

围压卸载速度对岩石动力强度与破碎特性的影响

殷志强^{1,2}, 李夕兵^{1,2}, 金解放^{1,2,3}, 尹士兵^{1,2}, 刘科伟^{1,2}

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083;
3. 江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 利用带轴向静压和围压装置的霍普金森压杆设备, 对砂岩在不同围压卸载条件下的动态力学性能进行试验研究, 即保持轴压和冲击条件不变, 改变围压卸载速度的动静组合冲击试验, 着重研究了围压卸载速率对岩石动态强度及损伤的影响。实验结果表明: 在仅改变围压卸载速度条件下, 当卸载速度在 0.5~10 MPa/s 范围内变化时, 砂岩动态抗压强度、能耗密度随围压卸载速度增大而降低; 破坏块度分维数则呈现出随围压卸载速度增大而增大。但当卸载速度增大到 200 MPa/s 时, 其动态抗压强度、能耗密度反而增加, 而破坏块度分维数则降低。

关键词: 岩石力学; SHPB; 卸载速度; 岩石动态强度; 破碎特性

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)08-1296-06

作者简介: 殷志强(1983-), 男, 安徽萧县人, 博士研究生, 从事采矿与岩石力学研究。E-mail: zqyinx@sina.com。

Effects of unloading rates of confining pressure on dynamic strength and fragmentation characteristics of rock under impact loads

YIN Zhi-qiang^{1,2}, LI Xi-bing^{1,2}, JIN Jie-fang^{1,2,3}, YIN Tu-bing^{1,2}, LIU Kei-wei^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Changsha 410083, China; 3. School of Architectural and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: By means of the improved SHPB with axial pre-pressure and confining pressure, experimental studies on the dynamic mechanical properties of sandstone under different unloading confining pressures are performed. In the experiments, the sandstone specimens are subjected to the static-dynamic coupling loads with fixed axial static pressure and impact energy and various rates of unloading confining pressure. The effects of unloading rates of confining pressure on rock dynamic strength and damage are investigated. The results show that when the unloading rates vary in the range of 0.5-10 MPa/s, the dynamic strength and energy density of sandstone gradually decrease, but the fractal dimension gradually increases. However, when the unloading rate reaches 200 MPa/s, the dynamic strength and energy density increase, and the fractal dimension decreases.

Key words: rock mechanics; SHPB; unloading rate; dynamic strength of rock; fragmentation characteristic

0 引言

随着岩石力学研究的深入, 使人们逐渐重视并开展岩石卸载影响的研究, 发现在深部开采过程中, 脆性岩体在深部高应力下所表现出的延性, 在开采卸载条件下又表现出的延脆性转化这一特殊的现象, 成为近来岩石力学研究的热点问题^[1]。Diederichs^[2]对深部硬岩巷道开挖过程中巷道周边岩体中由卸载引发的裂纹发育及扩展机理进行研究; 代革联等^[3]、任建喜等^[4]利用 CT 实时技术对岩石围压卸载的损伤破坏微观机制进行研究; 张黎明等^[5]的研究认为岩石的变形和破坏特性与卸围压时间密切相关; 陈卫忠等^[6]针对岩石

围压卸载破坏的研究认为岩石自身储能的释放量与卸载速度相关; 徐林生等^[7]用常规三轴加、卸载试验进行岩爆实验研究工作, 指出应力卸载状态下岩石破坏形式和岩爆的对应关系; M. G. Abuov 等^[8]的研究表明, 岩体爆破开挖过程中, 岩体应力的快速释放可引起开挖面附近岩体的损伤; 何满潮等^[9]通过快速卸载一方向的水平应力, 开展深部高应力花岗岩岩爆过程的实验研究。

但现有岩石卸载的研究局限于准静态情况, 实际

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50934006、10872218); 国家重点基础研究发展计划项目 (2010CB732004)

