

稿号: XXXX-XXXX (初稿/修改稿, 稿号请作者在退修时补充)

本文亮点介绍(砂颗粒具有应变率相关性, 在荷载作用下会发生颗粒破碎, 影响材料的力学特性。既有相关报道主要采用常规压力机研究砂在静态/准静态条件下砂的破碎效应, 并发现不同的加载速率会影响砂的强度和破碎特性, 但常规压力机无法实现中高应变率加载条件。本文采用霍普金森杆冲击试验, 研究了硅质砂在不同加载条件下砂的动态应力-应变特征及颗粒破碎特性。结果表明, 砂在动荷载作用下的压实主要由屈服阶段的塑性压密和塑性阶段的破碎压密组成; 颗粒相对破碎指数与应变率和有效粒径均近似呈正比关系, 与分形维数呈反比。粒度对吸能效率的影响随颗粒特性的不同而变化; 为提高砂的吸能效率和减小负荷水平, 建议采用较大粒径的硅砂):

动荷载下硅砂的破碎特性及吸能效应试验研究^{*}

崔鹏¹, 罗刚², 刘乐³, 曹芯芯⁴, 李邦翔¹, 梅雪峰^{5*}

1. 山东理工大学 建筑工程与空间信息学院 山东 淄博 255049;
2. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院 四川 成都 611756;
3. 重庆交通大学 土木工程学院 重庆 400074;
4. 山东交通职业学院 公路与建筑系 山东 潍坊 261206;
5. 内蒙古科技大学 土木工程学院 内蒙古 包头 014010)

摘要: 为揭示动荷载下硅砂的破碎特性及吸能效应, 基于改进的分离式霍普金森杆(SHPB)研究了四种粒组砂样(2.5-5.0 mm、1.25-2.5 mm、0.6-1.25 mm和小于0.3 mm)的动力响应特征。结果表明, 粒径和应变率会影响砂的动态应力-应变行为, 砂的变形可分为弹性、屈服和塑性三个阶段, 试样的压实过程主要由屈服阶段的塑性压密和塑性阶段的破碎压密组成; 颗粒相对破碎指数与应变率及有效粒径均近似呈正比关系, 与分形维数呈反比; 颗粒粒度对吸能效率的影响随颗粒特性的不同而变化(矿物组成、粒径及分化程度等); 相同应力水平下, 颗粒粒径越大, 能量吸收效率越高; 相同加载应变率条件下, 颗粒越大, 试样的峰值应力越小。为提高砂的吸能效率和减小负荷水平, 建议采用较大粒径的硅砂。

关键词: 硅质砂; 分离式霍普金森杆(SHPB); 分形破碎特征; 吸能效应

中图分类号: TU318

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

Experimental study on crushing characteristics and energy absorption effect of silica sand under dynamic loading

CUI Peng¹, LUO Gang², LIU Le³, CAO Xinxin⁴, LI Bangxiang, MEI Xuefeng^{5*}

(1. School of Architectural Engineering, ShanDong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China;

2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

4. Department of Highway and Architecture, Shandong Transport Vocational College, Weifang Shandong, 261206, China;

5. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: This study investigates the dynamic response characteristics of silica sand under dynamic loading, employing a modified Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) to gain insights into its crushing behavior and energy absorption properties. Four distinct grain size groups (2.5–5.0 mm, 1.25–2.5 mm, 0.6–1.25 mm, and less than 0.3 mm) were analyzed, with results demonstrating that the dynamic stress-strain behavior of silica sand is affected by both grain size and strain rate. The

*收稿日期: _____; 修回日期: _____;

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2021QE209); 国家自然科学基金青年项目(52309137); 国家自然科学基金面上项目(42277143); 国家重点研发计划(2022YFC3005704); 四川省自然资源厅科技项目(KJ-2023-004)

第一作者: 崔鹏(1998—), 男, 硕士研究生. E-mail: 22507020014@stumail.sdut.edu.cn;

通信作者: 梅雪峰(1987—), 男, 博士, 讲师. E-mail: xfmei@my.swjtu.edu.cn.

deformation process of silica sand is categorized into three stages: elastic, yielding, and plastic. Plastic compaction is dominant during the yielding stage, whereas crushing compaction prevails in the plastic stage. The relative crushing index of particles shows a positive correlation with both strain rate and effective particle size, and an inverse correlation with fractal dimension. The impact of particle size on energy absorption efficiency is influenced by factors such as mineral composition, particle size, and differentiation degree. Under identical stress levels, larger particle sizes demonstrate greater energy absorption efficiency; similarly, under identical loading strain rates, larger particles exhibit lower peak stress. To improve sand's energy absorption efficiency and reduce required loading levels, sand with larger particle sizes is recommended.

Keywords: silica sand; split Hopkinson pressure bar (SHPB) test; fractal crushing characteristics; energy absorption effect

砂是一种具有多孔、松散和高压缩性特点的颗粒状材料^[1], 在爆炸、冲击和振动荷载作用下, 会发生显著的变形和破碎效应^[2], 对应力波有极强的弥散和衰减特性, 被广泛应用于军事防护分配层^[3]和抗落石冲击棚洞(挡墙)缓冲层^[4]等方面。与固体材料不同, 由于砂的流固特性, 动荷载下材料的应力-应变关系更为复杂。压缩过程中, 大孔隙对颗粒的破碎具有促进作用, 随颗粒的破碎, 颗粒之间的接触形式改变, 刚度显著增大^[5], 砂由初始高压缩性“流相态”转变为低压缩性“固相态”, 表现出致密的类岩特性^[6]。研究动荷载作用下砂的应力-应变关系和颗粒破碎特征对于了解在砂中打桩、振冲、强夯及爆炸冲击中的动力学特性具有重要意义。

砂的动力学响应研究可采用重锤系统^[7]、激波管^[8]、摆锤^[9]、爆炸模型试验^[10]及分离式霍普金森杆(SHPB)等试验进行。然而, 通过落锤和摆锤装置很难获得中高应变率条件下材料的力学响应, 而爆炸模型试验通常使用嵌入式压力计获取应力数据, 由于应力计与材料波阻抗的巨大差异以及压力计对应力波的干扰, 可能会导致穿过试样的透射应力大于入射应力的问题^[11]。分离式霍普金森杆通过测试入射杆和透射杆两端的弹性变形进而计算试样两端的应力和应变特征, 成功的解决了在试样同一位置同时测量随时间变化的应力和应变的难题, 得到的结果比嵌入式压力计更准确且可以通过改变杆径和增大子弹速度进行高应变率加载。针对散体颗粒的破碎特性及本构模型, 董凯等^[12]采用 SHPB 试验和数值模拟构建了珊瑚砂应变率强化动态本构模型。Luo 等^[13]对 9 组不同颗粒级配的埃格兰砂试样进行了重复冲击试验发现, 较大颗粒在动态压缩下更容易破碎, 而致密小颗粒具有更大的吸能效果。Ou Yang 等^[14]对钙质砂的动态压缩性能研究表明, 冲击荷载作用下, 钙质砂的表观动态刚度仅为硅砂的 1/8-1/9, 且钙砂在较低应力下的吸能效果比硅砂更佳。Lv 等^[15]对比了粒径对钙砂和硅砂动态应力-应变的影响。结果表明, 钙砂比硅砂更容易破碎, 且钙质砂的吸能效率随粒径增大而增大, 但硅质砂的吸能效率随粒径增大而减小。Xu 等^[16]研究了不同粒组分布的钙质砂动态响应和断裂特性, 证明细颗粒的破碎受加载率和含水率的影响, 而中颗粒和粗颗粒的破碎主要受应变速率的影响。Xiao 等^[17]对比了准静态加载和高应变率加载工况下碳酸盐砂的动力响应, 发现在相同应力水平下, 准静态加载条件下的颗粒破碎程度高于动态加载。

已经证实, 颗粒破碎对砂的刚度^[18]和强度^[19]有重要影响。影响颗粒破碎的主要因素可归纳为初始级配^[20]、粒径^[21]、外应力^[22]和饱和度^[23]等。多种因素耦合作用的影响导致砂的动力响应表现出高度非线性特点, 已有相似的研究成果尚未形成统一的认识, 甚至出现彼此矛盾的情况^[24]。此外, 既有砂的破碎特性研究主要集中于静态/准静态等低应变率加载条件, 作为一种应变率相关性材料, 不同加载速率下砂的力学特性会发生较大改变。为此, 本文基于 SHPB 开展了硅砂在中高应变率的冲击试验, 测试了粒组分别为 2.5-5.0 mm、1.25-2.5 mm、0.6-1.25 mm 和小于 0.3 mm 试样的动态响应, 分析了粒径和应变率对硅砂动力学行为的影响, 并对颗粒分形破碎和能量吸收特征进行了量化和分析。

