

DOI: 10.11779/CJGE202012007

冲击扰动下滑移型岩爆的模拟试验及机理探讨

邓树新¹, 王明洋^{1, 2}, 李杰², 张国凯¹, 王振¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 由岩体结构面滑移导致的滑移型岩爆对外界扰动敏感、释放能量巨大, 一旦发生可能带来灾难性的后果。利用自主研制的试验装置, 结合高速摄影技术, 模拟了冲击扰动下岩块从开始滑移至发生岩爆全过程, 并从内因、外因和诱因3方面探讨了滑移型岩爆机理。冲击扰动应力波在块系岩体中传播造成结构面正应力的减小导致摩擦力下降, 即超低摩擦现象。如果结构面摩擦力减小到小于结构面剪切力, 岩块开始滑移。如果最终的动摩擦力也仍然小于结构面剪切力, 岩块将持续滑移导致块系岩体失稳崩塌, 发生滑移型岩爆。冲击扰动诱发的岩块间滑移运动与结构面初始应力状态密切相关。引入一个无量纲能量参数来表征动力扰动诱发滑移型岩爆的临界能量条件, 并给出了该能量参数与结构面初始应力状态的定量关系。总结得出滑移型岩爆产生需要满足3个条件: 块系岩体中存在软弱结构面(内因), 结构面上的应力水平接近临界状态(外因), 动力扰动使得结构面抗剪强度降低(诱因)。

关键词: 滑移型岩爆; 冲击扰动; 模型试验; 岩爆机理; 高速摄影

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)12-2215-07

作者简介: 邓树新(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要从事深部岩石力学与地下防护工程等方面的教学和科研工作。E-mail: dsx@njust.edu.cn。

Mechanism and simulation experiment of slip-type rock bursts triggered by impact disturbances

DENG Shu-xin¹, WANG Ming-yang^{1, 2}, LI Jie², ZHANG Guo-kai¹, WANG Zhen¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, The Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: The slip-type rock burst caused by the sliding of structural surfaces is sensitive to external disturbances and may release huge energy. Once it occurs, it may have catastrophic consequences for construction workers and engineering equipments. Using the self-developed test device and the high-speed photography technology, the whole process of the slip-type rock bursts from initial sliding to slip instability under impact disturbance is simulated. The mechanism is discussed from three aspects including external causes, internal causes and incentives. After an external impact, the propagation of stress waves in the blocky rock masses can lead to the reduction of friction, which is known as the ultra-low friction phenomenon. Once the friction force of structural planes reduces to a value less than the initial shear force of the structural plane, the rock block begins to slip. If the final dynamic friction force is still less than the shear force, the rock block will continue to slip, causing the blocky rock masses to be instable and collapse, namely a slip-type rock burst. The sliding motion between rock blocks induced by impact disturbance is closely related to the initial stress level of structural surfaces. A dimensionless energy parameter is introduced to characterize the critical energy condition of slip-type rock bursts induced by dynamic disturbances, and the quantitative relationship between the energy parameter and the initial stress state of the structural plane is given. It is concluded that three conditions need to be met for the occurrence of slip-type rock bursts: there are weak structural planes (internal causes) in the block rock mass, the stress conditions on the structural planes are close to the critical state (external causes), and the dynamic disturbance causes the shear strength of the structural plane to decrease (incentives).

Key words: slip-type rock burst; impact disturbance; model test; rock burst mechanism; high-speed photography

0 引言

随着中国经济建设和国防建设的高速发展, 地下资源的利用和地下空间的开发都不断趋向于地球深

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51909120)

收稿日期: 2020-05-06

*通信作者(E-mail: wmyrf@163.com)

部。在修建大埋深的矿井和隧道时, 岩爆是一种常见的岩体动力灾害, 一旦发生将可能造成人员伤亡、设备报废等事故, 并引起工程建设停滞, 直接或间接造成的经济损失难以估量。因此岩爆一直备受国内外学者关注, 但是其诱发机制的复杂性, 使得岩爆的预测、预报及控制存在相当大的难度^[1-4]。

根据岩体破坏形式不同, 岩爆可以分为两类^[5]: 第一类是由于岩石脆性破坏导致的, 通常称为应变型岩爆; 第二类是由断层滑移事件所导致的, 通常称为滑移型岩爆。通过调查文献资料发现, 滑移型岩爆具有以下 3 个主要特点:

