

文章编号:1672-9315(2006)03-0289-04

基于 AE 的煤岩破裂与动态失稳特征 实验及综合分析

来兴平^{1,2}, 张勇^{1,2}, 奚家米¹, 张海燕¹

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 2. 教育部西部矿井开采及灾害控制重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:要进行大尺度采空区衍生动力学灾害的准确预测预报, 必须进行煤岩破裂与演化为动力学失稳的定量化实验的前期研究。大柳塔煤矿 1⁻²煤处于厚风积沙、浅埋深、薄基岩工程与地质环境中, 要实现 6m 厚煤层一次全厚开采, 采后形成大范围采空区上覆煤岩破裂并演化为动力学失稳, 极易诱发生生灾害。基于对 1⁻²煤破裂失稳的声发射相关实验, 综合分析煤岩破裂声发射总事件、能率与时间的之间的定量关系, 包括加载上升阶段、初始破裂阶段、加速破裂阶段、破裂失稳后能量下降阶段与回弹阶段, 这有助于确定合理的失稳前兆判据, 以期对开采过程中诱发动力学灾害的危险源在线辨识及预警提供定量化预报。

关键词: 声发射; 煤岩破裂实验; 动力学失稳; 特征参数; 综合分析

中图分类号: TD 315⁺.1

文献标识码: A

Comprehensive characteristics analysis of crack propagation and dynamical destabilization of coal-rock based on acoustic emission experiment

LAI Xing-ping^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, XI Jia-mi¹, ZHANG Hai-yan¹

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. China Educational Ministry Key Lab. of Western Safe Mining & Hazard Control, Xi'an 710054, China)

Abstract: To accurately predict the dynamical hazard of a large scale mined-out area, the quantitative experiment on unstable crack propagation and dynamical destabilization on coal-rock have been fulfilled previously. The No. 1⁻² coal locates thick-sand on surface and shallow-depth and thin rock-base engineering geological environment. Large scale mined-out area will be caused once to mine coal thoroughly (6m) at Da-Liu-Ta coal mine in Shanxi province. The overburden coal-rock will collapse and result in destabilizing effect so as to derive dynamic hazard easily. Based on the AE interrelated experiment on No. 1⁻² coal crack growth, the quantitative regularity of total-AE-event and time, energy-rate and time has been comprehensive analyzed respectively. The process includes rising stage, initial crack stage, accelerating damage stage, after damaged and anti-elastic energy stage. These characteristic regularity will be regarded as collapsing load foreboding evidence so as to on-line identify of mining derived dynamic hazard and quantitative predict.

Key words: acoustic-emission (AE); experiment on unstable crack growth of coal-rock; dynamical destabilization; characteristic parameters; comprehensive analysis

• 收稿日期: 2005-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(10402033), 教育部西部矿山开采及灾害控制重点实验室重点项目(04JS19)

作者简介: 来兴平(1971-), 男, 宁夏平罗人, 教授, 主要从事工程力学、岩层控制与动力学灾害治理研究。

0 引言

岩石受载后其内部微破裂萌生、扩展和断裂过程中会产生声发射现象(AE)。通过研究岩石破坏过程的声发射前兆特征、声发射参数与岩石破裂之间的关系,为进行大尺度采空区衍生动力学灾害准确预测预报提供依据。国内外学者曾开展过岩石破裂全过程声发射演化特征的研究^[1-5],但目前对西部矿山采空区煤岩破裂失稳的声发射特征研究还很少涉及,因此很有必要开展该方面的相关研究。大柳塔煤矿处于侏罗系煤田,1⁻²易燃煤层处于厚风积沙、浅埋深、薄基岩地质环境中,要实现大采高(6m)煤层安全高效开采,必须对开采后形成的大尺度采空区煤岩破裂及动力学失稳进行预测预报。通过对1⁻²煤样单轴受压破坏过程中声发射特征实验与参数统计,分析煤岩受力、变形直至破坏全过程中总事件-时间($T_{AE}-t$)、能率-时间($N-t$)之间的动态关系进行对比分析,从微观破裂孕育、产生、演化直至宏观失稳的全过程揭示1⁻²煤岩破裂过程与声发射特征参数之间的内在规律。