1 试验设置

1.1 试验装置及原理

分离式 SHPB 装置主要由加载系统、压杆系统以及数据采集模块组成。加载系统通过压缩氮气驱动子弹撞击入射杆，其中，子弹速度可通过调节气压控制。压杆系统由入射杆和透射杆组成，杆径 $\Phi 40$ mm，长度分别为 2400 mm 和 2000 mm，材质为 7075 铝合金，弹性模量为 71 GPa，弹性波在杆内的传播速度为 $5000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。应变数据采集模块中，考虑本文测试的散体材料波阻抗较小且为变化值，试验采用高灵敏度半导体应变片，电阻值为 120Ω ，增益系数 1000，应变片距试件两端均为 850 mm。

设计了适用于散体颗粒材料的加载套筒。改进的套筒由盛放试样的外套筒、控制试样长度的内套筒及功能不同的 3 组垫片组成。其中外套筒由高强钢制成，长度 400 mm，内径 40.1 mm，壁厚 2 mm，可以侧向约束散体材料，并允许入射杆在套筒内滑动和转动。套筒上布置螺孔，通过螺栓固定垫片在套筒中的位置调节试样长度，并在冲击过程中排出空气，减小试验误差；内套筒材质与外套筒材质相同，直径 25 mm，主要用于精确控制试样的长度和初始密度；垫片分别为前端垫片、后端垫片和支撑垫片。前端和后端垫片材质与 SHPB 杆相同，采用 7075 铝合金，直径为 40.0 mm，厚度为 15 mm。垫片的主要作用是消除试件与杆端之间的不连续性和约束散体颗粒；支撑垫片与套筒材料相同，厚度为 10 mm，位于后端垫片底部，仅在试样制作时使用，可保证后端垫片在固定时不发生倾斜，从而保证试样长度的精确控制。

SHPB 冲击试验过程中，入射应变 ε_I 与反射应变 ε_R 由入射杆上的应变片测得，透射应变 ε_T 可由透射杆上的应变片测得。电压信号转变为应变信号按下式计算：

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot U_{in} (V)}{K \cdot U_{WB} (V) \cdot n \cdot A_i} \quad (1)$$

式中， U_{in} 为半导体应变片测量的电压， K 为半导体应变片灵敏系数，取值为 2.08； n 为桥臂数，本试验接入方式为半桥，取值为 2。通过预试验确定增益系数 $A_u=1000$ ，桥压 $U_{WB}=4 \text{ V}$ 。

根据一维应力波理论^[25]，可得到杆中入射应变 ε_I 、反射应变 ε_R 和透射应变 ε_T 。其中，试件的应力 σ_s 、应变 ε_s 和平均应变率 $\dot{\varepsilon}$ 分别为：

$$\sigma_s = \frac{E_C A_C}{2A_S} (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (2)$$

$$\varepsilon_s = \frac{C_C}{L_S} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{C_C}{L_S} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad (4)$$

式中， σ_s 为试样应力， ε_s 为试样应变， $\dot{\varepsilon}_s$ 为试样应变率， A_S 和 L_S 为试样横截面面积和长度， A_C 、 E_C 和 C_C 分别为杆横截面面积、弹性模量和波速， ε_I 、 ε_T 和 ε_R 分别为入射、透射和反射应变， t 为时间。

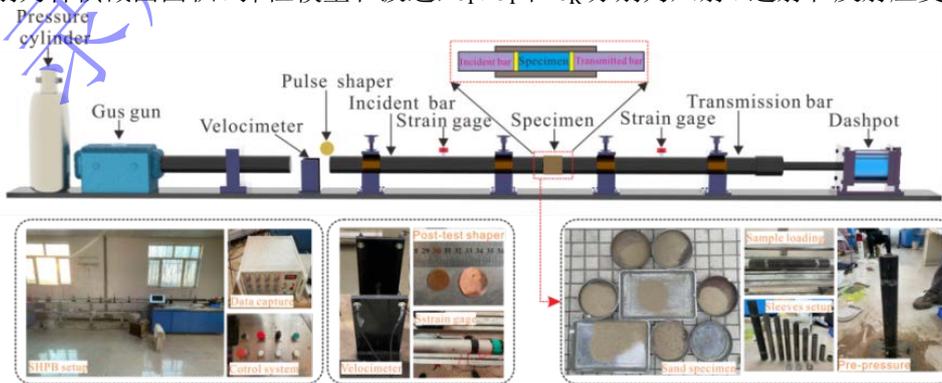


图 1 改进的霍普金森杆

Fig. 1 Improved Split Hopkinson pressure bar

1.2 试验材料

试验用砂取自天津河砂,在 105 °C 的烘箱中对砂样进行 24 h 恒温烘干处理。根据级配曲线(图 2),原始砂样平均粒径为 0.63 mm,不均匀系数为 5.07,曲率系数为 1.02。图 3 为本文砂颗粒的 EDS 能谱图,其中硅元素和氧元素含量最高。Si 含量 43.50 %, O 含量为 41.48 %, C 含量为 8.54 %, Al 含量为 4.07 %, K 含量为 0.31 %, Ca 含量为 1.61 %, Fe 含量为 0.49 %。图 4 为砂表面典型 SEM 图。可以看出砂颗粒表面粗糙且存在大量的孔隙和不连续初始裂隙,这些初始孔隙和缺陷是砂粒容易破碎的因素之一。根据试验设计,本文选用粒组范围分别为 2.5-5 mm、1.25-2.5 mm、0.6-1.25 mm 和小于 0.3 mm 的试样进行冲击加载。

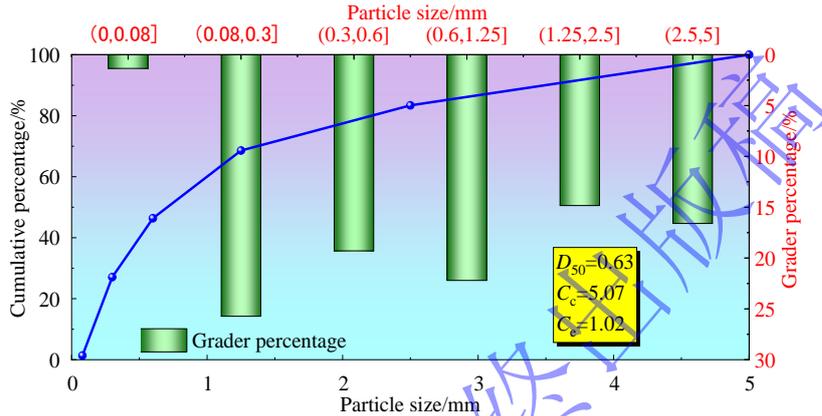


图 2 粒径分布图

Fig. 2 Particle size distribution

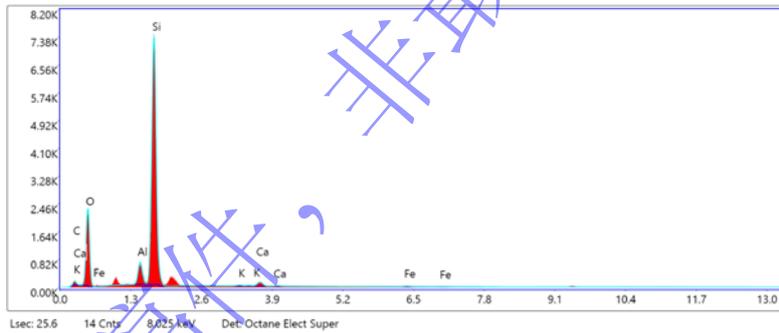


图 3 EDS 能谱图

Fig. 3 EDS energy spectra

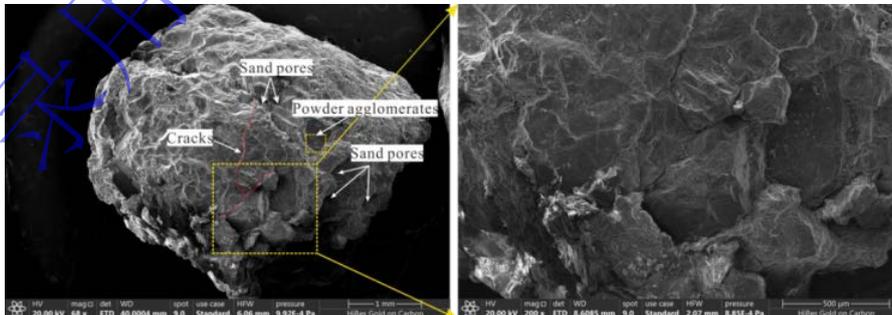


图 4 硅砂表面 SEM 图

Fig. 4 Scanning electron microscope photo of silica sand

1.3 试验步骤

李胜林等^[26]指出,试件长径比在 0.4-1.0 范围内时,可较准确地反映材料的动态力学性能。考虑到试件长度过短时,端面摩擦力较大,边界效应显著,对试验结果影响较大,本文所采用的试样长度为

