

DOI: [10.11883/bzycj-2018-0137](https://doi.org/10.11883/bzycj-2018-0137)

# 频繁动力扰动对围压卸载中高储能岩体的动力学影响<sup>\*</sup>

唐礼忠<sup>1</sup>, 刘 昌<sup>1</sup>, 王 春<sup>2</sup>, 陈英毅<sup>1</sup>, 申 帆<sup>1</sup>

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 基于冬瓜山铜矿深部巷道围岩开挖过程中面临的高应力和频繁爆破扰动问题, 利用改进的SHPB动静组合加载系统, 开展了频繁动力扰动对围压卸载中高储能岩体动力学影响的研究。研究结果表明, 围压卸载中的砂卡岩受到动力扰动时, 其动态峰值应力和弹性模量随动力扰动次数非线性变化。围压卸载中的高储能砂卡岩受到动力扰动时会释放能量。轴压促使岩样内微裂隙轴向发育, 造成岩样抵抗动力扰动能力减弱; 围压减缓岩样内微裂隙轴向发育, 造成岩样抵抗动力扰动能力增强。动力扰动对微裂隙扩展有促进作用, 使围压卸载中的岩样由拉伸破坏向剪切破坏转变。

**关键词:** 循环冲击; 围压卸荷; 能量耗散; 变形特征; 破坏模式

中图分类号: O347.3; TU452

国标学科代码: 1301540

文献标志码: A

随着岩土工程不断向深部发展, 而深部开采面临的岩爆、冲击地压和挤压大变形等工程灾害越来越多<sup>[1-2]</sup>。深埋巷道的坚硬围岩处于较高的应力环境下, 岩体内部储存的弹性势能较大, 开挖卸荷高储能硬岩容易引发岩爆等灾害。对于采用爆破手段开挖的深部矿山, 其巷道掘进和采场回采形成空间会造成围压卸载和应力状态改变, 自身采掘空间形成所需的爆破及相邻采掘空间形成所需的爆破, 会使岩体处于频繁的动力扰动作用下。因此, 矿山岩体在开挖过程中常处于不断的加载、卸载和频繁动力扰动的复杂受力环境下。可见, 高储能岩体卸载过程中频繁遭受动力扰动的动力学特性研究, 具有重要理论和实际意义。

目前, 针对岩石受到静应力和动力扰动组合作用这个问题, 多采用分离式霍普金森压杆(SHPB)进行研究。对于岩石受到轴向静应力和动力扰动问题, 左宇军等<sup>[3-4]</sup>以单轴动静组合实验为基础, 研究了岩爆的能量组成和岩爆发生时岩块的弹射速度问题, 认为对有岩爆倾向性的矿山进行支护时, 应考虑动静组合问题, 而不能只考虑静载问题。对于深部硬岩的破坏及发育问题, Diederichs 等<sup>[5]</sup>研究了深部硬岩巷道开挖过程中围岩的裂纹扩展和发育问题。Xia 等<sup>[6]</sup>研究了巴雷花岗岩微观组织的分布和特征, 识别了与微裂纹首选方向相关的3个正交的弱面, 发现断裂韧性和纵波速度都取决于这些弱面的方向。对于岩石受到轴向静应力卸载后的动力扰动问题, 唐礼忠等<sup>[7-8]</sup>研究了砂卡岩在一维高应力卸载条件下受频繁动力扰动时岩石的力学特性, 发现轴压不同时岩石的应力应变曲线也呈现出回弹和不回弹两种特性, 认为岩爆的发生是动力扰动诱发岩石内弹性储能突然释放造成的。针对岩石受到三维静应力和动力扰动问题, 王春等<sup>[9]</sup>研究了岩石在三维高静应力和频繁动态扰动时的损伤特性和本构模型, 通过推演损伤演化方程验证了岩石的损伤演化规律。在岩石断裂破坏方面, Zhao 等<sup>[10]</sup>在不考虑断裂剪切行为的情况下, 研究了非线性断裂正态特性对P波传递的影响。在考虑到岩石围压卸载的影响下, 殷志强等<sup>[11-12]</sup>研究了高应力砂岩在围压卸载后动力扰动的临界破坏特性及围压卸载速度对岩石的影响, 发现轴压的改变对岩石破坏时的能耗有直接影响, 围压的卸载速度和岩石破坏块度的分维数有密切联系。金解放等<sup>[13]</sup>

\* 收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2018-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51474250); 中央高校基本科研业务费专项(2018zzts721, 2018zzts212);

河南省高校重点科研(18A440014); 河南理工大学博士基金(672707)

第一作者: 唐礼忠(1963—), 男, 博士, 教授, lztang11@csu.edu.cn。

研究了轴压和围压对循环冲击下砂岩能耗的影响,发现平均应变率和岩样的体积能耗正相关。对岩石受到动力扰动下的裂纹发育问题,邱加冬等<sup>[14]</sup>利用霍普金森压杆,对完整和预制缺陷花岗岩做了层裂破坏实验,得出预制缺陷对初始层裂位置的影响。周磊等<sup>[15]</sup>用青砂岩做巷道模型,分析了冲击荷载下含预制裂缝巷道的裂纹扩展规律,得出了应力反射波与透射波对止裂问题的影响。上述研究主要对岩石在动静组合系统中进行一次冲击或者在一维状态下进行多次冲击,并未考虑岩石在卸围压的同时受到多次冲击时的动力学影响,而本文中实验进行了一定程度的创新。

冬瓜山铜矿深部巷道围岩由于受到高地应力和频繁爆破扰动等影响,时常发生顶板冒落、喷锚支护的锚杆被拔断等现象。巷道开挖过程和支护好的洞室围岩再发生锚杆被抽离、顶板冒落等破坏过程均可视为围压卸载的过程,而在其发生卸载的过程中会遭受频繁的爆破扰动。本文中,利用改进的SHPB动静组合加载系统对冬瓜山铜矿井下900 m的高储能矽卡岩进行卸围压同时进行多次动力扰动实验,分析动力扰动对矽卡岩的动态峰值应力、切线弹性模量、体积能耗和破坏形态的影响,以期对冬瓜山铜矿深部巷道围岩的开挖和支护提供参考。

