

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0003

弱动力扰动对花岗岩圆形隧洞岩爆影响的试验研究*

刘岩鑫, 蒋剑青, 苏国韶, 赵国富, 燕柳斌

(广西大学土木建筑工程学院工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 为探究弱动力扰动对岩爆的影响, 利用高压伺服动真三轴试验机, 对含预制圆形贯穿孔洞的红色中粗晶粒立方体花岗岩试样进行弱动力扰动荷载条件下的岩爆模型试验, 模拟隧洞洞壁围岩的岩爆弹射破坏过程, 并采用声发射系统和视频观测系统对其进行监测、记录。基于无扰动、高应力下开始施加扰动和低应力下开始施加扰动3种加载路径的试验数据, 从岩爆弹射破坏、岩爆坑破坏形态、声发射信号特征及岩爆烈度4个方面, 详细分析弱动力扰动条件下的岩爆特征。研究表明: 弱动力扰动会降低洞壁围岩发生岩爆时所需要的应力水平, 增大岩爆破坏发生的范围。高应力下开始施加的扰动荷载会促进最终岩爆快速发生; 而在低应力下开始施加的扰动荷载, 岩爆的发生过程较为缓慢。相比与静应力条件下的岩爆, 高应力下开始施加扰动触发的岩爆更剧烈, 低应力下开始施加扰动触发的岩爆剧烈程度较弱。这主要是因为高应力下开始施加的扰动对能量释放起到了激发和放大的作用, 低应力下开始施加的扰动对能量释放仅起到激发的作用。

关键词: 岩爆; 动力扰动; 真三轴; 隧洞模型

中图分类号: O383; TV672; TU458 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Experimental study on influence of weak dynamic disturbance on rockburst of granite in a circular tunnel

LIU Yanxin, JIANG Jianqing, SU Guoshao, ZHAO Guofu, YAN Liubin

(Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: In order to study the influence of weak dynamic disturbance on rockburst, test on cubic medium-coarse grained granite specimen with a circle hole was conducted to simulate the rockburst ejection process in circle tunnel subjected to weak dynamic disturbance. Three loading paths, namely, no disturbance, weak dynamic disturbance starting at high-stress level, and weak dynamic disturbance beginning at a low-stress level were considered. The testing process was recorded using AE and video monitoring system. The ejection failure process, characteristics of rockburst pit, acoustic emission signal characteristics and rockburst intensity were investigated. The testing results show that the weak dynamic disturbance can reduce the stress level at the occurrence of rockburst and increase the range of rockburst. The applied dynamic disturbance at a high-stress level leads to a rapid occurrence of rockburst. In contrast, when the weak dynamic disturbance is applied at a low-stress level, rockburst will occur in a gradual manner. In addition, compared with that without dynamic disturbance, rockburst with the weak dynamic disturbance starting at high-stress level has a higher intensity, while that with weak dynamic disturbance starting at low high-stress level has a lower intensity. This is because that weak dynamic disturbance starting at high-stress level is capable of stimulating and amplifying the energy release process, while weak dynamic disturbance starting at a low-stress level is only capable of stimulating the energy release process.

Keywords: rockburst; dynamic disturbance; true triaxial; tunnel model

* 收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(51869003, 51809051); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划

第一作者: 刘岩鑫(1995—), 男, 硕士研究生, 1710309003@st.gxu.edu.cn

通信作者: 苏国韶(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, guoshaosu@gxu.edu.cn

岩爆是深部岩体开挖中常见的工程地质灾害现象,通常伴随着猛烈岩块弹射,对现场施工人员和仪器设备具有极强危害性。近年来,随着水利、交通和采矿等重大工程项目向深部转移且深度不断增加,岩爆问题日益凸显^[1-5]。从岩爆的触发机制出发,岩爆可分为自发型和触发型两大类。与静应力集中导致的自发型岩爆不同,触发型岩爆是指开挖应力重分布后,深部工程围岩在高应力状态下,由于受到工程爆破、机械钻凿、地震及相邻隧道围岩岩爆等引起的动力扰动作用而发生的岩爆^[5-7]。与钻爆法开挖隧道时掌子面爆破时产生的强动力扰动不同(图1),在距离爆源一定距离处,呈指数型衰减传播的强动力扰动将变成幅值相对较低的弱动力扰动,而弱动力扰动触发的岩爆,其发生位置和烈度具有很强的随机性和时空滞后性,例如,锦屏二级水电站四条引水隧洞施工时,开挖后围岩发生岩爆最长的滞后时间约为163 d,距离掌子面最远处约有384 m^[8]。目前,此类岩爆发生的机理尚不清楚,难以预测,控制方法无规范可循。

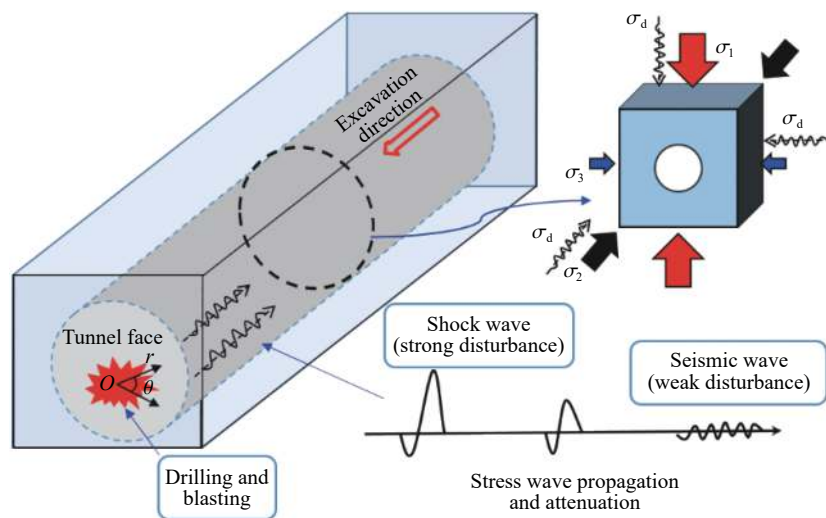


图1 钻爆开挖隧道围岩的受力状态

Fig. 1 Stress state of surrounding rock under tunnel work with borehole-blasting method

试验研究是揭示岩爆机理的重要手段。目前,已有的岩爆试验研究多侧重于探讨静力条件下的岩爆发生^[9-15]。而已有的动力岩石力学试验主要侧重于强动力扰动下的岩石变形破坏^[16-17]。但是,静力与强动力扰动条件下的研究成果均无法用来解析弱动力扰动触发型岩爆机理。针对此,何满朝等^[18]设计并研发冲击岩爆试验系统,进行了16种简谐波的冲击荷载模拟开挖爆破、顶板垮落、断层滑动等冲击扰动试验,模拟了触发型岩爆过程;苏国韶等^[19-20]开展了低频周期动力扰动(频率0.2~3.0Hz、振幅10~40 MPa)真三轴岩爆试验,探讨了触发型岩爆发生的能量机制;杜坤等^[21]利用真三轴试验系统研究了卸荷及局部动力扰动对岩石以及类岩石材料破坏的影响。但是,上述研究中采用长方体岩样,侧重于模拟局部岩体的岩爆过程,未能很好地模拟实际工程中岩爆沿洞室径向或轴向发育的整体空间特性,同时也未能模拟隧洞开挖断面曲率对围岩破坏的影响。因此,有必要开展结构模型层面的触发型岩爆试验研究。

