

高压物理学报

孔洞排布对PMMA多孔材料冲击响应行为的影响

罗国强 费细欢 喻寅 张睿智 张成成 沈强

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

LUO Guoqiang, FEI Xihuan, YU Yin, ZHANG Ruizhi, ZHANG Chengcheng, SHEN Qiang

引用本文:

罗国强, 费细欢, 喻寅, 等. 孔洞排布对PMMA多孔材料冲击响应行为的影响[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5):054202. DOI: 10.11858/gywlb.20200542

LUO Guoqiang, FEI Xihuan, YU Yin, et al. Effect of Voids Arrangement on Behavior of PMMA Cellular Materials on Impact Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(5):054202. DOI: 10.11858/gywlb.20200542

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200542>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击压缩下PMMA的响应和光学特性

Dynamic Response and Optical Properties of PMMA under Shock Compression

高压物理学报. 2017, 31(5): 579 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.011>

多孔材料温压状态方程计算简要评述

Review on Evaluation of Temperature–Pressure Equation of State of Porous Materials

高压物理学报. 2019, 33(3): 030111 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190767>

应变率和孔隙率对规则多孔钛压缩力学性能的影响

Effects of Strain Rate and Porosity on the Compressive Behavior of Porous Titanium with Regular Pores

高压物理学报. 2017, 31(4): 364 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.00.003>

二阶层级自相似四边形蜂窝动力压缩行为数值模拟

Dynamic Crushing Response of Self–Similar Second Order Hierarchical Square Honeycombs

高压物理学报. 2017, 31(4): 358 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.002>

桌面式激光驱动冲击波技术及其在含能材料分子反应机制研究中的应用

A Desktop Laser Driven Shock Wave Technique and Its Applications to Molecular Reaction Mechanism of Energetic Materials

高压物理学报. 2018, 32(1): 010107 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170599>

冲击加载和斜波加载下PBX炸药细观结构点火特性对比

Ignition Characteristics of PBX Explosives at Meso–Structural Level under Shock and Ramp Loading

高压物理学报. 2017, 31(1): 27 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.01.005>

孔洞排布对 PMMA 多孔材料冲击响应行为的影响

罗国强¹, 费细欢¹, 喻寅², 张睿智¹, 张成成¹, 沈强¹

(1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 多孔材料具有轻质、缓冲减震、吸能等特点, 在加载路径调控、爆炸或冲击防护领域具有广泛的应用前景。采用格点-弹簧模型(离散元方法), 模拟多种孔洞排布方式的 PMMA 多孔材料在冲击加载过程中的早期孔洞塌缩破坏、应力分布与粒子速度等冲击响应行为。结果表明: 在冲击加载过程中, 裂纹萌生于孔洞侧向(垂直于冲击波方向)附近区域, 孔洞破坏形式以剪切断裂为主; 在不同的孔洞排列模型中, 孔洞与孔洞之间均存在剪切裂纹相互贯通现象, 促进孔洞体积压缩致密化, 且孔洞排列方式不影响冲击波传播速度; 四角点阵模型有效减缓孔洞附近区域的应力集中; 四角点阵、三角点阵、锥形递减排列、锥形递增排列模型都显著影响 PMMA 多孔材料的冲击波阵面平整性; 孔洞的随机排列模型对降低粒子速度最有效, 四角点阵排列模型对降低波阵面后压力贡献最大。

关键词: 多孔材料; 孔洞排列模型; 冲击波; 冲击加载

中图分类号: O347.5

文献标识码: A

多孔材料具有比强度高、比刚度高、质量轻、吸收载荷能力强等优点, 广泛应用于缓冲减震、冲击防护、加载路径调控等领域^[1-3]。在这些应用场景中, 多孔材料受到冲击加载作用, 孔洞的破碎机制和压缩模式与准静态加载下不同, 且孔隙内部气相吸附出现滞后等现象^[4-5], 导致材料整体系统发生复杂的体积收缩变化, 处于非平衡状态。这一过程的冲击响应行为相关实验、模拟和结果分析均具有较强的挑战性^[6]。探究多孔材料在冲击加载中的响应特征, 不仅可以完善多孔材料在冲击领域的应用理论体系, 还可以为多孔材料在冲击载荷环境下的实际应用提供重要的指导。

关于孔洞微观结构对多孔材料动态冲击响应影响的研究有很多。在实验方面, Setchell^[7]通过动态冲击实验发现, 随机排列的微孔洞使脆性材料中的冲击波剖面展现出相比密实材料体积应变显著增强的“变形波”; Branch 等^[8-9]利用增材制造方法, 研究了不同结构的多孔泡沫材料在动态压缩下的力学响应特征, 结果表明体心立方和面心立方等周期性排列的多孔泡沫材料可以调节弹塑性压缩响应和应力集中行为。在数值模拟方面, Liu 等^[10]采用显式动态有限元方法进行模拟, 发现在动态加载过程中蜂窝结构从整齐排列到交错排列的变化会导致蜂窝平面更均匀的变形和稳定的平台应力; Zheng 等^[11]采用 ABAQUS/Explicit 软件分析发现, 蜂窝排列的不规则性导致多孔材料的变形更复杂, 且模拟结果表明这是由无序排列引起多孔材料在冲击过程中各向异性变形导致的; Zhao 等^[12]采用分子动力学模拟研究了孔洞形状、排列、大小等因素对纳米铜复合材料冲击响应的影响, 其中孔洞的排列对材料的弹塑性、孔洞塌缩等起调节作用; Herring 等^[13]通过分子动力学研究了孔洞排列、形状等二维微观孔隙结构对多孔晶体冲击响应的影响, 发现引起的爆轰压缩波变化与材料性质有关, 与孔洞的排列方式以及形状等因素无关; 姜太龙等^[14]通过离散元模拟发现, 随机排列的脆性多孔材料具有明显高于脆性致密材料的