收稿日期: 2010-05-24

中地下开挖工程往往还要承受冲击或爆破开挖时爆炸

荷载,这就涉及到岩石的动态破坏强度变化规律。相

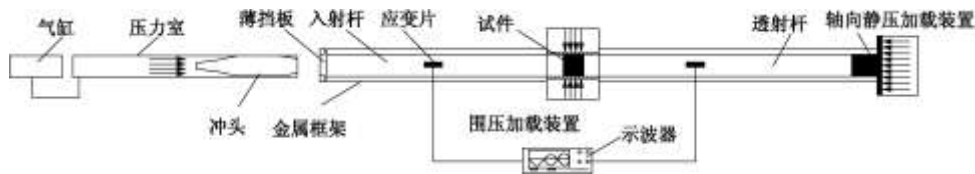


图1 改进后带三轴静压的 SHPB 装置示意图

Fig. 1 Configuration of improved SHPB device

关工程实例如秦岭特长隧道 I、II 线分别用 TBM 和钻爆法掘进期间的岩爆实录表明,地质条件相同时,采用 TBM 施工的隧道可能不发生岩爆,而用钻爆法施工的隧道就可能发生岩爆,这种现象发生的原因被认为是爆破产生的动力扰动和开挖卸载速度的共同影响^[10]。目前岩石力学实验中动态荷载一般采用 SHPB 实现。纯动态下岩石力学性质研究较多^[11-13],分别涉及本构关系、冲击强度、能量耗散、波形、应变率及破坏准则、温度等方面。而对经历过围压卸载后的岩石动态力学性质研究还不多见。

本文利用带围压装置的直径为 50 mm 的 SHPB 测试系统对砂岩在围压为 40 MPa 以不同卸载速度卸载至 0 MPa 情况下,以相同能量冲击加载的砂岩力学性能进行研究,分析不同围压卸载速度对砂岩单轴动静组合抗压强度及破坏特性的影响。

1 SHPB 试验系统的介绍

深部开采过程中,深部岩石不仅处在较高的三维地应力场,而且受到诸如爆破等动力扰动。为模拟深部开挖岩石受力环境,必须对常规的 SHPB 试验系统进行改进,使其能够实现三轴静压加卸载功能。改进的 SHPB 试验系统如图 1 所示^[11]。

经改进可以加载与冲击载荷方向垂直的围压。同时加载轴向静压和围压,从而可以进行三轴预应力下的冲击试验,改进的试验系统轴向静压及围压加载范围分别为 0~200 MPa 和 0~100 MPa。所用 SHPB 试验系统杆件采用 40Cr 合金钢,密度为 7.810 g/cm³,弹性波速为 5410 m/s,杆直径为 50 mm,输入杆和输出杆长度分别为 2.00 m 和 1.50 m,采用锥形子弹冲击消除振荡,实现稳定的半正弦波加载,图 2 为试验中典型的动态冲击应力波波形曲线^[14-16]。子弹材质和弹体最大直径与输入、输出杆相同。围压和轴向静压由手动加载。在围压和轴向静压加载设备处设有液压阀门,压力加载之后,可通过手动控制阀门开闭大小,控制压力卸载速度。

常规的 SHPB 实验基于一维应力和试件受力均匀的假设,而对于改进后的试验系统,当试件安装正确后受到轴向静应力作用,入射杆和输出杆仍然受一维

应力作用,服从一维应力波理论,故冲击过程中强度和能耗仍可采用常规的 SHPB 实验理论来计算。

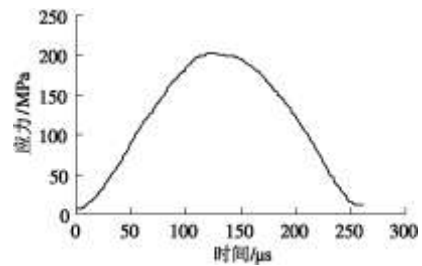


图2 典型半正弦应力波波形曲线

Fig. 2 Typical curve of half-sine stress

2 实验方案

为保证试样的均质,试样从同块完整性和均匀性相对较好的砂岩上钻取所得。试样采用直径50 mm×50 mm的圆柱体试件,并对试件的两端及侧面进行了仔细研磨,不平行度和不垂直度均小于0.02 mm。试件表面光滑,没有明显缺陷,呈灰白色,平均体积密度为2.63 t/m³。平均静态单轴抗压强度为109.45 MPa,冲击强度为165.27 MPa(平均应变率为67.85 s⁻¹)。

