DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.06.093

文章编号: 1006-6616 (2019) 06-1099-08

围压与冲击扰动作用下组合煤岩超低摩擦效应分析

李利萍¹,吴金鹏¹,鞠翔宇¹,王 淋² (1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院,辽宁阜新 123000; 2. 大连海事大学交通运输工程学院,辽宁大连 116000)

摘 要:深部煤岩在垂直扰动作用下发生振动,当水平冲击足以克服块体间摩擦阻力时,极易 发生超低摩擦型冲击地压。文章以细砂岩-煤-细砂岩组合块体为研究对象,考虑顶板-煤-底板 临近工作面开采工况,采用数值模拟方法,建立围压与冲击扰动下组合煤岩数值模型,以煤块 水平位移、垂直加速度差值作为超低摩擦效应特征参数,分析围压、垂直冲击及水平冲击对特 征参数的影响规律。研究结果表明:在垂直冲击与围压共同作用下,煤岩体残余位移及水平位 移峰值随围压增大且呈指数增长趋势;在垂直冲击、水平冲击和围压三者共同作用下,煤岩体 超低摩擦效应强度与作用时间都随着围压呈增加趋势;垂直冲击对组合煤岩超低摩擦效应的影 响最为显著。

关键词:超低摩擦效应;煤岩组合块体;围压;垂直冲击;水平冲击;冲击地压

中图分类号: TD324 文献标识码: A 开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



ANALYSIS OF ULTRA-LOW FRICTION EFFECT OF COAL-ROCK COMBINATION BLOCK UNDER CONFINING PRESSURE AND IMPACT DISTURBANCE

LI Liping¹, WU Jinpeng¹, JU Xiangyu¹, WANG Lin²

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. School of Transportation and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116000, Liaoning, China)

Abstract: The deep coal-rock combinations vibrate under the action of vertical disturbance. When the horizontal impact overcomes the friction resistance between blocks, it is very easy to produce ultra-low friction rock burst. In this paper, the combination block of fine sandstone-coal-fine sandstone is regarded as the research object. Considering the mining condition of the roof-coal-floor near the working face, numerical simulation method was used to establish the numerical block model under confining pressure

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0600901, 2017YFC0804208);国家自然科学基金项目(51874165, 51974148);辽宁省"兴 辽英才计划"项目(XLYC1807130)

作者简介: 李利萍 (1983-), 女, 博士, 副教授, 主要从事深部岩体力学特性方面的教学与研究工作。E-mail: llpah@126.com 收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2019-09-10; 责任编辑: 吴芳

引用格式: 李利萍, 吴金鹏, 鞠翔宇, 等. 围压与冲击扰动作用下组合煤岩超低摩擦效应分析 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (6): 1099-1106 DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2019. 25. 06. 093

LI Liping, WU Jinpeng, JU Xiangyu, et al. Analysis of ultra-low friction effect of coal-rock combination block under confining pressure and impact disturbance [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (6); 1099-1106 DOI; 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2019. 25. 06. 093

and impact disturbance. The horizontal displacement and vertical acceleration difference value of coal block are defined as characteristic parameters of ultral-low friction effect. The influence of confining pressure, vertical impact and horizontal impact on the characteristic parameters are analyzed. The results show that the residual and horizontal displacement peaks increase exponentially with the increase of confining pressure under the interaction of vertical impact and confining pressure. And under the interaction of vertical and horizontal impacts and confining pressure, the strength and duration of ultra-low friction effect also increase with the increase of confining pressure. The vertical impact has the most significant effect on the ultra-low friction effect in coal-rock combination block.