* 收稿日期: 2020-04-10; 修回日期: 2020-05-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51932006); 湖北省技术创新专项重大项目(2019AFA176)

作者简介: 罗国强(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事先进复合材料研究. E-mail: luogq@whut.edu.cn

通信作者: 喻寅(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事爆炸冲击模拟研究. E-mail: yuyun86@caep.cn

冲击塑性,而具有正六边形排列的多孔结构进一步提高了脆性材料的冲击塑性。以上报道的实验和计算模拟结果表明,孔洞的微观排列方式是影响多孔材料冲击响应行为的重要因素,但大部分研究人员更多是综合研究多孔材料的孔隙形状、排列等微观结构对多孔材料冲击响应的共同作用,很少分解研究孔洞排列因素对多孔材料冲击响应的影响。

在缓冲吸能、路径调控等动态加载领域中,如准等熵加载技术研究中,需要由高、中、低不同阻抗的多种材料叠层组合形成阻抗梯度飞片材料^[15-16],其低阻抗部分多采用高分子多孔材料。PMMA 多孔材料因其质轻、力学性能优异且制备技术简易^[17],在准等熵加载技术中具有较好的应用前景。本工作以 PMMA 多孔材料为研究对象,通过格点-弹簧模型,探究不同孔洞排列方式对 PMMA 多孔材料冲击响应行为的影响,分析不同排列模型的孔洞在动态冲击加载过程中的介观变形、应力变化以及剖面粒子速度变化特征,模拟结果可为后续通过增材制造等方式制备孔洞规则排布的 PMMA 多孔材料,并主动调控其动态响应提供科学支撑。

1 方法与模型

采用由中国工程物理研究院流体物理研究所自主编写的格点-弹簧模型 (Lattice-spring model)^[18-19]。该方法与物质点法、近场动力学以及格子模型等相似,主要解决大变形、裂纹、复杂界面等^[20-21]问题,现已在脆性介质断裂研究中发挥了重要作用。其算法原理:将连续介质离散分化为由格点/颗粒和弹簧相互连接的网络,通过计算格点与弹簧之间的演化过程和响应特征来获得连续介质整体系统的演化机制与规律。格点携带材料中物质微元的质量、位置、速度等信息,弹簧在两格点之间施加相互作用,并存储应变能和损伤断裂信息。图 1 显示了两颗粒之间的相互作用模型,邻近颗粒 i 和 j 之间分别设定沿法向和切向的弹簧。两颗粒中心连接的法向弹簧主要起着抵抗拉伸和压缩的作用,刚度系数为 k_n ;垂直两颗粒中心线且作用于颗粒接触边缘的切向弹簧主要起着抵抗剪切和转动的作用,刚度系数为 k_τ 。法向和切向作用力表示为

$$f_{ij}^n = k_n \delta_{ij}^n \quad (1)$$

$$f_{ij}^\tau = k_\tau \delta_{ij}^\tau \quad (2)$$

式中: δ_{ij}^n 和 δ_{ij}^τ 分别为颗粒 i 和 j 沿法向和切向的相对位移, f_{ij}^n 和 f_{ij}^τ 分别为作用于法向和切向上的力。

计算模型中的核心问题是准确地设定弹簧的刚度系数。Gusev^[22]提出了一种有限元-离散元参数映射方法,其基本思想是:先将目标材料的弹性常数转换为有限元模型中的相互作用参数,再进行映射,将有限元模型参数转换为弹簧刚度系数。Gusev 验证了模拟不同周期性复合介质格点-弹簧模型的准确性。Yu 等^[23]对比了通过格点-弹簧模型设定的孔洞模型的损伤演化结果与回收实验材料的微观形貌,进一步验证了格点-弹簧模型的准确性。

在本计算模型中,统一采用了 Griffith 能量平衡原理的断裂判据^[24],即模型中相邻格点微元之间存在一根法向拉压弹簧和一根切向剪切弹簧。一对弹簧中储存的总应变能是法向弹簧中储存的拉伸应变能与切向弹簧中储存的剪切应变能之和;当弹簧的总应变能等于或大于形成新微裂纹表面所对应的表面能时,即发生断裂。一般认为,静水压压缩不会导致断裂,故模型中没有计入法向弹簧储存的压缩应变能对断裂的影响。具体而言,计算模型的断裂判据如下

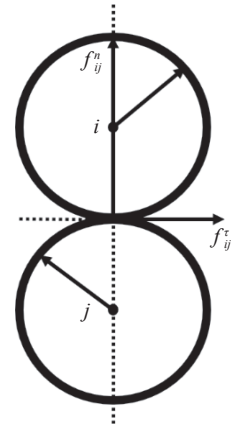


图 1 相邻两颗粒间的相互作用示意图

Fig. 1 Schematic of the interaction between adjacent

$$U_{ij} = U_{ij}^n + U_{ij}^t \quad (3)$$

$$U_{ij}^n = \begin{cases} k_n (\delta_{ij}^n)^2 / 2 & \delta_{ij}^n > 0 \\ 0 & \delta_{ij}^n \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$U_{ij}^t = k_t (\delta_{ij}^t)^2 / 2 \quad (5)$$

$$U_{ij} \geq 2\gamma c_0 \quad (\text{断裂}) \quad (6)$$

式中: U_{ij} 为一对弹簧中储存的总应变能, U_{ij}^n 和 U_{ij}^t 分别为法向和切向应变能, c_0 为两格点间微裂纹的长度, γ 为断裂表面能。当弹簧满足以上条件时发生断裂, 两个格点之间原本存在的相互作用力(抗拉伸和抗剪切作用力)消失, 在目标样品中形成一小段裂纹; 而在靠近裂纹两侧的格点仍存在其他相互作用, 其周围区域应力分布不均匀, 当某一时刻或某一区域产生应力集中时, 就有可能导致下一对弹簧的断裂, 如此演化, 弹簧断裂判据依次进行。