手动加载轴、围压。以相同加载速度加载轴向静压和围压至40 MPa,保持围压40 MPa,继续以相同加载速度加载轴压至81 MPa(约为单轴抗压强度75%,以免因围压卸载导致试样完全破坏);保持轴向静压不变,围压分别以10, 5, 2, 1, 0.5 MPa/s的速率卸载至0 MPa(手动控制),共5个围压卸载速度等级,卸载完成后进行单次相同能量冲击试验。另进行2组对比实验:①快速卸载实验,轴向静压和围压加载方式上同,卸载时手动快速完全打开压力阀门,经油压阀门处加装的FCP-SD01型压电式应力传感器,测得围压快速卸载时程曲线如图3所示,其采样时间为1 s,由所测时程曲线可以看出,40 MPa卸载至0 MPa所需时间约0.2 s,故卸载速度约200 MPa/s;②单轴动静组合实验,轴压81 MPa,试样无围压加卸载过程。

实验过程中的冲击载荷由瓶装高压氮气推动锥型冲头撞击入射杆,产生半正弦应力波。在实验过程中保持气压和冲头到入射杆的距离恒定,冲头与入射杆

撞击速度基本恒定, 实现等能量冲击。进而对不同围压卸载速度下砂岩试样进行等能量冲击的动静组合冲击实验, 研究围压卸载速度对砂岩动力学特性的影响。

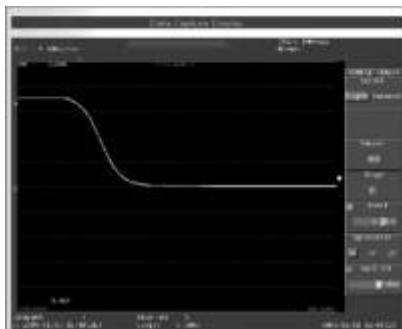


图3 围压快速卸载压力时程曲线图

Fig. 3 Time-step curves of rapid unloading of confining pressure

3 围压卸载速度对砂岩动力学特性影响试验分析

3.1 卸载速度对岩石动态冲击强度的影响

岩石材料的动态强度具有明显的应变率相关性, 在冲击实验中, 要比较岩石材料动态强度的特点, 只有在相同应变率下才具有可比性。实验过程中虽然通过保持气压和冲头到入射杆的距离恒定, 来实现相对恒定的动态加载速率, 但由于岩石材料固有的非均质性和系统误差, 相同加载条件下, 每个试件的真实应变率并不完全相同, 故只能保证将其控制在一个相对较小的范围内。因此, 将不同卸载速度条件下的每个试件的真实应变率及动态抗压强度进行统计, 见图4。由图4可看出, 砂岩动态应强度的应变率效应明显, 为进一步对比分析在相同应变率条件下岩石动态强度围压卸载速度的影响, 结合试验的加载应变率范围, 选取应变率为 67 s^{-1} 左右的试样进行分析, 图5为该应变率条件下, 不同围压卸载速度对砂岩动态强度的影响。

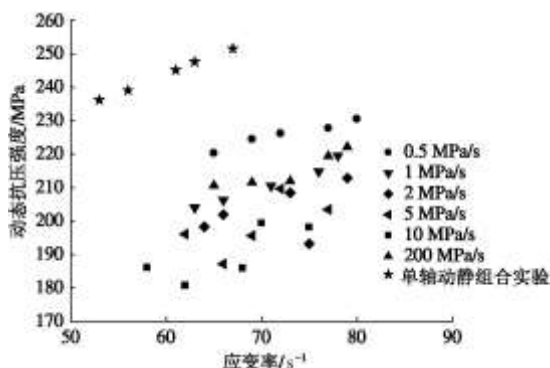


图4 不同围压卸载速度下动态强度与应变率的关系

Fig. 4 Relation between dynamic strength and strain rate under different unloading rates of confining pressure

