

文章编号:0253-9993(2007)09-0902-05

开采扰动区变尺度采空区覆岩介质动态损伤实验

来兴平¹, 栾小东², 伍永平¹, 张 勇¹, 吕兆海¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 教育部西部矿山开采及灾害治理重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 尝试利用非均匀围岩介质动态损伤声发射 (Acoustic Emission, AE) 总事件、能率、时间、空间结构参数、变形与应力尺度演化过程, 进行不同尺度开采推进形成的采空区围岩介质损伤统计与宏观动力失稳时-空关系对比分析, 找出采空区动力失稳预警量化依据。

关键词: 开采扰动区; 变尺度采空区; 动态损伤

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A

Experiment on dynamical damage of overburden-rock media at various scale mined-out area in excavation disturbed zone

LAI Xing-ping¹, LUAN Xiao-dong², WU Yong-ping¹, ZHANG Yong¹, LÜ Zhao-hai¹

(1. School of Energy Engineering, China Educational Ministry Key Lab. of Western Safe Mining & Hazard Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Civil & Environmental Engineering, University Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The characters of non-uniform rock-media dynamical damage, including cumulative number of acoustic events (AE), energy-rate, temporal and spatial parameters, scale of deformation and stress, etc., were implemented and compared of their relationship, and various in acoustic emissions that occur during micro-crack, so as to analyze the characteristics and internal regularity of various scale micro-damage and macro-dynamical instability or collapse in mined-out-area, and find out quantitative clue for collapsing prediction of mined-out-area.

Key words: excavation disturbed zone (EDZ); various scale mined-out area; dynamical damage

岩石类固体非均匀介质的损伤与破坏表现为突发性灾变前兆难以捕捉, 且灾变呈现不确定性, 如在邻近破坏及灾变阶段, 损伤演化不遵循稳态累积规律等, 其复杂特征根源在于多尺度耦合效应^[1~4]。声发射是研究固体材料损伤的重要工具, 其可以实时连续测量获取材料内部损伤的信息, 增大实验规模或试件尺寸可提高其损伤定位的相对精度^[5,6]。实现灾变预测的一种可能策略是寻找灾变的共性, 大尺度物理相似方法是解决开采扰动区 (Excavation Disturbed Zone, EDZ) 动力失稳预测及诱发灾变预报的有效手段之一^[7,8]。AE 技术是连接细观与宏观跨尺度耦合预测的有效方法, 根据其信号特征 (大事件数)、总事件数、能率) 与其物理力学参数 (强度、变形/位移等) 多元参数耦合, 可进行采空区空间结构及力学形态分析^[9~13]。本文尝试利用围岩介质声发射总事件、能率、时间、空间结构参数、变形与应力尺度演化过程, 进行不同尺度开采推进形成的采空区围岩介质细观损伤统计与宏观动力失稳时-空关系对比分析, 为灾变行为预报提供线索, 找出采空区动力失稳预警量化依据。

收稿日期: 2006-10-11 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10402033); 教育部西部矿山开采及灾害治理重点实验室重点资助项目 (04JS19)

作者简介: 来兴平 (1971-), 男, 宁夏平罗人, 教授, 博士。Tel: 029-85587131, E-mail: lxptest@yahoo.com.cn

1 实验背景描述

岩石在受力变形过程中的微破裂活动伴有声发射, 其是揭示岩石变形破坏过程的有效工具. 本实验原型基于某矿地层综合特性及主要开采技术参数 (图1). 采用3 m平面模型架 (几何比例1:50), 模拟原型开采尺度范围为0~100 m. 在开采区域上覆岩层水平方向上共布设了7条观测线, 根据不同开采进度 (不同尺度空区) 埋设了5个声发射传感器 (AE-1~5), 辅以应力/应变测试仪、全站仪, 观测岩层宏观破坏和地表移动以及支护载荷的变化^[14].

