

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0447

不同尺寸砂岩动态力学性质和 应力平衡性的试验研究*

张盛^{1,2}, 王峥¹, 张旭龙¹, 荣腾龙¹, 周锐¹, 徐瑞泽¹

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003;

2. 河南理工大学煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003)

摘要: 采用大直径分离式霍普金森压杆系统获得的不同尺寸试样的实验冲击动态力学参数有差异, 因此在直径 100 mm 压杆上进行了 3 种直径 (50、75 和 100 mm) 和 5 种长径比 (0.4、0.5、0.6、0.8 和 1.0) 的砂岩试样冲击试验, 分析了不同尺寸试样应力-应变曲线和应变率曲线随尺寸的变化, 提出了用于比较波形对齐重合度的波形叠加系数, 并与应力平衡因子共同构建了动态应力平衡性研究体系, 由此确定大直径霍普金森压杆试验的试样建议尺寸。同时, 利用高速摄影机监测试样的动态破坏状况。结果表明: 当长径比相同时, 直径 75 与 100 mm 岩石试样的动态抗压强度测试值相近, 直径 50 mm 试样具有更明显的长度效应; 随着试样直径的增大, 应变率曲线从单峰变为双峰; 小尺寸试样更易发生轴向劈裂破坏, 大尺寸试样受内部应力波叠加影响产生了较大的拉应力, 易发生层裂拉伸和轴向劈裂的复合型破坏; 对直径 75 mm 且长径比 0.3~0.4 的试样, 波形对齐后重合度较高, 在起始破坏前拥有充足的应力平衡时间, 应变率加载效果较好。获得了砂岩试样冲击压缩试验的尺寸效应, 可为大直径岩石试样的尺寸选择提供参考。

关键词: 动态压缩力学性质; 尺寸效应; 应力平衡因子; 大直径霍普金森压杆; 砂岩

中图分类号: O346; TU45

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Rock dynamic mechanical properties and dynamic stress balance of sandstone specimens with different sizes

ZHANG Sheng^{1,2}, WANG Zheng¹, ZHANG Xulong¹, RONG Tenglong¹, ZHOU Rui¹, XU Ruize¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China;

2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization,

Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)

Abstract: Aiming at a clarification of the differences in dynamic mechanical properties of rock specimens with different sizes when characterized by a large diameter split Hopkinson pressure bar system, sandstone specimens with three different diameters (50, 75 and 100 mm) and five kinds of length-diameter ratios (0.4, 0.5, 0.6, 0.8 and 1.0) were employed for impact experiments on a pressure bar of diameter 100 mm. The variations of stress versus strain and strain rate versus time of specimens with different sizes were analyzed. The concept of a superposition coefficient for comparing waveform alignment overlap was then proposed, and together with the equilibrium factor it was used to study dynamic stress equilibrium. Thus, the recommended size range of specimens was determined for large-diameter split Hopkinson pressure bar tests. Also, a high-

* 收稿日期: 2021-10-28; 修回日期: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51674101); 国家自然科学基金青年基金(52004081);
国家自然科学基金面上项目(52174074)

第一作者: 张盛(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, zhangs@hpu.edu.cn

通信作者: 王峥(1997—), 男, 硕士研究生, wz_hpu@163.com

speed camera was used to observe the dynamic damage of the specimens. The results show that when the length-diameter ratio of specimen remains the same, the tested dynamic compressive strengths are close for the specimens of diameter 75 mm and 100 mm, but it is affected by more pronounced specimen length for the specimens of diameter 50 mm. With the increase of specimen's diameter, the curve of strain rate versus time changes from single peak to double peak. The small-size specimen is more prone to axial splitting failure, and the large-size specimen produces larger tensile stress due to the superposition of internal stress waves, which is prone to the composite failure of spallation tension and axial splitting. When the specimen with a diameter of 75 mm and the length-diameter ratio of 0.3–0.4 is used, the coincidence degree after waveform alignment is better, sufficient stress balance time is achieved before initial failure, and the strain rate loading is more effective. It is helpful to reveal the size effect on the rock dynamic compression mechanical properties with different sizes of specimens, as it can provide a good reference for the specimen size selection in large-diameter SHPB tests.

Keywords: dynamic compression mechanical properties; size effect; stress balance factor; large-diameter split Hopkinson pressure bar; sandstone

在隧道、矿山等地下空间工程建设过程中,经常伴随着爆破、机械钻凿及矿体震动等岩体运动,使岩体处于冲击荷载作用环境,易发生动态失稳、破坏^[1],岩石动态力学性质对评价和指导此类环境的岩体工程建设具有重要作用^[2]。

分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置常用于测试材料的高应变率动态力学性能^[3-4]。大量试验表明,测试结果受试样尺寸的影响,因此岩石尺寸效应一直被广泛关注^[5]。在进行 SHPB 动态试验时,根据 ISRM(国际岩石力学学会)建议的试验方法^[6]和我国试验规程的建议,试样直径不少于 50 mm,试样长径比为 1 和 0.5,而其他方法对尺寸并没有明确限定^[7-9]。多数研究表明,试样的长度过大会影响应力平衡性、直径过大会导致二维效应增大,无法满足一维应力传播的假定条件,严重影响测试结果的准确性。

试样尺寸效应对岩石冲击特性研究的影响非常重要,学者们基于 $\varnothing 50$ mm SHPB 系统对不同尺寸岩石试样进行了研究,例如:宫凤强等^[10]根据岩石的 SHPB 系统中杆件的反射系数和应力相对差值的要求,求解了岩石波速和岩样最大长度间的二次函数关系式;李地元等^[11]采用 $\varnothing 50$ mm SHPB 冲击不同长径比花岗岩试样,发现长径比对试样两端的应力平衡状态有显著影响;平琦等^[12]采用 $\varnothing 50$ mm SHPB 冲击长 15~100 mm 的石灰岩试样,发现石灰岩试样的单轴动态抗压强度存在明显的尺寸效应,动态抗压强度随试样长度呈先增大后减小的趋势;杜晶^[13]对 5 组不同长度 $\varnothing 50$ mm 岩石试样的冲击试验数据进行拟合分析,发现岩石长径比为 0.5 和 0.6 较合理。Yuan 等^[14]采用 $\varnothing 50$ mm SHPB 研究了不同长度煤样在动态压缩过程中的应力均匀性,提出了确定应力平衡的新方法,并认为最优长径比为 0.3 或 0.4。Zhao 等^[15]采用与速率无关的材料模型,对 SHPB 动态试样尺寸的影响进行了数值研究,提出了由惯性(约束)效应引起的动态增长因子的经验公式;梁书峰等^[16]通过控制应力均匀化时间确定了试样极限长度的计算公式,得到岩石的合理长径比为 0.8。

由于岩石通常为非均质材料,为了将材料近似视为均质、进而获得可靠的试验数据,需采用大直径($\varnothing 100$ mm)霍普金森压杆,目前 $\varnothing 100$ mm SHPB 装置已广泛用于岩石等多种材料的动态冲击试验中^[17]。大直径 SHPB 的应用对试验技术、数据处理和试验结果分析等提出了新的挑战,而目前对大直径 SHPB 系统的动态冲击试样尺寸效应的研究明显不足,需要深入探究。

本文中,采用不同尺寸砂岩试样在 $\varnothing 100$ mm SHPB 设备进行动态冲击试验,分析应力波波形、动态应力-应变曲线和应变率曲线的变化规律,利用高速摄影机监测试样裂纹扩展情况和动态破坏过程。提出可用于比较动态波形叠加情况的波形叠加系数概念,并结合应力平衡因子分析不同尺寸砂岩试样的动态应力平衡性,讨论基于 $\varnothing 100$ mm SHPB 冲击系统的砂岩试样的建议尺寸。

1 试 验

1.1 SHPB 试验原理和假定条件

SHPB 最早起源于 J. Hopkinson^[18] 的铁丝冲击试验, 后经 B. Hopkinson^[19]、Taylor^[20]、Davies^[21]、Lindholm^[22] 和 Kolsky^[23] 的不断完善, 逐渐形成标准的 SHPB 动态测试系统(见图 1)。储气室的气压推动撞击杆, 撞击杆撞击入射杆产生应力波, 试样发生动态压缩, 因杆件为弹性杆, 采用应变片收集反映试样受力过程的电压(应变)信号, 采用高速摄影机监测试样的破坏过程。

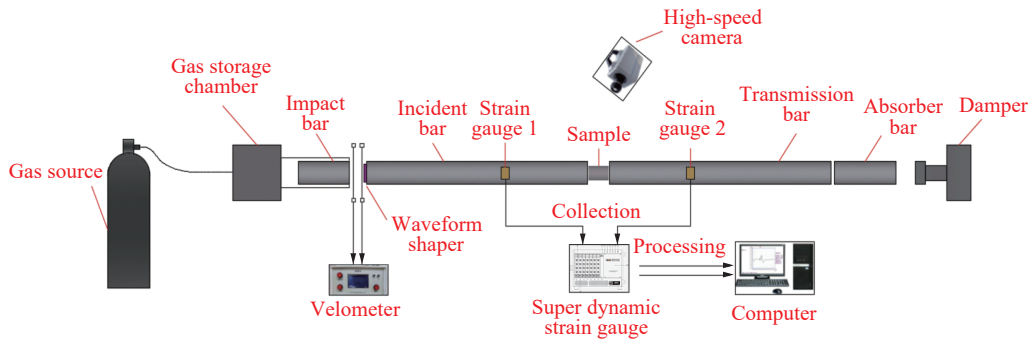


图 1 SHPB 系统

Fig. 1 An SHPB system

作用在试样上的轴向应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 、轴向应变 ϵ_s 和应力 σ_s 可由三波法公式计算:

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{c_0}{L_s} [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] \tag{1}$$

$$\epsilon_s = \frac{c_0}{L_s} \int_0^t [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] dt \tag{2}$$

$$\sigma_s = \frac{A_0}{2A_s} E_0 [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)] \tag{3}$$

式中: $\epsilon_i(t)$ 和 $\epsilon_r(t)$ 为应变片 1 记录的入射和反射信号, $\epsilon_t(t)$ 为应变片 2 记录的透射信号, A_0 为压杆的横截面积, E_0 和 c_0 分别为压杆的弹性模量和一维弹性波波速, A_s 和 L_s 分别为试样的原始横截面积和长度。

基于应力均匀性假设, 有:

$$\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) = \epsilon_t(t) \tag{4}$$

则式 (1)~(3) 可变为:

$$\dot{\epsilon}_s = -\frac{2c_0}{L_s} \epsilon_r(t) \tag{5}$$

$$\epsilon_s = -\frac{2c_0}{L_s} \int_0^t \epsilon_r(t) dt \tag{6}$$

$$\sigma_s = \frac{A_0}{A_s} E_0 \epsilon_t(t) \tag{7}$$

式 (5)~(7) 即为基于反射波加透射波的二波法基本公式, 是常用的冲击数据处理方法。根据 ISRM 建议的试验方法^[6], 上述公式基于以下假定条件: (1) 弹性波在入射杆和透射杆的传播可用一维应力波理论来描述; (2) 试样满足应力平衡状态; (3) 摩擦和轴向惯性效应可忽略。只有满足这些条件, 才能获得岩石真实可靠的应力-应变曲线。

对于条件 (1), 应力脉冲在压杆中传播时因横向惯性效应引起的几何弥散问题, 一直是 SHPB 试验技术的重要问题。在半径 r_0 、泊松比 ν_0 的圆柱状弹性杆中, 谐波传播速度 c_p 和波长 λ_0 的关系为^[24]:

$$c_p \approx c_0 \left[1 - \pi^2 \nu_0^2 \left(\frac{r_0}{\lambda_0} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$c_0 = \sqrt{E_0/\rho_0} \quad (9)$$

式中: E_0 和 ρ_0 分别为杆件的弹性模量和密度。随着弹性杆直径和脉冲传播距离的增加, 几何弥散效应更显著, 将会影响 SHPB 试验的一维应力波假定。

对于条件 (2), 采用式 (4) 验证, 现应用较广的方法是, 通过叠加入射波和反射波, 观察他与透射波的重合度, 分析判断整体应力平衡性。

对于条件 (3), 在杆件与试样接触面涂抹耦合剂, 可基本消除端面摩擦对应力波传播的影响。轴向惯性效应可量化为试样达到应力平衡状态前应力波在试样内部的传播次数。在强间断弹性入射波(矩形波阵面)下, 试样两端的无量纲应力差为^[24]:

$$\delta_k = \frac{2\beta(1-\beta)^{k-1}}{(1+\beta)^k - (1-\beta)^k} \quad (10)$$

式中: δ_k 为试样两端的相对应力差, β 为试样-压杆波阻抗比(杆件与试样的密度波速乘积的比), k 为透-反射次数。当 $\delta_k \leq 5\%$ 时, 可近似认为试样中的应力和应变分布满足均匀化假设^[24]。考虑试样的面积和长度, 则式 (10) 可变为:

$$\delta_k = \left[2\beta \frac{A_s}{A_0} \left(1 - \beta \frac{A_s}{A_0} \right)^{c_s t / L_s - 1} \right] / \left[\left(1 + \beta \frac{A_s}{A_0} \right)^{c_s t / L_s} - \left(1 - \beta \frac{A_s}{A_0} \right)^{c_s t / L_s} \right] \quad (11)$$

式中: A_s 和 L_s 分别为试样的面积和长度, A_0 为压杆面积, c_s 为试样的纵波波速, t 为应力波在试样中的传播时间。

由此可见, 不同尺寸的试样对冲击试验结果会产生较大影响。压杆直径一定时, 试样尺寸的合理选择是保证试样在较短时间内满足 $\delta_k \leq 5\%$ 的关键。冲击试验不同于静态试验, 直径和长度对应力波在试样中传播过程的影响是不同的, 不可将两者混为一谈, 应分别考虑他们对 SHPB 假定条件的影响。另外, SHPB 试验有效性应考虑整体应力平衡性和轴向惯性效应的影响, 有必要对大直径 SHPB 压杆下不同尺寸试样的动态冲击特性和合理尺寸进行深入研究。

1.2 大直径 SHPB 系统及监测设备

采用 $\varnothing 100$ mm SHPB 试验设备(见图 2)对砂岩试样进行单轴动态冲击试验。其中, 子弹为直径 100 mm、长 800 mm 的圆柱形钢杆, 入射杆长 5 000 mm, 透射杆长 3 000 mm, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 7 850 kg/m³, 波速为 5 172 m/s。分别在入射杆和透射杆上距试样加载端 2 500 和 1 540 mm 处粘贴高灵敏度的半导体应变片, 通过桥盒连接到 NUXI-1008 超动态信号测试仪采集数据。

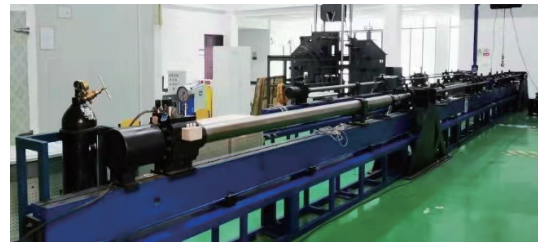


图 2 杆径 100 mm 的 SHPB 试验装置

Fig. 2 An SHPB test device with the rod diameter of 100 mm

试验前, 在压杆与试样的接触面涂抹黄油以消除端面摩擦。采用青铜片波形整形器, 削弱入射波的波头振荡和波形弥散。采用轴向液压装置对试样施加 2 MPa 的预紧力以保证冲击波在不同界面稳定传播, 冲击气压为 0.4 MPa, 子弹出腔速度约为 10 m/s。

采用高速摄影机监测试样冲击情况(见图 3), 综合考虑相片分辨率、拍摄频率, 调整相机位置。摄影机与试样之间放置防崩透明隔板, 保护相机不受损坏。通过超高速摄影系统捕捉试样动态破坏的全过程, 考虑既能捕捉破坏过程、又能保持一定的清晰度, 设置拍摄频率为 6 kHz, 即两张照片间隔时间约为 0.17 ms。冲击加载过程中, 相机和超动态应变仪同时触发。

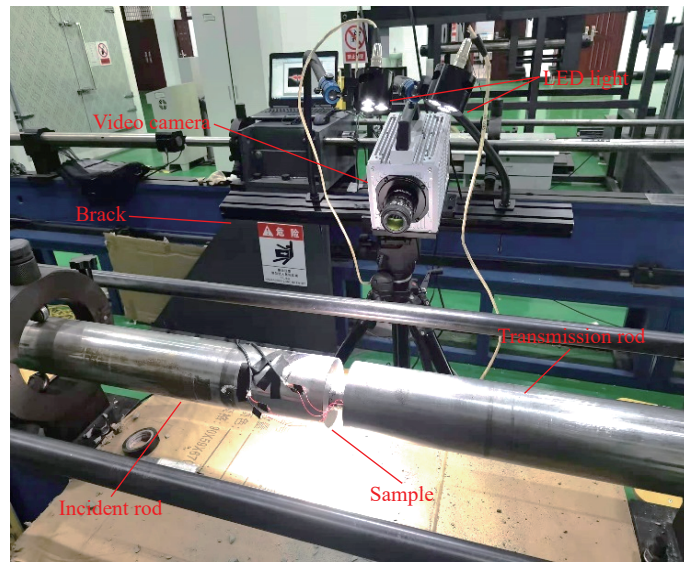


图 3 监测设备布置

Fig. 3 Layout of monitoring equipments

1.3 砂岩试样制备

在 ISRM 方法^[6]的建议尺寸基础上进行方案设计,最终确定了 3 种直径(50、75 和 100 mm)和 5 种长径比($x=0.4、0.5、0.6、0.8、1.0$)的试样。分别在试样两端距端面 5 mm 处对称粘贴的应变片 1~2,用于采集试样内部的应力情况,如图 4 所示。

试样取自四川省内江市,岩石均质性较好,试样由经验丰富的师傅在实验室内加工,加工规格符合方法^[6],试样密度为 $2\ 240\text{ kg/m}^3$,ZT801 岩石波速仪测量的纵波波速约为 $2\ 700\text{ m/s}$ 。采用 GCTS 岩石力学试验机测定了静态力学参数,弹性模量为 7.76 GPa ,泊松比为 0.243 ,单轴抗压强度为 47.6 MPa 。

将岩样制作成透明玻片,在显微镜下放大 40 倍偏光观察,砂岩组成颗粒堆积紧密(见图 5(a)),放大 100 倍透光观察,胶结物充分充填于矿物颗粒孔隙之间(见图 5(b))。经统计, $150\sim 300\ \mu\text{m}$ 的矿物颗粒占 75%, $100\sim 350\ \mu\text{m}$ 的矿物颗粒占 96%,均质性良好。

