

文章编号: 0253-9993(2010)01-0031-06

复杂环境下围岩变形大型三维模拟实验

来兴平^{1,2}, 伍永平^{1,2}, 曹建涛^{1,2}, 樊永宁^{1,3}, 张燕丽^{1,2}, 崔峰^{1,2}

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 神华宁夏煤业集团有限公司, 宁夏 银川 750002)

摘 要: 以宁夏宁东矿区复杂环境(历史性强震区内破碎围岩与富含水)下围岩局部化变形演化规律为目标, 综合分析地球物理特征、加载框架及其力学性能、围岩变形指标与定量识别方法、围岩结构与缺陷以及相似模拟材料复合特性等, 构建了三维物理模拟装置与“声-光-电”多元指标实时测试系统, 完成了恒定与可变围压下的“动-静”耦合加载实验, 对围岩局部化损伤的声发射特征规律与开采扰动下实验模型中扰动区内岩体径向和切向应力分布进行辨识。结果表明: 复杂岩体破裂与变形经历“振荡-沉寂”后, 极有可能会出持久性破坏, 进一步揭示了复合煤岩体变形具有局部化失稳特征。

关键词: 围岩变形; 三维物理模拟; 局部化变形; “声-光-电”多元指标; 变加载模式
中图分类号: TD315.3 **文献标志码:** A

Experiment on rock-mass deformation of large scale 3D-simulation in complex environment

LAI Xing-ping^{1,2}, WU Yong-ping^{1,2}, CAO Jian-tao^{1,2}, FAN Yong-ning^{1,3}, ZHANG Yan-li^{1,2}, CUI Feng^{1,2}

(1. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mines and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3. Shenhua Ningxia Coal Group Ltd., Yinchuan 750002, China)

Abstract: Aimed at quantitatively prediction the process of rock-mass localized deformation regularity and their relating indicators of Nindong coal region in broken rock-mass induced historical seismicity and rich water environment, and comprehensive analyzed geophysical characteristics, loading framework and its mechanical performance, invalid indicators of rock-mass deformation and their quantitative discrimination methods, structure and flaw and characterization of simulative material, etc., the largest scale 3D physical simulative assembly was constructed with integrated real-time monitoring system of multi-acoustics-optics-electricity-indicators, and experiment was undertaken with the constant and variable static-dynamical loading model. The acoustic emission(AE) characteristics and their regularity relating to rock-mass localized fracture were acquired, and distributing characteristics of radial and tangential stress in excavation disturbance were statistically and comparatively discriminated. The results obviously indicate that the durable damage and deformation may bring potentially after the crack and deformation of complex rockmass undergo oscillatory and quietness. Even the characteristics will be found upon localized destabilization of composite coal and rockmass.

Key words: rock-mass deformation; 3D-physical-simulation; localization deformation; acoustics-optics-electricity multi-indicators; variable loading model

岩体受外荷载后产生局部化变形易诱发灾害^[1-2]。西部地质力学环境复杂, 地下工程穿越断层

带或者节理断裂带时易引起局部滑移和动力失稳^[3]。在围岩介质破坏与失稳前兆预测中, 局部化

收稿日期: 2009-03-28 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772144, 10402033); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-972)

作者简介: 来兴平(1971—), 男, 宁夏平罗人, 教授, 博士生导师。E-mail: lxptest@yahoo.com.cn

损伤-破裂-失稳源观测是难题,在信号辨识中易忽略岩体局部化变形“可识别特征”信息及其内在关联特征^[4-5]。岩体局部能量瞬态释放弹性波现象称为声发射(acoustic emission, AE)。根据岩体存在凯塞效应进行岩体失稳 AE-压力-位移耦合模式辨识和增大实验尺寸及规模可提高危险源辨识精度^[6-7]。支持向量机、神经网络和子波变换等为局部化失稳预测提供了有效手段^[8-10]。

以宁夏宁东矿区围岩局部化变形演化规律预测为目标,综合地球物理特征、加载框架及其力学性能、结构与缺陷以及相似模拟材料复合特性等,构建了三维物理模拟装置与 AE、应力-应变、位移与变形等多元指标实时测试系统,完成了恒定与可变围压下的“动-静”耦合加载实验和围岩损伤“声-光-电”指标信息监测,比较分析了模型实验中围岩应力-损伤-变形-破裂-失稳的 AE 特征,为开采扰动区岩体局部化失稳源辨识提供了依据。

