

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

Statistical analysis of the character of acoustic emission for nonlinear dynamical damage in mined out areas supported by composite rock materials

蔡美峰¹, 来兴平^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 西安科技学院 陕西省岩层控制重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于声发射智能监测技术, 对玲珑金矿 255 m 水平坚硬岩石复合材料支护的主运巷采空区结构失稳过程进行了实时监测, 利用固体断裂非平衡统计理论进行统计推断, 分析采空区围岩断裂失稳过程中微破裂的时空演化规律以及变形与声发射间的内在联系, 同时在统计分析过程中考虑了不同因素对围岩破裂过程与失稳模式的影响, 这对于工程安全监测与评价有很大的现实意义。

关键词: 声发射特征; 非线性动力失稳; 统计分析

中图分类号: TD 325.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)01-0051-04

作者简介: 蔡美峰(1943-), 江苏如东人, 教授, 博士生导师。主要从事岩石力学基础理论、岩土工程数值方法、采矿设计优化及矿山地压控制方面的教学和科研工作。

CAI Mei-feng¹, LAI Xing-ping^{1,2}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, USTB, Beijing 100083, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Shanxi Strata Control Key Lab., Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on intelligent acoustic emission technique, the dynamical monitoring of material and structure damage of the collapsed areas supported by composite hard rock materials in transport roadways of Linglong gold mine has been carried out. The nonequilibrium statistical theory of solid fracture is used to predict the stability and damage process of the main transport roadway at 255 m level. The monitored results are used to seek out the inherent spatial and temporal rule of the fracture and damage, the intrinsic relation between the damage model and the nonlinear characteristic parameters of acoustic emission during the process of tunnel failure. Parametric statistical analysis is also conducted to assess the effect of various factors on the failure process and failure model. It is a matter of great significance for the safer inspection and evaluation of composite rock engineering.

Key words: acoustic emission's character; nonlinear dynamical damage; statistical analysis

0 前言*

众所周知, 岩石基复合材料支护的结构体系的非均质性、各向异性和损伤破坏过程复杂的特点, 这给地下工程结构的安全检测工作带来了相当大的难度。利用岩层断裂使岩体卸压和岩层内聚集的弹性能释放而产生的声发射来判断岩体内的动力现象, 确定采空(塌陷)区围岩的破裂时间、位置及其演化动态过程, 是坚硬围岩支护结构体系失稳预测的重要手段, 尤其对分析坚硬复合岩体(含有夹杂的花岗岩或有金属锚杆、钢纤维)的断裂、损伤演化规律以及塌陷破坏的共同特征, 都具有很大的现实意义^[1~3]。笔者及其一些专家学者在地应力测量、稳定性监测、混凝土断裂的识别和预报、矿震预报等动力学领域进行过一些定性工作^[4~7]。

本文采用实时声发射监测技术, 记录并分析了玲珑金矿 255 m 主运巷采空区坚硬岩石巷道钢纤维增强复合材料破坏全过程的声发射及其信号特征。

1 采空区围岩材料与结构失稳监测

1.1 检测信息

围岩断裂过程都是非平衡的不可逆的, 而其本质则是外应力(包括温度与介质)作用下的微裂纹逐渐演化长大(包括合并)和传播决定的。微裂纹长大的演化规律受动力影响, 本质上是随机的, 呈非线性特征, 而其微观机理则基于位错模型或点缺陷模型等。

Carpenter 等人认为, 声发射率与晶体内可动位错密度的变化有关, 他们提出声发射计数率与可动位错密度的关系^[8]:

$$\frac{dN_c}{dt} = 10^{-4} \frac{d\Lambda_m}{dt} \quad (1)$$

式中 $\frac{dN_c}{dt}$ 为单位时间声发射计数; $\frac{d\Lambda_m}{dt}$ 为可动位错

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50074002); 国家教委博士点基金资助项目(2000000802)