(1) 与结构面密切相关。在南非矿井中, 沿已有断裂面或新鲜断裂面滑移型破坏导致的矿震占据优势地位^[6]。在我国锦屏二级水电站深埋隧洞施工现场也发现, 结构面的存在与岩爆的发生具有密切联系^[7-8]。

(2) 释放能量巨大。陈宗基^[9]早在 20 世纪 80 年代就注意到了断裂滑移型岩爆的存在, 并指出: 断裂滑移型岩爆破坏通常远比应变型岩爆事件强烈得多, 在矿井环境单一事件中通常有数十米甚至数百米巷道被破坏。

(3) 对外界扰动敏感。Whyatt 等^[10]调查结果显示 75% 的岩爆都是在爆炸时或者爆炸几个小时后发生。陈宗基^[9]也指出切不可忽视爆炸波对触发煤爆的影响: 门头沟矿 114 起煤爆中, 有 89 起(占 78%)是因爆破触发的, 在龙凤矿中因爆破而触发的煤爆也超过总数的 50%。Kaiser^[11]也认为地下爆炸、地震产生应力波传至深部洞室的开挖面, 能够使原先存在软弱面的围岩内出现离散岩块的弹射现象。

因此, 滑移型岩爆的研究可能具有更重要的工程背景和意义。针对应变型岩爆的试验研究^[12-14]、数值模拟^[3, 15]以及岩爆判据研究^[16]都取得了长足的发展, 而对滑移型岩爆的研究较少。目前岩爆的物理模拟一般通过加载^[17]或者卸载^[18]方法进行试验, 而对冲击扰动诱发岩爆的物理模拟试验较少。在对岩爆机理的认识上, 一般从应力和能量两个角度考虑, 而很少考虑冲击扰动诱发的深部岩体特有的动力响应特征^[19], 如超低摩擦效应。鉴于此, 本文利用课题组自主研发的“新型块系岩体动态特性测试试验系统”, 结合高速摄影技术, 设计冲击扰动下深部岩体滑移型岩爆的物理模拟试验, 并对滑移型岩爆诱发机理进行探讨。

1 试验方案

1.1 问题简化

冲击扰动下深部岩体滑移型岩爆, 可被认为是由

下爆炸(爆破)应力波衰减后形成的动力扰动打破高地应力条件下块系岩体结构面平衡状态使内部储能突然释放的过程。该过程可以采用如图 1 所示的块体模型进行研究^[20-21]。

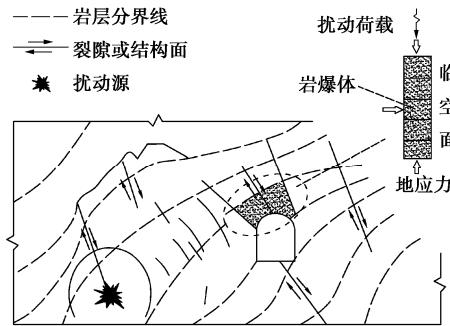


图 1 冲击扰动诱发滑移型岩爆简化示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of slip-type rock bursts induced by impact disturbance

1.2 试验模型

根据图 1 中简化的块体模型, 采用垂直叠加的红砂岩块进行滑移型岩爆的模拟试验研究, 如图 2 所示。单个红砂岩块尺寸为 160 mm×125 mm×125 mm, 质量为 6.2 kg, 纵波速度为 3800 m/s。5 个红砂岩块垂直叠加, 从上至下编号为 1~5, 取#3 岩块为工作岩块(岩爆体)。岩块间的接触表面没有进行特殊的抛光打磨处理, 试块之间接触紧密以保证岩块的整体稳定性。为了方便采用数字图像相关法进行图片处理, 在岩块 3 上标记两个标定点。

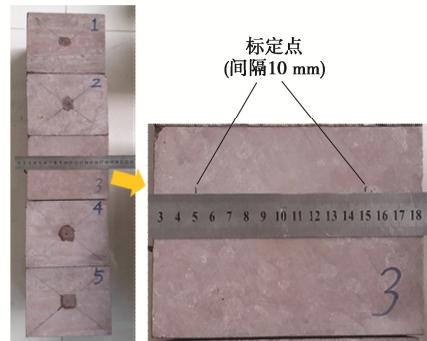


图 2 红砂岩试验模型

Fig. 2 Samples of red sandstone

1.3 试验装置

试验采用课题组自主研发的“新型块系岩体动态特性测试试验系统”^[22], 滑移型岩爆模拟试验方案及装置图片如图 3 所示。试验装置由工作台、控制加载装置以及测量系统 3 部分组成。