## 1 实 验

### 1.1 实验系统

为模拟深部开挖岩石的受力特性,采用改进的基于SHPB装置的动静组合加载系统<sup>[16-18]</sup>,其结构示意图见图1。该系统的轴向静压、围压和冲击动载的加载范围分别为0~200 MPa、0~100 MPa和0~500 MPa。轴压和围压均由手动控制油压泵对试样进行加卸载。SHPB系统的杆件为40 Cr合金钢,密度为7.810 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为240 GPa,泊松比为0.28,入射杆和投射杆的直径均为50 mm,弹性波在杆件中的传播速度为5 547 m/s。采用CS-1D型超动态应变仪和DL-750型示波器,对数据进行采集和显示。

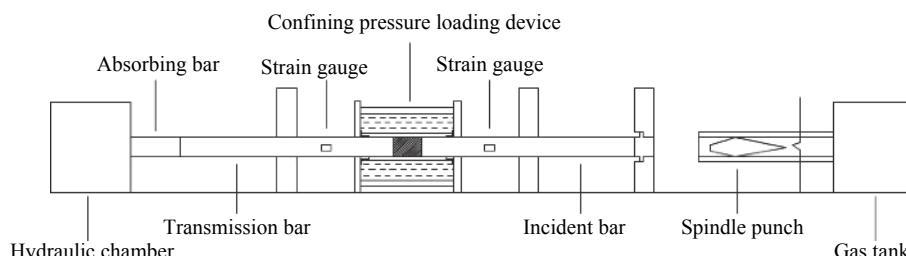


图1 动静组合系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of dynamic and static combination system

### 1.2 实验原理

在SHPB装置实验中,岩样的 $\sigma$ - $\varepsilon$ - $\dot{\varepsilon}$ 基于一维应力和试件受力均匀的假设,而对于改进的系统,当试件安装正确后受到轴向静应力作用,入射杆和透射杆仍然受一维应力作用,服从一维应力波理论,因此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。根据一维应力波理论,动态应力、应变率和应变分别为<sup>[19]</sup>:

$$\sigma(t) = \frac{A}{2A_s} [\sigma_I(t) + \sigma_R(t) + \sigma_T(t)], \quad \dot{\varepsilon}(t) = \frac{c}{El} [\sigma_T(t) + \sigma_R(t) - \sigma_I(t)], \quad \varepsilon(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}(t) dt \quad (1)$$

根据能量守恒定律,可以推出冲击过程中各项能量分别为<sup>[17]</sup>:

$$W_I = \frac{Ac}{E} \int_0^t \sigma_I^2(t) dt, \quad W_R = \frac{Ac}{E} \int_0^t \sigma_R^2(t) dt, \quad W_T = \frac{Ac}{E} \int_0^t \sigma_T^2(t) dt \quad (2)$$

$$W_s = W_I - W_R - W_T, \quad w = \frac{W_s}{V_s} \quad (3)$$

式中: $\sigma(t)$ 、 $\dot{\varepsilon}(t)$ 、 $\varepsilon(t)$  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,  $A$ 、 $A_s$  分别为弹性杆截面积和岩样截面积,  $E$ 、 $c$  分别为弹性杆的弹性模量和纵波波速,  $l$  和  $V_s$  分别为岩样长度和岩样体积,  $W_1$ 、 $W_R$ 、 $W_T$ 、 $W_S$  和  $w$  分别为冲击过程中的人射能、反射能、透射能、岩样总耗能和岩样体积耗能。

### 1.3 实验方案

实验目的是研究动力扰动对围压卸载中高储能岩体的影响, 利用 SHPB 动静组合加载系统, 获得深部高应力岩体开挖过程中受到的应力变化及动力扰动情况。其中, 岩样受到的轴向静压和围压均由油压泵提供, 动力扰动由冲击弹头对入射杆的撞击提供。根据在-910 m 水平测得的地应力测量数据可知, 该水平岩体受到的围压值为 20 MPa 左右, 巷道开挖后围压会发生卸载, 因而实验围压设定为 15 和 20 MPa, 再对两组围压进行卸载处理。采集加工好后的矽卡岩岩样做单轴抗压强度实验, 得出矽卡岩的平均单轴抗压强度为 126.63 MPa, 为防止轴压加载过高对岩样造成巨大损坏, 将实验的初始轴压值设定为单轴抗压强度的 50%, 即 62.5 MPa。为研究轴压的变化对岩样破坏的影响, 再增加两组轴压值, 即 72.5 和 82.5 MPa。为了模拟爆破扰动现象, 由于实验设备性能限制, 采用 0.6 MPa 的冲击气压冲击弹头, 由弹头对入射杆进行冲击, 进而由入射杆对岩样实施动力扰动。

实验中, 利用手动油压泵缓慢地给岩样加围压和轴压, 为防止岩样在冲击扰动前就被压坏, 先加固压后加轴压, 轴压、围压的前期加载速率保持为 0.5 MPa/s, 后期加载速率调整为 0.1 MPa/s。轴压、围压加载到设定值后维持轴压不变, 保持 5 min 后以 1 MPa/s 的卸载速率卸载围压, 当围压卸载到设定值的 50% 时, 施加 0.6 MPa 的气压推动弹头, 对入射杆进行冲击扰动。每次冲击扰动后, 如果岩样没有完全破坏, 调整围压至设定围压值再次进行卸荷和冲击扰动, 直至岩样完全破坏。具体的实验方案见表 1。

### 1.4 取样与加工

岩样为冬瓜山铜矿井下 900 m 深的矽卡岩。通过钻孔岩芯取样法, 在井下 900 m 水平取样, 再选择合适的岩芯进行加工。加工好的岩样应结构致密、表面无明显微裂纹。为满足实验要求, 按照规定, 岩样的直径为 50 mm, 高径比为 1, 岩样的两个端面的不垂直度和不平整度均小于 0.02 mm。为了更清楚地了解岩样的力学特性, 对岩样做单轴和三轴压缩实验。矽卡岩单轴压缩实验结果为: 峰值荷载 170.20 kN, 单轴抗压强度 126.63 MPa, 弹性模量 13.23 GPa, 泊松比 0.270, 矽卡岩三轴压缩实验结果见表 2。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验结果

对实验中每个岩样的数据进行整理, 统计其累计冲击次数并绘制其动态应力应变曲线(见图 2、表 3)。由于冲击次数较多, 在绘制动态应力应变曲线时采取近似等间隔取样的方式绘图, 图中的数字表示冲击次数。