结合图4、5可以看出, 在相似应变率下, 随着围压卸载速度的不同, 砂岩具有如下动力学特性: ①与

无围压加卸载的单轴动静组合冲击实验结果相比, 围压卸载历程导致砂岩动态强度明显降低; ②当卸载速度在 10 MPa/s 范围内变化时, 砂岩试样动态抗压强度随卸载速度的增大不断降低; ③围压卸载速度为 200 MPa/s 时, 其动态抗压强度出现明显提高, 可以看出砂岩试样动态强度并不是随卸载速度的增大而一直降低, 而是当快速卸载 (200 MPa/s) 时, 反而又有所增高, 由于实验条件的限制, 无法准确实现大于 10 MPa/s 的卸载控制, 因此无法得出其变化趋势转折点处的围压卸载速度。但是有一点可以肯定, 当快速卸载时动态强度出现反而增加的现象, 这可能是由于快速卸载与慢速卸载相比对岩石产生不同的损伤特性。

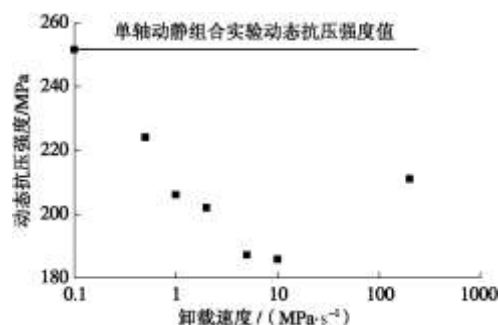


图5 围压卸载速度对砂岩动态强度的影响

Fig. 5 Effects of unloading rates of confining pressure on dynamic strength of sandstone

3.2 卸载速度对岩石冲击破坏能耗特性的影响

根据测试信号, 由应力波能量计算原理可得到冲击加载下岩石破碎过程中的能量消耗^[17]。经计算图6为砂岩试样在不同围压卸载速度的条件下, 各组砂岩试样冲击破碎平均能量消耗密度变化情况。

实验过程中轴向静压保持 81 MPa 及冲击能量固定不变, 由图6可以看出砂岩能耗密度的变化特性: ①与无围压加卸载的单轴动静组合冲击实验结果相比, 围压卸载历程导致砂岩能耗密度明显降低; ②当卸载速度在 10 MPa/s 范围内变化时, 砂岩试样能耗密度随卸载速度的增大不断降低; ③围压卸载速度为 200 MPa/s 时, 其能耗密度出现明显提高, 这与动态抗压强度变化趋势相似。

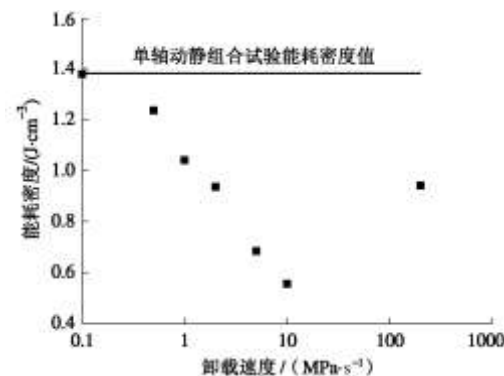


图6 围压卸载速度对砂岩能耗密度的影响

Fig. 6 Effects of unloading rates of confining pressure on density of energy of sandstone