1.4 加载方法

竖向冲击扰动由安装在顶部的电动式激振器进行加载。电动式激振器可以将电能转换为冲击能, 对试件提供精确可控的激振力, 振幅可达 1000 N, 通过加

载延时控制系统精确控制冲击加载起始时间, 能够实现 0~200 ms 任意时间间隔的精确调节。

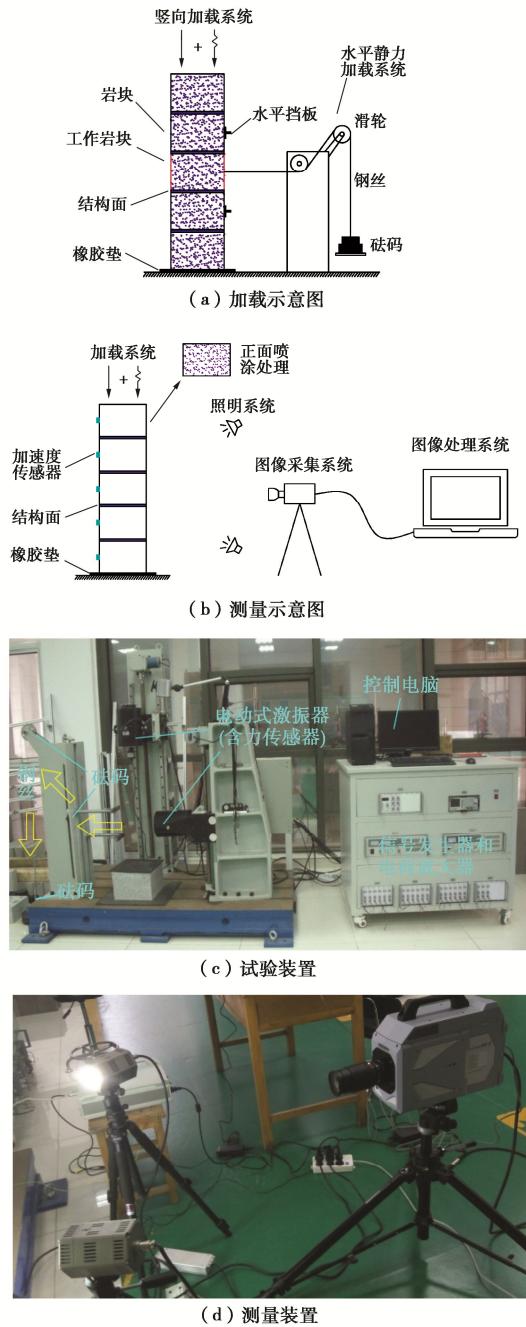


图 3 模拟试验方案

Fig. 3 Plan of simulation experiment

水平方向上将一根钢丝连接于工作岩块上, 钢丝的另一端穿过滑轮组与砝码盘相连, 通过改变砝码的重量, 实现水平拉力大小的调节, 用来模拟结构面上不同大小的初始剪切力。用水平挡板限制工作岩块相邻的岩块 2 和岩块 4 的水平运动。

1.5 测量方法

冲击扰动荷载由激振器内置的力传感器进行记录, 力传感器采用长沙 NOS 轮辐式力传感器, 量程为 0~1500 N。

所有岩块的竖向位移以及工作岩块的水平位移均由 Photron FASTCAM SA-Z 高清摄影机进行记录, 它的最高拍摄帧率可达 20000 fps, 最高分辨率可达 1024×1024 pixel。为方便像素点捕捉, 采用 LED 强光灯进行照明。实验中高清摄影机帧率设置为 1000 fps, 分辨率设置为 1024×512 pixel。高速摄像机每隔 1 ms 记录一张块体模型的高清图像。试验结束后, 将高清图像导入数字图像相关 (DIC) 计算软件作后期处理, 可得到整个块体模型的位移场。数字图像相关法通过对比试样变形前后两幅图像, 采用相关计算来获得试样表面的位移场。该方法能够全场测量, 对环境要求宽松, 测量精度高。