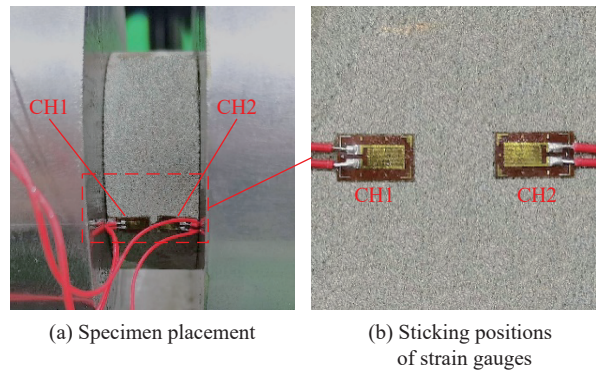


图 4 粘贴应变片的试样

Fig. 4 The specimen with strain gauges

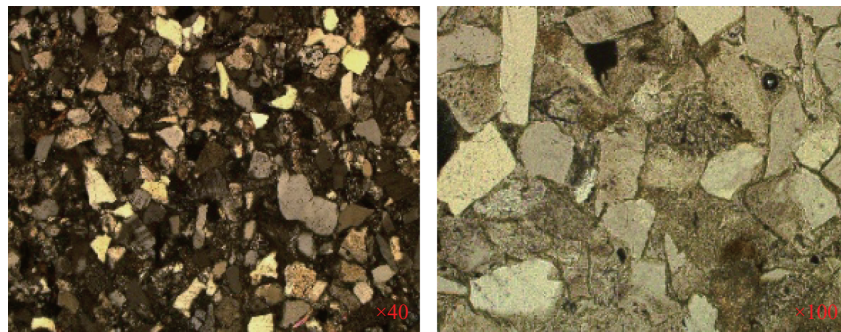


图 5 砂岩颗粒的微观组成

Fig. 5 Microscopic compositions of sandstone particles

2 试验结果

2.1 压杆的脉冲信号

由应变片测得的典型电压信号如图 6 所示, 入射波峰值约为 4.5 V, 历时约 0.4 ms。由式 (8) 可知, 随杆径增加, 几何弥散效应明显, 主要为入射波波峰振荡。随着试样直径的减小, 反射波波幅增大, 透射波波幅减小。波形变化与应力波传播理论^[24]相符, 当应力波从入射杆传入小直径试样时, 反射与入射的扰动应力异号(反射卸载), 透射扰动强于入射扰动; 当应力波从小直径试样传入透射杆时, 反射与入射的扰动应力同号(反射加载), 透射扰动弱于入射扰动。

由图 6 可知, 不同尺寸砂岩试样的透射波差异明显。为剔除波速影响, 采用电压与纵波波速之比为修正信号值, 可反映透射波特性差异:

$$\varphi = U_t/c_s \quad (12)$$

式中: U_t 为透射波信号电压, c_s 为试样纵波波速。不同长度和直径试样的透射波修正信号值, 如图 7 所示。随着试样长度的增大, 应力到达透射杆应变片的时间增长, 斜率(应力增长速度)减小; 随着直径的

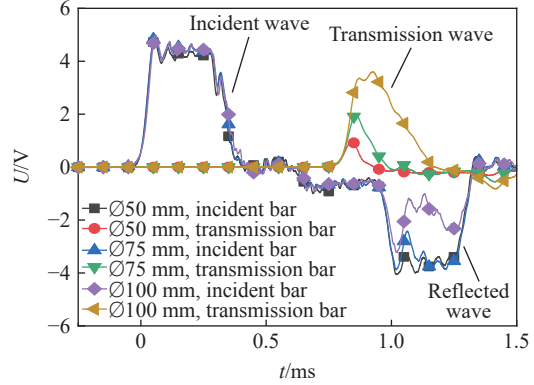


图 6 长径比 0.5 试样的波形

Fig. 6 Waveforms of specimens with the length-diameter ratio of 0.5

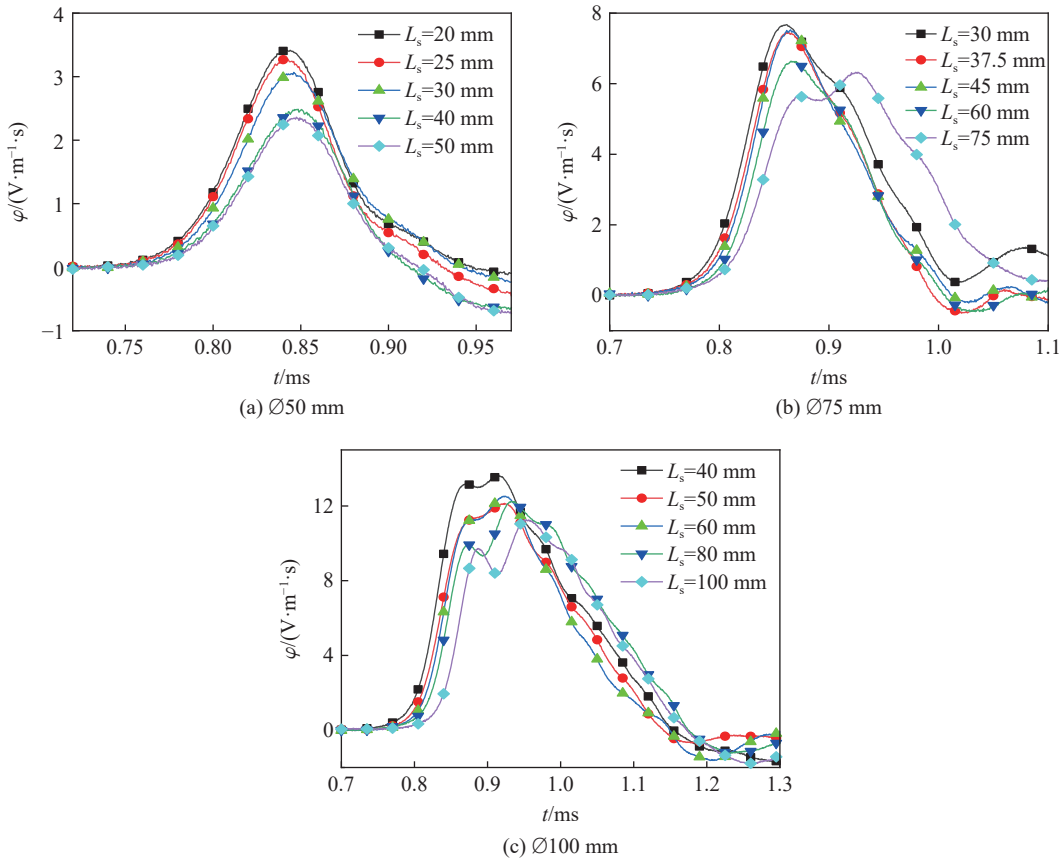


图 7 不同尺寸试样的透射波波形

Fig. 7 Transmission waveforms of specimens with different sizes

增大, 应力增长速度趋近相同, 说明接触面积的增大会削弱试样长度对透射波前沿段斜率的影响。峰值整体随长度的增加逐渐减小, 即试样吸收能增大、透射能逐渐减小, 这种情况在小直径试样时较明显。 $\varnothing 75\text{ mm}$ 和 $\varnothing 100\text{ mm}$ 试样波形出现双峰值现象, 且直径越大越明显。3 种直径的透射波修正信号峰值比接近 1 : 2 : 3, 直径越大峰值越大。原因主要有: (1) 试样直径越大, 抵抗破坏的能力越强, 可承受应力越大, 由试样传递至透射杆的应力越大; (2) 由文献 [24], 试样与杆件的接触面积变大, 根据两次透射波系数的计算可获得较大透射波应力。

2.2 应力-应变曲线

采用 D-Wave 后处理软件^[25] 分析波形数据, 采用平均的平滑方式, 平滑次数为 5, 合并点数为 50。波头的精确选取是准确处理数据的关键, 参照文献 [26], 对入射杆信号, 先找到应力波的第 1 个波峰点, 计算 1/5 波峰值前沿点, 再找到前沿点前后附近 10 个点的斜率并平均后, 则延长线与基线的交点即为入射波波头。选取代表性的数据, 得到动态应力-应变曲线, 如图 8 所示。

