

# 高应力岩石围压卸载后动力扰动的临界破坏特性

殷志强<sup>1,2</sup>, 李夕兵<sup>1</sup>, 尹土兵<sup>1</sup>, 金解放<sup>1,3</sup>, 杜坤<sup>1</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001;

3. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 利用改造的动静组合分离式霍普金森压杆(SHPB)加载装置, 系统研究砂岩历经三维加载-围压卸载-轴向冲击的临界破坏特性。试验结果表明: 砂岩受外界冲击时的临界破坏特性受轴向静压影响明显, 冲击强度随着轴向静压的增加出现先增加后减小的趋势; 当无轴压和轴向静压为单轴抗压强度的 20% 时, 应力-应变曲线为典型的 I 型曲线; 随着轴向静压的增大, 应力-应变曲线逐渐转变为 II 型曲线。试样破坏过程中能量变化逐渐由吸收扰动能量转变为释放弹性储能, 该现象可以较好地反映岩爆发生过程中高静应力和动力扰动的相互作用机制, 为深部岩爆机制的深入研究提供试验支持。另外, 利用数字散斑相关计算方法对试样应力加载过程进行表面位移场监测; 结果表明, 常规冲击加载下, 试样表现出为整体膨胀特性, 当轴向静压为 72 MPa 时, 则表现为入射端张剪性破坏和膨胀性破坏的共同作用, 反映出轴向静载对试样动态破裂面断裂方式的影响。

**关键词:** 岩石力学; 动静组合加载; 分离式霍普金森压杆(SHPB); 动态强度; 高速摄像机; 数字散斑相关方法

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2012)07-1355-08

## CRITICAL FAILURE CHARACTERISTICS OF HIGH STRESS ROCK INDUCED BY IMPACT DISTURBANCE UNDER CONFINING PRESSURE UNLOADING

YIN Zhiqiang<sup>1,2</sup>, LI Xibing<sup>1</sup>, YIN Tubing<sup>1</sup>, JIN Jiefang<sup>1,3</sup>, DU Kun<sup>1</sup>

(1. *School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China*; 2. *School of Mineral and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China*; 3. *School of Architectural and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China*)

**Abstract:** The critical failure characteristics of sandstone experiencing change stresses from three-dimensional loading to confining stress unloading and to axial impact, are investigated by the improved split Hopkinson pressure bar(SHPB) with axial static pressure and confining pressure. The results show that: (1) The critical failure characteristics of sandstone under external impact is influenced obviously by axial static pressure; and the impact strength first increases and then decreases as the axial static pressure increases. (2) The stress-strain curve of sample under coupled static and dynamic loading is a typical class I curve when without axial static pressure and the axial static pressure is 20% of uniaxial compressive strength. (3) With the increase of axial static pressure, the stress-strain curve changes to the typical class II curve gradually. In the failure process of sample, the energy change law is from disturbed energy absorption to elastic stored energy release, which can reflect the mechanism of interactions between high static stress and dynamic disturbance in the process of rockburst. The results can

**收稿日期:** 2012-04-02; **修回日期:** 2012-05-08

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50934006); 安徽理工大学青年教师科学研究基金资助项目(2012QNY39)

**作者简介:** 殷志强(1983-), 男, 博士, 2004年毕业于南华大学矿物资源工程专业, 现任讲师, 主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: zhqyin@aust.edu.cn

provide a test support for the further research of rockburst mechanism. The surface displacement field is monitored by digital speckle correlation method(DSCM). The surface displacement field results show that the samples present whole expansion characteristics under conventional impact loading; but under the axial static pressure of 72 MPa, the samples present the interaction of tension-shear failure and expansion failure, which reflects the effect of axial static pressure on the fracture mode of dynamic failure surface of sample.

**Key words:** rock mechanics; coupled static and dynamic loading; split Hopkinson pressure bar(SHPB); dynamic strength; high speed video camera; digital speckle correlation method(DSCM)

# 1 引言

近年来,随着岩石开挖活动不断向地下深入,遇到的工程灾害日益增多,如岩爆、冲击地压、大变形等,在1 000 m以下的高应力岩体开挖时尤其明显,对深部资源的安全、高效开采构成了巨大威胁<sup>[1-2]</sup>。深部高应力岩体开挖时,岩体在承受地应力、构造应力等高静应力的同时,还承受开挖引起的原三维应力场向二维应力场或一维应力场变化形成临空面而引发的应力卸载影响、以及开挖过程中爆破作业或机械钻凿等动载的作用<sup>[3]</sup>,其应力变化过程如图1所示。因此,深部岩体工程灾害所表现出来的力学特性与工程现象,主要是在高应力和开挖扰动的耦合作用下逐步孕育、发展形成的,具有“动静组合”加载的特点。