本文中利用真三轴岩爆试验系统,采用预制贯穿圆形孔洞的花岗岩试样,开展弱动力扰动对岩爆影响的模型试验,再现深部地下洞室开挖中的岩爆现象,并利用微型摄像机及声发射系统实时监测隧洞岩爆的孕育与发生过程,分析岩爆弹射破坏过程、宏观破坏特征以及声发射信号等特征,探讨弱动力扰动岩爆的发生机制。

1 岩爆试验方案

1.1 试验设备

本试验采用广西大学自主研发的动真三轴岩爆系统(图 2)。其中, 高压伺服动真三轴试验机能在独立施加三向相互垂直静荷载的同时, 也能够施加水平 x 向及竖直 z 向的扰动荷载; 声发射监测系统能够自动记录每个通道内置的声发射信号参数, 并且可实现计算机显示屏对声发射信号的实时监测。试验加载装置及声发射探头布置如图 3 所示。试样的外包夹具相互之间镶嵌合且互不受力, 外部压力能完整地作用在岩样的 6 个表面。声发射探头布置在加载装置底座四周, 其采样阈值设置为 40 dB, 采样率为 1 MHz。孔洞视频监测系统可实时监测孔洞内围岩的宏观破坏过程, 该系统主要包括特制的 x 向夹具、微型摄像机以及实时监控器。

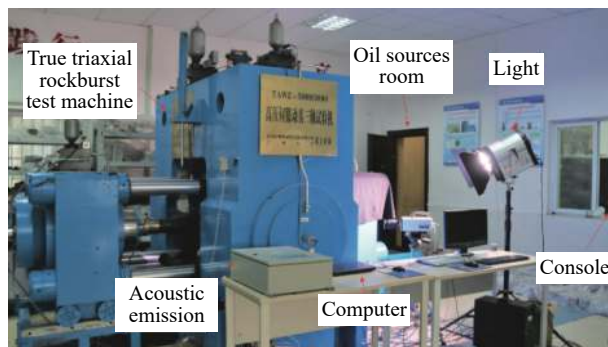


图 2 真三轴岩爆系统

Fig. 2 True triaxial rockburst test system

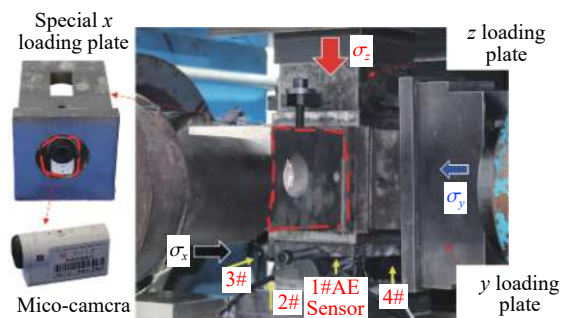


图 3 试验时夹具、声发射探头以及微型摄像机布置图

Fig. 3 Arrangements of the loading plate, acoustic emission sensors, and micro-camera in experiments

1.2 试样制备

岩样取自广西梧州市岑溪县红色中粗晶粒花岗岩, 主要由钾长石(54%)、石英(30%)、斜长石(10%)组成, 岩体内矿物分布较为均匀, 结构紧密, 未发现明显的裂纹和损伤; 经测得试样单轴抗压强度 σ_c 为 141.14 MPa, 弹性模量为 34 GPa, 泊松比为 0.23, 常温下纵波波速为 4812 m/s, 其完整性较好。为减少材料非均质性对试验结果的影响, 所有试样都取自一块完整的岩石。试样经过加工打磨后, 最终尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 含直径 50 mm 贯穿圆形隧洞的立方体试样(图 4); 保证岩样各方向受力均匀, 其两个相对的平行度以及两个相邻面的垂直度满足《水利水电工程岩石试验规程》(SL264-2001)的相关要求。

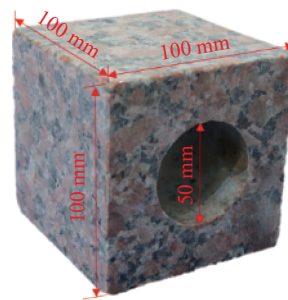


图 4 花岗岩试样

Fig. 4 Granite specimen

1.3 试验方案

分别开展了无弱动力扰动和有弱动力扰动的圆形隧洞真三轴岩爆试验, 通过对比两者试验结果, 分析弱动力扰动的影响研究, 试验加载路径见图 5 所示。对每种工况都做了 3 组以上的重复性试验, 且试验结果较为一致, 考虑到文章篇幅问题, 每种工况仅选取一组试验进行分析。

(1) 对于无扰动试验, 将其设置为对比试验(图 5(a)): 首先, 分别以 0.2、0.1 MPa/s 的加载速率同时加载 z 、 x 向应力, 在 x 向应力达到 10 MPa 后再以 0.1 MPa/s 的加载速率加载 y 向应力; 然后, 继续以 0.02 MPa/s 的速率增大 z 方向应力, 直至试样内洞壁两侧发生明显的岩爆弹射破坏现象。

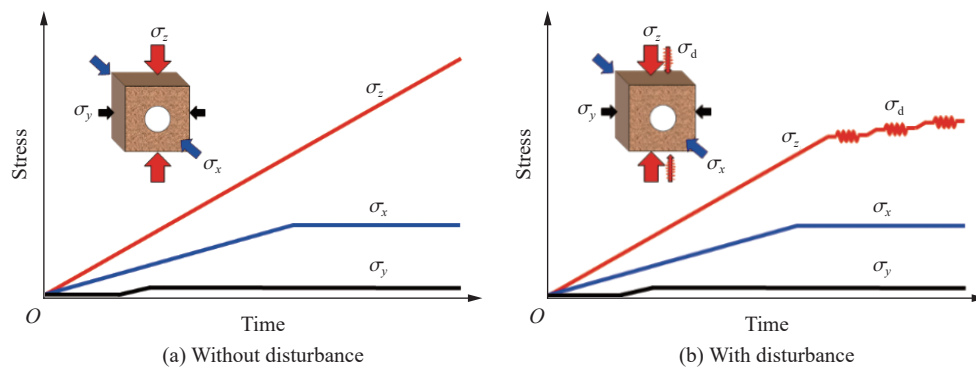


图5 加载路径

Fig. 5 Loading paths

(2)对于有扰动试验,以同样的加载顺序(先 z 、 x 方向再 y 方向)与加载速率(0.2、0.1、0.1 MPa/s)加载至预定值(洞壁已出现较大程度的岩爆),随后再施加 z 方向的扰动荷载(图5(b)),其中扰动荷载的幅值为1.5 MPa,频率为20 Hz,扰动时间为10 s。另外,为了探讨扰动时机对岩爆的影响,在岩样加载至较低的预定值后(洞壁开始出现局部岩爆破坏)开始施加间歇性扰动荷载,即在 z 向施加扰动荷载10 s后,继续以0.2 MPa/s的速率施加5 MPa静荷载,如此反复,直至试样内洞壁两侧发生明显的岩爆弹射破坏现象。

