

设计脆性材料的冲击塑性

姜太龙 喻寅 宦强 李永强 贺红亮

Shock plasticity design of brittle material

Jiang Tai-Long Yu Yin Huan Qiang Li Yong-Qiang He Hong-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 188301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.188301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.188301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

数字剪切散斑干涉法研究铝合金中 Portevin-Le Chatelier 带的离面变形行为

Digital shearography investigation on the out-plane deformation of the Portevin-Le Chatelier bands

物理学报.2014, 63(6): 066201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.066201>

多晶银纳米线拉伸变形的分子动力学模拟研究

Molecular dynamics simulation of polycrystal silver nanowires under tensile deformation

物理学报.2014, 63(1): 016201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.016201>

具有形状记忆效应的新型智能阻尼材料及其热弹性力学性能研究

Research on the shape memory effect and thermalelasticity of a novel intellectual damping material

物理学报.2012, 61(16): 168102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.168102>

基于分形多孔介质三维网络模型的非混溶两相流驱替数值模拟

Numerical simulations of immiscible two-phase flow displacement based on 3D network model for fractal porous media

物理学报.2011, 60(9): 098103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.098103>

析出相在铝镁合金 Portevin-Le Chatelier 效应中的作用研究

Effect of precipitation on Portevin-Le Chateliereffect in Al-Mg alloys

物理学报.2011, 60(9): 096201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.096201>

## 设计脆性材料的冲击塑性\*

姜太龙<sup>1)2)</sup> 喻寅<sup>2)</sup> 宦强<sup>1)</sup> 李永强<sup>1)†</sup> 贺红亮<sup>2)‡</sup>

1)(东北大学理学院, 沈阳 110819)

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)

(2015年1月9日收到; 2015年3月31日收到修改稿)

通过微结构设计提升脆性功能材料的冲击塑性, 将有助于避免或延缓失效的发生. 提出在脆性材料中植入特定的微小孔洞以改善其冲击塑性的设计方法. 采用一种能够定量表现脆性材料力学性质的格点-弹簧模型, 研究了孔洞排布方式对脆性材料冲击响应的影响. 孔洞随机排布的多孔脆性材料具有明显高于致密脆性材料的冲击塑性, 而设计规则的孔洞排布方式将有助于进一步提升脆性材料的冲击塑性. 对 150 m/s 活塞冲击下气孔率 5% 的多孔样品的介观变形特征分析表明, 孔洞规则排布的样品中孔洞贯通和体积收缩变形占主导, 而孔洞随机排布的样品中剪切裂纹长距离扩展和滑移与转动变形占主导. 尽管在宏观的 Hugoniot 应力-应变曲线上, 两种孔洞排布方式的样品都表现出三段式响应特征(线弹性阶段、塌缩变形阶段和滑移与转动变形阶段), 但孔洞规则排布时孔洞塌缩变形阶段对整体冲击塑性的贡献更大. 研究揭示的规则排布孔洞增强脆性材料冲击塑性的原理, 将有助于脆性材料冲击诱导功能失效的预防.

关键词: 脆性材料, 孔洞排布, 介观变形, 冲击响应

PACS: 83.60.Uv, 81.05.Rm, 62.20.F-

DOI: 10.7498/aps.64.188301

## 1 引言

通过微结构设计, 可以在不改变材料原始组分的条件下显著地提升材料的力学性能. 具有高硬度、高强度等优点的陶瓷和金属玻璃等功能材料, 由于断裂韧性低、塑性变形能力差等缺点, 一旦受到强冲击作用就将导致灾难性失效<sup>[1-3]</sup>, 严重地制约着这类功能材料的正常使用. 在材料内部设计和制备新颖的微结构, 已成为既保持材料的原有应用功能、又能显著提高材料防冲击失效能力的有效途径之一.

在准静态加载条件下, 通过引入微结构(孔洞、第二相颗粒、弱界面等)来有效增强脆性材料塑性和韧性的研究已有大量报道. 原本塑性应变几乎为零的高强度金属玻璃, 在内部引入孔洞之后获得

了显著的宏观压缩和拉伸塑性<sup>[4-6]</sup>. 从硬且韧的生物材料结构中得到启发, 利用激光刻蚀技术在玻璃中形成的波浪形弱界面, 能够将普通玻璃的断裂韧性提高 200 倍<sup>[7]</sup>. 在冲击加载条件下, 通过实验测量或计算机模拟获得的冲击波剖面能够反映材料的冲击响应特性<sup>[1,8-10]</sup>. Setchell<sup>[11-13]</sup> 的冲击波实验研究表明, 引入随机排布的微孔洞可以使脆性材料的冲击波剖面展现出代表冲击塑性显著增强的“变形波”. 通过准确控制脆性材料中的气孔率、孔洞大小和形貌, 已经开展了大量的计算机模拟并用于研究随机排布的微孔洞对脆性材料冲击响应的影响<sup>[14,15]</sup>, 但尚未探索不同的孔洞排布方式对冲击响应的影响. 近年来发展的微结构制备技术为精细地调控孔洞在脆性材料中的排布方式提供了可行途径. 例如在超轻、超硬材料和蜂窝材料等

\* 中国工程物理研究院重点实验室专项科研计划(批准号: 2012-专-03)、冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金(批准号: 9140C670301120C67248, 9140C670302140C67284)和国家自然科学基金(批准号: 11272164)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yqli@mail.neu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: honglianghe@caep.cn

研究领域内, 可以通过三维快速成型方法(微立体光刻技术、紫外线光波导系统、3D 打印等)制备出具有特定微结构组织的功能材料<sup>[16-19]</sup>. 如果将这些技术应用到多孔脆性材料的制备之中, 将可能制备出指定气孔率、孔洞大小、形貌和排布方式的多孔脆性材料, 有助于更全面地探索孔洞对脆性材料冲击响应的影响规律, 进一步提高脆性材料的冲击塑性.

