

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0247

冲击载荷下脆性空心颗粒破碎机理*

范志强^{1,2}, 何天明¹, 刘迎彬³, 索涛², 徐鹏¹

(1. 中北大学理学院, 山西 太原 030051;

2. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072;

3. 中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为考察脆性空心颗粒在冲击载荷作用下的应变率效应和破碎行为的细观机理, 以粉煤灰漂珠为研究对象, 基于低速冲击实验和有限元数值模拟, 对比了典型空心颗粒材料在不同加载速率下的力学响应特性和细观压溃行为, 阐释了材料宏观应变率效应产生的细观机理, 获得以下结果。(1) 在 $0.001\sim 300\text{ s}^{-1}$ 应变率范围, 漂珠颗粒的破碎率和 Hardin 破碎势平均提升了约 21% 和 10%~30%, 材料比吸能提升了 50%~125%, 比吸能的额外增加主要与动态颗粒滑移产生的摩擦耗能相关。颗粒平均尺寸较大的试样体现出更强的应变率效应。(2) 初始压溃阶段的应力应变响应特征的数值模拟结果与实验结果较吻合, 低速冲击下动态二次压溃现象产生的细观机理为动态颗粒滑移和压紧行为对加载速率的依赖性。(3) 数值模拟表明, 冲击加载下产生相同应变时颗粒的损伤程度和范围大于准静态加载, 这与实验所得破碎势随应变率增加的结果一致。对比低速冲击实验的相对破碎势分析和细观数值模拟结果可知, 脆性颗粒堆积材料在动态冲击下表现出的宏观应变率效应主要归因于颗粒压溃行为的率敏感性和动态加载下颗粒破碎能量利用率的降低。

关键词: 脆性空心颗粒; 力学特性; 破碎机理; 应变率效应; 相对破碎势

中图分类号: O347.4 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

Breaking mechanisms of brittle hollow particles under impact loading

FAN Zhiqiang^{1,2}, HE Tianming¹, LIU Yingbin³, SUO Tao², XU Peng¹

(1. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

3. School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: To investigate the strain rate sensitivity of mechanical properties and the breaking mechanisms of brittle hollow particles (BHPs) at mesoscopic level, low-velocity impact tests and the corresponding numerical simulation using finite element method (FEM) were performed on the fly ash cenospheres (CPs). Characteristics of the mechanical response and the mesoscopic crushing behavior of brittle hollow particles under dynamic loadings were observed and discussed based on the impact tests. Additionally, the mechanism of producing strain rate sensitivity of cenosphere was interpreted through the mesoscopic numerical simulations. The results are as follows. (1) At the strain rate of $0.001\sim 300\text{ s}^{-1}$, the breaking ratio and the Hardin relative breaking potential was improved by 12% and 10%~30%, respectively. Meanwhile, the specific energy absorption of two types of cenospheres increased 50%~125%. The extra improvement of energy absorption should be attributed to the increase of the friction energy dissipation which was caused by the dynamic slipping rearrangement of BHPs. Also, the cenosphere specimens with larger particles size distribution exhibited more remarkable strain rate sensitivity. (2) The stress-strain response of BHPs at the initial collapse stage obtained from the numerical simulation coincided well with the experimental results. It was suggested that the dynamic secondary collapse stress was mainly caused by the particle slippage

* 收稿日期: 2020-07-17; 修回日期: 2020-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(11602233, 11802274); 山西省应用基础研究计划(201701D221018);
山西省高校科技创新项目(2019-520)

第一作者: 范志强(1989—), 男, 博士, 副教授, fanzhq@nuc.edu.cn

and its dependence on the loading velocity. (3) In addition, the numerical simulation shown that the damage extent of packing particles under dynamic loadings was much higher than that under static loadings at the same compression strain level. This was in good agreement with the experimental results that the relative breaking potential, characterizing the crushing extent of particles, increased with the strain rate. By combining the potential analysis of the testing cenosphere specimens and the mesoscopic simulation, it can be concluded that the intrinsic mechanism of the macro strain rate effect of BHPs is the decrease in energy utilization of particle breaking and the rate-dependence of the particles crushing behavior.

Keywords: brittle hollow particles; mechanical properties; breaking mechanism; strain rate effect; relative breaking potential

脆性空心颗粒 (brittle hollow particles, BHPs) 不仅能够作为填充相使复合材料轻质化, 而且能作为承载相在破碎过程中耗散爆炸冲击能量, 同时释放压缩空间, 是物理和力学性能优异的一类工程材料。传统 BHPs 主要作为造孔剂填充于树脂或金属基体以制备轻质复合泡沫^[1-2], 但其颗粒堆积体力学特性的认识则相对较少。研究表明, 脆性空心颗粒作为人防工程分配层时兼具显著的削波耗能和抗二次爆炸效能, 可提高人防工程的抗爆能力^[3-4]。另外, BHPs 还可以作为航空结构低能量冲击防护组件的芯层, 实验表明, 由 Kevlar 和 BHPs 组成的防护层在承受冲击载荷时, 结构的主要损伤由复材层转移至 BHPs 芯层, 有助于减小航空复材结构的维护成本^[5]。

