



高静应力卸载过程中频繁动力扰动作用下岩石的动力学特性

唐礼忠, 陈源, 王春, 刘涛, 韦永恒, 邓丽凡

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 利用改进的岩石动静组合加载 SHPB 试验系统, 开展砂卡岩在不同静力轴压水平上以不同卸载速率的卸载过程中受频繁动力扰动作用的动力学试验, 研究砂卡岩在高静应力卸载过程中受频繁动力扰动作用下的动力学特性, 重点讨论静力轴压大小和卸载速率对岩石受频繁动力扰动时的动力学特性的影响。结果表明: 当卸载轴压一定时, 累计扰动冲击次数与卸载速率成线性正相关关系; 而当卸载速率一定时, 累计扰动冲击次数与轴压成线性负相关关系; 随着轴压卸载速率的增大, 当卸载轴压较小时, 动态变形模量先增大后减小; 而当轴压较大时, 动态变形模量持续减小; 岩石动态峰值应力与动力扰动次数呈二次函数关系, 但随卸载速率的增加, 动态峰值应力与扰动冲击次数关系逐渐过度为线性负相关关系; 最大动态应变与扰动冲击次数呈正相关关系。

关键词: 岩石力学; 动静组合加载; 高静应力; 轴压卸载速率; 动力学特性; 频繁动力扰动

中图分类号: TU45

文献标志码: A

随着资源开采逐渐向深部发展, 开采深度不断增加, 深部围岩的赋存环境也越来越复杂, 特别是深部岩体处于“三高一扰动”的力学环境下, 各种岩石力学问题不同于浅部, 例如深井岩爆、分区破裂化现象等, 因此研究深部岩体的力学性质已成为岩石力学领域中的热点问题^[1-2]。

随着开采活动的不断进行, 深部岩体的应力状态也在不断变化, 岩体处于加载和卸载的复杂过程中, 部分围岩应力集中而增高, 而其他围岩则应力释放而下降, 部分原因是由于岩体开挖后其内部应力状态由三维变为二维甚至一维应力状态, 在某些方位如巷道切向或矿柱轴向上的应力增大, 而在其他方位如巷道径向或矿柱横向上的应力下降; 部分原因是受到附近岩体的开采引起的应力重分布影响; 另一方面, 岩体破坏使其承载能力降低从而使其内部的应力释放而使应力下降。在这种加载和卸载过程中, 岩体可能受到矿山爆破的动力作用, 特别是在具有多采场回采的大规模开采矿山, 岩体受到其他采场爆破波产生的频繁动力扰动。因此, 岩体在卸载过程中受到频繁动力扰动是矿山岩体的一种常见的受力状态, 在这种受力状态下的岩体必然具有对应的变形和破坏特征, 这可能是矿山岩体破坏程度随时间和开采活动的进行而逐渐

加重的一个重要原因。

目前, 岩石力学界已将岩体在静应力和动力共同作用下的动力学问题作为动静组合问题开展了大量研究, 针对岩石卸载力学性质以及岩体受动力冲击扰动的动力学性质的研究已见于大量文献。比如, 研究人员^[3-8]利用伺服试验机对岩石进行卸荷研究, 通过施加不同的轴压和围压水平、不同的卸载速率和卸载量来改变卸荷条件, 分析卸荷条件下岩石的变形和破坏特征; 殷志强等^[9-10]和叶洲元等^[11]基于改进的 SHPB 动静组合加载试验系统对砂岩在围压卸载之后进行的动力扰动冲击, 改变不同围压卸载速率, 分析卸荷岩石力学特性, 研究围压卸载速率对岩石动态强度及损伤的影响。在频繁动力扰动冲击方面, 金解放等^[12-13]研究了在三维静载与循环冲击组合作用下轴压与围压对砂岩动态力学特性的影响和循环冲击载荷作用下破坏模式和机理等; 唐礼忠等^[14-15]针对一定轴压条件, 研究砂卡岩在高静应力和频繁动力扰动共同作用下变形特征、能量规律和破坏模式等。上述研究主要是岩石在准静态下的卸荷试验或者基于动静组合加载系统只进行一次冲击作用的卸载试验, 研究岩石在卸载条件下的变形特性、破坏过程及特征, 并且在频繁动力扰动试验中未考虑到卸载情况下岩石的动力学特性, 而

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474250); 中南大学“创新驱动计划”项目资助(2015CX005)

收稿日期: 2016-01-20; 修订日期: 2016-06-20

通信作者: 唐礼忠, 教授, 博士; 电话: 13974869836; E-mail: lztang11@csu.edu.cn

针对综合考虑岩石高静应力卸载过程中频繁动力扰动作用下动态力学特性和破坏特征的研究却较少见报道。

为研究高静应力卸载过程中受频繁动力扰动作用下的动力学特性, 本文作者采用 SHPB 动静组合加载试验系统, 在本研究组前期研究^[14-15]的基础上, 对采自冬瓜山铜矿矿井下的矽卡岩进行高静应力卸载过程中受频繁动力扰动试验。研究结果可以丰富和发展深部岩体力学理论, 并可为冬瓜山铜矿开采的围岩稳定性控制提供依据。