本文通过计算机模拟研究, 分析了孔洞规则排布和随机排布的多孔脆性材料在冲击波压缩下的介观变形过程和宏观塑性响应的机理和特征, 揭示了规则的孔洞排布方式对于脆性材料冲击演化过程的影响, 从而为新型脆性功能材料的设计和制备提供了物理认识.

## 2 脆性介质冲击波压缩的格点-弹簧模型

本文所采用的格点-弹簧模型 (lattice-spring model) 是将连续介质离散化为由格点 (颗粒) 和弹簧相互连接成的网络, 通过计算格点和弹簧的响应来获得连续介质的整体响应. 因此弹簧的设定方式及弹簧刚度系数的选择就决定了模型的宏观本构响应. 由于在处理断裂、破碎、动态损伤破坏和材料的微结构不均匀性等问题时具有独特优势, 格点-弹簧模型目前已在脆性介质断裂研究中发挥了重要作用, 并且逐渐在冲击波领域中被广泛应用.

本文建立的是一种弹性-脆性响应的材料模型, 假定颗粒之间只在线弹性范围内发生相互作用; 材料本身并不具备塑性变形能力, 因此模型整体的宏观塑性响应只可能是来自于微结构 (孔洞) 的贡献. 模型中最邻近颗粒  $i$  和  $j$  之间的相互作用如图 1 所示, 其中  $f_{ij}^n$  和  $f_{ij}^t$  分别表示法向和切向作用力, 并分别由通过两颗粒中心的法向弹簧和垂直于两颗粒中心连线、作用在颗粒接触边缘的切向弹簧提供. 法向作用力和切向作用力都是根据两颗粒间的相对位移计算得出的.

格点-弹簧模型能否定量表现目标材料的力学性能, 关键在于准确地设定模型中的弹簧刚度系数. Gusev<sup>[20]</sup> 提出了一种有限元-离散元参数映射方法, 其基本思想就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 (总体刚度矩阵), 再进行映射, 将有限元模型参数转换为弹簧刚

度系数. 本文采用了 Gusev 的参数映射方法, 将一个由等边三角形组成的网格作为二维有限元和格点-弹簧模型共用的模型网格, 并利用这一共用网格实现参数映射. 检验表明, 经过参数映射后本文的模型已经具备了定量表现密实和多孔脆性材料弹性性质的能力<sup>[21]</sup>.

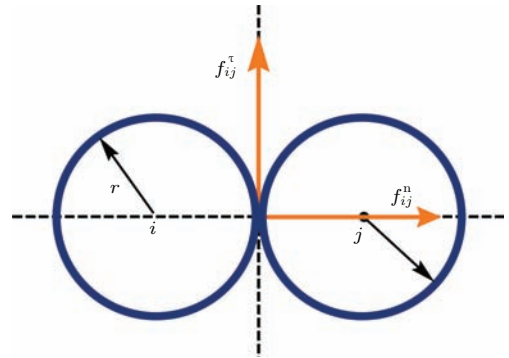


图 1 两个颗粒间的相互作用

Fig. 1. The interaction between two particles.

模型中所采用的弹簧断裂判据为基于 Griffith 能量平衡原理<sup>[22]</sup> 的能量阈值. 当两个颗粒产生相对位移时, 如果法向弹簧的拉伸应变能和切向弹簧的剪切应变能之和大于在两个颗粒之间形成一小段微裂纹所需要的表面能, 这两个弹簧就会发生不可逆的断裂. 由于纯压缩 (如均匀介质的静水压压缩) 不会引起材料破坏, 所以任何法向弹簧的压缩应变能均不计入上述断裂判据. 通过弹簧相互连接着的颗粒之间存在排斥、吸引和剪切作用, 一旦弹簧断裂, 两个颗粒之间将失去抗拉伸和抗剪切的作用力, 这就相当于在样品之中形成了一小段裂纹, 但是受破坏的颗粒之间仍然有其他相互作用. 当它们的间距小于平衡距离时, 将产生沿法向的排斥力和黏性力及沿切向的干摩擦力. 当一小段裂纹出现后, 它周围的应力场将重新分布, 这又可能导致附近另一对弹簧的断裂; 由此演化下去, 一条扩展的裂纹就会在模型样品之中自动地出现. 上述弹簧的设定、弹簧刚度系数的选取和断裂判据的设定等问题的详细计算方法详见文献<sup>[14]</sup>.

