

多孔脆性介质冲击波压缩破坏的细观机理和图像*

喻寅¹⁾²⁾ 王文强²⁾ 杨佳²⁾ 张友君²⁾ 蒋冬冬²⁾ 贺红亮^{2)†}

1) (四川大学物理学院辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064)

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实验室, 绵阳 621900)

(2011年7月12日收到; 2011年8月14日收到修改稿)

本文采用一种具有良好定量性质的离散元模型研究了带孔洞的各向同性脆性介质在细观尺度上的压缩破坏特征. 通过对孤立孔洞、三种简单的孔洞排布方式和大量孔洞随机排布等几种情况的模拟, 认识到了剪切破坏和局域拉伸破坏是冲击波压缩下多孔介质的基本破坏模式; 孔洞之间的损伤贯通会促进孔洞在较低应力下发生塌缩, 但损伤区的应力松弛过程却会对一定范围内的介质起到损伤屏蔽作用; 不同区域中损伤促进和损伤屏蔽的综合效果是在多孔脆性介质中形成一种高损伤区与低损伤区间错排布的奇特损伤分布. 本文的研究结果为深入理解脆性材料冲击波压缩破坏的演化过程和机理提供了细观尺度上的初步物理图像.

关键词: 脆性介质, 冲击波, 压缩破坏, 孔洞

PACS: 81.05.Rm, 62.50.Ef, 62.25.Mn

1 引言

脆性材料在人类生产生活的各个领域中都发挥着重要的作用, 在工程应用中延长其使用寿命, 避免其功能失效的发生始终是研究者们不懈努力的目标. 冲击波压缩下脆性材料通常会表现出独特的力学、电学失效现象, 制约着这些材料潜在的应用前景. 例如, 在一定的冲击波加载条件下某些玻璃、岩石之中会形成奇特的破坏波^[1-4], 受破坏区域成为低声阻抗区, 剪切模量显著降低; 石英、铌酸锂等电介质在冲击波加载下的电击穿强度不足常压下的10%^[5], 击穿强度的下降与晶体缺陷和冲击波引起的剪切效应有关; 蓝宝石、铁橄榄石等在常压下均为绝缘体, 但实验测量表明在一定的冲击波压缩条件下它们都将会表现出电阻率的显著降低^[6,7], 成为半导体甚至导体. 动高压领域的研究者们长期以来都在尝试深入地理解这类现象, 但限于实验观测的困难和现象本身的复杂性, 目前对脆性材料冲击波压缩过程中各种奇特现象的物理机理的认识仍然十分有限.

实际的材料总会不可避免地带有各种类型的缺陷, 孔洞是脆性材料中最常见的结构缺陷之一. 某些陶瓷在制备过程中难以被烧结成为完全密实的样品. 有时出于工程应用的需要, 还特意会将样品制备成为多孔介质. 例如 PZT 铁电陶瓷是一种难以烧结致密的功能陶瓷, 成品的气孔率约为 4%. 它具有极高的剩余极化强度和储能密度, 受冲击波压缩后发生铁电—反铁电相变, 在几微秒的时间内释放出大量电荷, 因而成为了爆电换能器的优选材料^[8]. Sandia 国家实验室的 Setchell^[9-11] 等人多年来一直致力于探索这种陶瓷在冲击波压缩下的力学响应和放电性能. 他们制备的标准样品气孔率约 4.3%, 通过加入造孔剂, 还制备出了气孔率约 5.5%, 8.8%, 13.2% 的各种样品. 通过大量冲击波实验, Setchell 等已经积累了充足的实验数据, 并已得出了冲击波压缩下孔洞对 PZT 陶瓷力学和电学性能影响的宏观规律性认识. 但在细观尺度上孔洞作为一种结构缺陷如何影响到脆性介质的抗冲击能力, 多孔脆性介质内部会出现什么形式的损伤破坏, 孔洞诱导的损伤是怎样演化为试件整体的力学

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号:2010A0201005) 和冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金 (批准号:9140C6711021007) 资助的课题.