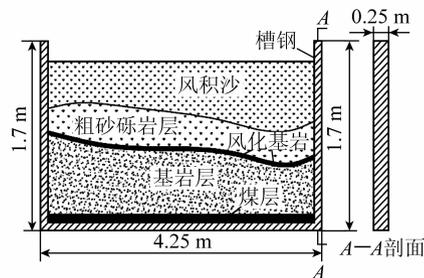


图1 模拟实验结构原型及参数
Fig. 1 The prototype and parameters of experimental structure

2 实验过程及分析

2.1 直接顶初次垮落阶段

工作面向前推进15 m, 采空区顶板岩层内部拉/剪应力超过其极限强度, 直接顶发生垮落, 初次垮落厚度约2 m, 从声发射传感器 AE-1~5 观测的总事件 (单位: 次/min) 和能率 (单位: $\text{mV} \cdot \mu\text{s}/\text{min}$) 反映变尺度条件下采空区上覆围岩介质损伤及演化规律明显不同.

(1) AE-1 特征及规律 AE-1 距 EDZ 区域最近, 其声发射关系特征如图2所示. 由于开采扰动影响, 采空区上方围岩应力重新分布, 声发射信号受扰动影响较大, 初期能率峰值为2 300, 总事件峰值为2 680 次/min, 围岩基本保持稳定, 如图2 (a) 所示. 此阶段应力不断升高, 声发射活跃但围岩没有发生失稳, 其应力不断升高 (最高达1.075 MPa), 且有新的损伤扩展. 测点32, 33 在推进过程中的水平和垂直变形均在增大, 其值分别为1, 2和8, 12 mm, 如图2 (b), (c) 所示.

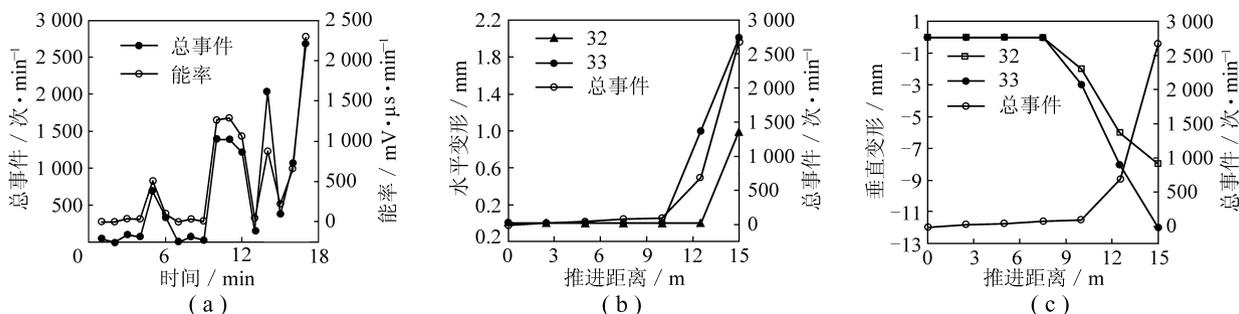


图2 初始破裂阶段 AE-1 信号特征及规律

Fig. 2 The signal character and regularity of AE-1 at initial crack stage

(2) AE-2, AE-3, AE-5 特征及规律 AE-2 总事件变化范围为1~1 040 次/min, 能率峰值为5 510, 这是由于围岩内部预先存在的微断裂或张开性结构面开始闭合, 围岩材料被压密造成的. AE-3 和 AE-5 距工作面较远, AE 总事件峰值分别为35, 10 次/min, 能量积聚极其微弱.

2.2 老顶初次来压阶段

直接顶初次垮落后在采空区随采随垮, 其垮落长度达2.5 m. 当工作面推至22.5 m时, 顶板上方厚4.5 m的覆岩层有微裂隙产生. 推进到27.5 m时离层裂隙的高度有所增加, 煤壁上方基岩出现拉裂隙, 同时在顶板高5.5 m处也有离层裂隙发育. 推进到30 m时离层高度增加, 支护载荷明显增加, 顶板突然断裂. 在开切眼侧沿煤壁垮落高度为6.8 m, 在离煤层顶部10 m处有离层产生, 垮落形态表现出不对称性, 来压时工作面支护载荷急剧增加. 采空区破断岩块长度较大(5~8 m), 老顶失稳但没造成切落失稳现象. 垮落岩层厚度的叠加但不产生贯通整个岩层的裂缝. 持续520 min后老顶发生初次来压, 老顶沿架后破断, 顶板围岩出现大范围运动, 采空区前后煤壁上方围岩上部出现拉裂隙, 老顶破断岩块沿工作面煤壁

切落,且有回转切落特点,破断岩块间形成贯通裂隙,综合分析可断定工作面初次来压步距为 32.5 m.