1 实验

1.1 试验系统

本试验中选用基于 SHPB 装置的一维动静组合加载试验系统^[16-18], 如图 1 所示。轴压加载装置产生轴向静载, 冲头撞击弹性杆产生应力波对试样施加动载。采用试样与杆等径加载方式进行冲击, 加载波为恒应变率加载的半正弦波应力脉冲^[17]。该试验系统可以测定岩石在 $0\sim 1\times 10^3\text{ s}^{-1}$ 应变率段的动态特性, 可以施加 $0\sim 200\text{ MPa}$ 的轴向静压和 $0\sim 500\text{ MPa}$ 的冲击动载, 进而可以实现动静组合加载。入射杆和透射杆的长度为 2 和 1.5 m, 杆直径均为 50 mm, 材料为 40Cr 合金钢, 密度为 7.810 g/cm^3 , 弹性模量为 240 GPa, 其弹性波速为 5447 m/s。采用 DL-750 型示波器和 CS-1D 型超动态应变仪分别作为采集数据和显示设备。通过轴压装置与其相连的手动油压泵实现轴压加卸载。在轴压加载装置处设有液压阀门, 阀门开闭大小可通过手动控制, 控制轴压卸载速率。

SHPB 装置由冲头、入射杆、透射杆组成, 将测试试样放置在入射杆和透射杆之间, 异形冲头被高压氮气冲出, 作用在入射杆端, 产生应力波脉冲, 在和试样接触后分别在入射杆和透射杆中产生反射应力脉冲 $\sigma_R(t)$ 和透射应力脉冲 $\sigma_T(t)$ 。入射波和反射波的应变信号由粘贴在入射杆上的应变片测得, 透射波的应

变信号由粘贴在入射杆上的应变片测得。根据一维应力波理论, 得到动态应力、应变率和应变的公式^[19]如下所示:

$$\sigma_s(t) = \frac{A_c}{2A_s} [\sigma_I(t) + \sigma_R(t) + \sigma_T(t)] \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C}{El} [\sigma_T(t) + \sigma_R(t) - \sigma_I(t)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s(t) dt \quad (3)$$

式中: $\sigma_s(t)$ 、 $\dot{\varepsilon}_s(t)$ 和 $\varepsilon_s(t)$ 分别为岩样的动态应力、应变率和应变; $\sigma_I(t)$ 、 $\sigma_R(t)$ 和 $\sigma_T(t)$ 分别为冲击过程中的入射应力、反射应力和透射应力; A_c 、 A_s 和 l 分别为弹性杆截面积、岩样截面积和岩样长度; E 、 C 分别为弹性杆的弹性模量、纵波波速。

1.2 试验方案

本试验的目的是研究高静应力卸载过程中受频繁动力扰动作用下岩石的动力学特性。岩石试样先经过轴压加载至设定值, 再以一定的卸载速率卸载至预加轴压的 50% 时进行扰动冲击, 循环进行直至试样破坏。在试验过程中设置不同的预加轴压值和不同的卸载速率, 来探究其对岩石试样的动态变形特征和破坏模式的影响。为确定预加轴向静压的大小, 利用 Instron1346 型电液伺服材料试验机进行岩石单轴抗压强度试验测定矽卡岩的单轴抗压强度, 得到矽卡岩的平均抗压强度为 126.79 MPa。由于岩石材料内部结构的非均匀性较大, 因而不同岩石试样强度的离散性较大, 为了保证试验顺利进行, 预加轴向静压的最大值取单轴抗压强度的 75%。

试验方案如表 1 所列, 试验分 4 个系列进行, 每个系列的预加轴向静压相同, 设计矽卡岩预加轴向静压分别为 65、75、85 和 95 MPa, 对应于矽卡岩单轴抗压强度的 51%、59%、67% 和 75%。首先, 每次冲击扰动前先以相同速率加载至预设轴压值, 再分别以 0.5、1、1.5 和 2 MPa/s 的卸载速率进行轴压卸载, 当

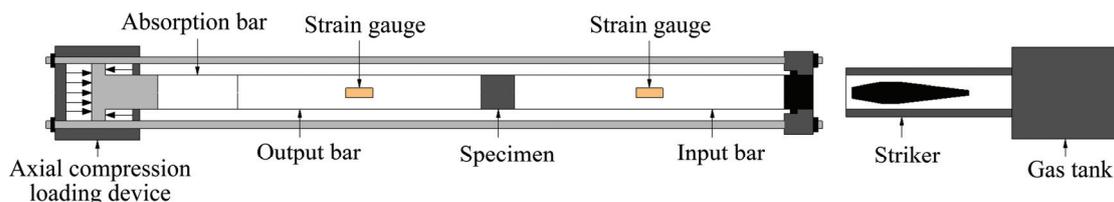


图 1 基于 SHPB 装置的一维动静组合加载试验系统示意图

Fig. 1 Experimental system sketch of one-dimensional coupled static and dynamic loads based on SHPB device

表1 试验参数

Table 1 Experimental parameter

| Specimen No. | Axial compression/MPa | Unloading rate/(MPa·s ⁻¹) |
|--------------|-----------------------|---------------------------------------|
| K1-1 | 65 | 0.5 |
| K2-1 | | 1 |
| K3-1 | | 1.5 |
| K4-1 | | 2 |
| K1-2 | 75 | 0.5 |
| K2-2 | | 1 |
| K3-2 | | 1.5 |
| K4-2 | | 2 |
| K1-3 | 85 | 0.5 |
| K2-3 | | 1 |
| K3-3 | | 1.5 |
| K4-3 | | 2 |
| K1-4 | 95 | 0.5 |
| K2-4 | | 1 |
| K3-4 | | 1.5 |
| K4-4 | | 2 |