† E-mail: honglianghe@263.net

或电学失效, 这些却是难以由实验观测回答的问题.

本文着眼于探索孔洞对脆性介质抗冲击性能的影响, 通过离散元方法 (discrete element method, DEM) 建模, 探讨了多孔的各向同性脆性介质受冲击波压缩破坏的细观机理和图像, 包括: 1) 冲击波压缩下的基本破坏模式; 2) 孔洞对损伤演化的促进和屏蔽作用; 3) 多孔介质的损伤分布特征.

2 离散元模型的构型

离散元方法能否真实地表现实际材料的力学性质, 关键在于模型中力学参数的选取. 2004年 Gusev^[12] 报道了一种将有限元参数映射到离散元模型中的方法, 可以被应用到二维、三维的任何几何拓扑结构的离散元模型中, 定量地模拟均匀或非均匀的固体介质. 但在其文章中只介绍了采用中心力场的离散元模型, 即微元间只具有拉伸、压缩作用, 而没有考虑剪切作用的贡献. 我们以 Gusev 的方法为基本思想推导并建立起了一种完整地包含了法向、切向作用力的有限元 - 离散元参数映射方法^[13], 可以将实际材料的弹性刚度张量严格地换算为离散元模型中微元间的法向和切向弹簧弹性系数, 从而使模型具备定量表现脆性材料力学性质的能力.

本文对这一参数选定方法的可靠性做过检验: 参考常见陶瓷材料的性能参数, 我们假想了一种杨氏模量 250 GPa, 泊松比 0.2, 密度 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的“模型材料”. 由杨氏模量和泊松比换算出剪切模量约为 104 GPa. 设定气孔率分别为 0%, 2%, 4%, 6%, 8% 和 10% 的均匀各向同性样品, 通过参数映射方法将预设的“模型材料”弹性模量映射转换为弹簧弹性系数并加入样品中. 对样品进行应变量为 0.001 的准静态拉伸和压缩加载, 并记录其应力 - 应变曲线, 如图 1(a) 所示. 可以看出密实样品的杨氏模量约为 251 GPa, 与预设值基本一致. 通过动态模拟可以得出各个样品的横波声速, 进而可得到剪切模量. 从密实样品中得出的剪切模量为 105 GPa, 也与预设值相符. 随着气孔率增加, 样品的杨氏模量和剪切模量都相应地降低. 在流体静水压下岩石中球形孔洞对其弹性性质的影响可以用下式估算^[14]:

$$\beta_{\text{eff}} = \beta_s \left(1 + \frac{3(1 - \nu_s)}{2(1 - 2\nu_s)} \frac{\eta}{1 - \eta} \right), \quad (1)$$

其中 β_s 表示密实样品的压缩系数, β_{eff} 为多孔样品的有效压缩系数, 压缩系数是体弹模量的倒数, ν_s 为密实样品的泊松比, η 表示气孔率. 我们用上式来近似预测多孔脆性介质宏观上的弹性性质, 由准静态计算中得出的杨氏模量和 (1) 式算出的有效压缩系数可以换算出不同气孔率样品的剪切模量. 图 1(b) 展示了预测值与通过样品横波声速得出的剪切模量之间作了归一化之后的对比. 两者的差异在可接受的范围内, 这表明了本文的模型具有定量表现密实和多孔脆性介质力学性质的能力.