40 mm，设计长径比为 1.0。由于本文不讨论试样初始密度对砂的力学性能影响，因此试验前需精确控制试样初始密度。考虑到套筒直径和试样长度较小，装样过程中可能会造成试样上表面平整度不均匀。为此，每次装样完毕后，需要进行适当预压。为确保预压不会导致颗粒破碎，影响砂的初始级配，需精确设计试样密度。经过多次调整，最终确定砂的初始密度为 $1.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，每次试验装样后，使用小型液压机施加 240 kPa 的预压应力，预压高度约为 1 mm。具体试验步骤如下（图 5）：（1）将支撑垫片放置于水平面，并叠放下垫片于支撑垫片顶端，用螺栓固定套筒和下垫片；（2）将称重砂样均匀倒入套筒内，轻压整平并缓慢滑落上垫片至试样顶端，确保套筒内空气排出；（3）将对应长度内套筒置于上垫片，将限位垫片盖于内套筒顶端，均匀缓慢地预压试样至内外套筒端部齐平结束（限位垫片与外套筒接触）；（4）取出内套筒，并用螺栓固定上垫片以避免试样搬运过程中长度和密度发生变化；（5）将安装好的试件置于入射杆与透射杆之间，调整套筒水平，并使入射杆端面与垫片端面保持充分接触。为减小摩擦，每次试验需在入射杆和前端垫片及透射杆和后端垫片之间涂抹润滑油。

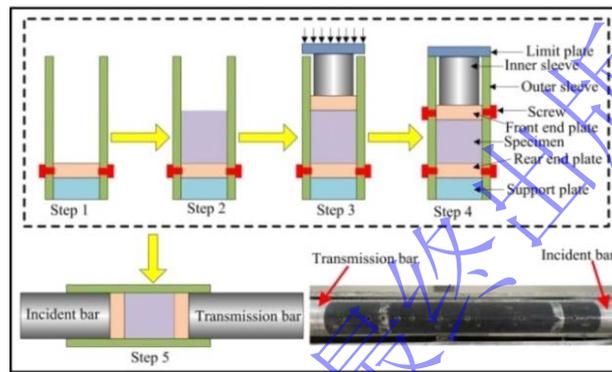
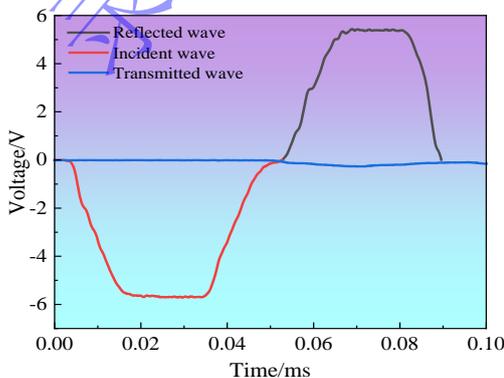


图 5 试验步骤
Fig. 5 Test steps

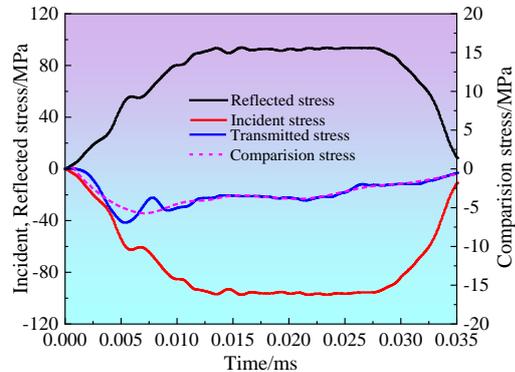
2 试验结果与分析

2.1 试验有效性验证

为确保 SHPB 试验的有效性，对典型电压信号进行分析和处理。图 6 a 为典型三波电压信号，结果表明波形连续光滑，未出现明显的跳跃和震荡，初步证明试样中不存在应力波叠加效应。采用波头对齐方式计算得到试样两端的应力时程曲线（图 6 b），表明试样两端的入射电压信号和反射电压信号之和与透射电压信号近似相等，满足应力平衡条件。考虑到材料本身的离散性及试验误差，相同粒组试样采用相同气压重复测试至少 2 次，取平均值作为代表值（图 6 c）。从图 6 d 可以看出，试样在加载开始约 $150 \mu\text{s}$ 后进入近似恒定应变率阶段，说明 SHPB 试验能够实现常应变率加载，下文中关于应变率分析均采用平台段的平均应变率作为当次加载结果。



(a) 典型三波图



(b) 应力平衡验证

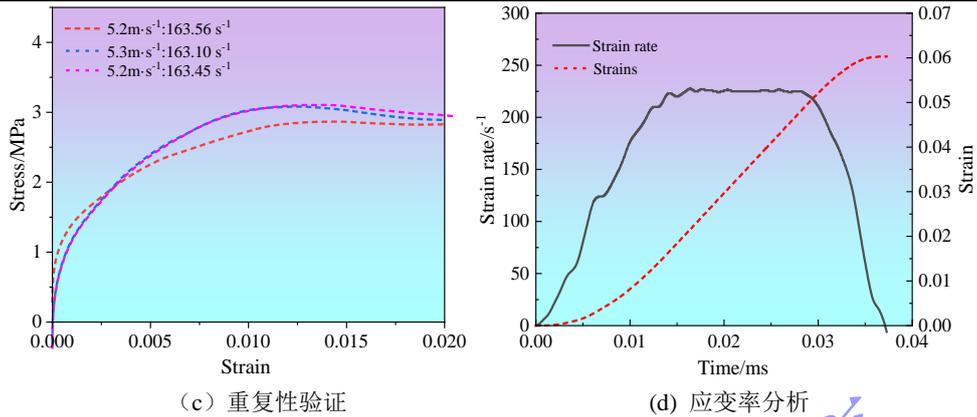


图 6 试验结果有效性验证

Fig. 6 Validation of the validity of test results

2.2 动态应力-应变特征

图 7 a~7 c 给出了试样的动应力-应变特征曲线。结果表明，不同粒径范围和不同加载速度下的试样动态应力-应变关系曲线具有相似的规律。近似相同应变率加载条件下，粒径越大，试样的变形越大；相同粒组下，应变率越大，峰值应力越大。根据干砂的应力-应变特征曲线（图 7 d），砂的变形可分为弹性阶段（OA）、屈服阶段（AB）、塑性阶段（BC）和卸载阶段（CD）。在弹性阶段，应力与应变呈线性关系，荷载主要由砂骨架承担，且应力未超过骨架的弹性极限；在屈服阶段，应力快速增长，砂骨架及孔隙开始变形破坏，颗粒发生滑移，细颗粒逐渐填充孔隙；在塑性阶段，颗粒破碎并发生重组，破碎的细颗粒逐渐填满孔隙，试样被压得密实，颗粒之间难以滑动，应力达到峰值；随着应力-应变进入卸载阶段，应力迅速下降，冲击结束。值得注意的是，由于小于 0.3 mm 粒组范围内颗粒更小，且包含粒径小于 0.074 mm 不可破碎颗粒^[27]，表现出压缩过程中试样变形更小和塑性阶段不明显的特点。