长期以来, 人们对实体颗粒材料在静动态压缩载荷下的力学响应进行了深入研究, 结果表明初始孔隙率、粒径、形状、级配、含水量和应变率等因素均对砂、土等颗粒材料的应力应变响应有复杂的影响规律^[6]。其中, 应变率效应是脆性颗粒材料最显著的动态特性, 但其影响因素较多, 目前尚无统一机理。基于单脉冲 SHPB 实验, Huang 等^[7-8] 从颗粒破碎这个细观角度研究了干燥砂的应变率效应, 发现颗粒材料宏观率效应的本质是颗粒破碎特性对冲击速率的依赖性, 实验表明相同应力水平下干燥砂准静态加载时颗粒破碎量和破碎程度明显高于动态加载, 颗粒破碎所需能量减少, 动静态加载下颗粒破碎能量利用率的不同导致了宏观上的应变率效应。然而, BHPs 的压缩响应涉及颗粒破碎、应变率效应和材料可压缩性, 动力学行为更复杂, 颗粒破碎是否仍是主导 BHPs 动力学特性的主要原因尚需验证。王壮壮等^[9] 通过低速冲击实验考察了粉煤灰漂珠脆性颗粒的力学性能, 发现漂珠堆积体的压溃强度和比吸能在低速冲击下即表现出显著的率敏感性, 基于颗粒破碎率和破碎势的分析指出冲击加载下颗粒破碎能量利用率的降低仍是其应变率效应的主导因素。然而, 上述虽然指出颗粒破碎行为的速率依赖性导致了应变率效应, 但并未探讨颗粒的细观破碎行为及其对材料宏观变形的影响机制。BHPs 实际上是一个多孔系统, 颗粒破碎与宏观变形间的关系及其对加载速率依赖性的研究, 目前鲜有涉及。另外, 由于高孔隙率复合泡沫主要由空心颗粒组成, 颗粒的团簇、破碎和接触应力集中对泡沫材料的力学性能和损伤演化均有显著影响^[10]。但现有的研究大多将复合泡沫的宏观力学行为归因于基体力学性能的率敏感性和材料冲击压溃模式的转变, 不同加载速率下颗粒的破碎机理及其对材料宏观失效行为影响的研究尚显不足。因此, 开展 BHPs 静动态压溃力学性能和细观行为的研究对揭示其应变率效应、深入理解复合泡沫动态行为均具有重要意义。

本文中, 以粉煤灰漂珠为研究对象, 在低速冲击实验和 Hardin 破碎势理论分析的基础上, 分别基于数字图像相关和有限元数值模拟技术, 考察漂珠 BHPs 材料在宏观和细观尺度上的压溃行为及其率敏感性, 进一步探讨颗粒的细观破碎特性及其对材料宏观力学特性的影响机制。

1 低速冲击实验和数值模拟

1.1 低速冲击实验

实验采用两种粒径分布的粉煤灰漂珠试样: LCPs 粒径 $d = 700 \sim 1000 \mu\text{m}$, 壁厚 $t = 40 \sim 80 \mu\text{m}$, 试样 SCPs 粒径 $d = 450 \sim 600 \mu\text{m}$, 壁厚 $t = 20 \sim 50 \mu\text{m}$, 其堆积密度分别为 0.32 、 0.35 g/cm^3 。准静态和落锤低速冲击时采用尼龙加载装置, 如图 1(a) 所示。实验共分 3 组: 自由压缩组、控制 0.50 应变组和控制 0.25 应变组。控制应变实验通过预设尼龙活塞与外套筒的间隙来设置单次加载的压缩量。通过对单次加载实验所得试样进行回收, 基于筛分法和激光粒度仪分析颗粒破碎特性, 考察应变率和颗粒尺寸对破碎特性的影响规律。考虑试样力学性质离散性, 每组实验重复 3 次并取平均结果分析, 图 1(b) 为 LCPs

在 5 m/s 冲击速度下、0.50 应变单次加载的结果。曲线在应变约 0.50 时迅速直线上升, 对应于套筒对活塞的限位作用。3 组实验重复性较好, 说明虽然单个颗粒的力学性质离散性较大, 但实验结果具有一定统计性, 可表征该颗粒堆积体的宏观力学行为。

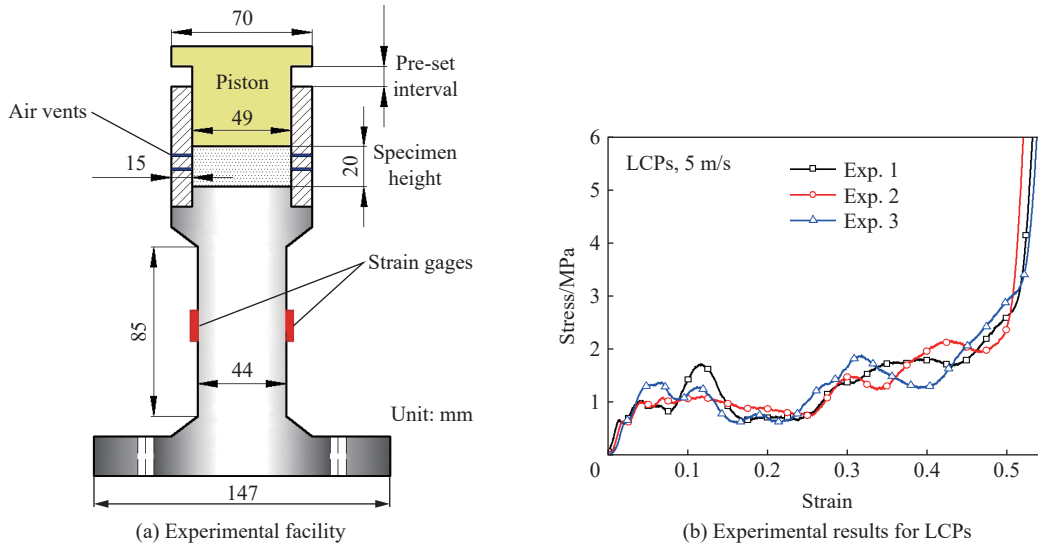


图 1 实验装置和单次加载实验验证

Fig. 1 Experimental facility and verification of single-impact experiment

1.2 有限元数值模拟

为考察颗粒堆积体在初始变形阶段的细观压溃行为, 基于 ANSYS/LS-DYNA 构建体心堆积 (BCC)、等尺寸颗粒有限元模型及其典型单胞结构, 如图 2 所示, 球体外部堆积孔隙率 0.41。压缩模型在高度、宽度和厚度方向分别包括 5 组、4 组和 1 组单胞单元, 上下分别为压头和支撑端, 其余四面均为对称面。漂珠与压头、支撑端间定义面面侵蚀接触, 漂珠自身定义单面侵蚀接触以描述颗粒碎片间的压溃行为。