1 声发射实验原理

煤岩破裂及失稳的声发射检测就是利用先进仪器接受从煤岩介质内部释放的弹性波,通过分析来确定破裂源特征及判断其动力学失稳倾向性的技术^[6-8]。AE数据采集通过灵敏的电子仪器,从声源发出的弹性波材料中传播,被置于物体表面的传感器接收,传感器将接收到的波形转换成电信号,再经信号放大器处理放大后,经滤波器除背景噪声等无效信号成分,对有效信号再次放大后经计算机处理形成各种声发射信号参数。实验采用北京声华兴业科技有限公司5通道SWAES数字化全波形声发射检测仪,该装置可根据需要选配不同的传感器和放大器,对应每一通道的参数、波形分别触发,数字信号处理电路避免了漂移现象,实现更高的精度和稳定性,可编程任意或全部通道的参数和波形采集。

2 声发射参数设置及实验内容

2.1 声发射实验参数设置

任何灾害危险性的增加都有相应的外在表现,而且在灾害临近时信息的种类、强度急剧增加。为全面反映岩石声发射特性,必须选取适当的参数,本文主要分析总事件和能率随时间变化特征。其中总事件是单位时间内仪器检测到的声发射事件累计总数(次/s),反映声发射频率。它是岩体或复合岩体材料出现破坏的重要标志。能率是单位时间内仪器检测到的声发射能量的相对累计值(能量单位/s),反映声发射能量,它是岩体破坏速度和大小变化程度的重要标志。实验前首先对声发射系统参数进行设置(见表1)。

表1 声发射系统主要实验参数预置

Tab. 1 Pre-setting-performance parameters of AE test system

数据传输 MB/S	频率响应/kHz	功耗(RMS)/W	动态范围/dB	采样精度/位	工作电压
132(MAX)	20-2 000 ±1.0 dB	160	≥72	16	AC220 V/50 Hz ±10%

2.2 实验内容

实验煤样采自大柳塔煤矿1⁻²煤,煤样高度(H)10 cm,直径(D)5 cm,通过实验研究煤样受力、变形直至破坏全过程中声发射的总事件-时间、能率-时间之间的关系,探索煤样单轴受压破坏全过程与声发射参数之间的特性等,图1(a,b)分别描述了煤样受压破坏前后声发射特征实验情景。

3 动载荷作用下煤岩的声发射特性

通过对大柳塔煤矿1⁻²煤单轴压缩声发射数据进行处理后,全面分析了煤岩在动载荷作用下破裂全过程声发射特征和规律^[9]。总事件与时间($T_{AE}-t$)、能率与时间($N-t$)关系及特征规律如下。

3.1 加载上升阶段

根据实验过程,开始对煤样进行初始加载,根据经典的岩石应力-应变规律,该过程类似于现场工程中的自重应力静力累积作用,此阶段时间与总事件、时间与能率之间的声发射关系曲线如图2所示。煤样声发

(a) (b)

图1 煤样受压破坏声发射实验情景描述,(a)煤样压缩前,(b)煤样压缩后

Fig.1 The description of AE experiment on coal compressing

射总事件个数很少,且变化不大,声发射总事件个数缓慢增加,但趋势平缓,偶尔也有涨落,但总趋势是增加的,这是由于煤样内某些预先存在的微裂隙或张开性结构面开始闭合,煤样被压密造成的。由于声发射事件数较少,因此能率也较小,但波动比较大,还受裂纹闭合的持续时间的影响,特别是第9s,声发射总事件不是很多,能率在前11s内最大,此时的裂纹闭合的持续时间是较长的。

3.2 初始破裂阶段

继续对煤样进行加载,煤样进入初始破裂阶段,此阶段时间与总事件、时间与能率之间的声发射关系曲线如图3所示。总事件比初始上升阶段有所增加,但涨落起伏较大,且延续时间较长,在第18s至第20s出现一次大的上升趋势,由此可见,在初始破裂阶段煤样的新裂纹开始出现,裂纹之间的相互碰撞开始加剧,一些裂纹又出现闭合,相互贯通,且裂纹出现的速率不同,在第18s至第20s速率在此阶段最大,可见此时煤样内部的总事件比较活跃,在第20s至第26s内总事件有所下降,表明此时裂纹之间的活跃程度降低。裂纹开始出现,能率随着时间的延续波动较大,能率和时间变化趋势与总事件和时间的变化趋势相一致。

