DOI: 10.11883/bzycj-2017-0131
文章编号: 1001-1455(2018)06-1353-11

动力荷载对围压卸载下岩石动态变形模量的影响*

唐礼忠[1],刘 涛[1],王 春[2],陈 源[1],李地元[1],韦永恒[1]
(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 454150)

摘要:利用 SHPB 岩石动静组合加载实验系统,研究在不同轴压水平下围压以 1 MPa/s 速率卸载至预加值 50%时砂卡岩受频繁冲击作用的动态变形模量变化规律。实验结果表明:高轴压促使岩石内部微裂纹萌发与扩展,降低了岩石抵抗外部冲击的能力。围压的侧向约束阻碍岩石内部裂纹的横向扩展,但在围压卸载时会加剧岩石内部的损伤,这是由于高轴压下,围压卸载导致岩石内部应力重新分布。轴压与围压卸载共同影响着冲击作用下的岩石动态变形模量,通过岩样在冲击荷载下的能量耗散分析岩石动态变形模量的变化规律,有助于了解深部岩体开挖的破坏机制。

关键词:频繁冲击;动态变形模量;围压卸载;能量耗散
中图分类号:O389;TU45 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

随着矿山不断向深部开采,卸载与扰动对岩石变形破坏的影响日渐收到人们的关注。针对于地下空间岩土工程问题,通常利用加载实验的方法进行岩石力学特性研究。但是岩石卸载过程中的变形、破坏与加载过程是两种完全不同的应力路径,因此二者的破坏机制也有着本质的区别。在深部高地应力条件下脆性岩体表现为延性,但在开采时又会出现延脆性转化[1-2],即脆性岩体由于开采面的卸荷作用发生岩爆等地压活动。同时,地下深部岩体在承受高地应力条件下,大多数巷道要经受回采引起的强烈扰动作用,使受采动影响的巷道围岩压力数倍于原岩地应力,从而造成岩体表现出不同的力学特征。因此,关于卸载下岩石的动力学研究,无论是在实际工程应用还是在理论探索方面都有重要意义。

国外对卸载条件下岩石的变形和破坏特征研究较早。M. G. Abuov 等[3]通过爆破开挖卸载对岩体破坏的研究,发现在爆破形成自由面的过程中岩体内应力的快速释放会引起开挖面临近的围岩产生裂隙甚至破坏。M. S. Diederichs 等[4]在深部硬岩巷道开挖过程中针对于围岩由于卸载引起的裂纹发育和扩展开展了机理研究。我国的许多矿山相继进入深部资源开采状态,关于深部开采过程中的岩石力学问题也已成为研究的焦点。何满潮等[5]对三向不同高应力条件下的花岗岩进行快速卸载其中一个方向的水平应力,以获得花岗岩岩爆全过程应力曲线。代革联等[6]、任建喜等[7]利用 CT 实时技术研究岩石在围压卸载下的微观损伤破坏机制。殷志强等[8]对砂岩在不同围压卸载条件下的动态力学性能进行了实验研究,表明适当提高围压卸载速率有助于利用较小的外部动力扰动破碎岩石。此外还有许多学者研究岩石卸载下的损伤破坏或者利用卸载实验来预测岩爆发生的可能性[9-11]。以上研究均表明卸载、卸载速率等均是影响岩石强度的因素。实际上,深部岩体的破坏不仅受高应力和开挖卸载的影响,还是在爆破等[12]动力扰动的综合作用下逐步累积、发展形成的。随着开采深度的增加,或者在需要增加开挖面积时,静载、开挖卸载和动力冲击等都将导致岩石强度的改变,是引起矿山整体不稳定的潜在威胁。金解放等[13-14]利用动静组合加载实验装置,对具有不同轴压和围压的砂岩进行循环冲击实验,并重点讨论了轴压和围压对砂岩动态疲劳力学特性的影响。在轴压卸载对岩石动态强度影响方面,唐礼忠等[15]也进行过详细探讨,根据实验结果显示,不同的静力卸载速率对岩石的动态强度参数影响显著。

但现有的岩石卸载的研究局限于准静态情况,关于岩石卸载条件下动态实验也多限于单次冲击。

* **收稿日期**:2017-04-25;**修回日期**:2017-12-12
基金项目:国家自然科学基金项目(51474250)
第一作者:唐礼忠(1963—),男,博士,教授,lztang11@csu.edu.cn。

实际地下工程在开挖过程中,承受的冲击或爆破荷载是频繁多次的,岩石的破坏也是这些因素综合作用下逐渐形成的结果。因此研究岩石在卸载条件下的动态强度变化规律具有实际意义。动态变形模量是岩石在一定大小的冲击力和冲击时间作用下抵抗变形能力的参数,它直接影响岩体工程在爆破等冲击荷载下的变形量。故充分认识岩石动态变形模量随动态冲击的变化规律将有助于深入认识高应力下岩石受开挖卸载影响的动态疲劳力学特性,了解岩体在真实力学环境下的变形和位移,为岩体地下工程的开挖、稳定和维护提供理论依据。本文中将重点讨论不同轴压时在围压卸载状态下岩石受频繁冲击荷载的动态变形模量变化规律,为地下铜矿巷道开挖与支护等提供参考。

1 实验系统及方案

1.1 系统介绍

实验系统为由中南大学改进的基于 SHPB 装置的岩石动静组合加载系统[16-18],包括入射杆、透射杆、缓冲杆、冲头、数据采集仪和显示设备。入射杆、透射杆以及冲头均由高强度 40Cr 合金钢制成,其力学性能参数为:密度 7 784 kg/m^3,弹性极限 725 MPa,弹性模量 236 GN/m^2,泊松比 0.285,杆波速率 5 606 m/s,动弹性模量 250 GN/m^2。