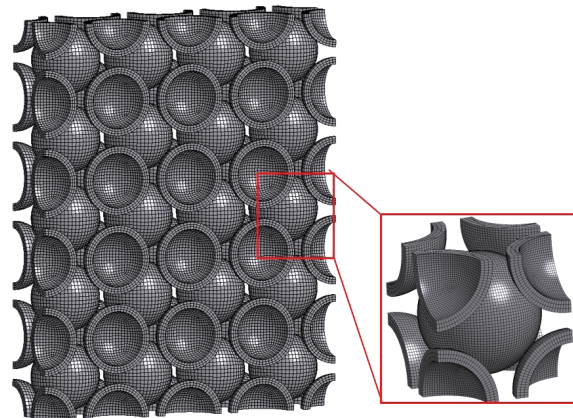


图 2 有限元模型和 BCC 单胞

Fig. 2 Finite element model and BCC unit cell

由于压头和支撑端强度远大于颗粒堆积体, 直接采用线弹性、铝合金材料模型。漂珠的主要组分和力学性质与岩石、混凝土等脆性材料相似, 但其壁面又包含较多微孔^[11], 因此采用普通混凝土的 HJC 模型描述其基体材料。HJC 模型^[12]包括材料基本力学参数、强度和应变率效应及损伤等, 采用无量纲等效应力描述屈服面方程并考虑材料应变率和损伤效应:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (1)$$

式中: 无量纲等效应力 $\sigma^* = \sigma/f_c$, 无量纲静水压力 $p^* = p/f_c$, f_c 为材料准静态单轴抗压强度, p 为实际静水压力; 式 (1) 第 2 项为等效应变率表示的率敏感性项, 参考应变率取 1.0 s^{-1} ; A 、 B 、 N 为强度参数, C 为应变率敏感性参数。材料损伤采用等效塑性应变 ϵ_p 和塑性体积应变 μ_p 的累积描述:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (2)$$

式中: $\Delta \epsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别为一个循环步的等效塑性应变和塑性体积应变, ϵ_p^f 和 μ_p^f 分别为常压下材料破碎的等效塑性应变和塑性体积应变。

另外,为描述脆性材料破碎特征,添加最大正应变为单元删除判据。由于形式简单、参数物理意义明确,HJC模型被广泛应用于冲击爆炸等强动载荷下混凝土类材料的动态响应分析中,但准确确定各参数所需的实验工作比较复杂。目前,大多基于Holmquist^[12]提出的48 MPa普通混凝土参数并通过实验、数值分析进行修正。巫绪涛等^[13]通过实验和数值对比分析在原始HJC参数基础上获得了C60混凝土的模型参数,任根茂等^[14]基于大量实验数据分析获得了可准确描述混凝土在弹体侵彻下力学响应的本构参数,本文沿用上述修正的C60普通混凝土模型参数。本有限元分析主要用于考察加载速率和颗粒性质对脆性空心颗粒堆积体变形行为和基本力学响应的影响规律,暂不考虑颗粒级配和堆积模式等因素的影响,模型共设置两种厚径比 t/d 为0.05和0.10,两种粒径 d 为1 000和800 μm ,设置10、100和1 000 s^{-1} 低速加载工况,并设置 $v=15\text{ m/s}$ 高速冲击模拟工况。

2 实验结果与分析

2.1 宏观压缩行为

图3为准静态压缩下LCPs的力学响应,通过数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法获得典型阶段的轴向应变场。颗粒堆积体在侧限压缩下体现了典型的多孔材料的应力应变响应特征,除持续时间较短的拟弹性段外,曲线主要由应力缓慢增长的平台段($0.03 < \varepsilon < 0.50$)和应力迅速增长的致密压实阶段($\varepsilon > 0.50$)组成。准静态压缩下颗粒破碎先出现在前后两端,后逐渐扩展到试样中部。当试样压缩至0.40时,试样中部仍存在大量完整颗粒,而此时两端已成为粉碎区,即BHPs在准静态压缩下也表现出显著的非均匀变形场,分析认为该现象主要由边界效应导致。一般而言,平均粒径较大、级配较差的颗粒具有较高的破碎潜力,因为粒径和级配对单个颗粒的平均配位数影响显著。在振荡压实的颗粒系统中,颗粒排列以面心或体心立方为主,此时单个颗粒拥有更多的配位数,从而体现出更高的破碎强度。然而,边界上的颗粒由于直接与支撑端接触,丧失了部分配位数,接触点的减少和非对称加载导致它相比于中间部位的颗粒更容易产生破碎。当一层颗粒破碎后,产生并经压实的碎片与下一层完整颗粒接触从而改变其局部级配,导致下一层颗粒发生破碎行为,从而在宏观上形成渐进压溃的响应特征。图4为LCPs在5 m/s冲击载荷下的力学响应和变形特征,材料宏观应力应变曲线和压溃行为均具有显著的速率依赖性。首先,试样的初始压溃强度相对于准静态有显著提升,且平台段可细分为应力水平较高的初始压溃段和应力相对较低的平稳压溃阶段。其次,冲击加载下颗粒破碎主要集中于冲击端,但与准静态压缩不同的是,试样中部区域的颗粒也同时出现破碎行为,当试样压缩至0.45时支撑端仍存在较多的完整颗粒。