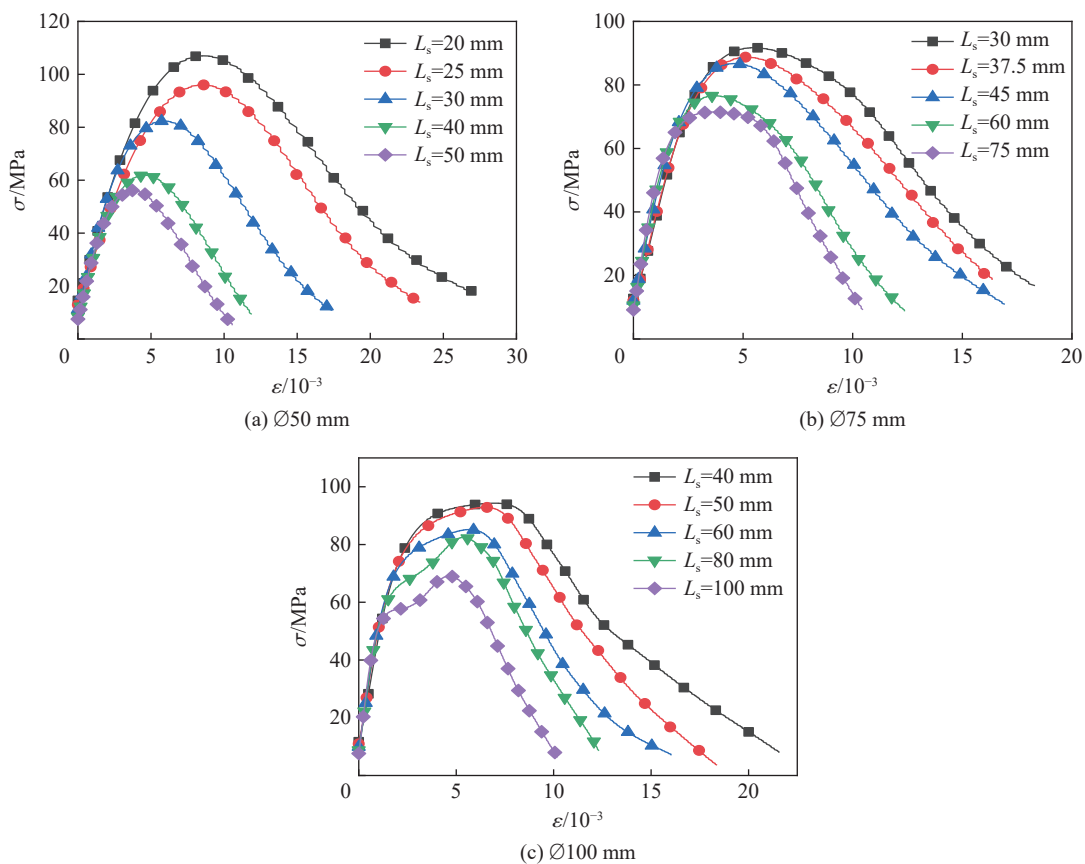


图 8 不同尺寸试样的动态应力-应变曲线

Fig. 8 Dynamic stress-strain curves of specimens with different sizes

砂岩试样的动态应力-应变曲线可分为弹性阶段、裂缝扩展阶段、塑性变形阶段和破坏阶段 4 个阶段。在初始弹性阶段呈线性增加趋势, 曲线基本重合; 在冲击荷载作用下, 试样内部微裂缝不断萌生发育, 达到动弹性极限应力后进入塑性变形阶段; 当达到屈服应力后, 试样内部裂纹扩展贯通, 应变增大且应力迅速降低, 试样破坏。随着长度增加, 直径相同试样的应变极值逐渐减小, 动弹性模量基本不变。 $\varnothing 50\text{ mm}$ 和 $\varnothing 75\text{ mm}$ 试样的裂缝扩展阶段不明显, 曲线较为平滑。 $\varnothing 75\text{ mm}$ 和 $\varnothing 100\text{ mm}$ 试样的应力-应变曲线变化范围相近, 但 $\varnothing 100\text{ mm}$ 试样的塑性阶段所占曲线比例明显偏高, 且随着长度增大, 逐渐出现了应力强化阶段, 不同阶段之间存在明显拐点。

不同长径比试样的动态抗压强度如图 9 所示。随着长径比增加, 强度逐渐减小。当长径比为 0.6 时, 不同直径的强度离散程度最小, 说明长径比 0.6 砂岩试样的动态抗压强度基本不受直径影响。以 0.6 为界限, 试样的强度在较小长径比时更大, 在较大长径比时更小。∅50 mm 试样动态抗压强度受长径比的影响显著, ∅75 mm 和 ∅100 mm 试样的拟合曲线单调递减, 可视为一次函数, 且强度十分接近, 基本不受径向尺寸效应的影响。

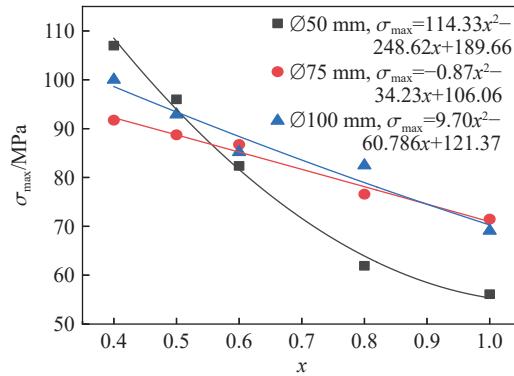


图 9 不同长径比试样的动态抗压强度

Fig. 9 Dynamic compressive strengths of specimens with different sizes

2.3 应变率曲线

恒应变率加载一直是 SHPB 试验中的难点, 现主要通过整形器^[27-28]和子弹形状^[29]等近似实现。不同尺寸试样应变率随时间的变化曲线如图 10 所示, 随着长度增大, 峰值减小。

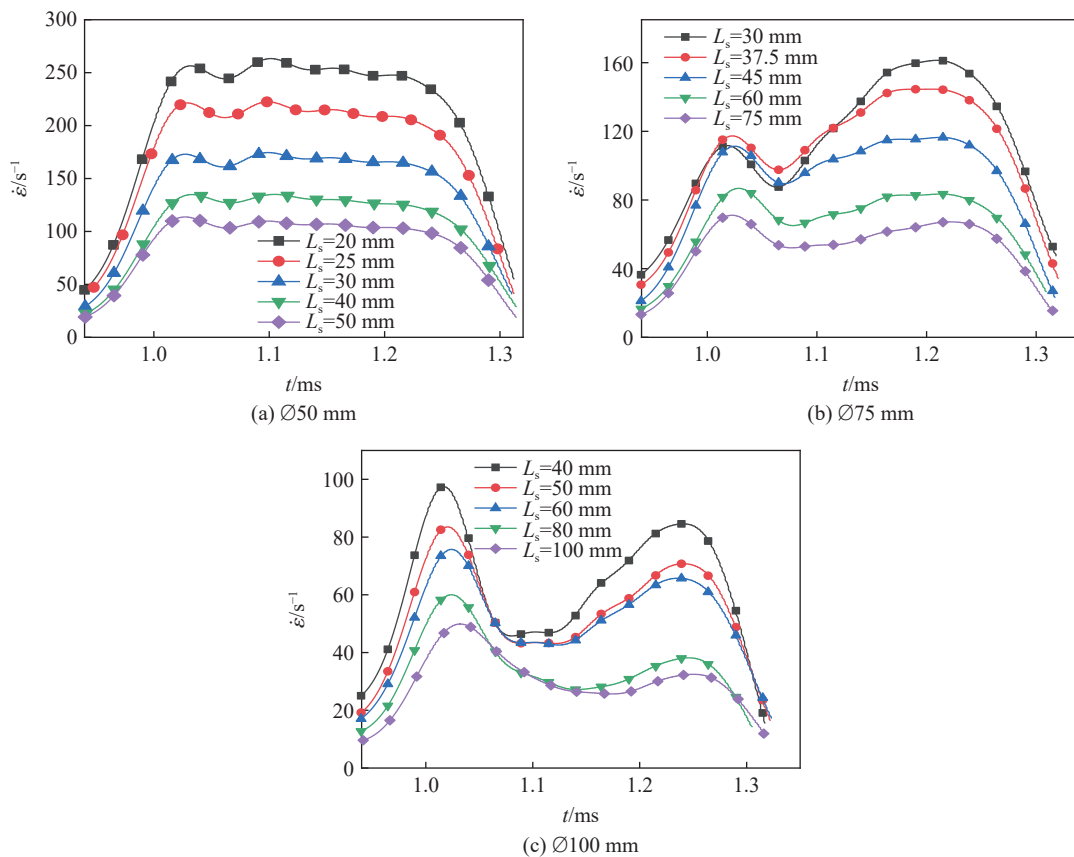


图 10 不同尺寸试样的应变率曲线

Fig. 10 Strain rate curves of specimens with different sizes

∅50 mm 试样具有稳定峰值, 基本实现了恒应变率加载。∅75 mm 和 ∅100 mm 试样应变率曲线呈现双峰值, 直径越大越明显。∅75 mm 试样的后峰值较前峰值更大, 与 ISRM 方法^[6]的应变率示例曲线相似。∅100 mm 试样的前峰值较后峰值更大, 长度 100 mm 试样的前峰值高出后峰值约 54%, 峰值间存在明显的分割现象, 应变率加载效果较差。

试样尺寸越小, 应变率越大, 应力变化越快。不同尺寸试样最大应变率随尺寸的变化和拟合情况如图 11 所示。最大应变率与试样尺寸为二次函数关系, 长 20 mm 的 ∅50 mm 试样最大应变率为长 100 mm 的 ∅100 mm 试样的约 5 倍。这样, 在冲击试验前, 可大致确定适用尺寸范围内砂岩的最大应变率, 为选择试样尺寸实现岩石高应变率加载提供参考。

2.4 动态破坏

由高速摄影获得的试样动态破坏过程(见图 12)可见, ∅50 mm 和 ∅75 mm 试样的动态破坏过程相似, 小直径试样更早产生裂纹。冲击荷载作用下, 破坏模式为轴向劈裂破坏, 破裂现象显著。相同直径试样, 长度越大破坏越剧烈; 随着直径的增大, 裂纹数目明显减少, 试样破碎程度减弱, 碎块变大。