1 大型三维物理模拟实验构建

复杂环境下围岩介质“损伤-变形-失稳”是多力学/信息与控制下耦合作用的物理与力学过程。

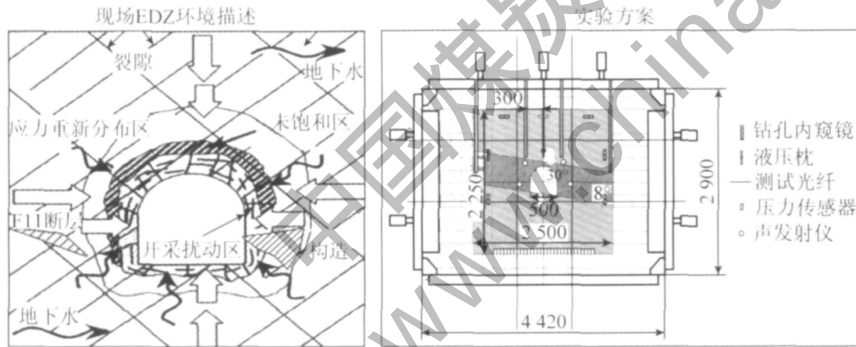


图1 大型三维物理模拟实验构建

Fig. 1 Large scale 3D-physical simulation construction

2.2 加载与信号测试系统

2.2.1 主体加载系统框架

利用三维实验装置顶部和侧帮油缸(单个油缸最大载荷 30 MPa)构成的非对称“动-静”(态)耦合主体加载框架(12.0 m × 8.8 m × 5.6 m),通过伺服控制系统实时进行多级加载。

2.2.2 监测指标

已有学者采用多种方法从不同角度对局部变形现象进行了理论与实(试)验研究^[13-16]。但对复合材料试件的测量区域较小,也没实现变形局部化的全程实时观测。岩体局部化裂纹孕育、演化、失稳诱发灾害,实质上是围岩局部结构承受复杂环境作用的过

实验装置大型化及其内部相关指标参数的精确测量是保证结果可靠的前提。宁东矿区历史上发生过 7 级以上的地震 6 次。基于不同加载模式下的物理相似模拟和现场 AE 试验,选择不同加卸载模式进行实验,定量刻画失稳破坏区煤岩介质的孕裂和失稳的进程^[11-12]。

2 三维模拟实验方案与参数的确定

2.1 实验方案与模型构建

以宁东矿区 2 号煤层开采中围岩稳定性控制为目标,分析围岩变形的力学条件、演化规律、控制模式。

开挖断面宽 4.80 m、高 4.20 m。模型原型长 24 m、高 21 m,最大埋深 380 m;模型空间尺寸为 4.42 m × 2.90 m × 2.50 m,中部空间复合相似材料铺装尺寸 2.50 m × 2.25 m × 2.00 m;模型比例为 1:10。图 1 分别描述了现场工程环境、模型试验方案设计、岩层层位以及监测系统布局。实验中将云母作为界面材料,钢板与混凝土砌块作为应力传递结构材料,石膏、粉煤灰和巴厘石等提高围岩介质的韧性。

程。监测指标涉及空区边界岩体破裂和滑移、垂直或沿单个节理或裂隙面的移动、边界点上两点间相对位移、渗流、剪切带正应力和剪应力、声发射(反映破裂程度)等指标,简单概括地描述其内涵为

$$P(t) = (\sigma/\varepsilon, AE, D)$$

式中 $P(t)$ 为空区岩体在应力与渗流耦合作用下稳定性概率函数; σ/ε 为应力-应变指标; AE 为特征参数,主要包括声发射的大事件、总事件和能率; D 为变形指标。

实验台包括八大测试系统:①通过伺服控制系统实时获取加载过程中的垂直和侧向水平载荷;②利用埋入式压力传感器,测试模拟范围内地层内部应力传

播与迁移及演化规律; ③利用数字化智能声发射装置, 测试在不同加载与采取模式下顶煤与顶板围岩内部损伤、破裂与变形程度以及能量变化规律与特征; ④利用光学钻孔窥视系统及检测装置, 验证开挖过程中深部岩层损伤与破坏特征及定量描述, 辅以 CT 检测系统进行围岩局部弱化特征及区域(局部化应变剪切带)预测; ⑤选用围岩破碎范围声学检测装置进行围岩内外承载结构松动与扩展范围以及相关缺陷进行检测, 为围岩稳定性控制范围提供定量依据; ⑥通过多路应力-应变信号采集系统, 分析不同开挖模式下围岩应力-应变分布与支护载荷分布及演化规律; ⑦利用光学全站仪实施岩层移动的非接触式远程观测; ⑧通过深层位可变角-拉线式多点位移监测装置, 剖析深部岩层的层裂-离层演化特征。