(1) AE-1 特征及规律 AE-1 附近围岩受开采扰动影响较大,围岩断裂尺度较大,声发射信号较强且波动幅度较大,总事件峰值为 32 691 次/min,能率变化范围为 0~7 065. 声发射突然增大或在连续增大时出现突然减小现象,这均为临近破坏的征兆,如图 3 (a) 所示. 围岩在该区内应力不断升高,围岩内部有新的损伤扩展,能率也不断升高,围岩介质破裂速度与破裂范围不断增加.

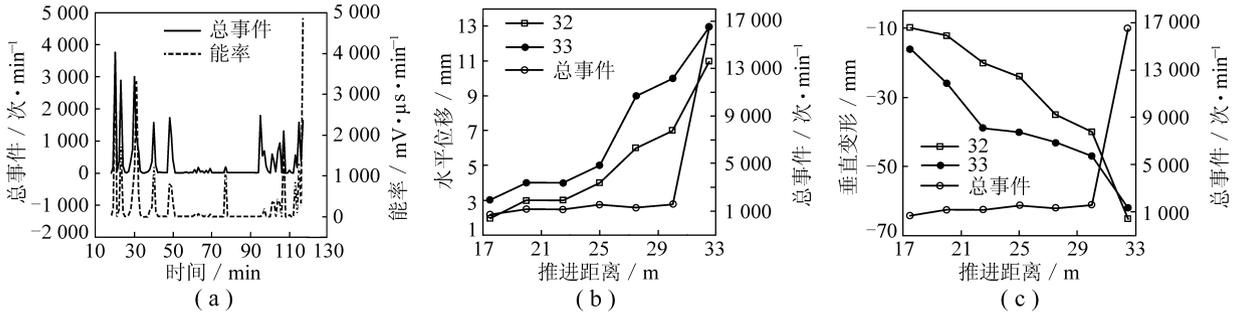


图 3 初次来压阶段 AE-1 信号的特征及规律

Fig. 3 The signal character and regularity of AE-1 at initial variable pressure stage

由于煤壁前方应力急剧增加,导致直接顶在煤壁前方形成裂隙,老顶突然来压. 持续 30 min 之后,应力不断下降,相应的声发射响应比也比较“平静”,这相当于围岩加载后的卸载响应过程,也是能量积聚与释放阶段,尤其要防止出现突变失稳和大面积来压以及采空区坍塌等动力破坏. 从图 3 (b), (c) 可看出 AE-1 附近测点 32, 33 在此阶段水平位移和下沉量有较大变化,初次来压后测点 32, 33 水平位移分别为 11, 13 mm, 下沉量分别为 65, 62 mm.

(2) AE-2 与 AE-3 信号特征 AE-2 位于垮落失稳区域,围岩内部应力不断升高并有新的损伤微裂隙产生,但微裂隙产生的过程是不均匀的,因此能量和声发射总事件有大的波动,这个过程持续时间长,可见微裂隙产生的过程是一个缓慢的过程,反映了在载荷作用下围岩微小裂隙扩展过程,此阶段总事件变化范围为 1~2 079 次/min,能率峰值为 1 023,如图 4 (a) 所示;围岩损伤弱,在老顶初次来压后应力高达 1.09 MPa,如图 4 (b) 所示. AE-3 距工作面较远,受开采扰动的影响小,老顶来压时总事件和能率到达阶段峰值,其分别达到 932 次/min 和 713,一旦出现突变,围岩并不立即破坏,只会出现内部裂隙变形或贯通,进而演化为断裂.