在动静组合冲击实验中, 由于轴向静压的作用, 使试样本身储存一定的体积应变能, 借助外部扰动, 当原先应力平衡被打破时, 所存储的体积应变能得以释放, 有助于岩石试件在较少的能量消耗下破坏。本次实验中随围压卸载速度的增大, 砂岩试样的动态强度逐渐降低, 而轴向静压保持不变, 因此轴向静压与试件抗压强度的比值逐渐增大, 这将导致试件本身存储的体积应变能相对增加, 试样冲击破碎能量消耗密度逐渐减低。叶洲元等^[18]研究表明, 在固定围压条件下, 随着轴向静压增加, 随轴压与抗压强度比值的增加, 砂岩试件破坏所消耗载荷能量密度逐渐降低。从本次实验结果来看, 也有类似的现象。因此由围压卸载速度的适当增加, 而引起砂岩试样冲击破碎时外部能量消耗的降低, 这将有助于利用较小外部扰动破碎岩石。

3.3 卸载速度对岩石冲击破坏特性的影响

图 7 为在相近应变率下, 不同围压卸载速度时砂岩试样冲击破坏形态。由图 7 可以看出, 在不同围压卸载速度下, 砂岩试样破坏形态不同, 卸载速度增大时砂岩试样受冲击破坏较为粉碎。这说明围压卸载速度对砂岩动态破坏形态也有一定的影响。

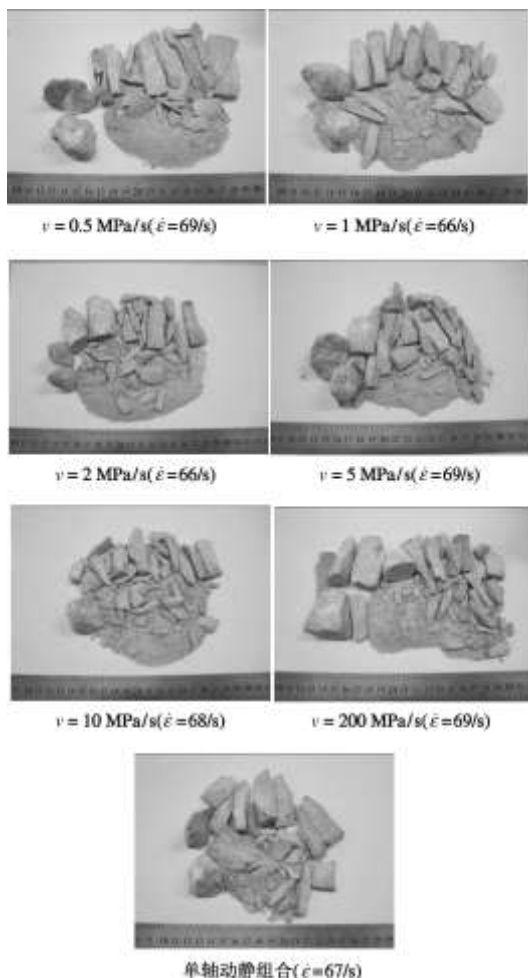


图 7 不同围压卸载速度下砂岩冲击破坏形态

Fig. 7 Impact damage patterns of sandstone specimens under different unloading rates of confining pressure

岩石宏观破碎是其内部裂隙不断发育、扩展和贯通的最终结果, 如此这样从细观损伤发展到宏观破碎的过程具有分形性质, 并表现出较好的统计自相似性。相关实验观察表明, 材料的宏观破碎是由小破裂群体集中而形成的, 小破裂又是由更小的裂隙演化和集聚而来, 这种岩石裂隙发育的自相似性的行为必然导致破碎后碎块块度具有自相似的特征^[19]。因此可通过分析岩石冲击破碎后碎块块度, 了解冲击前岩石本身裂隙发育情况。