3.3 加速破裂阶段

经过初始破裂阶段后,煤样内部出现大的裂纹,当载荷达到极限应力的85%左右时,声发射总事件和能率达到峰值,此时煤样达到破裂失稳状态。此阶段时间与总事件、时间与能率之间的声发射关系曲线如图4所示。煤样在此阶段的声发射总事件急剧增加,能率也是急剧增加,可以判定声发射现象比较突出,前期积聚的能量快速释放。这是由于煤样破裂速率、破裂范围快速增加,原有裂隙增大,微小裂隙连接形成大的裂隙,煤样产生结构性破坏,微裂隙的发展出现了质的变化,破裂不断发展,直至煤样完全破坏,煤样由体积压缩转为扩容,轴向应变和体积应变速率迅速增大,总事件和能率都达到了峰值。

3.4 破裂失稳后能量下降阶段

继续加载后,煤样总事件和能率都达到峰值后,煤样内部结构破裂,但煤样基本保持整体状,此阶段延续时间较长。此阶段时间与总事件、时间与能率之间的声发射信号特征关系曲线如图5所示。声发射总事件在较短的时间内急剧下降,能率也随之下落,但总事件和能率都不下降到零,在较长的时间内总事件和能率处于波动状态。这是由于在本阶段,裂隙急剧发展、交叉,贯通形成宏观断裂面,因此造成声发射总事件和能率在较短的时间内急剧下降。形成断裂面后,煤样变形在较长的时间内表现为沿宏观断裂面的块状滑移,因此在较长的时间内总事件和能率处于波动状态,这对现场采取安全预警措施有实时指导意义。

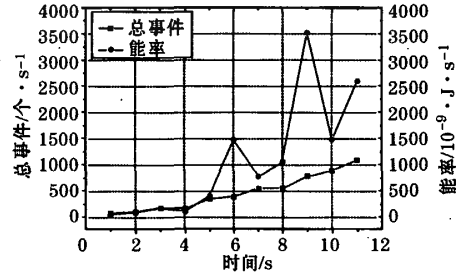


图2 加载上升阶段声发射关系曲线

Fig.2 The relationship curve of AE characteristics at load-rising stage

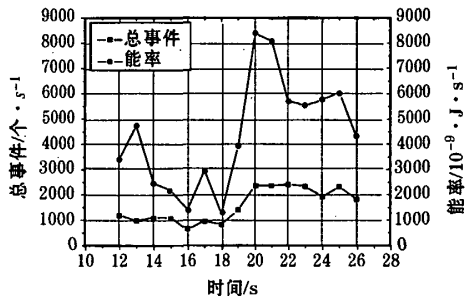


图3 初始破裂阶段声发射关系曲线

Fig.3 The relationship curve of AE characteristics at initial-crack stage

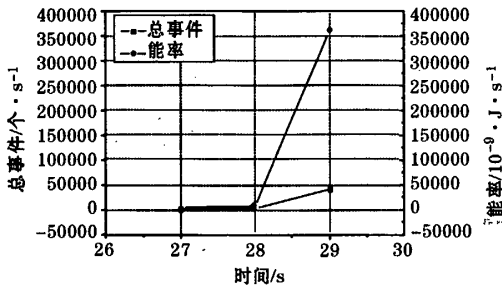


图4 加速破裂阶段声发射关系曲线

Fig. 4 The relationship curve of AE characteristics at accelerating damage stage

3.5 能量回弹阶段

继续对煤样进行加载,煤样破裂的声发射总事件和能率出现回弹现象,这就是所谓的“破坏后效应”,说明煤岩破坏后其运动还没有中止,此阶段时间与总事件、时间与能率之间的关系曲线如图6所示,从中可看出总事件和能率在经过5s的较小波动后,产生突变,急剧上升,总事件和能率出现反弹。这是由于煤样变形在较长的时间内积聚的能量在较短的时间内释放,使总事件和能率快速上升,这只是残余能量的释放,因此出现了一个小的峰值。

4 结论

通过对煤岩 1⁻²煤破裂失稳的声发射相关实验,综合分析加载上升阶段、初始破裂阶段、加速破裂阶段、破裂失稳后能量下降阶段与回弹阶段的煤岩破裂声发射总事件(T_{AE})与时间(t)、能率(N)与时间(t)的之间的定量关系,可以看出:

- 1) 声发射技术对大尺度采空区衍生动力学灾害的准确预测预报,尤其可实现对重大灾害的临灾预警和灾害倾向的可预知性提供了可能。
- 2) 煤样声发射特性与其赋存环境、加载过程及应力变化历史密切相关,它反映了在载荷作用下煤样由原有微裂隙孕育、演化直至宏观断裂失稳的过程。对于大柳塔 1⁻²煤岩来讲,当载荷达到极限应力的 80% 左右时,声发射总事件和能率达到峰值,这可以作为煤样破坏的前兆,同时验证了其破裂与动态失稳过程中声发射的总事件和能率可以反映煤样内部应力变化的剧烈程度,这作为判定煤样的稳定程度的依据之一。
- 3) 从微观破裂孕育、产生、演化直至宏观失稳的全过程揭示 1⁻²煤岩破裂过程与声发射特征参数之间的内在规律,为提出消除和缓解灾害的控制对策提供依据。同时,与应力/应变和位移等信息耦合,可形成衍生动力灾害连续、实时监测多参量判别技术,保证实现厚煤层(或大采高)安全开采的目的。

参考文献:

[1] X P Lai, M F Cai, M W Xie. 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.

[2] Locker D A. The role of AE in the study of rock failure[J]. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 1993, 30(7): 883-899.

[3] C A Tang. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34(2): 249-262.

[4] C A Tang, H Liu, P K K Lee, et al. Numerical tests on micro relationship of rock failure under uniaxial compression - Part I: Effect of heterogeneity[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2000, 37(4): 555-569.

[5] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 499-2 503.

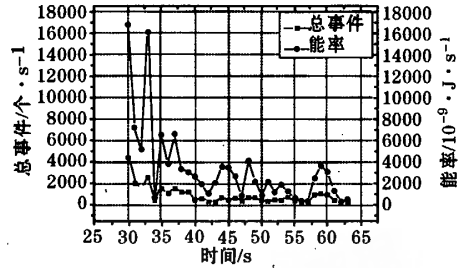


图5 破裂后能量下降阶段声发射关系曲线

Fig. 5 The relationship curve of AE characteristics after damaged at energy-dropping stage

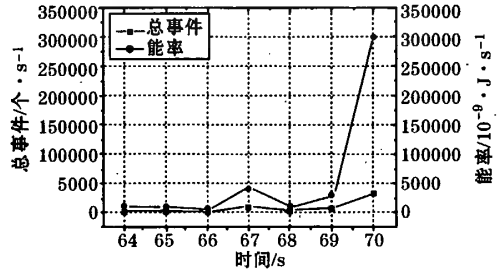


图6 能量回弹阶段声发射关系曲线

Fig. 6 The relationship curve of AE characteristics at anti-elastic energy stage

5.2 总体布局及建设构想

根据公园建设原则,从公园综合发展需要出发,在充分分析延川黄河蛇曲地质公园地质地貌景观资源、人文旅游资源及其特征的基础上,结合本公园生态环境的实际情况,以有利于景区建设,旅游资源合理开发与保护,各区间有机联系与功能合理分工等原则,把黄河蛇曲地质公园划分为:延水关河谷阶地峡谷地貌旅游区、苏亚湾黄土高原生态旅游区、乾坤湾蛇曲地貌旅游区、清水湾蛇曲地貌旅游区。各旅游区的主要功能、交通方式、地位以及主要景点见表4。

参考文献:

- [1] 程绍平,邓起东,闵伟,等.黄河晋陕峡谷河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动[J].第四纪地质研究,1998,8(3):238-248.
- [2] 郭威,庞桂珍,屈茂稳,等.黄河壶口瀑布国家地质公园地质遗迹的保护与开发利用[J].西北地质,2002,35(3):119-125.
- [3] 陈云,童国榜,曹家栋,等.渭河宝鸡段河谷地貌的构造气候响应[J].地质力学学报,1999,5(4):49-56.
- [4] 丁仲礼.中国黄土的土壤地层学与第四纪气候旋回[A].刘东生:黄土第四纪地质全球变化(一)[C].北京:科学出版社,1990:34-46.
- [5] 潘保田,李吉均,朱俊杰.黄河中游阶地与构造气候旋回,地貌·环境·发展[M].北京:中国环境科学出版社,1995:26-30.
- [6] 邢成起,丁国瑜,卢演涛,等.黄河中游河流阶地的对比及阶地系列形成中构造作用的多层次性分析[J].中国地震,2001,17(2):187-201.
- [7] 联合国教科文组织地学处.世界地质公园网络工作指南[Z].国家地质公园领导小组办公室翻译,2002.
- [8] 国土资源部地质环境司编.走进国家地质公园[M].北京:地质出版社,2000.
- [9] 赵逊,赵汀.中国地质公园地质背景浅析和世界地质公园建设[J].地质通报,2003,22(8):23-25.
- [10] 郭威,周义,丁华.论建立陕西延川黄河蛇曲地质公园的地质意义[J].西安科技大学学报,2005,25(3):333-336.