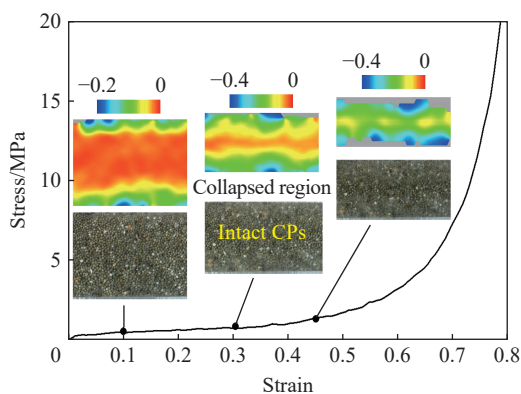


图3 LCPs准静态压缩力学响应
Fig. 3 Response of LCPs under quasi-static compression

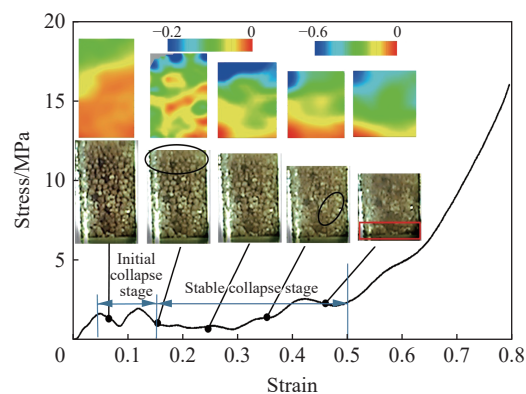


图4 LCPs在5 m/s速度下的冲击响应
Fig. 4 Impact response of LCPs at 5 m/s

分析可知,由于加载速率的迅速提升,颗粒没有足够的时间积累弹性势能,从而在试样宏观应力均匀的前提下产生仅由边界效应主导的破碎行为。在冲击载荷下,颗粒的滑移和重排开始影响试样的宏观变形,试样在产生颗粒破碎前能够快速被压缩至更高的紧密程度,锁紧的颗粒具有更高的配位数和破

碎强度。然而, 此时颗粒的破碎不仅发生在承载力较低的边界区域, 同时发生在承载力较高的中部区域, 从而快速耗散输入的能量并释放变形。压紧后的试样压溃模式主要由颗粒的初始结构缺陷和局部级配的不均匀导致, 因此会在中间部位产生随机的破碎区。对于大部分多孔/多胞材料而言, 其压缩行为与冲击速率显著相关并可归纳为 3 种模式^[15], 即以随机分布的变形集中带为主要特征的准静态模式、以撞击端形成狭窄局部变形带为特征的高速冲击模式、撞击端变形带和其他区域随机变形带共存的中速加载过渡模式, 3 种模式间的临界加载速率视基体材质和胞元特性而定。类似地, 空心颗粒堆积体在不同加载速率下也体现出典型的变形模式转变, 在加载速率足够低的准静态下, 颗粒的破碎以边界效应为主导形成自两端向中间扩展的破碎带; 在低速冲击下, 为由颗粒滑移重排和边界效应共同作用产生的冲击端和其他区域随机破碎带为主的过渡模式。当冲击速度足够大时, 材料内部应力不均匀程度增加, 冲击端的颗粒层状压溃将成为 BHPs 变形的主导特征, 即冲击模式。

2.2 宏观力学响应

图 5(a) 为两种漂珠试样在不同准静态加载速率下的工程应力应变曲线, 图 5(b)~(c) 为低速冲击下的应力曲线。由图 5(a) 可知, 在准静态加载速率下, 松散颗粒堆积体的表观应力呈现出应变率正相关性。低速冲击下, 试样承载力体现出较大的波动性, 但相同压缩应变下, 平台段的工程应力均高于准静态加载。另外, 冲击载荷下曲线拟弹性段持续时间显著增加, 其后紧随的初始压溃段应力水平也远高于准静态, 且随着应变率的提升有所增强。由图 5(b)~(c) 可知, 初始压溃段后应力水平迅速降低, 低速冲击下试样出现典型的动态二次压溃特征。该现象与颗粒的迅速滑移和重排有关, 即试样在产生明显的颗粒破碎前经历了压紧过程, 材料在宏观破碎前处于更高的密实程度, 从而在初始压溃段和平稳压溃段呈现更高的应力水平。

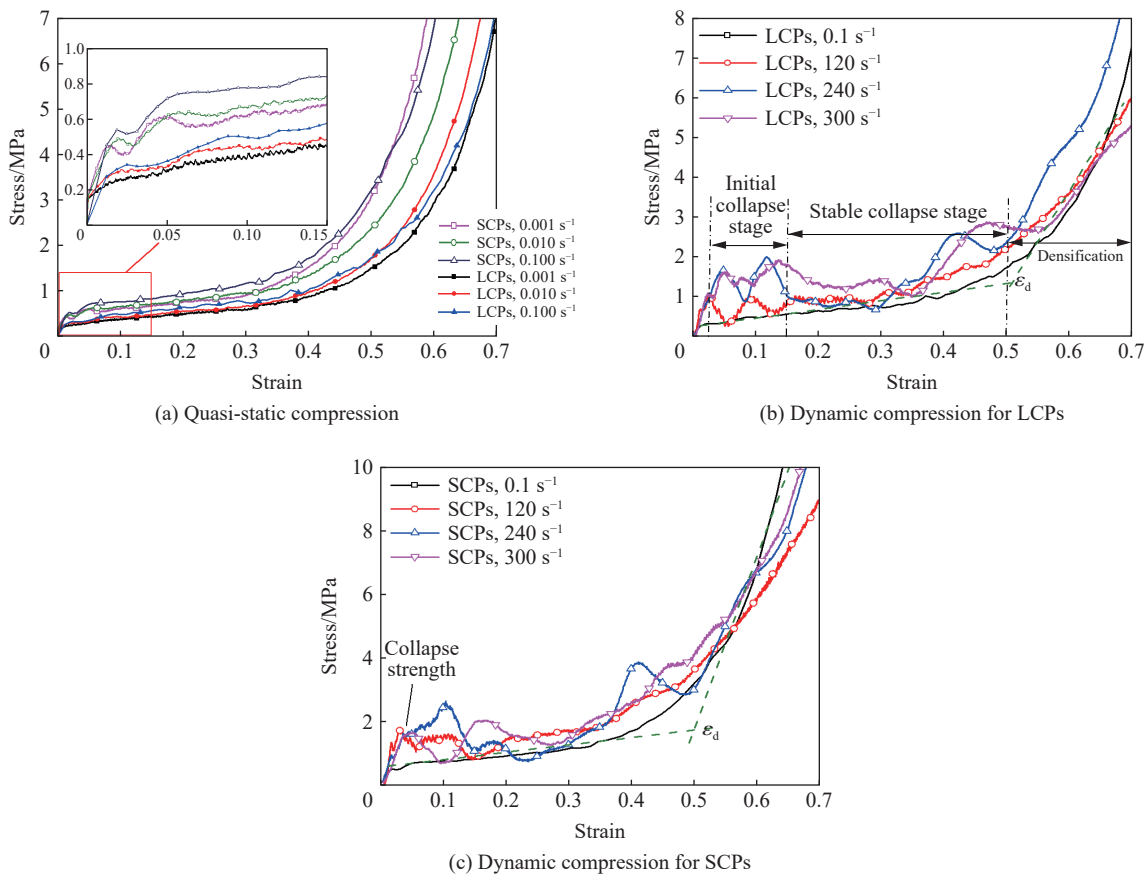


图 5 不同加载速率下试样的应力应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of specimens at different loading rates