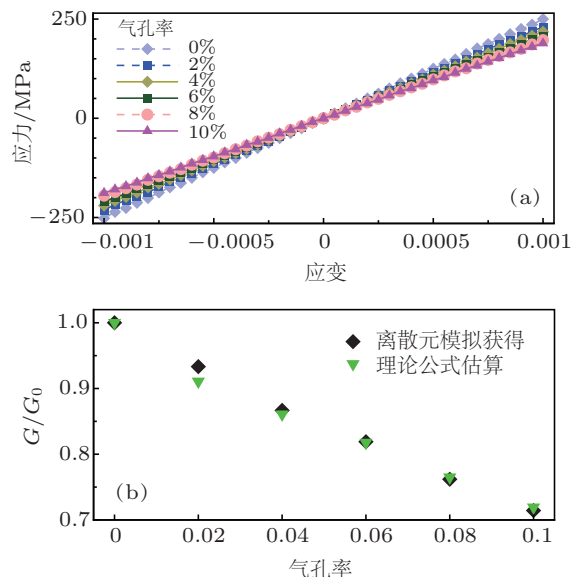


图 1 气孔率 0—10% 的均匀各向同性样品的 (a) 拉伸、压缩应力 - 应变关系和 (b) 理论预测与离散元模型计算得出的剪切模量归一化后的比较

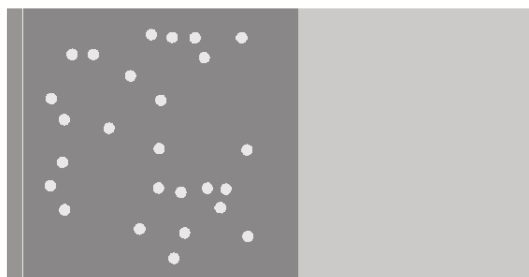


图 2 “冲击波计算机实验”的构型 (左侧为活塞; 中部为多孔脆性介质样品; 右侧为保压“窗口”. 活塞、样品和窗口均为同种材料, 但样品中带有孔洞. 上下两侧采用周期性边界条件)

本文采用如图 2 所示的“冲击波计算机实验”构型来研究冲击波压缩下多孔脆性介质的损伤演化特征. 图中左侧为一个以恒定速度 $v_p = 50 \text{ m/s}$ 向右运动的活塞; 活塞推动中间的多孔介质产生一个向右方传播的冲击波. 由于活塞是以恒定的速度推

动样品运动, 故在理想情况下样品中的粒子速度即等于活塞速度, 由此可以估算出冲击加载的应力约为 1.8 GPa. 为了避免样品后界面反射稀疏波的干扰, 在右侧加了一个足够长的“窗口”, 以保证在观测的时间段内多孔介质始终是处于压缩状态. 活塞、样品和窗口均为同种材料, 但活塞和窗口为密实介质, 样品为多孔介质. 模型的上下两侧使用了周期性边界条件以避免边侧稀疏波的干扰. 在下文中我们将冲击波传播方向简称为轴向, 将垂直于冲击波传播方向简称为横向. 样品之中设置了三类孔洞排布方式: 1) 样品中只有一个孤立圆形孔洞; 2) 样品中有四个孔洞按不同几何位置排列成三种有代表性的孔洞分布; 3) 样品中随机排布了大量孔洞, 气孔率为 4%. 所有样品中孔洞的直径均为 20 μm .

3 多孔脆性介质压缩破坏的细观机理和图像

一种材料要发生失效破坏, 必然会先经受一定程度的变形. 对于完美均匀的介质, 平面冲击波扫过之后样品在整体上处于一维应变状态. 如果不存在拉伸和剪切变形, 冲击波如何能在较低的冲击应力下将介质破坏呢? 关键在于介质中总是不可避免地带有各种结构缺陷, 虽然宏观上可近似视为一维应变压缩状态, 但细观尺度上结构缺陷周围却可以出现局域的拉伸和剪切变形, 介质的破坏也正是从这些缺陷区域萌生. 我们将分三类孔洞排布方式来逐步探讨孔洞对脆性介质冲击波压缩破坏的影响, 其他形式的结构缺陷如微裂纹、晶界、异质第二相等在本文中尚未考虑.