3 模型材料铺装与监测系统布设

根据设计布置测试仪器, 包括应力-应变传感测试系统、动载荷传感测试系统、声发射装置及传感器、钻孔光学窥视系统、围岩松动范围测试系统。

3.1 混凝土砌块强度测试

完成了混凝土砌块强度及其相关指标的检测和预制应力传递结构的抗压强度与抗剪强度的结构测试。混凝土砌块具有较高的韧性, 在一定程度上代表岩体沉积环境与特性。

3.2 应力-应变传感器铺设

在拟开挖井筒的底板中沿井筒法向与径向铺设应力-应变传感器, 用以考察不同埋深(层位)应力分布特征及规律。

3.3 模型内部围岩损伤窥视钻孔预制

为减少开挖扰动影响, 在模拟装置顶盖上打 5 个钻孔, 利用 $\phi 22$ mm 的钢管预制在不同深度或层位, 用以深部围岩损伤可视化光学窥视, 分析不同开挖时序的围岩局部化变形特征。

3.4 界面与断层结构预制与开挖

采用云母作为界面材料, 预制断层, 其间充填流沙、巴厘石和云母, 增加其强度与流动性。采用全断面快速掘进与分步开挖相结合方式。

4 不同加载模式下的 AE 特征

4.1 围压与垂直压力为 12 MPa 时的 AE 特征

(1) 带压开挖 70 cm。加载时间为 2008-05-09, 连续监测时间 17:57:24—18:02:53。图 2(a)~(c) 反映了 AE 特征参数(事件数和能率)与时间演化的关系。此时已开挖 70 cm(即将进入断层区域), 且先前已经过多次加、卸载, 内部初始裂纹早已完成其张开与闭合等。