需要指出的是,本试验通过简化的竖向扰动模拟地下工程三维空间的三向扰动,且所有试样的初始围压及中间主应力、最小主应力均相同,主要研究弱动力扰动对隧洞岩爆的影响,对于试样的加载速率及围压都是固定值。其中,通过施加不断增大的竖向应力 σ_z ,模拟洞壁开挖边界附近不断增大的环向应力;通过施加固定不变的纵轴向应力 σ_x (35 MPa)模拟开挖后的纵轴向应力无明显变化情况;通过施加较低的水平应力 σ_y (5 MPa)模拟开挖边界附近岩体较低的径向应力。竖向 z 的加载速率为0.2 MPa/s,中间、最小主应力加载速率为0.1 MPa/s。另外,分别考虑在较高应力下和在较低应力下开始施加扰动两种加载路径,模拟现场隧洞围岩在切向应力不断增大过程中高应力下和低应力下开始遭遇弱动力扰动而发生的岩爆。

2 试验结果及讨论

2.1 弱动力扰动对岩爆弹射破坏的影响

由图6~8可知,在试验过程中,各岩样圆孔洞壁围岩都经历了相同的破坏过程,即低应力下的多次劈裂破坏和岩块剥落以及高应力下的多次岩爆弹射破坏,明显区别于以往长方体或立方体岩样试验中的一次性岩石破坏或岩爆现象。特别是在高应力下,随着应力升高,岩爆出现的时间间隔逐渐缩短,岩爆弹射破坏的剧烈程度不断增强,直至最终强烈岩爆的出现,并伴随明显的尘雾现象;与此同时,局部岩爆坑不断扩展并相互连接、汇聚,最终形成沿孔洞轴向发育的宏观条状破裂带。需要指出的是,本文研究的对象是隧洞围岩的岩爆弹射破坏,如果在尘雾现象出现后继续加载,岩样将出现整体性的垮塌破坏,这不利于后续岩爆坑或破裂带的特征分析,因此,将由剧烈岩爆弹射导致的尘雾现象作为试验结束的标志。

不同加载条件下,岩样孔洞的岩爆弹射破坏特征存在诸多区别。首先,不同加载条件下,岩样孔洞最终岩爆发生时(明显尘雾出现时)的竖向应力不同。相对于岩样D1(无扰动),岩样D2(在高应力下开始施加扰动荷载)和岩样D3(在低应力下开始施加扰动荷载)的竖向应力较低,说明动力扰动降低隧洞围岩发生最终岩爆所需的应力水平,促进岩爆的发生;岩样D3的应力水平要低于岩样D2,说明低应力下开始施加扰动荷载的作用相比于高应力下开始施加扰动荷载的作用更加明显。其次,不同加载条件下,孔洞最终岩爆发生的快慢程度不同。对于岩样D1和D2,尘雾现象突然形成,孔洞内能见度骤然降低(特别是岩样D2),整个过程分别在14和8 s内完成,说明最终岩爆的发生较为迅速;而对于岩样D3,尘

雾现象逐渐形成, 孔内可视度逐步降低, 整个过程约 24 s, 说明最终岩爆的发生较为缓慢。此外, 不同加载条件下, 最终岩爆时的尘雾不同。最终岩爆造成尘雾现象进而导致岩样孔洞内可视度降低。岩样 D2 可视度最低, 其次是岩样 D1, 岩样 D3 可视度最高。