3.1 冲击波压缩破坏的基本模式

在二维情况下各向同性脆性材料的弹性本构关系可以表示为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{11} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

其中 C_{11} , C_{12} , C_{66} 为刚度张量的分量, 其中只有两个独立变量, 可由杨氏模量 E 和剪切模量 G 确定. 根据上式可以写出横向拉伸应力 σ_y 和最大分解

剪应力 τ_m ,

$$\begin{aligned} \sigma_y &= C_{12}\varepsilon_x + C_{11}\varepsilon_y, \\ \tau_m &= (C_{11} - C_{12})(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2. \end{aligned} \quad (3)$$

如果是在孔洞附近, 由于可以存在局域的横向拉伸, 横向拉伸应变 $\varepsilon_y > 0$; 如果是在远离孔洞的均匀区域, 仍保持一维应变状态, $\varepsilon_y = 0$. 由此可以定性地看出, 如果不存在孔洞, 介质中不可能出现横向拉伸破坏, 剪切破坏也要在加载应力高于材料的 σ_{HEL} 之后才有可能出现. 但如果存在孔洞, 则孔洞附近的介质可以在远低于 σ_{HEL} 的冲击应力下发生拉伸和剪切破坏.

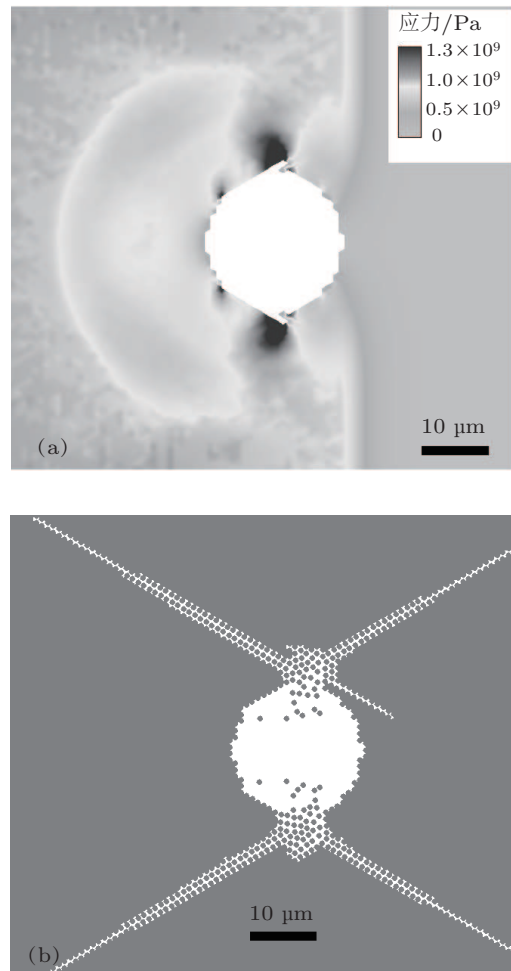


图 3 孤立孔洞的模拟结果 (a) 冲击波刚扫过孔洞时垂直于冲击波传播方向的应力分布; (b) 达到稳定的损伤演化情况, 孔洞附近出现了剪切破坏和局域拉伸破坏

图 3 展示了对带有孤立孔洞样品的模拟结果. 图 3(a) 为冲击波刚扫过孔洞时横向应力的分布情况. 孔洞右侧的深、浅色分界线即为冲击波阵面; 孔洞左侧的半圆形浅色区域对应着从孔洞边缘反射回的稀疏波; 在垂直于冲击波压缩方向上孔洞两

侧出现了明显的应力集中. 图 3(b) 展示了达到稳定后的介质损伤情况. 由于活塞是以 50 m/s 的速度推动样品, 产生的轴向应力峰值约为 1.8 GPa, 不足以使孔洞完全塌缩. 可以看出在孔洞两侧的应力集中区域中出现了拉伸破坏, 但这种破坏只停留在一个局域之内; 而由分剪应力导致的剪切破坏却可以向远离孔洞的区域伸展开. 这种能够作远距离扩展的剪切破坏模式在相关文献中被称为“剪切带”^[15,16], 但要说明的是脆性材料中的所谓“剪切带”与延性金属中存在的剪切带有着极大的区别. 脆性材料的剪切带本质上对应着一个断裂面两侧介质的相对摩擦滑动, 而延性金属中的剪切带通常不是断裂面, 其带内的金属发生了巨大的局域应变且常伴随有升温熔化, 带外两侧介质依靠带内的局域大变形而实现相对滑动.