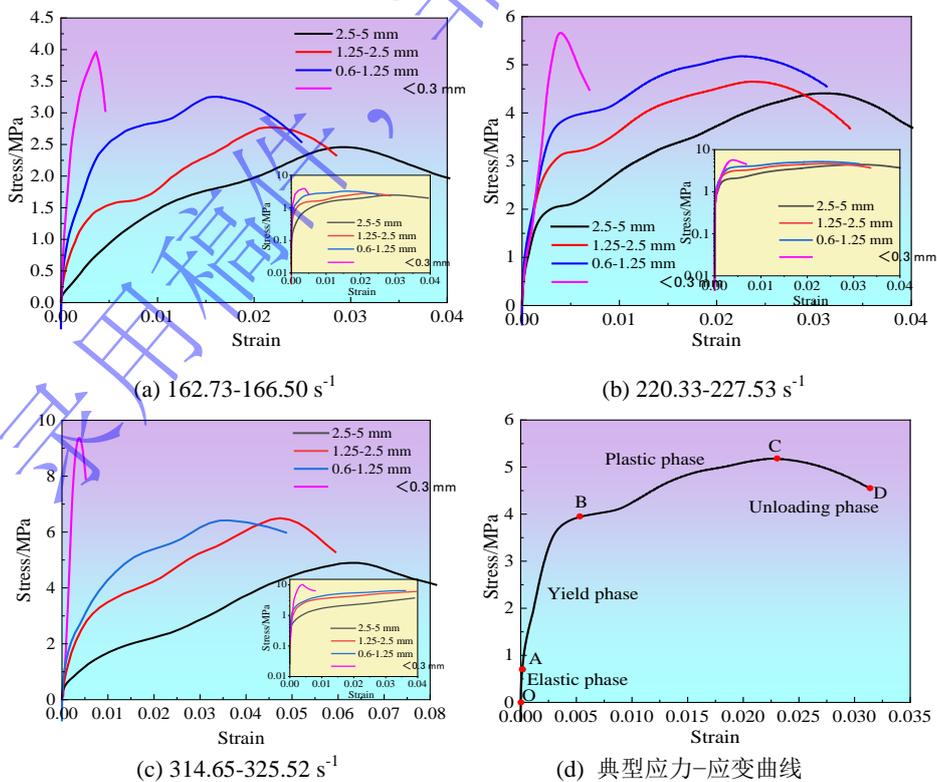


图 7 应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve

对比应力-应变曲线各阶段发现, 试样在弹性阶段的应力和应变均比较小, 证明砂属于典型的弹塑性材料, 在极小的应变 (0.5 %) 下即可进入屈服阶段。与塑性阶段相比, 屈服阶段的应变增长较小, 但应力增长速率较快, 承担的动荷载的比例较大。塑性阶段中, 颗粒大量破碎并重新排列, 变形显著增大, 应力-应变曲线斜率显著减小, 表现出较明显的软化特征。由此可见, 试样屈服阶段的变形小于塑性阶段。试样压实过程可概括为屈服阶段的塑性压实和塑性阶段的破碎压密。

根据干砂典型应力-应变特征, 近似相同的应变率下, 砂的屈服应力随粒径增大而近似线性减小(图 8)。峰值应力随粒径减小而增大(图 9)。证明砂存在较明显的应变率相关性效应。与应变率约为 1000 s^{-1} 时珊瑚砂的屈服应力与颗粒有效粒径的关系相比^[24], 本文砂的结果与珊瑚砂比较吻合。砂的高压缩性与易破碎性可以从材料的宏观特性解释。较大颗粒具有更多的初始缺陷和棱角显著的特点^[28,29] (图 4)。动态压缩过程中, 颗粒形状显著影响粒间应力分布, 大粒径和形状不规则颗粒间接触面积小, 应力集中更明显^[30,31], 颗粒越容易破碎^[32], 表现为相同应变率水平下, 随粒径增大, 变形增大的特点(图 10)。此外, 颗粒破碎后形成的碎屑填充于孔隙中, 降低了试样孔隙比, 同时破碎释放了颗粒的内孔隙, 对试样压缩变形具有促进作用。

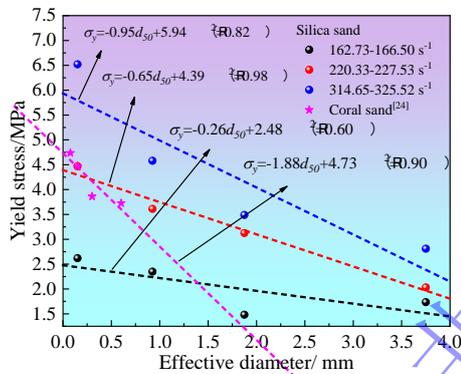


图 8 屈服应力与有效粒径的关系

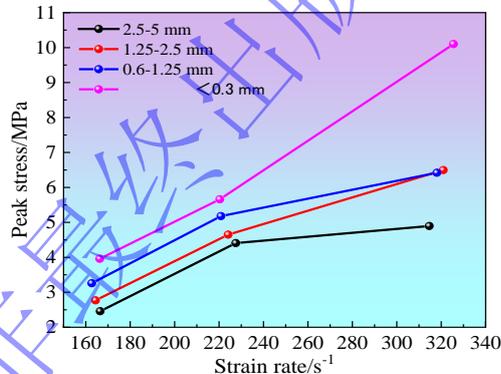


图 9 峰值应力与应变率的关系

Fig. 8 Relationship between yield stress and effective diameter

Fig. 9 Relationship between peak stress and strain rate

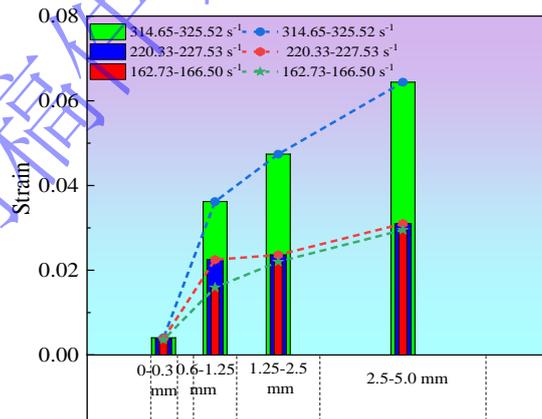


图 10 砂颗粒变形特性

Fig. 10 Deformation characteristics of sand particles

2.3 颗粒破碎及分形特征

作为一种典型的耗能材料, 颗粒破碎对材料的力学性能具有重要影响。为描述散体颗粒的破碎特性, Hardin^[27]在假定小于 0.074 mm 颗粒不可破碎的前提下, 从能量角度分析颗粒破碎效应, 并提出了相对破碎指数 B_r :

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (5)$$

式中, B_t 为冲击前后颗粒破碎量差值, B_p 潜在破碎势, 代表颗粒的破碎潜力, B_r 为相对破碎指数。

砂材料由形状各异及大小不一的颗粒组成, 且具有明显的自相似结构特征。为描述颗粒粒径大小和分布的均匀程度, 引入分形模型量化颗粒的分形特征。结合筛分试验及分形理论, 假定试样中各颗粒具有相同的密度, 进一步得到颗粒质量与粒径的分形关系^[33]:

$$P(d) = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^\gamma \quad (6)$$

式中, $P(d)$ 为小于某粒径颗粒百分比含量, d_i 为颗粒粒径, d_{\max} 为粒组内最大粒径, γ 为分形维数。

2.3.1 颗粒破碎特征分析

颗粒破碎是指在外荷载作用下, 颗粒发生结构的破裂或破损, 分裂成多个粒径相等或不等的颗粒。Guyon^[34]提出了破碎的3种类型, 即破裂(fracture)、破碎(attrition)和研磨(abrasion), 如图11所示。压实过程中, 骨架中的颗粒由于相互挤压作用发生破裂, 并分裂成粒径不均的多个颗粒。此外, 由于颗粒自身结构的初始缺陷, 挤压过程中部分黏着于颗粒表面的碎屑容易脱落, 导致大颗粒逐渐变小。因此, 在压实作用下颗粒通常表现出破裂与破碎两种类型, 而研磨主要发生在粗颗粒的剪切作用面上。

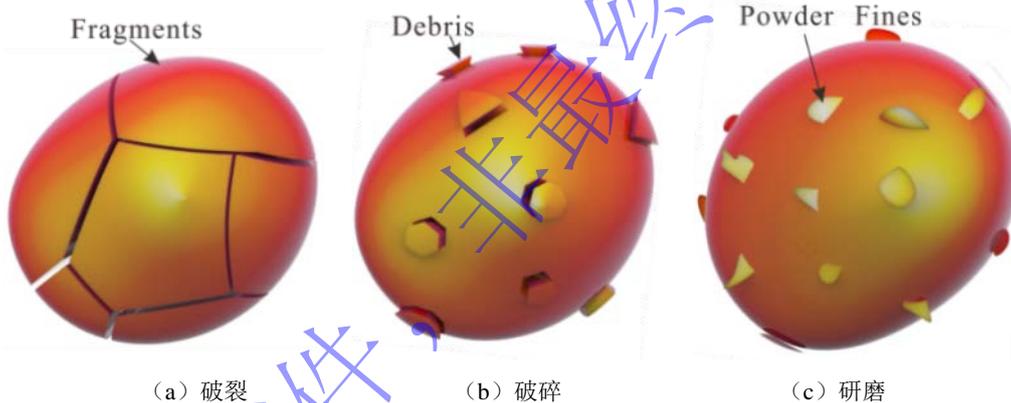


图 11 砂颗粒破碎模式^[34]

Fig. 11 Particle crushing mode of sand^[34]

图 12 给出了各粒组试样试验前后粒径分布变化范围。其中 Hardin^[27]和 Sadrekarimi 和 Olson^[35]对颗粒破碎的上限分别定义为 0.074 mm 和 0.01 mm。与原始级配曲线相比, 随冲击速度的增大, 试验后的粒径分布曲线向左移动, 表明在冲击作用下, 发生了颗粒破碎。速度越大, 破碎颗粒的质量随之增加。此外, 由于大颗粒相对于小颗粒更容易破碎, 因此随着颗粒粒径增大, 冲击后形成的小颗粒数量增多。对于初始粒组小于 0.3 mm 范围内的试样, 由于该粒组范围内存在较多粒径小于 0.074 mm 不可破坏的颗粒, 因此冲击前后颗粒的级配曲线的变化幅度较小。