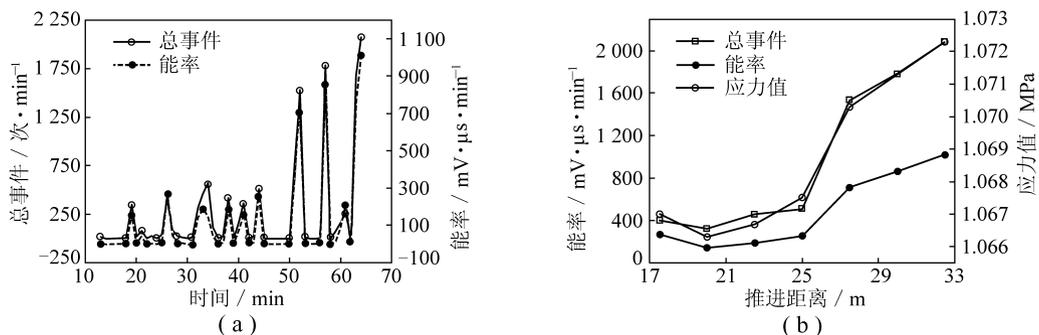


图 4 AE-2 信号的特征及规律统计

Fig. 4 The signal character and regularity of AE-2 at initial variable pressure stage

(3) AE-4 与 AE-5 信号特征 AE-4 距开采工作面较远,受采空区围岩破裂影响不大,能率和总事件都较小,但在老顶来压时能率和总事件较大,这一阶段总事件率峰值达 893 次/min,能率峰值达 2 480,且信号波动较大. AE-5 距开采工作面较远,围岩损伤声发射信号十分微弱,能率和总事件都较小,但在老顶来压时能率和总事件较大,总事件变化范围为 1~906 次/min,能率变化范围为 0~2 266,可见 AE-5

附近围岩在老顶初次来压期间表现稳定. 工作面推进到 40 m 处, 当老顶发生第 1 次周期来压, 顶板垮落高度增加到 9 m, 上部基岩离层纵向高度增加到距离煤层顶面高 15 m 处, 离层横向长度达 16 m. 在工作面推进到 45 m 时, 支护载荷迅速增加, 垮落高度发展到 13 m 处, 在距离煤层顶面 19 m 处岩层发生离层, 离层裂隙距切眼水平距离 26 m, 距工作面煤壁水平距离 19 m, 岩块块度较大, 并有继续加剧的趋势.

3 基于 AE 的覆岩损伤及破断规律分析

工程结构的失效从材料中孤立的空洞成核开始, 形成微小裂纹并演化为宏观裂纹, 直至整个结构破坏. 从力学角度看, 不同尺度的采空区上覆岩层内部拉、剪应力超过其强度极限时, 顶部岩层断裂或垮落, 若下沉速度梯度缓慢则形成移动盆地, 若是极速剪切垮落, 有可能造成采空区动力破坏并诱发灾害.

根据采空区上覆围岩损伤与破坏规律, 选取覆岩的垮落带、断裂带中典型变形的 3 排测点进行分析, 其分别为第 1 排 (16~19)、第 2 排 (30~32) 和第 5 排 (65~67), 根据实验中围岩破坏规律可知, 第 1 排、第 2 排测点在垮落带范围内, 第 5 排测点则在断裂带内. 由图 5 (a) 可看出, 18, 19 测点出现下沉现象, 其位于初次来压之前, 说明在顶板初次垮落之前岩层已出现离层, 随推进尺度变化, 测点的下沉变形速度不均衡, 可分为缓慢下沉段与急剧下沉段 (最大下沉变形达 4.821 m). 在工作面后方 10~35 m 之间下沉量出现突变, 即在煤壁 10 m 之后, 上位破断的岩层结构随下位岩层垮落而表现为瞬间急速下沉. 在工作面推进至 77.5 m 时, 最大下沉变形达 5.602 m (第 5 排 67 测点), 这与实验过程中声发射特征参数统计和现象监测规律一致.