Key words: ultra-low friction effect; coal-rock combination block; confining pressure; vertical impact; horizontal impact; rock burst

0 引言

超低摩擦效应是指深部岩块系统在动载作用 下,当冲击作用能量达到临界值时,岩块间处于 相对疏松状态,摩擦力大大降低,甚至在相互作 用的块系接触界面间产生摩擦"消失"效应^[1-2]。

俄罗斯学者 Kurlenya 和 Oparin^[3-5]通过建立块 系岩体动力模型,首次提出并验证了超低摩擦效 应的存在。E. H. Rutter 等^[6] 通过研究断层泥质摩 擦效应,发现软弱夹层对断层超低摩擦效应具有 重要影响。B. G. Tarasov 等^[7] 指出低摩擦剪切作 用是导致深埋地下矿山地震和岩石破裂的高能量 释放原因。钱七虎院士^[8]指出块系岩体中存在超 低摩擦现象,易引发岩爆、冲击地压等动力灾害。 王明洋等^[9-11]利用建立的块系岩体动力模型解释了 超低摩擦现象。何满朝等^[12]采用了自主研制的试 验设备研究了不同荷载情况下花岗岩块体模型的 变化特征。李杰等^[13]通过冲击扰动实验,获得了 岩块冲击滑动失稳的力学规律。潘一山等[14]基于 摆型波理论研究了超低摩擦现象发生机理。蓝一 凡^[15]研究深部岩体非连续块模型超低摩擦效应特 性参数,揭示并验证了超低摩擦效应的存在及产 生机制。谭维佳等[16]通过数值模拟方法选取研究 了一种典型的反倾岩滑坡现象,确定了其滑移变 形破坏阶段的主控因素。陈学军等[17]试验确定了 影响爆炸振动波频率传播强度的因素。

国内外学者通过理论和试验手段对超低摩擦 效应的研究取得了一定的成果,但利用数值模拟 方法分析超低摩擦效应的研究相对较少。数值模 拟方法是科学研究的重要手段之一,可以方便地 开展参数的敏感性研究,并模拟当前技术条件下 难以开展的物理实验。此外,现有研究并未考虑 深部块系岩体所受真实应力状态,块系岩体不仅 受上覆岩层压力作用,同时也受围压作用。现有 超低摩擦效应试验多采用花岗岩块体作为研究对 象,与现场工况尚存在很大差距。

深部煤岩体在高地应力环境下,受到集中开 采引发冲击荷载强烈扰动,采场和巷道周围的块 系煤岩体不断发生震动、变形和破坏。当冲击荷 载作用达到临界条件时,块系煤岩体易在周围荷 载作用下发生层间滑动,摩擦阻力减弱、甚至极 弱,产生超低摩擦效应,从而诱发超低摩擦型冲 击地压^[18]。因此,为研究深部煤岩体超低摩擦型 冲击地压机理,考虑围压与双向冲击作用,采用 数值模拟方法,以水平残余位移、水平位移极大 值、垂直加速度差值为表征超低摩擦效应重要参 数,分析煤岩组合块体系统由于受到围压、垂直 冲击、水平冲击作用时的超低摩擦效应影响规律, 旨在对超低摩擦效应机理深入认识和超低摩擦型 冲击地压防治提供一定科学理论依据。

1 理论模型

1.1 冲击能量的转化

以 Hertz 定律为基础,不考虑系统振动,将冲击能 W 转化为作用时间为 *t*₀、幅值为 *P*_m 的半正弦形式作用力,得到冲击载荷的函数形式如下

$$P(t) = \begin{cases} P_{\rm m} \sin(\omega t), & t < t_0 \\ 0, & t \ge t_0 \end{cases}$$
(1)

式中, P_{m} —动力载荷幅值, N; t—动力计算时间, s; $\omega = 2\pi f$, f—动载频率, Hz; P_{m} 和 ω 均通过 Hertz 定律计算求得。

冲击能量力学转化形式如图1所示。





1.2 模型构建

冲击地压多发生在强度高、厚度大的坚硬岩 层中,对含煤地层而言,冲击地压发生的典型条 件是底、顶板含有较厚的砂岩。为模拟实际开采 工况,利用 FLAC^{3D}软件建立煤岩组合块体超低摩 擦效应模型。模型由5块不同岩性的岩块竖直叠放 而成,其中,由上至下的第3块体为工作块体,岩 性为煤,顶板及底板岩块岩性为砂岩。块体尺寸 为100 mm×100 mm×100 mm,各块体划分为10×5× 8 个网格,之间设置接触面。煤岩组合块体超低摩 擦效应数值模型与监测点位置,如图2所示。工作 块体在水平和垂直双向冲击作用下,极易发生超 低摩擦效应。采集监测点数据信息,以观察煤块 及煤-岩接触面的超低摩擦效应变化规律。监测点 1、2 设置在煤-岩接触面上下两侧,监测点3 设置 在煤块形心处。