通过以上的模拟和分析可知, 剪切破坏和局域拉伸断裂是多孔脆性介质的两种基本破坏模式. 局域拉伸主要发生在垂直于冲击波传播方向的孔洞边缘上, 剪切带也是在同样的位置出现并向四个方向扩展. 下文中将探讨这两种基本破坏模式对三种有代表性的孔洞排布方式的不同影响.

3.2 孔洞对损伤演化的促进和屏蔽作用

我们设置了一组长为 250 μm 的模型, 在其中加入四个孔洞, 排列方式分别为垂直一列、水平一行、以 45° 倾角排成折线形. 图 4 展示了两种几何构型的模型经受冲击波压缩后的损伤演化情况. 图 4(a) 为垂直排成一列的四个孔洞在初期的损伤情况, 孔洞周围出现了局部拉伸断裂和剪切带. 垂直排列的几何构型显著地增强了孔洞上下两侧的应力集中, 加剧了局域拉伸破坏. 被强化

的横向拉伸破坏使得孔洞之间形成了贯通的损伤带. 一旦损伤相互贯通, 孔洞就会很容易地塌缩掉, 破碎颗粒将填满孔洞所在位置, 如图 4(b) 所示. 图 4(c) 为以 45° 倾角排成折线形的四个孔洞初期的损伤情况. 可以看出在这种几何构型下剪切带比局域拉伸破坏更容易发展. 当剪切带将孔洞相互贯通之后孔洞发生完全塌缩, 如图 4(d) 所示. 由于在模拟中对上下边界运用了周期性边界条件, 当介质的损伤扩展超出了上 (或下) 边界后, 就会从下 (或上) 边界重新进入样品并继续扩展, 例如图 4(d) 中右侧的两条剪切带, 它们从上边界伸展出样品, 又从下边界进入.

以上两种情况中孔洞之间的损伤带相互贯通, 使得孔洞在相对较低的 1.8 GPa 峰值应力下就发生了完全塌缩, 表现了孔洞对损伤演化的促进作用. 图 5 展示了四个孔洞水平排成一列时的损伤和轴向应力分布情况. 当冲击波阵面扫过样品后, 四个孔洞均处在压缩状态, 但对内侧的两个孔洞而言, 其左右两侧都受到其他孔洞的应力屏蔽; 而对外侧的两个孔洞, 左右两侧中有一侧受其他孔洞的应力屏蔽, 另一侧则要承受密实介质的压缩. 所以在初期的损伤演化中外侧两个孔洞附近将会出现相对更严重的损伤. 且随着损伤的逐步演化, 外侧孔洞附近发展出的较严重的横向拉伸和剪切破坏将导致一个低应力区的形成 (图 5 中部浅色区域), 从而对内侧孔洞起到更为明显的损伤屏蔽作用.

综合以上讨论可知, 如果孔洞之间形成了贯通的损伤带, 则多孔介质中的损伤演化将会受到促进; 另一方面, 孔洞及其附近的损伤区域可以产生应力屏蔽的效应, 使得一定范围内介质的损伤演化受到抑制.