收集冲击实验后砂岩试样碎块, 使用新标准土壤筛进行筛分统计, 筛径分别为 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 5.00, 10.00, 20.00, 60.00 mm 共 8 个等级, 对每个等级筛分质量进行称量。采用碎块的质量 - 等效尺寸进行分维数计算,

$$D = 3 - \alpha \quad (1)$$

式中,

$$\alpha = \frac{\lg M_R / M}{\lg R} \quad (2)$$

式中, α 为在双对数坐标, $\lg R - \lg(M_R / M)$ 下所绘出直线的斜率值, M_R 为直径小于的 R 碎块累积质量, M 为总质量。

按块度分形理论处理数据, 得出各试样分形维数。不同围压卸载速度的条件下, 围压卸载速度与破碎块度分维的关系如图 8 所示, 砂岩试样冲击破碎分维数与能量消耗密度的关系如图 9 所示。

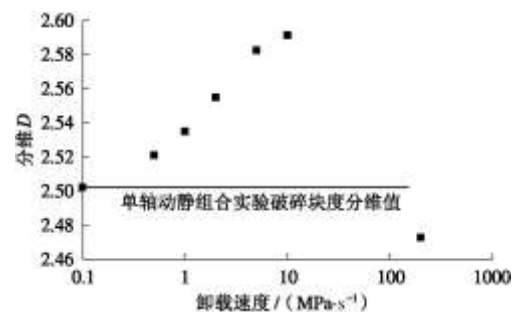


图 8 围压卸载速度对破碎块度分维的影响

Fig. 8 Effects of fractal dimension on confining unloading rates of confining pressure

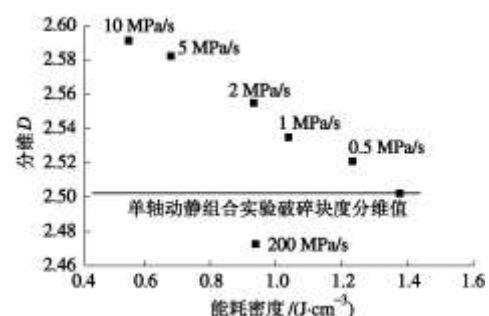


图 9 不同围压卸载速度下破碎块度分维与能耗密度的关系

Fig. 9 Relation between energy and fractal dimension under different unloading rates of confining pressure

由图 8, 9 可以看出, 在相同能量的冲击条件下, 围压卸载速度的不同, 砂岩试样冲击破碎块度的分维特征有如下特征: ①围压卸载速度增大, 砂岩试样冲击破碎特性呈现出高分维、低能耗的发展趋势; ②当卸载速度在 10 MPa/s 范围内变化时, 砂岩试样破碎块度分维数随卸载速度的增大不断增高; ③围压卸载速度为 200 MPa/s 时, 其能耗密度出现明显降低, 岩石碎块分维数低于无围压卸载历程的单轴动静组合试样的分形维数。

在不同围压卸载速度和相同冲击条件的前提下, 破碎块度分维数定量地反映了岩石受围压卸载损伤和冲击载荷共同作用所造成的差异。根据分形理论所提出的相关结论, 分形维数大的试件, 碎块多, 体积小, 破碎程度高; 分形维数小的试件, 碎块少, 体积大, 破碎程度较低。可以认为当围压卸载速度较小时, 在一定范围内增加卸载速度可导致裂隙发育更广, 增加岩石试件损伤程度, 导致岩石抗压强度更低, 在保持轴向静压不变的条件下, 轴向静压与抗压强度的比值不断增大, 岩石体积应变能增加, 因此当受到等能量冲击加载时, 由于试样本身体积应变能释放作用, 使岩石试件能耗降低、破碎更均匀; 当快速卸载时, 围压以 200 MPa/s 的速度卸载, 岩石碎块分维数低于无围压卸载历程的单轴动静组合试样的分形维数, 可以认为在快速卸载条件下, 裂隙的传播和转移不充分, 试件内部只形成较大的断裂表面, 当再受到冲击时, 试样沿围压卸载引发的初始少数断裂表面发生移动, 破碎程度低, 块度分布较不均匀。实验过程中由于冲击能量保持不变, 砂岩破碎块度分维的不同, 这反映了不同围压卸载速度对砂岩试样引起不同的裂隙发育, 造成不同程度的损伤。根据以上实验结果看出, 当在一定范围内提高围压卸载速度可提高砂岩试样裂隙发育程度。

