

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.01.19

考虑弹性核作用下的冲击地压形成机理模型试验

许海亮, 孙金斗, 覃吉宁, 任合欢
(北方工业大学土木工程学院, 北京 100144)

摘要: 使用 CCD 相机搭建实验图像数据采集系统, 采用花岗岩模拟坚硬顶底板、红砂岩模拟软岩层组合成岩层结构, 近似还原顶板来压过程中软岩层的变形破坏过程, 研究帮部“弹性核”对冲击地压至灾的影响机制。研究结果表明: (1) 上覆顶板来压时, 可将软岩层划分为塑性破坏区、弹性承压区、原岩应力区, 弹性承压区易形成较大的弹性核。 (2) 软岩层变形能在弹性承压区大幅度积累, 其积累过程是波动式上升的; 在峰值荷载前, 变形能积累和释放的频率加快; 达到峰值荷载时, 弹性承压区变形能存在明显的释放过程。 (3) 冲击地压发生时, 塑性破坏区冲击并反作用于临近岩体使其短暂收缩。 (4) 冲击地压是一个渐进性的过程; 一方面, 由于水平约束的消失, 弹性承压区的受力状态由水平方向受约束的压缩状转入单轴压缩态, 导致其承载能力减弱; 另一方面, 承载区面积快速减小, 导致软岩层承压区域承担的竖向荷载突增; 两者共同作用导致冲击地压出现渐进性的冲击和破坏。

关键词: 冲击地压; 弹性核; 变形能密度; 数字散斑相关方法

中图分类号: TD324

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)01-0120-07

Experimental study on development mechanism of coal bump considering the elastic core effect

XU Hailiang, SUN Jindou, QIN Jining, REN Hehuan
(School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Construction of experimental image data acquisition system with CCD camera. Granite and Red sandstone were used to simulate strata structure. The granite was used to simulate Hard-Roof and Red sandstone was used to simulate soft rock. Restore deformation and failure process of soft rock strata during roof weighting to research the effect of elastic core. The results show that: (1) When the roof weighting, soft rock strata can be divided into plastic yield areas, elastic confined zone and natural stress zone. The elastic confined zone easy to form elastic core. (2) Lots of energy can be accumulate in elastic confined zone, and the deformation energy of elastic confined zone is fluctuating growth. Before peak load, the fluctuation frequency of deformation energy is increased. Deformation energy have obvious release process when the peak load is reached. (3) When the coal bump occurs, plastic yield areas lash and cause neighbouring mass contract. (4) Coal bump is a gradual process. The fade of horizontal constraints result the stress state get into uniaxial compression state and weaken the bearing capacity. The reduce of bearing area cause vertical load sudden increase. Progressive failure of coal bump is a combination of two aspect.

Keywords: coal bump; elastic core; deformation energy density; digital speckle correlation method

收稿日期: 2019-05-10; 修订日期: 2019-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51474013)

第一作者: 许海亮(1978-), 男, 河北易县人, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学试验研究方面的工作。E-mail: xuhailiang@ncut.edu.cn

通讯作者: 孙金斗(1995-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事岩石力学试验研究方面的工作。E-mail: 18811755416@163.com

0 引言

冲击地压是发生在煤矿井开采过程中的典型动力灾害,大量工程实践证明^[1-6],上覆岩层压力与顶板断裂等导致的垂直载荷极易引起冲击地压、矿震等灾害。实际工程中,冲击地压发生由多种因素共同导致,且其发生毫无预兆性,难以监测其发生的时空演化规律。因此,通过室内试验近似还原其发生过程,揭示冲击地压发生的时空演化过程,对工程及地质灾害的预测预警具有一定的理论和实践价值。