应变率对脆性材料力学性能的影响可通过多种指标进行表征, 尽管材料动态力学性能的绝对值不同, 但归一化得到的应变率对其强度等指标的影响可采用统一的广义关系来描述^[16-17]:

$$\frac{\sigma_{\text{dyn}}}{\sigma_{\text{ref}}} = 1 + \alpha \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{\text{ref}}} \right)^{\beta} \quad (3)$$

式中: σ_{dyn} 和 σ_{ref} 分别为高应变率下和参考应变率 ($\dot{\epsilon}_{\text{ref}}=0.001 \text{ s}^{-1}$) 下材料的抗压强度, α 和 β 为应变率效应参数。以初次压溃应力作为 BHPs 抗压强度并考虑 0.50 应变对应比吸能随相对应变率的变化, 如图 6 所示。在低速冲击下, BHPs 的强度和耗能性均有显著提高, 考虑它在压溃过程中可提供稳定的反馈载荷, 可作为复合结构的填充芯层缓冲载荷并耗散冲击能量^[5], 且颗粒材料特有的流动性和便于通过颗粒尺寸调控力学性能的梯度等优点, 利于异形薄壁结构的填充设计。另外, 相比 SCPs, LCPs 具有更低的颗粒强度和更高的堆积孔隙率, 具有更高的破碎和滑移潜能, 而宏观上 LCPs 的抗压强度和比吸能也体现出更强的应变率相关性, 由此可知颗粒的破碎特性会显著影响其动态压缩响应。

2.3 颗粒破碎特性

考虑颗粒破碎是 BHPs 的主要压缩行为和耗能机制, 材料的表观应力和吸能均与颗粒破碎行为相关, 若 BHPs 中颗粒破碎是率相关的, 则材料必然表现出宏观的应变率效应。因此, 分别从总体破碎率和破碎程度定量表征 BHPs 颗粒破碎特性。通过筛分法获得 0.25 和 0.50 限制应变实验中、不同应变率加载下 BHPs 试样颗粒破碎率, 如图 7(a) 所示。

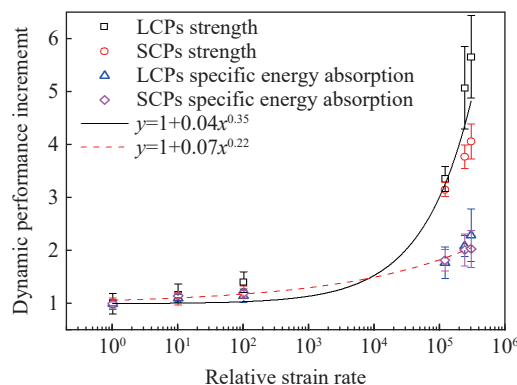
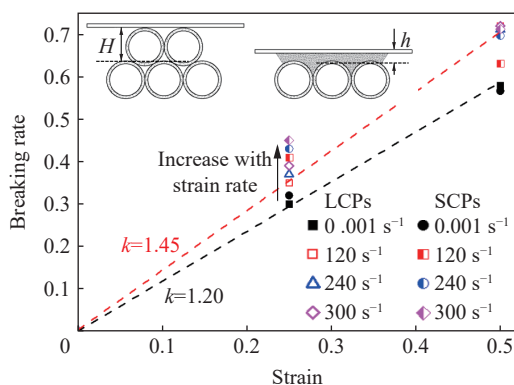
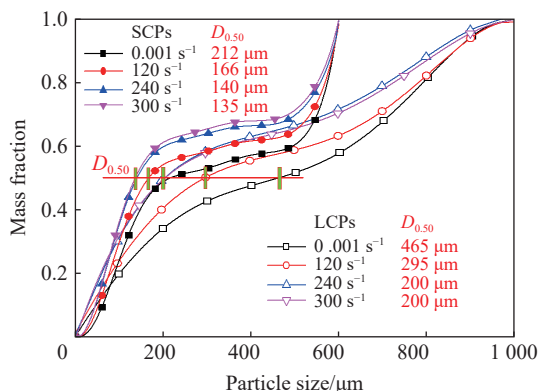


图 6 强度和比吸能的应变率效应

Fig. 6 Dependence of strength and specific energy absorption on strain rate



(a) Breaking rate analysis



(b) Gradation curves

图 7 不同应变率下颗粒破碎特性分析

Fig. 7 Analysis on particle breaking characteristics at different strain rates

LCPs 和 SCPs 在不同应变水平下的破碎率 η 均随着应变率的升高而增加, 表明在相同压缩程度时, 低速冲击加载的试样相对于准静态压缩时产生了更多的颗粒破碎。由实验可知, 可认为准静态和低速冲击下颗粒均层层压溃, 通过计算单层颗粒破碎后释放的纵向空间即可预测颗粒破碎率与表观工程应变间的关系, 如图 7(a) 所示。考虑漂珠颗粒的堆积方式, 破碎前单层颗粒所支撑的空间高度 $H=0.93d$, 该层颗粒破碎后, 由于碎片的存在其实际释放空间高度为 h , 根据球壳基体材料质量守恒并假设碎片密实化堆积, 则 $h=0.15H$, 即单层颗粒破碎所产生的压缩位移增量为 $0.85H$ 。反之, 当压缩应变为 ϵ 时所需产