轴压卸载到预加轴压的50%(分别为32.5、37.5、42.5和47.5 MPa)时进行扰动冲击。每次冲击扰动后,如果岩样未完全破坏,调整轴压至预加轴压值,重复上述过程进行下次扰动冲击试验,直至岩样完全破坏,试验结束。

试验过程中保持冲击气压和冲头到入射杆的距离恒定,冲头与入射杆的撞击速度基本恒定,冲击气压均为0.5 MPa,实现等能量冲击。手动卸载时为保证数据的精度,调节液压阀门的控制卸载速率,并使用秒表对卸载过程进行计时。同时为保证卸载过程与冲击过程协调一致,当轴压卸载至预加轴压的50%时,负责控制冲击装置的人员立即进行冲击。

1.3 试样制备

本试验中岩样取自冬瓜山铜矿井下900m深度的矽卡岩,选取的岩样结构致密,强度大,表面无明显微裂纹。按照岩石力学试验性能测试要求加工岩样。试样的尺寸为 $d 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,长径比为1:1的圆柱。对岩样两端进行仔细研磨,以保证两端横截面的不平行度和不垂直度都小于0.02。表2所列为各组矽卡岩的各项物理力学参数。

表2 矽卡岩试件的参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of Skarn specimens

| Specimen No. | Height/mm | Diameter/mm | Mass/g | Density/(g·cm ⁻³) |
|--------------|-----------|-------------|--------|-------------------------------|
| K1-1 | 50.34 | 53.6 | 352.39 | 3.10 |
| K2-1 | 49.47 | 53.08 | 389.26 | 3.56 |
| K3-1 | 49.74 | 53.15 | 352.32 | 3.19 |
| K4-1 | 50.3 | 53.36 | 331.16 | 2.94 |
| K1-2 | 50.22 | 52.98 | 342.02 | 3.09 |
| K2-2 | 49.81 | 52.87 | 352.47 | 3.22 |
| K3-2 | 50.07 | 53.69 | 399.33 | 3.52 |
| K4-2 | 50.3 | 53.24 | 359.22 | 3.21 |
| K1-3 | 49.85 | 52.88 | 365.03 | 3.33 |
| K2-3 | 50.05 | 53.72 | 399.93 | 3.53 |
| K3-3 | 49.41 | 53.2 | 362.24 | 3.30 |
| K4-3 | 49.71 | 53.26 | 315.19 | 2.85 |
| K1-4 | 49.85 | 53.7 | 382.72 | 3.39 |
| K2-4 | 50.07 | 53.14 | 392.69 | 3.54 |
| K3-4 | 49.67 | 53.34 | 389.13 | 3.51 |
| K4-4 | 49.59 | 53.31 | 391.12 | 3.53 |

2 结果与讨论

2.1 试验结果

将试验中每个试验岩样的数据进行整理,记录每个岩样的试验累计冲击次数,并绘制动态应力-应变曲线(见图2)。试验组数比较多只给出当轴压为75 MPa时,不同轴压卸载速率条件下矽卡岩的冲击得到的动态应力-应变曲线,图2中的数字表示冲击次数。由于冲击次数较多,只绘制出近似等间距的扰动冲击次数的动态应力-应变曲线以更清晰直观地表示实验结果。篇幅所限,未给出当卸载速率一定,不同轴压下的动态应力-应变曲线。表3列出试验累计扰动冲击次数的变化情况。

图2所示为高静应力卸载过程中频繁动力扰动作用下矽卡岩的动态应力-应变曲线。从图2可以看出,在初始阶段动态应力-应变曲线近似呈直线变化,未出现下凹曲线,说明在预加轴压时,高轴压使岩石内部原有的孔隙和微裂隙闭合,岩石被压实,同时也因为选用的矽卡岩结构致密,强度大,因而未出现微裂隙压实阶段。动态应力-应变曲线大致分为弹性阶段、非线性变形阶段和破坏阶段。从图2中还可以看出峰