冲击地压的孕灾及致灾机理十分复杂,国内外学者针对冲击地压进行了大量的研究工作,并提出了一系列重要理论。如在冲击地压早期研究中具有代表性的强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向性理论^[7],以及其后变形失稳理论^[8-9]、“三准则”机理^[10]、“三因素”机理^[11]、强度弱化减冲机理^[12]。不同学者从不同角度对冲击地压进行了研究,提出了不同的理论,推动了冲击地压发生研究进程。但目前的理论研究相对抽象,还缺乏和地下工程结构的相结合,很难和冲击地压发生后的现象相互佐证,如冲击地压发生后煤层顶底板并不发生明显的破坏和变形,而煤层却发生破坏和整体移出,在煤层和顶板之间存在明显的滑动擦痕和离层^[11]。而已有的研究指出,在顶板来压过程中,由煤壁至深处将形成破坏区、弹性承压区和原岩应力区,该划分方法虽相对理想化,但煤体深部具有可释放的变形能的事实是毋庸置疑的^[13-15]。

通过上述问题及分析,本文从煤体帮部弹性承压区释放变形能推动塑性破坏区向采空区滑移的角度出发,设计专项试验。选用一种花岗岩和一种红砂岩,由两种岩石试件组合还原岩层结构模型,采用单轴压缩加载方式模拟顶板来压过程,分析煤岩层变形及破坏的演化规律,还原弹性承压区的能量积累和释放的过程,分析了软岩层的变形破坏过程及能量时空演化规律。

1 试验过程

1.1 试验设计及实验模型

煤体开采后形成采空区,随着工作面持续推进,煤岩层长度逐渐减小,其所承载荷载均值逐渐增加,在所承载荷载增加过程中,煤岩侧壁出现片帮或冲击,如图1(a)所示。由此,通过试验还原冲击地压的关键首先在于形成煤体开挖后的结构形式,其次,顶底板岩层与煤岩层之间应存在合理的岩性差异。基于上述需求,

完成试验模型的搭建,如图1(b)所示。

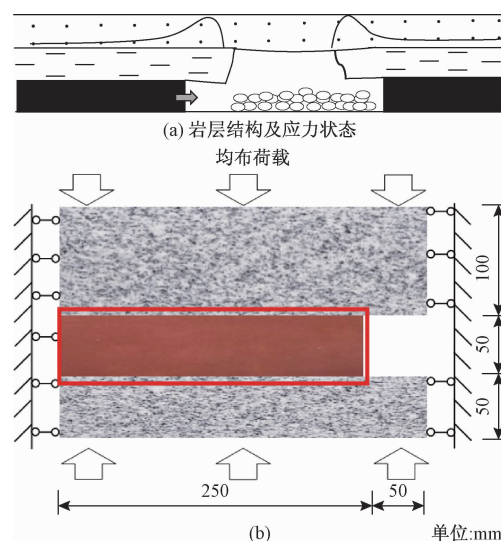


图1 力学模型及实验模型图

Fig. 1 Experimental model and size

模型为上、中、下三层岩石组成的层状结构,其中上层和下层岩石为花岗岩,模拟顶底板,其弹性模量约为 101.29 GPa,泊松比约为 0.27。中间层为红砂岩,模拟软岩层(煤层),其弹性模量 58.07 GPa,泊松比约为 0.32。

结合试验机大小及采空区对周围岩体的影响范围^[16],使用的模型尺寸如下:

顶板层尺寸为 300 mm × 100 mm × 50 mm;底板尺寸为 300 mm × 50 mm × 50 mm;软岩层尺寸为 250 mm × 50 mm × 50 mm,软岩层部分为本文的兴趣区域。

实验模型的边界和加载条件为:模型左侧边界施加水平方向的位移约束;模型右侧边界,仅对顶底板岩层施加水平位移约束。使用 RLJW-2000 液压伺服试验机分别在顶、底板岩层的上、下表面施加垂直方向的压力。本次实验中采用位移控制加载方式,加载速率为 0.25 mm/min;使用 CCD 相机搭建图像采集系统,图像采集速度为 5 帧/s,图像分辨率为 1600pixel × 1200pixel,物面分辨率为 0.2 mm/pixel。