图 2(a)~(c) 表明, 加载中 AE 事件数量多, 但以小事件为主, 幅度多在 45 dB 附近, 加载到 122.76 s 时

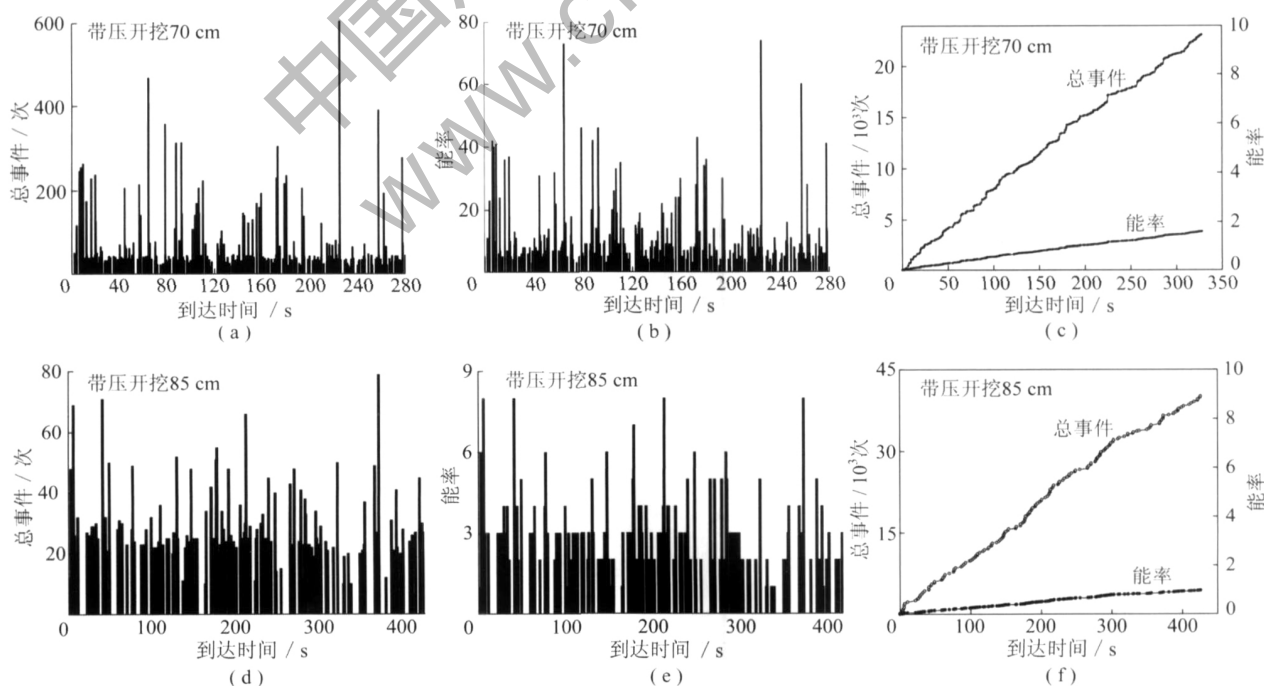


图2 带压开挖 70 和 85 cm 时岩体破裂 AE 特征统计

Fig. 2 Statistical of AE characteristics upon rockmass fracture in pressure excavation 70 and 85 cm

达到最大幅度 57.8 dB。每秒内最大振铃数 672 次,最大能率为 87,持续时间最大达到 157 895.4 μs 。在开挖遇到断层之前的破坏以能量小、数量多、持续时间长的小范围破裂为主,偶有大事件发生。图 2(c) 为总事件和总能量的累加规律,说明本次加载阶段,AE 事件数持续平稳增加,实验体内裂隙和破裂范围也在稳步扩展。

(2) 带压开挖 85 cm。加载时间 2008-05-10T08:30,带压开挖 85 cm;连续监测时间为 08:40:02—08:47:08。图 2(d)~(f) 分别反映了本次加载阶段 AE 事件数、能率以及二者的累积量随到达时间的变化。

从图 2(d)~(f) 中可看出,本次加载阶段 AE 事件在数量和强度上都较上一阶段有所下降,事件数大幅减小,能率也迅速降低。加载到 285.34 s 时,有振铃计数最大 79 次,能率最高 8,这表明实验体在开挖过后内部比较稳定,没有发生大的破坏。图 2(f) 中总事件曲线有几个阶梯状区段,尤其是在监测初期

10 s 内,上升最为明显。这反映了在开挖扰动的初始阶段岩体内的裂隙在短时间大量增加,稍后就趋于缓和,并不会立即发生失稳。能量曲线的增长远小于总事件的增长速度,并且越来越平缓,这说明岩体内部裂隙能量释放小,仍然在小范围扩展中。

4.2 围压为 2 MPa 时的 AE 特征

加载时间为 2008-05-11。卸压后,左右围压为 2 MPa,竖向载荷为 0。连续监测时间 10:10:12—11:32:51。开挖完成并卸压 9 h 后,左右围压小 (2 MPa)。

从图 3(a)~(c) 可以看出,在加载开始的前半段约 2 500 s 的时间内,AE 事件少,在加载 2 569 s 之后,AE 迅速增多,这一点在图 3(c) 中表现的也非常明显,2 569 s 后斜率突然增大。所以岩体在卸压一段时间以后,会有一个相对稳定期。在此期间岩体内部裂纹破坏扩展活动很少,但是一旦有外部扰动,可能引发大范围内破坏,成为工程失稳的危险源。