图 13 展示了颗粒有效粒径和应变率对相对破碎指数的影响。图 13 a 表明在相同的应变率水平下, 相对破碎指数与有效粒径近似呈线性关系。在应变率介于 162.73-166.50 s⁻¹, 有效粒径由 0.925 mm 增大至 3.75 mm 过程中, 相对破碎指数由 0.15 增大至 0.24; 在应变率介于 220.33-227.53 s⁻¹, 相对破碎指数由 0.24 增大至 0.34; 在应变率介于 314.65-325.52 s⁻¹, 相对破碎指数由 0.36 增大至 0.43。随着应变率的增大, 颗粒的破碎程度显著增强, 颗粒尺寸较大的更容易发生破碎。与文[16]中钙质砂的结果相比, 相对破碎指数随有效粒径的变化趋势相似, 但由于钙质砂成分组成与硅砂不同, 相同有效粒径和应变率水平下, 钙质砂的相对破碎指数大于本文砂样, 且相同有效粒径下, 钙质砂的破碎程度更高。此外, 在假定粒径小于 0.074 mm 不会发生破坏的前提下, 相对破碎指数与应变率呈正相关(图 13 b)。

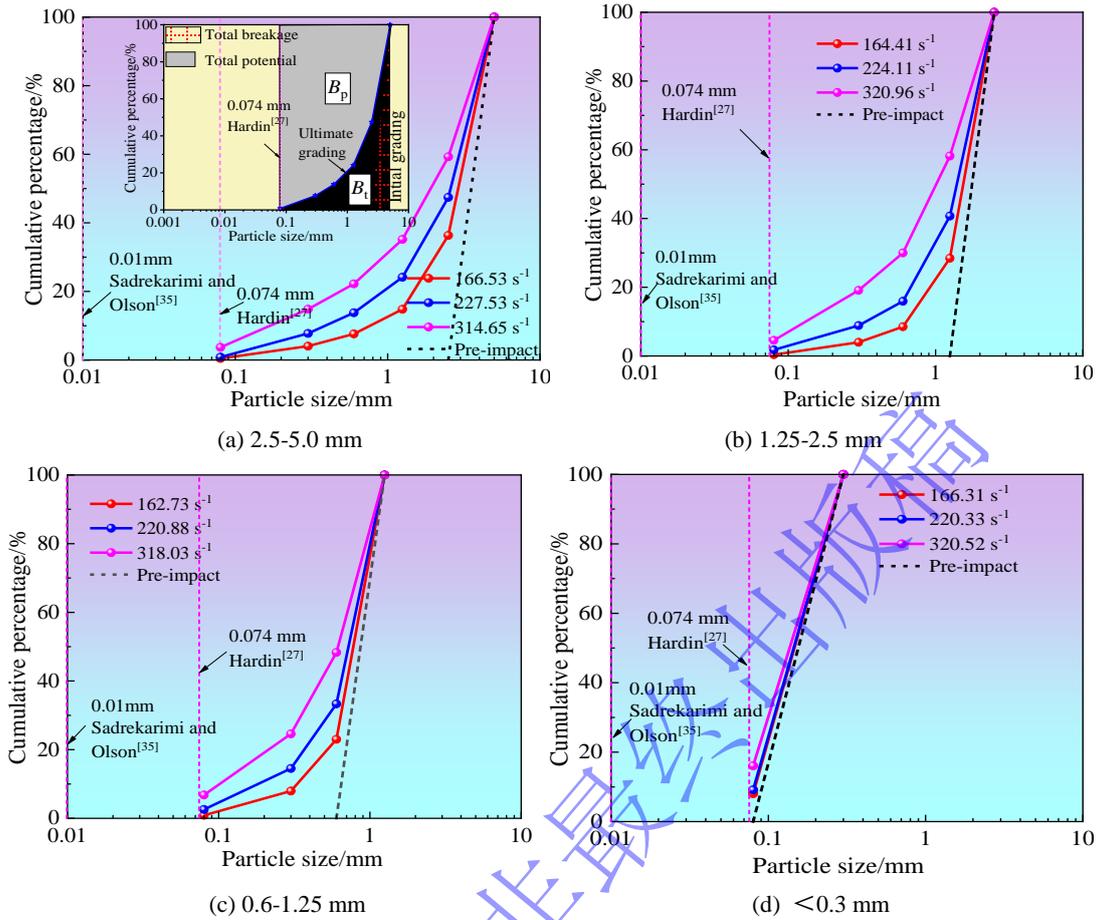


图 12 粒径分布演化

Fig. 12 Evolution of particle size distribution

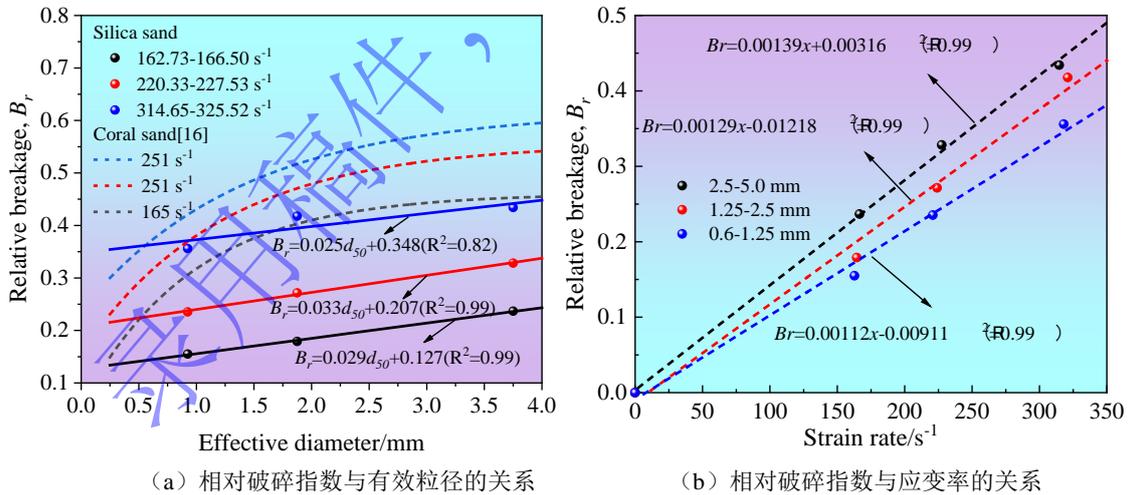


图 13 相对破碎指数影响因素

Fig. 13 Factors influencing the relative breakage

为直观地描述动荷载作用下砂颗粒的破碎特性，图 14 给出了不同粒组及不同加载速度下，颗粒的破碎产物分布实物图。结果表明，随应变率的增加，破碎产物尺寸逐渐细化，2.5-5.0 mm 粒组破碎作用最显著，部分大颗粒破碎成小粒径的颗粒，而小于 0.3 mm 粒组破碎效应不明显，破碎模式的演化规律与级配曲线的结果基本一致。