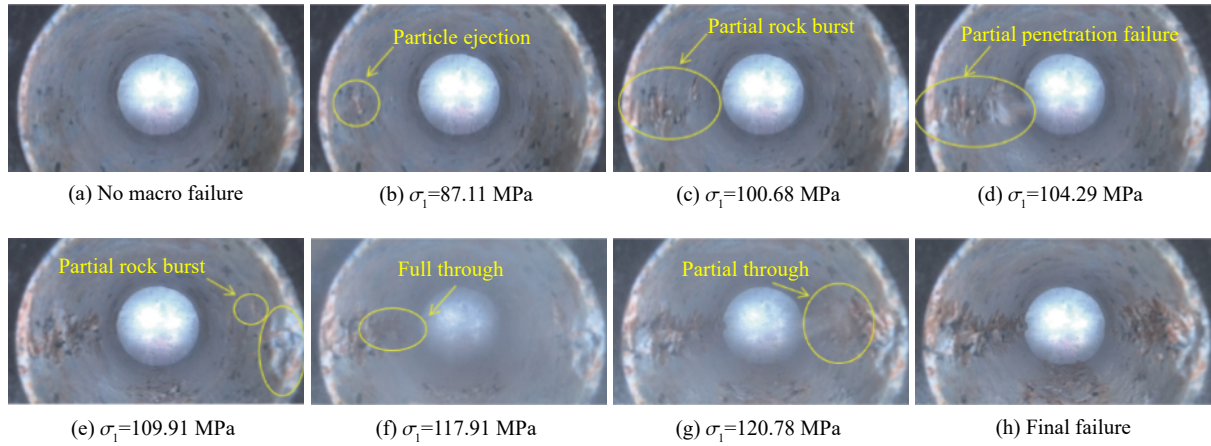


图 6 D1 试样破坏过程

Fig. 6 Failure process of tested specimen D1

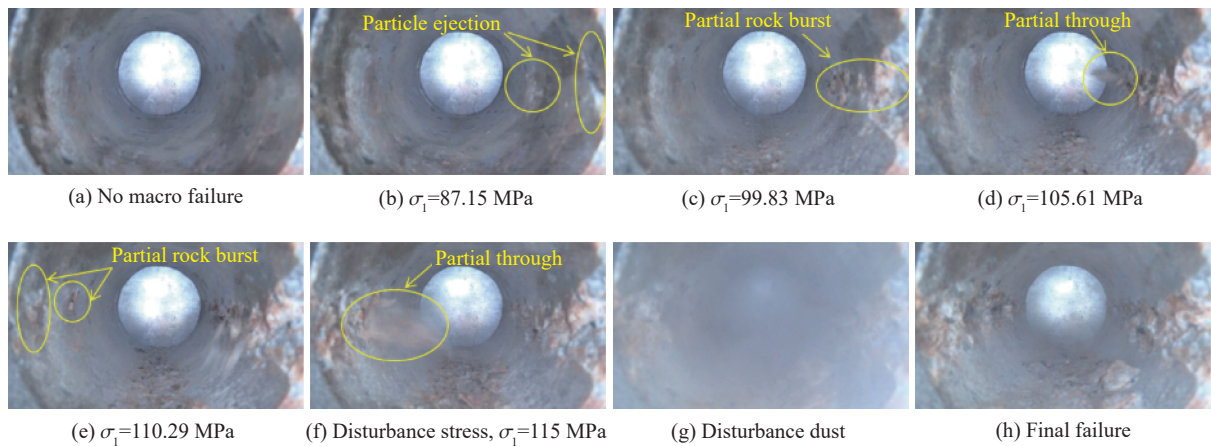


图 7 D2 试样破坏过程

Fig. 7 Failure process of tested specimen D2

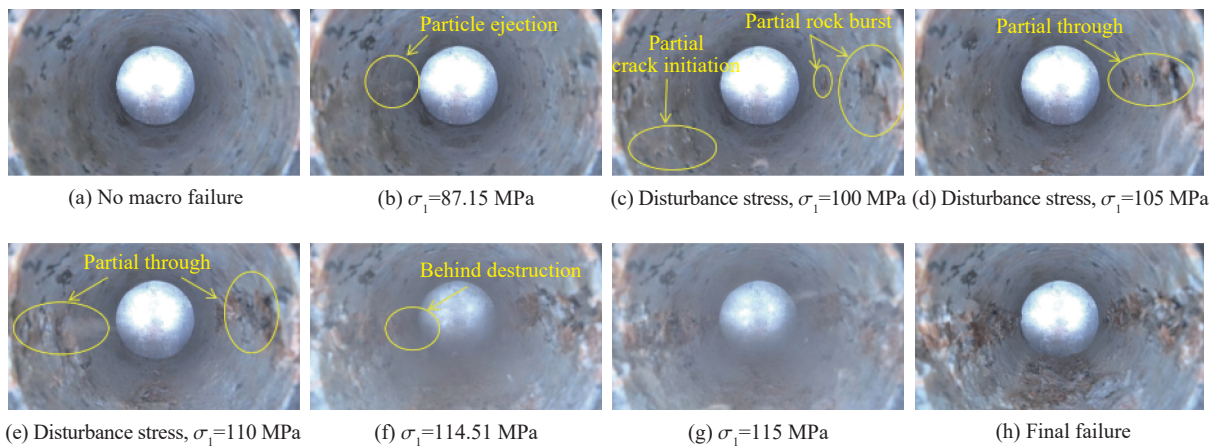


图 8 D3 试样破坏过程

Fig. 8 Failure process of tested specimen D3

2.2 弱动力扰动对岩爆坑破坏形态的影响

试验过程中各岩样圆孔内壁均出现岩爆弹射破坏现象,岩爆坑的形态和分布规律相近,如图 9 所示。岩爆破坏导致围岩在径向约 0° 和 180° 处形成两边浅、中间深的 V 形岩爆坑,岩爆坑表面呈不规则锯齿状且布满细小粉末;同时,岩爆坑沿轴向发育,形成左右两条近似平行的条状破裂带。这与加拿大 Mine-by 隧道现场围岩的破裂情况(图 10)一致,说明了本文中试验结果的合理性。另外,需要指出的是, Mine-by 隧道洞壁左右破裂带在横截面内的连线与水平方向存在一定夹角,而本文破裂带的连线与水平方向重合,这与主应力方向有关。 Mine-by 隧道的主应力与水平方向存在一角度,而在本文试验中主应力与水平方向垂直或者平行;同时,由弹性力学分析可知,圆形隧洞开挖卸荷后,应力集中导致的最大切向应力 σ_θ 分布在与最大主应力 σ_1 平行或与最小主应力 σ_3 垂直的隧洞边界处(见图 11),应力导致的岩石破坏通常发生在这些切向应力最大的区域。

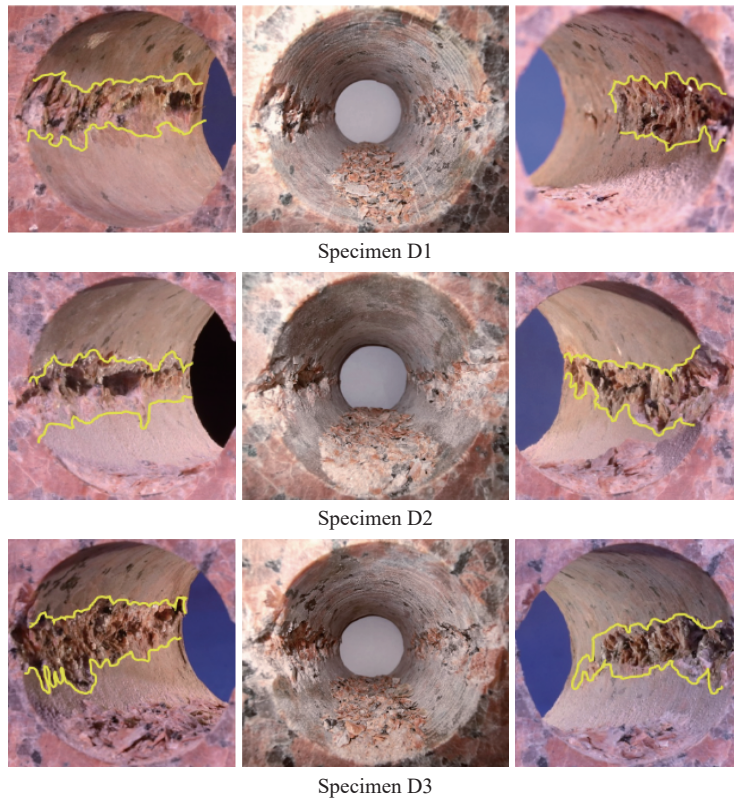


图 9 试样最终破坏形态

Fig. 9 Final failure patterns of the experimental specimens

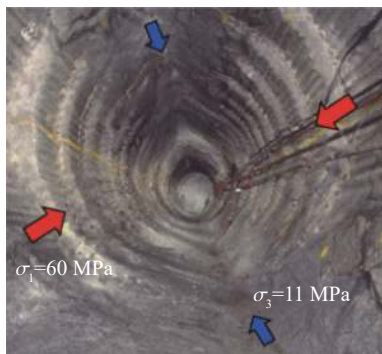


图 10 加拿大 Mine-by 隧道现场围岩破裂及应力分析图^[22]

Fig. 10 In-situ fracture of surrounding rock and stress analysis for mine by tunnel^[22]