2 试验结果

2.1 剪切强度

为测量岩块的水平剪切强度, 在不施加竖向冲击力条件下, 通过累加砝码的方式逐步增大水平拉力, 观察工作岩块的水平运动, 直至系统失稳, 记录此时水平拉力值, 即为结构面剪切强度。为验证测量结果的可重复性, 试验重复 3 次取平均值。通过 3 次剪切试验获得剪切强度的平均值为 189.75 N。

为了表征工作岩块初始剪切力水平, 定义初始剪切力比 β 为水平拉力和剪切强度的比值,

$$\beta = \frac{T}{F_p} \quad , \quad (1)$$

式中, T , F_p 为水平拉力和剪切强度。

2.2 竖向位移响应

电动式激振器内含力传感器, 可以精确记录冲击力时程曲线, 记为 $p(t)$, 通过对力时程曲线积分可以得到冲击的冲量 I_m 。假设冲击荷载的作用时间很短, 岩块尚来不及产生很大的位移, 在瞬时冲量荷载作用下, 系统从外场源获得能量, 冲击能量和冲量存在下列换算关系:

$$W = \frac{1}{2m} \left| \int_0^\infty p(t) dt \right|^2 = \frac{I_m^2}{2m} \quad , \quad (2)$$

式中, W 为冲击能量, m 为岩块质量, t 为时间。结合冲击力时程曲线及式 (2) 可计算得到每次试验对应的冲击扰动能量。

不同冲击能量条件下, 各岩块竖向位移时程曲线如图 4 (a) 所示。由图 4 (a) 可知, 在施加竖向冲击扰动荷载后, 冲击应力波在岩块系统中传播, 各岩块产生明显的竖向振动。冲击扰动使得岩块首先产生压缩位移, 随后变成拉伸位移。各个岩块的竖向振动并不协调, 即岩块间存在相对位移, 如图 4 (b) 所示。当岩块间的相对位移处于拉伸状态时, 岩块结构面的

正应力减小, 从而导致摩擦力降低, 即产生超低摩擦现象。

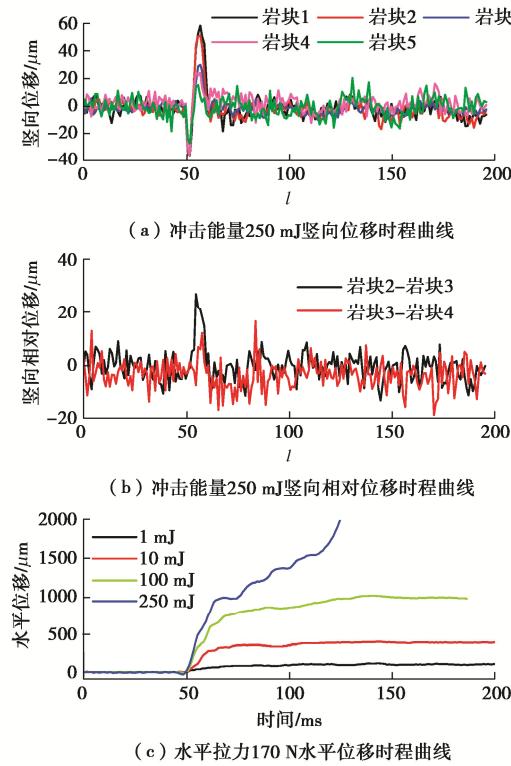


图 4 岩块位移时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of displacement of rock blocks

2.3 水平位移响应

由 2.2 节可知, 沿结构面法向的相对拉伸位移将导致结构面摩擦力的减小。一旦摩擦力减小到低于结构面剪切力(水平拉力), 工作岩块将沿结构面开始水平滑移, 水平位移时程曲线如图 4(c) 所示, 坚向振动停止后工作岩块 3 种最终状态如图 5 所示。

图 4(c) 中当冲击能量为 1 mJ 时, 工作岩块并没有产生明显的水平位移, 对应的状态如图 5(a) 所示。说明在这种情况下, 受坚向冲击扰动影响而降低后的摩擦力仍然大于工作岩块所受水平拉力。