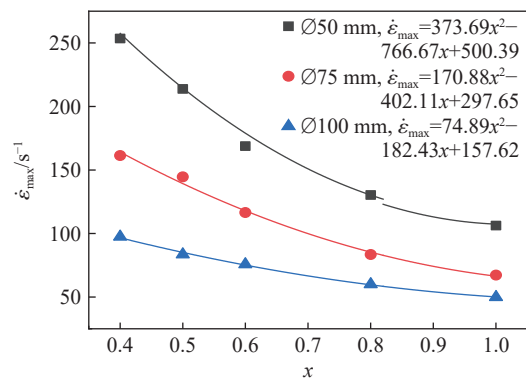


图 11 不同长径比试样的最大应变率

Fig. 11 The maximum strain rates of specimens with different sizes

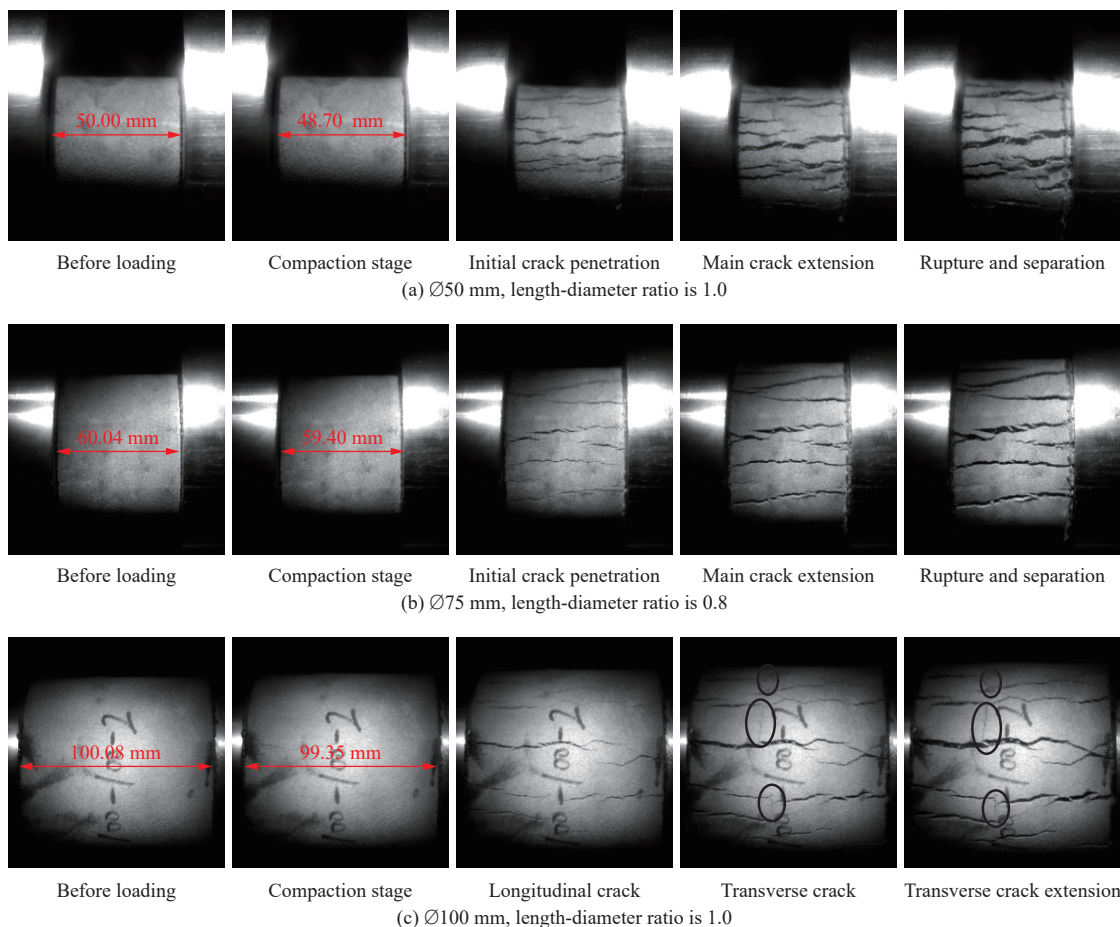


图 12 不同尺寸试样的动态破坏过程

Fig. 12 Dynamic destruction processes of specimens with different sizes

由长径比 1.0 的 $\varnothing 50$ mm 试样和长径比 0.8 的 $\varnothing 75$ mm 试样的动态破坏过程可见: 自应力波到达试样前端, 试样逐渐被压密, 发生轴向压缩和径向膨胀过程, 小直径试样出现了纵向微小裂纹; 随着应力波不断作用, $\varnothing 50$ mm 试样的裂纹迅速贯穿, $\varnothing 75$ mm 试样出现轴向初始劈裂裂纹; 紧接着, 初始劈裂裂纹扩展为宏观主裂纹, 一些次生裂纹也相继扩展, 并与初始裂纹贯通; 最终, 试样分离破碎、破坏^[30]。

在整理试样碎块时, 发现大尺寸试样的外层破碎块相对较完整。究其原因, 除与大尺寸岩石试样抵抗破坏的能力更强有关, 可能还受泊松比和破坏效应产生横向变形的影响, 即: 在应力波作用期间, 试样直径逐渐大于杆件直径, 外层岩块脱离主体, 可能会导致应力仅作用于试样部分区域。推测 $\varnothing 75$ mm 和 $\varnothing 100$ mm 试样的应力-应变曲线变化范围相近可能与此有关, 因此试样直径不宜与杆径相同, 或在冲击过程中杆径至少应大于试样在变形过程中的最大直径。对于小直径杆 ($\varnothing 50$ mm), 试样膨胀程度虽较小, 但为确保试验结果有效, 建议采用较大直径的压杆。随着试样长度增大, 长径比 1.0 的 $\varnothing 100$ mm 试样除出现轴向劈裂裂纹, 还出现了明显的纵向裂纹。这可能是, 因试样较长, 入射波和反射波叠加后, 在试样内接近中间位置产生了较大拉应力, 导致试样发生纵向层裂拉伸和轴向劈裂的复合型破坏形态。

3 动态应力平衡

3.1 波形叠加方法

波形叠加是研究整体应力平衡状态的重要步骤。传统叠加方法波头对齐困难, 根据应力波传播理论^[24], 有了对齐波形的办法。如图 13 所示, 以应变片 1 首次接收信号为波形计算起始时间点, 应力波到达界面 P_1 时一部分发生反射, 再次被应变片 1 接收; 另一部分进入试样内后发生多次透-反射过程, 经过界面 P_2 透射的应力波被应变片 2 接收。已知两个应变片的距离和波速, 计算反射波和透射波的平移时间:

$$t_1 = 2d_1/c_0 \quad (13)$$

$$t_2 = (d_1 + d_2)/c_0 + L_s/c_s \quad (14)$$

式中: t_1 为应力波两次到达入射杆应变片 1 的时间间隔, 即反射波的平移时间; t_2 为应力波在两杆件应变片的时间间隔, 即透射波的平移时间; $d_1=2.5$ m 为入射杆应变片 1 与界面 P_1 的距离; $d_2=1.54$ m 为透射杆应变片 2 与界面 P_2 的距离; L_s 为试样长度; $c_0=5\ 172$ m/s 为杆件纵波波速; $c_s=2\ 700$ m/s 为试样纵波波速。

不同尺寸试样的入射波与反射波的叠加曲线与透射波的比较, 如图 14 所示。

小直径试样透射波峰值更接近入射波起点, 随着试样直径增大, 透射波峰值后移。 $\varnothing 50$ mm 试样在前期 ($0\sim 0.1$ ms) 重合度较高, 那时破坏过程较短, 在后期 ($0.1\sim 0.4$ ms) 透射波基本与轴线重合, 入射杆与试样前端并未完全分离。 $\varnothing 100$ mm 试样则相反, 大尺寸试样具有较强的抗冲击能力, 试样在前期 ($0\sim 0.2$ ms) 叠加重合度较低。随着试样内部应力逐渐均衡稳定 ($0.2\sim 0.4$ ms), 长度较小的 $\varnothing 100$ mm 试样重合度逐渐提高, 长度较大的重合度提升不明显。试样直径越大, 杆件与试样接触面积越大, 反射波越小, 透射波越大, 这与广义波阻抗计算结果^[24] 相符。另外, 随着直径增大, 反射波逐渐出现凹陷现象, 且试样越短, 凹陷程度越明显。

为了更直观地分析入射加反射与透射的叠加情况, 引入波形叠加系数 γ , 它为在入射波历时内入射波和反射波的叠加电压与透射波电压之差的平均值:

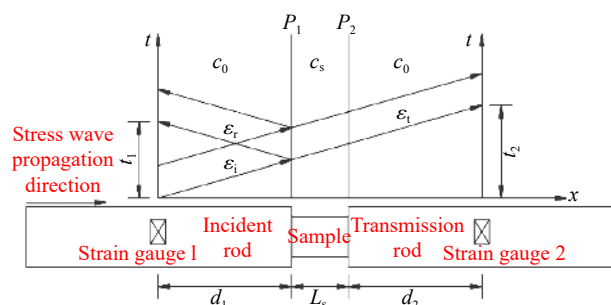


图 13 应力波平移分析

Fig. 13 An analytical diagram of stress-wave translation

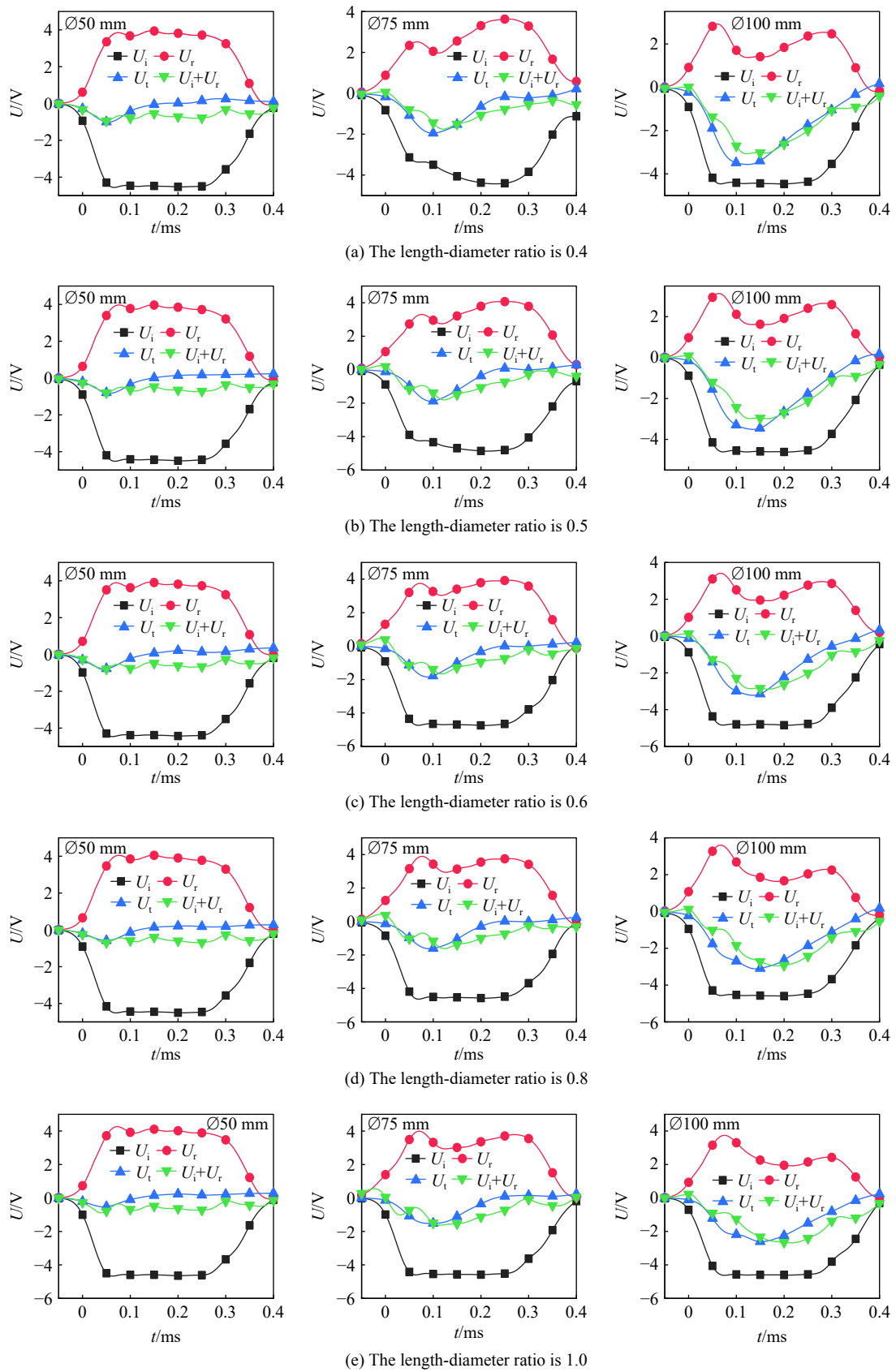


图 14 不同尺寸试样的冲击波波形叠加

Fig. 14 The impact waveform superposition of specimens with different sizes

$$\gamma = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_n} |(U_i)_t + (U_r)_t - (U_t)_t|}{n-1} \quad (15)$$

式中: n 为波形历时 $0 \sim 0.4$ ms 的数据点个数, 共 801 个; U_i 和 U_r 分别为入射波和反射波的电压; U_t 为透射波的电压; t_n 为第 n 个数据点。波形叠加系数如图 15 所示。

由图 15 可见, 对于等径试样, 长径比越小, 波形叠加系数越小。短试样应力波往返一次所需时间更短, 在路径中消耗的能量较少。随着直径增大, 波形叠加系数受长径比影响显著。 $\varnothing 50$ mm 试样受长度影响较小, $\varnothing 75$ mm 试样较其他直径的波形叠加系数更小, 有利于整体平衡性。 $\varnothing 100$ mm 试样的曲线接近于一次函数, 波形叠加系数主要受试样长度影响。因此, 直径约 75 mm 的试样波形叠加系数最小, 整体应力平衡性最好。

张盛等^[31]提出了量化轴向惯性效应的应力平衡因子 α_k , 衡量标准为 $\alpha_k \leq 0.05$ 。考虑不同研究方向的精度问题, 选波形叠加系数 $\gamma \leq 0.5$ V 为判断标准。由图 15 可见, 长径比 0.5 以下的 $\varnothing 100$ mm 试样和所有长径比的 $\varnothing 75$ mm 试样均满足条件。

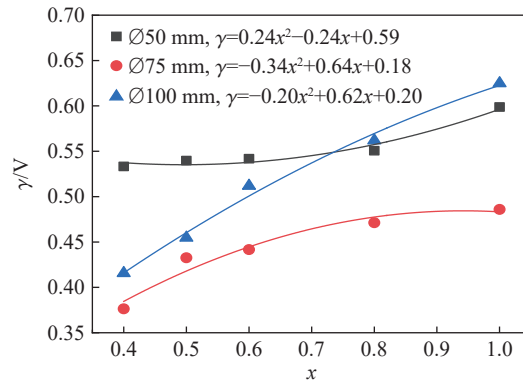


图 15 不同尺寸下试样的波形叠加系数

Fig. 15 Waveform superposition coefficients of specimens with different sizes

3.2 应力平衡因子

在试样尚处于弹性小变形时, 越早实现均匀化则越理想^[24], 可以很好消除轴向惯性效应。宋力等^[32]、毛勇建等^[33]采用试样两端应力差与平均应力的比来衡量应力不均匀度, 经过周风华等^[34]、朱珏等^[35]的简化调整, 逐渐演变为通过试样两端应变片所测信号计算的应力平衡因子公式:

$$\alpha_k = 2 \left| \frac{\sigma_{si} - \sigma_{st}}{\sigma_{si} + \sigma_{st}} \right| \quad \text{or} \quad \alpha_k = 2 \left| \frac{\varepsilon_{si} - \varepsilon_{st}}{\varepsilon_{si} + \varepsilon_{st}} \right| \quad (16)$$

式中: α_k 为应力平衡因子, σ_{si} 和 σ_{st} 分别为试样前后对称两端应变片所测应力, ε_{si} 和 ε_{st} 分别为试样前后两端应变片所测应变。将应变代入式 (16), 可计算应变平衡因子。以应力波到达试样前端时间节点为计算零时刻, 动态应力平衡因子曲线如图 16 所示。

试样两端应力随着时间不断变化, 应力平衡因子是一个不断变化的过程, 其曲线大致可分成振荡区和稳定下降区两部分。在振荡区内, 应力波刚传入试样, 入射端和透射端应力差异较大, 曲线发生大幅振荡, 且振荡幅度逐渐降低。不同尺寸试样具有相近时间段(约 45 μ s)的振荡区域, 这可能与冲击强度有关, 冲击强度越高, 应力波上升沿越陡, 理论上振荡区会越短, 试样越早达到应力平衡。应力波在试样中发生多次透、反射后进入稳定下降区, 不同尺寸时应力平衡因子稳定下降。在稳定下降区, $\varnothing 50$ mm 试样的斜率逐渐增大, 而 $\varnothing 75$ mm 和 $\varnothing 100$ mm 试样的斜率逐渐减小。随着试样直径增大, 起始下降点越高, 下降幅度越大。随着试样长度增大, 起始下降点越高, 变化趋势越明显。

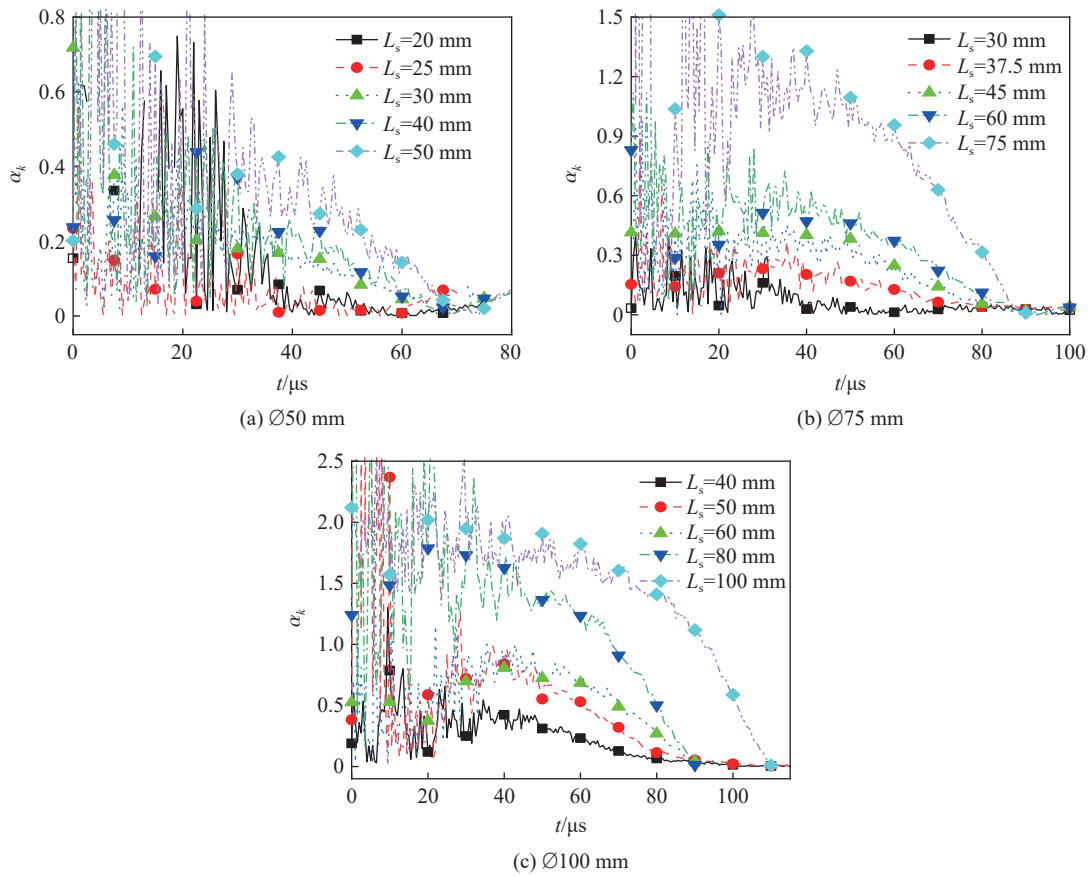


图 16 不同尺寸试样的应力平衡因子

Fig. 16 Stress balance factors of specimens with different sizes

4 砂岩试样的尺寸选取

根据 ISRM 方法^[6]的 SHPB 假设条件,以整体应力平衡性(波形叠加系数 γ)和轴向惯性效应(应力平衡因子 α_k)为判断 SHPB 试样合理尺寸的依据。一般地,当 $\alpha_k \leq 0.05$ 时,认为试样达到了应力平衡状态^[31]。补充长径比 0.2 和 0.3 的砂岩试样冲击数据,得到 3 种直径下 7 组长径比试样平衡点 t_e 曲线,如图 17(a) 所示。试样直径相同时,长度越大,平衡点越高。 $\varnothing 50$ mm 试样在长径比 0.2~0.5 时平衡点相近,平均为