本研究所建立的基于格点-弹簧模型的冲击压缩构型如图 2 所示: 左端红色部分代表铜(Cu)冲击加载平板, 选择铜材料的原因在于相同的冲击条件下铜冲击平板所携带的能量高, 获得的冲击响应信号更显著; 冲击平板以恒定速度 v_p 沿 x 轴正方向冲击目标样品, 如黄色箭头所示, 使得冲击波在目标样品中自左向右传播; 中间蓝色部分表示目标样品, 即 PMMA 多孔材料, 白色圆形部分表示孔洞; 右端灰色部分为氟化锂(LiF)窗口, 用于防止冲击波在目标样品后界面突然卸载而无法获得正常信号; 模型上、下边界都设定为周期性边界条件。在本研究中, 将 x 轴称为横向, y 轴称为纵向。

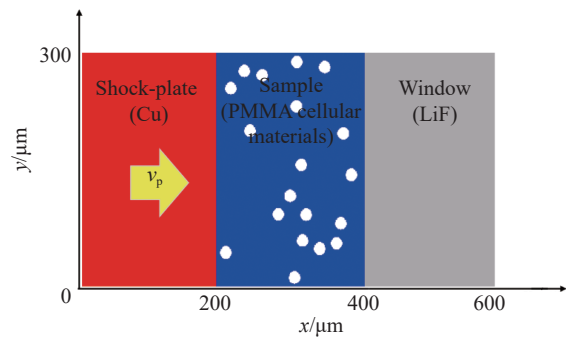


图 2 基于格点-弹簧模型的冲击压缩构型

Fig. 2 Configuration of the shock compression model based on the lattice-spring model

基于准等熵加载技术研究背景, 本研究设计的孔洞模型及其参数如下: 整体模型大小设定为 $600 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, Cu、PMMA 多孔材料和 LiF 窗口材料的厚度(δ)均为 $200 \mu\text{m}$, 单元格点半径为 $1 \mu\text{m}$, 计算单元格点数为 413 816。设计孔洞排列模型的孔隙率(ϕ)均控制在 10%, 孔洞半径 R 设定为 $10 \mu\text{m}$, 整体模型所包含的计算单元格点数为 396 735。材料的相关参数及断裂表面能(γ)^[25]如表 1 所示, 其中: ρ 为密度; E 为杨氏模量; μ 为泊松比; PMMA 的断裂表面能 γ 没有采用准静态下的实验参数, 而是先基于密实 PMMA 的冲击加载实验结果反推高应变率条件下 PMMA 的断裂参数, 然后将其应用于本研究中的 PMMA 多孔材料计算。计算中, 孔洞直接作为微结构加入, 无孔洞的地方仍为密实 PMMA。根据低速下准等熵加载技术研究的需要, 结合本程序的实际计算能力, 平板冲击加载速度设定为 $v_p = 100 \text{ m/s}$ 。

表 1 模型各部分材料的物性参数

Table 1 Specific physical parameters of each part of the model

Material	$R/\mu\text{m}$	$\delta/\mu\text{m}$	E/GPa	μ	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\gamma/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$
Cu		200	110	0.25	8 960	50 000
PMMA	10	200	3	0.20	1 180	10
LiF		200	65	0.10	2 640	

如前所述, 大部分研究人员都在关注多孔材料的孔隙形状、排列等微观结构对多孔材料冲击响应的综合作用^[8-14], 很少关注孔洞排列单一因素对多孔材料冲击响应的影响。为了研究孔洞排列对 PMMA 多孔材料冲击响应的影响, 设计了随机排列(Random lattice)、四角点阵(Square lattice)、三角点阵(Triangular lattice)以及锥形的递减排列(Decreasing lattice)和递增排列(Increasing lattice), 如图 3 所示。