图 4(c) 中当冲击能量为 10 mJ 和 100 mJ 时, 工作岩块在坚向冲击扰动施加后开始沿水平方向滑动, 此时降低后的摩擦力小于工作岩块所受水平拉力。在冲击扰动荷载施加完毕后, 岩块的坚向振动逐渐停止, 工作岩块的动摩擦力 F_d 大于水平拉力 T , 工作岩块将在动摩擦力作用下逐渐停止滑移, 产生残余位移, 如图 5(b) 所示。冲击能量为 10 mJ 和 100 mJ 时, 工作岩块在 170 N 水平拉力作用下产生了 390 μm 和 970 μm 残余位移。

图 4(c) 中当冲击能量为 250 mJ 时, 岩块的坚向振动停止后工作岩块仍持续滑移。说明此时结构面动摩擦力 F_d 小于水平拉力 T , 由于存在剪应力差

$T - F_d$, 工作岩块将会一直沿水平方向滑移直至岩块系统崩塌。在试验过程中, 为了安全考虑, 砝码盘限定了高度, 如图 3(a) 所示。因此在图 5(c) 中由于砝码盘落地后, 工作岩块水平拉力消失, 随即水平滑移停止, 产生残余位移。而在实际工程中, 岩爆体将在剪切力作用下产生自持续的滑移运动, 直至岩块系统崩塌, 发生滑移型岩爆。

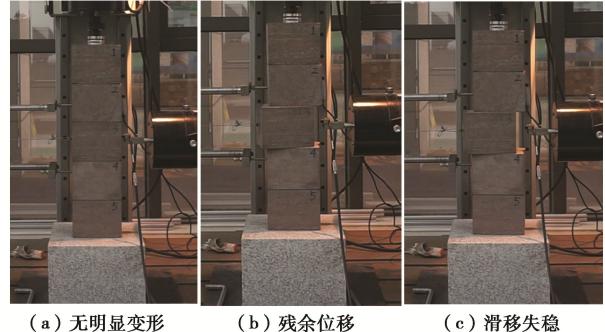


图 5 工作岩块水平滑移运动 3 种状态

Fig. 5 Three states of horizontal sliding motion of working block

2.4 残余位移

图 4(c) 中, 残余位移大小能反映冲击扰动下水平拉力克服摩擦力做功的大小。图 6 为不同水平拉力作用下工作岩块水平运动残余位移与冲击能量之间的关系。当水平拉力一定时, 随着冲击能量的增加, 工作岩块产生的残余位移量不断增加, 说明超低摩擦效应变得更加显著。这种残余位移随冲击能量增加效应在 β 值较大时尤其明显。当 $T = 180 \text{ N}$ ($\beta = 0.95$) 时, 仅 5 mJ 扰动能量诱发工作岩块产生 330 μm 残余位移, 10 mJ 扰动能量则能诱发工作岩块发生滑移失稳。

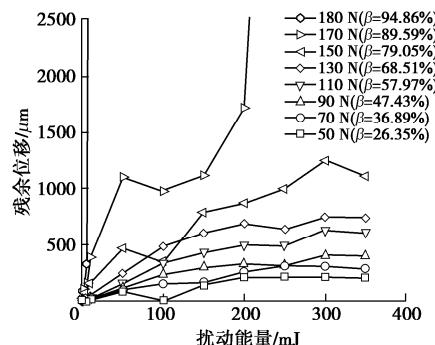


图 6 残余位移与冲击能量之间关系

Fig. 6 Relationship between residual displacement and impact energy

2.5 临界能量条件

由 2.3 节可知, 受一定水平拉力作用下, 工作岩块最终状态可以分为 3 种(图 5): ①没有明显的残余位移, 可视为仅产生弹性变形; ②岩块开始滑移, 但并不会一直持续下去, 最后形成显著的残余位移; ③

