

“动-静”耦合加载围岩变形大型立体模拟研究

伍永平^{1,2}, 吴学明^{1,2}

(1. 西安科技大学西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了探讨地下巷道围岩破坏过程与机制, 利用自制的大型三维立体模拟装置与“声-光-力”多元指标实时测试系统, 完成了恒定与可变围压下的“动-静”耦合加载试验。对宁夏鸳鸯湖矿区复杂地质模型开挖中扰动区内围岩内部裂隙发育、损伤及破坏形态进行光学LCD式内窥摄影和结构演化过程进行实时追踪, 对围岩局部化损伤的声发射特征规律进行对比分析。试验结果表明, 在不同载荷和开挖时步条件下, 复杂围岩变形与破裂在不同加载阶段、不同层位有着一定的相似性和渐变性, 而声发射活动经历“贫瘠期-活跃期-回档期-沉寂期”后, 事件数减少, 持续时间增长, 围岩极有可能会局部衍生灾害, 进一步揭示了复合围岩局部持久性变形特征。

关键词: 矿业工程; “动-静”耦合加载; 围岩变形; 立体模拟; 多元测试系统

中图分类号: TD315 文献标志码: A 文章编号: 1000-4548(2011)10-1504-07

作者简介: 伍永平(1962-), 男, 陕西汉中, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力及围岩灾害防治的科研及教学工作。E-mail: wxmrock@163.com。

Large-scale 3D simulation of rock-mass deformation under static-dynamical coupling loading

WU Yong-ping^{1,2}, WU Xue-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Western Mine & Hazard Prevention, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To explore the damage process and mechanism of underground roadway, by using a large-scale three-dimensional simulation device and a real-time test system with acoustic-optics-pressure multiple indicators, dynamic-static coupling loading is completed under constant and variable confining pressures. The crack growth, damage and failure modes as well as the evolution process of structures in the region of excavation disturbance surrounding are real-time tracked by LCD-type optical endoscopic photography in complex geological model of Yuanyang Lake mining area, Ningxia, and the rules of acoustic emission in localized damage in surrounding rock are analyzed. The results show that complex rock deformation and fracture at different loading stages and different horizons have certain similarity and gradual nature under different loading weights and excavation steps. After the acoustic emission events have undergone barren period-active period-back to schedule-quiet period, the number of events begin to reduce, the endurance period grows, and partial derivative disasters are most likely to appear, which further reveals the local deformation characteristics of the persistence in the complex surrounding rock.

Key words: mining engineering; dynamic-static coupling loading; rock deformation; 3D simulation; multiple test system

0 引言

研究地下工程围岩稳定性问题, 除了开展现场动态监测^[1-2]和进行数学数值分析^[3]外, 利用室内物理模型试验研究也是极其重要且不可或缺的手段之一^[4-5]。随着科技的进步, 目前对岩体失稳机制的研究手段也在逐渐得到改进, 如利用弹性波CT (computerized tomography) 技术^[6]、智能声波探测技术^[7]及偏光显微镜技术^[8]等。由于岩体作为一种非连续介质, 受外荷

载后产生局部化变形失稳易诱发灾害^[9-10]。宁夏鸳鸯湖矿区地质力学环境复杂, 地下井巷掘进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^[11]。但在围岩介质变形与失稳前兆预测中, 局部化损伤-破裂-失稳源观测还比较困难, 在声信号测试中

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90210012); 陕西省重点实验室重点项目(05JS23)

收稿日期: 2010-09-05

易忽略岩体局部化变形的“可辨识信息”^[12],根据岩体存在凯撒效应进行岩体失稳S(stress)-AE-D(displacement)耦合模式辨识和增大模型尺寸及规模可提高危险源辨识精度^[13-14]。

岩体介质受外力或内力作用时,由于其本身的弹性变形、裂纹扩张,造成材料内局部因能量的快速释放而发出的瞬时弹性波现象,称为声发射(Acoustic Emission, AE)。声发射是研究岩体材料失稳破裂演化过程的利好工具,能连续、实时地监测围压作用下内部裂纹的产生和扩展。在相似模拟试验研究中,通常用肉眼观测复合围岩表面破裂程度和范围,必要时要对模型进行切割剖视,然后进行人工素描和统计量测,这种方法很难判断围岩内部节理、裂隙扩展演化过程,更不利于配合声发射测试法。