从图 2 可以看出, 岩样的动态应力应变曲线的初始阶段并未出现压密阶段, 说明实验所采用的井下

表 1 实验方案

Table 1 Experimental plan

岩样	预加轴压 /MPa	预加围压 /MPa	冲击时围压 /MPa	围压卸载速率 /(MPa·s <sup>-1</sup> )	冲击气压 /MPa
XK1-1	62.5	15	7.5	1	0.6
XK1-2		20	10		
XK2-1	72.5	15	7.5	1	0.6
XK2-2		20	10		
XK3-1	82.5	15	7.5	1	0.6
XK3-2		20	10		

表 2 矽卡岩三轴压缩实验结果

Table 2 Triaxial compression experimental results for skarn

围压 /MPa	弹性模量 /GPa	三轴抗压强度 /MPa	峰值应变 /10 <sup>-3</sup>	黏结力 /MPa	内摩擦角 /(°)
15	26.81	217.93	10.27	6.86	57
20	32.69	237.87	12.29		

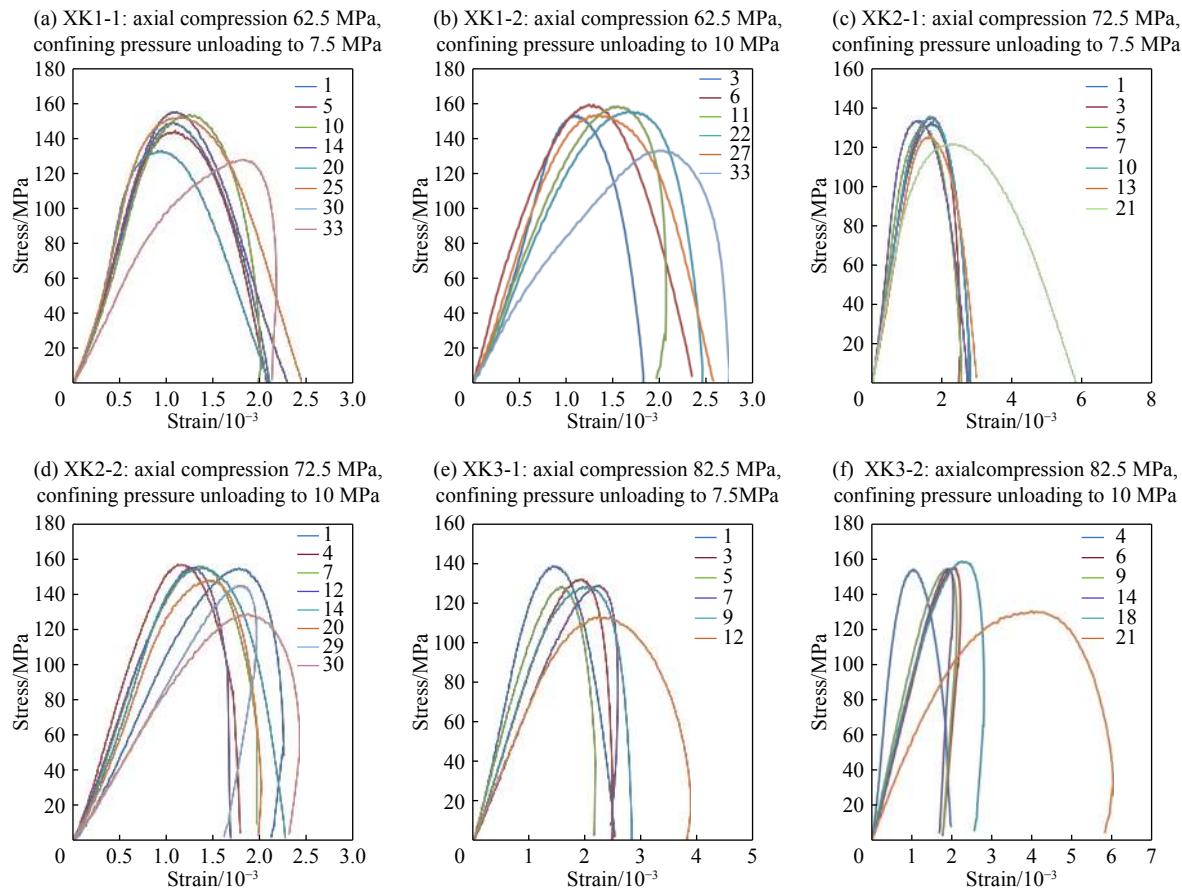


图 2 频繁扰动下矽卡岩动态应力应变曲线

Fig. 2 Dynamic stress-strain curves of skarn under frequent disturbances

表 3 冲击次数统计表

Table 3 Summary of impacts

岩样	预加轴压/ MPa	预加围压/ MPa	冲击时围压/ MPa	冲击次数
XK1-1	62.5	15	7.5	35
XK1-2		20	10	36
XK2-1	72.5	15	7.5	21
XK2-2		20	10	31
XK3-1	82.5	15	7.5	13
XK3-2		20	10	21

深部矽卡岩结构致密、内部裂隙较少。在动态峰值应力前区,各试样的实验结果大致相同,压应变随着压应力的增大而增大。在动态峰值应力后区,出现回弹和不回弹两种现象。当预加的轴压和围压较低时,岩样内储存的弹性势能较少,应力卸载后岩样内释放的弹性应力始终小于加载应力,因而没出现回弹现象。当预加的轴压和围压较大时,岩样内储存的弹性势能较多,应力卸载后岩样内释放的弹性应力大于加载应力,因而出现回弹现象。岩样在受到多次扰动后,内部损伤不断累积、裂隙不断发育、储存的弹性势能不断减小,因而最后的几次冲击不出现回弹现象。

在岩样能承受的扰动次数方面:轴压一定时,围压越大岩样能够承受的扰动次数越多;围压一定时,轴压越大岩样能够承受的扰动次数越少。实验应变片是贴在入射杆和透射杆上面的,弹头撞击入射杆产生的应力波经入射杆传递到岩样上后引发岩样的变形,入射杆和透射杆上的应变片记录下岩样的纵向变形。围压的存在束缚了岩样的横向变形,使岩样内部裂隙之间的挤压摩擦作用增强,轴压对岩样产生的纵向变形被围压削弱,导致岩样不容易发生变形,因而轴压一定的情况下,围压越大岩样能够承受的扰动次数越多。轴压的施加方向和应力波的传播方向一致,轴压越大,岩样内裂纹的扩展速度越快,动力扰动能加速裂纹的扩展,因而围压一定的情况下,轴压越大岩样能承受的扰动次数越少。