利用该系统进行三维高静载频繁动态扰动实验,冲头产生的加载应力波为恒应变率半正弦波应力脉冲,利用 DL-750 示波器及 CS-1D 超动态应变仪采集实验数据。采用可拆卸的围压装置对岩石施加围压,实验时由手动加压方式对岩石加载设定的围压值。

实验系统可实现岩石轴向静压 0～200 MPa、围压 0～200 MPa、冲击荷载 0～500 MPa 的同时加载,示意图见图 1。在气体压力下,冲头以一定的速率与入射杆中心对撞并在输入杆中产生入射应力波。经过极短时间传至入射杆和岩样的界面,由于两者波阻抗不同,因而在界面处产生透射和反射,其中反射部分又在入射杆内产生反射波,而透射部分随即进入岩样并在岩样与透射杆界面处发生透反射,并在透射杆中产生透射波。入射波和反射波的应力应变信号可由粘贴在入射杆上的应变片测得,透射波的应力应变信号可由粘贴在透射杆上的应变片测得。根据一维应力波理论,可以求得岩样的平均应力、应变和应变率随时间的变化[19],即:

$$\sigma(t)=[\sigma_{\mathrm{i}}(t)-\sigma_{\mathrm{r}}(t)+\sigma_{\mathrm{t}}(t)]\frac{A_{\mathrm{e}}}{2A_{\mathrm{s}}} \tag{1}$$

$$\varepsilon(t)=\frac{c}{El}\int_0^t[\sigma_{\mathrm{i}}(t)+\sigma_{\mathrm{r}}(t)-\sigma_{\mathrm{t}}(t)]\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}(t)=\frac{c}{El}[\sigma_{\mathrm{i}}(t)+\sigma_{\mathrm{r}}(t)-\sigma_{\mathrm{t}}(t)] \tag{3}$$

式中:$\sigma(t)$、$\varepsilon(t)$、$\dot{\varepsilon}(t)$分别为岩样的平均应力、应变和应变率,$\sigma_{\mathrm{i}}(t)$、$\sigma_{\mathrm{r}}(t)$、$\sigma_{\mathrm{t}}(t)$分别为某一时刻 t 的入射应力、反射应力和透射应力,E、c 分别为弹性杆的弹性模量和纵波波速;A_{e}、A_{s}、l 分别为弹性杆截面积、岩样截面积和岩样长度。

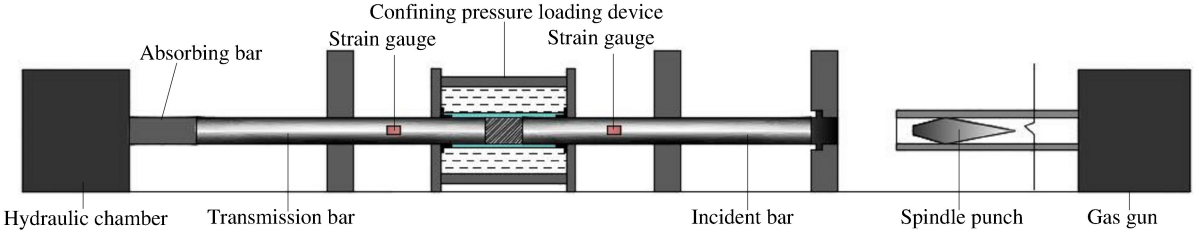


图 1 基于 SHPB 装置的动静组合加载系统

Fig. 1 Coupled static and dynamic loading system based on SHPB device

1.2 岩样制备

岩样取自冬瓜山铜矿井下 900 m 处的矽卡岩,为保证岩样在深部所处的力学环境相近,所有岩样

均在同一深度、同一区域范围并用相同的试件制备工序采集。选用结构致密、坚硬、表面无明显微裂纹的矽卡岩岩芯，加工成直径 50 mm、高 50 mm 的圆柱体。深部矽卡岩单轴压缩实验结果离散性较大，不同岩石试件的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比等参数有较大变化，这与矽卡岩试件内部结构和矿物成分及分布密切相关。单轴抗压强度高的试件，内部微裂纹少，铜含量高且分布均匀性好；单轴抗压强度低的岩石试件，内部缺陷较多，铜含量较低，且在岩石试件内部集中分布，导致整体强度降低。三轴压缩实验由于围压的约束作用，削弱了岩样内部结构差异的影响，因此实验结果离散性相对较小，分析总结深部矽卡岩的三轴压缩实验结果，其各个主要参数均值见表 1。

表 1 矽卡岩三轴压缩实验结果

Table 1 Results of three axial compression experiment of skarn

围压/MPa	弹性模量/GPa	三轴抗压强度/MPa	峰值应变/10^{-3}	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		
25	21.81	245.06	14.37		
30	22.03	284.34	15.38		

1.3　实验方案

岩石试样处于轴压、围压荷载之下，对围压以一定速率卸载至设定值的 50%时迅速施加冲击，循环进行直至试样破坏。在实验过程中设定了不同的预加载轴压值和围压值，以探讨轴压和围压在围压卸载环境下对岩石动态变形模量变化规律的影响。利用围压卸载下的冲击定性模拟实际过程中由于爆破开挖引起工作面卸荷下的岩石动力学环境。卸载速率同加载速率一样会影响岩石强度和变形模量的大小，设定为 1 MPa/s 定性反映岩体工程中开挖引起的卸载过程。