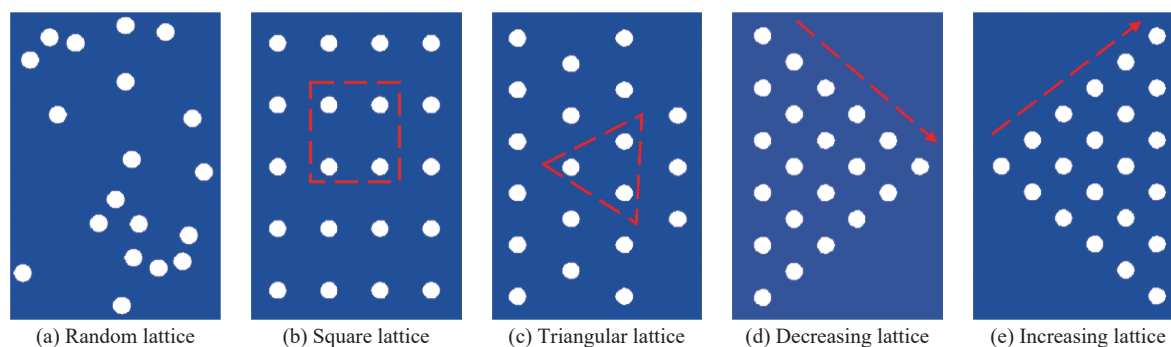


图 3 多孔材料的孔洞排列模型

Fig. 3 Arrangement modes of voids of the cellular materials

2 结果与分析

2.1 孔洞裂纹扩展

图 4 展示了 5 种孔洞排列模型 PMMA 多孔材料在早期单次冲击加载时孔洞裂纹的扩展过程, 为了观察孔洞的裂纹扩展演化, 每种排列模型的记录时刻为 50、100、130、180 ns。当冲击波传播 50 ns 时, 靠近冲击端孔洞体积收缩, 孔洞外壁开始破碎, 纵向区域萌发裂纹。100 ns 时, 靠近冲击端孔洞已经开始被破碎颗粒填充, 裂纹已经扩展并沿 45° 倾角方向延伸。130 ns 时, 各个模型的冲击波正好传播至 PMMA 多孔材料与 LiF 窗口界面位置, 即冲击波已通过整个孔洞区域, 说明孔洞排列方式不影响冲击波的传播速度; 另外, 也可以观察到冲击波传播完整个孔洞区域时, 所有孔洞未发生完全塌缩变形, 见 130 ns 时各个模型中孔洞的形貌。当冲击加载至 180 ns 时, 孔洞塌缩程度开始呈现不同的现象。随机排列和三角点阵模型中, 孔洞附近区域均已萌发裂纹, 并产生破碎颗粒; 在四角点阵模型中, 虽然孔洞附近区域已经萌发裂纹, 但有一列孔洞并未展开裂纹, 孔洞外壁没有被完全压缩破坏, 如图 4(b) 中 180 ns 时刻裂纹扩展的虚线框所示; 同样, 在递减、递增排列模型中部分孔洞外壁未被压缩损伤, 没有产生破碎颗粒, 与喻寅等^[26]的研究结论相似, 规则排列中孔洞与孔洞之间的损伤区域可以产生应力屏蔽响应, 使得一定范围内孔洞附近区域的损伤破坏受到抑制。由此可见, 四角点阵、递增排列和递减排列方式的孔洞结构能够有效减缓 PMMA 多孔材料内部孔洞区域的应力集中和孔洞塌缩变形速率, 其中四角点阵方式的孔洞结构影响效果最显著。

从图 4 中也可以观察到, 每种排列模型的孔洞纵向附近区域优先出现裂纹, 这是因为冲击波接触孔洞界面时反射稀疏波^[27], 稀疏波主要作用于孔洞横向附近区域, 从而降低横向区域的压应力, 导致孔洞纵向附近区域应力集中并产生裂纹。从理论公式上也可以分析出, 孔洞附近区域出现应力集中现象, 容易导致材料被压缩破坏。然而在冲击加载过程中应力集中并不是导致孔洞周围区域塌缩破坏的直接原因, 通常还与材料的剪应力有关。二维平面内的最大分解剪应力定义为^[23]

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \quad (7)$$

式中: σ_1 和 σ_2 为材料主应力。在理想的平面冲击状态下, 目标样品处于一维应变状态, 而且沿 x 轴和 y 轴的正应力 σ_x 、 σ_y 分别对应材料主应力 σ_1 和 σ_2 。最大分解剪应力 $\tau_{\max}$ 的方向与 x 轴的夹角约为 45°。可以观察到, 孔洞附近区域应力偏离一维应变状态, 主应力方向会偏离 x 轴和 y 轴, 因此需要根据 σ_x 、 σ_y 计算出两个主应力^[28], 即