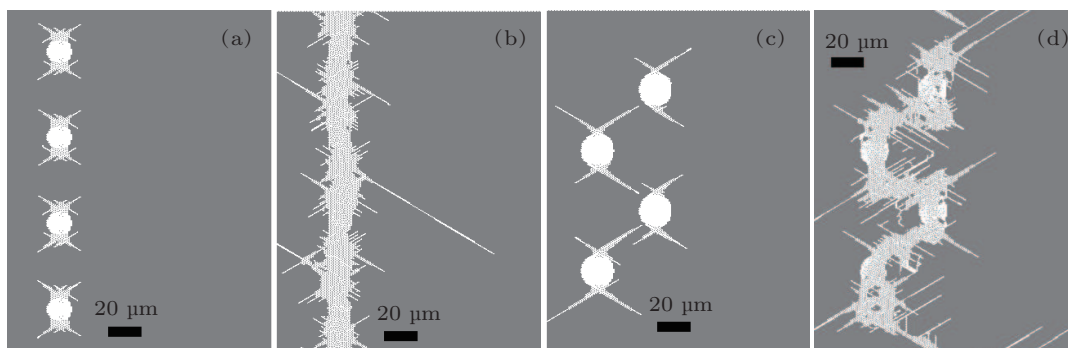


图 4 两种几何构型下样品的损伤演化 (a) 和 (b) 分别为孔洞垂直排成一列时样品初期和后期的损伤情况; (c) 和 (d) 分别为孔洞以 45° 角排成折线形时样品初期和后期的损伤情况. 损伤带贯通促进了孔洞的塌缩

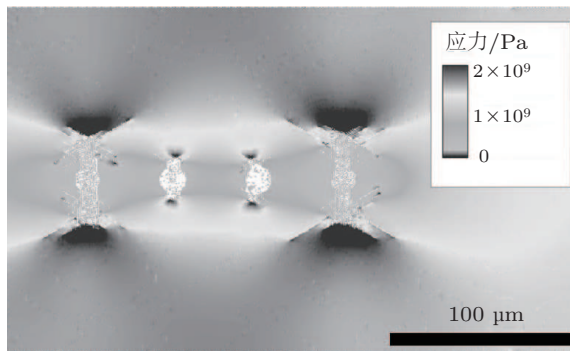


图5 孔洞水平排成一行时样品的损伤情况. 外侧两个孔洞附近出现的损伤形成了一个低应力区, 对内侧孔洞起到了损伤屏蔽作用

3.3 多孔介质的损伤分布

如果模型中孔洞的排布是完全随机的, 不同区域的孔洞间几何排列关系就可能类似于上述三种简单情况中的一种. 这种情况下孔洞对损伤演化的促进和屏蔽作用将会导致奇特的损伤分布特征. 图6(a)展示了一个长为 $500\ \mu\text{m}$, 气孔率为4%的样品在冲击波压缩下的损伤分布情况. 可以看出一部分区域中出现了贯通的损伤带, 带内的孔洞正在塌缩. 但在很多未被损伤带贯通的孔洞周围只出现了较轻微的损伤. 孔洞塌缩的过程同时也是一个内应力释放的过程, 在一个孔洞被完全压实之前, 其附近破碎的介质颗粒总可以通过向孔洞中剩余的空间移动来将应力释放掉. 塌缩孔洞附近的应力释放以及剪切带两侧介质相对滑动导致的应力松弛, 使得损伤带附近一定范围内的多孔介质能够暂时地处于临界破坏应力之下. 直到损伤带中的孔洞完全塌缩, 这一区域被重新压实, 应力才会回升. 一条损伤带所能屏蔽出的低应力区范围是有限的, 在这一范围之外又会出现另一区域的孔洞间损伤贯通、损伤带内孔洞塌缩和损伤带附近应力屏蔽. 损伤的促进和屏蔽在空间上分布于不同区域, 在逻辑上是因果关系, 在时间上则是先后出现.

图6(b)中展示了一个长为 $4\ \text{mm}$, 气孔率为4%的样品中的损伤分布情况. 纵坐标为损伤度, 定义为模型的一个区域中破坏的键与模拟前该区域总键数的比值. 在模拟之前孔洞是均匀随机地分布在整个样品中, 但在冲击波压缩之后被损伤带连通的孔洞塌缩, 未被连通的孔洞基本完好, 于是形成了一种高损伤区与低损伤区间错排布的奇特破坏形式. 只有当冲击波压缩维持的时间足够长后, 多孔脆性介质中的孔洞才会全部塌缩.