针对强震区破碎复合围岩变形特征,考虑了原型地质特征、几何相似性、力学相似性、系统初始状态、结构与缺陷及材料复合特性等。研制了“动-静”耦合加载围岩变形大型三维物理模拟多元指标测试试验装置。完成了恒定与可变围压的围岩损伤“声-光-力”(Acoustic-Optics-Pressure, AOP)指标信息监测。对比和分析了模型围岩应力-损伤-变形-破裂-失稳的AE特征,在加载过程中,特采用基于光学LCD式内窥摄影技术分析的实用且精度较高的裂隙发育识别新方法。定性和定量辅助声发射在围岩体局部化变形内部不同层位变形的动态测试及演化过程,为开采扰动区岩体局部化失稳源辨识提供了依据。

1 三维物理模拟试验模型的研制、安装与测试

1.1 主体加载框架及模型设计

采用柔性三维加载试验装置,该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”耦合主体加载框架(图1(a)),框架尺寸为12000 mm×8800 mm×5600 mm(长×高×厚),通过伺服控制系统实时进行多级加载。利用侧护板和高韧性混凝土砌块来解决侧向应力的传递。混凝土砌块具有较高的韧性,在一定程度上代表具有一定韧性的混合片麻岩的沉积环境与特性。之前,完成了混凝土砌块强度及预制应力传递结构的抗压强度与抗剪强度的结构测试。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。

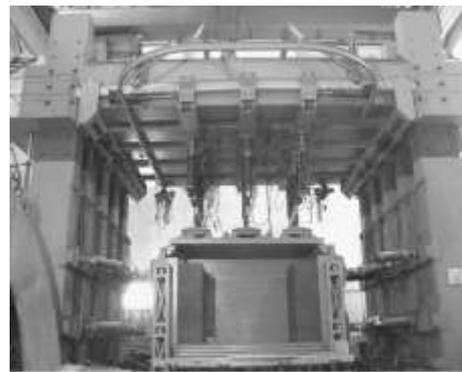
实际开挖断面宽4800 mm、高4200 mm,最大埋深380 m;模型空间尺寸为4420 mm×2900 mm×2000 mm(长×高×厚),中部空间复合相似材料铺装尺寸

2500 mm×2250 mm×1950 mm;模型几何相似比为 $a_1=1/10$,时间相似比 $a_t=\sqrt{a_1}=0.3162$;载荷相似比 $a_F=a_1^3 a_\gamma=1.1\times 10^{-3}$;考虑了原型围岩性质和岩体介质的不连续性,对测取的力学参数考虑0.9的裂隙影响系数,再根据相似理论求得模型各岩层材料的物理力学参数、计算材料配比和用量^[12]采用全断面快速掘进与分步开挖相结合方式。图1(b)、(c)描述了模型设计及监测系统布局。

1.2 测试系统布局

采用SWAES数字化全波形声发射监测仪可对围岩损伤-破裂-失稳过程的声信号进行捕捉与动态监测,采用YS(B)毫米微差LCD式光学钻孔窥视摄影仪对不同层位和“动-静”加载阶段裂隙扩展形态进行全程摄像,以此反映AE动态测试中钻孔内的各种真实孔壁岩体裂隙形状、离层和结构联动及分离特征。

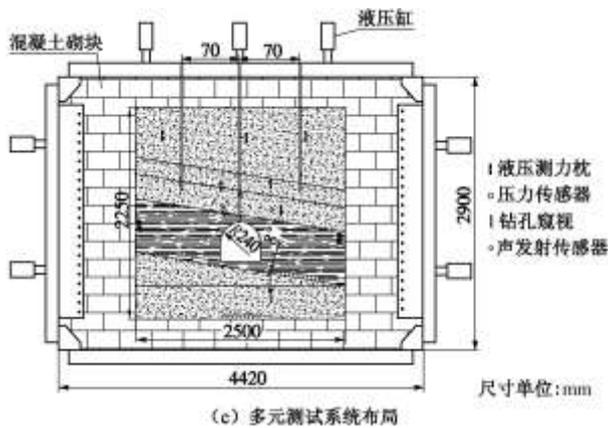
在待开挖巷道底板中沿其法向与径向铺设应力-应变传感器,用以考察不同埋深(层位)应力分布规律。为减少开挖扰动影响,在模型装置顶盖上打6个钻孔,利用<22 mm的钢管预制在不同深度或层位,用以深部围岩损伤可视化光学窥视。在模型中部巷道两侧沿其切向和轴向及底板各铺设10个压力传感器来测试开挖中围岩应力变化情况。在待开挖巷道断面周边200 mm处均匀布设5个声发射传感器,按逆时针顺序依次为#1~#5。利用PENTAXR-322NX光学全站仪坐标测点原理,测量不同加载时步下测点位移变化情况。