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (9)$$

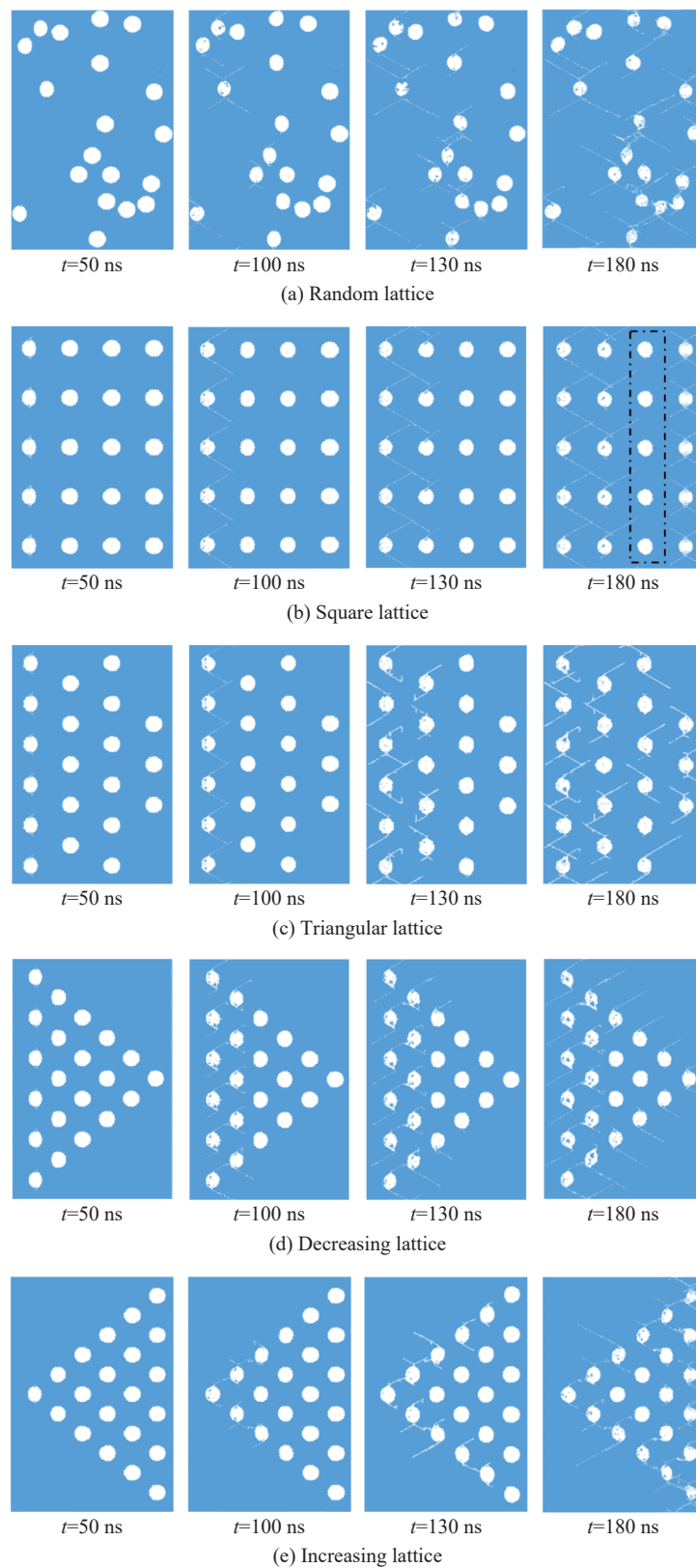


图 4 不同时刻下 5 种孔洞排列模型的裂纹扩展

Fig. 4 Crack growth patterns of five arrangement models of voids at various times

从图 5(a) 中的孔洞附近区域可以看到, 远离孔洞区域的剪应力很小, 且沿着远离孔洞区域扩展, 孔洞附近区域容易产生剪应力集中, 导致该区域的弹簧先达到断裂判据要求, 剪切裂纹从孔洞纵向区域向远离孔洞内部扩展。由 2.2 节中各个模型的应力分布可知, 部分孔洞周围区域应力达到 300 MPa, 而在图 4 对应的部分孔洞裂纹扩展图中并没有出现裂纹。这是因为单轴压缩下 PMMA 材料处于压剪复合状态, 且静水压力较低而剪切应力分量较大, 此刻 PMMA 材料发生断裂不是因为静水压力, 而是因为剪切应力达到了阈值。在本计算的冲击加载条件下, PMMA 多孔材料处于一维应变状态, 该状态下静水压力高, 而剪切应力分量小, 导致部分孔洞周围区域应力虽然达到 300 MPa, 但其对应的剪切应力分量(即切向弹簧中的剪切应变能)并未达到断裂阈值, 因此 PMMA 多孔材料中有部分孔洞并未出现裂纹。

随着冲击波的传播, 裂纹逐渐向远离孔洞内部方向扩展, 形成剪切裂纹, 孔洞周围区域受到剪切破坏; 且相邻孔洞之间的裂纹相互贯通, 加快了孔洞的塌缩变形, 破碎颗粒逐渐填满孔洞内部而达到材料密实化, 如图 5(b) 所示。

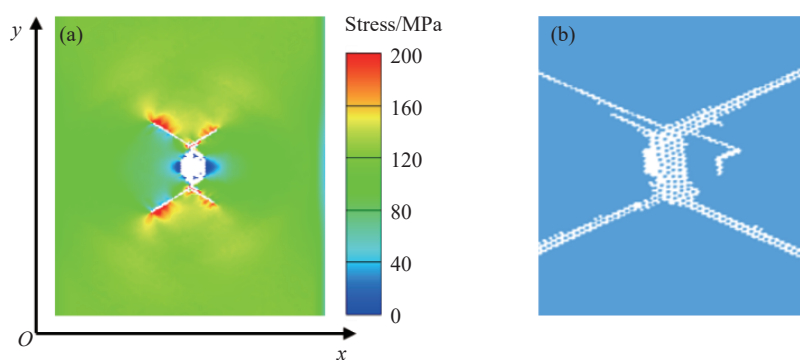


图 5 孔洞附近区域剪切裂纹 (a) 和颗粒破碎填充孔洞示意图 (b)

Fig. 5 Shear cracks in the area around the void (a) and schematic of particle-fragmentation-filled void (b)

2.2 孔洞附近区域的应力分布云图

图 6 记录了 5 种孔洞排列模型中孔洞附近区域早期被压缩损伤时沿冲击波方向(横向)的应力分布变化, 即沿 x 轴的正应力 σ_x 的分布。孔洞周围虽然存在应力集中和应力松弛区域, 但是都在冲击波平均应力幅值上下浮动, 冲击波应力很高, 本研究将平均冲击应力幅值设为正值。在 50 和 100 ns 时刻, 冲击波在 PMMA 多孔材料内传播, 可以清楚地观察到当冲击波扫过孔洞时, 每种模型中孔洞周围的应力分布不均匀, 横、纵向区域应力变化显著, 即孔洞横向区域应力低, 纵向区域应力高, 且应力集中于孔洞纵向区域。这是因为 PMMA 多孔材料在横向受到动态冲击加载时, 冲击波沿着 PMMA 多孔材料横向传播, 当冲击波传播到孔洞自由面时, 会反射稀疏波, 根据动量守恒定律, 稀疏波起卸载作用, 导致碰撞瞬间横向自由面区域应力迅速下降^[27]。这也解释了前面所述的裂纹萌发于孔洞纵向区域的现象。130 ns 时刻, 可以观察到四角点阵模型中同一层孔洞的横向区域是低应力区域且相互连通, 降低了 PMMA 多孔材料与窗口界面处应力, 影响了冲击波阵面的平整性。同样, 在该时刻, 三角点阵、递减排列、递增排列模型中, 靠近 PMMA 多孔材料与窗口界面处的孔洞引起波阵面不平整, 导致界面处应力不均匀且得到降低效果, 影响了 PMMA 多孔材料与窗口界面处粒子速度的大小。待到冲击加载经历 180 ns 后, 根据波阻抗匹配原理, 当冲击波从低阻抗材料传播到高阻抗材料界面时, 会反射比原冲击波速度更快的压缩波^[27], LiF 窗口材料的波阻抗远大于 PMMA 的波阻抗, 因此界面处会反射压缩波, 当压缩波在 PMMA 多孔材料中传播时, PMMA 多孔材料右端孔洞周围应力迅速升高, 进一步加快孔洞的压缩破坏。