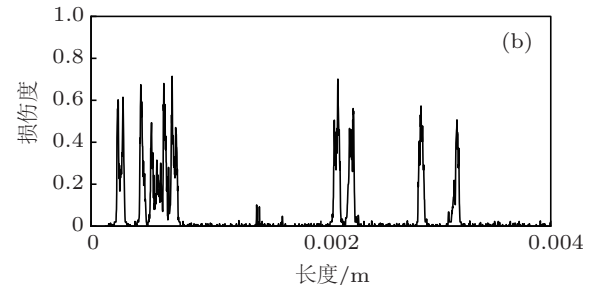
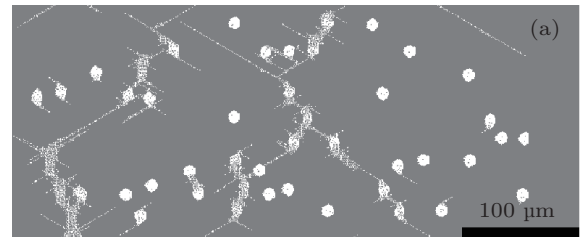


图6 (a) 长为 $500\ \mu\text{m}$ 的多孔脆性介质中的损伤分布, 一部分孔洞被损伤带贯通并塌缩, 一部分孔洞只受轻微损伤; (b) 长为 $4\ \text{mm}$ 的孔洞均匀随机分布的脆性介质中出现了高损伤区与低损伤区的交错分布

4 讨论

2009年邓小良等^[17]用分子动力学模拟研究了冲击波拉伸作用下单晶铜中双孔洞间的贯通过程, 发现在相同的冲击加载强度下, $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 30^\circ$ 的孔洞之间没有相互贯通; 而在 $\theta = 60^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的孔洞之间观察到了贯通现象. 这说明不论是在细观还是微观尺度上, 孔洞的几何排布都显著地影响着介质的损伤程度和损伤特征.

2007年Belytschko^[18]用扩展的有限元方法研究了准静态拉伸加载中脆性介质内大量随机分布的微裂纹对一条宏观主裂纹应力分布的影响. 一条微裂纹根据与主裂纹的距离和夹角的不同, 可以对主裂纹尖端的应力强度因子起到屏蔽或放大作用. 当主裂纹尖端应力场受到的影响足够强时, 主裂纹的扩展方向就有可能发生改变. 可见, 微裂纹和孔洞等各种细观结构缺陷都普遍地对脆性介质的损伤演化起着促进或屏蔽作用.

材料在宏观尺度上的性质是由细观尺度基质的性质和基质组合成的细观结构共同决定的, 孔洞对脆性材料宏观力学性质的突出影响即是细观结构决定宏观性质的典型例证. 但孔洞对脆性介质抗冲击能力的影响又并非是孤立孔洞贡献的线性叠加, 而是与孔洞间的几何排布密切相关. 贯通的损伤带在促进带内孔洞塌缩和屏蔽带外介质损伤两方面都起到了关键的作用. 因此我们认为, 对孤立

孔洞的理论建模, 以及宏观尺度的连续介质力学计算可能都不足以有效地表现出多孔脆性介质的损伤演化特征. 细观尺度的计算机模拟将是研究脆性材料冲击波压缩破坏的一种难以替代的方法.

5 结论

本文采用一种具有良好定量性质的离散元模型对带有孔洞的各向同性脆性介质进行了“冲击波计算机实验”, 得到了冲击波压缩下多孔脆性介质损伤破坏的细观机理和图像: 1) 在一维

应变压缩状态下, 孔洞附近的局域拉伸破坏和可远距离扩展的剪切破坏是多孔脆性介质中的基本破坏模式; 2) 孔洞之间的贯通损伤带会促进孔洞在较低应力下塌缩; 但孔洞塌缩和剪切带两侧介质的相对滑动等弛豫过程可以在一定范围内产生低应力区, 进而抑制该区域内的损伤演化; 3) 多孔脆性介质在较低应力的冲击波压缩下会形成一种高损伤区与低损伤区间错排布的奇特破坏形式, 并不是所有孔洞都会完全塌缩. 本文的研究结果为后续工作中对多孔陶瓷冲击波压缩破坏的深入研究提供了初步的物理认识.