(a) 主体加载框架



(b) 模型与测试系统



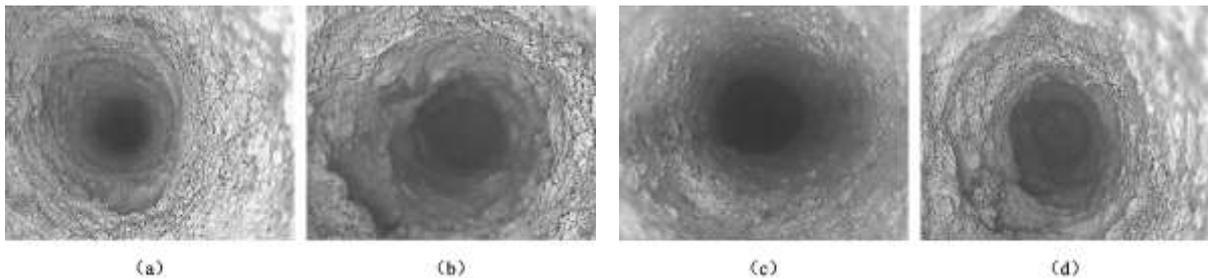
(c) 多元测试系统布局

图1 大型立体模拟试验系统构建

Fig. 1 Construction of large-scale 3D physical simulation system

1.3 测试指标

复杂环境下复合材料岩体工程开挖扰动区局部变形现象的分析和时空预测问题还远没有得到很好解决^[15]。测量范围较小,也没实现变形局部化的全程观测。破裂失稳的辨识源和辨识信息及精度和参数优化仍然是“瓶颈”问题。本试验主要集合应变、位移、“声-光-力”等多元指标信息的“声-光”动态测试,全程地监测、记录岩体开挖过程中各种信息的宏观规律和统计特征,通过建立围岩开采扰动与局部化变形孕育和诱发失稳之间的关系,综合多元信息的分析和特征识别,来实现围岩局部化失稳至灾的“设计-诊断-监测-识别”目的。



(a)

(b)

(c)

(d)

1.4 试验过程简述

模型铺装完毕后放置3 d,然后打开前后约束,待自然风干(7 d)后,于2008年5月7日~5月15日进行模型的加载与开挖试验。根据实际巷道埋深、设计应力及构造应力变量,所以,给模型顶部和侧帮施加不同载荷的方法来实现其力学相似性。试验采取分级加载方式,研究过程分为带压开挖70 cm阶段、带压开挖85 cm阶段、开挖200 cm后卸压阶段、开挖结束后加载4个阶段。根据工程实际、现场试验条件及围岩变形动态特征综合考量,现场围压和垂压加载级数范围定为2~16 MPa。

2 试验结果及分析

2.1 不同加载阶段和层位的围岩内窥摄影分析

根据模型试验围岩变形与破坏过程的内窥摄影,当施加围压12 MPa、垂直压力10 MPa,巷道开挖至70 cm时,围岩体进入弹性阶段,巷道拱顶围岩出现少量碎片剥落和碎粒弹射现象,拱顶上部层位(顶板上方约40 cm处)产生多条不等宽度且肉眼可观察到可分辨出的圆形环状相交裂隙(图2(a)),向深部(顶板上方约20 cm处)逐渐增多且碎裂(图2(b)),浅部(顶板上方约60 cm处)多以纵横相交网状裂纹出现(图2(c))。

保持水平与垂直方向加载级数不变,继续开挖至85 cm时,观察到距离巷道顶板上方60 cm处的孔壁破坏特征,见图2(d)。受采动和开挖尺度及挤压影响,孔壁受压呈椭圆形,圆形环状相交裂隙渐变并局部蔓延,有的出现裂隙崩解。越往深部(顶板上方约20 cm处)崩解现象越严重(图2(e)),而浅部(顶板上方约60 cm处)的纵横相交网状裂纹持续扩展为膨胀裂隙和剪切裂隙(图2(f)),甚至影响到结构体的“结构联动”承载作用,而巷道壁面轮廓也始终伴随着碎片剥离和飞出,切向应力峰值后移。