Fig. 2 Diagram of the numerical simulation model

冲击载荷通过 Herz 理论将冲击能转化为作用 时间为 t₀ 的半正弦形式作用力施加在模型顶部砂 岩块体形心位置。为验证采用数值模拟方法的有 效性,根据参考文献 [19] 超低摩擦效应实验研 究中块体模型所受冲击能量的取值范围 9~55 mJ,

表1 模型力学参数

Table 1 Relevant mechanical parameters of the numerical

simulation model

砂岩		煤			
参数名称	取值	参数名称	取值		
密度/(g/cm ³)	2.80	密度/(g/cm ³)	1.38		
抗拉强度/MPa	11.12	抗拉强度/MPa	0.15		
粘聚力/MPa	5.87	粘聚力/MPa	1.25		
内摩擦角/(°)	53.05	内摩擦角/(°)	32.00		
泊松比	0.11	洎松比	4.90		
弹性模量/GPa	50.80	弹性模量/GPa	2.10		

为水平冲击和垂直冲击均设定了 5 组数值模拟方案,其冲击能分别为 10 mJ、30 mJ、50 mJ、70 mJ 和 90 mJ。结合实际开采中煤岩体临界工作面受弱围压作用,对模型 y 向施加双侧围压作用,围压大小分别为 0 MPa、1 MPa、2 MPa 和 3 MPa。

1.3 可行性验证

对煤岩组合块体施加垂直和水平双向冲击作 用,得到工作块体水平位移振动曲线。根据数值 模拟曲线与参考文献 [20-21]中实验所得水平位 移振动曲线对比图(图3)可知,此数值模拟结果 与已有实验所得水平位移振动曲线在数值大小并 不完全相同,但具有相同的变化趋势。水平位移 变化形式均类似于准周期的正弦曲线,幅值逐渐



减小,最终达到平衡。因此,从实验结果与理论 值对比分析角度,验证了文中所建理论模型的正 确性。由于数值模拟与超低摩擦实验条件存在局 限性,实验时难以保证与文中所建立的模型中各 项参数取值完全相同,数值模拟结果与文献中的 实验结果在数值上存在差异性,但整体变化趋势 相同,验证了文中数值模拟模型的合理性。

2 垂直冲击与围压共同作用影响 分析

由于受人工采掘,临近工作面煤岩体受弱围 压作用时,若遇冲击载荷强扰动,易发生超低摩 擦效应,最终诱发如冲击地压、岩爆、工程性地 震等一系列动力工程灾害,因此,研究围压作用 对揭示超低摩擦效应机理具有重要意义。

(1) 煤块水平位移

块体在围压与垂直冲击共同作用时运动状态 发生改变,块体振动过程中,当水平残余位移、 水平位移峰值最大时,块体超低摩擦效应最为显 著。随围压增加,块体振动更剧烈,水平位移峰 值增大。

根据 50 mJ 垂直冲击作用时,不同围压条件下 煤块的水平位移曲线(图 4)可知,块体在垂直冲 击作用下,振动过程中水平位移增加幅度减小, 逐渐稳定于新平衡位置并产生残余位移。

工作块体在垂直冲击作用下,竖直方向上发 生周期性"上下"振荡。围压增加,使得煤块中 释放的能量大于自身所消耗的能量,煤块水平方 向上发生瞬时移动,煤块水平位移达到峰值。当 围压由 0 MPa 依次增加到 1 MPa、2 MPa、3 MPa 时,工作块体水平位移峰值依次为 3.20 µm、 3.36 µm、3.61 µm、3.87 µm。围压越大,块体水 平位移峰值越大;说明煤块内部释放的能量越多, 块体水平方向越易产生滑移,超低摩擦效应俞为 显著。