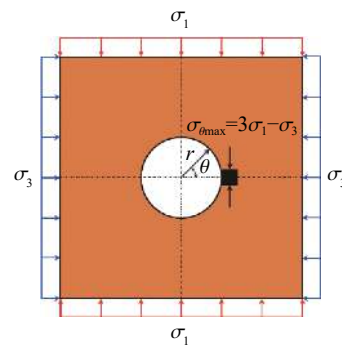


图 11 开挖卸荷后隧洞横截面受力示意图

Fig. 11 Stress state of the cross-section of the tunnel after excavation

为分析弱动力扰动对岩爆发生后隧洞破坏特征的影响, 分别测量了各岩样岩爆破裂带的长度、最大宽度和最大深度等尺寸, 测量结果见表 1。由表 1 可知, 无动力扰动岩样 D1 的岩爆破裂带尺寸低于在高应力条件下开始施加扰动的岩样 D2 和在低应力条件下开始施加扰动的岩样 D3。从长度上来看, 各岩样洞壁左侧破裂带在洞轴线方向上是贯通的(图 9), 对应长度均为 100 mm。而各岩样洞壁右侧破裂带长度不同, 岩样 D1、D2 和 D3 右侧破裂带的长度分别为 47、100 和 89 mm。从中可知, 有扰动荷载作用下岩样的右侧破裂带长度大于无扰动荷载作用下岩样的右侧破裂带长度, 说明扰动荷载会促进岩爆沿轴向方向破坏。另外, 岩样 D2 的岩爆破裂带的长度大于岩样 D3, 表明在高应力条件下开始施加扰动比在地应力条件下施加扰动对岩爆沿轴向发展的促进作用更为明显。从深度上来看, 由强度破坏准则可知, 围岩在静力荷载下发生破坏时, 若不考虑围岩长期时间效应的损伤, 对于某一特定的应力水平, 其围岩发生破坏的深度是一定的^[23]。然而, 从试验结束后测得试样岩爆坑尺寸的结果发现(表 1), 虽然岩样 D2 和 D3 发生最终岩爆弹射破坏时洞壁围岩的应力水平低于岩样 D1, 但岩样 D2 和 D3 洞壁岩爆坑的平均深度分别为 11 和 9 mm, 却大于岩样 D1 的 6 mm, 说明动力扰动会促进岩爆破坏沿径向发展; 同时可以看出, 岩样 D2 的岩爆坑深度要大于岩样 D3, 表明在高应力条件下开始施加扰动比在低应力条件下施加扰动对岩爆沿径向发展的促进作用更为明显。

表 1 岩爆坑的尺寸

Table 1 Dimensions of rockburst notch

编号	扰动情况	左侧岩爆坑			右侧岩爆坑		
		长度/mm	最大宽度/mm	最大深度/mm	长度/mm	最大宽度/mm	最大深度/mm
D1	无	100	15	6	47	15	3
D2	有	100	19	11	100	22	7
D3	多次	100	24	9	89	17	8

综上所述, 动力扰动会促进岩爆区域的发展, 且高应力条件下开始施加的动力荷载对岩爆破裂发展的影响要强于低应力条件下施加的动力荷载。这主要是因为围岩发生岩爆破坏后, 所积蓄的弹性应变能释放, 已发生岩爆处围岩的应力降低; 而随着竖向应力的不断升高, 围岩内部应力调整, 潜在岩爆区向周边区域转移; 动力扰动会促进这一过程的发生, 导致更多潜在岩爆区的形成。对于在高应力条件下开始施加扰动的岩样 D2, 动力扰动会诱发大量处于临界状态条件下岩石释放能量, 造成岩爆弹射破坏; 这是一个快速强卸荷的过程, 可导致周边处于稳定或亚临界状态下的岩体发生失稳破坏, 释放更多的能量, 诱发更为剧烈、更为广泛地岩爆弹射破坏。然而, 对于在较低应力水平开始施加扰动荷载的岩样 D3, 当应力较低时, 动力扰动不会诱发岩爆的发生或仅诱发轻微岩爆, 随着动力扰动次数的增加, 岩爆的剧烈程度不断增强, 这是一个缓慢的卸荷过程, 相比较于岩样 D2 在高应力条件下仅扰动一次就发生岩爆的快速强卸荷过程, 该卸荷效应对周边处于亚临界或稳定状态下岩体发生失稳破坏的诱发作用较小。

为进一步探索动力扰动对岩爆破坏的影响, 分析不同加载条件下碎屑的分布特征, 对弹射碎屑进行 4.75、2.36、1.18、0.6、0.3 mm、盘底等 6 个等级筛分, 筛分结果见图 12。从中可知, 相比较于岩样 D1, 岩样 D2 和 D3 的碎屑的总质量分别增加了 94.5% 和 91.5%。岩样 D1 的碎屑的最大尺寸为 10.5 mm, 岩样 D2 和 D3 的碎屑明显较大, 最大尺寸分别为 17 和 15 mm。另外, 相对于岩样 D2, D3 试样的大碎屑数量较多, 具有更大的宽度。这说明试样洞壁内在发生岩爆破坏时, 扰动荷载不仅会增加两侧围岩形成劈裂破坏的数量, 还会增大薄片状碎屑长度和宽度。

为进一步分析碎屑的分布特征, 采用高灵敏度电子秤测量不同粒径区间碎屑的质量, 测量结果见表 2。在各等级的碎屑粒径区间质量占比中, 岩样 D2 大于 4.75 mm 的粗粒径质量占比要高于 D3, 而 0.60~4.75 mm 的中、粗粒径碎屑质量占比都要低于 D3。为了定量描述碎屑的分布特征, 采用统计的方法, 分析碎屑的平均破碎程度 d_c ^[24]:

$$d_e = \frac{\sum (d_i \xi_i)}{\sum \xi_i} \quad (1)$$

式中: d_i 、 ξ_i 分别是碎屑等效粒径和所对应的质量百分占比。 d_e 越大表示碎屑大块体偏多;反之,小块体偏多。高应力水平扰动试样(D2)碎屑的 $d_e=2.46$ mm, D3 碎屑的 $d_e=2.23$ mm, 这表明在低应力水平施加扰动荷载, 围岩岩爆弹射碎屑的平均破碎程度更大。这是因为随着竖向应力的升高, 以及在低应力状态施加完多次扰动荷载后, 会使得洞壁围岩表面随机生成更多的劈裂裂缝, 围岩内裂纹发育得更为充分。

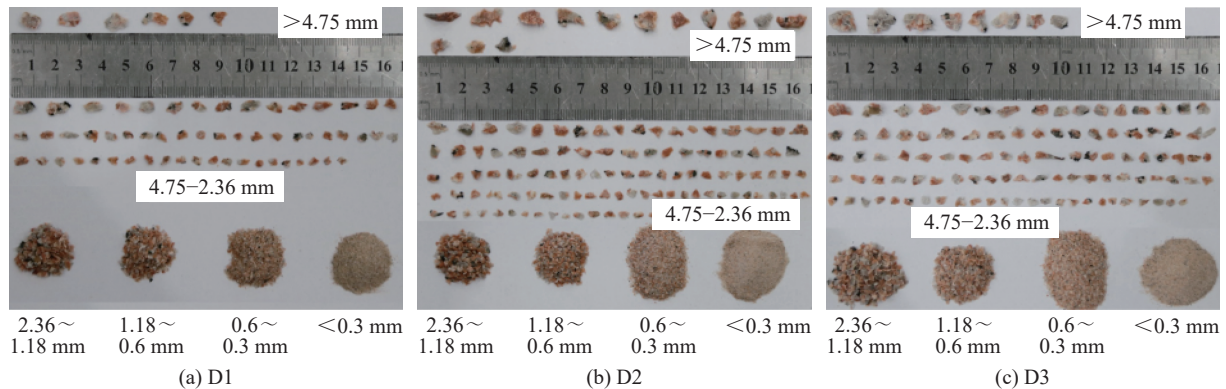


图 12 试样碎屑

Fig. 12 Debris from the tested specimens

表 2 不同粒径岩爆碎屑质量分布(单位:g)