4 围压卸载后岩石动力学特性与岩爆效应

岩爆是围岩脆性破坏能量突然释放造成的自然灾害。地下工程中, 人工开挖是岩爆发生的外因条件之一。它破坏了岩体原始的应力平衡状态, 原来处于三向受力状态的围岩由于单向或双向卸载形成临空面, 应力重新分布后, 围岩局部应力集中, 当应力集聚到一定程度时, 就会向临空面释放出来, 对于脆硬岩体易产生岩爆灾害。高地应力区岩石开挖工程中深部岩体本身承受着很高的地应力作用, 在此基础上, 水平应力开挖卸载和施加强动力载荷两者共同作用, 岩体

更有可能突然崩解, 引发岩爆。在这种情况下所发生的岩爆, 归根结底, 就是岩体在应力卸载后的动静组合载荷下发生的力学行为之一。以巷道掘进工作面为例, 掘进方向岩石越靠近掘进面, 水平应力逐渐减小。岩体开挖时, 一次开挖的进度愈大, 开挖的速率愈高, 水平应力的卸载速度也就愈高, 岩体应力的快速释放将引起开挖面附近岩体的损伤, 这种经过卸载损伤的岩体, 当受强动力载荷扰动影响时更易发生岩爆灾害。

本文实验即对这种经过卸载损伤的岩体受动力扰动的情况进行相应模拟。根据试验结果可知: 砂岩试样的冲击破坏特性与围压卸载速度密切相关。适当提高围压卸载速度可提高岩石裂隙发育程度, 造成岩石的动态抗压强度和破坏所消耗能量密度的降低。岩石冲击破坏时实际吸收的能量减小, 但由于岩石本身储存的体积应变能对外释放, 使岩石在较小的外部动载荷作用下即可破坏。

这表明在深部开挖过程中, 通过调整施工速度, 控制围岩的应力释放速度, 如改爆破等瞬态卸载为机械开挖的慢速卸载, 同时适当的提高机械开挖速度, 利用高应力下快速应力卸载对岩石损伤的影响, 充分利用岩体体积应变能的释放, 即可使用较小的外部动载荷能量实现岩石破碎。同时避免了爆破开挖所带来的强动力扰动, 从而减缓或降低由于强动力载荷扰动所引发的岩爆灾害。

5 结 论

(1) 通过实验分析, 围压卸载速度对砂岩动力学特性有明显影响。在仅改变围压卸载速度条件下, 当卸载速度在 0.5~10 MPa/s 范围内变化时, 砂岩动态抗压强度、能耗密度随围压卸载速度增大而降低; 破坏块度分维数则呈现出随围压卸载速度增大而增大。但当卸载速度增大到 200 MPa/s 时, 其动态抗压强度、能耗密度反而增加, 而破坏块度分维数则降低。

(2) 在深部高应力环境矿岩开挖时, 适当的提高围岩卸载速度, 可降低砂岩的动态强度和破坏能量消耗, 将有助于利用较小外部动力扰动破碎岩石, 使用较小的外部动载荷能量破碎岩石, 从而减缓或降低由于强动力载荷扰动所引发的岩爆灾害。

参考文献:

- [1] 古德生, 李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006. (DU De-sheng, LI Xi-bing. Modern mining science and technology for metal mineral resources[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [2] DIEDERICH S M, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and