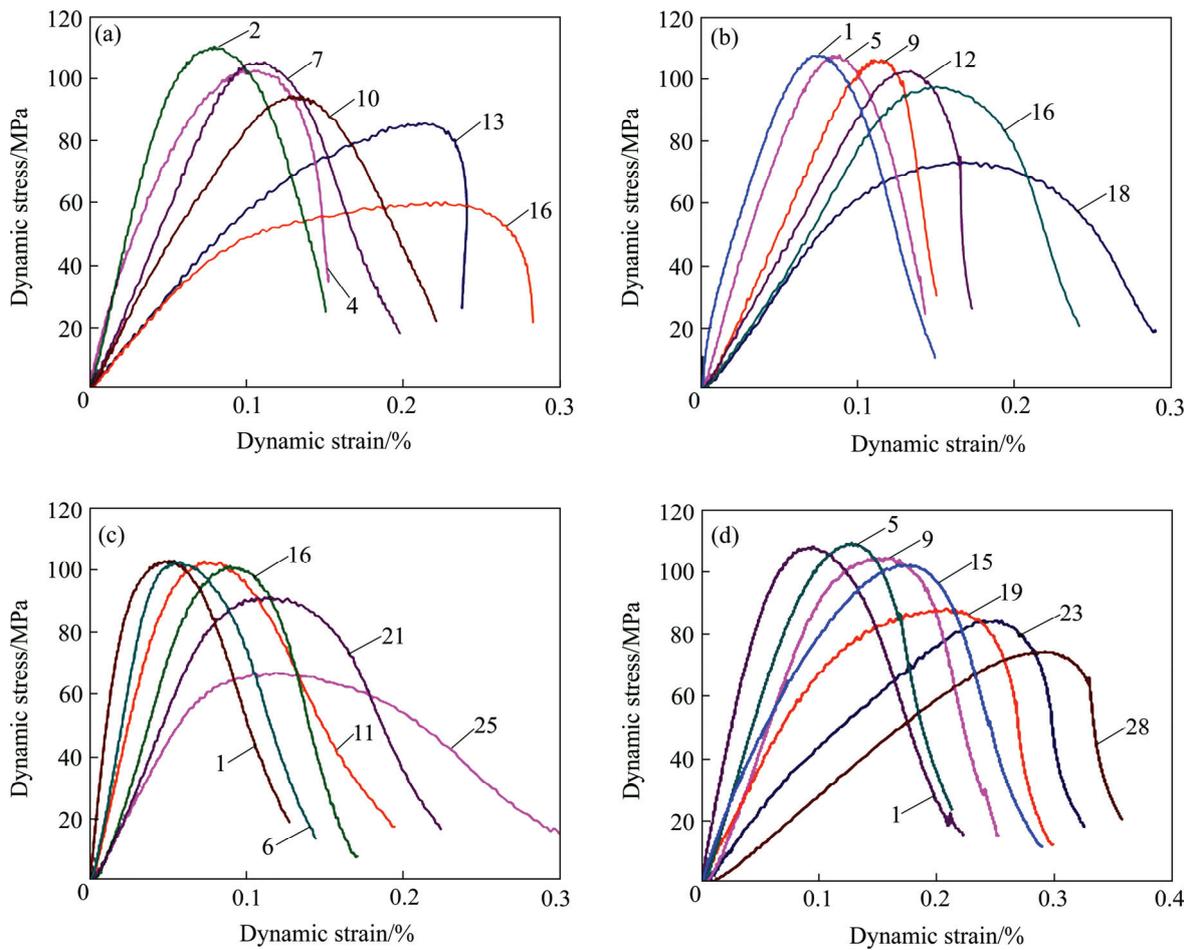


图 2 高静应力卸载过程中频繁动力扰动作用下砂卡岩的动态应力-应变曲线

Fig. 2 Dynamic stress-strain curves of skarn in process of high static unloading under frequent dynamic disturbance test: (a) Axial compression 75 MPa, unloading rate 0.5 MPa/s (K1-2); (b) Axial compression 75 MPa, unloading rate 1 MPa/s (K2-2); (c) Axial compression 75 MPa, unloading rate 1.5 MPa/s (K3-2); (d) Axial compression 75 MPa, unloading rate 2 MPa/s (K4-2)

表 3 试验累计扰动冲击次数

Table 3 Accumulated number of disturbance impact in test

| Specimen No. | Accumulated number of disturbance impact | Specimen No. | Accumulated number of disturbance impact |
|--------------|--|--------------|--|
| K1-1 | 20 | K1-3 | 14 |
| K2-1 | 27 | K2-3 | 18 |
| K3-1 | 33 | K3-3 | 17 |
| K4-1 | 42 | K4-3 | 24 |
| K1-2 | 16 | K1-4 | 7 |
| K2-2 | 18 | K2-4 | 10 |
| K3-2 | 25 | K3-4 | 13 |
| K4-2 | 28 | K4-4 | 16 |

后区未出现回弹现象, 究其原因, 本研究为一维动静加卸载试验, 岩样只受轴向的动静载荷, 岩石的侧面

为自由面, 在动静载荷作用下可以发生径向变形, 高轴压加载阶段储存的弹性能释放, 同时高轴压下加载力大于弹性力, 因而岩石未出现回弹, 随着扰动冲击次数的增加, 岩石的弹性能释放也会转化为岩石破坏的能量, 岩石内部损伤不可避免地持续增加, 总应变不断增加直至岩石破坏。

2.2 累计冲击次数与轴压和卸载速率的关系

图 3 所示给出了 4 个不同卸载轴压水平对应的累计扰动冲击次数与卸载速率的关系。可以看出, 当卸载轴压水平一定时, 累计动力扰动冲击次数与卸载速率近似成线性关系, 卸载速率低, 累计冲击次数少, 而卸载速率高则累计扰动冲击次数多。说明不同卸载速率对岩体卸载过程中岩体内部结构的影响不同, 速率较低时, 卸载过程中岩石得以产生较大的变形, 其内部裂隙发展或新生裂隙多些, 结构损伤相对严重些,

而当卸载速率较大时,岩石变形较小,其内部裂隙发展和新生裂隙少些,结构损伤相对较弱。因此,静力卸载速率对动力扰动破坏具有明显影响。

图4所示给出了4个不同卸载速率对应的轴压卸载水平与累计冲击次数的关系。可以看出,当轴压卸载速率一定时,随着轴压的增大,累计扰动冲击次数与卸载轴压近似成反比关系,轴压大,则累计冲击次数少;相反地,轴压小,则累计冲击次数多。这应该是在高轴压条件下,轴压越高岩石结构损伤大,因而岩石抵抗动力冲击的次数越少。