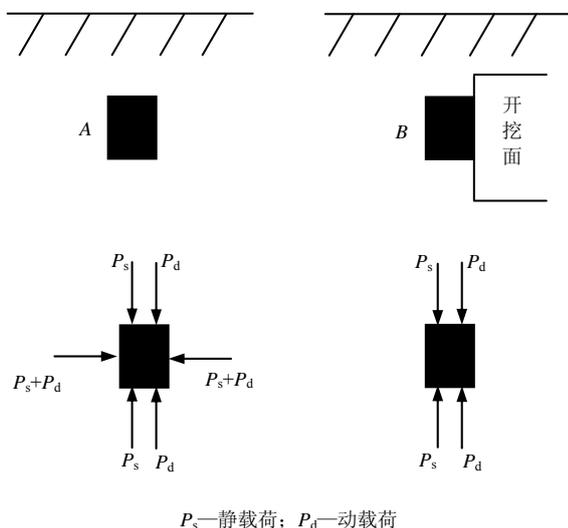


图1 深部岩体开挖应力变化示意图

Fig.1 Sketches of stress change of deep rock excavation

岩石动静组合加载的力学问题自从2002年香山第175次科学会议上被提出以来,受到广泛关注。X. B. Li等<sup>[4-6]</sup>研制了基于分离式霍普金森压杆(SHPB)装置的岩石动静组合冲击加载试验系统,并进行相关动静组合试验研究,结果表明,综合考虑动静组

合加载作用,比单纯考虑动载作用或只静载作用更有实际意义。宫凤强等<sup>[7]</sup>针对砂岩一维动静组合加载条件下破坏特性进行研究,并对动静组合加载条件下岩爆现象进行了深入分析。上述研究主要是针对高应力岩石在动力扰动下的破坏特性展开的。实际上,深部岩石在开挖过程中由三维应力场向二维应力场或一维应力场转变时,首先经历了一定的卸压过程,内部仍然保持一定预应力,之后再经受开挖扰动发生破坏。目前,徐林生等<sup>[8-12]</sup>针对深部高应力开挖造成应力卸载而引发的岩石破坏进行了一些研究,基本为利用常规三轴试验设备及自制的真三轴试验设备开展的岩石卸荷损伤及岩爆方面研究,并取得了系列研究成果。然而,关于应力卸荷作用下动静组合加载力学特性的研究并不多见。

因此,本文针对深部岩石工程开挖特点,利用改造的岩石动静组合SHPB加载装置,根据三维加载-围压卸载-轴向冲击的研究路线,通过砂岩在轴向围压加卸载条件下的动力扰动破裂试验,对深部岩石开挖过程中多种应力耦合作用的力学加载特性进行试验模拟,分析应力卸荷及轴向动静组合加载对岩石临界破坏特性的影响。这对于揭示高应力下深部岩体开挖过程中动力扰动诱发岩爆的破坏机制有一定的工程意义。

# 2 试验系统及方案

## 2.1 试验系统

改进的SHPB试验系统如图2所示。该试验系统的可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和0~100 MPa。子弹材质和弹体最大直径与输入、输出杆相同。改进后的试验系统采用锥形子弹冲击消除振荡,实现稳定的半正弦波加载<sup>[13]</sup>。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,加载之后,通过手动控制阀门的开、闭程度,控制压力卸载速度。

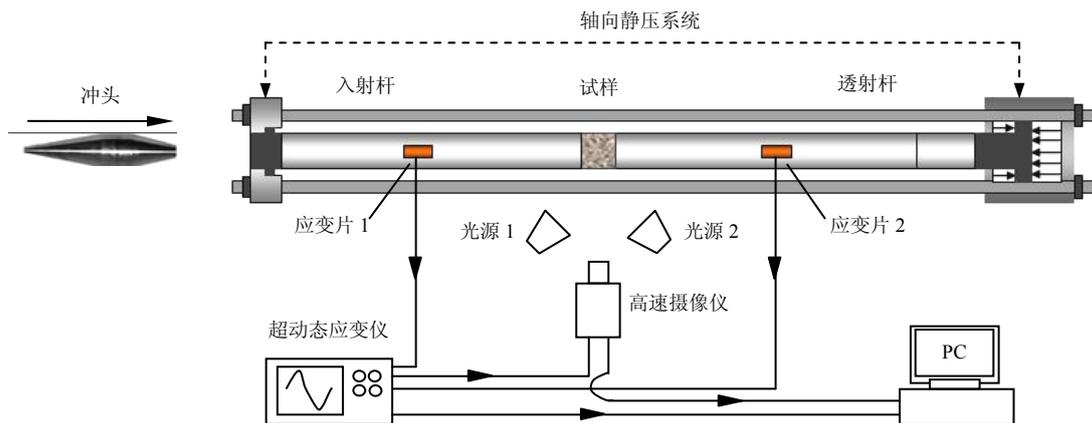


图 2 改进后动静组合 SHPB 加载装置图

Fig.2 Configuration of improved SHPB device with coupled static and dynamic loading