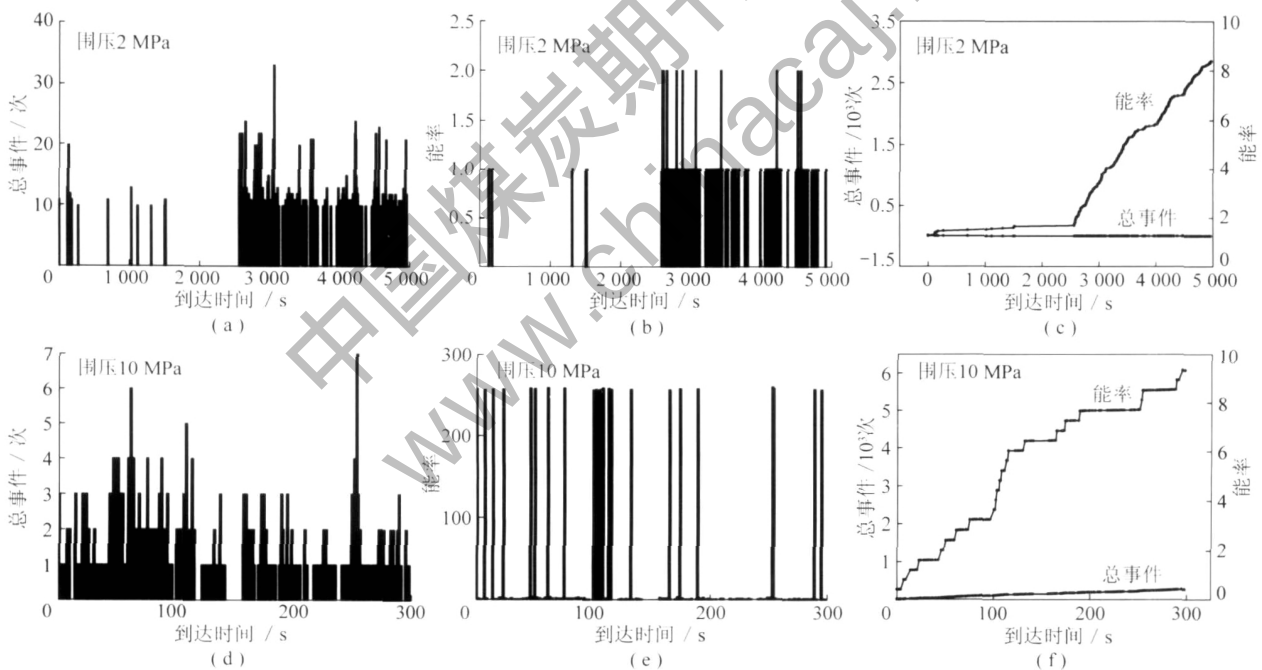


图 3 围压 2 MPa 和 10 MPa 时岩体破裂 AE 特征统计

Fig. 3 Statistical of AE characteristics upon rockmass fracture in confining pressure 2 MPa and 10 MPa

4.3 围压为 10 MPa、垂直压力为 14 MPa 时的 AE 特征

加载时间为 2008-05-12;左右围压为 10 MPa,垂直压力为 14 MPa。监测时间范围 14:00:49—14:05:47。图 3(d)~(f) 是本次加载过程的 AE 振铃计数和持续时间变化规律。

图 3(d) 显示 AE 事件前一段时间较密集,后一

时段则较稀疏,总体上呈现先升后降趋势,与前期加载阶段相比很平静。图 3(e) 中,AE 持续时间短,能量释放快。综合图 3(d)、(e) 对比分析,本阶段岩体内的裂纹活动可称为嘈杂期,在一段密集的小的破裂活动中夹杂着少量裂纹的缓慢扩展。图 3(f) 中总事件数增长缓慢,而持续时间呈阶梯状,这也说明了监测过程中有前文提到的裂纹缓慢扩展过程即能量的

缓慢释放。

5 地震作用下复合岩体 AE 特征

加载时间为 2008-05-12 左右围压为 10 MPa, 垂直压力为 16 MPa, 连续监测时间为 14:06:03—14:56:14, 14:28:04 汶川特大地震发生。

图 4(a)、(b) 描述了地震作用下 AE 规律。从 AE 数和持续时间随时间的变化关系来看, AE 活动比较频繁。监测开始约 1 700 s 以前 AE 数较均匀, 持续时间一直在振荡中; 1 700 s 后的 AE 事件增多, 持续时间加长。14:28:04 汶川特大地震爆发, 距监测开始 1 321 s, 持续约 300 s, 即监测时间 1 621 s。从图 4(c) 可知, 在地震结束后(监测历时 1 621 s), AE 持续时间显著增加, 反映出地震荷载作用以后, 岩体内出现大量裂纹的持续扩展, 其内部破坏范围在不