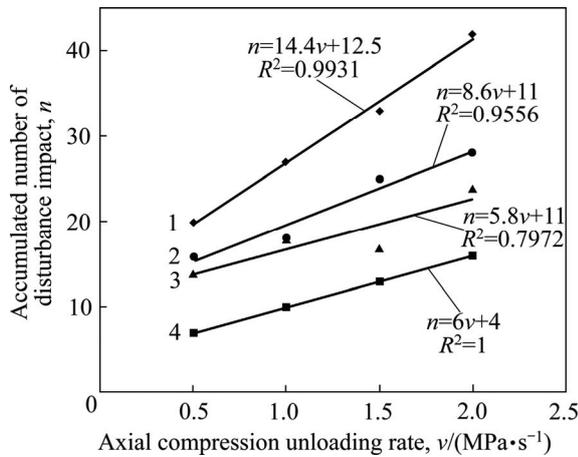


图3 累计扰动冲击次数与卸载速率的关系

Fig. 3 Effect of axial compression unloading rate on accumulated number of disturbance impact: 1—Axial compression 65 MPa; 2—Axial compression 75 MPa; 3—Axial compression 85 MPa; 4—Axial compression 95 MPa

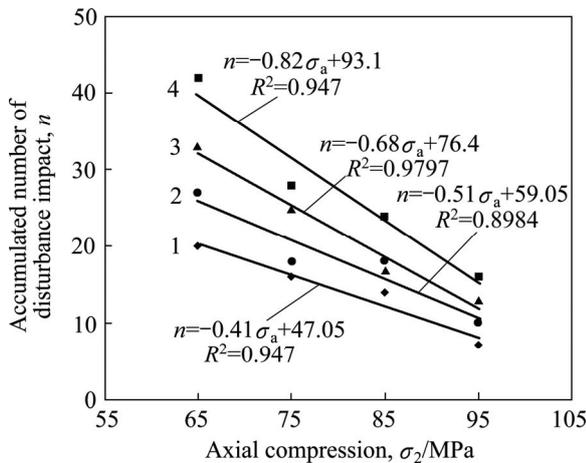


图4 累计扰动冲击次数与轴压的关系

Fig. 4 Effect of axial compression on accumulated number of disturbance impact: 1—Unloading rate 0.5 MPa/s; 2—Unloading rate 1 MPa/s; 3—Unloading rate 1.5 MPa/s; 4—Unloading rate 2 MPa/s

2.3 动态变形模量特征

采用作者在文献[15]中描述的方法测定岩石动态变形模量。如图5所示,选用割线模量、第二类割线模量^[20]和加载段变形模量的加权平均值为动态变形模量。计算公式如下:

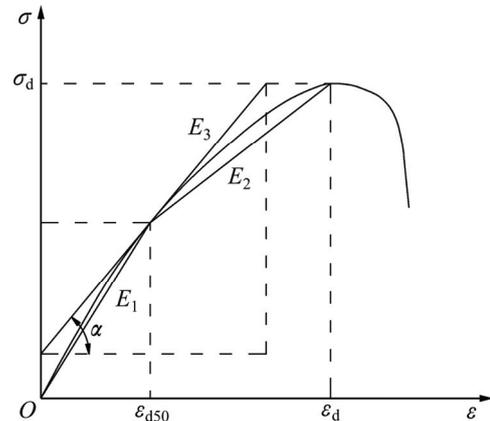


图5 动态变形模量确定示意图

Fig. 5 Schematic diagram of definition of rock dynamic deformation modulus

$$E_1 = \frac{\sigma_{d50}}{\varepsilon_{d50}} \tag{4}$$

$$E_2 = \frac{\sigma_d - \sigma_{d50}}{\varepsilon_d - \varepsilon_{d50}} \tag{5}$$

$$E_3 = \tan \alpha \tag{6}$$

$$E_d = \frac{1}{3}(E_1 + E_2 + E_3) \tag{7}$$

式中: E_1 、 E_2 、 E_3 和 E_d 分别为割线模量、第二类割线模量、加载段变形模量和动态变形模量; σ_d 、 ε_d 分别为峰值应力、峰值应力对应的应变; σ_{d50} 、 ε_{d50} 分别为 50%峰值应力、50%峰值应力对应的应变; α 为 50%峰值应力处切线与 ε 轴的夹角。

针对一定的卸载速率和卸载水平,计算岩样受多次动力扰动直至破坏的动态变形模量的平均值,绘制出4个静力卸载水平对应的动态变形模量与卸载速率关系曲线,如图6所示。图6显示当卸载轴压水平分别为65、75 MPa时,随着轴压卸载速率的增大,动态变形模量是先增大后减小,如卸载速率分别为0.5、1和1.5 MPa/s对应的动态变形模量。在岩石轴压相对较低时,岩石内部结构相对完整,损伤程度低,但另一方面,岩石卸载速率小则卸载用时长,弹性能释放更多,变形更充分,有利于裂纹扩展和新生裂纹,在卸载过程中产生较大损伤,因而,相对于较高卸载速

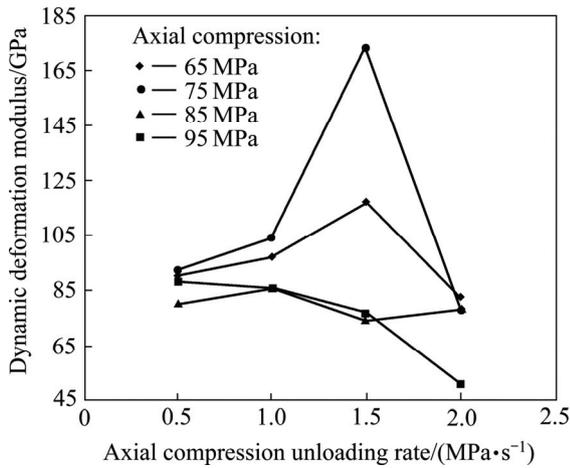


图 6 动态变形模量随扰动冲击次数的变化关系
 Fig. 6 Relationship between dynamic deformation modulus and disturbance impact times