### 2.2 试样制备

为保证试样的均质性，试样从同块完整性和均匀性相对较好的砂岩上钻取。试样为  $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的圆柱，并对其两端及侧面进行了仔细研磨，不平行度和不垂直度均小于  $0.02 \text{ mm}$ 。试样表面光滑，没有明显缺陷，呈灰白色，平均体积密度为  $2\,500 \text{ kg/m}^3$ 。平均静态单轴抗压强度约为  $90 \text{ MPa}$ 。

### 2.3 试验过程

试验中进行了无轴向静压加载的常规动态压缩和动静组合加载 2 类试验，其中，动静组合加载试验中，轴向静压取 4 个级别，分别为 18, 54, 63, 72 MPa，约相当于静载抗压强度的 20%, 60%, 70% 和 80%，在轴向静压施加的同时进行围压加载(40 MPa)，静压加载结束后，以相同的应力卸载速度(1 MPa/s)卸载围压。试验前，需对不同轴向静压加载条件下的试样进行试验性的预冲击，通过调整冲击气压和冲头在发射腔内的位置，不断降低冲击能量，以岩石发生破裂并有碎片剥离，且失去承载能力为准则，以判别岩石是否发生临界破坏<sup>[11]</sup>。保持该冲击条件，进行不同轴向静压加载条件下动力加载扰动岩石临界破坏力学特性试验。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 不同轴向静压下岩石试样临界破坏强度特性

图 3 为不同轴向静压下试样临界破坏时的应力 - 应变曲线。扰动破坏时，砂岩试样在无轴向静压和 18 MPa 轴向静压时，应力 - 应变曲线表现为典型的 I 型曲线；在较高的轴向静压(54, 63 和 72 MPa)时，应力 - 应变曲线表现为 II 型曲线，且峰后应变

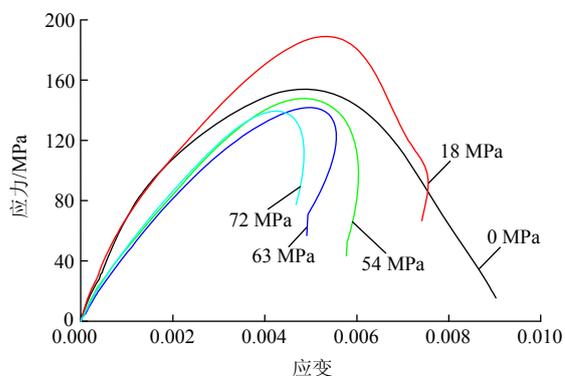


图 3 不同轴向静压下试样临界破坏时的应力 - 应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curves of sandstone sample at critical failure under different axial static pressures

回弹程度有随轴向静压增大而增大的趋势。

图 4 为不同轴向静压下砂岩试样临界破坏时的动态强度及冲击扰动能量的变化规律，图中曲线明显体现出了轴向静压对试样的影响。

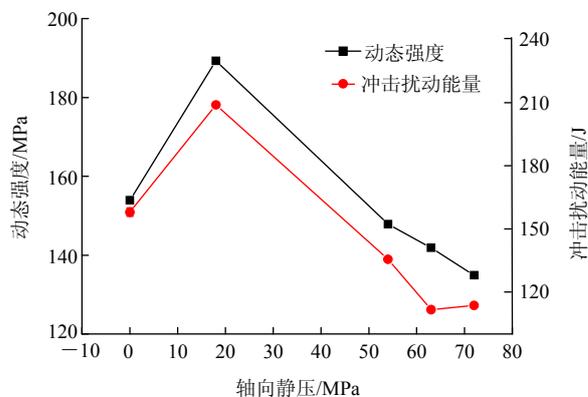


图 4 不同轴向静压下砂岩试样临界破坏时的动态强度及冲击扰动能量的变化规律  
Fig.4 Change laws of dynamic strength at critical failure and impact disturbance energy of sandstone sample under different axial static pressures

由图 4 可知，随轴向静压的增大，试样临界破坏时的动态强度及冲击扰动能量均呈现先增大后减小的变化趋势。当轴向静压从 0 MPa 增大到 18 MPa 时，轴向静压对试样产生压密作用<sup>[10]</sup>，故其动态强度与破坏时所需扰动能量增大。当轴向静载增大到 54 MPa 以上，试样进入弹性变形阶段，内部储存一定弹性应变能，导致试样受较小动力扰动作用就破坏，尤其在 63 和 72 MPa 时，试样接近弹性变形向损伤变形过渡阶段，在近似冲击扰动能量作用下，试样的强度仍随轴向静压的增大而降低。