其实,由第2.2~2.3节通过数据拟合发现,动态峰值应力与冲击次数的关系和动态弹性模量与冲击次数的关系,均满足 $y=ax^4+bx^3+cx^2+dx+f$ 的形式。其中,a和b主要影响曲线后半段的变化情况,c和d主要影响曲线前半段的变化情况,f和岩样上施加的轴压、围压值有关。

## 2.2 动态峰值应力变化规律

图3为砂卡岩在不同轴压下受到围压卸载和频繁动力扰动情况下岩石的动态峰值应力变化情况。岩样上施加的轴压相同围压不同时,岩样受扰动后的动态峰值应力变化规律大致相同,但岩样上施加的围压越大岩样受扰动后其动态峰值应力一般越大。在轴压较低时围压的增大对动态峰值应力的影响较小,如轴压为62.5 MPa时,高围压下岩样的动态峰值应力普遍比低围压下岩样的动态峰值应力大6%。在轴压较大时,围压的增大对动态峰值应力的影响较大,如轴压为72.5 MPa时,高围压下岩样的动态峰值应力普遍比低围压下岩样的动态峰值应力大16%。岩样上施加相同轴压不同围压时,施加的围压越大岩样被压得越致密,应力波经过岩样时耗散越小,导致动态峰值应力越大。实验中围压只有轴压的1/10,相对于围压来说,轴压对岩样的压密作用更明显,岩样上施加的轴压较小时,岩样的压密效果不明显,围压对岩样的影响就更小,因而在较低轴压下围压的改变对岩样动态峰值应力的影响较小。

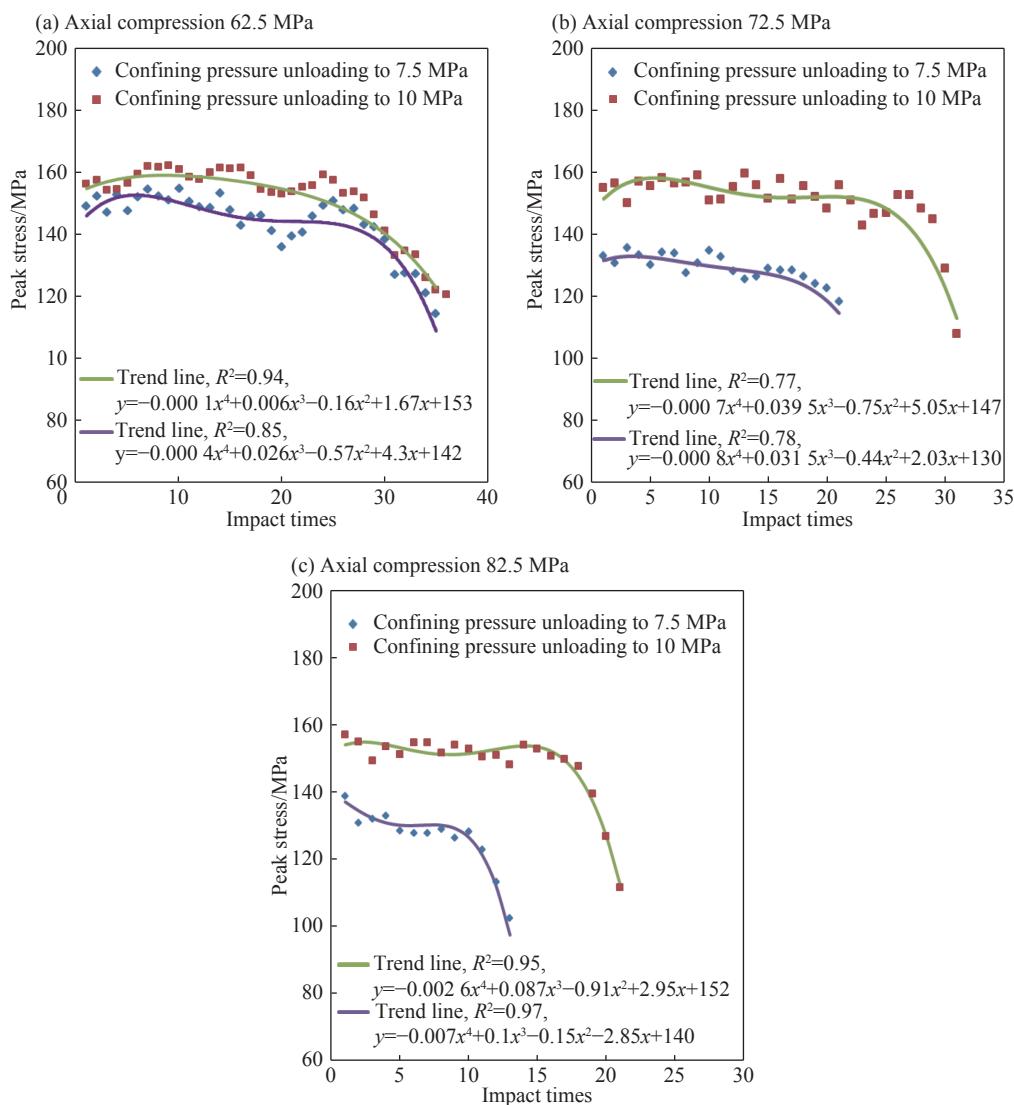


图3 动态峰值应力与冲击次数的关系

Fig. 3 Relationship between peak dynamic stress and impact times

图3(a)~(b)中,岩样的动态峰值应力随扰动次数的变化规律大致相同。在初始的几次动力扰动下,岩石的动态峰值应力随冲击次数的增多逐渐增大,增长幅度为3%。随着动力扰动次数的增多,岩石的动态峰值应力逐渐下降,下降幅度为7%。岩石完全失稳破坏前,动态峰值应力有小幅度的提高,增长幅度为4%。随着岩石失稳的加剧,岩石的动态峰值应力急剧下降,下降幅度达25%。可以看出,较低的轴压并未对岩样造成损伤,初始的几次动力扰动对岩样进行了压密,因此岩样的动态峰值应力逐渐增大。随着扰动次数的增多,岩样内部损伤逐渐累积,动态峰值应力逐渐下降。在岩样最终失稳破坏前岩样内部已有部分破坏,围压增大了岩样内部碎块的摩擦力,因而岩样完全失稳前动态峰值应力有小幅提高,但岩样的破坏程度则在不断增大,最终随着岩样内部损伤的加剧,岩样的动态峰值应力急剧下降。动态峰值应力急剧下降的起始点,为岩石在受到多次动力扰动时完全失稳破坏的临界点。