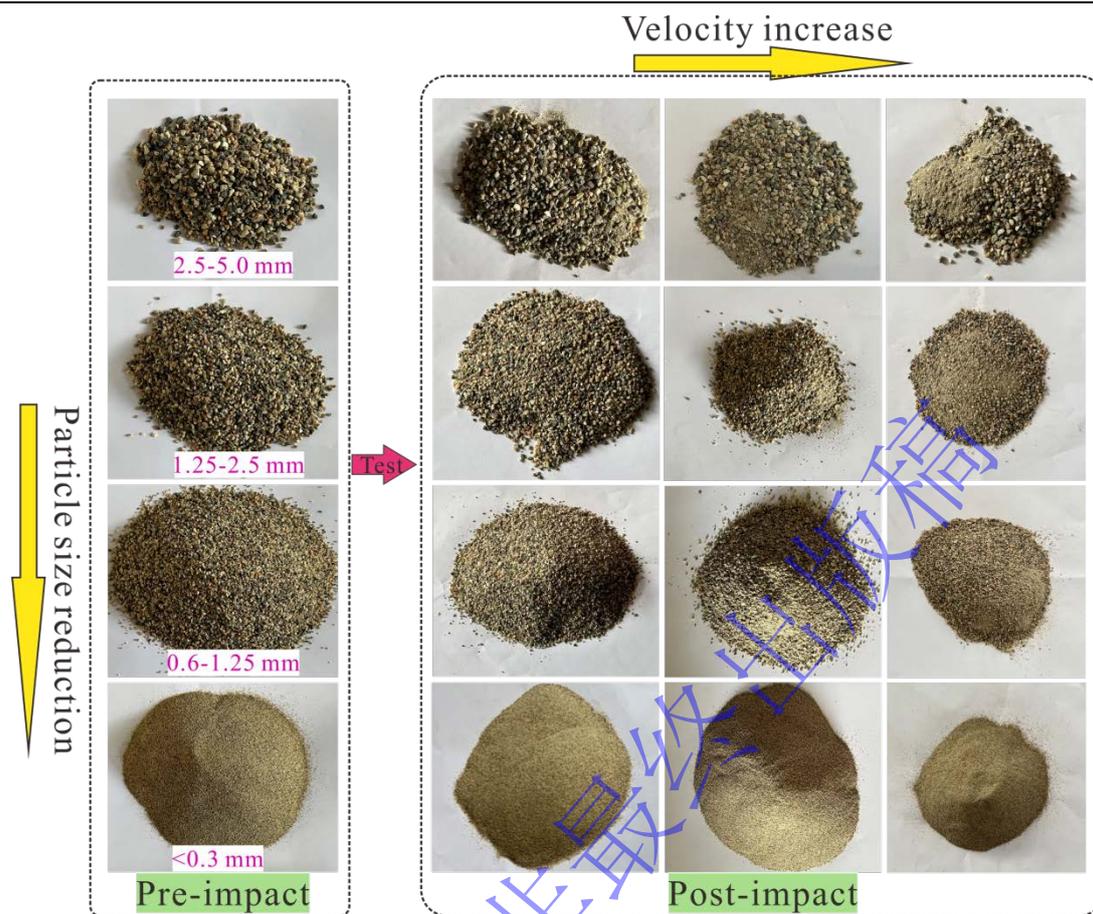


图 14 颗粒破碎前后对比

Fig. 14 Comparison before and after particle crushing

2.3.2 颗粒分形特征分析

图 15 分别显示了不同初始粒组的砂在不同应变率下测试前后的分形尺寸。由于小于 0.3 mm 的试样包含不可破碎的颗粒，因此下文中关于破碎的分析仅针对大于 0.3 mm 的粒组。砂样初始粒径分别为 0.60-1.25 mm、1.25-2.5 mm 和 2.5-5.0 mm，初始分形尺寸分别约为 12.55、13.29 和 13.29。应变率介于 162.73-166.50 s^{-1} ，分形维数分别为 1.24、1.57 和 1.62；应变率介于 220.33-227.53 s^{-1} ，分形维数分别为 1.13、1.12 和 1.28；应变率介于 314.65-325.52 s^{-1} ，分形维数分别为 0.79、0.92 和 0.97。由此可见，当颗粒受到外力作用破碎时，其结构会变得碎片化。较大的颗粒会破碎成多个较小的颗粒，这些小颗粒的形状和排列方式往往更简单。随着颗粒破碎程度的加剧，颗粒形状变得更简单，导致分形维数减小，证明大颗粒比小颗粒更容易压碎。

图 16 给出了有效粒径与分形维数的关系（图中柱状图不同颜色代表不同应变率）。结果表明，相同粒组，应变率越大，颗粒破碎程度越明显，分形维数越小。在相同的应变率下，粒组的有效粒径越大，分形维数越小。此外，通过线性拟合函数可以较好地描述相对破碎指数和分形维数的关系。图 17 给出了不同应变率条件下，不同粒组的峰值应力与分形维数的关系。结果表明，随峰值应力的增大，分形维数逐渐减小，二者表现出良好的线性关系。此外，不同粒组对应的拟合直线斜率随粒径减小而逐渐增大，证明相同应力水平下，粒径越大，破碎程度越明显。

图 18 为不同粒组试样冲击后的不均匀系数和相对破碎指数的变化规律。结果表明，相同应变率下，大颗粒刚度更小，破碎作用更显著，试样破碎后产生的细小颗粒更多，增大了试样的不均匀性，具体表现为冲击后颗粒的不均匀系数随初始有效粒径增大而增大。对于相同的粒组，随应变率增大，试样破碎后的不均匀系数越大，且随粒组范围进一步扩大，冲击后试样级配不均匀程度也进一步增加。

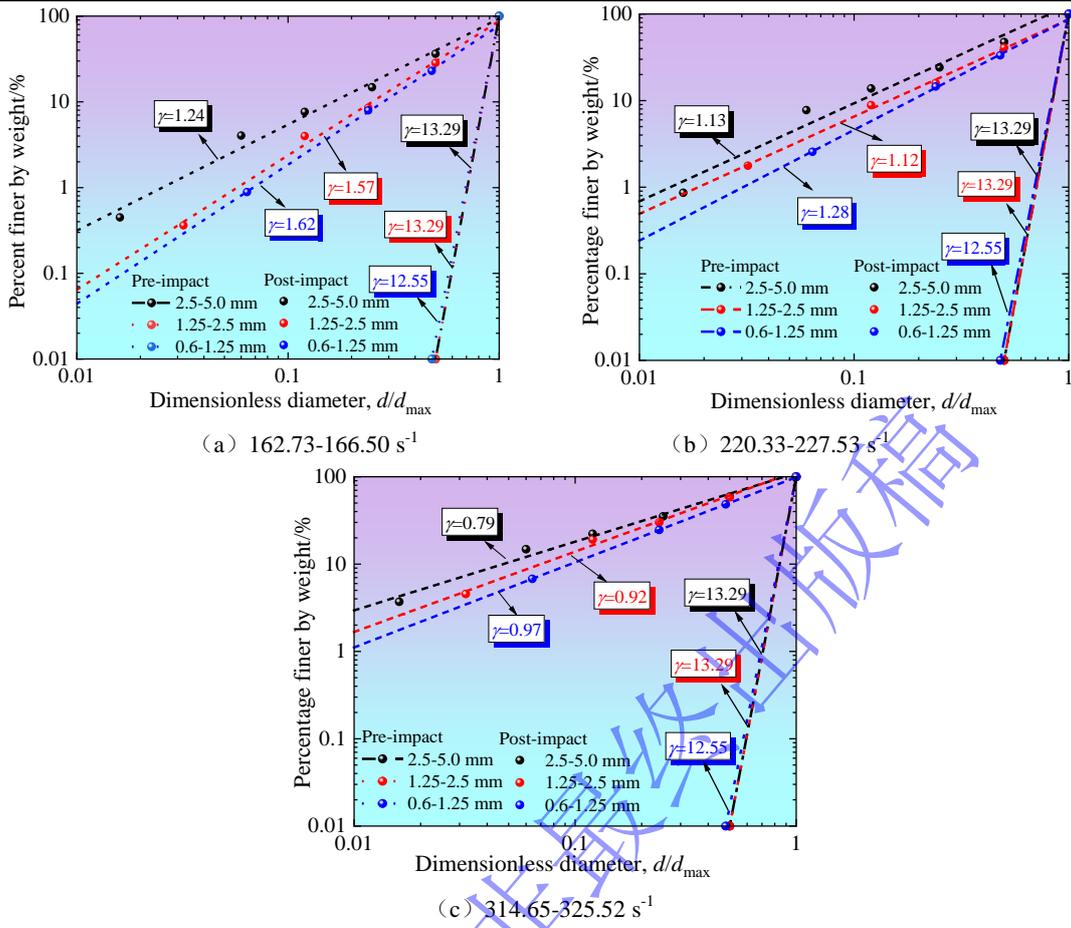


图 15 分形维数演化模式

Fig. 15 Fractal dimension evolution model

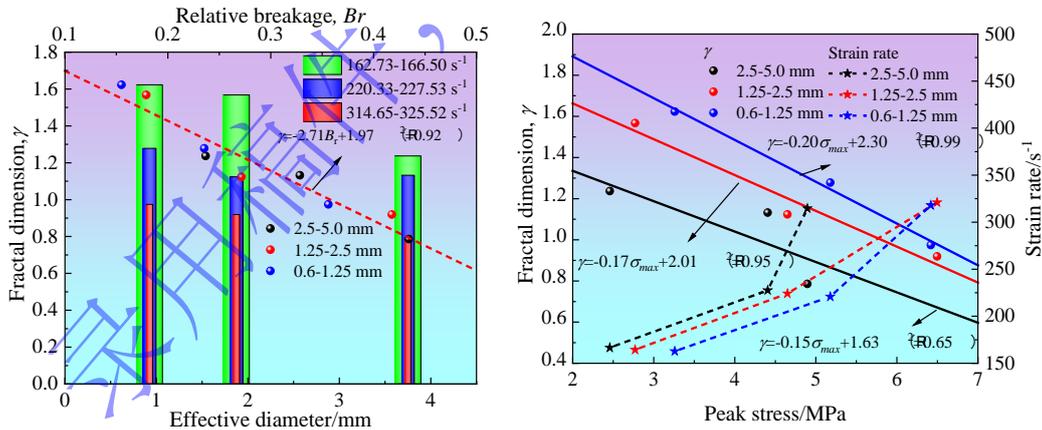


图 16 分形维数与有效粒径, 相对破碎指数的关系 图 17 分形维数与峰值应力的关系

Fig. 16 Relationship between fractal dimension and effective particle size, relative breakage. Fig. 17 Relationship between fractal dimension and peak stress