本文所采用的格点-弹簧模型的冲击波压缩构型如图 2 所示. 左端的两列颗粒被当作一个活塞, 它以恒定速度  $v_p$  自左向右运动, 致使冲击波在样品中自左向右传播. 模型的上、下边界都施加了周期性边界条件, 通过去除部分颗粒来设置圆形孔洞. 在下文中我们将冲击波传播方向简称为纵向,

将垂直于冲击波传播方向简称为横向. 在冲击波压缩的模拟计算过程中, 颗粒的位置、速度、应力和连接状态等信息都在指定的仿真步被记录下来.

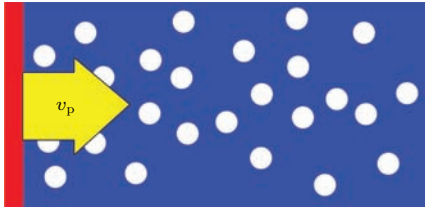


图2 (网刊彩色) 冲击波压缩模型的构型示意图 左边红色的部分代表活塞, 右边蓝色的部分代表样品, 白色的圆形代表孔洞, 黄色的箭头表示冲击方向

Fig. 2. (color online) The configuration diagram of shock compression model. The red part on the left represents the piston. The blue part on the right represents the sample. The white circular areas represent the voids. The yellow arrow represents the shock direction.

本文模型的具体参数包括: 每个颗粒的直径为  $1 \mu\text{m}$ ; 孔洞随机和规则排布的多孔样品中的孔洞直径均为  $10 \mu\text{m}$ ; 所有多孔样品的长度为  $1.6 \text{ mm}$ , 宽度为  $0.4 \text{ mm}$ , 并且在宽度方向(横向)上施加了周期性边界条件; 目标材料的杨氏模量  $E = 130 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.22$ , 密度  $\rho = 8010 \text{ kg/m}^3$ ; 断裂表面能  $\gamma = 3 \text{ J/m}^2$ ; 并分别设计了随机和规则的孔洞排布方式如图3所示.

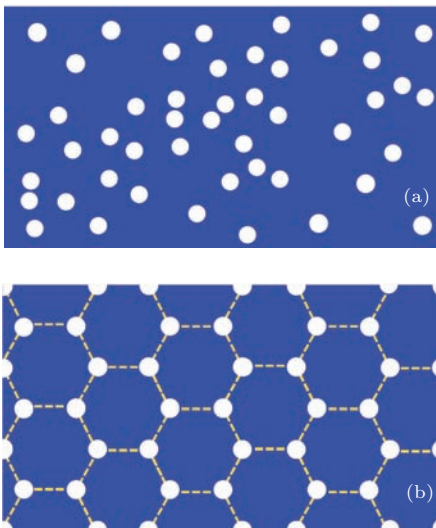


图3 (网刊彩色) 多孔脆性材料中孔洞的排布方式 (a) 随机排布方式; (b) 规则的正六边形排布方式, 虚线围成的正六边形表示孔洞规则排布的基本单元

Fig. 3. (color online) The arrangement modes of voids: (a) Random arrangement mode; (b) regularly hexagonal arrangement mode, the hexagons enclosed by the dashed lines represent the basic elements of regular arrangement mode.

### 3 微孔洞在冲击波压缩下的介观变形机理

#### 3.1 脆性介质中孤立孔洞的演化过程

首先利用小尺寸模型研究了存在一个孤立孔洞时, 冲击波压缩产生的孔洞塌缩过程对周围介质的应力、应变状态的影响. 当冲击波扫过孔洞后, 一方面孔洞界面作为自由面会反射一个稀疏波, 另一方面介质在孔洞附近的变形会偏离一维应变状态. 图4是冲击波刚扫过孤立孔洞后孔洞附近介质的纵向应力分布图, 模型输入的冲击应力为  $2 \text{ GPa}$ . 从图4中除了可以看到孔洞反射的、降低应力的稀疏波外, 还可以观察到在孔洞的横向上出现了显著的压应力集中, 并且从出现应力集中的区域产生了逐渐向远离孔洞方向扩展的剪切裂纹, 孔洞周围受到剪切破坏.

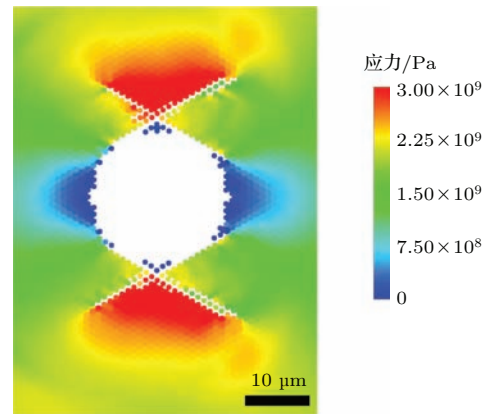


图4 (网刊彩色) 冲击波扫过孤立孔洞时孔洞附近的纵向应力分布

Fig. 4. (color online) The longitudinal stress distribution around the isolated void when shock wave sweeps.