具体实验方案见表 2，在冬瓜山实测地应力的基础上，结合 SHBP 实验系统围压加载范围，确定 4 个系列围压值。根据矽卡岩的静载实验结果，以围压为 15 MPa 时的三轴抗压强度值为参考，设计预加载轴压值为 52.5、62.5、72.5、82.5 MPa，此时可确保预加围压、轴压时岩样不会发生宏观破坏，同时满足了高静载条件。整个加载过程利用手动油压泵缓慢进行，先加围压后加轴压，防止加载速率过快而导致岩样破碎，围压、轴压的加载速率保持为 0.5 MPa/s，后期加载速率调整为 0.1 MPa/s。围压、轴压加

表 2 实验方案

Table 2 Testing projects

岩样编号	预加轴压/MPa	预加围压/MPa	冲击时围压/MPa	围压卸载速率/(MPa·s^{-1})	冲击气压/MPa
XK1-1	52.5	15	7.5	1	0.6
XK1-2		20	10.0		
XK1-3		25	12.5		
XK1-4		30	15.0		
XK2-1	62.5	15	7.5	1	0.6
XK2-2		20	10.0		
XK2-3		25	12.5		
XK2-4		30	15.0		
XK3-1	72.5	15	7.5	1	0.6
XK3-2		20	10.0		
XK3-3		25	12.5		
XK3-4		30	15.0		
XK4-1	82.5	15	7.5	1	0.6
XK4-2		20	10.0		
XK4-3		25	12.5		
XK4-4		30	15.0		

载到设定值后维持压力不变,保持 5 min 稳定后再以 1 MPa/s 的卸载速率开始卸载围压。当围压卸载到设定值的 50%时,施加冲击荷载。每次冲击扰动后,如果岩样未完全破坏,调整围压至预加初始值,重新以 1 MPa/s 速率卸载至设定围压值后施加冲击,直至岩样完全破坏,实验结束。

2 实验结果

2.1 岩石动态应力应变曲线

对共 4 组岩样进行数据整理,记录各个岩石累计冲击次数,并绘制出对应的动态应力应变曲线。由于各岩石累计冲击次数较多,故在图 2 中绘出近似等间距的动态应力应变曲线,以便于清晰地观察与分析实验结果,图 2 中曲线上的数字表示第几次冲击。各个矽卡岩岩样受含铜量、内部结构分布的影响,其动态实验存在一定程度的离散性,个别曲线的应力峰值在实验过程中出现突变现象,这很大程度上是由于试件内部微裂纹扩展汇聚形成宏观大裂纹并产生应变突增的缘故,而该过程发展的快慢程度不仅与岩样承受的外部荷载相关,还受各个岩样矿物成分和内部微小裂纹分布的影响。同时,不同应力环境下的矽卡岩,在动力荷载逐次冲击作用下,其动态变形曲线的峰值应力变化幅度也是不同的,如图 2(c)中,在冲击破坏之前各条曲线的应力峰值变化相比其他岩样幅度较为平缓。这是由于在频繁冲击过程中,个别试件出现疲劳适应现象,岩石内微观损伤处于稳定低速发展阶段,宏观上表现为岩石短暂时间内抵抗外界冲击的能力未发生明显变化。纵观矽卡岩的动态变形曲线可以发现,相同应力条件下各个岩样的曲线峰值应力值在整体上存在离散性,甚至没有规律。同时岩样在受持续动力冲击下,其各相应曲线应力增长段的斜率整体上呈下降趋势,但下降幅度不一,个别曲线出现上升情况,排除实验系统误差,一个重要的原因是受岩样原有的结构以及裂纹在冲击动力作用下发展变化的制约。虽然岩样的差异性对其具体参数值有较大的影响,但动态变形模量在某一影响因素的变化下曲线形态总体变化规律却表现出明显的一致性,如轴压、动力冲击次数等对岩样的影响,而围压的影响规律相对较差。由于受篇幅限制,图 2 中仅给出部分典型的不同轴压与围压卸载组合下的动态应力应变曲线。