岩块的滑移水平拉力作用下一直持续下去导致系统失稳破坏。为了表征这 3 种最终状态的临界能量条件, 参照 Kurlenya 等^[23]根据岩块震动和频谱曲线总结出的深部块系岩体摆型波与准共振现象出现的无量纲能量条件, 引入无量纲系数 k ,

$$k = \frac{W}{mC_p^2}, \quad (3)$$

式中, W 为外部冲击扰动的作用能量, 其值取决于扰动源附近地质块体动能, C_p 为岩块纵波速度。

经过多组试验, 不同水平拉力作用下, 岩块开始滑移以及滑移失稳时冲击能量对应的 k 如图 7 所示。图 7 中 3 个区域分别代表工作岩块受竖向扰动后的 3 种最终状态。当 β 值较小时, 岩块仅能产生弹性变形或者残余位移, 不会发生滑移失稳, 产生残余位移的临界能量值随着 β 的增大而减小。当 β 较大时, 足够大的扰动能量将使得岩块发生滑移失稳, 其临界能量值随着 β 的增大而减小。当 β 接近 1 时, 极小的能量也能诱发岩块滑移失稳, 其临界能量值随着 β 的增大急剧减小。

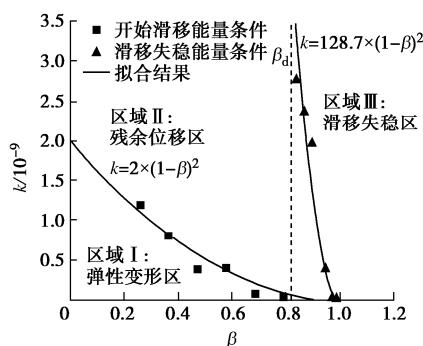


图 7 岩块不同最终状态的临界能量条件

Fig. 7 Critical energy conditions of different final states of rock blocks

根据试验结果, 拟合得到工作岩块开始滑移和滑移失稳能量条件可以分别表示为

$$k = \begin{cases} 2 \times (1 - \beta)^2 \times 10^{-9} \\ 128.7 \times (1 - \beta)^2 \times 10^{-9} \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 反应了冲击扰动作用下滑移型岩爆发生能量条件与岩块初始应力状态之间的定量关系, 即无量纲参数 k 与 $1 - \beta$ 的平方成正比。

Kurlenya 等^[23]认为, 随着冲击能量增大, 当 $k \geq (1 \sim 4) \times 10^{-11}$ 时, 摆型波开始形成, 当 $k \geq (1 \sim 4) \times 10^{-9}$ 时整个岩块系统进入准共振状态。满足此条件, 地质块体间超低摩擦开始起主要作用, 从而使得岩块间的脱离变得容易。Kurlenya 等^[23]没有考虑结构面剪切力的作用, 而仅研究了式 (4) 中 $\beta = 0$ 的情况。式 (4) 中取 $\beta = 0$ 的计算结果和 Kurlenya 等^[23]通过现场观测

总结经验结果一致, 验证了式 (4) 的合理性。

3 滑移型岩爆机理探讨

在外部冲击扰动作用下, 块系岩体沿应力波传播方向振动, 各岩块的振动并不协调, 与应力波传播方向垂直的结构面两侧岩块存在相对位移。当相对位移处于拉伸向时, 结构面正应力的减小导致摩擦力下降。当竖向扰动能量足够大, 能够使得结构面摩擦力降低到小于初始剪切力, 工作岩块开始沿结构面滑移。

工作岩块沿结构面的滑移运动是否可以一直持续下去取决于剪切力 T 和动摩擦力 F_d 的大小。当 $T < F_d$, 工作岩块将在摩擦力作用下停止运动, 产生残余位移。显然, 当 $T \geq F_d$ 时, 工作岩块能一直持续滑移下去, 发生滑移型岩爆。因此, 块系岩体要发生滑移型岩爆, 需要满足 3 个条件:

(1) 首先, 岩体中需要存在软弱结构面, 即存在滑移破坏的可能性, 这是滑移型岩爆的内因。

(2) 然后, 结构面上的应力条件需要接近临界状态, 即 $T \geq F_d$ 或 $\beta \geq \beta_d = F_d / F_p$ 。这可视为滑移型岩爆的外因。

(3) 外部冲击扰动能量要足够大, 使得扰动应力波衰减后结构面仍有足够小的动摩擦力 F_d , 即需要满足 $k \geq 128.7 \times (1 - \beta)^2 \times 10^{-9}$ 。这是滑移型岩爆的诱因。