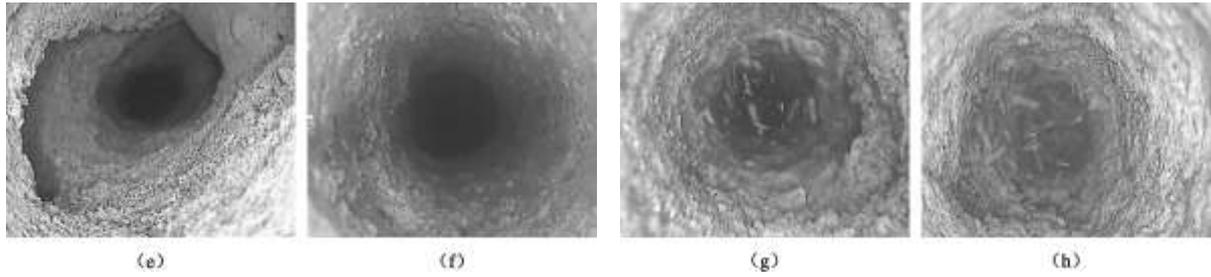


图2 围岩破裂过程的内窥摄影

Fig. 2 Inner-spy photographs of failure process of surrounding rock

全长开挖200 cm并卸压9 h后, 围岩应力重新调整, 围岩破坏进入相对稳定期。当围压加载至2 MPa, 垂直压力为0 MPa时, 保持加载量级不变, 在巷道顶板上方60 cm处, 见图2 (g), 受拉应力影响, 钻孔孔壁表现为圆形环状裂隙且表面粗糙碎裂, 伴随有小部分碎屑掉落现象。

开挖工作完成后, 继续保持加载量级不变, 围压加载至10 MPa、垂直压力为14 MPa和16 MPa时, 在巷道顶板上方60 cm处, 钻孔裂隙宽度和延伸长度都有进一步得发展, 表现孔壁左下侧为受压所形成的斜切倾角裂隙且宽度较大(图2 (h)), 表面被裂隙带切割成小型岩块不时掉落。

根据物理模拟实验的光学摄影监测结果, 得到复合围岩在“动-静”耦合加载及开采扰动下的变形破裂演化特征: ①由于模型填装和制备等原因, 围岩破坏在开挖一定距离(70 cm)和加载到一定荷载(围压12 MPa、垂直压力10 MPa)后体现为均匀岩体连续介质的弹性特征, 巷道壁面有碎屑弹射现象, 受纵向和横向压力约束, 裂隙发育总是连续不断扩宽、增长。开挖尺度对围岩破裂速度影响较大, 在开挖至85 cm后, 孔壁变形随深度增大越发激烈, 形状迥异, 出现裂隙崩落特征; ②开挖结束并卸载9 h后, 围岩应力调整, 孔内裂隙粗糙破碎, 当稍加少量荷载即有掉渣现象, 继续增大荷载, 钻孔体现为裂隙破碎、宽度大、长度

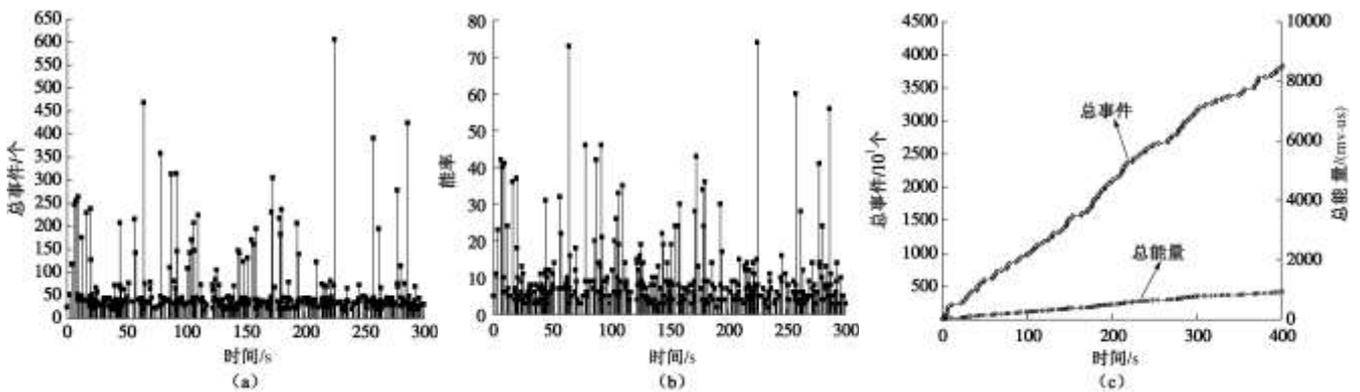
长、带倾角等特征, 且有小型岩块大量掉落; ③在不同围压和开挖时步条件下, 复杂围岩变形与破裂在不同加载阶段和不同层位在形状和演化特征上有着一定的相似性和渐变性。