Table 2 Mass distribution of rockburst debris with different particle sizes (unit: g)

编号	>4.75 mm	>2.38 mm	>1.18 mm	>0.6 mm	>0.3 mm	盘底	总计
D1	0.35	1.06	1.29	1.01	1.51	1.28	6.5
D2	1.49	1.63	1.79	1.69	3.33	2.71	12.64
D3	0.93	2.26	2.23	1.72	2.96	2.35	12.45

需要指出的是, 岩样边长与孔洞直径之比虽然没有达到 3 至 5 倍的要求, 但本文试验仍能很好地模拟了围岩发生劈裂、剥落、弹射等硬脆性围岩的典型脆性破坏现象, 岩样的最终的破坏形态与工程实际较为相似, 所模拟的岩爆破坏径向深度非常小, 远离岩样外边界, 且距离开挖边界较远处的岩石仍处于弹性应力与稳定状态, 这与现场的围岩破坏情况是较为吻合的。

2.3 弱动力扰动对岩爆过程的声发射影响

声发射信号是岩石受力过程中内部裂纹萌生、发育、扩展及联结时所释放的弹性应力波, 蕴含着能够表征岩石破坏过程和特征的重要关键信息。声发射计数是指超过阈值声发射信号的振荡次数, 能够直观的反映岩石内部的开裂过程。因此, 可通过声发射计数来分析弱动力扰动对围岩内部开裂的影响。

图 13 为实际加载路径与声发射振铃计数信号。各岩样的声发射演化规律在加载过程中大致相同, 并可分为 3 个阶段: 初始微裂纹压密及弹性变形阶段(阶段 I)、微裂纹萌生及稳定扩展阶段(阶段 II)、微裂纹非稳定发育至岩爆阶段(阶段 III)。但是, 对于受力不同岩样, 阶段 III 的声发射信号特征存在较大差异。首先, 受到单次扰动荷载试样 D2 以及多次扰动荷载试样 D3 在阶段 3 后期的最大声发射振铃计数分别为 8.1×10^5 、 8.5×10^5 , 明显高于没有受到扰动荷载试样 D1 的最大声发射计数 5.1×10^5 , 说明受到扰动荷载的岩样在后期发生破坏事件会更多。其次, 对于在较高应力条件下施加扰动的岩样 D2, 在施加扰动前, 声发射振铃计数的变化特征与无扰动的岩样 D1 相似; 当动荷载施加后, 本已处于较高水平的声发射信号突增并达到最大值, 这与无扰动岩样 D1 的声发射信号的变化特征有明显区别; 这是因为在试验过程中, 施加扰动荷载的时机接近岩样临界破坏点, 更多集聚在岩石内部的能量得以释放, 造成更为剧

烈的岩石开裂和破坏。对于扰动荷载施加时机提前、次数增加的岩样 D3, 在阶段 III 前期较低应力条件下施加扰动荷载, 声发射计数信号也会出现明显的突增, 但随后信号又趋于平稳; 在阶段 III 后期较高应力条件下施加扰动荷载(第三次扰动荷载), 声发射信号持续增加, 并在竖向静应力加载至最大值时声发射信号也到达最大值。这主要是因为提前施加扰动荷载, 洞壁两侧围岩应力状态较低, 可释放的能量较少, 不足以导致持续的岩石开裂行为, 裂纹发育的较为微弱或者说不明显; 但多次扰动会触发更多裂纹的发育, 造成相对于 D2 岩样更多的岩石开裂破坏。

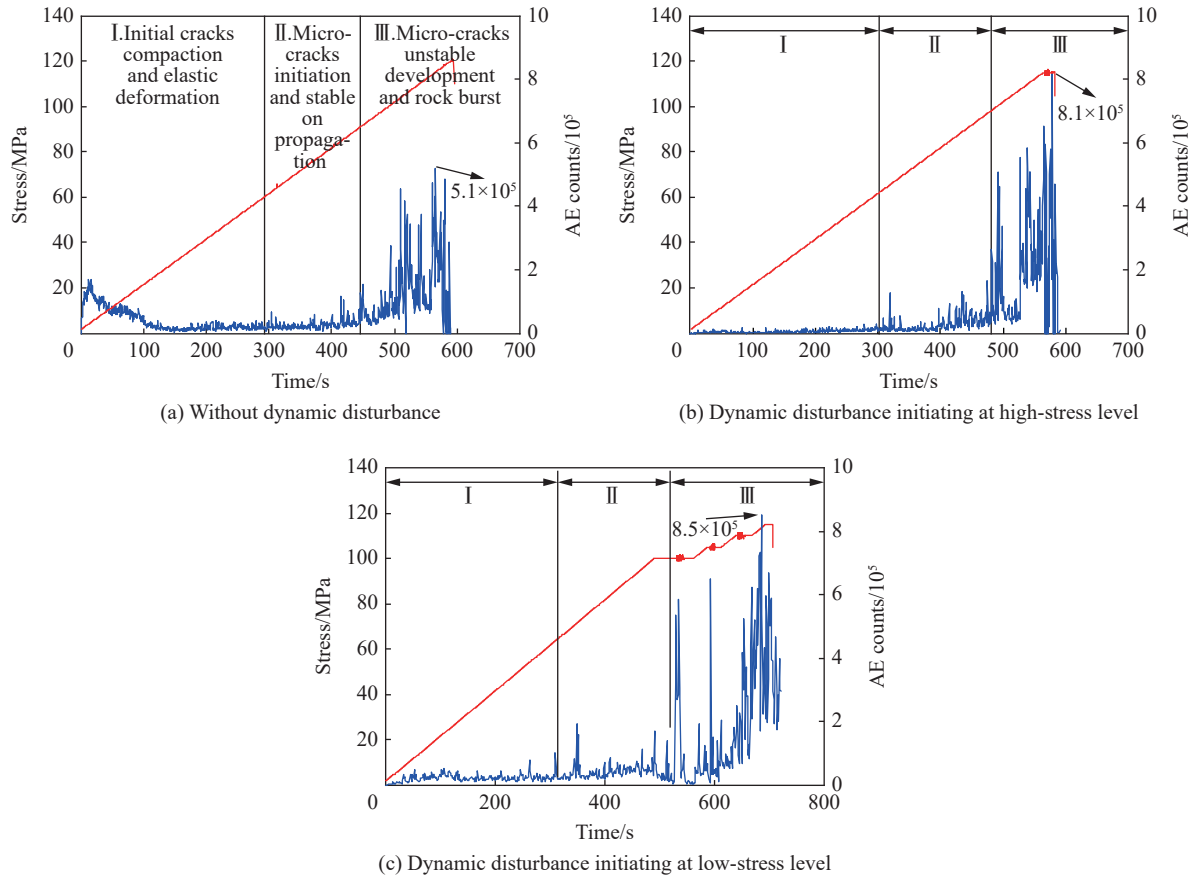


图 13 不同加载条件下岩样声发射振铃计数

Fig. 13 Acoustic emission ringing count of the tested specimens under different loading conditions