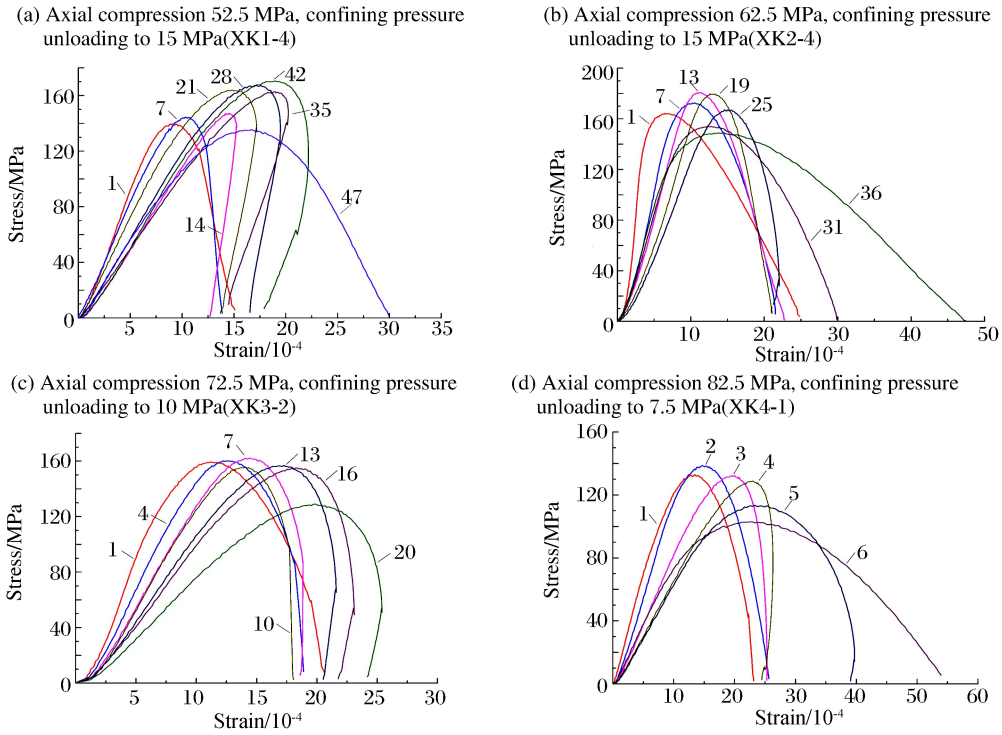


图 2 围压卸载过程中频繁冲击荷载下矽卡岩的动态应力应变曲线(图中数字表示冲击次序)

Fig. 2 Dynamic stress-strain curves of skarn with frequent impact and confining pressure unloading (numbers in figure denotes impact order)

2.2　动态变形模量计算

岩石动态变形模量是反应岩石抵抗动态载荷变形的一个重要参数，有些工程中着重考虑岩体的不均匀性和不连续性等影响因素，忽略加载速率对岩体变形模量的影响，其动态变形模量取静态值或其相应倍数。如美国联邦大坝安全导则[20]中岩体在不考虑加载速率对岩体变形模量影响下，其动态变形模量取静态值，我国拱坝抗震计算中基岩动态变形模量多取静态值的 1.3 倍。本文中对岩石动态变形模量的确定采用唐礼忠等[21]在文献中的计算方法。具体见图 3，计算公式如下：

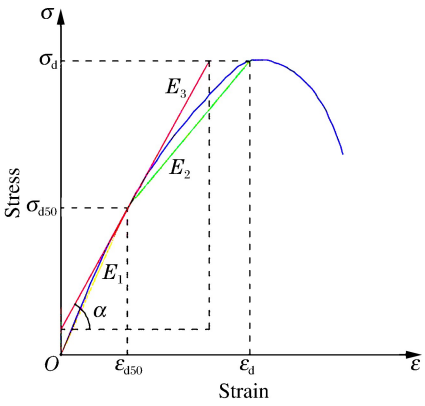


图 3　动态变形模量计算示意图

Fig. 3　Schematic diagram of dynamic deformation modulus calculation

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

$$E_2 = (\sigma_d - \sigma_{d50}) / (\varepsilon_d - \varepsilon_{d50}) \tag{5}$$

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

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

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 分别为峰值应力和其对应的应变；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%峰值应力处切线与轴的夹角。

3　动态变形模量特性分析

3.1　岩石冲击损伤的能量描述

从能量角度出发，岩石变形破坏过程实质上是能量吸收、转化和释放的过程，运用能量耗散的观点可以更好地反映外载荷作用下岩石强度的本质特征。

矽卡岩在动力冲击作用下，内部结构在不断发生变化，而岩石会吸收外界能量或释放内部存储的能量来完成内部结构的改变。基于能量守恒定律，认为岩石实验前总能量等于实验后总能量。实验前能量可分为岩石内部存储的弹性能及动力作用下的入射能两种，实验后的能量分为岩石内部存储的弹塑性能、反射能、透射能和其他复合能，其中如果岩石完全破坏，则内部便不再存储弹塑性能，复合能包括岩石试件破碎后碎片弹射出去的动能、产生碎片新表面及新裂纹的能量、热能、声能、振动能等。事实上，深部地下资源在开发过程中，矿岩在受到诸如爆破等动态荷载作用之前，就已经处于很高的静应力场中。因此，实验过程中在模拟静应力状态时，对岩石施加三轴压力也必然伴随能量的输入、存储等演化过程，但考虑到这些能量构成没有直接导致岩样的破坏以及分析的方便，在本文的分析中没有考虑这方面的能量演化行为。李夕兵等[22]研究认为动静组合加载时，岩石如果不耗能，则入射能等于反射能与透射能之和，且岩石吸收能量用正值表示，释放能量用负值表示。为研究频繁冲击荷载下能量耗散和岩石动态变形模量之间的关系，引入以上观点，并对冲击过程进行能量分析。假设试件与输入杆、透射杆截面处的能量损耗忽略不计，则：

$$W_i = \frac{A_e}{\rho c}\int_0^t \sigma_i^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{8}$$

$$W_r = \frac{A_e}{\rho c}\int_0^t \sigma_r^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{9}$$

$$W_t = \frac{A_e}{\rho c}\int_0^t \sigma_t^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{10}$$

$$W_c = W_i - W_r - W_t \tag{11}$$

$$W = W_c / V \tag{12}$$

式中：W_i、W_r、W_t 分别为入射应力波、反射应力波和透射应力波能量，W_c 为单次动力作用下岩石总能耗，ρ 为弹性杆密度，V 为岩石试件体积。

3.2 轴压与岩石冲击荷载下动态模量的关系

由于每个岩石累计冲击次数不一样，尤其是围压卸载至 15.0 MPa 水平时，岩石承受的冲击次数较多，为了分析不同轴压大小对岩石动态变形模量的影响，分别选用在固定围压卸载条件下不同轴压水平的岩石首次冲击和冲击破坏时的动态变形模量进行比较，并用动态变形均值模量来衡量岩样的整体变形能力。