实验时首先制作实验模型的散斑场,其中花岗岩试块使用天然散斑场,红砂岩试块采用黑白珍珠漆喷涂采集面制作人工散斑场;然后,在试验机上组装实验模型并施加预压;最后,对加载系统和图像采集系统进行对时确保压机与图像采集的时间一致性,开始加载同时开启图像采集。

1.2 试验结果

在相同加载方式下对实验模型上、中、下层岩石材

料性质进行研究,测定试块基本参数,每种岩石材料进行三组实验,其强度试验结果如表 1 所示。模型试验共进行了 4 组,绘制花岗岩、红砂岩及模型试件的加载曲线如图 2(a)所示,选取典例的试验破坏图像如图 2 所示。

表 1 材料强度表

Table 1 The properties of materials

序号	峰值应力/MPa	平均强度/MPa
红砂岩 1 [#]	55.23	
红砂岩 2 [#]	64.88	59.07
红砂岩 3 [#]	67.11	
花岗岩 1 [#]	108.28	
花岗岩 2 [#]	92.46	101.29
花岗岩 3 [#]	103.13	

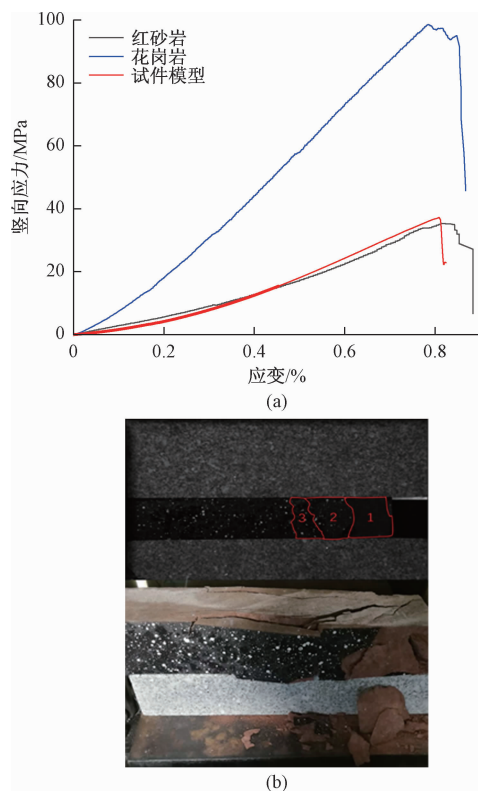


图 2 试件散斑及破坏图像

Fig. 2 The destroy image of text model

模型试件出现破坏时,1 号区域首先出现强烈的冲击,2、3 号区域向右侧采空区方向依次发生冲击且强度逐渐减弱。

2 试验结果分析

绘制 4 组实验中的压机曲线,并选取较为典型的压机曲线作为典例进行分析如图 3 所示。

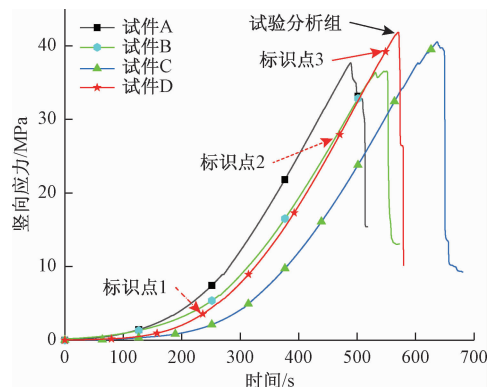


图 3 模型加载曲线

Fig. 3 The loading curve of text model

2.1 软岩层应变场分析

利用数字散斑技术,计算软岩层在加载过程中的竖向、水平方向应变场分布情况并绘制标识点 1-3 时刻(图 3)的应变场等值线云图,如图 4 所示。

由图 4 可知,在上覆岩层荷载较小时,软岩层水平、竖直方向应变基本呈现均匀分布;在上覆岩层荷载逐渐增大过程中,在采空区一侧的竖向压应变、水平拉应变的量值增大,最终在采空区一侧形成了竖直方向受压、水平方向受拉的局部化带^[17-18],从能量角度讲可将其解释为弹性核。