综上所述, 当试样受到扰动荷载后, 岩石内部开裂程度增大, 并导致洞壁围岩发生更为明显的宏观破坏(劈裂和岩爆)。高应力条件下(临近岩石破坏)的扰动荷载会促进裂纹以一种更为迅速形式发育并扩展; 多次扰动荷载(从较低应力条件下开始)会促进裂纹以一种更为充分的形式发育。

2.4 弱动力扰动对岩爆烈度影响

下面从能量的角度, 通过隧洞围岩释放的弹性应变能 U_r 和洞壁开裂耗散的能量 U_d 分析岩爆发生时的剧烈程度。

长方体或圆柱体岩样试验过程中能量释放明显区别于隧洞模型试验。对于前者^[3], 随着岩样应力的增大, 外界不断对岩样做功 W , 大部分输入的能量以弹性应变能 U_e 的形式储存在岩石内部, 少部分能量用于岩石峰前裂纹发展, 这部分能量也可称为峰前耗散能 U_d ; 当应力达到峰值强度时, 集聚的弹性应变能快速释放, 裂纹迅速汇聚贯通, 导致岩石最终破坏; 因此, 峰后 U_r 主要源自峰前 U_e , 并取决于岩石的强度, 岩石的强度越大, 对应的 U_e 越多, 峰后 U_r 越多。对于后者, 岩样不发生整体性破坏, 集聚岩样内部的弹性应变能 U_e 不完全释放, U_r 可表述为:

$$U_r = W - U_e \quad (2)$$

应力做功 W 与弹性应变能 U_e 可通过应力-应变曲线积分计算获得:

$$W = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i \quad (3)$$

$$U_e = \frac{1}{2} \sigma_i \varepsilon_i \quad (4)$$

通过对应力-应变曲线积分, 可得外界对岩样 D1、D2 和 D3 做功分别为 445.9、502.9、423.7 kJ, 储存在岩石内部的能量分别为 388.3、381.2、381.1 kJ, 进而由式(2)可得洞壁围岩释放弹性应变能分别为 57.5、121.7 和 42.6 kJ(图 14)。

裂纹发展是能量耗散的主要形式, 本试验通过声发射绝对能量来分析裂纹发展耗散的能量。其中, 声发射绝对能量是声发射撞击信号能量的真实反映^[25]。如图 15 所示, 岩样 D1、D2 和 D3 的声发射累积绝对能量分别为 6.02、23.8 和 35.7 nJ。由此说明, 当试样受到扰动荷载后, 围岩内部裂纹的发育及扩展会耗散更多的能量, 即扰动荷载的施加会导致围岩内部开裂程度的增加, 且开裂程度会随着扰动次数的增加而增大。因此, 扰动荷载会促进能量耗散, 并以更为明显的裂纹发展表现出来; 当试样受到扰动荷载后, 围岩发生岩爆时所形成的岩爆坑规模及岩爆破坏范围都会增大, 进而导致弹射碎屑的质量也增多, 这与本节宏观破坏特征结果相吻合。

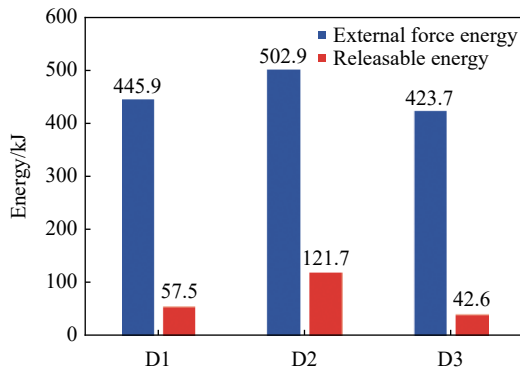


图 14 外力做功与可释放能

Fig. 14 Work done by external force and releasable energy

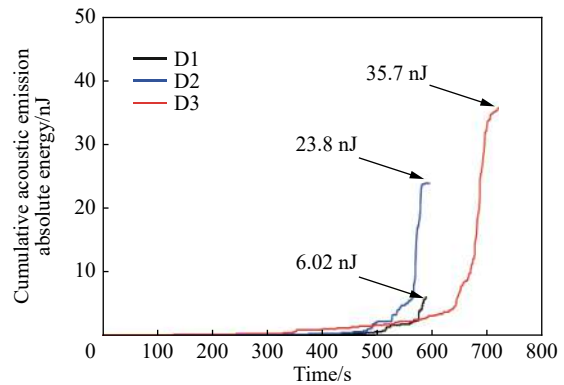


图 15 声发射累积绝对能量

Fig. 15 Cumulative acoustic emission absolute energy

对于受到多次扰动的试样 D3, 洞壁围岩内可释放的弹性应变能要小于无扰动的岩样 D1, 其中围岩内耗散的能量要明显多于 D1; 另外, 其弹射碎屑的质量与数量都要大于 D1。因此, 试样 D3 围岩在发生岩爆弹射时, 平均到每块碎屑的弹射动能会减少, 即说明多次扰动试样的岩爆烈度要弱于无扰动试样。然而, 由于试样 D2 在高应力状态时受到扰动荷载, 且扰动荷载对试样的应变增量要明显更多, 使得围岩内储存的可释放弹性应变能要远大于无扰动试样 D1, 进而导致岩爆的烈度增强。此外, 从围岩弹射过程中的尘雾现象的强弱, 也可较为直观地看出洞壁岩爆时的剧烈程度由强到弱为: 高应力水平扰动荷载、无扰动试样、低应力水平多次扰动。

另外, 对于长方体试样模拟局部岩爆破坏过程, 岩爆发生时岩样会出现整体结构性失稳, 动力扰动在岩样加载过程中促进裂纹的发育, 降低岩样的承载能力和极限储能, 导致岩爆发生时释放的能量减少, 岩爆弹射动力或烈度降低, 无扰动试样的岩爆烈度强于有扰动试样的。对于圆形隧洞模型模拟整体隧洞围岩的岩爆破坏过程, 与无扰动的岩爆相比, 弱动力扰动会诱发隧洞整体洞段岩体内弹性能沿开挖边界向外突然猛烈释放, 岩爆发生时岩体会释放更多的能量, 造成更为严重的洞壁围岩破坏, 促成更为剧烈的岩爆现象; 动力扰动对能量释放起到了激发和放大的作用。在低静应力条件下, 弱动力扰动逐渐促进围岩内部能量释放, 即使局部岩体内集聚的弹性应变能在静应力条件下未达到临界条件, 岩爆也会发生, 岩爆烈度通常较低; 在高静应力条件下, 岩爆潜在区相对较少, 导致岩爆烈度降低; 动力扰动对能量释放仅起到激发的作用。