伴随着剪切裂纹的向外扩展, 孔洞逐步发生塌缩. 孔洞周围受到损伤而破碎的介质飞散进入到孔洞内, 使孔洞体积逐渐减小, 致使样品产生体积收缩变形. 最终破碎的微元将整个孔洞填满, 孔洞完全塌缩. 对孔洞塌缩后周围介质变形特征的研究结果表明, 剪切裂纹两侧介质发生了明显的相对滑动; 冲击条件下孔洞的塌缩并非是介质各向同性地向孔洞中心填充, 而是沿纵向的介质向着孔洞填充的各向异性收缩<sup>[15]</sup>. 无论是多孔脆性材料还是多孔延性材料, 在准静态和冲击加载下的孔洞塌缩所对应的主导机理都是孔洞周围的剪应力集中导致的剪切滑移. 但这一机理在不同材料中的表现方式是不同的. 具体表现为在金属玻璃中的孔洞周围会



产生剪切带<sup>[5]</sup>;在延性金属中的孔洞周围会出现位错<sup>[23,24]</sup>;在本文的陶瓷类脆性材料的孔洞周围会产生剪切裂纹.

### 3.2 大量孔洞导致的介观变形特征

当在脆性材料中植入大量的微孔洞后,孔洞塌缩和介质滑移会带来显著的应力松弛,从而将冲击波阵面上的应力幅值显著削弱,导致多孔脆性材料表现出明显高于致密脆性材料的宏观冲击塑性.本文的研究进一步表明,不同的孔洞排布方式将导致不同的介观变形特征,进而调控着多孔脆性材料的冲击塑性.

我们建立了气孔率为5%的模拟样品,分别采用了图3所示的两种孔洞排布方式.在 $v_p = 150$  m/s的活塞驱动下得到了两种样品在同一时刻、同一位置的介观损伤分布特征如图5所示.从图5(a)的孔洞随机排布损伤分布特征图中可以看到,在孔洞塌缩过程中孔洞周围产生了大量剪切裂纹;介质被充分伸展开的剪切裂纹切割成分散的微小区域.样品中的孔洞是随机排布的,在孔洞排布相对集中的区域,孔洞在塌缩过程中容易相互贯通,在孔洞周围很难形成长距离扩展的剪切裂纹;在孔洞排布相对稀疏的区域,孔洞周围萌生出大量向着介质内部长距离扩展的剪切裂纹.样品内部的相对速度场中的漩涡状结构表明,样品内部的介质不仅存在着滑移变形<sup>[14,15]</sup>,还正在进行转动变形<sup>[25,26]</sup>.冲击波压缩下多孔脆性材料的塑性变形来源包括孔洞塌缩导致的体积收缩变形和剪切裂纹扩展导致的介质滑移与转动变形两部分,而且在孔洞随机排布时剪切裂纹的长距离扩展和介质滑移与转动变形占主导.

图5(b)展示了孔洞规则排布样品的介观变形特征.与随机排布情况相同的是样品中都发生了孔洞塌缩过程并伴随着剪切裂纹扩展,同时相对速度场表明样品内部发生了滑移与转动变形,也即说明了孔洞的排布方式并不改变多孔脆性材料的塑性变形机理.不同之处在于孔洞规则排布的样品在孔洞塌缩过程中产生的剪切裂纹数量明显减少,同时介质被沿横向相互贯通的孔洞切割成均匀分布的长条形区域.由于样品中的孔洞是规则排布的,致使样品在各个局部区域的损伤特征几乎相同.这种规则排布方式使得沿着横向的孔洞容易相互贯通,

并且大多数的剪切裂纹只扩展到沿横向最邻近的孔洞周围便不再继续扩展.由此可见,孔洞规则排布时孔洞贯通和体积收缩变形占主导.设计规则的孔洞排布方式可以调控冲击波压缩下脆性材料的介观变形特征.

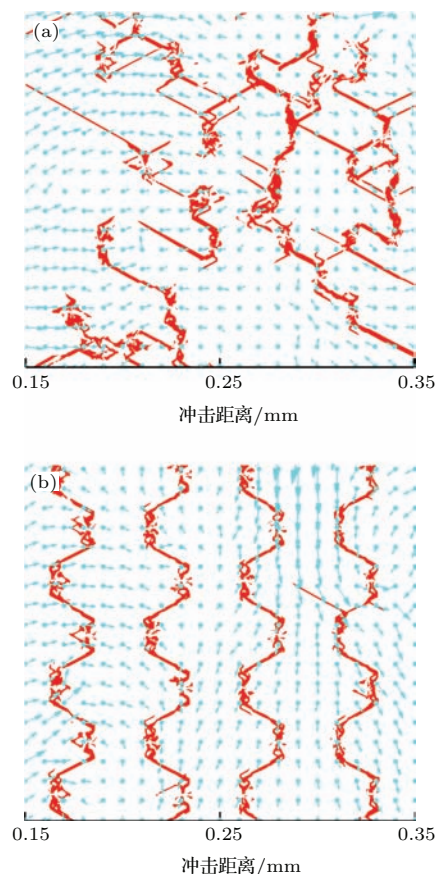


图5 (网刊彩色) 150 m/s冲击下,气孔率5%的(a)孔洞随机排布样品和(b)孔洞规则排布样品中的介观变形特征.红色区域表示损伤区域;蓝色的箭头表示样品内部的相对速度场,箭头形成的“漩涡状结构”表明存在着转动变形. Fig. 5. (color online) Features of mesoscopic deformation in (a) the sample with randomly arranged voids and (b) the sample with regularly arranged voids. The velocity of the piston is 150 m/s and the porosity is 5%. The red areas represent the damaged areas. The blue arrows represent the relative velocity field in the samples and “vortex structure” formed by the arrows indicates that rotation deformation exists.