当围压由 0 MPa 依次增加到 1 MPa、2 MPa、 3 MPa 时,水平位移峰值 拟合曲线为 y =3.1841 $e^{0.0639x}$,水平位移峰值依次增加 4.8%、 7.7%、6.9%;残余位移拟合曲线为 y =2.1272 $e^{0.1026x}$,残余位移依次增加 5.6%、8.7%、 19.4% (图 5)。 R^2 值可以反映趋势线的估计值与 数值模拟数据之间的拟合程度, R^2 值取值范围为



0~1, R² 值越大, 说明数值模拟结果的有效性越

高,反之亦然。由图 5 可知,水平位移峰值及残余 位移拟合曲线的 R² 值均大于 0.9,数值模拟结果 具有高可靠性。



图 5 工作块体残余位移、水平位移峰值与 围压关系曲线

Fig. 5 Curves of residual displacement, horizontal displacement peak and confining pressure of the working block

由此可知,受垂直冲击与围压共同作用的块体,水平位移峰值和残余位移随围压均呈指数关系增长。

(2) 加速度差值变化

在冲击强扰动情况下,块系岩体临界平衡条 件发生变化导致块体运动,块体间相对加速度发 生剧烈变化,当垂直加速度差值最大时,超低摩 擦效应强度最大。

模拟结果表明,受垂直冲击与围压共同作用 的块体,随围压增加,块体受迫振动阶段时间延 长,垂直加速度差值峰值增大。

从不同围压条件下(50 mJ 垂直冲击载荷作用 相邻块体2和3上监测点)垂直加速度差值变化曲 线图中可以看出(图6),岩块首先在动载作用下 产生了多次剧烈波动,随后骤变衰减为正弦波, 且有明显分界点,说明垂直冲击载荷作用下岩块 存在两种振动阶段,分别为受迫振动和自由振动 阶段。

不同围压下,工作块体垂直加速度差值均随 时间呈正弦曲线波动变化。但由于围压的存在, 使得工作块体垂直加速度差值在受迫振动阶段和 自由振动阶段出现明显的差异。当围压由 0 MPa 增加到 1 MPa (图 6),块体振动时间延长,受迫 振动时间由 3.65 ms 增加到 5.29 ms,自由振动时 间由 2.85 ms 增加到 4.68 ms,加速度峰值由 2.85 m/s²增加到 3.35 m/s²。垂直加速度峰值越 大,表明工作块体垂直方向振动越剧烈,法向力 越小,超低摩擦效应越强。因此可以得出结论:



图 6 不同围压下垂直加速度差值变化曲线 Fig. 6 Curves of vertical acceleration difference under different confining pressures

围压越大,煤岩组合块体超低摩擦效应越显著。

3 双向冲击与围压共同作用分析

3.1 仅受双向冲击作用

深部煤岩体所处地质环境复杂,加之开采过 程中由于受到爆破震动、周期来压等人工及机械 设备的不规则扰动,极易诱发冲击地压等动力型 灾害。其中周期来压是放顶煤开采过程中常见的 冲击扰动现象,具有周期短、冲击力大等特点。

根据残余位移随水平冲击、垂直冲击变化曲线(图 7a)可知,随垂直冲击增大,块体残余位移增大,以水平冲击 10 mJ 为例,当垂直冲击由 10 mJ依次增加到 30 mJ、50 mJ、70 mJ、90 mJ, 残余位移依次增长 159%、93.4%、73.8%、37.3%。在同一垂直冲击作用下,水平冲击由 10 mJ增加到 50 mJ,残余位移的变化并不明显。