分析认为,顶板来压后,软岩层开始均匀受载,由于软岩层侧壁附近存在临空面,易产生变形,导致其承载能力较差,顶板开始向两帮深处寻找更为坚实的承载区,使得软岩层侧壁至深部,逐渐形成塑性区、弹性承压区、原岩应力区(图 4(a)标识点 3)。随着顶板来压逐渐增加,软岩层侧壁附近的塑性区逐渐失效,弹性区范围逐渐向软岩层深部介质延伸,弹性区介质在顶底板夹持及左右相邻介质的约束下,竖向承载能力远大于软岩层侧壁,使得荷载无法继续向软岩层深部传递;当顶板来压增大到一定量值时,弹性承压区扩容效应、压胀效应逐渐显现,弹性区介质承载能力达到极限,软岩层介质发生强烈的冲击,相邻介质依次发生破坏和冲击,最终形成结构性失稳和破坏。

2.2 软岩层弹性变形能演化分析

由前节分析可知,在顶板来压过程中,软岩层不同位置的应变分布存在较大的差异且极易积累弹性应变。变形能密度指标综合考虑了应力、应变关系,故本节考虑使用变形能密度指标分析软岩层的变形能时空演化规律。其计算公式如下:

$$U = \frac{E}{2}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 - 2\nu\varepsilon_1\varepsilon_2) \quad (1)$$

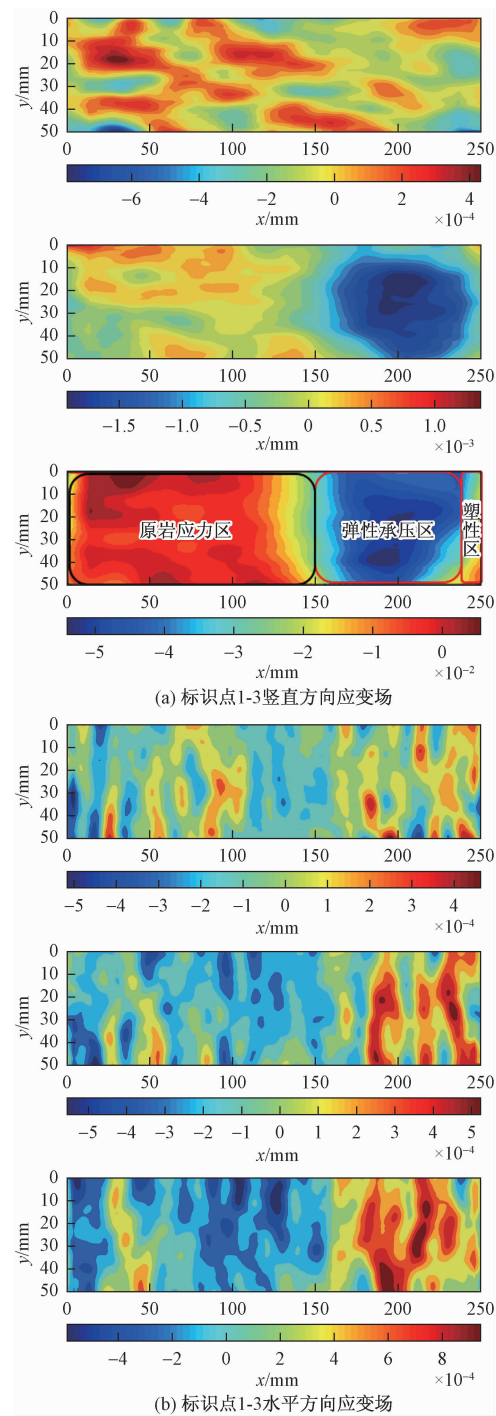


图 4 软岩层竖直、水平方向应变场

Fig. 4 The vertical and horizontal strain field of Soft rock

式中： U ——变形能密度；
 E ——软岩层试件的弹性模量；
 ν ——软岩层试件的泊松比；
 ε_1 ——软岩层试件表面的第一主应变；
 ε_2 ——软岩层试件表面的第二主应变。
将软岩层划分为 250×50 个计算微单元，同列 50