从图 5 (b) 可看出开采扰动区岩层的破断过程: 首先是采空区侧部位下沉, 产生了向采空区侧挤压的水平位移. 在工作面后方 10~15 m 开始滑落回转运动, 其靠煤壁侧与煤壁上方岩层铰接处, 产生切落造成破断岩块回转. 从第 5 排监测到的变形值可知, 位于断裂带的岩层运动基本为逐块弯曲下沉破断, 其 66 测点的水平位移最大达 0.4 m. 当出现第 4 次周期来压 (图 6 (a)) 时, 支护载荷骤然增加, 破断裂隙高度增加到 50 m, 离层裂隙也继续向上发展演化, 此次破断有深部高位岩层参加, 破断裂隙迅速发展至模型上边界, 产生贯通裂隙并产生断裂, 造成大面积垮落, 最终诱致地表坍塌现象 (图 6 (b)).

由于各类围岩力学性质的差异, 不同的岩性, 其破坏模式不一样, 岩石坚硬程度不同, 声发射信号的强弱不同. 围岩内部裂隙一旦出现突变, 围岩并不立即破坏, 只会出现内部裂隙的发展或变形. 监测围岩的应力持续下降, 而声发射却非常活跃, 表明围岩中的应力已经超过最大应力峰值, 承载力已不断下降, 观测到的围岩内部应力值也持续下降, 围岩破坏后的运动是一个非稳态过程, 其运动过程将缓慢持续下

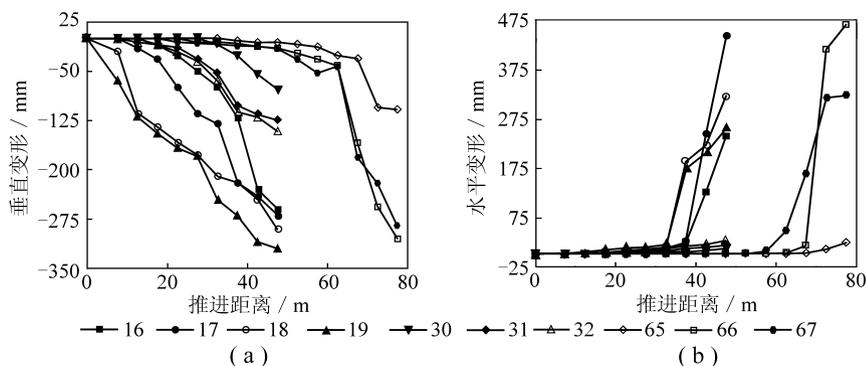


图 5 监测点垂直与水平变形特征规律

Fig. 5 The character and regularity of vertical and horizon deformation at observation points

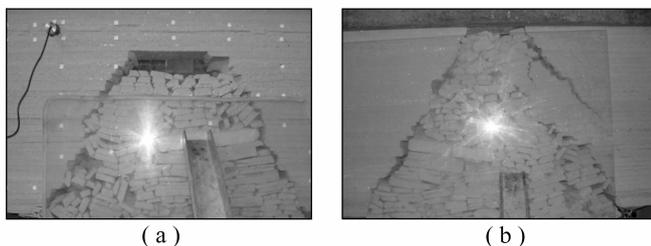


图 6 采空区第 4 次周期来压和覆岩坍塌至地表

Fig. 6 The 4th periodical pressure and scenes of burden rock-mass collapsed to surface in mined-out area

去,很多事故往往就在这一阶段发生.围岩应力不断升高,围岩内有裂隙出现,且有新的损伤扩展,围岩破裂速度与破裂范围不断增加.在工作面第2次周期来压时急剧增大至1.1 MPa,围岩产生结构性破坏,声发射活动明显增加,且在围岩破坏之前达到峰值,尤其要防止周期来压破坏诱发采空区动力失稳.有关AE规律与岩层破裂规律之间的深层次关系参见文献[15].值得注意的是,在实验过程中发现煤壁附近的剪破裂和岩层破断的张破裂产生的AE强度与性质有本质区别,张破裂能量小,但破裂严重;剪破裂能量大,破裂小,这一点在基于AE的煤与岩石单轴拉伸与剪切破裂实验中也进一步得到充分证实.