率的情况, 在动力扰动过程中岩石的动态变形模量较小, 反之亦然; 但是, 当卸载速率大于某个临界值(如图中 1.5 MPa/s)时, 岩石动态变形模量却随卸载速率呈负相关关系, 说明卸载速率大于某个临界值后, 卸载速率的增大可能是促进或诱导岩石损伤程度的增加, 动力扰动不仅是对由于卸载导致存在较高损伤程度岩石的动力作用, 同时也起到了加速岩石卸载损伤的作用, 这两个作用使岩石动态变形模量急剧下降。

当卸载轴压水平为 85 MPa 时, 不同卸载速率条件下岩石动态弹模只有轻微波动; 当卸载轴压水平为 95 MPa 时, 岩石动态变形模量与轴压卸载速率呈负相关关系。这说明在较高卸载轴压水平的卸载过程中, 在卸载之前的高静力加载过程就产生了较大的损伤, 在卸载时, 卸载速率高则其能量释放快, 这种较快能量释放作用下, 其内部非稳定的裂纹或破裂面更易扩展、张开或滑动等永久变形, 同时, 在动力扰动作用下只会加速这种结构损伤和破坏, 因而导致动态变形模量变小。综上所述, 卸载轴压水平和卸载速率对岩石动扰动下的动态变形模量具有明显影响。

2.4 动态峰值应力特征

图 7 所示为预加轴压为 85 MPa 时, 一维高轴压卸荷过程中受频繁动力扰动作用下砂卡岩动态峰值应力随着扰动冲击次数的变化关系。可以看出, 对于一定的卸载速率, 随着动力扰动次数的增加, 每次动力扰动形成的岩石动态峰值应力与动力扰动次数呈二次函数关系, 在初始几次动力扰动时, 岩石动态应力峰值随扰动次数增加而增大, 之后逐渐变为随扰动次数增加而减小; 但随卸载速率的增加, 动态峰值应力随

着扰动冲击次数变化的曲线越来越平缓, 逐渐过度为近似直线, 即随扰动次数增加动态峰值应力直线下降。其原因与 2.3 节所认为的导致岩石动态变形模量减小是一致的, 即卸载速率小, 岩石变形更充分, 损伤程度更大, 从而导致动力扰动更易使岩石动态应力峰值更小且破坏的累计扰动次数少; 在低卸载速率条件下, 初期的动力扰动使岩石动态应力峰值增大说明这个阶段的动力扰动可能在岩石内产生了对其结构有利的调节。

图 8 所示为轴压卸载速率为 1 MPa/s 时, 不同预加轴压条件下动态峰值应力随着动力扰动次数变化的关系。随着扰动冲击次数的增加, 动态应力总体上表

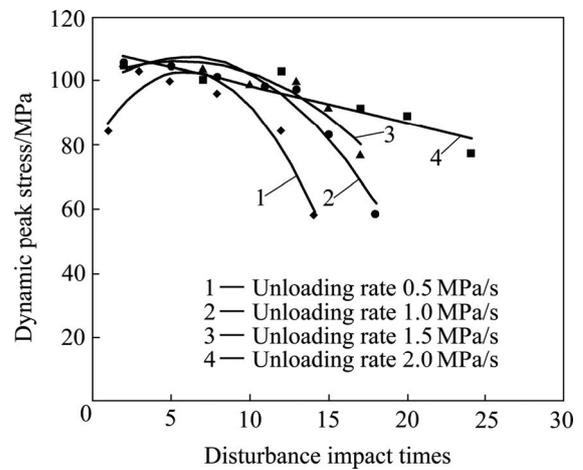


图 7 不同卸载速率时动态峰值应力随扰动冲击次数的变化关系

Fig. 7 Variation relationship between dynamic peak stress with disturbance impact times in different axial compression unloading rate

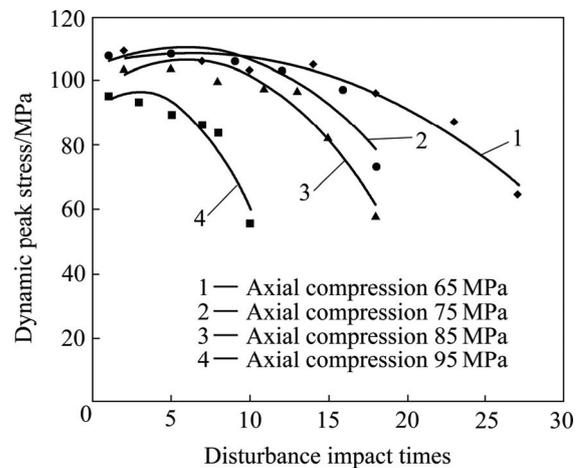


图 8 不同轴压时动态峰值应力随扰动冲击次数的变化关系
 Fig. 8 Variation relationship between dynamic peak stress with disturbance impact times in different axial compression

现出逐渐减小的趋势；随预加卸载轴压的增大，破坏时的累计动力扰动次数减小。

2.5 最大应变特征

图9所示为预加轴压为75 MPa时，不同卸载速率砂卡岩在高静应力卸载过程中频繁动力扰动作用下最大应变随扰动冲击次数的变化关系。可以看出，对于同一卸载速率条件下，最大应变与扰动冲击次数呈正相关关系。这说明随着扰动冲击次数的增加，动态应变逐渐增大，损伤也越来越大，直至发生破坏。