- the influence of near-face stress rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(5): 785 - 812.
- [3] 代革联, 李新虎. 岩石加卸荷破坏细观机理 CT 实时分析[J]. 工程地质学报, 2004, **12**(1): 104 - 108. (DAI Ge-lian, LI Xin-hu. CT real time testing of meso-failure mechanisms of rock under loading and unloading conditons[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, **12**(1): 104 - 108. (in Chinese))
- [4] 任建喜, 葛修润, 蒲毅彬, 等. 岩石卸荷损伤演化机理 CT 实时分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(6): 697 - 701. (REN Jina-xi, GE Xiu-run, PU Yi-bin, et al. Primary study of real-time CT testing of unloading damage evolution law of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(6): 697 - 701. (in Chinese))
- [5] 张黎明, 王在泉, 贺俊征. 岩石卸荷破坏与岩爆效应[J]. 西安建筑科技大学学报, 2007, **39**(1): 110 - 114. (ZHANG Lin-ming, WANG Zai-quan, HE Jun-zheng. Analysis of failure characteristics of rock under unloading conditions and their effects on rock burst[J]. Journal of Xi'an University of Architecture, 2007, **39**(1): 110 - 114. (in Chinese))
- [6] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(8): 1530 - 1540. (CHEN Wei-zhong, LU Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Research on unloading confining pressure tests and rockburst criterion based on energy theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(8): 1530 - 1540. (in Chinese))
- [7] 徐林生. 卸荷状态下岩爆岩石力学实验[J]. 重庆交通学院学报, 2003, **22**(1): 1 - 4. (XU Lin-sheng. Research on the experimental rock mechanics of rockburst under condition[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2003, **22**(1): 1 - 4. (in Chinese))
- [8] ABOUV M G, AITALIEV S M, ERMEKOV T M, et al. Studies of the effect of dynamic processes during explosive break-out upon the toof of mining excavations[J]. Journal of mining Science, 1988, **24**(6): 581 - 590.
- [9] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(5): 865 - 876. (HE Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(5): 865 - 876. (in Chinese))
- [10] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春, 等. 静荷载理论在岩爆研究中的局限性及岩爆岩石动力学机理的初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(8): 1255 - 1262. (XU Ze-min, HUANG Run-qiu, LUO Xing-chun, et al. Limitations of static load theory in rockburst research and preliminary analysis on dynamics mechanism of rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(8): 1255 - 1262. (in Chinese))
- [11] LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, LOK Tat-seng, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**(5): 739 - 748.
- [12] ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, MA Chun-de, et al. Damage and failure rule of rock undergoing uniaxial compressive load and dynamic load[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, **12**(6): 742 - 748.
- [13] ZHANG Z X, J YU S Q, et al. Effects of high temperatures on dynamic rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2001(38): 211 - 225.
- [14] LI Xi-bing, LOK Tat-seng, ZHAO J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant couplete dynamic stress-strain curves for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, **37**(7): 1055 - 1060.
- [15] 李夕兵, 古德生, 赖海辉. 冲击载荷下岩石动态应力 - 应变全图测试中的合理加载波形[J]. 爆炸与冲击, 1993, **13**(2): 125 - 130. (LI Xi-bing, GU De-sheng, LAI Hai-hui. On the reasonable loading stress waveforms determined by dynamic stress-strain curves of rock by SHPB[J]. Explosion and Shock Waves, 1993, **13**(2): 125 - 130. (in Chinese))
- [16] 李夕兵, 周子龙, 王卫华. 运用有限元和神经网络为 SHPB 装置构造理想冲头[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(23): 4215 - 4218. (LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, WANG Wei-hua. Construction of ideal striker for SHPB device based on FEM and neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(23): 4215 - 4218. (in Chinese))
- [17] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 1994. (LI Xi-bing, DU De-sheng. Rock impact dynamics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [18] 叶洲元, 李夕兵, 万国香, 等. 受三维静载压缩岩石对冲击能的吸收效应[J]. 爆炸与冲击, 2009, **29**(4): 419 - 424. (YE Zhou-yuan, LI Xi-bing, WAN Guo-xiang, et al. Impact energy-absorption property of rock under tri-axial compression[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, **29**(4): 419 - 424. (in Chinese)).
- [19] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, **3**(4): 1 - 9. (XIE He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, **23**(4): 1 - 9. (in Chinese))