综合以上分析可揭示非均匀围岩材料损伤与断裂失稳过程中存在敏感耦合,小尺度上的某些无序性细节在非线形演化过程中可能被强烈地放大,变成大尺度上的显著效应,对系统灾变行为产生重要影响.

4 结 论

(1) 上覆厚松散层对EDZ内的矿压规律有其独特影响,初次和周期性垮落失稳都具有非常明显的非线性和非对称动力切落与失稳特征,并诱致EDZ强烈动压显现.顶板破断裂隙在煤壁前方老顶的上部产生,在煤壁形成贯通裂隙并演化为切落失稳现象.

(2) 从围岩动力失稳的声发射总事件、能率、时间、空间结构参数、变形与应力尺度演化规律等多元信息综合分析可看出,工程岩体破裂失稳与岩石全应力应变破坏过程有很大的必然联系,围岩声发射特性与其赋存及应力变化历史密切相关,它反映了在动态变化的载荷作用下围岩由原有微裂隙孕育、演化直至宏观断裂失稳的过程,可作为判定围岩稳定程度的依据之一.围岩微裂纹演化-失稳遵守一定的统计分布和空间分布规律,且与时间、空间以及工程岩体的区域特征有直接联系.

(3) 基于AE的规律,结合岩层运动规律和开采地层的条件,可对岩层运动及衍生灾害进行预测预报.

参考文献:

- [1] 谢和平. 矿山岩体力学及工程的研究进展与展望 [J]. 中国工程科学, 2003, 5 (3): 31~37.
- [2] 何国威, 夏蒙芬, 柯孚久, 等. 多尺度耦合现象: 挑战和机遇 [J]. 自然科学进展, 2004, 14 (2): 121~124.
- [3] 夏蒙芬, 韩闻生, 柯孚久, 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变 [J]. 力学进展, 1995, 25 (1): 1~23.
- [4] 谢和平, 彭瑞东, 周宏伟, 等. 基于断裂力学与损伤力学的岩石强度理论研究进展 [J]. 自然科学进展, 2004, 14 (10): 1 086~1 092.
- [5] 赵亚溥. 断裂力学中的相似方法及尺度率 [J]. 力学与实践, 1995, 17 (5): 11~16.
- [6] 来兴平. 开采扰动下大尺度采空区衍生动力灾害控制研究 [R]. 北京: 北京科技大学, 2004.
- [7] Lai X P, Cai M F, Xie M W. In situ monitoring and analysis of rock mass behavior prior to collapse of the main transport roadway in Linglong Gold Mine, China [J]. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 2006, 43 (4): 640~646.
- [8] Lai Xingping, Cai Meifeng. Couple analyzing the acoustic emission characters from hard composite rock fracture [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 11 (2): 97~101.
- [9] Cappa F, Guglielmi Y, Gaffet S, et al. Use of in situ fiber optic sensors to characterize highly heterogeneous elastic displacements in fractured rocks [J]. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 2006, 43 (4): 647~654.
- [10] 姜福兴, 张 兴, 杨淑华, 等. 长壁采场覆岩空间结构探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 979~984.
- [11] 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.
- [12] 来兴平, 蔡美峰. 岩石基复合材料支护采空区动力失稳声发射特征统计分析 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 51~54.
- [13] 蔡美峰, 来兴平. 复合坚硬岩石巷道塌陷段监控的研究与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 391~394.
- [14] 来兴平, 张 勇, 奚家米. 基于AE煤岩破裂与动态失稳特征实验及综合分析 [J]. 西安科技大学学报, 2006, 26 (3): 289~292.
- [15] 西安科技大学, 中国神华能源股份有限公司神东煤炭分公司, 教育部西部矿井开采与灾害治理重点实验室. 大柳塔煤6 m厚煤层一次采全厚开采方法及“支架-围岩”双馈动力学研究 [R]. 西安: 西安科技大学, 2005.