### 3.2 不同轴向静压下岩石试样临界破坏形态特征

轴向静压为 0, 18, 63 和 72 MPa 时，试样扰动破坏时的典型破坏形态如图 5 所示。从图 5 可以看出，不同轴向静压加载下，试样在扰动破坏时，其破坏形态有明显区别。结合图 3 中对应的应力 - 应变曲线，当轴向静压较低(0 和 18 MPa)时，试样破坏为较典型的中心条状破裂，其应力 - 应变曲线表现为较典型的 I 型曲线；当轴向静压较高(63 和 72 MPa)时，试样破坏模式有所变化，试样破坏形态为表面剥落后的内部裂隙发育，呈现出较典型的“X”形分布<sup>[11]</sup>，试样表面产生“V”形条状碎块，同时其应力 - 应变曲线则表现为较典型的 II 型曲线，即岩石破坏过程全应力 - 应变曲线的岩爆曲线<sup>[14-15]</sup>。



图 5 不同轴向静压下砂岩试样典型破坏形态  
Fig.5 Typical failure forms of sandstone samples under different axial static pressures

### 3.3 破坏能耗规律

不同轴向静压加载下，试样扰动破坏能量密度及扰动破坏所需的扰动能量值如图 6 所示。由图 6 可知：

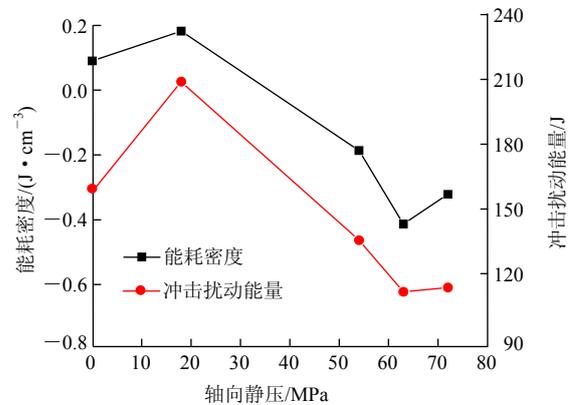


图 6 不同轴向静压下砂岩试样临界破坏扰动破坏能耗密度及冲击扰动能量的变化规律

Fig.6 Change laws of critical disturbance failure energy density and impact disturbance energy of sandstone samples under different axial static pressures

(1) 在轴向静压为 0 MPa 时，试样无应力加载，仅吸收很少部分的扰动能量(约 0.1 J/cm)即导致试样破坏；轴向静压为 18 MPa(单轴抗压强度的 20% 左右)时，试样基本处于压密段与线弹性段的过渡阶段，一般认为此应力状态下亦无弹性应力能量的存储，试样处于压密、内部孔隙闭合的状态，故试样破坏时需要更大的扰动能量，同时所吸收的外界冲击扰动能量也大于无轴向静压加载时；此 2 种初始应力条件下，试样破坏均需消耗外界扰动能量，结合图 3 中对应的应力 - 应变曲线可以看出，应力 - 应变曲线均为典型 I 型曲线。

(2) 当轴向静压较大(54, 63 和 72 MPa)时，试样进入弹性变形阶段，扰动破坏前具有一定的应力能储存，该能量在试样受冲击扰动破坏时释放出来，体现在试样扰动破坏时的能耗为负值，同时，其对应的应力 - 应变曲线(见图 3)呈现典型的 II 型曲线。试验过程中，试样破坏过程中的能量消耗为负值反映出该过程中释放能量。试样受到轴向静压作用所储存的弹性能，在受到动力临界破坏扰动引起其弹性能释放的现象，即实验室岩爆现象<sup>[7, 16]</sup>。

由此可见，历经轴围压加、卸载的高应力储能试样，在较小能量的动力扰动下，导致试样内储能的释放，引发试样“岩爆”破坏。

### 3.4 破坏过程与表面变形场的 DSCM 表征

为研究岩石试样在动力扰动加载过程中的变形

特征。在原有动静组合加载系统上, 增加高速摄像设备, 对试样表面变形场在高应变率加载下的破坏过程进行监测。采用 FASTCAM SA1.1 高速数字式摄像系统对动态冲击过程进行摄像。试验系统见图 2。通过同步控制系统, 可得到不同应力加载时间下的数字图像<sup>[17-18]</sup>。

利用数字散斑相关技术(DSCM), 对 0 MPa 轴向静压下的常规冲击加载和 72 MPa 轴向静压下的动静组合加载 2 种条件下, 试样扰动破坏过程中的表面位移场的变化情况进行直观描述。散斑试验过程中, 高速摄像帧频率设置为 40 000 fps, 即每 25  $\mu\text{s}$  拍摄一张, 图片像素为 448 Pixel $\times$ 288 Pixel。经标定图像的物面分辨率为 0.137 mm/Pixel。利用基于 Matlab 编制的 DSCM 计算程序进行计算, 得出动态加载过程中各时刻的 X 和 Y 方向位移。计算区域为试样表面中心尺寸为 48 mm $\times$ 13 mm 的矩形区域, 如图 7 所示。本文图像中右端为应力波入射端。