4 结 论

针对深部岩体工程中亟待解决的滑移型岩爆问题, 利用研发的试验系统, 模拟了冲击扰动下块系岩体滑移型岩爆过程, 并从内因、外因和诱因 3 方面探讨了岩爆发生机理。

(1) 外部冲击扰动应力波在块系岩体中传播, 使得与应力波传播方向垂直的结构面两侧岩块存在相对拉伸位移, 造成结构面正应力的减小导致摩擦力下降, 产生超低摩擦现象。当水平拉力一定, 随着冲击能量的增加, 工作岩块产生的残余位移量不断增加, 说明超低摩擦效应变得更加显著。一旦结构面摩擦力减小到小于结构面剪切力, 岩块开始滑移。如果结构面最终的动摩擦力仍然小于剪切力, 岩块将持续滑移导致块系岩体失稳崩塌, 发生滑移型岩爆。

(2) 冲击扰动诱发的岩块间的滑移运动与岩块初始剪切应力水平密切相关。随着水平剪切力的增大, 发生滑移型岩爆的所需能量减小。当岩块处于亚临界平衡状态时, 极其微弱的扰动即可诱发较大的岩块间残余位移, 甚至发生滑移型岩爆。

(3) 引入一个无量纲能量参数 k 来表征动力扰动

诱发滑移型岩爆的临界能量条件，并给出了该能量参数与结构面初始应力状态的定量关系，无量纲参数 k 与 $1-\beta$ 的平方成正比。

(4) 滑移型岩爆产生需要满足 3 个条件：内因方面，工程岩体中需存在宏观软弱结构面；外因方面，结构面上的应力条件应接近临界状态，一般来说，剪切力应大于结构面动摩擦力；诱因方面，动力扰动应使得结构面摩擦力降低到小于初始剪切力。

参考文献：

- [1] 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. (FENG Xia-ting. The Mechanism of Rockburst Gestation Process, Early Warning and Dynamic Regulation[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [2] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2034 - 2042. (ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and its criterion and prevention[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034 - 2042. (in Chinese))
- [3] 蔡美峰, 冀东, 郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1973 - 1980. (CAI Mei-feng, JI Dong, GUO Qi-feng. Research on rockburst prediction based on in-situ stress measurement and mining disturbance energy accumulation theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1973 - 1980. (in Chinese))
- [4] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制, 预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188 - 2204. (JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin. Research status of coal mine rock burst in China: mechanism, early warning and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188 - 2204. (in Chinese))
- [5] 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(1): 1 - 6. (QIAN Qi-hu. Definition, mechanism, classification and quantitative prediction model of rock burst and rock burst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [6] RYDER J A. Excess shear stress in the assessment of geologically hazardous situations[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1988, 88(1): 27 - 39.
- [7] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 结构面剪切破坏特性及其在滑移型岩爆研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1729 - 1738. (ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Characteristics of shear failure of structural plane and slip rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1729 - 1738. (in Chinese))
- [8] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞岩爆的结构面作用机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 720 - 727. (ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Shear failure characteristics of structural plane and its application in the study of sliding rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 720 - 727. (in Chinese))
- [9] 陈宗基. 岩爆的工程实录, 理论与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(1): 1 - 18. (CHEN Zong-ji. Engineering record of rockburst, theory and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(1): 1 - 18. (in Chinese))
- [10] WHYATT J K, BOARD M P. Strain softening model for representing shear failure in continuous rock masses[C]// Proc 2nd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, 1991, Minneapolis.
- [11] KAISER P K. Canadian Rockburst Support Handbook: 1996[M]. Sudbury: Geomechanics Research Centre, 1996.
- [12] 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(9): 1729 - 1739. (HE Man-chao, LIU Dong-qiao, GONG Wei-li, et al. Development and test of impact rock burst test system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(9): 1729 - 1739. (in Chinese))
- [13] 李夕兵, 宫凤强, 杜坤, 等. 高应力岩体动力扰动下发生岩爆的试验研究进展报告[J]. 科技创新导报, 2016(15): 173. (LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, DU Kun, et al. Progress report of experimental research on rockburst under dynamic stress of high stress rock mass[J]. Science and Technology Innovation Guide, 2016(15): 173. (in Chinese))
- [14] 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(7): 1309 - 1322. (SU Guo-shao, HU Li-hua, FENG Xia-ting, et al. True triaxial test study on rock burst process under the combined action of low frequency periodic disturbance load and static load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016(7): 1309 - 1322. (in Chinese))
- [15] 朱万成, 左宇军, 尚世明, 等. 动态扰动触发深部巷道发生失稳破裂的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(5):