图3(c)中,岩样的动态峰值应力随冲击次数的变化规律与图3(a)~(b)中的不同。在初始的几次动力扰动下,岩样的动态峰值应力随着冲击扰动次数的增加下降较快,降幅为3%。随后动态峰值应力缓慢下降,降幅为1%。最后动态峰值应力急剧下降,降幅为23%。可以看出,较高的轴压对岩样产生了较大的损伤,因而初始的几次动力扰动下岩样的动态峰值应力下降较快。随着扰动次数的增多,扰动加剧了轴压对岩样产生的损伤,但由于扰动的能量较小,扰动带来的损伤没有轴压产生的损伤明显,因而岩样的动态峰值应力缓慢下降。在岩样的损伤达到完全失稳的临界点后,动力扰动会使岩样的动态峰值应力急剧下降。

### 2.3 弹性模量变化规律

图4为矽卡岩在不同轴压下受到围压卸载和频繁动力扰动情况下岩石的切线弹性模量变化规律。同岩样的动态峰值应力变化规律一样,岩样上施加的轴压相同、围压不同时,岩样受动力扰动后其弹性模量的变化规律大致相同,但岩样上施加的围压越大岩样受扰动后其弹性模量值一般稍大。在轴压较低时,围压的增大对弹性模量的影响较小,如轴压为62.5 MPa时,高围压下岩样的弹性模量普遍比低围压下岩样的弹性模量大4%。在轴压较高时围压的增大对弹性模量的影响较大,如轴压为72.5和82.5 MPa时,高围压下岩样的弹性模量普遍比低围压下岩样的弹性模量大6%和13%。弹性模量反映的是岩石抵抗外来变化的能力,越致密的岩石弹性模量越大。岩样上施加相同轴压不同围压时,施加的围压越大岩样被压的越致密,岩样的弹性模量就越大。岩样上施加的轴压较小时,岩样的压密效果不明显,围压对岩样的影响就更小,因而在较低轴压下围压的改变对岩样弹性模量的影响较小。

图4(a)~(b)中,岩样的弹性模量随冲击扰动次数的变化规律大致相同。在较低的轴压下,岩样未出现损伤,在初始的几次动力扰动下,岩样被逐渐压密,岩石的弹性模量随冲击次数的增多逐渐增大,增大幅度分别为11%和20%。随着动力扰动次数的增多,岩样内部开始出现损伤,岩石的弹性模量逐渐下降,下降幅度为15%和28%。在岩石完全失稳破坏前,弹性模量有小幅度的提高,随着岩石失稳的加剧,岩石的弹性模量急剧下降,下降幅度为30%。

图4(c)中,岩样的弹性模量随冲击扰动次数的增加整体上呈下降趋势。冲击扰动前期弹性模量下降较快,降幅为15%;中期弹性模量下降较慢,降幅为5%;后期弹性模量下降较快,降幅为32%。对岩样弹性模量变化规律的分析同对动态峰值应力变化规律的分析相同,这里不再赘述。弹性模量和动态峰值应力都能反映岩石的损伤状况,因而弹性模量和动态峰值应力受动力扰动影响的变化规律大致相同。不过从图中可以看出,弹性模量的变化规律能更直观地反映岩石的损伤破坏情况,在数据处理上,动态峰值应力更容易得出,弹性模量的得出要稍加繁琐。

### 2.4 体积能耗变化规律

实验选用的岩石采自冬瓜山铜矿地下900 m,冬瓜山铜矿在开采时有岩爆现象产生,因而实验所选的岩样储有弹性势能,在对储有弹性势能的岩样进行冲击时岩样会释放能量。图5为矽卡岩在不同轴压下受到围压卸载和频繁动力扰动情况下岩石的单位体积能耗变化规律。岩样上施加的轴压相同、围