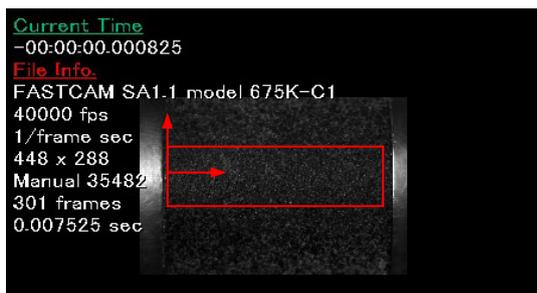
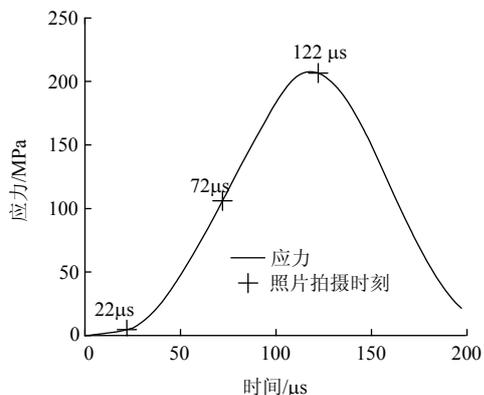


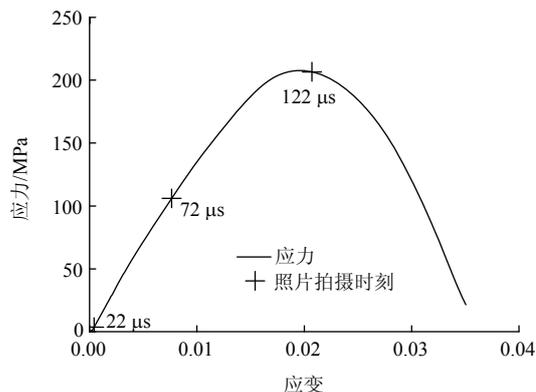
图 7 试样观测区域散斑图像

Fig.7 Speckle pattern in inspection area of sample

常规冲击加载时, 试样应力时程曲线及应力 - 应变曲线如图 8 所示。试样在加载初始时刻(22  $\mu\text{s}$ )、加载上升时刻(72  $\mu\text{s}$ )和应力峰值时刻(122  $\mu\text{s}$ )的 X 和 Y 方向位移场如图 9 所示。



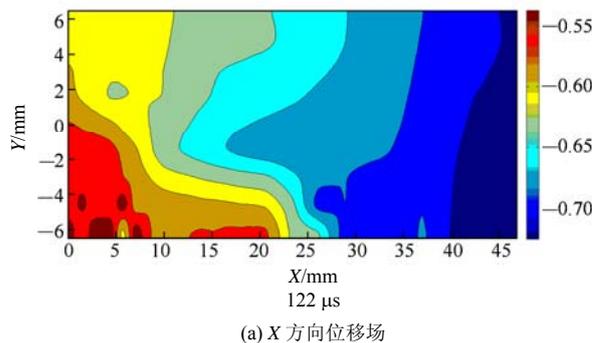
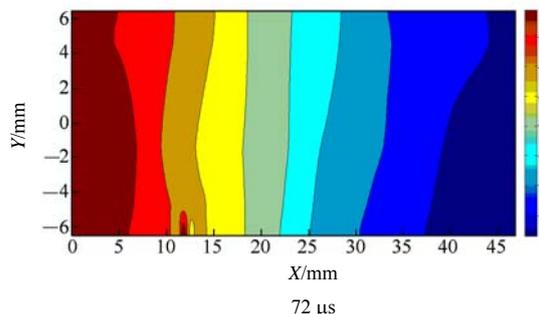
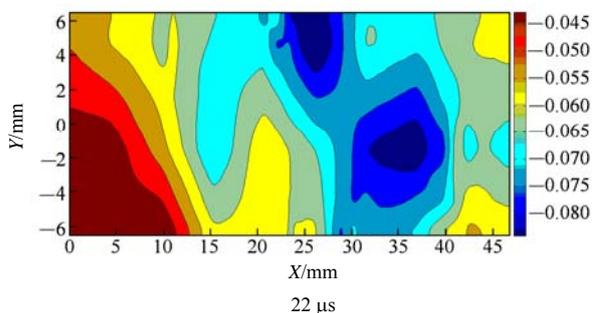
(a) 应力时程曲线



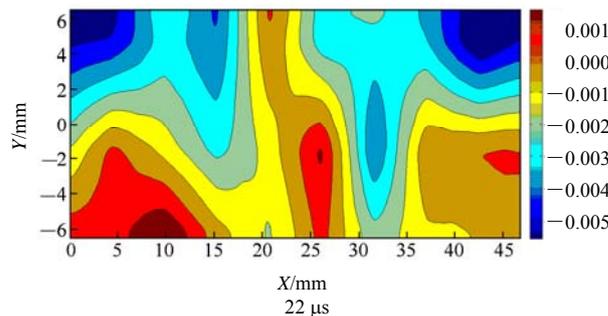
(b) 应力 - 应变曲线

图 8 常规冲击加载时试样应力时程曲线及应力 - 应变曲线

Fig.8 Stress history curve and stress-strain curve of sample under conventional impact loading