3 结 论

通过动真三轴岩爆试验机在室内模拟了圆形隧洞的弱动力扰动触发型岩爆过程,并采用声发射系统与视频观测系统监测岩爆的孕育过程,主要结论如下:

(1)弱动力扰动降低隧洞围岩发生最终岩爆所需的应力水平,促进岩爆的发生;低应力下开始施加扰动荷载的作用相比于高应力下开始施加扰动荷载的作用更加明显。其次,高应力下开始施加的扰动荷载会促使最终岩爆以一种较快的方式发生,低应力下开始施加的扰动荷载导致的最终岩爆发生缓慢。

(2)与自发型岩爆相比,弱动力扰动下的触发型岩爆发生后,隧洞围岩破裂程度更严重。

(3)从岩爆烈度方面来比较,与长方体岩样模拟的弱动力扰动下岩爆烈度不同,考虑开挖断面曲率影响的圆形隧洞模型,在高应力下开始施加扰动所触发的岩爆最剧烈,无扰动的自发型次之,低应力下开始施加扰动所触发的相对轻微。在高应力下开始施加扰动,弱动力扰动可诱发隧洞整体洞段岩体内弹性能沿开挖边界向外突然猛烈释放;相对于无扰动的情况,弱动力扰动所触发的岩爆发生时岩体会释放更多的能量,造成更为严重的洞壁围岩破坏,从而促成更为剧烈的岩爆现象;弱动力扰动对能量释放起到了激发和放大的作用。在低应力下开始施加扰动,弱动力扰动可逐渐促进围岩内部能量释放从而触发岩爆,但与高静应力条件相比,岩爆烈度相对较低;弱动力扰动对能量释放仅起到激发的作用。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 1-6. DOI: CNKI:SUN:YTLX.0.2014-01001.
QIAN Q H. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 1-6. DOI: CNKI:SUN:YTLX.0.2014-01001.
- [2] 冯夏庭. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 159-167.
- [3] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3003-3010. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.17.001.
XIE H P, JU Y, LI L Y. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3003-3010. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.17.001.
- [4] 谭以安. 岩爆形成机理研究 [J]. *水文地质工程地质*, 1989(1): 38-42. DOI: CNKI:SUN:SWDG.0.1989-01-011.
- [5] KAISER P K, MCCREATH D, TANNANT D. Canadian rockburst support handbook [M]. Geomechanics Research Centre, 1996. 66-81.
- [6] KAISER P K, CAI M. Design of rock support system under rockburst condition [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2012, 4(3): 215-227. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2012.00215.
- [7] HUANG R Q, WANG X N. Analysis of dynamic disturbance on rock burst [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1999, 57(3): 281-284. DOI: 10.1007/s100640050046.
- [8] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(3): 561-569. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.03.014.
CHEN B R, FENG X T, MING H J, et al. Evolution law and mechanism of rockburst in deep tunnel: time delayed rockburst [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3): 561-569. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.03.014.
- [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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.05.001.
HE M C, MIAO J L, LI D J, 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.05.001.
- [10] ZHAO X G, WANG J, CAI M, et al. Influence of unloading rate on the strainburst characteristics of Beishan granite under true-triaxial unloading conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 467-483. DOI: 10.1007/s00603-013-0443-2.
- [11] SU G S, JIANG J Q, ZHAI S B, et al. Influence of tunnel axis stress on strainburst: an experimental study [J]. *Rock Mechanics*

- and *Rock Engineering*, 2017, 50(6): 1551–1567. DOI: 10.1007/s00603-017-1181-7.
- [12] HU X C, SU G S, CHEN G Y, et al. Experiment on rockburst process of borehole and its acoustic emission characteristics [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(3): 783–802. DOI: 10.1007/s00603-018-1613-z.
- [13] 苏国韶, 刘鑫锦, 闫召富, 等. 岩爆预警与烈度评价的声音信号分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 13–21. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0383.
- SU G S, LIU X J, YAN Z F, et al. Sound signal analysis for warning and intensity evaluation of rockburst [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 13–21. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0383.
- [14] 苏国韶, 陈冠言, 胡小川, 等. 花岗岩晶粒尺寸对岩爆影响的试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 123103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0419.
- SU G S, CHEN G Y, HU X C, et al. Experimental study on influence of granite grain size on rockburst [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 123103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0419.
- [15] 宫凤强, 罗勇, 司雪峰, 等. 深部圆形隧洞板裂屈曲岩爆的模拟试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(7): 1633–1648. DOI: CNKI:SUN:YSLX.0.2017-07-008.
- GONG F Q, LUO Y, SI X F, et al. Experimental modelling on rockburst in deep hard rock circular tunnels [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(7): 1633–1648. DOI: CNKI:SUN:YSLX.0.2017-07-008.
- [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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.07.011.
- LI X B, ZHOU Z L, YE Z Y, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1387–1395. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.07.011.
- [17] ZUO Y J, LI X B, ZHOU Z L, 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. DOI: 10.1007/s11771-005-0080-3.
- [18] 何满潮, 刘冬桥, 宫伟力, 等. 冲击岩爆试验系统研发及试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1729–1739. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.001.
- HE M C, LIU D Q, GONG W L, et al. Development of a testing system for impact rockbursts [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1729–1739. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.001.
- [19] 苏国韶, 胡李华, 冯夏庭, 等. 低频周期扰动荷载与静载联合作用下岩爆过程的真三轴试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1309–1322. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1249.
- SU G S, HU L H, FENG X T, et al. True triaxial experimental study of rockburst process under low frequency cyclic disturbance load combined with static load [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1309–1322. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1249.
- [20] SU G S, FENG X T, WANG J H, et al. Experimental study of remotely triggered rockburst induced by a tunnel axial dynamic disturbance under true-triaxial conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(8): 2207–2226. DOI: 10.1007/s00603-017-1218-y.
- [21] DU K, TAO M, LI X B, et al. Experimental study of slabbing and rockburst induced by true-triaxial unloading and local dynamic disturbance [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(9): 3437–3453. DOI: 10.1007/s00603-016-0990-4.
- [22] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2004, 41(8): 1251–1275. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.012.
- [23] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.11.005.
- HUANG R Q, HUANG D. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2205–2213. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.11.005.
- [24] 许金余, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(11): 3225–3229. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.11.005.
- XU J Y, LIU S. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3225–3229. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.11.005.
- [25] 沈功田. 声发射检测技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 53–56.

(责任编辑 王易难)