## 4 随机和规则两种孔洞排布方式的宏观响应特性

### 4.1 两种孔洞排布方式下的冲击波剖面

针对多孔铁电陶瓷开展的冲击波实验研究反映了冲击波剖面对于样品中孔洞损伤塌缩过程和气孔率的显著依赖<sup>[11-13]</sup>.本文研究了在相同气孔

率条件下孔洞的排布方式对多孔脆性材料冲击波剖面演化特征的影响. 图6为气孔率10%, 随机和规则两种孔洞排布方式的样品在90—300 m/s 活塞的冲击下演化形成的冲击波剖面. 与完全致密样品中的弹性单波结构不同, 冲击波在多孔样品内部会逐渐展现为弹性波-变形波的双波结构. 传播速度较快的是弹性波, 传播速度较慢的是对应着材料“塑性”(不可逆)变形的变形波, 在变形波后出现的平台被称为冲击终态 (Hugoniot 状态). 宏观尺度上的冲击波剖面与样品内部的介观尺度变形特征存在着对应关系. 其中弹性波与变形波之间的平台对应着样品内部的低损伤区, 处于这一区域的介质基本处于弹性状态, 只出现了轻微的损伤(剪切裂纹在个别孔洞周边成核); 变形波对应着样品内部的孔洞塌缩区, 处于这一区域的介质正在发生孔洞塌缩过程, 并产生体积收缩变形和滑移与转动变形; 冲击终态对应着样品内部的孔洞压实区, 处于这一区域的孔洞已经完全塌缩并且被充分压实, 介质趋于冲击平衡态 [14].

从图6(a)的孔洞随机排布冲击波剖面图中可以看到, 当气孔率相同、冲击应力不同时, 样品的动态屈服极限并不改变, 所以样品的弹性波几乎重叠在一起. 随着冲击应力的增加, 加剧了样品内部孔洞塌缩变形和介质滑移与转动变形速度, 因而变形波的传播速度加快; 对应的冲击终态中的粒子速度和应力也相应增加. 这些计算获得的多孔脆性材料冲击波剖面随冲击应力的变化规律与 Setchell [12,13] 通过大量冲击波实验获得的多孔陶瓷的变化特征和规律是一致的.

延性金属中的位错、滑移、孪晶等变形机理能够使延性材料表现出塑性. 在冲击波压缩下多孔脆性材料的冲击波剖面虽然能够逐渐演化成为类似于延性金属的“弹性-塑性”双波结构, 但并不意味着两者具有相同的塑性变形机理. 孔洞塌缩导致的体积收缩变形和剪切裂纹扩展导致的介质滑移与转动变形共同决定了多孔脆性材料在冲击波压缩下的冲击塑性.

图6(b)展示了在气孔率10%的孔洞规则排布样品在不同冲击应力条件下的冲击波剖面. 在相同气孔率、不同冲击应力条件下, 孔洞规则排布时的冲击波剖面演化规律与孔洞随机排布的情况是一致的, 规则排布的孔洞并未使冲击波剖面的演化过程产生本质上的区别.

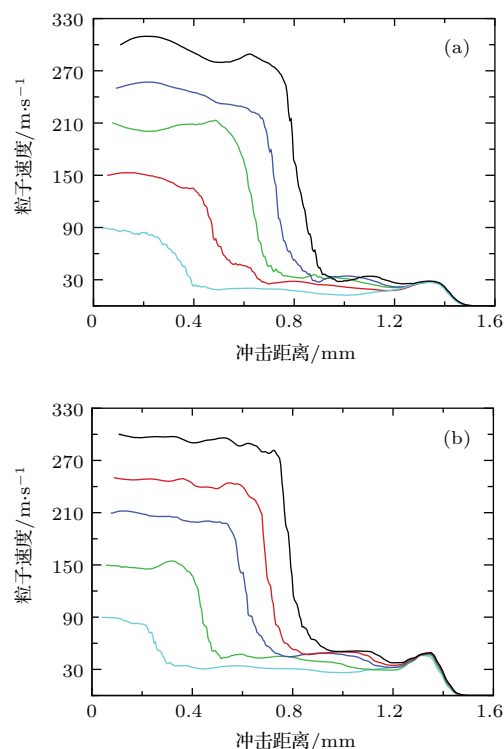


图6 (网刊彩色) 不同冲击应力下气孔率10%样品的冲击波剖面 (a) 孔洞随机排布样品; (b) 孔洞规则排布样品的粒子速度剖面

Fig. 6. (color online) Shock wave profiles of the samples with a porosity of 10% under different shock stresses. Particle velocity profiles of (a) the sample with randomly arranged voids and (b) the sample with regularly arranged voids.