- 915 - 921. (ZHU Wan-cheng, ZUO Yu-jun, SHANG Shi-ming, et al. Numerical simulation of instability and cracking in deep roadways triggered by dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(5): 915 - 921. (in Chinese))
- [16] 潘一山, 章梦涛, 李国臻. 稳定性动力准则的圆形洞室岩爆分析[J]. 岩土工程学报, 1993(5): 59 - 66. (PAN Yi-shan, ZHANG Meng-tao, LI Guo-zhen. Rockburst analysis of circular caverns with dynamic stability criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993(5): 59 - 66. (in Chinese))
- [17] 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): 1634 - 1648. (GONG Feng-qiang, LUO Yong, SI Xue-feng, et al. Simulation test study on slab buckling rock burst of deep circular tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1634 - 1648. (in Chinese))
- [18] 何满潮, 赵 菲, 杜 帅, 等. 不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2737 - 2747. (HE Man-chao, ZHAO Fei, DU Shuai, et al. Experimental analysis of rockburst failure characteristics under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2737 - 2747. (in Chinese))
- [19] 周小平, 钱七虎. 深部裂隙岩体岩爆定量预测模型[C]//新观点新学说学术沙龙文集 51: 岩爆机理探索, 2010, 北京. (ZHOU Xiao-ping, QIAN Qi-hu. Quantitative prediction model of rock burst in deep fractured rock mass[C]//New Perspectives and New Doctrine Academic Salon Collection 51: Exploration of Rock Burst Mechanism, 2010, Beijing. (in Chinese))
- [20] MA G W, AN X M, WANG M Y. Analytical study of dynamic friction mechanism in blocky rock systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5): 946 - 951.
- [21] KURLENYA M V, OPARIN V N. Problems of nonlinear geomechanics. part II[J]. Journal of Mining Science, 2000, 36(4): 305 - 326.
- [22] 李 杰, 周益春, 蒋海明, 等. 非线性摆型波问题的提出及科研仪器研制[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2017, 39(4): 22 - 28. (LI Jie, ZHOU Yi-chun, JIANG Hai-ming, et al. Proposal of nonlinear pendulum wave problem and research instrument development[J]. Journal of Natural Science of Xiangtan University, 2017, 39(4): 22 - 28. (in Chinese))
- [23] KURLENYA M V, OPARIN V N, VOSTRIKOV V I, et al. Pendulum waves Part III: data of on-site observations[J]. Journal of Mining Science, 1996, 32(5): 341 - 361.

黄土力学的理论与实践专题学术研讨会在西安成功召开

由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会与中国工程建设标准化协会湿陷性黄土专业委员会联合主办, 西安理工大学等单位承办的“黄土力学的理论与实践专题学术研讨会”于2020年11月20日—22日在西安成功召开。参会单位共120个, 参会学者652位。

会议组织学术报告98个, 其中院士报告2个, 特邀报告24个, 分会场报告72个。邓铭江院士做了题为“中国西北“水三线”空间格局与区域协调发展”的报告, 彭建兵院士做了题为“宜居黄河科学愿景”的报告。会议以“一带一路”重大工程建设中的黄土力学理论与实践的关键科学问题和工程技术问题为中心议题进行了广泛深入交流。在黄土的基本性质、测试技

术、本构模型、地基处理、基坑支护、桩基工程、地下工程、边坡工程、环境工程和数值分析以及其它特殊土等方面, 与会专家提供了最新研究成果, 拓展了与会者的学术视野, 将有力地促进黄土力学理论与实践的发展和创新。

本次会议共收到全国60多个单位提交的169篇学术论文。

会议采用线上线下同时进行, 全程线上免费直播, 盛况空前。会议组织和大会报告得到与会专家的高度评价和盛赞, 取得了圆满成功, 既是黄土力学的第一次盛会, 也是名副其实的学术盛宴。

会议期间, 非饱和土与特殊土专委会举行了工作会议, 共有92名专委会委员出席会议。

(西安理工大学党发宁教授和王丽琴副教授、陆军勤务学院方祥位教授联合供稿)