收稿日期: 2002-06-28

密度。

坚硬岩石材料在外载荷作用下以及施工扰动和断层挤压等内力作用下变形或破坏时,内部积聚的弹性应变能会向外发射一系列脉冲应力波(即声发射信号),它是分析声发射性质和状态的基本依据,处理和分析声发射信号特征参数有总事件、大事件和能率。

1.2 声发射监测方法

对于坚硬岩石复合材料的声发射监测,岩体稳定程度不同,其声发射监测网布置以及岩体失稳声发射指标临界值均不同。岩体稳定程度高,其岩体失稳声发射指标临界值较高(类似花岗岩破裂失稳),监测周期也可以长一些;围岩稳定性差,其失稳声发射指标临界值较低(类似煤矿坚硬顶板),监测时间可短一些。图1和图2分别给出了工程现场监测网的布置和声发射监测工况。

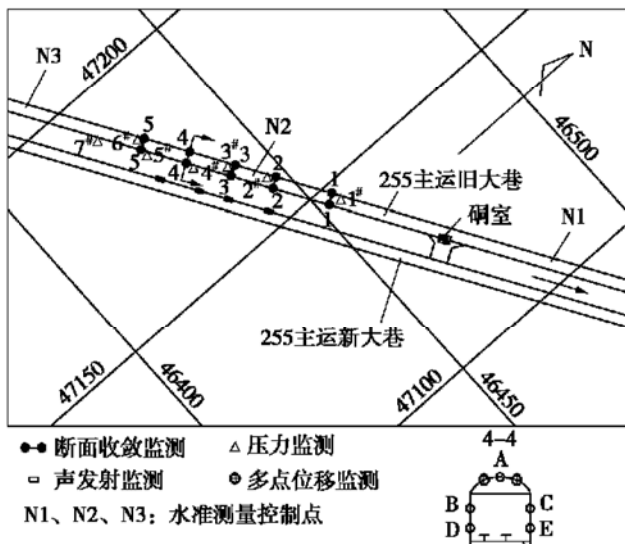


图1 采空区监测网布置

Fig. 1 The arrangement of monitoring net in mined out areas



(a) 传感器的布置



(b) 现场声发射仪器工况

图2 工程现场声发射监测状况

Fig. 2 The in-situ AE monitoring condition

2 非平衡统计理论描述

固体断裂非平衡统计理论或称为非平衡统计断裂力学,是将非平衡统计理论的概念和方法用于研究固体断裂而发展起来的^[9]。裂隙统计演化动力学是主体,微观机理是出发点。根据微裂隙数统计原理及实际材料微观结构不均匀性,给出了描述大量裂隙长大的演化方程。该方程的普遍性和由微观机理决定的方程系数的特殊性,就是断裂非平衡统计理论为何能描述各种断裂类型普遍规律的一个主要缘由,其微裂纹演化遵守一定的统计分布规律。

若 $P(C, t) dC$ 看成微裂隙的空间概率分布函数,则微裂隙的时间概率分布函数为

$$P(t, C) dt = P(C, t) dt / \int_0^{\infty} P(C, t) dt. \quad (2)$$

它定义为无限长的时间范围内求得长度 C 的微裂隙存在于 t 和 $t + dt$ 间的概率。显然, $P(t, C) dt$ 满足归一化条件 $\int_0^{\infty} P(t, C) dt = 1$ 。

利用声发射方法监测围岩失稳破坏,完全可以作为岩石微裂纹及扩展方向的有效预报手段,监视岩石破裂的发生以及地震预报具有重要价值。如局部信息与整体信息的自相似性、小尺度下测得的信息与大尺度下测得的信息的自相似性、历史信息与未来信息的自相似性。由此可以构造模型,由前者预测后者,对这种信息挖掘研究,将会与岩石的变形破裂机制密切联系起来,从本质上提出更为有效的分析方法。

因此,可以从声发射事件的时间分布上进行围岩断裂失稳的非平衡统计,为了使其能反映围岩失稳特性,在一定空间区域与时间范围内需求出声发射统计平均值,还要考虑相应宏观力学量的统计平均值^[10]。