## 4.2 两种孔洞排布方式下的Hugoniot曲线

Hugoniot 曲线作为样品在不同冲击应力条件下冲击终态上状态的连线, 全面地表现了材料的冲击响应特征. 本文研究并得到了孔洞规则排布和随机排布的样品在气孔率5%和10%的条件下的Hugoniot 应力-应变曲线如图7所示. 以完全致密(气孔率0%)的脆性材料作为对照, 它在测试压力范围内处于弹性状态, 因此它的Hugoniot 曲线只包含线弹性阶段. 多孔脆性材料的Hugoniot 曲线中均包含了三个线性阶段, 从左至右依次为线弹性阶段、塌缩变形阶段和滑移与转动变形阶段. 随着冲击应力的增大, 孔洞发生塌缩并导致体积收缩, 同时伴随有一定的介质滑移与转动变形. 这一阶段被称为塌缩变形阶段, 其中孔洞塌缩导致的体积收缩变形是该阶段变形的主体. 当样品内的孔洞完全塌缩并被充分压实后, 发现多孔脆性材料仍然能够持续地发生不可逆变形, 与此对应的是破碎介质的

滑移与转动变形; Hugoniot 曲线中的第三个阶段就被称为滑移与转动变形阶段(压实阶段)<sup>[14]</sup>.

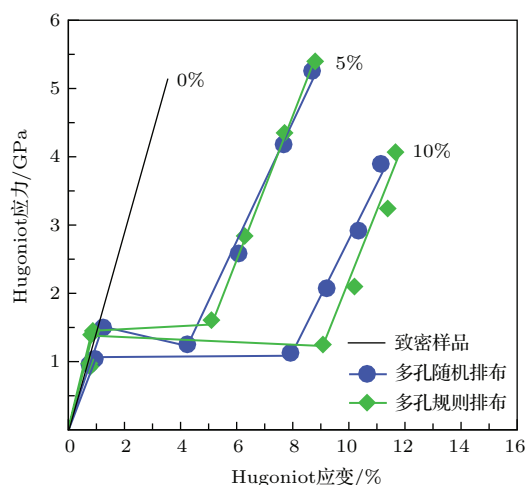


图7 孔洞排布方式对多孔脆性材料 Hugoniot 应力-应变曲线的影响

Fig. 7. The influences of arrangement modes of voids on the Hugoniot stress-strain curves of the porous brittle materials.

针对多孔延性金属的研究<sup>[27]</sup>表明,多孔延性与脆性材料的 Hugoniot 曲线都可以划分成三个阶段:线弹性阶段、塌缩变形阶段和压实阶段.它们的区别在于:1)多孔延性材料的 HEL 非常低;2)多孔延性材料的塌缩变形阶段不是一个平台,而是一个随应变上升,应力也缓慢上升的斜坡;而多孔脆性材料的塌缩变形阶段在本文模拟中是一个平台,或者是随应变上升,应力却缓慢下降的负刚度斜坡.这是因为延性材料中的孔洞塌缩对应塑性变形和应变硬化,而脆性材料中的孔洞塌缩对应着剪切破坏、裂纹扩展和介质破碎,破碎后的介质失去强度.多孔延性材料的压实阶段是一个非线性的上升曲线,本文中通过用一条直线来拟合多孔脆性材料的压实阶段,这是因为本文所研究的压力范围还很低,材料响应近似表现为线性.但可以推测在更高压力下,多孔脆性材料的压实阶段也会变成类似于多孔延性材料的非线性曲线.

本文的计算结果表明,多孔脆性材料的冲击塑性明显高于致密脆性材料,并且气孔率越高,冲击塑性越高.两种孔洞排布方式所对应的 Hugoniot 曲线存在着相同的规律,即都包含了线弹性阶段、塌缩变形阶段和滑移与转动变形阶段的三段式响应.气孔率越高,塌缩变形阶段产生的应变越大,但是塌缩变形阶段的应变不随冲击应力改变.随着冲击应力的增大,滑移与转动变形阶段的应变逐渐

增大,因而在总应变中所占的比重相应地增大.这说明滑移与转动变形在高冲击应力下将是占主导地位的方式.孔洞随机和规则排布样品的区别在于当气孔率相同时,孔洞规则排布的样品在塌缩变形阶段(第二段)产生的应变大于随机排布情况;并且随着气孔率的升高,孔洞规则排布样品的整体冲击塑性将高于随机排布情况.规则排布中孔洞塌缩变形阶段对整体冲击塑性的贡献更大,而随机排布中滑移与转动变形阶段(第三段)对整体冲击塑性的贡献更大.

## 5 讨论

关于脆性材料中微结构(孔洞)与塑性变形之间的理论分析,目前理论研究成果较少,文献中对延性金属的理论分析较为成熟.例如用于模拟多孔延性材料低压行为的  $P-\alpha$  模型<sup>[28,29]</sup>和能够在较宽压力范围内预测多孔延性材料的 Hugoniot 曲线的热力学状态方程等<sup>[27]</sup>.虽然上述理论模型可以预测多孔延性材料在冲击压缩下的各种热力学状态,但不能有效地预测多孔脆性材料的宏观冲击响应和揭示微结构演化对材料宏观响应影响的物理机理.对于脆性材料的冲击研究目前是以实验为主,模拟方法和理论模型还处于发展阶段.