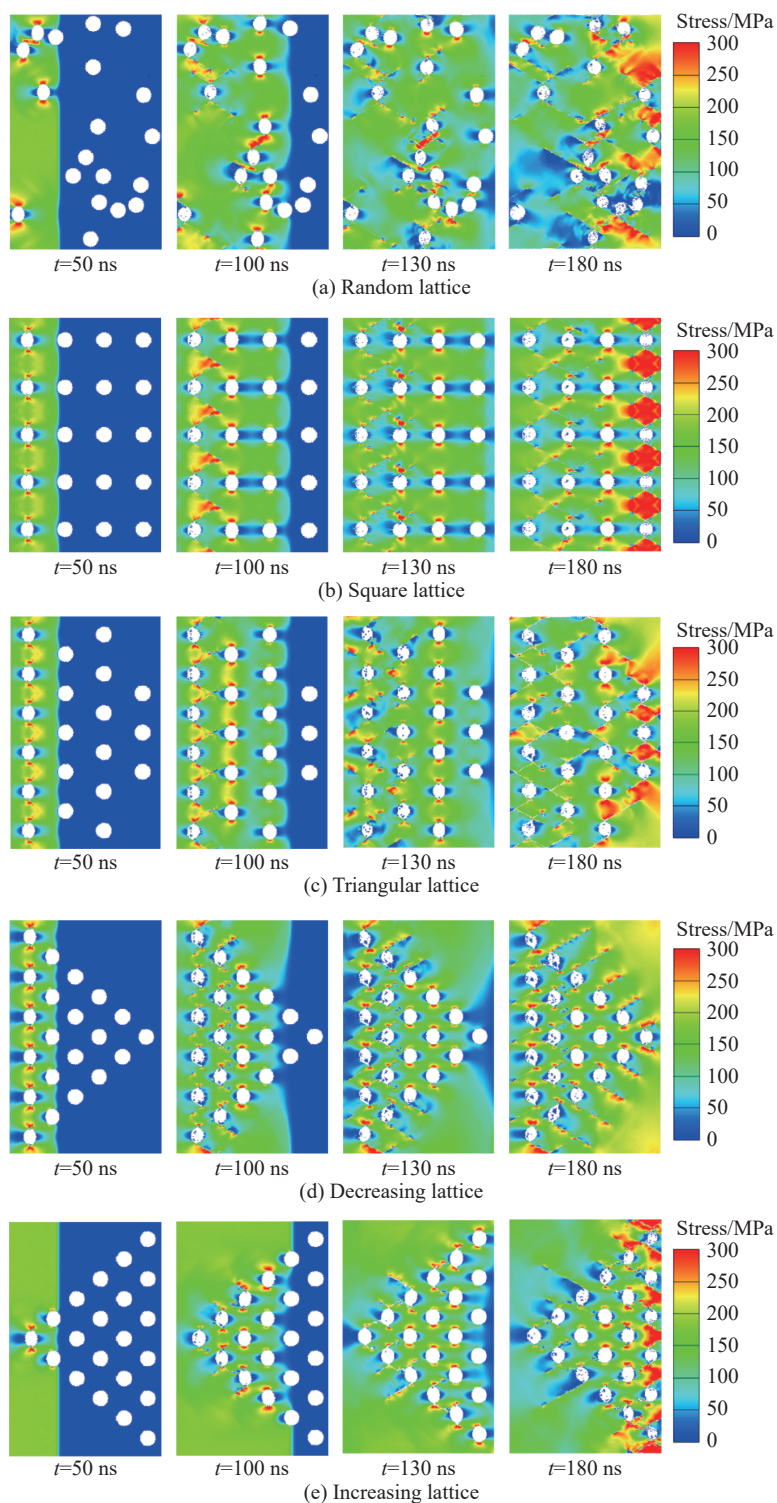


图 6 不同时刻 5 种孔洞排列模型的应力分布云图

Fig. 6 Stress distributions of five arrangement models of voids at various times

2.3 粒子速度剖面

图 7 显示了 5 种孔洞排列模型在目标样品与窗口界面处的宏观粒子速度剖面。从图 7 中可以观察到, 每种排列方式的 PMMA 多孔材料被完全压缩破坏后, 其粒子速度曲线均存在多个速度平台, 依次标记为 I、II、III、IV、V, 曲线整体呈阶梯式上升趋势。当冲击波第 1 次扫完孔洞并传播到 PMMA 多

孔材料与窗口界面时,因 LiF 窗口的阻抗高于 PMMA 的阻抗,将反射压缩波,使得该界面处粒子速度上升,同时因孔洞塌缩变形降低粒子速度导致第 I 平台的形成。同理,随着冲击时间的增加,对应的第 II、III、IV、V 平台都是由多种波系与孔洞结构相互作用形成,直到第 V 平台时,孔洞完全塌缩,孔洞内部被破碎颗粒填充密实化达到 Hugoniot 状态。虽然每种排列模型的粒子速度曲线趋势相同,但是对应每个阶段的平台速度大小却存在差异,且从第 II 平台开始,差异更显著,尤其是随机排列模型,其对应的粒子速度曲线都是最低的。同时不难发现,四角点阵模型对应的粒子速度曲线的第 I、II、III 平台左端有凸起,即每当多种波系作用于 PMMA 多孔材料与窗口界面时,粒子速度较快地升高而后降低形成平台。如前所述,这是因为规则的四角点阵排列结构左右两端孔洞受到损伤时产生的应力场区域可延缓中间孔洞损伤,进一步延缓孔洞的塌缩变形,导致多种波系作用于界面时延缓粒子速度的降低。