如图 4 所示，以 1 MPa/s 的速率卸载围压至一定值时，岩石承受的第 1 次冲击荷载，其变形模量随轴压的增大表现出先增大后减小的发展趋势。即如图 4 所示，轴压在 60～70 MPa 之间存在一个临界值，当轴压小于该临界值时，岩石承受初次动态冲击的变形模量随着轴压的增大而增大。当预先加载的轴压超过该临界值后，轴压的增大反而导致岩石的动态变形模量变小。在围压相同的情况下，岩石冲击破坏时的变形模量随轴压的增大呈现出先增后减的规律。

图 5 中给出了岩石受多次动态冲击后破坏时的动态变形模量随轴压的变化曲线，与首次冲击时的动态变形模量随轴压的变化趋势一致。结合图 6，在围压 7.5、15.0 MPa 两种水平下，可以看出在轴压 52.5 MPa时，岩石试件在动力作用下经历能量释放到能量吸收的转化过程，及岩石经过短暂的应力调整，内部的裂隙在动力作用下发生进一步的闭合，这有效提高了矽卡岩的整体强度性能。此后岩石进入相对较为稳定的应力状态，岩石吸收持续的冲击能量，内部新裂纹开始缓慢生成，故在低轴压下，可以承受较多次数的冲击作用才发生破坏。而轴压在 62.5、72.5、82.5 MPa 下均表现为释放本身所储存的能量，这是由于在施加冲击荷载之前矽卡岩处于三轴应力状态之下，本身内部已经存储了大量的弹塑性能并能暂且保持稳定，这部分能量远大于岩石内部微裂纹扩展所需的表面能，当冲击荷载扰动原有平衡时，岩石只要吸收少部分冲击能量就能促使内部新裂纹的快速产生与发展，同时对外释放岩石自身存储的部分弹性能。随着轴压的增大，该过程表现得越为快速和剧烈，如在轴压 82.5 MPa 时，矽卡岩经过数次动力作用下即发生破坏，说明内部裂纹的发展速度很快，而且其他新的细微裂纹尚未形成，主裂纹已经扩大形成宏观断裂面造成破坏，并对外释放更多的弹性能，此时岩石的破碎块度相对较大。

因此总体上，在轴压较小情况下，动力作用促使三轴应力状态下的岩石更为致密，轴压的增大有助于增强岩石的整体抵抗冲击能力，其动态变形模量相对提高。在持续的动力作用下岩石极少对外释放自身的弹性能，而内部新裂纹的产生需要吸收更多的冲击能量。当轴压增大到一定程度后，岩石内节理裂隙在本身所处的静载作用下已经完全闭合，动力作用下岩石只需要吸收少量能量后就能形成新的裂纹，而高轴压下裂纹的扩展会非常迅速，并开始转为对外释放弹性能，弹性能的释放量与矽卡岩的矿物成分以及试件的内部结构等因素相关，此时，矽卡岩的动态变形模量受其内部裂纹发育的快慢程度影响开始相应降低。

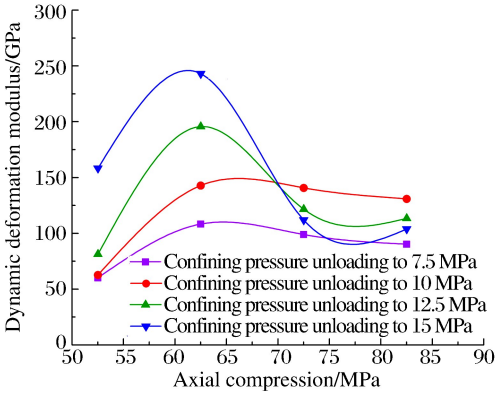


图 4 矽卡岩首次受冲击荷载的动态变形模量与轴压的关系

Fig. 4 Relationship between dynamic deformation modulus of skarn and axial compression for the first impact

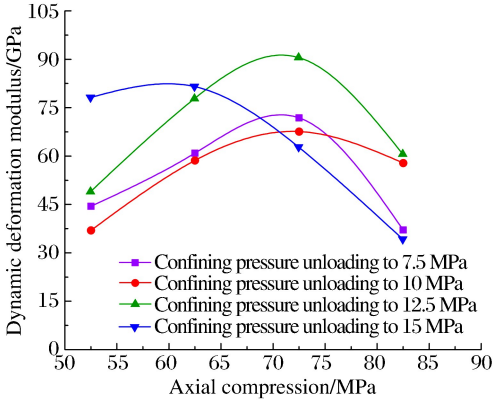


图 5 矽卡岩冲击破坏时的动态变形模量与轴压的关系

Fig. 5 Relationship between dynamic deformation modulus of skarn and axial compression in impact failure