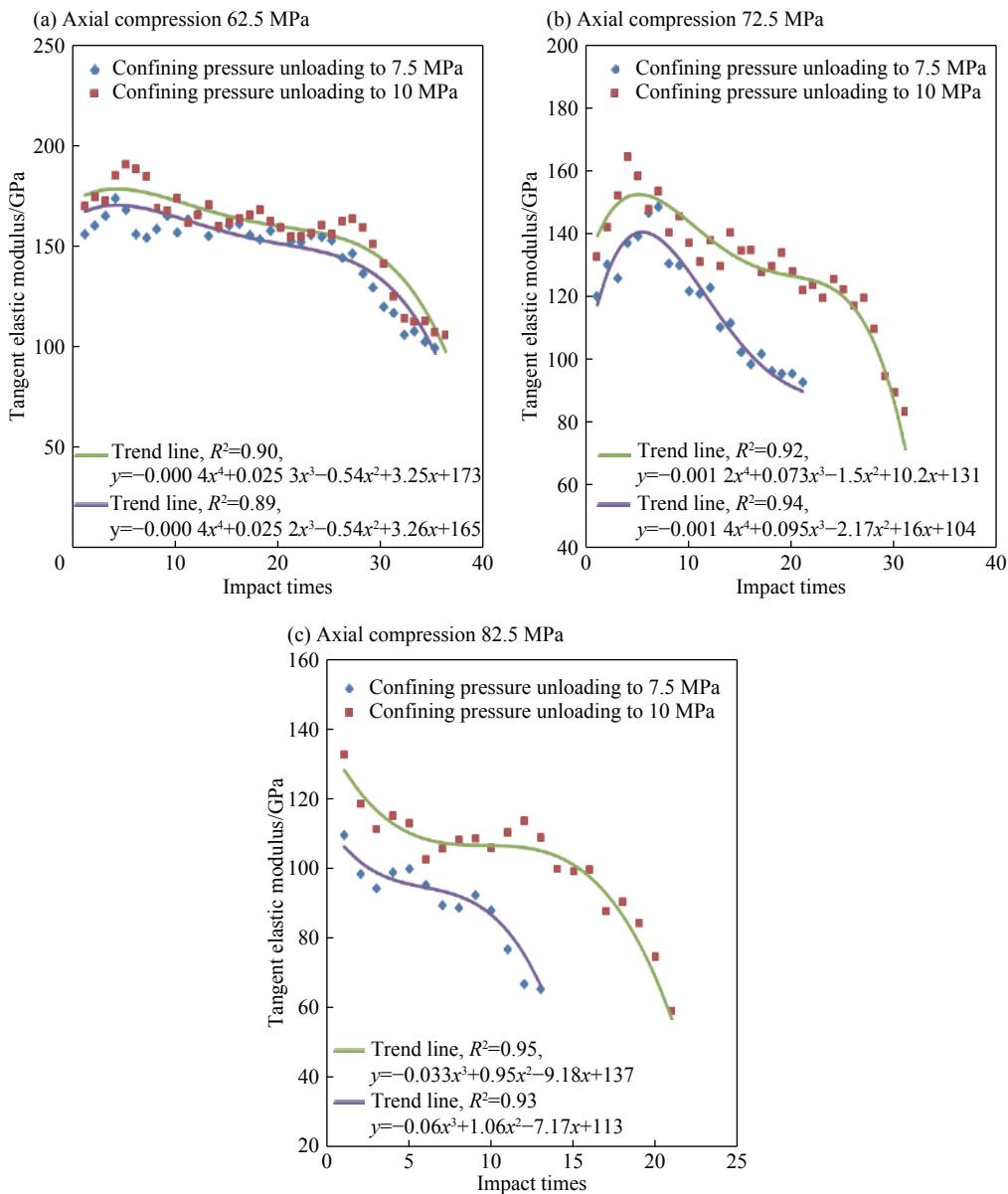


图4 切线弹性模量与冲击次数的关系

Fig. 4 Relationship between tangent elastic modulus and number of impacts

压不同时,岩样受冲击后的能耗规律大致相同。前几次冲击扰动下岩样内部损伤较少,损伤发展速度较慢,因而岩样受冲击后释放的能量大致相同。随着冲击扰动次数的增多,围压越大岩样内部损伤发展越快,岩样受冲击后释放的能量越多。所以从图中可以看出,前几次冲击扰动下相同轴压下的两条曲线接近重合,随着冲击扰动次数的增加,两条曲线渐渐分开。

从图5(a)可以看出,前几次冲击扰动下,岩样受冲击后释放的能量渐渐增加,随后降低在一定值附近,接着释放的能量先增多再急剧减少。对岩样施加的轴压较低时,岩样未被完全压密,初始的几次动力扰动下岩样释放的能量先增多、再减少到一个固定值附近。随着冲击次数的增加,岩样内部损伤发展速度加剧,裂纹的扩展伴随着弹性储能的释放,因而这个阶段内岩样受冲击后释放的能量逐渐增大。当岩样内部裂纹发展较多,岩样渐渐失稳时,岩样受冲击后其释放的能量急剧减少并向吸收能量方向转变。从后面岩样的破坏情况可以看到,较低轴压下受冲击的XK1-1和XK1-2岩样并未发生十分严重的破坏,因而他们在所有的冲击过程中均表现出能量的释放。

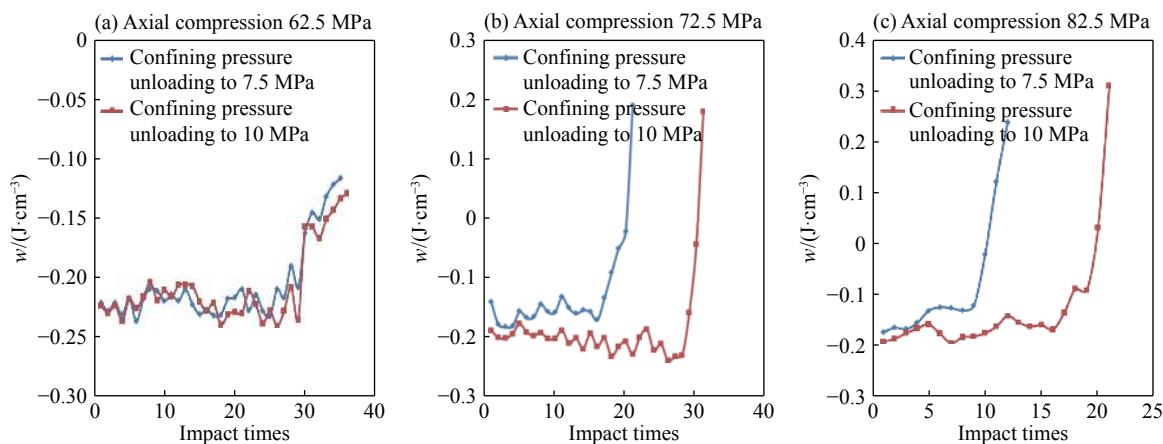


图 5 岩样体积能耗与冲击次数的关系

Fig. 5 Relationship between energy consumption per unit volume of rock and number of impacts

岩样受冲击后体积能耗的变化规律和弹性模量的变化规律具有密切联系,以图4(a)和图5(a)为例进行分析。岩样在受到初始的几次动力扰动后岩样的弹性模量逐渐增大,岩样释放的能量也逐渐增多。随着冲击次数的增多,岩样的弹性模量先稳定一段时间、再慢慢下降,岩样释放的能量先稳定一段时间、再慢慢增多,这段时间内岩样弹模的下降意味着岩样内部裂纹的扩展,因此岩样释放的能量逐渐增多。在岩样受冲击扰动的后半部分,岩样的弹性模量急剧下降,与此同时岩样受冲击释放的能量也急剧下降,岩样弹模的急剧下降意味着岩样破坏失稳加剧,因而岩样受冲击后释放的能量也急剧下降。弹性模量和体积能耗都与岩样的均质性、内部完整性具有密切联系,他们随冲击扰动的变化规律也大致相同,但体积能耗的计算较弹性模量的复杂。

## 2.5 破坏分析

图6为矽卡岩受扰动后的最终破坏情况。从图6可以看出,在轴压相同的条件下,围压越高,岩样受扰动完全失稳后的破碎程度越高。XK1-1和XK1-2岩样受到大致相同的扰动次数,在受到最后一次扰动后,两个岩样的动态峰值应力、弹性模量、体积能耗都大致相同。而XK1-2岩样的破坏程度更高,由此可知围压的增大有利于提高岩样的稳定性。