生的颗粒破碎率 $\eta=1.18\varepsilon$ 。对图 7(a) 的准静态实验结果进行线性拟合, 所得斜率 $k=1.2$, 与分析较为吻合。对低速冲击试验结果进行拟合, 该线性关系斜率约为 1.45, 侧向受限压缩时 ε 同时代表体积应变, 即低速冲击下颗粒破碎率平均增加约 21%。然而, 由图 6 可知, 低速冲击下试样耗能提升的幅度为 50%~125%, 远高于破碎量的增加, 可知低速冲击下不仅颗粒的破碎量有所提升, 产生单位破碎量的颗粒所消耗的能量也高于准静态加载, 即颗粒的总体破碎量和单位破碎所消耗的能量均具有显著的率依赖性, 从而导致了 BHPs 的宏观应变率效应, 而单位破碎所消耗能量的增加主要体现在单颗粒破碎程度的变化。为定量表征颗粒破碎程度, 对 0.50 限制应变静态压缩下的试样进行回收, 测量粒径曲线如图 7(b)。对比 0.50 颗粒碎片的最大尺寸 $D_{0.50}$ 可知, 随着应变率的增高, 颗粒碎片平均尺寸越来越小, 即颗粒的破碎程度随着应变率的增大而增大, 其中 LCPs 的破碎程度增大更为明显, 因此体现出比 SCPs 更强的应变率效应。

相对破碎势 B_r^H 被广泛用以量化颗粒破碎与能量耗散之间的关系, 其定义为^[18]:

$$B_r^H = \int_0^1 (d - d_0) dF \bigg/ \int_0^1 (d_u - d_0) dF \quad (4)$$

式中: $d_0=0.074$ mm 为颗粒破碎极限尺寸, d 和 d_u 分别为颗粒经过一定压缩后的当前级配曲线和初始级配曲线, B_r^H 实际表征颗粒材料破碎势的相对变化量。因此, 破碎势定量表征了具有一定级配的颗粒系统当前所具有的破碎潜能, 而 Hardin 相对破碎势则描述了该破碎潜能经历特定载荷后的变化量。对上述粒径分布曲线进行积分可得材料在相同压缩应变、不同应变率下的相对破碎势, 如图 8 所示。 B_r^H 随应变率的增大而增加, 这也是动态颗粒破碎率和破碎程度提升的表现。然而, 考虑不同加载速率下, 试样虽经历相同变形但所耗散的能量并不相同。考虑 BHPs 在应力平台阶段以颗粒破碎为主, 因此对应力平台阶段曲线进行积分作为颗粒破碎和能量耗散 E_{abs} , 则单位能量耗散下颗粒体系所产生的相对破碎势为:

$$B_{\text{rpe}} = B_r^H / E_{\text{abs}} \quad (5)$$

由图 8 可知, 单位输入能量下产生的破碎势随应变率降低, 即动态加载下颗粒破碎的能量利用率减小。因此, 为产生相同的破碎程度, 动态加载需要更高的能量耗散, 从而表现为应力水平的提高, 颗粒破碎特性的率敏感性和动态破碎能量利用率的降低是产生名义应变率效应的本质原因。

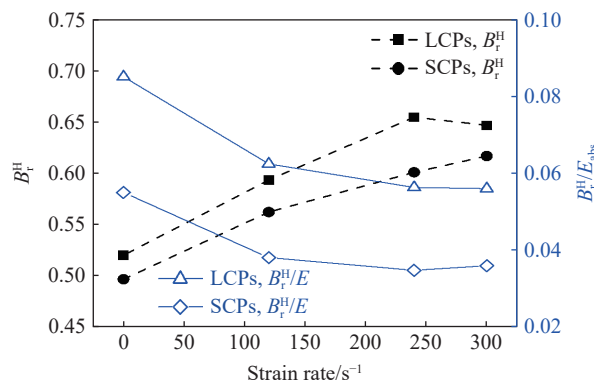


图 8 相对破碎势随应变率的变化

Fig. 8 Variation of relative breaking potential with strain rate

3 数值模拟结果与分析

数值模拟中, 分别设置不同颗粒直径、厚径比和加载速率, 考察颗粒强度和加载速率对其细观压溃行为和力学响应的影响。工况 d800-t80-100 s⁻¹ 表示颗粒外径 800 μm 、壁厚 80 μm 、加载速率 100 s⁻¹。由于实验受颗粒尺寸、壁厚、微缺陷等随机因素影响较显著, 而本模拟仅考虑同尺寸颗粒、规则堆积下的力学行为, 在此仅给出强度最高颗粒在高应变率下和强度最低颗粒在低应变率下的应力曲线以获得统

计性结果, 如图 9(a) 所示。另外, 由于模拟中设置了实体单元的删除失效, 颗粒开始逐层破碎后应力的变化趋势与实际偏差较大, 因此模拟与实验曲线的对比仅限于拟弹性和初始压溃阶段。图中也给出实验和数值模拟所有工况中应力曲线的上、下边界, 其余工况的应力应变曲线均在此范围内波动。实验与数值模拟的应力应变曲线基本吻合, 动态应力曲线中均出现了初次压溃和动态二次压溃应力拐点, 而应变率较低时二次压溃现象并不明显, 该现象与实验结果较一致。

当颗粒尺寸相同、加载率不同时, 试样初次压溃应力基本不变, 但动态二次压溃应力随应变率增加, 且该峰值出现时间随之延后, 如图 9(b) 所示。当不考虑基体材料应变率效应时, 试样的初次压溃和二次压溃应力值略微降低, 如图中阴影区所示, 表明基体材料的应变率效应对初始压溃阶段的应力上升贡献较小, 二次压溃效应的增强应主要归因于颗粒细观破碎行为的加载速率依赖性。