虽然 Setchell<sup>[11]</sup>的实验研究表明孔洞可以为脆性材料带来显著的冲击塑性,但其内在的演化机理却很难通过实验研究来揭示.本文的研究目的在于通过对脆性材料的冲击波压缩破坏过程开展建模和模拟,揭示孔洞影响脆性材料冲击响应的物理机理,并探索孔洞排布方式对于脆性材料冲击塑性的调控作用.在充分地认识微结构与宏观响应的关联之后,就有可能在将来发展起一套能够准确预测和描述多孔脆性材料冲击 Hugoniot、高压状态方程和高压本构的理论模型,从而更好地指导多孔脆性材料的设计和制备.

模拟结果表明,通过在脆性材料中植入微孔洞,可以显著提高脆性材料的冲击塑性.通过设计规则的孔洞排布方式可以调控在冲击波压缩作用下样品内部的介观变形特征,调控体积收缩变形和滑移与转动变形两种变形机理对于整体冲击塑性的贡献大小,从而实现对多孔脆性材料宏观冲击塑性的精确调控,更好地改善脆性材料的冲击塑性.

本文的研究提供了这样一种关于材料设计及制造的新思路:首先,根据实际应用的需要提出对



材料性质的要求——脆性功能材料需要增强冲击塑性以预防冲击破坏诱导的功能失效;其次,通过计算机模拟的方法设计出适当的微结构使材料具备这种性质——引入孔洞可以显著地增强脆性材料的冲击塑性,设计孔洞的排布方式可以有效地调控贡献宏观塑性的介观变形过程;最后,采用恰当的制造技术制备出具有这种微结构的材料——近年来飞速发展的3D快速成型技术已经成为功能材料中复杂微结构的重要制备手段。

3D快速成型技术结合传统的孔洞随机排布的多孔陶瓷制备技术,就可以制备出经过设计和优化的孔洞规则排布的多孔陶瓷。为了精确调控陶瓷中规则排布的孔洞,可以先利用3D快速成型技术,例如PMMA(有机玻璃,常用的造孔剂)的3D打印技术,制备出一个“小球+细杆”的3D镂空框架结构。小球即按照设计好的多孔脆性材料的规则排布方式进行排布,细杆用于在陶瓷烧结之前支撑这一框架结构。然后将细小的陶瓷粉体均匀地填充到这个框架结构之中。在陶瓷烧结制备过程中,PMMA组成的小球+细杆框架结构将在850 °C之下完全热解,在半烧结的陶瓷粉体中保留原本框架结构的空隙。此后的进一步升温烧结过程中陶瓷整体会有一些程度的收缩,正适合于将原来的细杆所留下的空隙占满,而小球所留下的空间却不能完全占满,就成为了陶瓷之中规则排布的孔洞。

## 6 结 论

脆性材料缺乏大变形和抗失效的能力,这在很大程度上限制了其工程应用范围。本文探讨了通过在脆性材料中植入孔洞来提高脆性材料冲击塑性的设计方法,并研究了孔洞的排布方式对脆性材料冲击响应的影响。在冲击波压缩下多孔脆性材料中同时存在着孔洞塌缩导致的体积收缩变形和介质滑移与转动变形两种主要的介观变形机理,因而具有明显高于致密脆性材料的冲击塑性。对150 m/s活塞冲击下、气孔率5%的多孔样品介观变形特征的分析表明,孔洞规则排布时容易沿着横向相互贯通,抑制了剪切裂纹的长距离扩展,因而体积收缩变形占主导。而孔洞随机排布时出现的大量剪切裂纹长距离扩展现象,使得滑移与转动变形占主导。通过对比宏观响应特性发现,规则排布中孔洞塌缩变形阶段对整体冲击塑性的贡献更大,而随机排布中滑移与转动变形阶段对整体冲击塑性的贡献更

大。通过设计规则孔洞的排布方式,能够实现多孔脆性材料整体冲击塑性的调控,同时先进的3D快速成型技术也为这种微结构设计投入实际应用提供了有力支持。本文的研究成果为提高脆性材料的冲击塑性提供了可能应用。

