用矩形切割使新生成的 Voronoi 图限定在有限区域内，丢弃有限区域外的站点和多边形网格，最终形成仿贝壳珍珠层随机 Voronoi 模型。

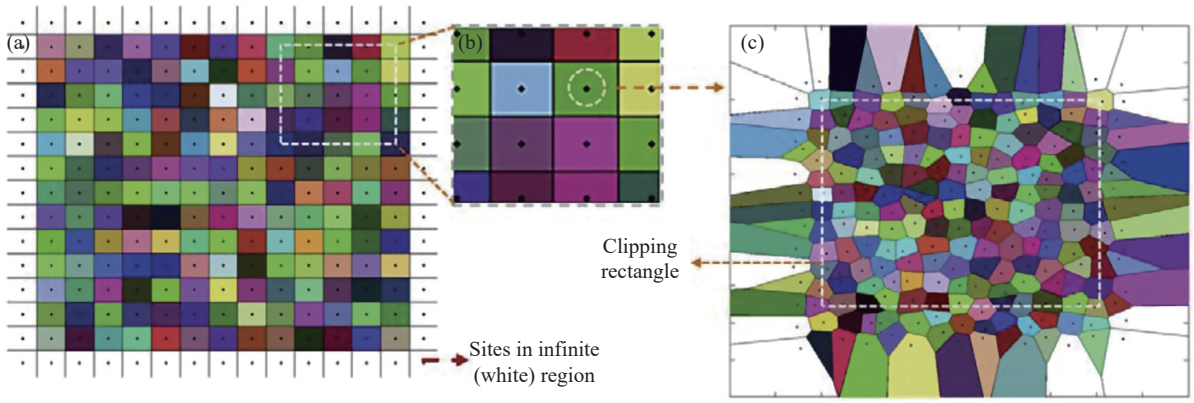



图 1　(a) Voronoi 图的初始网格构型；(b) 每个站点都在一个圆圈区域内随机移动；(c) 新的 Voronoi 图是从新的站点系统中生成，通过矩形裁剪，形成有限区域的随机 Voronoi 图[25]

Fig. 1　(a) Initial grid formation of Voronoi diagram; (b) each site moves randomly within a circle region; (c) a new Voronoi diagram is generated from the new site system, and by a rectangle cut, a finite Voronoi diagram is generated[25]

## 2　Voronoi 模型有限元分析

### 2.1　几何建模

图 2 给出了规则片板单元模型以及 4 种不同分块尺寸的不规则 Voronoi 片板模型，5 种模型的总体几何尺寸相同，均为 240 mm × 240 mm × 15 mm，模型总层数均为 5 层。图 2(a) 为规则片板模型，每个规则片板的几何尺寸为 30 mm × 30 mm × 3 mm，每层由 8 × 8 共 64 个片板组成，图 2(b)～图 2(e) 分别给出了 7 × 7、8 × 8、9 × 9 和 10 × 10 分块的 Voronoi 不规则模型，每种模型均包括 5 层不同的随机单层结构，每层厚度为 3 mm。

为了模拟仿贝壳珍珠层片层之间受冲击破坏时的脱黏现象，采用了内聚力 Cohesive 模型。通过合理的参数选择，内聚力 Cohesive 模型能够部分描述贝壳珍珠层内部层与层之间的变形和失效现象[2]。在片板之间以及板层之间插入 Cohesive 黏结层，考虑 3 种黏结层厚度 0.1、0.2 和 0.3 mm，讨论黏结层厚度对模型冲击损伤的影响。

内聚力 Cohesive 模型的牵引分离定律涉及黏性牵引应力矢量$\boldsymbol{T} = \{t_\mathrm{n}, t_\mathrm{s}, t_\mathrm{t}\}$，其中下标 n、s 和 t 分别表示一个法向和两个切向分量。这些变量之间满足双线性二次黏聚律[25]