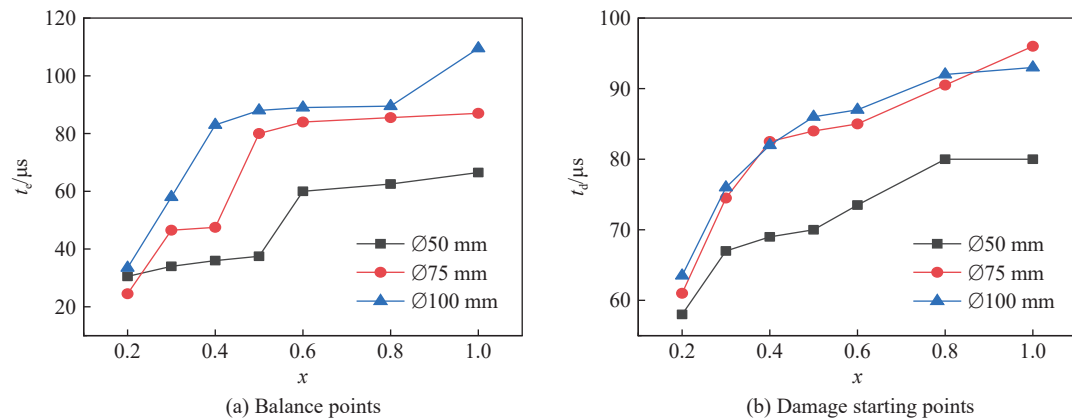


图 17 不同尺寸试样的平衡点和破坏起始点

Fig. 17 Balance points and damage starting points of specimens with different sizes

35 μs 。当长径比大于等于 0.6 时, 平衡点相近, 平均为 64 μs ; 当 $\phi 75\text{ mm}$ 试样长径比为 0.2 时, 平衡点为 24.5 μs , 长径比 0.3 和 0.4 的平衡点相近, 平均为 47 μs , 长径比 0.5~1.0 的平衡点相近, 平均为 84 μs ; $\phi 100\text{ mm}$ 试样在长径比 0.2~0.4 时平衡点单调增高, 长径比 0.4~0.8 时平衡点相近, 平均为 86 μs , 长径比 1.0 的平衡点为 109.5 μs 。平衡点曲线整体变化呈台阶式上升趋势, $\phi 50\text{ mm}$ 、 $\phi 75\text{ mm}$ 和 $\phi 100\text{ mm}$ 试样分别在长径比 0.5~0.6、0.4~0.5 和 0.8~1.0 时存在不同程度的突变。

不同尺寸试样破坏时间不同, 试样需在破坏前达到应力平衡状态才有意义, 因此需计算起始破坏时间。根据 ISRM 方法^[6], 失效时间可通过应变速率的拐点进行确定。以应力波到达试样前端为零时刻, 可设试样前应变片的应力曲线斜率极大值的横坐标为试样起始破坏时间 t_d 。计算同类型尺寸试样均值, 得到不同尺寸下 t_d 曲线, 如图 17(b) 所示。在相同直径时, 随着试样长度增大, 破坏点增高。 $\phi 75\text{ mm}$ 和 $\phi 100\text{ mm}$ 试样的破坏点相近, 明显高于 $\phi 50\text{ mm}$ 试样的。这可能因为, 大直径试样内应力波相互叠加现象相对剧烈, 导致试样起始破坏时间提前。

采用起始破坏时间与平衡点时间的差 $\Delta t = t_d - t_e$, 判断试样在破坏前能否消除轴向惯性效应, 如图 18 所示。当 $\phi 100\text{ mm}$ 试样长径比为 1.0 时, $\Delta t < 0$, 说明试样在起始破坏后实现应力平衡。长径比 0.3~0.8 的 $\phi 100\text{ mm}$ 试样、长径比 0.5~1.0 的 $\phi 75\text{ mm}$ 试样和长径比 0.6~1.0 的 $\phi 50\text{ mm}$ 试样的 $|\Delta t| \leq 20\ \mu\text{s}$, 平衡点与破坏点相近, 在达到平衡后可供应力波作用时间较短。长径比 0.2 的 $\phi 100\text{ mm}$ 试样、长径比 0.2~0.4 的 $\phi 75\text{ mm}$ 试样和长径比 0.2~0.5 的 $\phi 50\text{ mm}$ 试样的 $|\Delta t| \geq 25\ \mu\text{s}$, 应力波在试样内至少经历了一个来回。

本文中, 仅考虑一个常用冲击速度(10 m/s)。

理论上, 随着冲击速度增大, t_e 和 t_d 均减小, 因此无法确定 Δt , 需要继续深入研究。

由试验结果(见表 1)可知: 在 $\phi 100\text{ mm}$ SHPB 动态冲击系统下, $\phi 50\text{ mm}$ 试样基本实现恒应变率加载, 长径比 0.2~0.5 试样在开始破坏前应力波传播了至少一个来回, 但波形叠加系数较大, 与大直径试样相比重合度不高; $\phi 100\text{ mm}$ 试样的应变率曲线出现双峰值, 凹陷幅度较大, 应变率加载效果较差。动态破坏过程为轴向劈裂和纵向层裂拉伸的复合型破坏, 整体应力平衡状态与长径比单调正相关, 随着长径比的增大, 波形叠加系数 γ 增大, 在高长径比下达到应力平衡的时间较长, 长径比仅 0.2 试样在破坏前达到了应力平衡状态。另外, 在应力波到达试样时, 试样直径开始增大, 应力加载效果不符合端面加载试验要求, 具体为试样破碎块中外侧岩块占比较高, 与 $\phi 75\text{ mm}$ 试样应力-应变曲线高度相似; $\phi 75\text{ mm}$ 试样的应变率曲线虽出现双峰值, 但通过 ISRM 方法^[6]可计算平均应变率, $\phi 75\text{ mm}$ 试样具有更低的波形叠加系数, 与长径比二次相关, 波形叠加后重合度较其他直径更高, 长径比 0.4 及以下试样可在起始破坏前 25 μs 达到应力平衡。

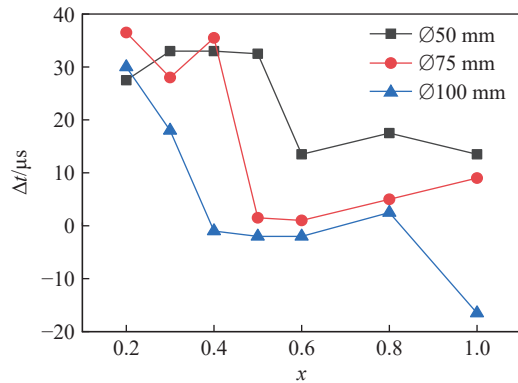


图 18 不同尺寸试样的破坏起始点与平衡点的时间差
Fig. 18 Time differences between damage starting points and balance points of specimens with different sizes

表 1 不同尺寸试样的动态分析

Table 1 Dynamic analyses of specimens with different sizes

情况	$\phi 50\text{ mm}$	$\phi 75\text{ mm}$	$\phi 100\text{ mm}$
应变率加载	良好	双峰	较明显双峰
动态破坏	轴向劈裂	轴向劈裂	轴向劈裂和纵向层裂的复合型破坏
$\gamma \leq 0.5$	无法满足	满足	$x = 0.2 \sim 0.5$
$\Delta t \geq 25\ \mu\text{s}$	$x = 0.2 \sim 0.5$	$x = 0.2 \sim 0.4$	$x = 0.2$

对比发现,长径比 0.2~0.4 的 $\phi 75$ mm 试样优于其他的。试样越短,越容易实现应力平衡,且避免了轴向惯性效应的影响,但试样长径比过小在试验中容易失稳。杜晶等^[36]通过拟合长径比与应变率-破碎分维数关系式系数 k 之间的线性关系,得到砂岩试样可取的最小长径比为 0.296。另外,考虑试样变形,由文献^[37],试样直径最好是压杆直径的 0.8 倍,以保证它超过压杆直径前达到 0.3 的真实应变。根据以上分析可得,试样直径可选择 80 mm,此时最优长径比可为 0.3。

综上所述,采用 $\phi 100$ mm SHPB 进行动态压缩试验时,建议选取最优尺寸长径比 0.3 的 $\phi 80$ mm 砂岩试样。如减小试样直径,长径比可选范围增大,但直径不易过小,也可参考本文,选用长径比 0.3~0.4 的 $\phi 75$ mm 砂岩试样。这可为大直径 SHPB 岩石冲击压缩试验的尺寸选择提供参考。

5 结 论

在 $\phi 100$ mm 的 SHPB 冲击系统,对 3 种直径(50、75 和 100 mm)和 5 种长径比(0.4、0.5、0.6、0.8 和 1.0)的砂岩试样进行了动态压缩冲击试验,并采用高速摄影机实时监测裂纹扩展情况,比较了不同尺寸试样的应力-应变曲线、应变率曲线和动态破坏过程,通过分析应力平衡状态和轴向惯性效应,讨论了适用于 $\phi 100$ mm SHPB 的试样建议尺寸。主要结论如下。