(a) X 方向位移场



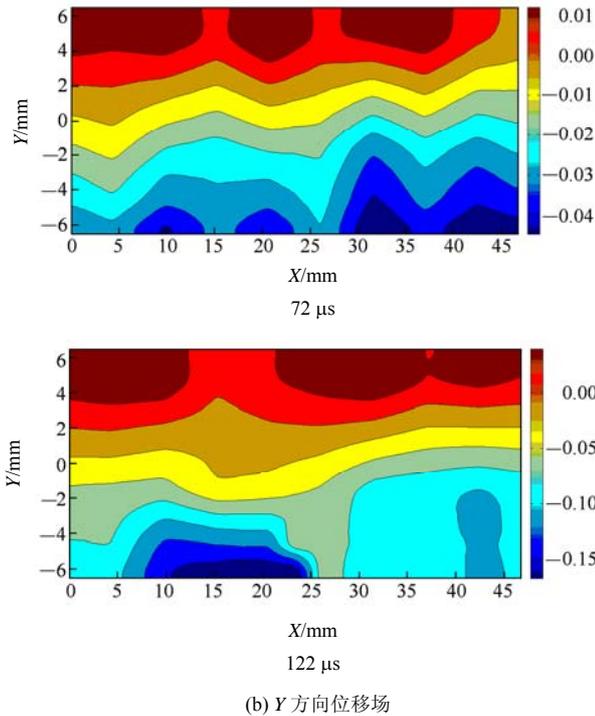
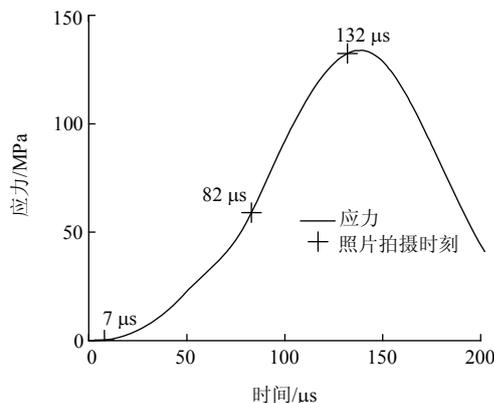


图9 常规冲击加载下试样表面位移场(单位: mm)  
Fig.9 Surface displacement fields of sample under conventional impact loading(unit: mm)

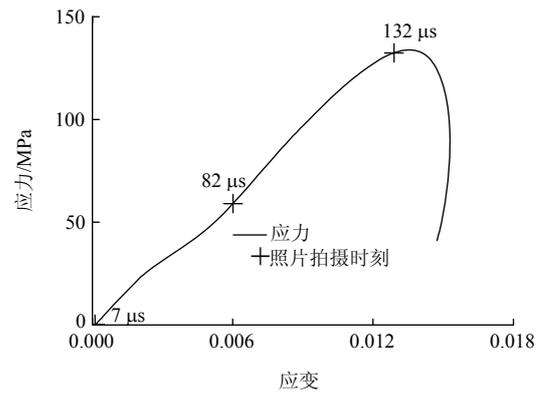
由图9可以看出: 试样X方向位移随应力加载呈持续减小状态; 而Y方向位移趋势反映出, 试样在常规冲击加载下, 入射端与透射端的膨胀量基本相同, 试样基本呈现均匀膨胀性。

72 MPa 轴向静压下, 试样应力时程曲线及应力 - 应变曲线如图10所示。试样在加载初始时刻(7 μs)、加载上升时刻(82 μs)和应力峰值时刻(132 μs)X和Y方向位移场图11所示。

由图11可以看出: 试样在入射端的位移量随应力加载时间的增加而增大, 与图9(a)中常规冲击加载过程变化趋势近似; Y方向位移趋势与常规冲击加载下(见图9(b))呈现明显区别, 在应力峰值时刻(132 μs), 试样应力入射端位移量明显大于透射端,