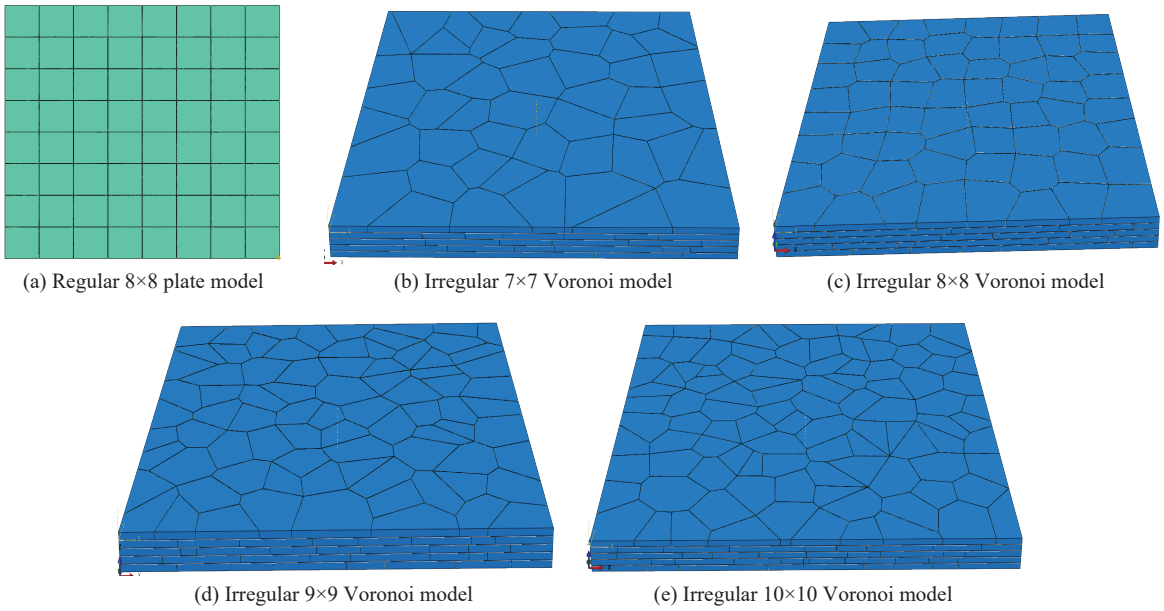
$$\left(\frac{t_{\mathrm{n}}}{t_{\mathrm{n}}^{0}}\right)^{2}+\left(\frac{t_{\mathrm{s}}}{t_{\mathrm{s}}^{0}}\right)^{2}+\left(\frac{t_{\mathrm{t}}}{t_{\mathrm{t}}^{0}}\right)^{2}=1 \tag{2}$$

式中: $t_{\mathrm{n}}^{0}$、$t_{\mathrm{s}}^{0}$、$t_{\mathrm{t}}^{0}$分别表示变形垂直于界面以及在第一、第二剪切方向上的最大应力。

Cohesive 黏结层刚度退化速率满足

$$\left(\frac{G_{\mathrm{n}}}{G_{\mathrm{n}}^{0}}\right)^{2}+\left(\frac{G_{\mathrm{s}}}{G_{\mathrm{s}}^{0}}\right)^{2}+\left(\frac{G_{\mathrm{t}}}{G_{\mathrm{t}}^{0}}\right)^{2}=1 \tag{3}$$

式中: $G_{\mathrm{n}}$、$G_{\mathrm{s}}$、$G_{\mathrm{t}}$分别为正向和两个切向的断裂能, $G_{\mathrm{n}}^{0}$、$G_{\mathrm{s}}^{0}$、$G_{\mathrm{t}}^{0}$分别为正向和两个切向引起破坏所需的最大断裂能。



(a) Regular 8×8 plate model　(b) Irregular 7×7 Voronoi model　(c) Irregular 8×8 Voronoi model

(d) Irregular 9×9 Voronoi model　(e) Irregular 10×10 Voronoi model

图 2　规则 8 × 8 模型和随机 Voronoi 模型的示意图

Fig. 2　Schematic of regular 8 × 8 model and random Voronoi models

## 2.2　材料参数

仿贝壳珍珠层三维 Voronoi 结构模型包括两种材料模型, 其中片层采用铝 AA5083-H116, 片层之间 Cohesive 黏性层使用乙烯树脂材料。表 1 和表 2 列出了两种材料参数[19, 25], 其中$\rho$为密度, $\nu$为泊松比, $E$ 为弹性模量, $E_{\mathrm{s}}$ 和 $E_{\mathrm{t}}$ 为两个切向弹性模量。

**表 1　铝片的材料参数**

**Table 1　Parameters of aluminum plate**

| Material | $\rho$/(kg·m$^{-3}$) | $\nu$ | $E$/GPa |
|---|---|---|---|
| Aluminum | 2 750 | 0.3 | 72 |