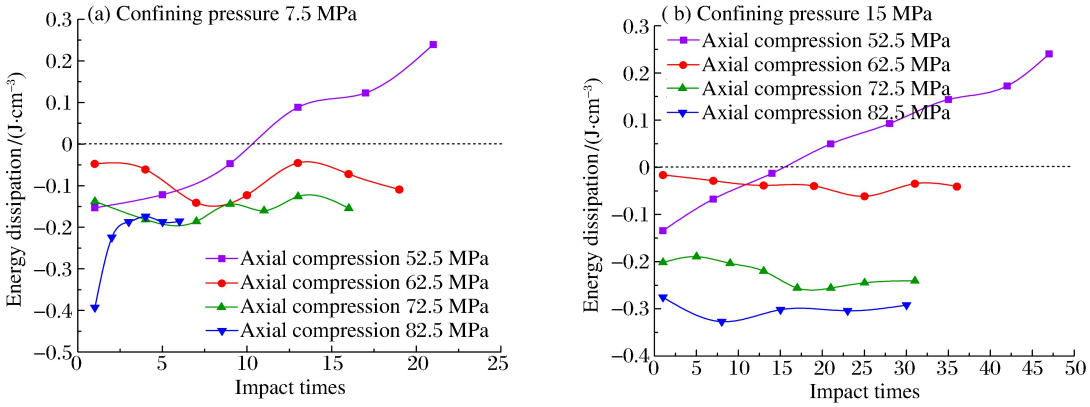


图 6　矽卡岩能耗与冲击次数的关系

Fig. 6　Relationship between energy dissipation of skarn and impact times

3.3　围压与岩石冲击荷载下动态模量的关系

围压对岩石试样的动态变形模量的影响受轴压大小的制约。图 7 给出了轴压一定时岩石首次冲击与冲击破坏时动态变形模量的变化规律。由图 7 可知，当轴压为 52.5、62.5 MPa 时，动态变形模量随围压的增大呈递增趋势；但是当轴压为 72.5、82.5 MPa 时，动态变形模量却随围压的增加又出现下降的趋势。

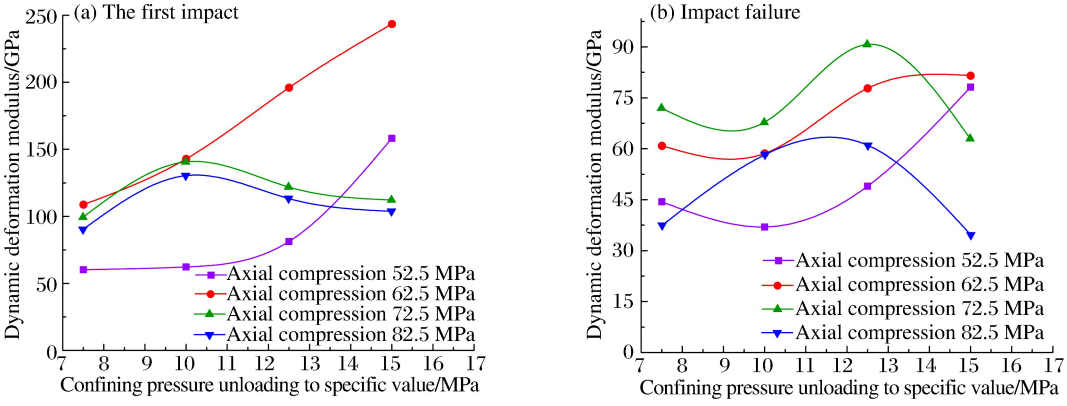


图 7　矽卡岩动态变形模量与围压的关系

Fig. 7　Relationship between dynamic deformation modulus of skarn and confining compression

岩石试件在受动力冲击前施加轴压，首先会引起岩石内部纵向微裂隙的闭合，尤其是在轴压较小的情况下随轴压的增大效果愈加明显。同时岩石受围压的侧向约束，当对围压进行一定速率卸载后，此时围压值越高岩石的横向微裂隙的重新张开程度越小，对其施加轴向冲击荷载时，由于岩石致密性较高使其动态变形模量有所增加。从图 8 中可以看出，矽卡岩处于不同围压的约束条件下，但在轴压为 52.5 MPa时，其内部的损伤程度相对较低，而且本身储备的能量不够造成破坏，试件需要在逐次的动力作用下不断吸收能量来促成裂纹的发育。在围压较低的情况下，矽卡岩内部的横向微裂纹的重新张开程度大，动力作用可以加速该种裂纹的尖端继续发展，岩石在数次动力作用下能量就会产生较大的变化幅度。因此，矽卡岩的动态变形模量与围压呈正相关，很大程度上与围压对岩石内部原有裂纹的约束有关。随着轴压的增大，尤其是轴压与围压的比值达到一定程度，矽卡岩强度将得到加强，部分试件表现出吸能现象，此时岩石是在持续的动力冲击下逐渐损伤直到破坏，其动态变形能力得到一定提升。但是在围压增大到 15 MPa 时，如图 8(b)，岩石又开始对外释放能量，其能量的释放在动力的冲击作用下相对比较平稳，可能是围压的侧向约束限制了试件的横向变形，特别是在对围压进行一定速率卸载之后，使得高轴压下的岩石内部存储的弹性势能得不到充分释放，此时矽卡岩试件内的高应力成为动力作用下岩石形变的不利因素，在某种程度上又弱化了岩石的抗冲击能力，导致其动态变形模量开始下降。