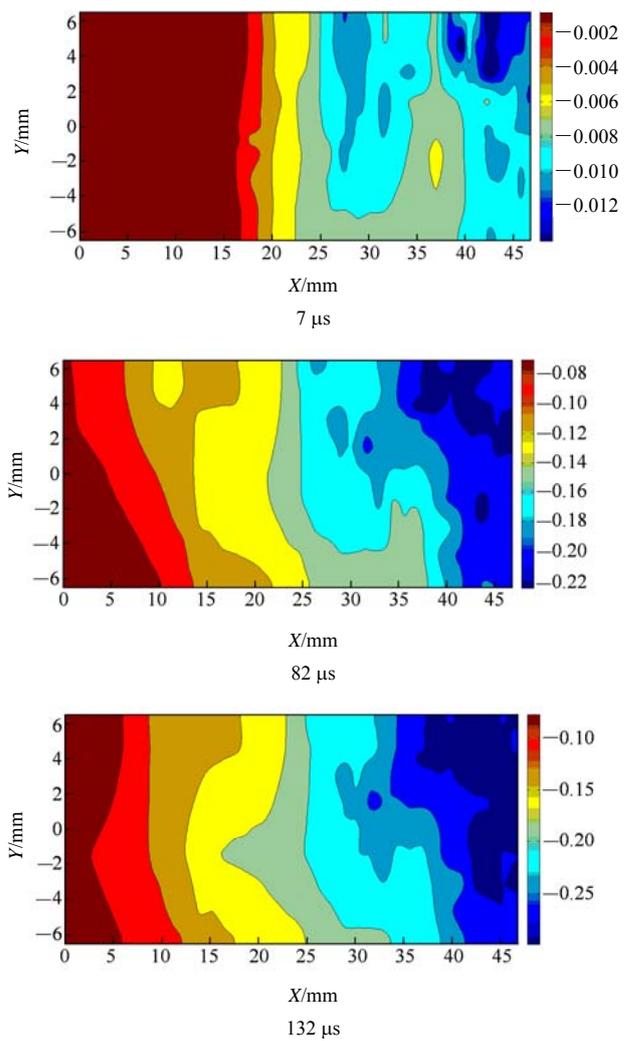
(a) 应力时程曲线



(b) 应力 - 应变曲线

图10 72 MPa 轴向静压下试样应力时程曲线及应力 - 应变曲线  
Fig.10 Stress history curve and stress-strain curve under axial static pressures of 72 MPa

即入射端出现明显张性膨胀, 而透射端基本无明显膨胀现象。与图5(d)中试样单锥破坏情况相比较, 可以看出, 试样在较高轴向静载作用下的扰动破坏



(a) X方向位移场

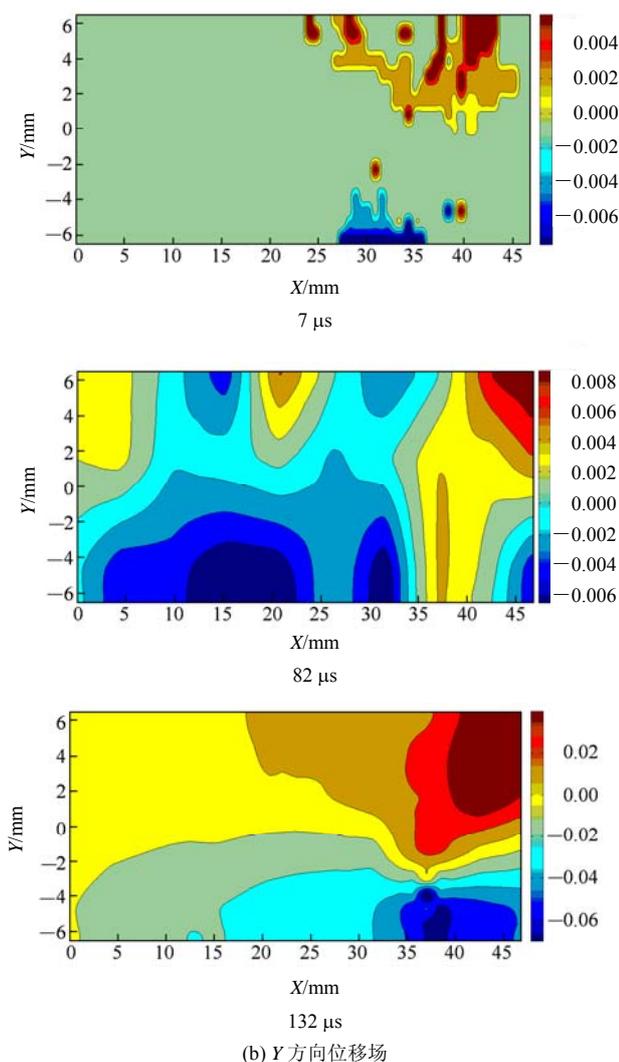


图 11 动静组合加载下试样表面位移场(单位: mm)

Fig.11 Surface displacement fields of sample under coupled static and dynamic loading(unit: mm)

中, 入射端破碎更为严重, 透射端保留一个锥体碎块。该破坏模式与矿山开采中最常见的矿柱结构压剪破裂模式<sup>[19]</sup>较为相似, 其受力特性均为静载和动力扰动共同作用, 在一定程度上揭示了深部岩体开挖过程中动静组合加载下岩石破坏模式的形成原因。

通过比较常规冲击加载和动静组合加载条件下试样破坏过程图像及表面 DSCM 计算结果可以看出, DSCM 计算可以更加直观、准确地反映试样在动态加载条件下的样变形特征。