在较低围压下,轴压较低时,矽卡岩受扰动次数较多。由图6(a)可知,岩样并未发生完全失稳破坏,只发生端部的剥离破坏,随着轴压的增高,矽卡岩最终破坏时的块度逐渐增大。轴压较低时,岩样内部微裂隙发展速度较慢,微裂隙沿多方向发展,动力扰动促进了微裂隙的发展,岩样最终破坏时破碎块度较小。轴压较高时,岩样内部微裂隙发展速度较快,微裂隙主要沿轴向方向发展,动力扰动加快了裂隙的发展,岩样最终破坏时破碎块度较大。在较高围压下,轴压较低时,岩样最终破坏时的破坏块度较大,随着轴压的增大,岩样最终破坏时破碎块度较小。较大的围压对岩样有横向束缚作用,促使岩样内部微裂隙向多方向发展,动力扰动会使裂隙的发展速度加快,轴压越大裂纹的扩展速度越快,因而轴压越大岩样最终破坏时破碎块度越小。每次冲击扰动会加速岩样内部原有的裂纹扩展并产生新的裂纹。轴压和围压的作用导致岩样内部裂纹的断裂起始角不断变化,裂纹呈非线性变化。总体来说,冲击扰动次数越多,裂纹发展越丰富,岩样内总的裂纹扩展路径越长,岩样的破碎程度越高,岩样的破碎块度越小。

在较低围压下,岩样最终破坏模式主要呈拉伸破坏;在较高围压下,岩样最终破坏模式呈拉剪混合摩擦型破坏。岩样上施加的围压较低时,岩样最终的破坏形态呈片条状,是较典型的拉伸破坏。岩样上施加的围压较高时,岩样最终的破坏形态比较复杂,岩样破碎块度较小,岩石碎屑较多,说明岩石在发生拉剪破坏时伴随有岩块的挤压和滑移摩擦。因而,轴压促使岩样内微裂隙轴向发育,造成岩样抵抗动力扰动能力减弱;围压减缓岩样内微裂隙轴向发育,造成岩样抵抗动力扰动能力增强。

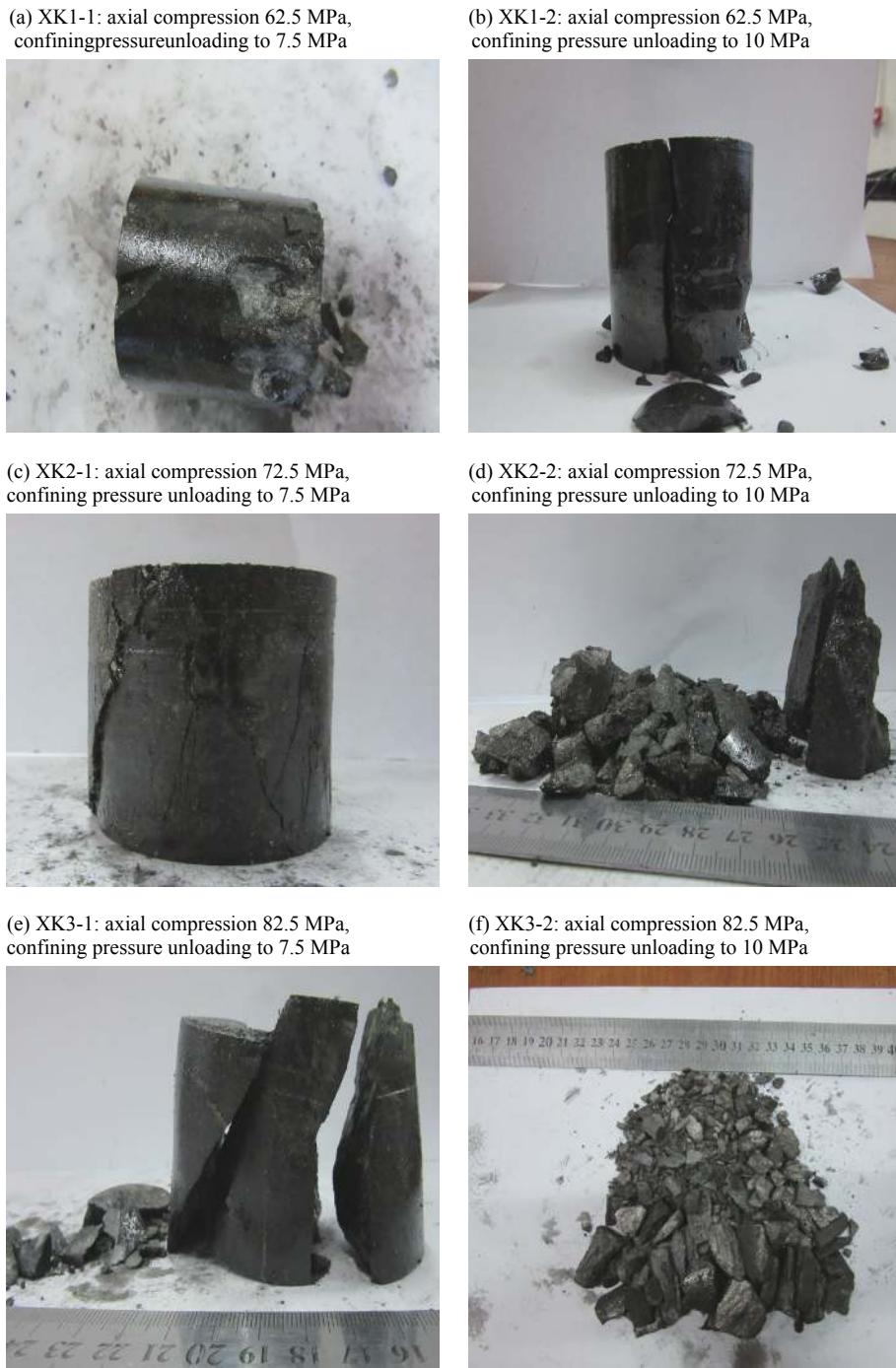


图6 矽卡岩最终破坏形态

Fig. 6 Final destruction modes of skarn

### 3 结 论

(1) 围压卸载中的矽卡岩受动力扰动时, 其动态峰值应力和弹性模量随动力扰动次数呈非线性变化, 且动态峰值应力和弹性模量随动力扰动次数的变化规律相似。在较低轴压下, 矽卡岩在受到初始的几次动力扰动时, 其动态峰值应力和弹性模量均表现出先升高再减小的趋势, 随着扰动次数的增多, 动态峰值应力和弹性模量均表现为下降, 且最后的几次扰动下下降速度较快。在较高轴压下, 矽卡岩受动力扰动后, 其动态峰值应力和弹性模量整体上表现为下降, 但前期下降较慢后期下降较快。