个微单元组合成 1 个条带单元，自左至右总计划分为 250 个条带单元，沿弱层围岩水平方向建立横坐标图如图 5(a) 所示，以条带单元变形能密度量值为纵坐标，绘制标识点 1-3 时刻（图 3）的变形能密度空间分布状态，如图 5(b) 所示。

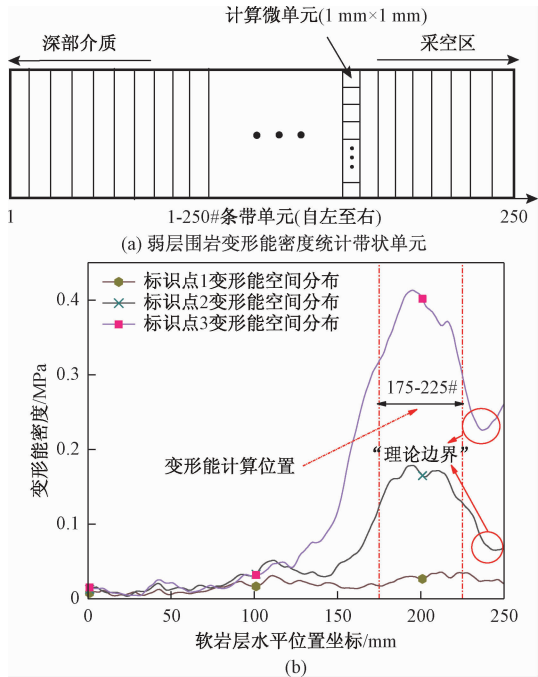


图 5 软岩层变形能空间分布

Fig. 5 The distribution of deformation energy of soft rock

由图 5 可知，在加载初期，变形能密度量值较小且基本呈现均匀分布；在顶板来压的过程中，采空区附近的变形能的增量开始逐渐大于原岩应力区；且软岩层侧壁和较深部介质之间的位置逐渐演化出变形能的极小值，较深部的变形能量值继续增加直至破坏。

分析认为，顶板来压量值较小时，弱层围岩均匀受载且变形较小，故其变形能密度基本保持一致且量值差异较小；在顶板压力增长过程中，一方面，顶底板对软岩层夹持作用逐渐增大，软岩层在采空区附近的介质出现应变集中，故变形能量值较其他区域较大；另一方面，软岩层侧壁附近存在临空面，约束弱、承载力差，不能承担较大的竖向荷载，故在其和相邻介质之间出现极小值。从能量角度讲，极小值附近亦是塑性区和弹性区划分的“理论边界”。

选择弹性承压区 175-225#条带单元（图 5(b)），进一步分析其弹性变形能随时间演化特征并绘图，如图 6 所示。

由图 6 可知，在顶板来压较小时（0 ~ 200 s），软岩层弹性承压区变形能量值较小，在顶板压力增加过程

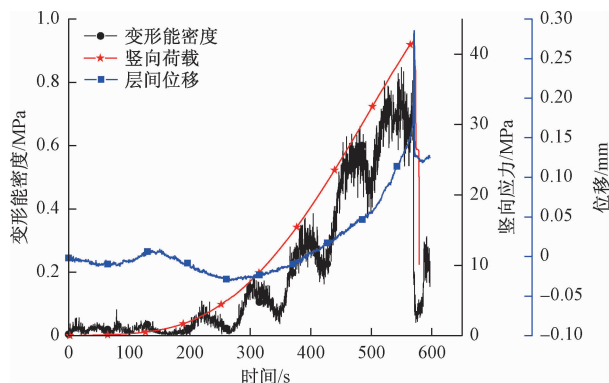


图6 弹性承压区变形能演化曲线

Fig. 6 The evolution deformation energy of elastic confined zone

中(200~520 s),变形能波动式上升,在加载峰值前(520~568 s),变形能出现明波动频率加快且量值无明显增幅;在加载峰值时(570 s),弹性承压区变形能快速降低。