## 4 结 论

(1) 利用自行研制的岩石动静组合加载试验系

统, 系统研究了砂岩试样在历经围压加卸载后动静组合加载下临界破坏的强度特性、能量规律和破坏模式等, 试样冲击强度随着轴向静载的增加出现先增加后减小的趋势。

(2) 不同轴向静载作用下, 应力 - 应变曲线峰后特征变化明显: 当无轴向静压和轴向静载为静态抗压强度的 20%, 试样整体动态破坏时, 应力 - 应变曲线为典型的 I 型曲线, 破坏能耗表现为吸收外界扰动能量特性; 随着轴向静载的增大, 应力 - 应变曲线逐渐向 II 型曲线变化, 破坏能耗表现为试样弹性储能的释放特性, 直观反映出高应力岩石动力扰动诱发岩爆现象。

(3) 砂岩试样在扰动临界破坏时, 其破坏形态受轴向静载的影响明显。当轴向静压较低时, 试样破坏为较典型的中心条状破裂; 在较高轴向静压作用时, 试样破坏形态呈现出较为典型的“X”形分布, 试样表面产生的“V”形条状碎块。

(4) 通过高速摄像设备与应力加载过程的同步控制, 得到与砂岩试样应力加载历程相匹配的数字图像, 利用 DSCM 程序计算获得试样表面位移场特性, 反映出轴向静载对是试样动态受力破裂受力特性有明显影响。该方法为研究试样动态破裂特征研究提供了一个有效的监测手段。

## 参考文献(References):

- [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: 86 - 87.(DU Desheng, LI Xibing. Modern mining science and technology for metal mineral resources[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 86 - 87.(in Chinese))
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(in Chinese))
- [3] ZHAO P J, LOK T S, YIN Z Q, et al. Simplified design of rock cavern concrete lining to resist shock loading[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(5): 1 087 - 1 094.
- [4] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, 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.

- [5] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 387 - 1 395.(LI Xibing, ZHOU Zilong, YE Zhouyuan, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 387 - 1 395.(in Chinese))
- [6] 李夕兵, 宫凤强, ZHAO J, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 251 - 260.(LI Xibing, GONG Fengqiang, ZHAO J, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 251 - 260.(in Chinese))
- [7] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 一维动静组合加载下砂岩动力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2 076 - 2 085.(GONG Fengqiang, LI Xibing, LIU Xiling. Experimental study of dynamic characteristics of sandstone under one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2 076 - 2 085.(in Chinese))
- [8] 徐林生. 卸荷状态下岩爆岩石力学试验[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(1): 1 - 4.(XU Linsheng. Research on the experimental rock mechanics of rockburst under unloading condition[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2003, 22(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [9] 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 Liming, WANG Zaiquan, HE Junzheng. Analysis of failure characteristics of rock under unloading conditions and their effects on rockburst[J]. Journal of Xi'an University of Architecture, 2007, 39(1): 110 - 114.(in Chinese))
- [10] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865 - 876.(HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, 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))
- [11] 刘豆豆, 陈卫忠, 杨建平, 等. 脆性岩石卸围压强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2 588 - 2 594.(LIU Doudou, CHEN Weizhong, YANG Jianping, et al. Experimental research on strength characteristic of brittle rock unloading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2 588 - 2 594.(in Chinese))
- [12] 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制的初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 255 - 1 262.(XU Zemin, HUANG Runqiu, LUO Xingchun, et al. Limitations of static load theory in rockburst research and preliminary analysis of dynamics mechanism of rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 255 - 1 262.(in Chinese))
- [13] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 1994: 52 - 55.(LI Xibing, GU Desheng. Rock impact dynamics[M]. Changsha: Central South University Press, 1994: 52 - 55.(in Chinese))
- [14] SAITO T. 关于深部隧道工作面岩爆的研究—日本 Kan-Etsu 隧道实例[C]// 国际岩石力学会议论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 1987: 192 - 200.(SAITO T. Study of rockburst of deep working plane-example of Japanese Kan-Etsu tunnel[C]// Proceedings of the International Mechanics and Engineering Conference. Beijing: Coal Industry Press, 1987: 192 - 200.(in Chinese))
- [15] 蔡朋, 邹爱清, 汪斌, 等. 一种基于 II 型全过程曲线的岩爆倾向性指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 3 290 - 3 294.(CAI Peng, WU Aiqing, WANG Bin, et al. A rockburst proneness index based on class II whole process curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.1): 3 290 - 3 294.(in Chinese))
- [16] YIN Z Q, LI X B, JIN J F, et al. Failure characteristics of high stress rock induced by impact disturbance under confining pressure unloading[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(1): 175 - 184.
- [17] PIERRON F, SUTTON M A, TIWARI V. Ultra high speed DIC and virtual fields method analysis of a three point bending impact test on an aluminum bar[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(4): 537 - 563
- [18] SIVIOUR C R, GRANTHAM S G, WILLIAMSON D M, et al. Novel measurements of material properties at high rates of strain using speckle metrology[J]. Imaging Science Journal, 2009, 57(6): 326 - 332.
- [19] LI C L, RICHARD P, ERLING N. The stress-strain behavior of rock material related to fracture under compression[J]. Energy Geology, 1998, 49(3/4): 293 - 30