光学摄影探测试验结果可为声发射动态监测试验提供参考、补充, 也为围岩介质局部化损伤-破裂-变形的AE预测前兆参量提供定量的“可辨识信息”。

2.2 不同加载阶段下的声发射活动特征

(1) 围压 12 MPa、垂直压力 10 MPa 时的 AE 特征。

加载时间为2008年5月9日, 连续监测时间约300 s, 初始开挖至70 cm(即将进入断层区域)。图3 (a)、(b)反映了AE特征参数(事件数和能率)与时间演化的关系。且先前已经过长时间多次加卸载, 围岩早已完成其内部结构调整、结构面压密与闭合等。图3 (a)、(b)表明, 加载中AE事件数明显增多, 幅度多在45 dB附近, 加载到225.60 s时达到最大幅度57.8 dB。每秒内最大振铃数达620次, 最大能率为75, 持续时间最大达到157895.4 μ s。在此阶段前, AE总事件数表现为稀少贫瘠, 时间内数目相差较大, 总能量较少(但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, 说明断层带对围岩破坏具有“屏蔽”效应)。根据总



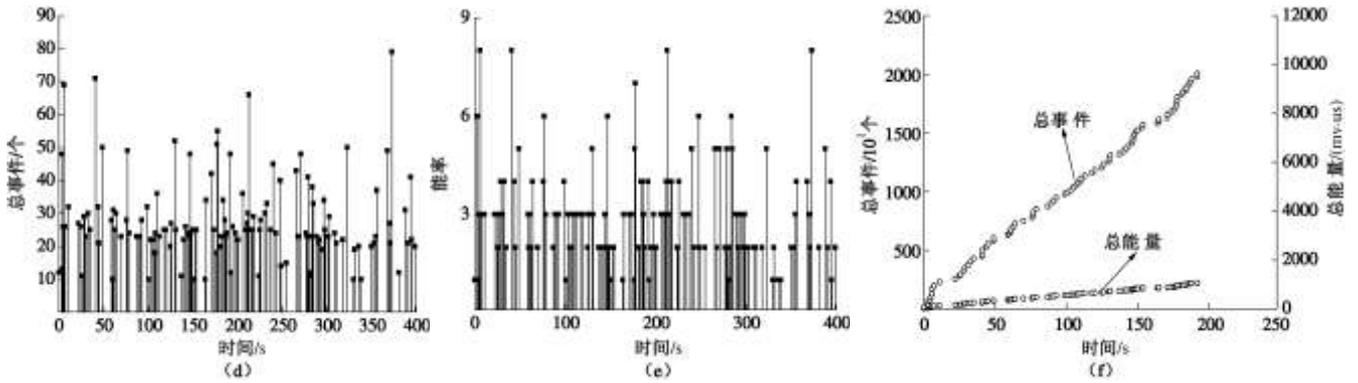


图3 围岩破裂在不同开挖过程中的 AE 特征统计

Fig. 3 Statistical AE characteristics of surrounding rock-mass at different excavation stages