-
- [1] Rasorenov S V, Kanel G I, Fortov V E 1991 *High Pressure Research* **6** 225
- [2] Bourne N K, Rosenberg Z, Field J E 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 3736
- [3] Grady D E 1980 *J. Geophys. Research* **85** 913
- [4] Jeanloz R 1980 *J. Geophys. Research* **85** 3161
- [5] Graham R A (Translated by He H L) 2010 *Solids Under High-Pressure Shock Compression* (Beijing: Science Press) p79 (in Chinese) [格拉汉姆 R. A. 著贺红亮译 2010 固体的冲击波压缩 (北京: 科学出版社) 第 79 页]
- [6] Weir S T, Mitchell A C, Nellis W J 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 1522
- [7] Mashimo T, Kondo K I, Sawaoka A 1980 *J. Geophys. Res.* **85** 1876
- [8] Zhang F P, Du J M, Liu Y S, Liu Y, Liu G M, He H L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 057701 (in Chinese) [张福平, 杜金梅, 刘雨生, 刘艺, 刘高旻, 贺红亮 2011 物理学报 **60** 057701]
- [9] Setchell R E 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 573
- [10] Setchell R E 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 3507
- [11] Setchell R E 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 053525
- [12] Gusev A A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 034302
- [13] Yu Y, He H L, Wang W Q 2011 *Proceedings of China mechanics - 2011 Haerbing, China, August 22-24, 2011* p144 (in Chinese) [喻寅, 贺红亮, 王文强 2011 中国力学大会 -2011 哈尔滨 8 月 22-24 日 2011 年] 第 144 页
- [14] Chen Y, Huang T F 2001 *Rock Physics* (Beijing: Beijing University Press) p80 (in Chinese) [陈颢, 黄庭芳 2001 岩石物理学 (北京: 北京大学出版社) 第 80 页]
- [15] Wada T, Inoue A, Greer A L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 251907
- [16] Wang Y C, Mora P 2008 *Pure Appl. Geophys.* **165** 609
- [17] Deng X L, Zhu W J, Song Z F, He H L, Jing F Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4772 (in Chinese) [邓小良, 祝文军, 宋振飞, 贺红亮, 经福谦 2009 物理学报 **58** 4772]
- [18] Belytschko T 2007 *Int. J. Fract.* **145** 1

Mesoscopic picture of fracture in porous brittle material under shock wave compression*

Yu Yin¹⁾²⁾ Wang Wen-Qiang²⁾ Yang Jia²⁾ Zhang You-Jun²⁾
Jiang Dong-Dong²⁾ He Hong-Liang^{2)†}

1) (*Department of Physics and Key Laboratory for Radiation Physics and Technology of Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

2) (*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 12 July 2011; revised manuscript received 14 August 2011)

Abstract

Void is one of the most common type of structure flaws existing in brittle materials, which dramatically affects the shock loading response of brittle materials. A quantitative discrete element method is employed in this work to study the fracture characteristics of porous isotropic brittle material under shock wave compression. Scenarios of isolated void, three types of simple distribution and random distribution of voids are computed, from which we find that shear fracture and local tensile fracture are two type of basic fracture modes for brittle material under shock wave compression. Coalescence of damage bands between voids can induce the collapse of voids at relatively low pressure, while stress relaxation caused by damage can shield fracture evolution in a certain zone. The combination of amplification and shielding effects of damage results in a unique pattern of alternate distribution of severe and mild damage zones. These simulation results present a basic physics picture for the understanding of evolution process and mechanism of fracture in porous brittle material under shock wave compression.

Keywords: brittle material, shock wave, compressive failure, void

PACS: 81.05.Rm, 62.50.Ef, 62.25.Mn

* Project supported by the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics, China (Grant No. 2010A0201005), and the Science and Technology Foundation of State Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics (Grant No. 9140C6711021007).

† E-mail: honglianghe@263.net