Fig. 7 Curves of impact and residual displacement

由垂直冲击分别为 10 mJ、50 mJ 时,不同水 平冲击与残余位移关系曲线(图 7b)可知,受双 向冲击作用的块体残余位移随水平冲击增大而增 加,当块体受 10 mJ 和 50 mJ 垂直冲击作用时,残 余位移拟合曲线分别为 y=0.1084x+10.226, R² = 0.996, y=0.0492x+46.239, R²=0.9316。

3.2 双向冲击与围压共同作用

采深的增加会导致煤层底顶板压力增大,尤 其是开采空间附近、底板移近量增大,对煤层的 夹持作用更为明显,使得煤层积聚大量的变形能。 在外界冲击扰动作用下,煤层间的夹持作用减弱 甚至消失,煤层内弹性势能瞬间释放,遭到猛烈 的突出破坏。

模拟结果表明:

(1)受围压与双向冲击共同作用时,垂直冲击与水平冲击载荷大小不变,块体残余位移随围压增大而增加。

在不同围压条件下,10 mJ 与 50 mJ 垂直冲击 作用下煤岩体水平残余位移曲线图(图 8a、8b) 显示,煤岩体在同一垂直冲击载荷和水平冲击载 荷作用下,块体残余位移随围压增大而增大,超 低摩擦效应更明显。而在实际工程中岩爆在浅部 低围压处发生次数同样很少,岩爆发生的次数和 强度随开采深度增加而增大^[22]。



图 8 冲击、围压与残余位移关系曲线 Fig. 8 Curves of relation between impact, confining pressure and residual displacement

(2)受围压与双向冲击载荷共同作用时,垂 直冲击与水平冲击增大,残余位移增大,且垂直 冲击载荷是引起煤岩体超低摩擦效应的最主要 原因。

当煤岩体在同一垂直冲击载荷、同一围压作 用下(图8),块体残余位移随水平冲击载荷增大 而增大。而当块体在同一水平冲击、同一围压作 用下,块体所受的垂直冲击载荷由10 mJ增加到 50 mJ时,残余位移值显著提高,以煤岩体所受围 压1 MPa、10 mJ水平冲击为例,块体垂直冲击载 荷由10 mJ增加到50 mJ时,残余位移值由 0.89 μm增加到23.5 μm,且随着围压增加,残余 位移增长幅度变大。当煤岩体所受10 mJ垂直冲 击、1 MPa围压时,水平冲击由10 mJ依次增加到 30 mJ、50 mJ、70 mJ、90 mJ,工作块体残余位移 依次为1.03 μm、1.20 μm、1.46 μm、1.81 μm, 残余位移变化不明显。由此说明,垂直冲击对煤 岩体超低摩擦效应的影响更为显著。

根据煤岩组合体受不同围压作用时,50 mJ 水 平冲击与50 mJ 垂直冲击共同作用下的工作块体垂 直加速度差值变化曲线(图9)可知,受围压作用 块体垂直加速度差值曲线受迫振动与自由振动阶 段分界明显,随着围压增大,垂直加速度差值曲 线在受迫振动阶段极值点增多,振动频率加快。 当围压由1 MPa 增加到3 MPa时,块体受迫振动 时间由1.33 ms 增加到1.42 ms,垂直加速度峰值 由4.67 m/s² 增加到5.87 m/s²。由此可知,受双 向冲击与围压共同作用,煤岩组合体受迫振动时 间及垂直加速度差值峰值都随围压增加而增大, 煤岩组合块体超低摩擦效应强度增大。



图9 垂直加速度差值与围压关系曲线



4 讨论

深部开采条件下超低摩擦效应与冲击地压、 煤层突出等密切相关,而深部岩体处于"三高" 的复杂地质环境中使其具有了独特的块系等级构 造特性^[18]。钱七虎院士^[8]指出:"一般来说,由 于物理力学的原因,岩体位处越深,地应力越大, 岩块越小,结构面(裂缝)越多"。基于以上深部 开采条件下岩体特征,文章采用数值模拟手段, 开展煤岩组合块体弱围压下受垂直和水平冲击作 用时的超低摩擦效应特征参数变化规律研究。分 析得到,垂直冲击载荷是引起煤岩组合块体超低 摩擦效应增强的主要原因的结论,所得结论与地 震等现象中横波产生的破坏大于纵波的情况相一 致;也与李利萍等^[23]研究的垂直冲击作用是超低 摩擦效应发生的前提条件的结论相一致。深部块 系岩体尺寸大小、岩块侧面约束情况及块体接触 面的摩擦性质对深部岩体超低摩擦效应也具有重 要影响,针对上述因素的研究,文章尚存在不足, 因此在以后的研究工作中将重点分析上述因素对 超低摩擦效应的影响作用。