**表 2　Cohesive 模型的材料参数**

**Table 2　Parameters of Cohesive model**

| $t_{\mathrm{n}}^{0}$/MPa | $t_{\mathrm{s}}^{0}$/MPa | $t_{\mathrm{t}}^{0}$/MPa | $G_{\mathrm{n}}^{0}$/(kJ·m$^{-2}$) | $G_{\mathrm{s}}^{0}$/(kJ·m$^{-2}$) | $G_{\mathrm{t}}^{0}$/(kJ·m$^{-2}$) | $\rho$/(kg·m$^{-3}$) | $E_{\mathrm{s}}$/GPa | $E_{\mathrm{t}}$/GPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 80 | 80 | 80 | 1 | 1 | 1 | 1 850 | 4 | 1.5 |

在大应变情况下, 铝合金的本构关系可采用 Johnson-Cook 模型描述

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)\left(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left[1 - \left(\frac{T - T_\mathrm{r}}{T - T_\mathrm{m}}\right)^m\right] \tag{4}$$

式中：$\sigma$为等效应力，$A$为材料在常温准静态下的屈服强度，$B$为应变强化系数，$n$为强化指数，$\varepsilon$为等效塑性应变，$\dot{\varepsilon}$为塑性应变率，$\dot{\varepsilon}_0$为初始应变率，$C$为应变率敏感系数，$m$为温度软化系数，$T_\mathrm{m}$为材料的熔点，$T_\mathrm{r}$为参考温度(取常温)，$T$为当前温度。表 3 列出了 Johnson-Cook 模型参数[25]。

**表 3　Johnson-Cook 模型参数[25]**

**Table 3　Parameters of Johnson-Cook model[25]**

| Material | $A$/MPa | $B$/MPa | $n$ | $C$ | $m$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Aluminum | 391 | 684 | 0.436 | 0.009 59 | 2 |

## 2.3　加载条件与边界条件

图 3 显示了模型的边界条件和加载条件。弹丸以 18 m/s 的初速度冲击 Voronoi 模型，弹丸速度属于中低速范围。弹丸模型上半部分是一个半径 15 mm、长 45 mm 的圆柱体，下半部分是一个半径为 15 mm 的半球体，总长为60 mm，刚体属性。冲击载荷下仿贝壳珍珠层三维 Voronoi 模型的边界条件为 4 个侧边均完全固定，弹丸与复合结构模型的接触为通用接触，弹丸作用在复合结构模型中心。

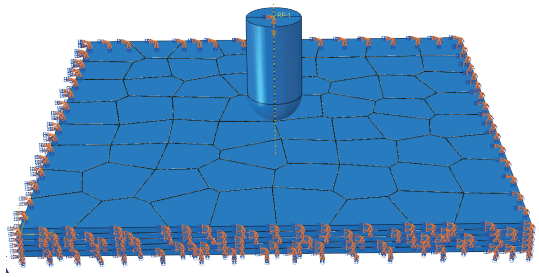


图 3　模型边界条件和加载条件

Fig. 3　Boundary condition and loading of the model

黏结层网格类型采用 COH3D8，铝片网格类型采用 C3D8R，黏结层网格大小为 1 mm，铝片网格大小为 2 mm。在该网格密度下，模型的网格单元总数达到 167 230。节点总数为 567 001 时，最大应力值保持稳定，网格的收敛性较好。

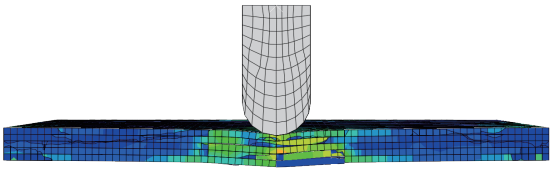
# 3　模拟结果分析

## 3.1　有限元分析

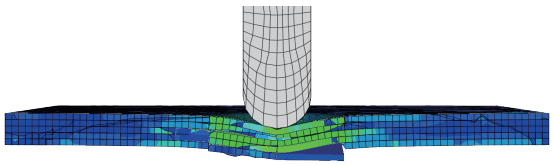
在珍珠层结构中，片板滑动机制被认为是激活内在和外在韧化机制的关键因素，可以阻止裂纹扩展。该机制分别引起内聚力和残余塑性应变，从而闭合裂纹。由于弹丸冲击载荷方向垂直于 Voronoi 板模型，冲击载荷破坏的主要形式是黏性层剥离，因此片板滑动引起的增韧机制在这种特定的冲击加载问题中不占主导地位。在冲击载荷下，损伤和变形耗散的能量比摩擦接触要多得多，Voronoi 模型对珍珠层结构负载分配和能量吸收机制的影响是所要考虑的主要因素。本研究首先分析冲击载荷下模型的动态响应，在此基础上考察不规则 Voronoi 片板等几何因素对动态力学特性和能量分配的影响。