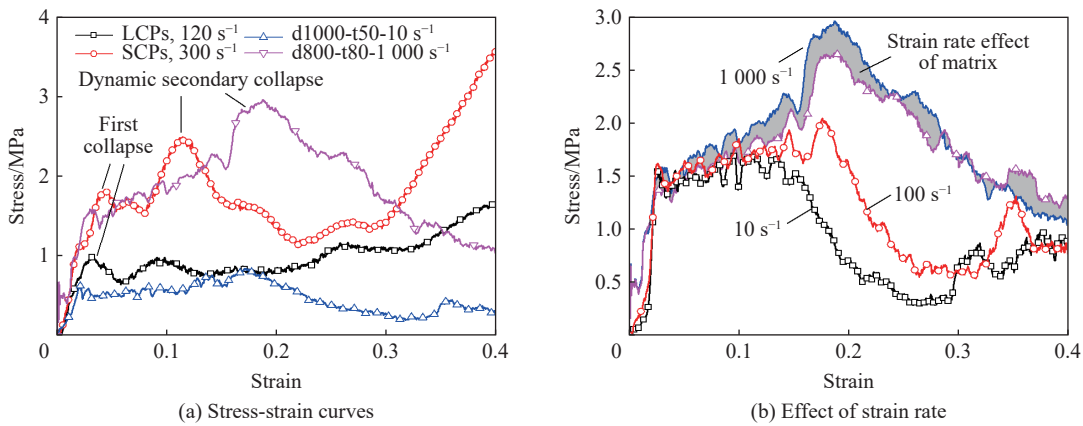


图 9 数值模拟和实验的应力应变曲线

Fig. 9 Simulated and experimental stress-strain curves

图 10 为工况 $d800-t80-1000\text{ s}^{-1}$ 和 $d1000-t50-10\text{ s}^{-1}$ 的颗粒损伤过程云图。强度较大的颗粒在高应变率压缩下, 产生明显的破碎前已通过颗粒间滑移压至较为紧实的状态, 在此过程中虽然颗粒内部产生损伤, 但并未出现显著的破碎现象(见图 10(a)中 $\epsilon=0.15$)。强度较低的颗粒在低应变率加载下, 颗粒的滑移与破碎耦合, 通过滑移产生的压实区仅包括 2~3 层颗粒, 颗粒逐层压溃的同时下部区域仍存在较大的堆积孔隙率(见图 10(b)中 $\epsilon=0.15$)。对比可知, 颗粒细观压溃行为对强度和加载速率存在显著依赖性, 当颗粒破碎发生于堆积孔隙率较低的压实状态时, 则会产生更高的二次压溃应力。图 11 为两种试样在不同加载速率、相同工程应变($\epsilon=0.2$)时的损伤云图。颗粒破碎前堆积体的密实程度随颗粒强度和加载速率的增大而增加; 相同变形阶段时, 加载速率越高则颗粒损伤程度和范围越大, 因此能够产生更多的颗粒破碎率和更大的破碎程度, 这与实验所得相对破碎势随应变率的增大而增加较为吻合, 即材料在相同变形段内产生更高的应力水平和能量耗散, 从而体现出宏观应变率效应。

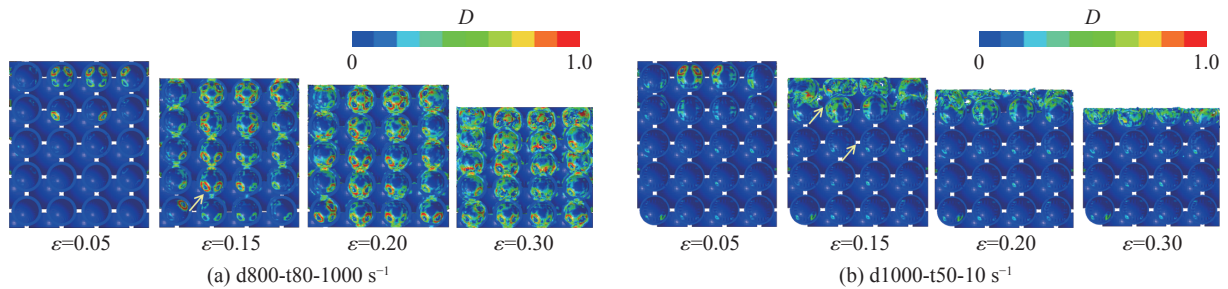


图 10 不同冲击载荷下典型颗粒压溃过程

Fig. 10 Typical crushing process of particles subject under different impact loading conditions

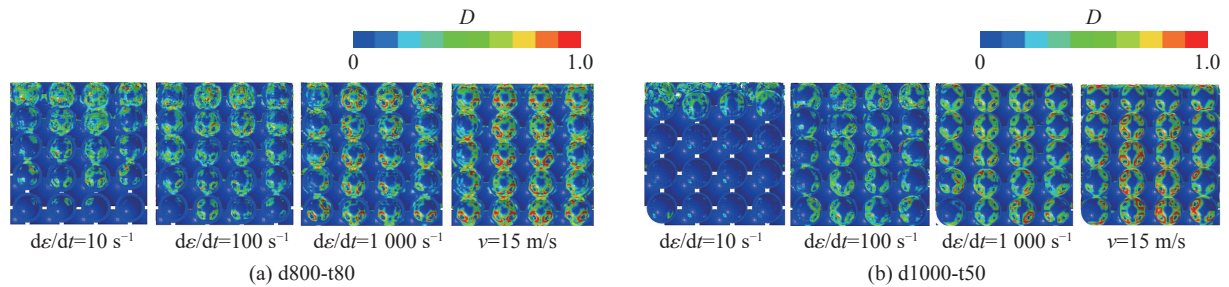


图 11 颗粒强度和加载速率对材料初始压溃行为的影响

Fig. 11 Influences of particle strength and loading rate on initial crushing behavior

由颗粒细观压溃行为分析可知如下。(1)由于初始堆积的松散性, BHPs 在颗粒破碎前主要发生滑移压紧和损伤累积, 压紧区的宽度随颗粒的强度和加载速率的增大而增大(见图 11 中 $d\varepsilon/dt=10, 100 \text{ s}^{-1}$)。(2)强度较大的颗粒在初始压溃阶段的主要行为是滑移和损伤累积, 较少发生颗粒破碎; 强度较低的颗粒在产生滑移的同时快速累积损伤并发生破碎, 且该现象在低应变率下更显著。动态颗粒滑移会引起更高的摩擦耗能, 这也是材料比吸能的提升幅度远高于颗粒破碎量和破碎程度增长率的主要原因。(3)加载速率越大, 颗粒压紧区宽度越大, 在压紧范围内颗粒的损伤程度越高, 对应试样产生更高的破碎势。因此, 脆性空心颗粒材料表现出的宏观应变率效应主要归因于颗粒细观压溃行为的加载速率依赖性, 而该依赖性与颗粒破碎时堆积孔隙率的减小程度有关。对比实验可知, 相比于 SCPs, LCPs 颗粒强度较低、堆积孔隙率较高(堆积密度较小), 在低速冲击压缩时, 堆积孔隙率的减小过程对材料力学响应的影响更明显, 因此它表现的宏观应变率效应也显著大于 SCPs。