5 结论

采用数值模拟方法,以煤岩组合工作块体的 水平位移及垂直加速度差值为特征参数,利用 FLAC^{3D}模拟软件,对煤岩组合块体模型施加双向 冲击与围压作用,模拟分析围压及双向冲击载荷 对煤岩组合超低摩擦效应强度、作用时间等参数 的影响规律,获得了几点认识。

(1)煤岩组合块体在垂直冲击与围压作用下, 超低摩擦效应强度、作用时间随围压增加而增加。

(2)煤岩组合块体在双向冲击作用下,残余 位移随垂直冲击和水平冲击增加而增加,且残余 位移随水平冲击增大呈线性趋势增长,超低摩擦 效应强度增强。

(3)垂直冲击载荷是引起煤岩组合块体超低 摩擦效应增强的主要原因。

参考文献/References

- [1] KURLENYA M V, OPARIN V N. Problems of nonlinear geomechanics, Part I [J]. Journal of Mining Science, 1999, 35 (3): 216-230.
- [2] KURLENYA M V, OPARIN V N. Problems of nonlinear geomechanics. Part II [J]. Journal of Mining Science, 2000, 36 (4): 305-326.
- [3] KURLENYA M V, ADUSHKIN V V, OPARIN V N. Alternating reaction of rocks to dynamic action [J]. Doklady ANSSSR Geotechnics, 1992, 26 (2): 323-329.
- [4] KURLENYA M V, OPARIN V N, VOSTRIKOV V I. Effect of anomalously low friction in block media [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1999, 40 (6): 1116-1120.
- [5] KURLENYA M V, OPARIN V N, BALMASHNOVA E G, et

al. On dynamic behavior of "self-stressed" block media. Part I. One-dimensional mechanico-mathematical model [J]. Journal of Mining Science, 2001, 37 (1): 1-9.

- [6] RUTTER E H, HACKSTON A J, YEATMAN E, et al. Reduction of friction on geological faults by weak-phase smearing [J]. Journal of Structural Geology, 2013, 51: 52-60.
- [7] TARASOV B G, RANDOLPH M F. Frictionless shear at great depth and other paradoxes of hard rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45 (3): 316-328.
- [8] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题[C]//第230次香山科学会议:深部地下空间开发中的基础研究关键技术问题. 北京:[s. n.], 2004.
 QIAN Qihu. Key scientific problems in the development of deep underground space [C] //Proceedings of the 230th Science Conference on Xiangshan Mountain-Key Technical Problems in the Development of Deep Underground Space. Beijing: [s. n.], 2004. (in Chinese)
- [9] 王明洋,戚承志,钱七虎.深部岩体块系介质变形与运动特性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24 (16): 2825-2830.

WANG Mingyang, QI Chengzhi, QIAN Qihu. Study on deformation and motion characteristics of blocks in deep rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (16): 2825-2830. (in Chinese with English abstract)

- [10] 王明洋,周泽平,钱七虎.深部岩体的构造和变形与破坏问题[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):448-455.
 WANG Mingyang, ZHOU Zeping, QIAN Qihu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3):448-455. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王明洋,李杰,李凯锐. 深部岩体非线性力学能量作用原理与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34 (4):659-667.