图 4 和图 5 分别为不同时刻规则片板模型与 Voronoi 片板模型受弹丸冲击时的应力云图剖视图。通过对比可以发现：在规则模型中，应力主要集中在弹丸冲击点及附近区域，远离冲击点区域的应力很小；在 Voronoi 模型中，应力分布区域更大，受力更加均匀。规则模型受冲击后很快就被冲破；而 Voronoi 模型的冲击模拟结果显示，其最大应力载荷小于规则模型，最终弹丸并未完全贯穿模型。

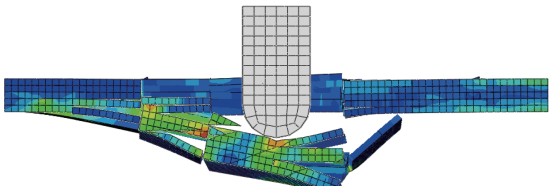
图 6 和图 7 分别为规则片板模型和 Voronoi片板模型受弹丸冲击 3.00 ms 时应力云图的俯视图。从受弹丸冲击破坏情况来看：规则模型中脱黏现象主要集中在弹丸冲击点附近区域；而 Voronoi 模型的冲击影响区域更大，基本遍布整个模型。对于 Voronoi 模型，冲击区域发生变形时，其余片板受挤压后也发生了脱黏现象，吸收更多的冲击能量，从而有利于冲击能量的扩散与吸收，使模型的更多部分承担冲击负载，即增加承载区域，减小应力集中，更好地发挥能量共享机制。因此 Voronoi 片板模型抵抗冲击荷载的能力明显优于规则片板模型。



(a) 0.20 ms



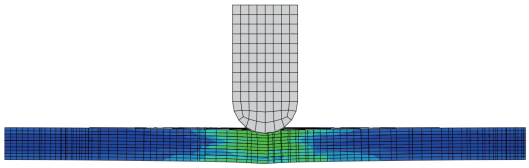
(b) 0.40 ms



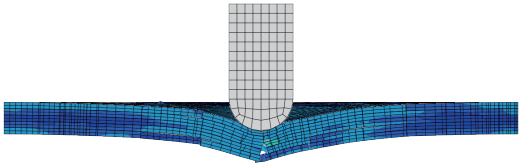
(c) 1.50 ms

图 4　不同时刻规则片板模型的 von Mises 应力云图剖视图

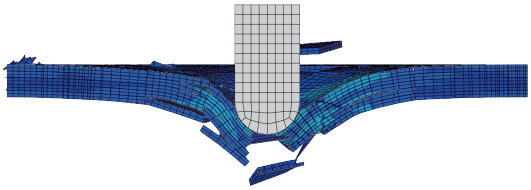
Fig. 4　Cutaway views of von Mises stress contours of regular plate model at different times



(a) 0.15 ms



(b) 0.45 ms



(c) 3.00 ms

图 5　不同时刻 Voronoi 片板模型的 von Mises 应力云图剖视图

Fig. 5　Cutaway views of von Mises stress contours of Voronoi plate model at different times