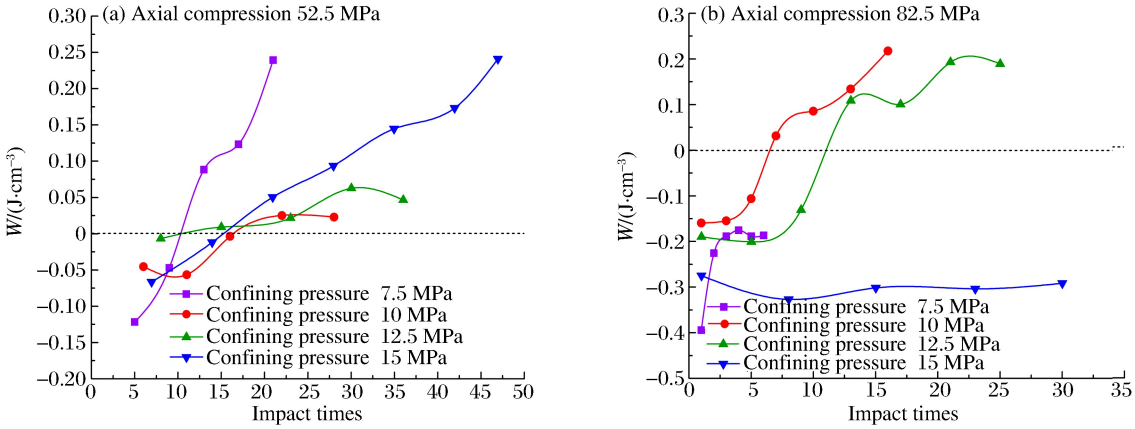


图 8 矽卡岩能耗与冲击次数的关系

Fig. 8 Relationship between energy dissipation of skarn and impact times

3.4 动态变形模量与冲击次数的关系

在地下岩土工程中，频繁的冲击荷载会逐渐降低岩石的力学性能，尤其是在较大的冲击能量下最终会导致岩石的破坏。本实验是在岩石受三轴静载荷与围压卸载的条件下对其施加轴向冲击荷载，研究岩石动态变形模量的变化趋势。

图 9 所示为岩石在 4 种不同轴压下动态模量受冲击荷载的变化规律。岩石的动态变形模量在冲击荷载作用下逐渐减小，显然频繁等能量的冲击在岩石内部引起了各个微粒的相对移动，导致原有的裂纹

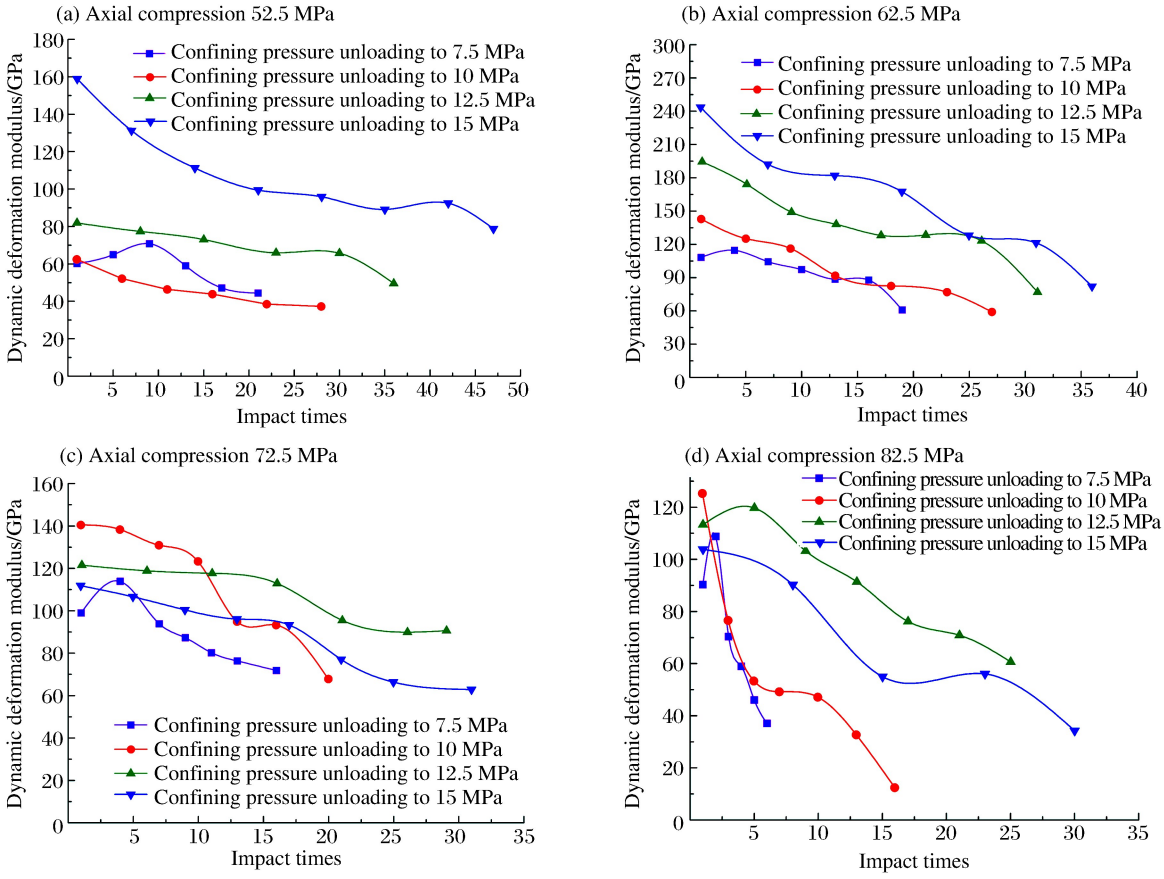


图 9 不同轴压下动态变形模量与冲击次数的关系

Fig. 9 Relationship between dynamic deformation modulus and impact number under different axial compression

延伸扩展甚至产生新的裂纹。这些岩石内部微弱的变化逐步削弱了岩石抵抗外部冲击变形的能力。从能量的角度分析，结合图 6、8，岩石存储的能量或者吸收冲击荷载的能量主要耗散于内部晶体颗粒摩擦、裂纹扩展以及裂隙面的相对错动等，并对外释放多余弹性变形能，导致岩石的内聚力等力学参数不断降低，最终岩石破坏。同时，从围压分别为 10.0、12.5、15.0 MPa 时的三条曲线后半段明显可以看出，在围压较高的情况下变形模量的线性变化规律越来越差。这表明岩石在承受动力冲击过程中其强度在不断下降，而且下降趋势越来越不稳定。M. A. Cook 等[23]曾指出，急剧释放作用荷载可能导致位移岩石的超松弛，在介质中产生拉应力。实验过程中，对围压以 1 MPa/s 的速率卸载至固定值时再施加轴向冲击荷载，如此循环往复，拉应力可能加剧岩石内部裂纹尖端的延展，这是岩石中各微粒受动力作用引起相对位移的不确定性因数。故在岩石即将破坏的后期，其变形模量的线性变化规律变差。