图10所示为当轴压卸载速率为0.5 MPa/s时，岩石在不同轴压的条件下最大应变随扰动冲击次数的变化关系。图10显示，4个不同等级的预加卸载轴压条

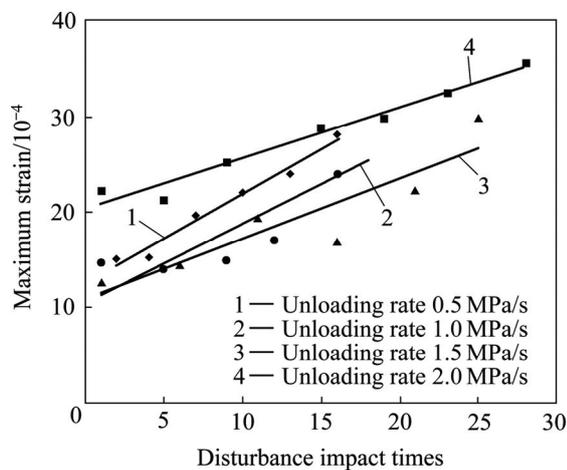


图9 不同卸载速率时最大应变随扰动冲击次数的变化规律
Fig. 9 Variation relationship between maximum strain with disturbance impact times in different axial compression unloading rates

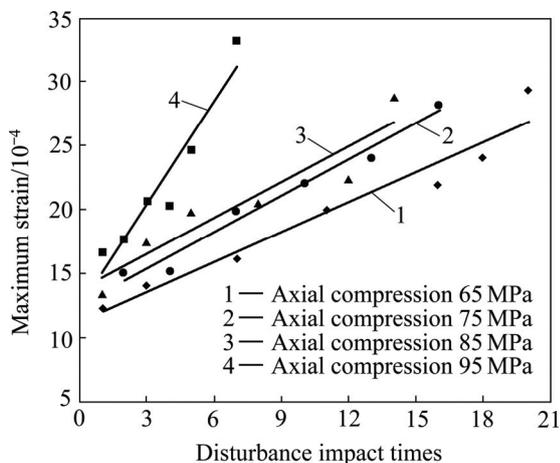


图10 不同轴压时最大应变随扰动冲击次数的变化规律
Fig. 10 Variation relationship between maximum strain and disturbance impact times in different axial compression

件下，随着扰动冲击次数的增加，最大应变都总体上表现出一个不断增大的趋势。当预加卸载轴压分别为65、75和85 MPa时，最大应变随扰动冲击次数的增加，最大应变增大的趋势大致相同；而当预加轴压为95 MPa时，最大应变随扰动冲击次数的变化最为急剧。这说明当预加轴压为95 MPa时，所施加的高轴向静载对岩石的损伤破坏明显增大。

3 结论

1) 卸载轴压水平和卸载速率对岩石在静力卸载过程中受频繁动力扰动的累计动力扰动次数具有显著影响：当卸载轴压水平一定时，累计动力扰动冲击次数与卸载速率近似成线性正相关关系，卸载轴压水平高时，随轴压卸载速率的增大，累计扰动冲击次数增大；而当卸载速率一定时，累计动力扰动冲击次数与卸载轴压水平近似成线性负相关关系，随着卸载轴压水平的增大，累计扰动冲击次数减小。

2) 卸载轴压水平和卸载速率对岩石动扰动下的动态变形模量具有明显影响：当卸载轴压水平较低时，随着轴压卸载速率的增大，动态变形模量先增大后减小；但当卸载轴压水平较高时，岩石动态变形模量与卸载速率呈负相关关系。这与卸载和动力扰动过程的弹性能释放和岩石结构损伤演化具有密切关系。

3) 在一定的卸载速率下，岩石动态峰值应力与动力扰动次数呈二次函数关系，在初始动力扰动的动态应力峰值随扰动次数增加而增大，之后逐渐变为随扰动次数增加而减小；但随卸载速率的增加，动态峰值应力与扰动冲击次数关系曲线逐渐过度为近似直线的负相关曲线；随着扰动冲击次数的增加，动态峰值应力总体上表现出逐渐减小的趋势。

4) 在同一卸载速率条件下，最大应变与扰动冲击次数呈正相关关系；随着扰动冲击次数的增加，最大应变都总体上表现出一个不断增大的趋势。

REFERENCES

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 姜耀东. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, JIANG Yao-dong. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 钱七虎. 非线性岩石力学的进展——深部岩体力学的若干问题[C]//中国岩石力学与工程学会编. 第八次全国岩石力学