分析认为,软岩层弹性承压区在顶板压力增加过程中,变形能呈现波动式上升而非线性增长主要是由于软岩层存在变形传导和能量传递,在水平方向上产生了向采空区一侧的位移,导致其变形能存在积累后再次释放的过程;在加载峰值前(520~560 s),弹性承压区的部分介质进入塑性变形阶段,承载能力减弱,向采空区一侧滑移速度加快,故其变形能量值波动频率加快;在加载峰值(570 s),弹性承压区位置的变形能出现明显的释放过程,推动相邻介质加速滑移,加快软岩层破坏进程。

2.3 软岩层冲击过程相互作用

峰值荷载时软岩层介质出现了剧烈的冲击,为分析其冲击过程中各部分的相互作用,计算由试件最终的破坏形态划分的1、2、3号区域(图2)水平位移量值结合加载曲线绘图,如图7所示。

由图7可知,在顶板压力较小时(0~380 s),软岩层各区块的水平位移基本保持不变,在顶板来压过程中(380~560 s),1、2、3号区域的水平位移量值开始出现差异,1号区域向采空区一侧滑移速度最快,2、3号区域依次递减;上覆岩层荷载达到峰值应力的98%时(568 s),1号区域加速向采空区方向滑移,最终形成冲击。同时可以看出其作用于2、3号区域向左侧短暂收缩,形成强度较弱的冲击;软岩层介质出现材料破坏后,最终形成结构性失稳破坏。

分析认为,在软岩层冲击过程中,弹性承压区逐步释放能量并向两侧发生挤压,导致1、2、3号区域出现

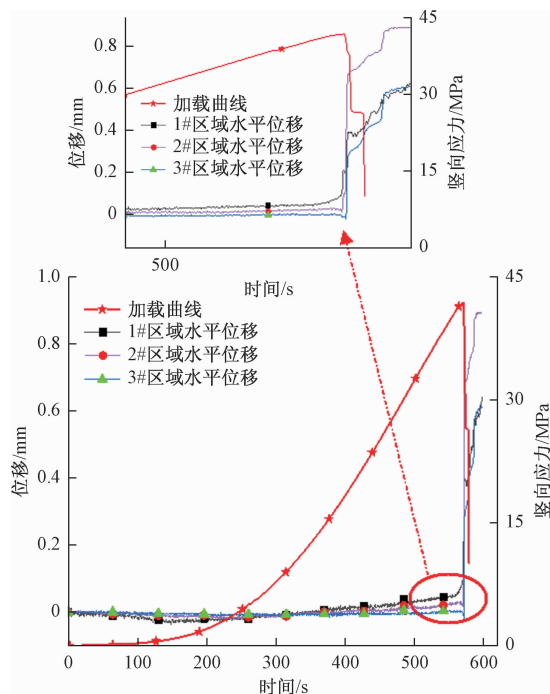


图7 突出区域水平位移曲线

Fig. 7 The horizontal displacement of destruction area

滑动现象。其位移差异主要是由约束条件的不同导致的,一方面,岩层界面附近的约束能力强于软岩层中间位置,另一方面,深部介质的约束能力大于浅部围岩,两者共同作用下,使得在临空面附近的介质最先形成“反C”型突出。突出产生时,向采空区一侧加速滑动,由于相邻介质提供其冲击力源,导致未突出部分向相反方向短暂收缩;同时,较深部软岩层介质在临近采空区一侧的水平方向约束消失,其受力状态由带有水平方向约束的受压状转入单轴压缩状态,承载能力大幅度削减;另一方面,承载区面积迅速减小,导致其单位面积介质所受荷载突增,造成其更大范围的介质破裂,形成渐进性的冲击和破坏。

3 结论

使用CCD相机和万能试验机搭建实验平台,使用花岗岩及红砂岩组合成地层结构模型,进行单轴加载实验,实验结果显示其变形及运动规律与实际工程相符,可近似还原冲击地压的致灾孕灾过程,对冲击地压孕灾致灾的演化过程进行了应变场、能量演化、冲击过程相互作用的相关分析,得出以下结论:

(1)上覆顶板来压时,可将软岩层划分为塑性破坏区、弹性承压区、原岩应力区,弹性承压区易形成较大的弹性核。

(2) 软岩层变形能在弹性承压区大幅度积累,其积累过程是波动式上升的;在峰值荷载前,变形能波动频率加快;达到峰值荷载时,弹性承压区变形能存在明显的释放过程。

(3) 冲击地压发生时,突出体发生冲击并反作用于临近岩体使其短暂收缩。

(4) 冲击地压是一个渐进性的过程;一方面,由于水平约束的消失,弹性承压区的受力状态由水平方向受约束的压缩状转入单轴压缩态,导致其承载能力大幅度减弱;另一方面,承载区面积快速减小,导致软岩层承压区域承担的竖向荷载突增;两者共同作用导致冲击地压出现渐进性的冲击和破坏。

参考文献:

- [1] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].岩石力学与工程学报,2003(11):1844-1851. [PAN Y S, LI Z H, ZHANG M T. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(11):1844-1851. (in Chinese)]
- [2] 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 Y D, ZHAO Y X. State of the art; Investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2188-2204. (in Chinese)]
- [3] 刘长友,黄炳香,孟祥军,等.超长孤岛综放工作面支承压分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2007(增刊1):2761-2766. [LIU C Y, HUANG B X, MENG X J, et al. Research on abutment pressure distribution law of overlength isolated fully-mechanized top coal caving face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007 (Suppl):2761-2766. (in Chinese)]
- [4] 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(16):2803-2813. [HE M C, XIE H P, PENG S P, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(16):2803-2813. (in Chinese)]
- [5] 张晓春,缪协兴,翟明华,等.三河尖煤矿冲击矿压发生机制分析[J].岩石力学与工程学报,1998(5):30-35. [ZHANG X C, LIAO X X, ZHAI M H, et al. Analysis on rockburst mechanism in Sanhejian coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998(5):30-35. (in Chinese)]
- [6] 潘俊锋,毛德兵,蓝航,等.我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2013,41(6):21-25. [PAN J F, MAO D B, LAN H, et al. Study status and prospects of mine pressure bumping control technology in China [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6):21-25. (in Chinese)]
- [7] 齐庆新,彭永伟,李宏艳,等.煤岩冲击倾向性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊1):2736-2742. [QI Q X, PENG Y W, LI H Y, et al. Study of bursting liability of coal and rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Suppl):2736-2742. (in Chinese)]
- [8] 齐庆新,史元伟,刘天泉.冲击地压粘滑失稳机理的实验研究[J].煤炭学报,1997(2):34-38. [QI Q X, SHI Y W, LIU T Q. Mechanism of instability caused by viscous sliding in rock burst [J]. Journal of China Coal Society, 1997(2):34-38. (in Chinese)]
- [9] LIPPMANN H,张江,寇绍全.关于煤矿中“突出”的理论——对慕尼黑工业大学矿业力学研究的介绍(特约稿)[J].力学进展,1990(4):452-467. [LIPPMANN H, ZHANG J, KOU S Q. The theory of bumps in coal mines: An introduction to the study of Mining Mechanics at the T. U. Munich, F. R. Germany (Invited) [J]. Advances in Mechanics, 1990(4):452-467. (in Chinese)]
- [10] 李玉生.冲击地压机理及其初步应用[J].中国矿业学院学报,1985(3):42-48. [LI Y S. Rock burst mechanism and its preliminary application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985(3):42-48. (in Chinese)]
- [11] 齐庆新,刘天泉,史元伟,等.冲击地压的摩擦滑动失稳机理[J].矿山压力与顶板管理,1995(增刊1):174-177. [QI Q X, LIU T Q, SHI Y W, et al. Mechanism of friction sildingestability of rock burst [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 1995 (Suppl):174-177. (in Chinese)]
- [12] 窦林名,陆莱平,牟宗龙,等.冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J].煤炭学报,2005(6):690-694. [DOU L M, LU C P, MOU Z L, et al. Intensity weakening theory for rock burst and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2005(6):690-694. (in Chinese)]
- [13] 周光文,刘文岗,姜耀东,等.采场冲击地压的能量积聚释放特征分析[J].采矿与安全工程学报,2008(1):73-77. [ZHOU G W, LIU W G, JIANG Y D, et