WANG Mingyang, LI Jie, LI Kairui. A nonlinear mechanical energy theory in deep rock mass engineering and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (4): 659-667. (in Chinese with English abstract)

[12] 何满潮,王炀,刘冬桥,等.基于二维数字图像相关技术的块系花岗岩超低摩擦效应实验研究[J].煤炭学报,2018,43 (10):2732-2740.
HE Manchao, WANG Yang, LIU Dongqiao, et al. Experimental study on ultra-ow friction effect of granite block based on two-limensional digital image correlation technique [J]. Journal of China Coal Society, 2018,43 (10):2732-2740. (in Chinese

with English abstract)

- [13] 李杰,蒋海明,王明阳,等. 爆炸与冲击中的非线性岩石力 学问题(II)冲击扰动诱发岩块滑移的物理模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(2):291-301.
 LI Jie, JIANG Haiming, WANG Mingyang, et al. Nonlinear mechanical problems in rock explosion and shock. Part II: physical model test on sliding of rock blocks triggered by external disturbance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2):291-301. (in Chinese with English abstract)
- [14] 潘一山,王凯兴.岩体间超低摩擦发生机理的摆型波理论
 [J].地震地质,2014,36 (3):833-844.
 PAN Yishan, WANG Kaixing. Pendulum-Type waves theory on the mechanism of anomalously low friction between rock masses

[J]. Seismology and Geology, 2014, 36 (3): 833-844. (in Chinese with English abstract)

- [15] 蓝一凡. 深埋洞室超低摩擦型岩爆发生机制与定量预测
 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
 LAN Yifan. The Occurrence mechanism of anomalously low friction-type rockburst and its quantitative prediction in deep caverns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [16] 谭维佳,代贞伟,陈云霞,等. 三峡库区反倾岩质滑坡防治 措施研究 [J]. 地质力学学报,2017,23 (1):78-87.
 TAN Weijia, DAI Zhenwei, CHEN Yunxia, et al. Study on control measures of counter-tilt rock landslide in three gorges reservoir region [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (1):78-87. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈学军,余思喆,宋字,等.采矿爆破振动波在岩溶区的传播影响因素分析 [J].地质力学学报,2018,24 (5):692-698.
 CHEN Xuejun, YU Sizhe, SONG Yu, et al. Analysis of factors influencing the propagation of mining blasting vibration wave in karst area [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24 (5):692-698. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李利萍,潘一山,王晓纯,等.开采深度和垂直冲击荷载对超低摩擦型冲击地压的影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2014,33 (S1):3225-3230.
 LI Liping, PAN Yishan, WANG Xiaochun, et al. Influence analysis of exploit depth and vertical impact load on anomalously low friction rock burst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (S1): 3225-3230. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王德荣,陆渝生,冯淑芳,等.深部岩体动态特性多功能试验系统的研制 [J].岩石力学与工程学报,2008,27 (3):601-606.
 WANG Derong, LU Yusheng, FENG Shufang, et al. Development of Multipurpose test system for dynamic Behaviors

Development of Multipurpose test system for dynamic Behaviors of deep Rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (3): 601-606. (in Chinese with English abstract)

- [20] OPARIN V N, BALMASHNOVA E G, VOSTRIKOV V I. On dynamic behavior of "self-stressed/" block media. Part II: comparison of theoretical and experimental data [J]. Journal of Mining Science, 2001, 37 (5) 455-461.
- [21] 王洪亮, 葛涛, 王德荣, 等. 块系岩体动力特性理论与实验 对比分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (5): 951-958.

WANG Hongliang, GE Tao, WANG Derong, et al. Comparison of theoretical and experimental analyses of dynamic characteristics of block rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (5): 951-958. (in Chinese with English abstract)

[22] 李长洪, 蔡美峰, 乔兰, 等. 岩石全应力-应变曲线及其与岩爆关系 [J]. 北京科技大学学报, 1999, 21 (6): 513-515.

LI Changhong, CAI Meifeng, QIAO Lan, et al. Rock complete stress-strain curve and its relationship to rock burst [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999, 21 (6): 513-515. (in Chinese with English abstract)

[23] LI L P, LI W J, TANG J P, et al. Influence of bidirectional impact loading on anomalously low-friction effect in block rock media [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 9156304.