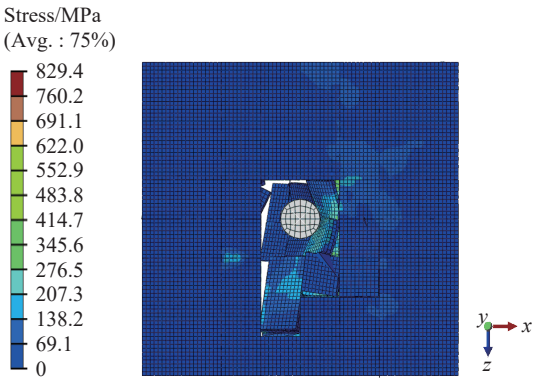



图 6　3.00 ms 时规则片板模型的 von Mises 应力云图俯视图

Fig. 6　Top view of von Mises stress contours of regular plate model at 3.00 ms

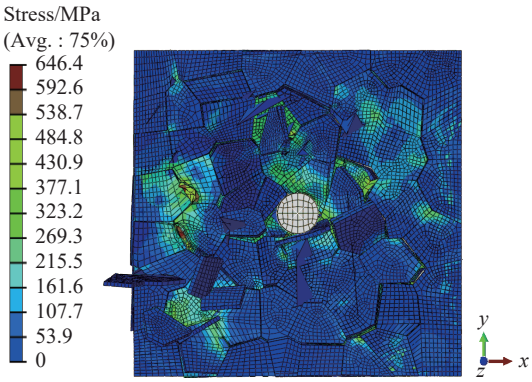



图 7　3.00 ms 时 Voronoi 片板模型的 von Mises 应力云图俯视图

Fig. 7　Top view of von Mises stress contours of Voronoi plate model at 3.00 ms

## 3.2　黏结层厚度和分块尺寸对冲击吸能的影响

图 8 和图 9 分别给出了规则模型和不同分块 Voronoi 模型的损伤耗散能和塑性耗散能对比。在模型总尺寸相同的情况下, Voronoi 模型的损伤耗散能远远高于规则片板模型, 而塑性耗散能则小于规则片板模型, 说明在冲击载荷作用下 Voronoi 模型抵抗冲击的能力优于规则片板模型。不同分块 Voronoi 模型的损伤耗散能和塑性耗散能差别不大, 分块尺寸对 Voronoi 模型抗冲击性能的影响很小。

图 10 和图 11 分别给出了不同黏结层厚度($h$)的 Voronoi 模型的损伤耗散能和塑性耗散能。可以看出, 黏结层对损伤耗散能和塑性耗散能的影响很明显。黏结层越薄, 模型整体吸能越大, 越薄的黏结层使模型具有更高的抗弯刚度, 抗冲击性能越强。由此可见, Voronoi 模型的不规则性是仿贝壳珍珠层复合结构模型抗冲击性能的影响因素, 对贝壳结构韧性的提升发挥着重要作用。

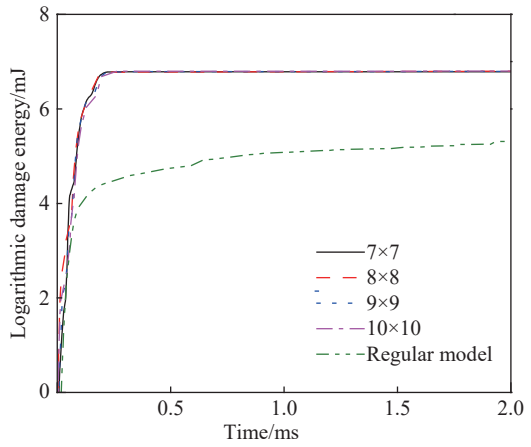



图 8　规则模型和不同分块尺寸 Voronoi 模型的损伤耗能

Fig. 8　Damage energy of regular model and Voronoi models with different block sizes

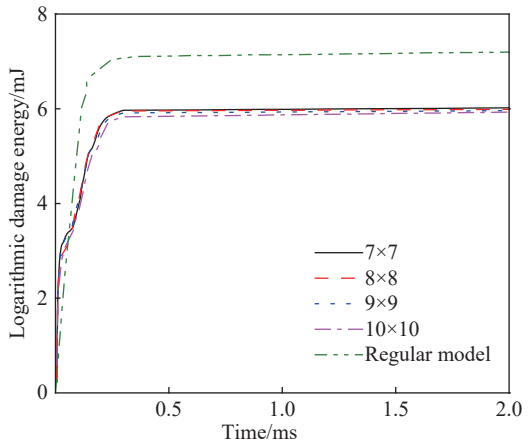



图 9　规则模型和不同分块尺寸 Voronoi 模型的塑性能

Fig. 9　Plastic energy of regular model and Voronoi models with different block sizes