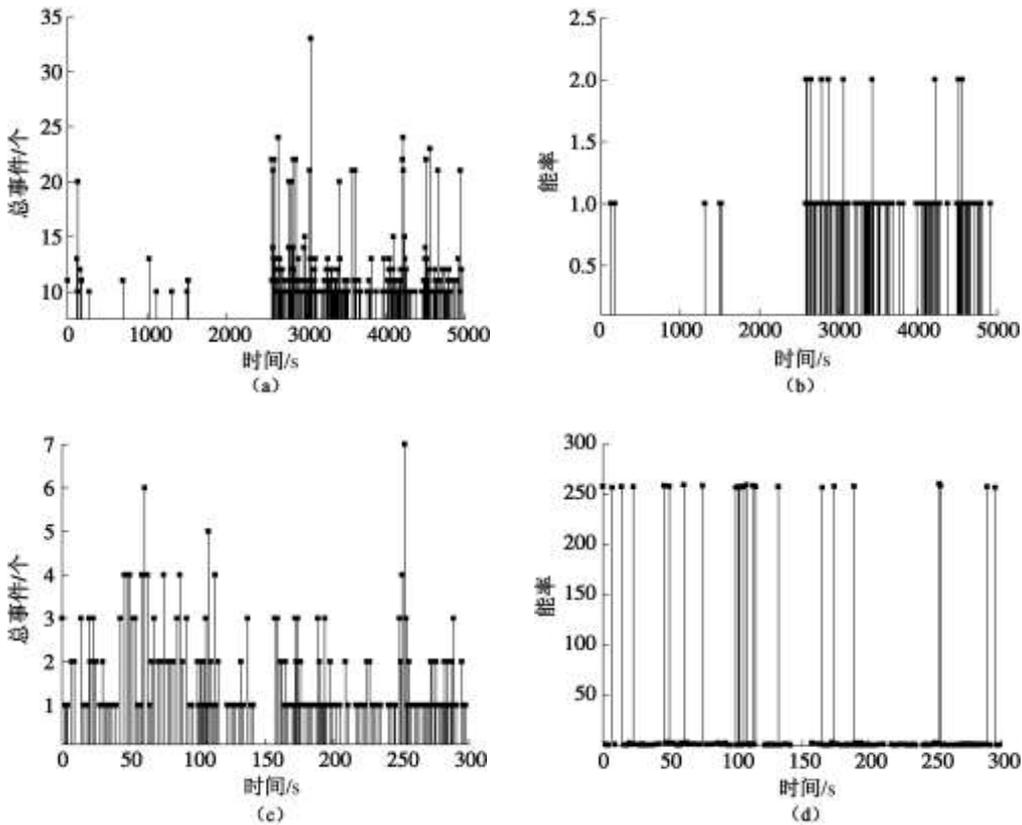


图4 不同围压时围岩破裂 AE 特征统计

Fig. 4 Statistical AE characteristics of surrounding rock-mass under different confining pressures

事件和总能量的累加规律（图3（c）），本次加载阶段AE事件数活跃且加速增多，能量持续释放，围岩体内经过结构面闭合和裂隙充填物压密后的结构体出现大量微破裂变形且体积改变能增大。

加载时间2008年5月10日，开挖至85 cm，连续监测时间约400 s。图3（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时间的变化特征规律。从图3（d）、（e）中可看出，本次加载阶段AE事件数较上一阶段有较大程度回档下降，事件级数大幅减小，能率也迅速降低。加载到370.21 s时，振铃计数最大80次，能率最高8，这表明围岩体在开挖15

cm前内部剪切破裂变形很激烈，之后围岩结构很快出现局部范围“结构联动失效”现象，有塑性向破坏阶段发展趋势。图3（f）反映了累积总事件和能量持续增加，但数目和量级减少。能量曲线增长率远小于总事件增长率，但比开挖70 cm稍有增加，岩体内局部塑性能增大。

（2）围压为2 MPa时的AE特征

加载时间为2008年5月11日，开挖工作完成（全长200 cm）并卸压9 h后，围压加载至2 MPa，垂直压力为0。连续监测时间5000 s。从图4（a）、（b）可以看出，在加载前半段约2400 s内，AE事件数较少。之

后, 事件数活跃且增多, 能率也突然增大但释放时间滞后, 量级都大幅减小, 虽然前后事件数看似由贫瘠转化为相对活跃的一个循环期, 但整体仍表现为持续回档。所以在卸压一段时间后, 除了部分残余变形外, 大部分围岩体介质回弹变形能力弱, 结构面非弹性变形部分在上一加载阶段消耗了大量能量来用于结构调整、滑移与错动。这与完整岩体加载变形不同, 通过巷道断面变形和光学摄影就能看出, 也与围岩性质有关。