2.4 能量效应

动态压缩过程中, 砂会发生压缩变形及颗粒破碎, 并伴随能量的传递和转换。SHPB 试验中可以通过下式计算得到入射能 W_I 、反射能 W_R 、透射能 W_T 及吸收能 W_S ^[36]:

$$W_{I,R,T} = A_C E_C C_C \int \varepsilon_{I,R,T}^2(t) dt \quad (7)$$

为评价材料在冲击作用下的吸能特性，定义吸能效率^[37]：

$$\Delta = \frac{\int_0^{\varepsilon_z} \sigma_z d\varepsilon}{\int_0^1 \sigma_z d\varepsilon} = \frac{\int_0^{\varepsilon_z} \sigma_z d\varepsilon}{1 \times \sigma_z} \quad (8)$$

图 19 给出了相对破碎指数与入射能的关系。表明，颗粒相对破碎指数随入射能增大呈指数增大。相同的入射能情况下，颗粒粒径越大，相对破碎指数越大。由于小于 0.074 mm 的颗粒不会发生破碎，因此相对破碎指数随入射能量的增大逐渐趋于平缓。由此可见，分形维数存在极限值。当外荷载或应变率足够大时，相对破碎指数逐渐趋于稳定，体应变与颗粒破碎逐渐停止，并逐步达到稳定级配。

不同粒组试样吸能效率与应力关系如图 20 a。砂的吸能效率随应力的增加而增大。正如前文所述，粒径越大，刚度越小，不规则程度越高，破碎程度越高且应力集中效应越明显，进而导致相同应力水平下粒径越大，能量吸收效率越高。实际工程中，为提高砂的消能效果（如棚洞顶板和机场跑道缓冲层），建议采用较大粒径的砂样。

颗粒破碎是影响砂吸能效率的重要因素。其中，颗粒尺寸、矿物组成、孔隙度及分化程度都会影响颗粒的破碎应力水平。Lv 等^[15]通过研究石英砂和钙质砂的能量吸收特性发现，钙质砂的破碎存在整个加载阶段，而硅砂的大量破碎发生在应力大于 40 MPa 之后，因此钙砂能量吸收效率随着粒度的增大而增加，硅砂能量吸收效率随着粒度的增大而降低（图 20 a）。与本文所研究的硅砂相比，受粒度和分化程度的影响，颗粒破碎在较低的应力水平下即可发生，表现出的能量吸收效率特性与钙砂类似。因此，颗粒粒度对吸能效率的影响随颗粒特性的不同而变化。此外，不同粒组试样吸能效率与应变关系如图 20 b，发现在相同应变水平下，粒径越大，能量吸收效率越低，与小颗粒相比，大颗粒压缩性更高，因此所需要的能量更少。

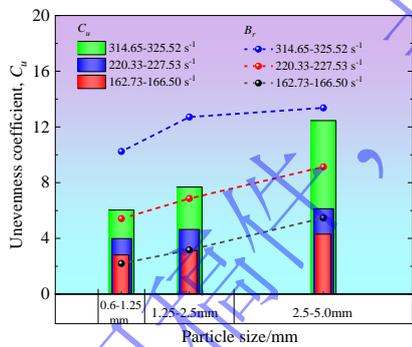


图 18 粒径与不均匀系数、相对破碎指数的关系

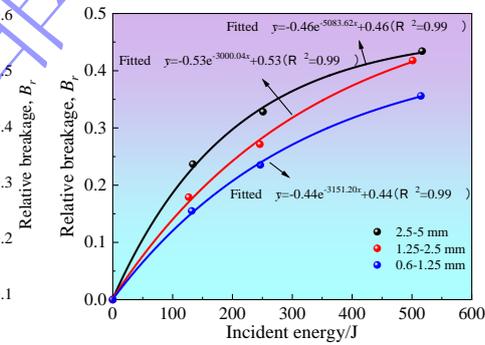
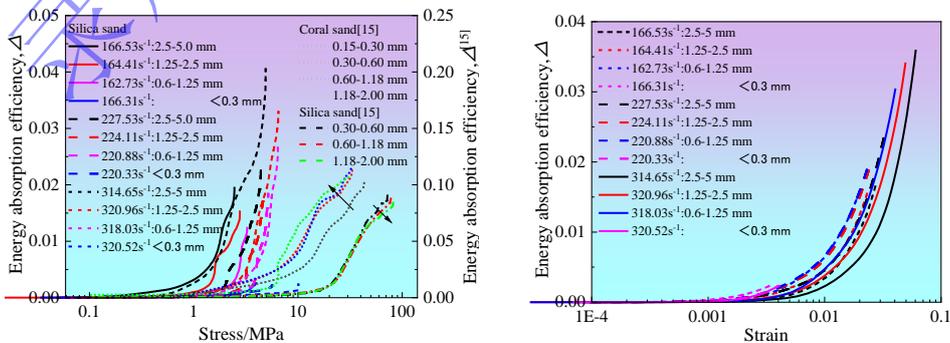


图 19 相对破碎指数和入射能的关系

Fig. 18 Characteristic parameters of particle crushing Fig. 19 Relationship between incident energy and relative breakage.



(a) 能量吸收效率与应力的关系

(b) 能量吸收效率与应变的关系

图 20 粒径对吸能效率的影响

Fig. 20 Effect of particle size on energy absorption efficiency

3 结论

采用 $\Phi 40$ mm 分离式霍普金森杆测试了粒组分别为 2.5-5.0 mm、1.25-2.5 mm、0.6-1.25 mm 和小于 0.3 mm 硅砂的应力-应变特征、分形破碎情况和能量吸收效应, 得到以下结论:

(1) 干砂的动态应力-应变曲线分为弹性阶段、屈服阶段、塑性阶段和卸载阶段。试样压实过程主要由屈服阶段的塑性压密和塑性阶段的破碎压实组成。

(2) 相对破碎指数与应变率及有效粒径均呈正比关系, 粒径越大越容易发生破碎。当应变率由 162.73 s^{-1} 增大至 325.52 s^{-1} , 有效粒径由 0.925 mm 增大至 3.75 mm 时, 相对破碎指数由 0.15 增大至 0.43。

(3) 分形维数随颗粒尺寸增大而减小。相同粒组, 应变率越大, 颗粒破碎程度越明显, 分形维数越小; 相同应变率下, 有效粒径越大, 分形维数越小; 此外, 相对破碎指数和分形维数满足线性关系。

(4) 颗粒粒度对吸能效率的影响取决于颗粒特性(矿物成分、粒径及分化程度等)。对于破碎应力水平较低的砂, 相同应力水平下, 粒径越大, 潜在破碎势越高, 能量吸收效率越高。此外, 粒径越大, 试样峰值应力越小。为提高砂的消能效果和减轻负荷水平(如棚洞顶板和机场跑道缓冲层), 建议采用较大粒径的砂样。

(5) 砂作为防护工程填充材料, 可考虑常用砂的物质组成(如硅质砂和钙质砂)、加载应变率水平及粒径特性进行标准化定制, 工程设计中可直接选用或在结构设计中分配层进行优化。

参考文献

- [1] 于潇, 陈力, 方秦. 珊瑚砂中应力波衰减规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(06): 1520-1529. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0147.
YU X, CHEN L, FANG Q. Experimental study on the attenuation of stress wave in coral sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(06): 1520-1529. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0147.
- [2] 杨阳, 张春会, 崔恩杰, 等. 单颗粒与单粒组钙质砂破碎特性及其关联关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3410-3418. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1148.
YANG Y, ZHANG C H, CUI E J, et al. The crushing characteristics of single particle and uniformly-graded sample of carbonate sand and their association relationship[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3410-3418. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1148.
- [3] 周辉, 任辉启, 吴祥云, 等. 成层式防护结构中分散层研究综述[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(11): 3-28. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0280.
ZHOU H, REN H Q, WU X Y, et al. A review of sacrificial claddings in multilayer protective structure[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 3-28. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0280.
- [4] ZHAO D B, YI W J, KUNNATH S K. Numerical simulation and shear resistance of reinforced concrete beams under impact [J]. Engineering Structures, 2018, 166: 387-401. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.072.
- [5] LIN Y, YAO W, JAFARI M, WANG N, XIA K. Quantification of the Dynamic Compressive Response of Two Ottawa Sands [J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(9): 1371-1382. DOI: org/10.1007/s11340-017-0304-0.
- [6] SONG B, CHEN W, LUK V. Impact compressive response of dry sand [J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(6): 777-785. DOI: 10.1016/j.mechmat.2009.01.003.
- [7] 吴建利, 胡卸文, 梅雪峰, 等. 落石冲击混凝土板与缓冲层组合结构的动力响应[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(01): 78-87. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202004029.
WU J L, HU X W, MEI X F, et al. Dynamic response of RC slab with cushion layer composed of sandy soil to rockfall impact[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(01): 78-87. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202004029.