4　结　论

(1)矽卡岩在高应力与围压卸载作用下，频繁的冲击荷载会不断降低岩石的动态变形模量，即岩石在三轴应力卸载和频繁冲击荷载共同作用下损伤不断累积、抵抗变形能力逐渐下降，最终可能引发深部岩体动力灾害。

(2)利用动静组合加载实验系统，初步探讨了围压卸载和频繁冲击作用对矽卡岩破坏的影响。根据矽卡岩动态变形模量的变化规律可知：围压卸载条件下，轴压增大，矽卡岩变形模量相应增加，但轴压增大一定程度后动态变形模量开始下降。而围压值的变化对动态变形模量的影响受轴压值大小的影响。

(3)轴压较低时，矽卡岩在冲击作用下先对外释放能量，在持续的动力作用下最后转为吸收冲击动能导致岩石破坏；而在轴压较大情况下，矽卡岩在动力作用下逐渐对外释放内部存储的多余弹性能直到破坏。围压的变化对矽卡岩能量的吸收与释放变化规律相对较差，二者具体的关系尚需进一步的研究。

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，2006：454-455.

[2] HE M C. Rock mechanics and hazard control in deep mining engineering in China[C]// Proceedings of the 4th Asian Rock Mechanics Symposium. Singapore: World Scientific Publishing Co. Ltd, 2006:29-46.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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 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.

[6] 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 Gelian, LI Xinhu. 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.

[7] 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 Jianxi, GE Xiurun, PU Yibin, 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.

[8] 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. The confining pressure unloading speed effect on rock dynamic strength and fragmentation characteristics of rock and soil engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011,33(8):1296-1301.

[9] 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 Weizhong, LYU Senpeng, GUO Xiaohong, 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.

[10] 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 rock burst[J]. Journal of Xi'an University of Architecture, 2007,39(1):110-114.

[11] 陈景涛,冯夏庭. 高地应力条件下岩石的真三轴实验研[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(8):1537-1543.
CHEN Jingtao, FENG Xiating. True triaxial experimental study on rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(8):1537-1543.

[12] 王智德,夏元友,周雄,等. 顺层岩质边坡爆破的振动控制及损伤特性[J]. 爆炸与冲击,2017,37(1):27-36.
WANG Zhide, XIA Yuanyou, ZHOU Xiong, et al. Blasting vibration control and damage characteristics of bedding rock slopes[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(1):27-36.

[13] 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 Jiefang, LI Xibing, ZHONG Haibing. Study on dynamic mechanical properties of sandstone under 3D static load and cyclic impact[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(7):1358-1372.

[14] 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.
JIN Jiefang, LI Xibing, YIN Zhiqiang, et al. Effect of axial compression and confining pressure on energy dissipation of sandstone under cyclic impact[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(11):3096-3102.

[15] 唐礼忠,陈源,王春,等. 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[J]. 中国有色金属学报,2016,26(8):1728-1736.
TANG Lizhong, CHEN Yuan, WANG Chun, et al. The dynamic characteristics of the rock under frequent impact in the high static press unloading[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016,26(8):1728-1736.

[16] 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.

[17] 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.

[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,2014:19-20.

[20] FEMA. Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams[S]. 2005.

[21] 唐礼忠,王春,程露萍,等. 一维静载及循环冲击共同作用下矽卡岩力学特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,10:3898-3906.
TANG Lizhong, WANG Chun, CHENG Luping, et al. Experimental study on mechanical properties of skarn under one-dimensional static load and cyclic impact[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015,10:3898-3906.

[22] 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,1994:269-275.

[23] COOK M A, COOK V D, CLAY R B, et al. Behavior of rock during blasting[J]. Transactions of Society of Mining Engineers, 1966,23(5):383-392.

Study on dynamic deformation modulus of rock under confining pressure unloading and dynamic loading

TANG Lizhong[1], LIU Tao[1], WANG Chun[2],
CHEN Yuan[1], LI Diyuan[1], WEI Yongheng[1]
(1. *School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*;
2. *School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo* 454150, *Henan, China*)

Abstract: Dynamic experiments on skarn were conducted with a modified one-dimensional coupled static and dynamic loads based on SHPB device. The variations of dynamic deformation modulus of skarn under different axial pressures and frequent dynamic disturbance are studied when confining pressure was unloaded at the 1 MPa/s rate to 50% of initial value. The results show that high axial pressure promotes the formation and propagation of microcracks in rocks and reduces the resisting ability under external shocks. The lateral restraint of confining pressure hinders the transverse propagation of cracks inside the rock, but it will aggravate the damage when confining pressure is unloaded. This is because, under high axial pressure, unloading of confining pressure results in redistribution of stress inside rock. The axial pressure and confining unloading pressure affect the dynamic deformation modulus of rock under impact. Base on the variation analysis of dynamic deformation modulus by the energy dissipation of rock under impact, some significant understanding of deep rock excavation failure mechanism are drawn.

Keywords: frequent impact; dynamic deformation modulus; confining pressure unloading; energy dissipation

（责任编辑　曾月蓉）