(2) 围压卸载中的砂卡岩受到动力扰动时会释放能量, 释放能量的多少和岩石的损伤发展速度有关。在较低轴压下, 砂卡岩在受到初始的几次动力扰动下, 其释放的能量先增多再减少, 随着岩石损伤的加剧, 单次扰动下岩石裂纹扩展速度增快, 岩样受扰动后释放的能量增多, 在最后的几次扰动下, 岩样的损伤已十分严重, 岩样逐渐从释放能量向吸收能量转变。

(3) 轴压和围压的增大均导致岩样损伤加剧, 轴压促使裂纹轴向发育, 围压促使裂纹横向发育。围压的施加促使裂纹扩展起始角不断变化, 减弱了主要轴向裂纹的扩展速度, 岩样的承载能力提高。

## 参考文献:

- [1] 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): 2803–2813.  
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mass mechanics in deep mining [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803–2813.
- [2] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展: 深部岩体力学的若干问题 [C] // 中国岩石力学与工程学会. 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.
- [3] 左宇军, 李夕兵, 张义平, 等. 动-静组合加载诱发岩爆时岩块弹射速度的计算 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(4): 815–819.  
ZUO Yujun, LI Xibing, ZHANG Yiping, et al. Calculation of ejection velocity of rock in rockburst caused by static-dynamic coupling loading [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2006, 37(4): 815–819.
- [4] ZUO Yujun, LI Xibing, ZHOU Zilong. Determination of ejection velocity of rock fragments during rock burst in consideration of damage [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2005, 12(5): 618–622.
- [5] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 785–812.
- [6] XIA K, NASSERI M H B, MOHANTY B, et al. Effects of microstructures on dynamic compression of Barre granite [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(6): 879–887.
- [7] 唐礼忠, 舒计步, 武建力, 等. 高静应力和频繁动力扰动共同作用下砂卡岩动力学特性 [J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(8): 993–999.  
TANG Lizhong, SHU Jibu, WU Jianli, et al. Dynamic characteristics of skarn under high static stress and frequent dynamic disturbances [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(8): 993–999.
- [8] 唐礼忠, 王春, 程露萍, 等. 一维静载及循环冲击共同作用下砂卡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 Lizhong, WANG Chun, CHENG Luping, et al. Experimental research on mechanical properties of skarn under one-dimensional static loading and cyclic impact [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(10): 3898–3906.
- [9] 王春, 唐礼忠, 程露萍, 等. 三维高静载频繁动态扰动时岩石损伤特性及本构模型 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(8): 2286–2296; 2305.  
WANG Chun, TANG Lizhong, CHENG Luping, et al. . Damage characteristics and constitutive model of rocks subjected to three-dimensional high dynamic static disturbance [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(8): 2286–2296; 2305.
- [10] ZHAO J, ZHAO X B, CAI J G. A further study of P-wave attenuation across parallel fractures with linear deformational behaviour [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(5): 776–788.
- [11] 殷志强, 李夕兵, 尹士兵, 等. 高应力岩石围压卸载后动力扰动的临界破坏特性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(7): 1355–1362.  
YIN Zhiqiang, LI Xibing, YIN Tubing, et al. Critical failure characteristics of dynamic disturbance after unloading of high stress rock confining pressure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(7): 1355–1362.
- [12] 殷志强, 李夕兵, 金解放, 等. 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 Zhiqiang, LI Xibing, JIN Jiefang, et al. Influence of confining pressure unloading speed on rock strength and fracture characteristics [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8): 1296–1301.

- [13] 金解放, 李夕兵, 殷志强, 等. 轴压和围压对循环冲击下砂岩能量耗散的影响 [J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3096–3102; 3109.  
JIN Jiefang, LI Xibing, YIN Zhiqiang, et al. Effect of axial compression and confining pressure on energy dissipation of sandstone under cyclical impact [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3096–3102; 3109.
- [14] 邱加冬, 李地元, 李夕兵, 等. 预制缺陷对花岗岩层裂破坏的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 665–670. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0310.  
QIU Jiadong, LI Diyuan, LI Xibing, et al. Effect of pre-existing flaws on spalling fracture of granite [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(3): 665–670. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0310.
- [15] 周磊, 朱哲明, 董玉清, 等. 冲击加载下巷道内裂纹的扩展特性及破坏行为 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(4): 785–794. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0383.  
ZHOU Lei, ZHU Zheming, DONG Yuqing, et al. Propagation characteristics and failure behaviors of crack in tunnel under impact loads [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(4): 785–794. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0383.
- [16] 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): 1387–1395.  
LI Xibing, ZHOU Zilong, YE Zhouyuan, et al. Study on mechanical properties of rock static and dynamic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1387–1395.
- [17] LI Xibing, ZHOU Zilong, LOK Tatseng, 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.
- [18] LI X B, LOK T S, ZHAO J, et al. 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.
- [19] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 20–21.

## Dynamic influence of frequent dynamic disturbance on high-energy rock mass during confining pressure unloading

TANG Lizhong<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, WANG Chun<sup>2</sup>, CHEN Yingyi<sup>1</sup>, SHEN Fan<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

**Abstract:** In this study, based on the high stress and frequent blast disturbance in the process of surrounding rock excavation in the deep roadway of Dongguashan Copper Mine, we investigated the dynamic properties of the high-energy rock mass disturbed by frequent dynamic loading during confining pressure unloading, using the modified SHPB coupled static-dynamic loading system. The results show that the peak dynamic stress and elastic modulus of the skarn subjected to confining pressure unloading varied nonlinearly with the number of dynamic disturbances, and the high energy skarn in confining pressure unloading released energy when subjected to dynamic disturbance. The axial pressure promoted the axial development of micro-fissures in the rock specimens, resulting in a lower capacity of rock samples. However, the confining pressure restrained the axial development of micro-fissures in the rock sample, resulting in a higher capacity of rock samples. The dynamic disturbance promoted the micro-fracture expansion, transforming the rock sample in confining pressure from tensile failure to shear failure.

**Keywords:** cyclic impact; confining pressure unloading; energy dissipation; deformation characteristics; failure mode

(责任编辑 丁峰)