- [8] 吕华, 王仲琦. 密实填充砂墙对冲击波消波吸能的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(10):64-69. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2016.10.012.
LV H, WANG Z Q. Experimental study of shock attenuation by dense packed sand wall[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(10):64-69. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2016.10.012.
- [9] 蔡改贫, 郭进山, 夏刘洋. 基于 Weibull 分布的 Bond 冲击破碎粒度分布特征[J]. 金属矿山, 2016 (04):118-121. DOI:CNKI:SUN:JSKS.0.2016-04-026.
CAI G P, GUO J S, XIA L Y. Particle Size Distribution Characteristics of Bond Impact Based on Weibull Distribution[J]. Metal Mine, 2016,(04):118-121. DOI:CNKI:SUN:JSKS.0.2016-04-026.
- [10] 潘亚豪, 宗周红, 钱海敏, 等. 钙质砂介质中爆炸波传播规律的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(05):88-100. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0117
PAN Y H, ZONG Z H, QIAN H M, et al. Experiment study on blast wave propagation in calcareous sand [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 1-15. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0117
- [11] YU X, CHEN L, FANG Q, et al. Determination of attenuation effects of coral sand on the propagation of impact induced stress wave[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125:63-82. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2018.11.004.
- [12] 董凯, 任辉启, 阮文俊, 等. 爆炸冲击下珊瑚砂动态本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(04):88-99. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0172.
DONG K, REN H Q, QI W J, et al. Dynamic constitutive model of coral sand under blast loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(04):88-99. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0172.
- [13] LUO H, COOPER W L, LU H. Effects of particle size and moisture on the compressive behavior of dense Eglin sand under confinement at high strain rates [J]. International Journal of Impact Engineering. 2014, 65:40-55. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2013.11.001.
- [14] OUYANG H, DAI G, QIN W, et al. Dynamic behaviors of calcareous sand under repeated one-dimensional impacts [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 150:106891. DOI:10.1016/J.SOILDYN.2021.106891.
- [15] LV Y, Wang Y, Zuo D. Effects of particle size on dynamic constitutive relation and energy absorption of calcareous sand. [J]. Powder Technology, 2019, 356:21-30. DOI:org/10.1016/j.powtec.2019.07.088.
- [16] Xu D S, Shen G, Liu Q M, et al. Dynamic mechanical response and particle breakage characteristics of calcareous sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 181. DOI:10.1016/j.soildyn.2024.108653.
- [17] XIAO Y, YUAN Z, CHU, JIAN L, et al. Particle breakage and energy dissipation of carbonate sands under quasi-static and dynamic compression[J]. Acta Geotechnica 2019, 14(6):1741-1755. DOI:org/10.1007/s11440-019-00790-1.
- [18] 吕亚茹, 吴琳, 王媛, 等. 玻璃球宏观冲击特性的 SHPB 试验和耦合数值模拟研究[J]. 工程力学, 2023, 40(06):245-256. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2021.11.0857
LV Y R, WU L, WANG Y, et al. Macro and micro quantitative study on impact behavior of glass beads by SHPB tests and FEM-DEM coupling analysis [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(06):245-256. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2021.11.0857
- [19] 陈榕, 武智勇, 郝冬雪, 等. 高应力下石英砂三轴剪切颗粒破碎演化规律及影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(08):1713-1722. DOI:10.11779/CJGE20220647.
CHEN R, WU Z Y, HAO D X, et al. Evolution rules and effects of particle breakage for quartz sand in triaxial shear tests under high pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1713-1722. DOI:10.11779/CJGE20220647.
- [20] 魏久淇, 王明洋, 邱艳宇, 等. 钙质砂动态力学特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(24):7-12. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2018.24.002.
WEI J Q, WANG M Y, QIU Y Y, et al. Impact compressive response of calcareous sand[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(24):7-12. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2018.24.002.

- [21] 王博, 吕果, 李江. 考虑粒径对砂土宏观剪切性质的试验研究[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(05):618-622. DOI:10.3969/j.issn.1007-2993.2023.05.017.
WANG B, LV G, LI J. Experimental Study on Micro-macro Shear Properties of Sand Considering Particle Size[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(05):618-622. DOI:10.3969/j.issn.1007-2993.2023.05.017.
- [22] 孟敏强, 袁正鑫, 蒋翔. 钙质砂-石英砂单颗粒破碎-强度-尺寸效应试验研究[J]. 中国科学:技术科学, 2022, 52(07):1035-1047. DOI:org/10.1360/SST-2021-0241
MENG M Q, YUAN Z X, JIANG X. Experimental study of the single-particle crushing-strength-size effect of calcareous sand-quartz sand[J]. Scientia Sinica Technologica, 2022, 52(07):1035-1047. DOI:org/10.1360/SST-2021-0241
- [23] 张季如, 陈敬鑫, 王磊, 等. 三轴剪切过程中排水条件对钙质砂颗粒破碎、变形和强度特性的影响[J]. 岩土力学, 2024,45(2):375 - 384. DOI:10.16285/j.rsm.2023.0243.
ZHANG J R, CHEN J X, WANG L, et al. Effect of drainage conditions during triaxial shearing on particle breakage, deformation, and strength properties of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2):375 - 384. DOI:10.16285/j.rsm.2023.0243.
- [24] YU X, REN W, ZHOU B, et al. Experimental study on the mechanical behavior and energy absorption capacity of coral sand at high strain rates[J]. Ocean engineering, 2024, 291: 116343. DOI:org/10.1016/j.oceaneng.2023.116343.
- [25] 卢芳云, 陈荣, 林玉亮, 等. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
LU F Y, CHEN R, LIN Y L, et al. Hopkinson bar techniques[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [26] 李胜林, 刘殿书, 李祥龙, 等. $\phi 75$ mm 分离式霍普金森压杆试件长度效应的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 93 - 97.
LI S L, LIU D S, LI X L, et al. Experimental study on the length effect of $\phi 75$ mm split Hopkinson compression bar [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(1): 93 -97.
- [27] 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).
- [28] Zhang J M, Duan M D, Wang D L, et al. Particle strength of calcareous sand in Nansha islands, south China sea[J]. Advances in Civil Engineering Materials, 2019, 8(01):355-364. DOI:10.1520/ACEM20180145.
- [29] KUANG D M, LONG Z L, GUO R Q, et al. Experimental and numerical investigation on size effect on crushing behaviors of single calcareous sand particles[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2020, 39 (2) :1-11. DOI: 10.1080/1064119X.2020.1725194.
- [30] YANG J, LIU X. Shear wave velocity and stiffness of sand: the role of non-plastic fines[J]. Géotechnique, 2016, 66(6) : 500 -514. DOI:10.1680/jgeot.15.p.205.
- [31] Sharma S S, Fahey M. Deformation characteristics of two cemented calcareous soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 41(6): 1139-1151. DOI:10.1139/T04-066.
- [32] 彭宇, 丁选明, 肖杨, 等. 基于染色标定与图像颗粒分割的钙质砂颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学, 2019,40(07):2663-2672. DOI:10.16285/j.rsm.2018.0689.
PENG Y, DING X M, XIAO Y, et al. Study of particle breakage behaviour of calcareous sand by dyeing tracking and particle image segmentation method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(07): 2663-2672. DOI:10.16285/j.rsm.2018.0689.
- [33] Einav I. Breakage mechanics—Part I: Theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(6):1274-1297. DOI:10.1016/j.jmps.2006.11.003.
- [34] Peters J F, Muthuswamy M, Wibowo J, et al. Characterization of force chains in granular material[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics, 2005, 72(4):041307. DOI:10.1103/PhysRevE.72.041307.
- [35] Sadrekarimi A, Olson S M. Particle damage observed in ring shear tests on sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(5):497-515. DOI:10.1139/T09-117.

- [36] 谢磊, 李庆华, 徐世焱. 超高韧性水泥基复合材料多次冲击压缩性能及本构关系[J]. 工程力学, 2021, 38(12):158-171. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2020.11.0860.
XIE L, LI Q H, XU S L. Multiple impact compressive properties and constitutive model of ultra-high toughness cementitious composites [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 158 – 171. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2020.11.0860.
- [37] Miltz J, Ramon O. Energy absorption characteristics of polymeric foams used as cushioning materials[J]. Polymer Engineering and Science, 1990, 30(2):129–133. DOI:10.1002/pen.760300210.

录用稿件，
非最终出版稿