- al. Characteristics of energy accumulation and release of rock outburst in mining face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008 (1): 73 - 77. (in Chinese)]
- [14] 姚精明,何富连,徐军,等. 冲击地压的能量机理及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(3):808 - 813. [YAO J M, HE F L, XU J, et al. Energy mechanism of rock burst and its application [J]. Journal of Central South University (Science and Technology)2009,40(3):808 - 813. (in Chinese)]
- [15] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报,2014,39(2):205 - 213. [JIANG Y D, PAN Y S, JIANG F X, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(2):205 - 213. (in Chinese)]
- [16] 李新元,马念杰,钟亚平,等. 坚硬顶板断裂过程中弹性能量积聚与释放的分布规律[J]. 岩石力学与工程学报,2007(增刊1):2786 - 2793. [LI X Y, MA N J, ZHONG Y P, et al. Storage and release regular of elastic energy distrubution in tight roof fracturing[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007 (Suppl):2786 - 2793. (in Chinese)]
- [17] 宋义敏,马少鹏,杨小彬,等. 岩石变形破坏的数字散斑相关方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(1):170 - 175. [SONG Y M, MA S P, YANG X B, et al. Experimental investigation on failure of rock by digital speckle correlation methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(1):170 - 175. (in Chinese)]
- [18] 杨小彬,宋义敏,赵同彬. 岩石变形破坏演化力学分析[M]. 北京:煤炭工业出版社,2016:47 - 54. [YANG X B, SONG Y M, ZHAO T B. Mechanics analysis of deformation and failure of rock [M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,2016:47 - 54. (in Chinese)]

(上接第 112 页)

- [5] 龙建辉,郭文斌,李萍,等. 黄土滑坡滑带土的蠕变特性[J]. 岩土工程学报,2010,32(7):1023 - 1028. [LONG J H, GUO W B, LI P, et al. Creep property of soil in sliding zone of loess landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1023 - 1028. (in Chinese)]
- [6] 杨爱武,孔令伟,张先伟. 吹填软土蠕变过程中颗粒与孔隙演化特征分析[J]. 岩土力学,2014,35(6):1634 - 1640. [YANG A W, KONG L W, ZHANG X W. Analysis of evolution of particles and pores in creep process of dredger fill soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1634 - 1640. (in Chinese)]
- [7] 王来贵,李磊,刘学,等. 基于岩石长期稳定性的工程寿命预估研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(3):97 - 100. [WANG L G, LI L, LIU X, et al. Life expectation of an rock engineered slope based on the long-term stability [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(3): 97 - 100. (in Chinese)]
- [8] 孙森军,唐辉明,王潇弘,等. 蠕动型滑坡滑带土蠕变特性研究[J]. 岩土力学,2017,38(2):385 - 391. [SUN M J, TANG H M, WANG X H, et al. Creep properties of sliding-zone soil from a creeping landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 385 - 391. (in Chinese)]
- [9] LI C, TANG H M, HAN D W, et al. Exploration of the creep properties of undisturbed shear zone soil of the Huangtupo landslide[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(2): 1237 - 1248.
- [10] 范意民,张静薇,杨建英,等. 三峡水库区云阳县西城滑坡蠕变研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(1):32 - 35. [FAN Y M, ZHANG J W, YANG J Y, et al. The research of prophase slope creeping motion of Xicheng landslide in Yunyang County of Three Gorges project area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(1): 32 - 35. (in Chinese)]
- [11] WP,WLI. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide [J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1995, 52(1): 75 - 78.
- [12] 段钊. 黄土滑坡触发机理研究[D]. 西安:长安大学,2013. [DUAN Z. Study on the trigger mechanism of loess landslide[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)]