## 参考文献

- [1] Sun B R, Zhan Z J, Liang B, Zhang R J, Wang W K 2012 *Chin. Phys. B* **21** 056101
- [2] Bourne N, Millett J, Rosenberg Z, Murray N 1998 *J. Mech. Phys. Solids* **46** 1887
- [3] Grady D E 1998 *Mech. Mater.* **29** 181
- [4] Qu R T, Zhao J X, Stoica M, Eckert J, Zhang Z F 2012 *Mater. Sci. Eng. A* **534** 365
- [5] Sarac B, Schroers J 2013 *Nat. Commun.* **4** 2158
- [6] Wada T, Inoue A, Greer A L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 251907
- [7] Mirkhalaf M, Dastjerdi A K, Barthelat F 2014 *Nat. Commun.* **5** 3166
- [8] Wang F, Peng X S, Liu S Y, Li Y S, Jiang X H, Ding Y K 2011 *Chin. Phys. B* **20** 065202
- [9] Geng H Y, Wu Q, Tan H, Cai L C, Jing F Q 2002 *Chin. Phys.* **11** 1188
- [10] Tan P J, Reid S R, Harrigan J J, Zou Z, Li S 2005 *J. Mech. Phys. Solids* **53** 2206
- [11] Setchell R E 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 573
- [12] Setchell R E 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 013507
- [13] Setchell R E 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 053525
- [14] Yu Y, Wang W Q, He H L, Lu T C 2014 *Phys. Rev. E* **89** 043309
- [15] Yu Y, He H L, Wang W Q, Lu T C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 246102 (in Chinese) [喻寅, 贺红亮, 王文强, 卢铁城 2014 物理学报 **63** 246102]
- [16] Schaedler T A, Jacobsen A J, Torrents A, Sorensen A E, Lian J, Greer J R, Valdevit L, Carter W B 2011 *Science* **334** 962
- [17] Zheng X Y, Lee H, Weisgraber T H, Shusteff M, de Otte J, Duoss E B, Kuntz J D, Biener M M, Ge Q, Jackson J A, Kucheyev S O, Fang N X, Spadaccini C M 2014 *Science* **344** 1373
- [18] Meza L R, Das S, Greer J R 2014 *Science* **345** 1322
- [19] Bauer J, Hengsbach S, Tesari I, Schwaiger R, Kraft O 2014 *PNAS* **111** 2453
- [20] Gusev A A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 034302
- [21] Yu Y, Wang W Q, Yang J, Zhang Y J, Jiang D D, He H L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 048103 (in Chinese) [喻寅, 王文强, 杨佳, 张友君, 蒋冬冬, 贺红亮 2012 物理学报 **61** 048103]
- [22] Lawn B (translated by Gong J H) 2010 *Fracture of Brittle Solids* (Beijing: Higher Education Press) pp4-5 (in Chinese) [罗恩 B 著(龚江宏译) 2010 脆性固体断裂力学 (北京: 高等教育出版社) 第4—5页]
- [23] Erhart P, Bringa E M, Kumar M, Albe K 2005 *Phys. Rev. B* **72** 052104



- [24] Dávila L P, Erhart P, Bringa E M, Meyers M A, Lubarda V A, Schneider M S, Becker R, Kumar M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 161902
- [25] Yano K, Horie Y 1999 *Phys. Rev. B* **59** 13672
- [26] Makarov P V, Schmauder S, Cherepanov O I, Smolin I Y, Romanova V A, Balokhonov R R, Saraev D Y, Soppa E, Kizler P, Fischer G, Hu S, Ludwig M 2001 *Theor. Appl. Fract. Mech.* **37** 183
- [27] Wu Q, Jing F Q 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 49
- [28] Herrmann W 1969 *J. Appl. Phys.* **40** 2490
- [29] Carroll M M, Holt A C 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 1626

## Shock plasticity design of brittle material\*

Jiang Tai-Long<sup>1)2)</sup> Yu Yin<sup>2)</sup> Huan Qiang<sup>1)</sup> Li Yong-Qiang<sup>1)†</sup> He Hong-Liang<sup>2)‡</sup>

1) (School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

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

( Received 9 January 2015; revised manuscript received 31 March 2015 )

### Abstract

The mechanical properties of a material are closely related to its internal micro-structure. Enhancing shock plasticity by designing appropriate micro-structure will help to slow down or delay shock failure of brittle material. In this paper, we put forward a method of designing and improving shock plasticity of brittle material by implanting specific micro-voids. A lattice-spring model is adopted, which can represent mechanical properties of brittle materials quantitatively. Simulations reveal how the arrangement modes of micro-voids can affect the shock response of brittle material. By implanting randomly arranged voids, porous brittle material has significantly higher shock plasticity than dense brittle material and the design of the regular arrangement mode of voids will help to enhance the shock plasticity further. The dominant mechanism corresponding to the void collapse in the shocked brittle material is shear slip caused by shear stress concentration, which features the occurrence of shear cracks around the voids. Features of mesoscopic deformation in the sample with 5% porosity indicate that the shock plasticity of porous brittle material comes from the volume shrinkage deformation caused by void collapse and the slippage and rotation deformation caused by extension of shear cracks. The inter-permeation of voids and volume shrinkage deformation play a leading role in the sample with regularly arranged voids. While the shear cracks extends over long distance, slippage and rotation deformation take place dominantly in the sample with randomly arranged voids. The two samples with different arrangement modes of voids both have three stages of response in the Hugoniot stress-strain curves in this paper, i. e., linear elasticity stage, collapse deformation stage, and slippage and rotation deformation stage. The sample with higher porosity has a higher shock plasticity than the sample with lower porosity. When the samples have the same porosity, the collapse deformation stage makes greater contribution to the overall shock plasticity if voids are regularly arranged, while the slippage and rotation deformation stage make greater contribution to the overall shock plasticity if the voids are randomly arranged. The principle of enhancing shock plasticity of brittle material by arranging voids regularly in this paper provides physical knowledge for the designing and preparing new types of brittle materials, thereby helping to prevent the function failure induced by shock in brittle material.

**Keywords:** brittle materials, arrangement modes of voids, mesoscopic deformation, shock response

**PACS:** 83.60.Uv, 81.05.Rm, 62.20.F–

**DOI:** 10.7498/aps.64.188301

\* Project supported by the National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2012-zhuan-03), the Foundation of National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, China (Grant Nos. 9140C670301120C67248, 9140C670302140C67284) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11272164).

† Corresponding author. E-mail: [yqli@mail.neu.edu.cn](mailto:yqli@mail.neu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [honglianghe@caep.cn](mailto:honglianghe@caep.cn)