从 PMMA 多孔材料孔洞密实化到 Hugoniot 状态,可以看出,孔洞排布方式不同导致粒子速度各不相同,记录第 V 平台的平均粒子速度并列于表 2。从对应状态的应力云图中读取 PMMA 多孔材料与窗口界面附近区域的平均应力,也记录在表 2 中。从图 7 可以看到,引起第 I 平台升起时刻相同,即冲击波扫完各个孔洞排列模型中的孔洞后到达 PMMA 多孔材料与窗口界面位置的时间相同,表明孔洞排布结构不影响冲击波传播速度,但影响粒子速度。同时,PMMA 多孔材料的体积收缩,密度改变,也影响波阵面后压力。由表 2 中的数据可知,孔洞排列方式对 PMMA 多孔材料的粒子速度剖面 and 波阵面后压力的影响程度各不相同,其中孔洞的随机排列模型对降低粒子速度最有效,四角点阵排列模型对降低波阵面后压力贡献最大。因为当冲击波经过四角点阵孔洞区域后,每层 4 个孔洞均处于压缩状态,对于内侧的两列孔洞而言,左右两侧都受到其他孔洞的应力屏蔽影响,而对于外侧两列孔洞,左右两侧中有一侧受其他孔洞的应力屏蔽影响,另一侧承受密实材料区域的压缩,因此在早期孔洞损伤过程中,四角点阵中外侧两列孔洞附近区域出现相对严重的损伤裂纹,且随着时间的推移,外侧孔洞附近出现较严重的横向拉伸和剪切破坏而形成低应力区,对内侧两列孔洞起到明显的损伤屏蔽作用,从而达到降低波阵面后压力的作用^[26]。这说明通过孔洞排布设计,可以改变 PMMA 多孔材料的冲击响应行为。

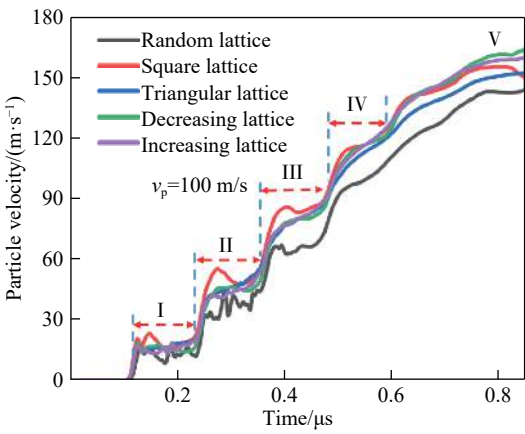


图 7 5 种孔洞排列模型的粒子速度剖面
Fig. 7 Particle velocity profiles of voids for five arrangement modes

表 2 5 种孔洞排列模型中的粒子速度与波阵面后应力

Table 2 Particle velocities and stresses in the five arrangements modes of void		
Modes	Particle velocity/(m·s ⁻¹)	Stress/MPa
Random lattice	142.6	56.11
Square lattice	155.0	29.74
Triangular lattice	151.5	62.84
Decreasing lattice	161.7	58.13
Increasing lattice	158.9	55.39

3 结 论

采用格点-弹簧模型,分析了 5 种孔洞排列方式下 PMMA 多孔材料的介观裂纹扩展与非弹性变形、应力变化特征以及宏观粒子速度剖面曲线,得到以下结论。

(1) 孔洞破坏形式以剪切断裂为主; 四角点阵排列模型能有效减缓孔洞附近区域的应力集中和孔洞非弹性变形; 在每种排列模型中均观察到了孔洞与孔洞之间的扩展裂纹相互贯通, 促进材料的密实化。

(2) 在各种排列模型中孔洞侧向(垂直于冲击方向)区域应力较低, 纵向(沿冲击方向)区域应力较高, 裂纹萌发于孔洞纵向区域; 四角点阵模型中同一层孔洞的侧向区域是相互连通的低应力区, 降低了界面处应力; 四角点阵、三角点阵、递减排列、递增排列模型都显著影响冲击波阵面的平整性。

(3) 孔洞排列方式不影响冲击波的传播速度(传播速度由总的孔隙率决定), 但影响粒子速度剖面和波阵面后压力; 孔洞的随机排列模型对降低粒子速度最有效, 四角点阵排列模型对降低波阵面后压力贡献最大。

参考文献:

- [1] HU L L, YU T X. Dynamic crushing strength of hexagonal honeycombs [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(5): 467–474.
- [2] SUN Y L, LI Q M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: a review of phenomenon, mechanism and modelling [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 112: 74–115.
- [3] DUAN Y, ZHAO X H, LIU Z Y, et al. Dynamic response of additively manufactured graded foams [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 183: 107630.
- [4] STAPF S. Porous materials: how molecules huddle in holes [J]. *Nature Physics*, 2006, 2(11): 731–732.
- [5] GUILLARD F, GOLSHAN P, SHEN L M, et al. Dynamic patterns of compaction in brittle porous media [J]. *Nature Physics*, 2015, 11(10): 835–838.
- [6] 许爱国, 张广财, 蔚喜军, 等. 冲击作用下多孔材料热力学特征的模拟与分析 [J]. *中国工程科学*, 2009, 11(9): 13–19.
XU A G, ZHANG G C, YU X J, et al. Simulation study of shock wave reaction on porous material [J]. *Engineering Sciences*, 2009, 11(9): 13–19.
- [7] SETCHELL R E. Shock wave compression of the ferroelectric ceramic $\text{Pb}_{0.99}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})_{0.98}\text{Nb}_{0.02}\text{O}_3$: microstructural effects [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(5): 053525.
- [8] BRANCH B, IONITA A, PATTERSON B M, et al. A comparison of shockwave dynamics in stochastic and periodic porous polymer architectures [J]. *Polymer*, 2019, 160: 325–337.
- [9] BRANCH B, IONITA A, CLEMENTS B E, et al. Controlling shockwave dynamics using architecture in periodic porous materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(13): 135102.
- [10] LIU Y, ZHANG X C. The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 98–109.
- [11] ZHENG Z J, YU J L, LI J R. Dynamic crushing of 2D cellular structures: a finite element study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1/2/3/4): 650–664.
- [12] ZHAO F P, WU H A, LUO S N. Microstructure effects on shock response of Cu nanofoams [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(7): 073501.
- [13] HERRING S D, GERMANN T C, GRØNBECH-JENSEN N. Effects of void size, density, and arrangement on deflagration and detonation sensitivity of a reactive empirical bond order high explosive [J]. *Physical Review B*, 2010, 82(21): 214108.
- [14] 姜太龙, 喻寅, 宦强, 等. 设计脆性材料的冲击塑性 [J]. *物理学报*, 2015, 64(18): 188301.
JIANG T L, YU Y, HUAN Q, et al. Shock plasticity design of brittle material [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(18): 188301.
- [15] 黄海军, 沈强, 罗国强, 等. 利用多层阻抗梯度飞片产生准等熵压缩的理论解析 [C]//第四届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 武夷山: 中国力学学会, 2006.
- [16] 杜艾, 周斌, 沈洋, 等. 激光准等熵压缩实验中阻抗梯度飞片的制备技术简介 [J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(11): 2158–2164.
DU A, ZHOU B, SHEN Y, et al. Brief introduction of fabrication technique for flier-plate with gradient wave impedance in laser-induced quasi-isentropic compression [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, 48(11): 2158–2164.
- [17] 朱婷. 基于 ABAQUS 软件的 PMMA 材料裂纹及其扩展研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016: 2–3.
ZHU T. Research on crack and propagation of PMMA material based on ABAQUS [D]. Changsha: Hunan University, 2016: 2–3.
- [18] 喻寅, 李媛媛, 贺红亮, 等. 脆性材料动态断裂的介观格子模型 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(3): 030106.

- YU Y, LI Y Y, HE H L, et al. Mesoscale lattice model for dynamic fracture of brittle materials [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(3): 030106.
- [19] YU Y, WANG W Q, CHEN K G, et al. Controllable fracture in shocked ceramics: shielding one region from severely fractured state with the sacrifice of another region [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 135: 137–147.
- [20] SULSKY D, ZHOU S J, SCHREYER H L. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics [J]. *Computer Physics Communications*, 1995, 87(1/2): 236–252.
- [21] SILLING S A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48(1): 175–209.
- [22] GUSEV A A. Finite element mapping for spring network representations of the mechanics of solids [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(3): 034302.
- [23] YU Y, WANG W Q, HE H L, et al. Mesoscopic deformation features of shocked porous ceramic: polycrystalline modeling and experimental observations [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(12): 125901.
- [24] LAWN B. 脆性固体断裂力学 [M]. 龚江宏, 译. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 4–5.
- [25] PHILLIPS D C, TETELMAN A S. The fracture toughness of fibre composites [J]. *Composites*, 1972, 3(5): 216–223.
- [26] 喻寅, 王文强, 杨佳, 等. 多孔脆性介质冲击波压缩破坏的细观机理和图像 [J]. *物理学报*, 2012, 61(4): 048103.
- YU Y, WANG W Q, YANG J, et al. Mesoscopic picture of fracture in porous brittle material under shock wave compression [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(4): 048103.
- [27] 谭华. 实验冲击波物理 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2018: 67–68.
- [28] 徐之纶. 弹性力学简明教程 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 145–147.

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

LUO Guoqiang¹, FEI Xihuan¹, YU Yin², ZHANG Ruizhi¹, ZHANG Chengcheng¹, SHEN Qiang¹

(1. *State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;*

2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: Cellular materials, characterized by their light weight and energy absorbing, etc., have broad potential applications in the fields of loading-path control, explosion and impact protection. In this paper, the discrete element method of lattice-spring model is utilized to simulate the early impact response of PMMA cellular materials with different arrangement models of voids during the impact loading process. The early void collapse failure, stress distribution and particle velocity of materials with various arrangement models are investigated. Our results show that the arrangement of voids affect the particle velocity but not the shock wave velocity. The cracks are germinated in the area near the longitudinal direction of the void, and the failure mode of the void is mainly shear failure. In different arrangement models of voids, there is a phenomenon of shear cracks interpenetrating between the holes, which promotes the compression of the volume. The square lattice and triangular lattice arrangement models prominently slow the stress concentration and plastic deformation rate of voids in the nearby area. The square lattice, triangular lattice, decreasing arrangement and increasing arrangement significantly have a remarkable influence on the flatness of the shock wave front of PMMA cellular materials. The random arrangement is the most effective one to reduce the particle velocity, and the square lattice contributes most to the post-pressure reduction of the wave front.

Keywords: cellular materials; arrangement model of voids; shock wave; impact loading