- 与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 10-17.
- QIAN Qi-hu. The current development of nonlinear rock mechanics: the mechanics problems of deep rock mass[C]//Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering ed. Proceedings of the 8th Rock Mechanics and Engineering Conference. Beijing: Science Press, 2004: 10-17.
- [3] 王瑞红, 李建林, 蒋昱州, 陈 星. 循环加卸载对岩体残余强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2103-2109.
- WANG Rui-hong, LI Jian-lin, JIANG Yu-zhou, CHEN Xing. Experimental research on influence of cyclic loading and unloading on rock mass residual strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2103-2109.
- [4] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 周 辉, 孙 峰. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1807-1817.
- QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, ZHOU Hui, SUN Feng. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1807-1817.
- [5] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 杨金保. 不同初始损伤和卸荷路径下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1686-1697.
- QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, YANG Jin-bao. Experimental research on mechanical properties of deep marble under different initial damage levels and unloading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1686-1697.
- [6] 黄润秋, 黄 达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 21-33.
- HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 21-33.
- [7] 黄润秋, 黄 达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2205-2213.
- HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2205-2213.
- [8] 王在泉, 张黎明, 孙 辉, 张迎辉, 匡顺勇. 不同卸荷速度条件下灰岩力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1045-1050, 1277.
- WANG Zai-quan, ZHANG Li-ming, SUN Hui, ZHANG Ying-hui, KUANG Shun-yong. Experimental study of mechanical properties of limestone under different unloading velocities[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1045-1050, 1277.
- [9] 殷志强, 李夕兵, 金解放, 尹士兵, 刘科伟. 围压卸载速度对岩石动力强度与破碎特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1296-1301.
- YIN Zhi-qiang, LI Xi-bing, JIN Jie-fang, YIN Tu-bing, LIU Ke-wei. Effects of unloading rates of confining pressure on dynamic strength and fragmentation characteristics of rock under impact loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1296-1301.
- [10] 殷志强, 李夕兵. 围压卸荷条件下砂岩损伤与动态破碎特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2013(1): 90-94.
- YIN Zhi-qiang, LI Xi-bing. Research on damage and dynamic fragmentation characteristics of sandstone under unloading with confining pressures[J]. China Safety Science Journal, 2013(1): 90-94.
- [11] 叶洲元, 赵伏军, 周子龙. 动静组合载荷下卸荷岩石力学特性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 454-459.
- YE Zhou-yuan, ZHAO Fu-jun, ZHOU Zi-long. Mechanical characteristics of unloading rock under coupled dynamic and static loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 454-459.
- [12] 金解放, 李夕兵, 钟海兵. 三维静载与循环冲击组合作用下砂岩动态力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1358-1372.
- JIN Jie-fang, LI Xi-bing, ZHONG Hai-bing. Study of dynamic mechanical characteristic of sandstone subjected to three-dimensional coupled static-cyclic impact loadings[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 32(7): 1358-1372.
- [13] 金解放, 李夕兵, 王观石, 殷志强. 循环冲击载荷作用下砂岩破坏模式及其机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1453-1461.
- JIN Jie-fang, LI Xi-bing, WANG Guan-shi, YIN Zhi-qiang. Failure modes and mechanisms of sandstone under cyclic impact loadings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4): 1453-1461.
- [14] 唐礼忠, 舒计步, 武建力, 李夕兵, 汪令辉. 高静应力和频繁动力扰动共同作用下砂岩动力学特性[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(8): 993-999.
- TANG Li-zhong, SHU Ji-bu, WU Jian-li, LI Xi-bing, WANG Ling-hui. Dynamic characteristics of skarn under the combined action of high static stress and frequent dynamic disturbance[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(8): 993-999.
- [15] 唐礼忠, 王 春, 程露萍, 高龙华. 一维静载及循环冲击共同作用下砂岩力学特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3898-3906.
- TANG Li-zhong, WANG Chun, CHENG Lu-ping, GAO Long-hua. Experimental study of mechanical characteristics of skarn under one-dimensional coupled static and cyclic impact loads[J]. Journal of Central South University (Science and

- Technology), 2015, 46(10): 3898–3906.
- [16] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, HONG L, YIN T B. 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.
- [17] LI X B, LOK T S, ZHAO J, ZHAO P J. Oscillation elimination in the hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress–strain curves for rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(7): 1055–1060.
- [18] 李夕兵, 宫凤强, ZHAO J, 高科, 尹士兵. 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(2): 251–260.
LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, ZHAO J, GAO Ke, YIN Tu-bing. 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(2): 251–260.
- [19] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 12.
LI Xi-bing, GU De-sheng. *Rock impact dynamics*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994: 12.
- [20] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1179–1190.
GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling. Preliminary experimental study of characteristics of rock subjected to 3D coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1179–1190.

Dynamic properties of rock disturbed frequently dynamically in process of unloading under high static stress

TANG Li-zhong, CHEN Yuan, WANG Chun, LIU Tao, WEI Yong-heng, DEND Li-fan

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Dynamic experiments on skarn were conducted with a modified one-dimensional coupled static and dynamic loads based on SHPB device, in which rock samples were frequently dynamically disturbed in the process of static unloading with different static unloading rates on different levels of high static axial compression, in order to research the dynamic properties of skarn in the process of high static stress unloading and frequent dynamic disturbance, and focus on the influence of level of axial compression and axial compression unloading rate on the dynamic properties. The results show that there is a positive correlation between accumulated number of dynamic disturbance and axial compression unloading rate when level of unloading axial compression is constant. But when axial compression unloading rate is constant, the accumulated number of dynamic disturbance is negatively related with unloading axial compression. When static axial compression is small, the dynamic deformation modulus firstly increases with the increase of axial compression unloading rate and then it decreases, and when static axial compression is large, the dynamic deformation modulus decreases steadily. The relationship between dynamic peak stress and the dynamic disturbance times is a quadratic function, but with the increase of axial compression unloading rate, it gradually becomes a linear negative correlation. And maximum dynamic strain is positive correlated with the dynamic disturbance times.

Key words: rock mechanics; coupled static and dynamic load; high static stress; axial compression unloading rate; frequent dynamic disturbance

Foundation item: Project(51474250) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2015CX005) supported by Innovation-driven Plan in Central South University, China

Received date: 2016-01-20; **Accepted date:** 2016-06-20

Corresponding author: TANG Li-zhong; Tel: +86-13974869836; E-mail: lztang11@csu.edu.cn

(编辑 王超)