(1) 当试样直径相同时,随着试样长度增加,动抗压强度和应变极值变小,动弹性模量基本不变;当试样长径比相同时,随着试样直径增大,裂缝扩展阶段和塑性变形阶段所占曲线比例增大,动态弹性模量增大, $\phi 50$ mm 试样的动抗压强度受长径比的影响较大直径($\phi 75$ mm 和 $\phi 100$ mm)试样更明显, $\phi 75$ mm 和 $\phi 100$ mm 试样拟合曲线为一次函数,动态抗压强度接近。

(2) 随着直径的增大,3 种直径下透射波修正信号峰值比接近 1:2:3。随着试样直径的增大,应变率曲线从单峰变为双峰,最大应变率与长径比的拟合曲线呈现规律性变化,能够在动态试验前估算最大应变率,高恒应变率加载可通过提高试样直径和杆径的不匹配实现。

(3) $\phi 50$ mm 和 $\phi 75$ mm 试样仅发生轴向劈裂破坏。 $\phi 100$ mm 试样受应力波相互叠加的影响,在中间位置产生了较大拉应力,导致长径比 0.8 和 1.0 的 $\phi 100$ mm 试样发生含径向、轴向裂纹的复合型破坏。

(4) 在 $\phi 100$ mm SHPB 进行砂岩试样的冲击压缩试验时,不建议采用较小直径的 $\phi 50$ mm 试样和与杆件尺寸一致的 $\phi 100$ mm 试样。由应力平衡状态和轴向惯性效应分析,试样的合理尺寸不仅需考虑试样的直径,也需考虑试样的长径比。如选用长径比 0.3~0.4 的 $\phi 75$ mm 试样,其应变率加载效果较好,波形叠加后重合度较高,在起始破坏前拥有足够长的平衡时间,有利于准确测试岩石的动态力学性质。

参考文献:

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-68.
- [2] 方正峰. 基于 SHPB 试验的灰岩动态力学特性及损伤破坏过程研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2017: 1-13.
- [3] 胡时胜, 王礼立, 宋力, 等. Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(6): 641-657. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)06-0641-17.
HU S S, WANG L L, SONG L, et al. Review of the development of Hopkinson pressure bar technique in China [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(6): 641-657. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)06-0641-17.
- [4] GAMA B A, LOPATNIKOV S L, GILLESPIE JR J W. Hopkinson bar experimental technique: a critical review [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2004, 57(4): 223-250. DOI: 10.1115/1.1704626.
- [5] VAN MIER J G M, VAN VLIET M R A. Influence of microstructure of concrete on size/scale effects in tensile fracture [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70(16): 2281-2306. DOI: 10.1016/S0013-7944(02)00222-9.
- [6] ULUSAY R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014 [M]. Cham, Switzerland: Springer, 2015.
- [7] PATERSON M S, WONG T F. Experimental rock deformation-the brittle field [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2005: 5-15.

- [8] 洪亮. 冲击荷载下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008: 91–118.
HONG L. Size effect on strength and energy dissipation in fracture of rock under impact loads [D]. Changsha, Hunan, China: Central South University, 2008: 91–118.
- [9] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1–47.
LI X B. Rock dynamics fundamentals and applications [M]. Beijing, China: Science Press, 2014: 1–47.
- [10] 宫凤强, 李夕兵, 饶秋华, 等. 岩石 SHPB 试验中确定试样尺寸的参考方法 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(17): 24–28. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.17.005.
GONG F Q, LI X B, RAO Q H, et al. Reference method for determining sample size in SHPB tests of rock materials [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(17): 24–28. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.17.005.
- [11] 李地元, 肖鹏, 谢涛, 等. 动静态压缩下岩石试样的长径比效应研究 [J]. *实验力学*, 2018, 33(1): 93–100. DOI: 10.7520/1001-4888-16-254.
LI D Y, XIAO P, XIE T, et al. On the effect of length to diameter ratio of rock specimen subjected to dynamic and static compression [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(1): 93–100. DOI: 10.7520/1001-4888-16-254.
- [12] 平琦, 张号, 苏海鹏. 不同长度石灰岩动态压缩力学性质试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S2): 3891–3897. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0646.
PING Q, ZHANG H, SU H P. Study on dynamic compression mechanical properties of limestone with different lengths [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S2): 3891–3897. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0646.
- [13] 杜晶. 不同长径比下岩石冲击动力学特性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011: 39–57.
DU J. Size effect on the dynamic mechanical properties under impact loads of rock [D]. Changsha, Hunan, China: Central South University, 2011: 39–57.
- [14] YUAN Q P, XIE G X, WANG L, et al. Experimental study on stress uniformity and deformation behavior of coals with different length-to-diameter ratios under dynamic compression [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 6675200. DOI: 10.1155/2021/6675200.
- [15] ZHAO F Q, XU P B, WEN H M. Influence of specimen size in SHPB tests on concrete [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(1): 014101. DOI: 10.11858/gywlxb.20170532.
- [16] 梁书锋, 吴帅峰, 李胜利, 等. 岩石材料 SHPB 实验试件尺寸确定的研究 [J]. *工程爆破*, 2015, 21(5): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2015.05.001.
LIANG S F, WU S F, LI S L, et al. Study on the determination of specimen size in SHPB experiments of rock materials [J]. *Engineering Blasting*, 2015, 21(5): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2015.05.001.
- [17] 郭瑞奇, 任辉启, 张磊, 等. 分离式大直径 Hopkinson 杆实验技术研究进展 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(7): 1518–1536. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.023.
GUO R Q, REN H Q, ZHANG L, et al. Research progress of large-diameter split Hopkinson bar experimental technique [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(7): 1518–1536. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.023.
- [18] HOPKINSON J. On the rupture of iron wire by a blow [C] // *Proceedings of the Literary and Philosophical Society of Manchester*. Manchester, UK, 1872: 40–45.
- [19] HOPKINSON B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1914, 213(497): 437–456.
- [20] TAYLOR G I. The testing of materials at high rates of loading [J]. *Journal of the ICE*, 1946, 26(8): 486–519. DOI: 10.1680/ijoti.1946.13699.
- [21] DAVIES R M. A critical study of the Hopkinson pressure bar [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1948, 240(821): 375–457. DOI: 10.1098/rsta.1948.0001.
- [22] LINDHOLM U S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1964, 12(5): 317–325. DOI: 10.1016/0022-5096(64)90028-6.
- [23] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. *Proceedings of the Physical Society Section B*, 1949, 62(11): 676–700. DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302.
- [24] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 5–64.
WANG L L. Foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2005: 5–64.

- [25] 刘金旭. D-Wave 软件说明书 [Z]. 北京: 北京理工大学, 2012.
- [26] 刘德顺, 李夕兵. 冲击机械系统动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 42.
LIU D S, LI X B. Mechanical impact dynamics [M]. Beijing, China: Science Press, 1999: 42.
- [27] 任亮, 何瑜, 王凯. 基于整形器的 UHPC 材料 SHPB 试验数值模拟与分析 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(21): 44–52. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.21.007.
REN L, HE Y, WANG K. Numerical simulation and analysis of SHPB test for UHPC material based on shaper [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(21): 44–52. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.21.007.
- [28] 陈刚, 张青平, 黄西成. 基于软材料的 SHPB 波形整形技术 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46(4): 393–399. DOI: 10.1360/N092015-00368.
CHEN G, ZHANG Q P, HUANG X C. Pulse shaping with soft material for SHPB [J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2016, 46(4): 393–399. DOI: 10.1360/N092015-00368.
- [29] FORRESTAL M J, WARREN T L. A conical striker bar to obtain constant true strain rate for Kolsky bar experiments [J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2021, 7(1): 161–164. DOI: 10.1007/s40870-020-00269-1.
- [30] GAO M Z, XIE J, GAO Y N, et al. Mechanical behavior of coal under different mining rates: a case study from laboratory experiments to field testing [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(5): 825–841. DOI: 10.1016/J.IJMS.2021.06.007.
- [31] 张盛, 喻炳鑫, 王峰, 等. 不同尺寸含裂缝岩样动态破坏特征的实验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 1045–1054. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0131.
ZHANG S, YU B X, WANG F, et al. Experimental study on dynamic fracture characteristics of different sizes of rock specimens with a crack [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 1045–1054. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0131.
- [32] 宋力, 胡时胜. SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(3): 207–216. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0207-10.
SONG L, HU S S. Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3): 207–216. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0207-10.
- [33] 毛勇建, 李玉龙. SHPB 试验中试件的轴向应力均匀性 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(5): 448–454. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)05-0448-07.
MAO Y J, LI Y L. Axial stress uniformity in specimens of SHPB tests [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(5): 448–454. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)05-0448-07.
- [34] 周风华, 王礼立, 胡时胜. 高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性的影响 [J]. *实验力学*, 1992, 7(1): 23–29.
ZHOU F H, WANG L L, HU S S. On the effect of stress nonuniformness in polymer specimen of SHPB tests [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1992, 7(1): 23–29.
- [35] 朱珏, 胡时胜, 王礼立. SHPB 试验中粘弹性材料的应力均匀性分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(4): 315–322. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)04-0315-08.
ZHU J, HU S S, WANG L L. Analysis on stress uniformity of viscoelastic materials in split Hopkinson bar tests [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 315–322. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)04-0315-08.
- [36] 杜晶, 李夕兵, 宫凤强, 等. 岩石冲击实验碎屑分类及其分形特征 [J]. *矿业研究与开发*, 2010, 30(5): 20–22, 84. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2010.05.006.
DU J, LI X B, GONG F Q, et al. Classification and Fractal Characteristics of the fragments from impacting experiment of rock [J]. *Mining Research and Development*, 2010, 30(5): 20–22, 84. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2010.05.006.
- [37] 杜忠华, 高光发, 李伟兵. 撞击动力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017: 162–170.
DU Z H, GAO F G, LI W B. Impact dynamics [M]. Beijing, China: Beijing Institute of Technology Press, 2017: 162–170.

(责任编辑 丁峰)