断扩大。通过第 40 次和第 41 次加载过程中的 AE 特征参数对比, 统计每分钟内事件数和持续时间的变化, 如图 4(d) 所示, 在地震来临前的 20 多分钟内, AE 事件在一定范围内振荡。地震来临后经过一段时间的沉寂(约 350 s) 才开始出现大规模的持续—长时(间)的 AE 事件。由此可见, 当 AE 经过“振荡—沉寂期”后, 预示着岩体内部很可能会出现大量长时(间)持久性破坏, 这为动力学失稳致灾提供了前兆信息。另外, 在不同开挖范围内, 扰动区域内岩体的径向和切向应力明显增大, 局部区域出现应力集中现象。另外, 还采用光学窥视、数值模拟、支持向量机、子波变换等信号辨识方法, 有效解决了声发射噪声过滤等问题^[17] 对实验中围岩应力—损伤—变形—破裂—失稳源等进行分析, 为开采扰动区危险源辨识提供了依据。

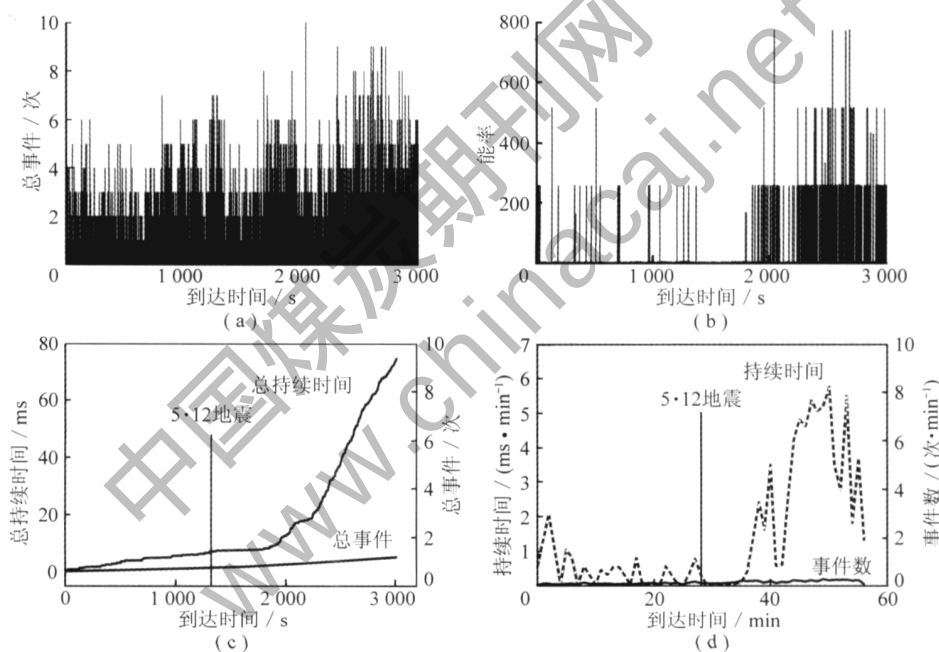


图4 地震作用下岩体破裂 AE 特征统计

Fig. 4 Statistical of AE characteristics upon rockmass fracture in nature earthquake

6 结 论

(1) 增大实验尺寸及规模可提高失稳与危险源辨识精度。系统分析了地球物理特征、加载框架及其性能、岩体损伤与变形指标与定量识别、围岩结构与缺陷、复合岩体模拟材料特性等因素, 构建了大型三维物理模拟装置与“声—光—电”物理力学指标信息测试系统并成功开展了相关实验, 为复杂环境下井下力学/信息与控制等信息源动态预测技术构筑了科学平台。