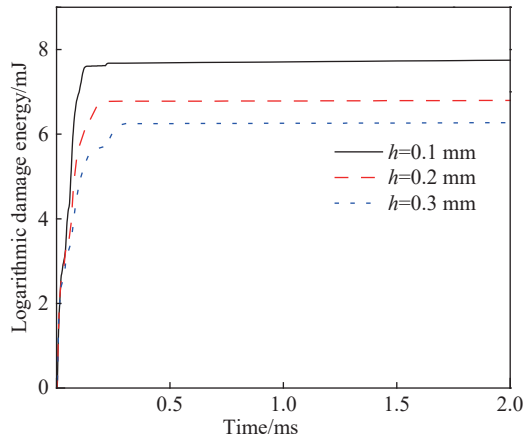



图 10　具有不同黏性层厚度的 Voronoi 模型的损伤耗能

Fig. 10　Damage energy of Voronoi models with different adhesive thicknesses

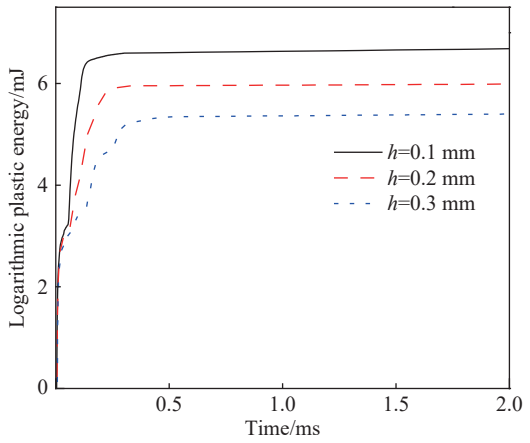



图 11　具有不同黏性层厚度的 Voronoi 模型的塑性能

Fig. 11　Plastic energy of Voronoi model with different adhesive thicknesses

## 4　结　论

通过有限元数值模拟研究了仿贝壳珍珠层 Voronoi 模型在弹丸冲击载荷下的动态力学响应，得到如下主要结论。

(1)从冲击破坏受损情况来看，不规则 Voronoi 模型的冲击影响区域比规则模型更大，基本遍布整个模型。对于 Voronoi 模型，当冲击区域发生变形时，其余片板受挤压后发生脱黏现象，从而吸收更多的冲击能量，有利于冲击能量的扩散与吸收，让模型的更多部分承担冲击负载，即增加承载区域，并且减小应力集中，更好地发挥共享机制。规则模型的脱黏现象主要集中在弹丸冲击点及其附近区域。

(2)在模型总尺寸相同的情况下，Voronoi 片板模型的损伤耗散能远远高于规则片板模型，而塑性耗散能则小于规则模型。在冲击载荷作用下，不规则 Voronoi 片板模型抵抗冲击的能力优于规则片板模型。

(3)分块尺寸对 Voronoi 模型抗冲击性能的影响很小，而黏结层对损伤耗散能和塑性耗散能的影响很明显，黏结层越薄，模型整体吸能越大，抗冲击性能越强。

鉴于目前制备具有 Voronoi 结构的金属/高分子材料复合实验模型具有一定困难，因此未对模拟结果进行实验验证。随着 3D 打印技术的进一步发展，可采用金属/高分子材料混合 3D 打印技术制备仿贝壳珍珠层 Voronoi 实验模型，届时即可对铝/乙烯基复合三维 Voronoi 模型的数值模拟工作进行验证，进而开展更深入的研究。

## 参考文献:


[1] CURREY J D. Mechanical properties of mother of pearl in tension [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1977, 196(1125): 443–463.

[2] BARTHELAT F, TANG H, ZAVATTIERI P D, et al. On the mechanics of mother-of-pearl: a key feature in the material hierarchical structure [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(2): 306–337.

[3] IMBALZANO G, TRAN P, NGO T D, et al. A numerical study of auxetic composite panels under blast loadings [J]. Composite Structures, 2016, 135: 339–352.

[4] NGUYEN Q T, NGO T D, TRAN P, et al. Influences of clay and manufacturing on fire resistance of organoclay/thermoset nanocomposites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 74: 26–37.

[5] PRO J W, LIM R K, PETZOLD L R, et al. GPU-based simulations of fracture in idealized brick and mortar composites [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 80: 68–85.

[6] ZHANG N, YANG S F, XIONG L M, et al. Nanoscale toughening mechanism of nacre tablet [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016, 53: 200–209.

[7] SARIKAYA M. An introduction to biomimetics: a structural viewpoint [J]. Microscopy Research and Technique, 1994, 27(5): 360–375.

[8] GAO H J, JI B H, JÄGER I L, et al. Materials become insensitive to flaws at nanoscale: lessons from nature [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(10): 5597–5600.