(3) 围压为10 MPa、垂直压力为14 MPa时的AE特征。

加载时间为2008年5月12日, 连续监测时间300 s。图4(c)、(d)是本次加载过程的AE振铃计数和能率变化特征。AE事件活动特征形似开挖85 cm后的第一阶段, 事件数整体继续回落。由于载荷级数突然加大和加卸载作用, 破碎带岩体和啮合的结构面急速被破坏, 残余变形能有效释放, 事件数较活跃但零星稀少, 能量释放大但不连续。

(4) 围压为10 MPa、垂直压力为16 MPa时的AE特征。

加载时间为2008年5月12日, 连续监测时间3000 s。从总事件数和总持续时间随时间的变化关系(图5)来看, 相比第三加载阶段, AE事件数总体降低且沉寂平稳且幅度降低。监测开始约1760 s以前AE数少而均匀, 持续时间曲线以较小斜率缓慢上升增大;但在1760 s(14点28分)后, AE事件数突然增多, 但影响幅度不大, 持续时间急速上升。(由于此时汶川特大地震爆发, 距地震爆发至地震结束后历时1340 s的时段里, AE总持续时间一直急速增加, 这一定程度上反映出地震波作用后, 原本处于沉寂期的围岩体内大量被压密的稳定节理裂隙再次出现扩张与闭合。这表明, 地震的来临打破了沉寂期内围岩体稳定的AE事件数, 增大了持续时间, 从而缩短了衍生灾害发生周期。)。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。借助光学摄影窥探结果, 综合声发射统计特征分析, 由此可见, 反复荷载和不同开挖扰动下的围岩体AE活动经历“贫瘠期-活跃期-回档期-沉寂期”后, 预示着巷道围岩极有可能会局部出现衍生灾害, 且时间持久, 这为动力学失稳致灾提供了前兆信息。

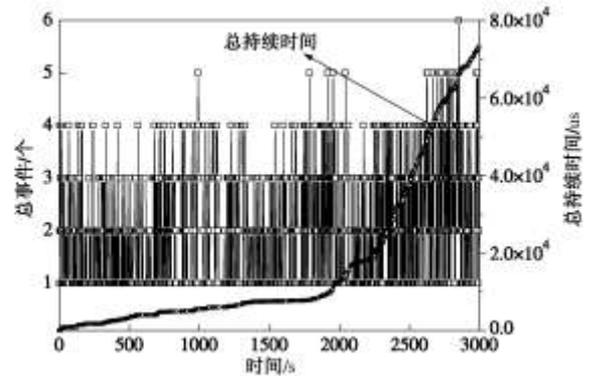


图5 开挖完成长时间后带压及地震作用围岩破裂AE特征统计
Fig. 5 Statistical AE characteristics of surrounding rock mass after long time to complete excavation and natural earthquake

3 结 论

(1) 考虑了原型地质特征、几何相似性、力学相似性、系统初始状态、结构与缺陷及材料复合特性等, 研制了“动-静”耦合加载围岩变形大型三维物理模拟多元指标测试试验装置, 尝试增大实验尺寸及规模来提高失稳与危险源辨识精度, 为复杂环境下围岩变形信息化监测与控制技术构筑了科学平台。

(2) 完成了模型在恒定与可变围压下的“动-静”耦合加载试验, 利用光学LCD式内窥摄影技术分析了围岩变形与破裂特征, 在不同加载条件和开挖时步下, 复杂围岩变形与破裂演化在不同层位有着一定的相似性和渐变性。带压开挖初期, 孔壁形状以圆形环状裂隙、纵横相交裂纹为主, 深、浅位形状相似;随着开挖距离增大, 裂隙渐变为膨胀和剪切状。开挖完成后, 随着围压增大, 孔壁则表现为裂隙破碎、宽度大、长度长、带倾角等特征, 且有小型岩块大量掉落。为声发射动态测试技术在围岩变形物理模拟试验中的应用提供定量辅助识别信息, 对开采扰动区围岩体局部化失稳灾害源辨识起到定量参考价值。

(3) 利用数字化声发射技术对围岩损伤与破裂程度的AE总事件与时间、能率及总持续时间之间的特征关系进行统计, 分析表明, 从带压开挖初期阶段到开挖工作结束的很长一段时间, 声发射活动表现出“贫瘠期-活跃期-回档期-沉寂期”特点, 预示着围岩极有可能会局部出现持久性局部衍生灾害, 进一步揭示了复合围岩的局部变形特征。为采空区动力失稳至灾及开挖扰动区危险源辨知提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 蔡美峰, 何满朝, 刘冬燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU

- Don-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(8): 1545 - 1553. (LI Shu-cai, WANG Han-peng, QIAN Qi-hu, et al. In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(8): 1545 - 1553. (in Chinese))
- [3] 江 权, 冯夏庭, 陈国庆, 等. 高地应力条件下大型地下洞室群稳定性综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 2): 3768 - 3777. (JIANG Quan, FENG Xia-ting, CHEN Guo-qing, et al. Stability study of large underground caverns under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S2): 3768 - 3777. (in Chinese))
- [4] 来兴平, 伍永平, 曹建涛, 等. 复杂环境下围岩变形大型三维模拟实验[J]. 煤炭学报, 2010, **35**(1): 31 - 36. (LAI Xing-ping, WU Yong-ping, CAO Jian-tao, et al. Experiment on rock-mass deformation of large scale 3D - simulation in complex environment[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(1): 31 - 36. (in Chinese))
- [5] 任伟中, 白世伟, 孙桂凤, 等. 厚覆盖岩层条件下地下采矿的地表及围岩变形破坏特征模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(21): 3935 - 3941. (REN Wei-zhong, BAI Shi-wei, SUN Gui-feng, et al. Research on deformation and subsidence characters of groud and surrounding rock induced by underground mining under thick covering terrain by model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(21): 3935 - 3941. (in Chinese))
- [6] 程久龙. 矿山采动裂隙岩体地球物理场特征研究及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2008, **37**(6): I - III (CHENG Jiu-long. Study on geophysical field Characteristics of mining - induced fracture rock mass in mine and its applications[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, **37**(6): I - III. (in Chinese))
- [7] 潘卫东, 张 辉, 罗 焯. 超声波检测在矿山岩石力学工程分析中的应用[J]. 金属矿山, 2009(增刊): 633 - 652. (PAN Wei-dong, ZHANG Hui, LUO Ye. Application of ultrasonic measure on the analyzis of rock mechanics in mining engineering[J]. Metal Mine, 2009(S0) : 633 - 652. (in Chinese))
- [8] 来兴平, 伍永平, 任奋华, 等. 西部矿区深部复杂应力环境下开采扰动区松软岩层力学特性[J]. 北京科技大学学报, 2006, **28**(4): 312 - 316. ((LAI Xing-ping, WU Yong-ping, REN Fen-hua, et al. Mechanical characteristics of soft - rock at excavation disturbed zone in the complex stress environment of deep mining in the western coal mine region of China[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, **28**(4): 312 - 316. (in Chinese))
- [9] 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. Catastrophe in rock unstable failure[J]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993. (in Chinese))
- [10] LAI Xing-ping, CAI Mei-feng, REN Fen-hua, et al. Assessment of rock mass characteristics and the excavation disturbed zone in the Lin-xin Coal-Mine beneath the Xi-tian river, China[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2006, **43**(4): 572 - 581.
- [11] 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): 1321 - 1328. (ZHAO Yang-sheng, YANG dong, FENG Zeng-chao, et al. Multi - field coupling theory of porousmedia and its applications to resources and energy engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(7): 1321 - 1328. (in Chinese))
- [12] 卫晓君, 邹 磊, 来兴平, 等. 基于 AE 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 - 386. (WEI Xiao-jun, ZOU Lei, LAI Xing-ping, et al. 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. (in Chinese))
- [13] CAI Mei-feng, LAI Xing-ping. Monitoring and analysis of nonlinear dynamic damage of transport road - way supported by composite hard-rock materials in Ling-long gold mine[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, **10**(2): 83 - 86.
- [14] 伍永平, 吴学明, 严永胜, 等. 软弱围岩变形三维物理模拟监测系统构建[J]. 西安科技大学学报, 2010, **30**(4): 381 - 387. (WU Yong-ping, WU Xue-ming, YAN Yong-sheng, et al. Construction on 3D - simulation monitoring system upon deformation of soft rock[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, **30**(4): 381 - 387. (in Chinese))
- [15] 冯夏庭, 周 辉, 李邵军, 等. 复杂条件下岩石工程安全性的智能分析评估和时空预测系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(9): 1741 - 1756. (FENG Xia-ting, ZHOU Hui, LI Shao-jun, et al. System of intelligent evaluation and prediction in space - time for safety of rock engineering under

hazardous environment[J]. Chinese Journal of Rock Chinese))
Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1741 - 1756. (in