(上接第292页)

- [6] 来兴平,黄昌富,蔡美峰.采空区动力学灾害监测的非平衡信号的子波变换分析[J].西安科技学院学报,2003,23(3):237-240.
- [7] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock strength[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34: 1-165-1-186.
- [8] Xingping Lai, Meifeng Cai. 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] 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控制重点实验室.大柳塔煤矿1⁻²煤6m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.

(上接第295页)

参考文献:

- [1] 李湖生.由通风网络结构数据自动生成曲线网络图[J].煤矿安全,1998,(1):9-12.
- [2] 吴兵,卢本陶,等.由通风网络结构数据自动生成通风网络图研究[J].中国安全科学技术,2005,1(6):25-28.
- [3] 郭建广.矿井通风计算机管理系统的改进研究[D].辽宁工程技术大学,2001.
- [4] 李龙清,吴奉亮.基于ObjectARX的通风辅助设计系统研究[J].煤炭工程,2004,(8):53-56.

基于AE的煤岩破裂与动态失稳特征实验及综合分析

作者: [来兴平](#), [张勇](#), [奚家米](#), [张海燕](#), [LAI Xing-ping](#), [ZHANG Yong](#), [XI Jia-mi](#),
[ZHANG Hai-yan](#)

作者单位: [来兴平,张勇,LAI Xing-ping,ZHANG Yong\(西安科技大学,陕西,西安,710054;教育部西部矿
井开采及灾害控制重点实验室,陕西,西安,710054\)](#), [奚家米,张海燕,XI Jia-mi,ZHANG
Hai-yan\(西安科技大学,陕西,西安,710054\)](#)

刊名: [西安科技大学学报](#) **PKU**

英文刊名: [JOURNAL OF XI'AN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY](#)

年,卷(期): 2006, 26(3)

引用次数: 5次

参考文献(9条)

- [1. X P Lai, M F Cai, M W Xie In situ monitoring and analysis of rock mass behavior prior to collapse of the main transport roadway in Linglong Gold Mine, China 2006\(04\)](#)
- [2. Locker D A The role of AE in the study of rock failure 1993\(07\)](#)
- [3. C A Tang Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity 1997\(02\)](#)
- [4. C A Tang, H Liu, P K K Lee Numerical tests on micro relationship of rock failure under uniaxial compression-Part I :Effect of heterogeneity 2000\(04\)](#)
- [5. 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究\[期刊论文\]-岩石力学与工程学报 2004\(15\)](#)
- [6. 来兴平, 黄昌富, 蔡美峰 采空区动力学灾害监测的非平衡信号的子波变换分析\[期刊论文\]-西安科技学院学报 2003\(03\)](#)
- [7. Hoek E, Brown E T Practical estimates of rock strength 1997](#)
- [8. Xingping Lai, Meifeng Cai Couple analyzing the acoustic emission characters from hard composite rock fracture\[期刊论文\]-Journal of University of Science and Technology Beijing 2004\(02\)](#)
- [9. 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控制重点实验室 大柳塔煤矿1-2煤6m厚煤层一次采全厚开采方法及“支架-围岩”双馈动力学研究 2005](#)

相似文献(0条)

引证文献(5条)

- [1. 胥海东, 蒋东晖, 邹磊, 曹建涛, 来兴平 基于光学窥视的破碎顶板岩层动态破裂特征\[期刊论文\]-西安科技大学学报 2009\(3\)](#)
- [2. 童敏明, 胡俊立, 唐守锋, 戴新联 不同应力速率下含水煤岩声发射信号特性\[期刊论文\]-采矿与安全工程学报 2009\(1\)](#)
- [3. 来兴平, 吴学明, 高喜才, 伍永平 基于MTS-AE单轴压缩下的煤岩损伤特征\[期刊论文\]-西安科技大学学报 2008\(2\)](#)
- [4. 来兴平, 栾小东, 伍永平, 张勇, 吕兆海 开采扰动区变尺度采空区覆岩介质动态损伤实验\[期刊论文\]-煤炭学报 2007\(9\)](#)
- [5. 李玉民, 来兴平, 蔡晓芒, 吕兆海, 苏普正 开采扰动区\(EDZ\)内层状围岩变尺度损伤及失稳预计实验及综合分析\[期刊论文\]-西安科技大学学报 2007\(1\)](#)