[9] SONG F, SOH A K, BAI Y L. Structural and mechanical properties of the organic matrix layers of nacre [J]. Biomaterials, 2003, 24(20): 3623–3631.

[10] BARTHELAT F. Nacre from mollusk shells: a model for high-performance structural materials [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2010, 5(3): 035001.

[11] TRAN P, NGO T D, MENDIS P. Bio-inspired composite structures subjected to underwater impulsive loading [J]. Computational Materials Science, 2014, 82: 134–139.

[12] FLORES-JOHNSON E A, SHEN L M, GUIAMATSIA I, et al. A numerical study of bioinspired nacre-like composite plates under blast loading [J]. Composite Structures, 2015, 126: 329–336.

[13] DUTTA A, TEKALUR S A. Crack tortuousity in the nacreous layer-topological dependence and biomimetic design guideline [J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(2): 325–335.

[14] KOTHA S P, LI Y, GUZELSU N. Micromechanical model of nacre tested in tension [J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(8): 2001–2007.

[15] BARTHELAT F, RABIEI R. Toughness amplification in natural composites [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2011, 59(4): 829–840.

[16] SONG F, BAI Y L. Effects of nanostructures on the fracture strength of the interfaces in nacre [J]. Journal of Materials Research, 2003, 18(8): 1741–1744.

[17] RABIEI R, BEKAH S, BARTHELAT F. Failure mode transition in nacre and bone-like materials [J]. Acta Biomaterialia, 2010, 6(10): 4081–4089.

[18] SHAO Y, ZHAO H P, FENG X Q, et al. Discontinuous crack-bridging model for fracture toughness analysis of nacre [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2012, 60(8): 1400–1419.

[19] GHAZLAN A, NGO T, VAN LE T, et al. Blast performance of a bio-mimetic panel based on the structure of nacre: a numerical study [J]. Composite Structures, 2020, 234: 111691.

[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] 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.

[22] 刘金义, 刘爽. Voronoi 图应用综述 [J]. 工程图学学报, 2004, 25(2): 125–132.
LIU J Y, LIU S. A survey on applications of Voronoi diagrams [J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 25(2): 125–132.

[23] BARGMANN S, KLUSEMANN B, MARKMANN J, et al. Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials: a review [J]. Progress in Materials Science, 2018, 96: 322–384.

［24］ BAHMANI A, LI G, WILLETT T L, et al. Generating realistic representative microstructure of biomimetic composite materials for computational assessment of mechanical properties [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 7: 373–381.

［25］ GHAZLAN A, NGO T D, TRAN P. Three-dimensional Voronoi model of a nacre-mimetic composite structure under impulsive loading [J]. Composite Structures, 2016, 153: 278–296.

# Dynamic Responses of Nare-Like Voronoi Structure under Impact Loading

WU Xiaodong[1,2], ZHANG Haiguang[2], WANG Yu[2], MENG Xiangsheng[2]

（1. *Department of Nuclear Emergency and Safety*, *China Institute for Radiation Protection*, *Taiyuan* 030009, *Shanxi*, *China*;
2. *College of Mechanical and Vehicle Engineering*, *Taiyuan University of Technology*, *Taiyuan* 030024, *Shanxi*, *China*）

**Abstract:** As an effective structure system for resisting the compression, the nacre composite structure has random Voronoi structure at a microscopic level and good mechanical performance. In this study, a three-dimensional Voronoi model consisting of aluminum/vinyl composite structure was presented to investigate the dynamic responses of nare-like Voronoi model under impact loading. Firstly the stochastic Voronoi model was built using the Voronoi technology, and then the adhesive layers were introduced between random polygonal aluminium sheets to simulate the bonding and delaminating processes. Via the maximum deformation, damage distribution and dissipation energy, the mechanical performances of Voronoi plate model were evaluated and compared with those of the regular plate model. The results showed that the Voronoi model is in favor of energy spreading and absorbing, reducing the stress concentration and making the energy sharing mechanism work better. But the impact damage of the regular plate model is concentrated near the impacting point of the bullet. Finally the influences of adhesive thickness and block size on mechanical performances were discussed. It was indicated that the block size has little effect on the impact resistance of the Voronoi model while the adhesive thickness exerts significant influence on the damage dissipation energy and plastic energy. It was found that the thinner is the adhesive thickness, the better is the impact resistance performance of the model.

**Keywords:** nacre; Voronoi structure; dynamic response; impact loading; finite element analysis