4 结 论

通过对不同粒径的漂珠在准静态和低速冲击下力学和破碎特性的实验分析, 结合有限元数值模拟考察了典型脆性空心颗粒低速冲击下宏观应变率效应的产生机理和细观破碎行为特征, 结论如下。

(1)漂珠脆性空心颗粒在低速冲击下的压溃应力、能量耗散和颗粒破碎均表现了显著的应变率效应。在 $0.001 \sim 300 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围, 颗粒破碎率提升约 21%, Hardin 破碎势提高 10%~30%, 而材料比吸能平均提升 50%~125%, 比吸能的额外增加主要与动态颗粒滑移产生的摩擦耗能相关。

(2)空心颗粒材料低速冲击时出现应力水平较高的初始压溃阶段和二次压溃现象, 该现象的细观机理为动态颗粒滑移和压紧行为对加载速率的依赖性。颗粒破碎前滑移压紧区的范围随单颗粒的强度和加载速率的增大而增大。

(3)颗粒破碎特征的定量分析表明, 动态冲击下颗粒破碎的能量利用率相比于准静态加载时显著降低; 数值模拟表明在相同压缩应变下, 动态加载颗粒的损伤范围和程度大于准静态加载; 动态冲击下颗粒压溃行为的率敏感性和破碎能量利用率的降低是导致其宏观应变率效应的主要原因。

参考文献:

- [1] GOEL M D, MONDAL D P, YADAV M S, et al. Effect of strain rate and relative density on compressive deformation behavior of aluminum cenosphere syntactic foam [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 590: 406–415. DOI: 10.1016/j.msea.2013.10.048.
- [2] FAN Z Q, MIAO Y Z, WANG Z Z, et al. Effect of the cenospheres size and internally lateral constraints on dynamic compressive behavior of fly ash cenospheres polyurethane syntactic foams [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 171: 329–338. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.008.
- [3] 赵凯, 罗文超, 李煦阳, 等. 人防工程中空壳颗粒材料抗爆性能试验研究 [J]. *实验力学*, 2012, 27(2): 189–194. ZHAO K, LUO W C, LI X Y, et al. Experimental study of explosion load bearing performance of Shelly cellular material used in civil defense engineering [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(2): 189–194.

- [4] 孙晓旺,李永池,叶中豹,等.新型空壳颗粒材料在人防工程中应用的实验研究[J].*爆炸与冲击*,2017,37(4):643–648. DOI:10.11883/1001-1455(2017)04-0643-06.
SUN X W, LI Y C, YE Z B, et al. Experimental study of a novel shelly cellular material used in civil defense engineering [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 643–648. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0643-06.
- [5] RAHMÉ P, BOUVET C, RIVALLANT S, et al. Experimental investigation of impact on composite laminates with protective layers [J]. *Composites Science and Technology*, 2012, 72(2): 182–189. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.10.015.
- [6] OMIDVAR M, ISKANDER M, BLESS S. Stress-strain behavior of sand at high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 49: 192–213. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.03.004.
- [7] HUANG J Y, XU S L, HU S S. Influence of particle breakage on the dynamic compression responses of brittle granular materials [J]. *Mechanics of Materials*, 2014, 68: 15–28. DOI: 10.1016/j.mechmat.2013.08.002.
- [8] HUANG J, XU S, HU S. Effects of grain size and gradation on the dynamic responses of quartz sands [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 59: 1–10. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.03.007.
- [9] 王壮壮,徐鹏,范志强,等.漂珠颗粒材料静动态力学性能与破碎机理研究[J].*爆炸与冲击*,2020,40(6):063101. DOI:10.11883/bzycj-2019-0337.
WANG Z Z, XU P, FAN Z Q, et al. Study on static and dynamic mechanical properties and fracture mechanism of cenospheres [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(6): 063101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0337.
- [10] CROOM B P, JIN H, MILLS B, et al. Damage mechanisms in elastomeric foam composites: multiscale X-ray computed tomography and finite element analyses [J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 169: 195–202. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.11.025.
- [11] MONDAL D P, JHA N, GULL B, et al. Microarchitecture and compressive deformation behaviour of Al-alloy (LM13)-cenosphere hybrid Al-foam prepared using CaCO₃ as foaming agent [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 560: 601–610. DOI: 10.1016/j.msea.2012.10.003.
- [12] HOLOMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjective to large strains, high strain rates, and high pressure [C]//Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics. USA: American Defense Preparedness Association, 1993: 591–600.
- [13] 巫绪涛,李耀,李和平.混凝土HJC本构模型参数的研究[J].*应用力学学报*,2010,27(2):340–344.
WU X T, LI Y, LI H P. Research on the material constants of the HJC dynamic constitutive model for concrete [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2010, 27(2): 340–344.
- [14] 任根茂,吴昊,方秦,等.普通混凝土HJC本构模型参数确定[J].*振动与冲击*,2016,35(18):9–16. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2016.14.002.
REN G M, WU H, FANG Q, et al. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(18): 9–16. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.14.002.
- [15] 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(1–4): 650–664. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.05.007.
- [16] BISCHOFF P H, PERRY S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates [J]. *Materials and Structures*, 1991, 24(6): 425–450. DOI: 10.1007/BF02472016.
- [17] RAMESH K T, HOGAN J D, KIMBERLEY J, et al. A review of mechanisms and models for dynamic failure, strength, and fragmentation [J]. *Planetary and Space Science*, 2015, 107: 10–23. DOI: 10.1016/j.pss.2014.11.010.
- [18] HARDIN B O. Crushing of soil particles [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(10): 1177–1192. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:10(1177).

(责任编辑 丁峰)