(2) 利用大型三维物理模拟实验装置系统, 完成了恒定与可变围压下的“动—静”耦合加载实验, 对围岩损伤与破裂程度的 AE 总事件与时间、能率与持续时间、总事件—能率—时间之间的关系, 地震作用下 AE 特征以及开采扰动下实验模型中岩体应力分布进行统计, 分析表明, 当 AE 经过“振荡—沉寂期”后, 预示岩体内部很可能会出现大量长时间持久性破坏, 这为动力学失稳致灾提供了前兆信息。同时, 也证明了岩体变形具有局部化特征, 为开采扰动区危险源辨识提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
Tang Chun'an. Process of rock failure and instability[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.
- [2] Lai Xingping, Cai Meifeng, Ren Fenhua, et al. Assessment of rock mass characteristics and the excavation disturbed zone in the Linxin Coal Mine beneath the Xitian river, China[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science 2006, 43(4): 572–581.
- [3] 赵阳升, 杨 栋, 冯增朝, 等. 多孔介质多场耦合作用理论及其在资源与能源工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 321–1 328.
Zhao Yangsheng, Yang Dong, Feng Zengchao, et al. Multi-field coupling theory of porous media and its applications to resources and energy engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2008, 27(7): 1 321–1 328.
- [4] 徐永波, 白以龙. 动态载荷下剪切变形局部化、微结构演化与剪切断裂研究进展[J]. 力学进展, 2007, 37(4): 496–516.
Xu Yongbo, Bai Yilong. Shear localization, microstructure evolution and fracture under high-strain rate[J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(4): 496–516.
- [5] 卫晓君, 邹 磊, 来兴平. 采空区覆岩介质局部化变形特征分析[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 382–385.
Wei Xiaojun, Zou Lei, Lai Xingping. Roof localized damage and deformation characteristic based on the overburden rock mass in mined out area[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 382–385.
- [6] Cai Meifeng, Lai Xingping. Monitoring and analysis of nonlinear dynamic damage of transport road-way supported by composite hard rock materials in Linglong gold Mine[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2003, 10(2): 83–86.
- [7] Lai Xingping, Wan Linhai, Cai Meifeng. Couple analyzing the acoustic emission signal from hard composite rock damage[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2004, 11(1): 1–4.
- [8] 来兴平, 张立杰, 蔡美峰. 神经网络在大尺度采空区损伤演化统计与预测中应用[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(4): 300–302.
Lai Xingping, Zhang Lijie, Cai Meifeng. Application of neural network to the statistics and prediction of dynamical and evolument in the large scale mine out area supported by rock-based composite materials[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(4): 300–302.
- [9] 来兴平, 张海燕, 刘叶玲, 等. 支持向量机在岩石破裂失稳声发射定位实验中的应用[J]. 金属矿山, 2006, 12: 61–62.
Lai Xingping, Zhang Haiyan, Liu Yeling, et al. Application of support sector machine in test on acoustic emission location in rock crack and destabilization[J]. Metal Mine 2006, 12: 61–62.
- [10] Cai Meifeng, Lai Xingping. Evaluation on stability of stope structure based on nonlinear dynamics of coupling ANN[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2002, 9(1): 1–4.
- [11] 来兴平, 栾小东, 伍永平, 等. 开采扰动区变尺度采空区覆岩介质动态损伤实验[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 902–904.
Lai Xingping, Luan Xiaodong, Wu Yongping, et al. Experiment on dynamical damage of overburden-rock media at various scale mined-out area in excavation disturbed zone[J]. Journal of China Coal Society 2007, 32(9): 902–904.
- [12] 来兴平, 吴学明, 高喜才, 等. 基于 MTS–AE 单轴压缩下的煤岩损伤特征[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(2): 375–377.
Lai Xingping, Wu Xueming, Gao Xicai, et al. Characteristics analysis of coal rock damage based on MTS–AE uniaxial compression[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology 2008, 28(2): 375–377.
- [13] 任奋华, 来兴平, 蔡美峰, 等. 破碎岩体巷道非对称破坏与变形规律定量预计与评价[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(3): 221–226.
Ren Fenhua, Lai Xingping, Cai Meifeng, et al. Quantitative prediction and evaluation on the regularity of asymmetric damage and distortion upon broken rock mass roadways[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2008, 30(3): 221–226.
- [14] Lai Xingping, Ren Fenhua, Wu Yongping, et al. Comprehensive assessment on dynamic roof instability under fractured rock mass conditions in the excavation disturbed zone[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 2009, 16(1): 12–18.
- [15] 石平五, 来兴平, 伍永平. 复合岩体巷道破坏规律的试验系统研制与应用[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 231–234.
Shi Pingwu, Lai Xingping, Wu Yongping. Research on the simulative experiment system and application to the damaged regularity in composite rock-mass roadway[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2002, 24(3): 231–234.
- [16] 王怀文, 周宏伟, 左建平, 等. 光测方法在岩层移动相似模拟实验中的应用[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 278–281.
Wang Huaiwen, Zhou Hongwei, Zuo Jianping, et al. Application of optical measurement method in strata movement simulation experiment[J]. Journal of China Coal Society 2006, 31(3): 278–281.
- [17] 来兴平, 伍永平. 复杂环境富含水破碎围岩稳定性控制[R]. 西安: 西安科技大学, 2008.
Lai Xingping, Wu Yongping. Complex environments rich in water and fractured surrounding rock stability control[R]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology 2008.