3 声发射信号统计规律与分析

3.1 围岩失稳声发射事件时间分布的特征

同其它材料一样,受力的岩石因储存在其结构内部的应变能的释放而诱发产生脉冲,这种脉冲以弹性波的形式出现,一个声发射信号可以定义为一个瞬态弹性波,岩石微破裂的损伤演化过程可以直接从声发射事件的时间分布上推断出来。

根据声发射对微裂纹与缺陷的检测分析,岩石基复合材料支护采空区岩体断裂失稳的演化过程是一个非平衡的时空演化过程,具有非线性特征。现场监测的工程岩体结构体系断裂失稳的声发射信号反映裂纹的产生与消亡过程。通过基于非平衡统计理论建模,对声发射信号特征参数进行了全面的统计分析并评

价,从不同阶段声发射特征参数变化趋势来反映围岩的结构破坏特征^[11]。统计分析过程中将围岩断裂失稳过程分为5个阶段:加载阶段、上升阶段、初始破裂阶段、能量释放阶段和加速破裂阶段(如图3所示)。由于岩体微观缺陷和结构的不均匀性,其声发射有规律地分散,充分显示其固有的统计特性。从声发射特征参数变化情况分析可以看出,在不同的监测时间范围内,岩体声发射的大事件和总事件的变化是不一样的,而且其能率的变化趋势(临界值)也不尽相同,这可以反映出该部位的岩体介质内核性态是不一样的。统计与分析表明,一般来讲,能率越大,反映岩石越坚硬,岩石达到破裂的临界能量积聚的时间越长。在工程现场,压力和位移变化的速率对声发射影响很大,监测结果统计表明,随着压力增大,位移增多,声发射的频率与幅度也随之增大(如图4所示)。另外由于暴雨入渗,造成了声发射大事件和总事件增大,而能率却明显下降(见图5),这主要是渗流对岩体产生软化作用,加速岩体破裂作用造成的。

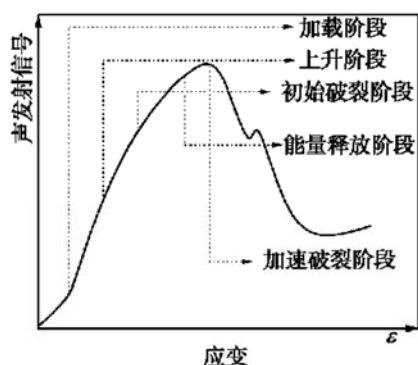


图3 围岩破坏过程中声发射特征参数曲线

Fig. 3 The curve of AE characteristic parameters during the fracture of rock

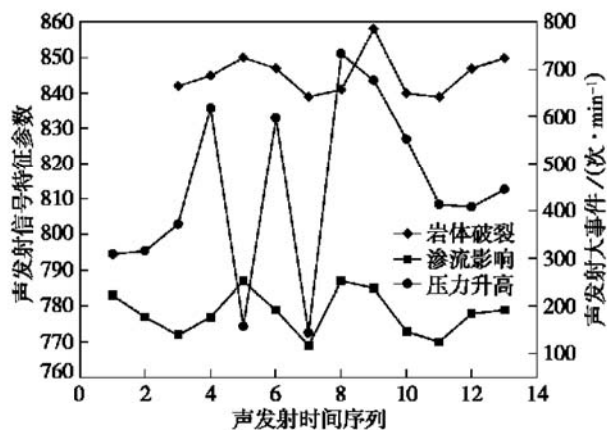


图4 压力、渗流对岩体破裂声发射影响关系

Fig. 4 The interacting relation of AE between pressure and seepage

3.2 围岩失稳位置反演

基于声发射特征参数——总事件、大事件和能率(其分别反映频率、幅度和岩石坚硬程度)的监测与统

计,其信号辨识过程如下:

(1) 声发射信号的识别和检测,分析有没有集丛现象,这是判断围岩开始断裂的主要特征之一,在此过程中要正确处理噪声(包括爆破震动和电机车震动等因素)影响。

(2) 由于围岩断裂过程并不是连续的,因此其声发射就会出现非连续、非平稳、断续信号,利用小波变换对其进行分析。首先进行信号分解,利用非平衡统计理论,对断续信号进行拟合,结合快速傅立叶变换给出的频率和相位(角度)进行耦合变换,将断续信号进行“补接”成连续信号,这为声发射特征参数统计分析及其围岩破断位置的反演提供有效手段和理论依据。基于声发射监测信号统计分析,推断出围岩失稳的位置,图6是对围岩断裂失稳声发射线定位及幅度—持续时间关系的描述。

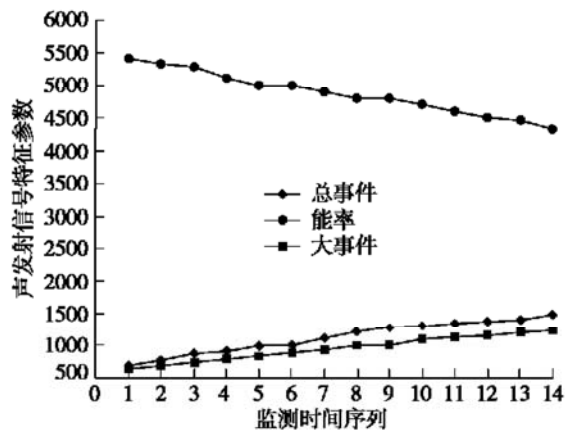


图5 渗流作用的岩体声发射特征曲线

Fig. 5 The curve of AE character under the seepage effect

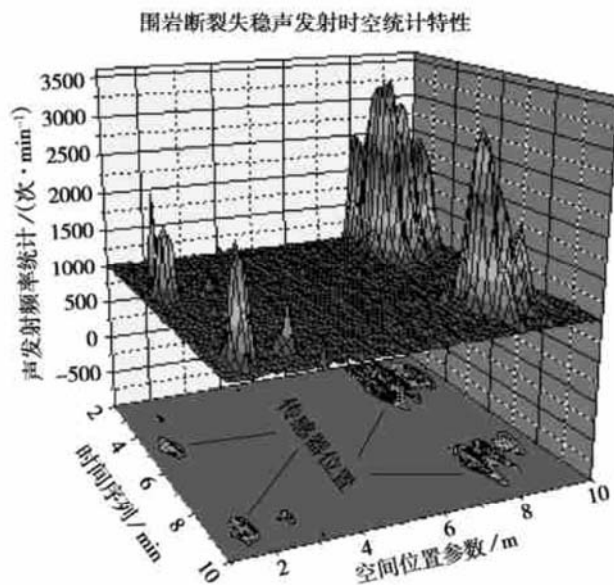


图6 声发射线定位及幅度—持续时间关系

Fig. 6 The relation of line location and amplitude vs sustaining time of AE

4 结果讨论与分析

基于对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发现:

(1) 采空区(或塌陷区)围岩动力失稳呈现非线性关系,结合岩体失稳的全应力应变关系,可以揭示围岩失稳过程与声发射之间内在的规律性和必然联系。

(2) 对于岩石基复合材料支护采空区,其破裂失稳的声发射不仅与围岩材料结构与缺陷的强度分布(即工程岩体材料的力学性质)有关,而且还与工程岩体所处的应力状态有关。

(3) 声发射频率、幅度与变形(加载)速度有关,在实验室测试中,一般可以保持加载速度不变,但在现场实际工程监测中,这一点难以达到,因而增加了问题的复杂性。

(4) 围岩断裂失稳的声发射是一个过程量,其真实反映围岩断裂的前兆,因而其可以作为一种有效的、可靠的预测预报手段。

(5) 根据声发射频率和时空的演化趋势,可以判断塌陷区失稳的关键位置,同时也进一步证明了对于岩石基复合材料支护采空区,其动力失稳的声发射特征参数明确地反映岩体内部微破裂变化的剧烈程度,根据其统计特征分析,可以判定该岩体的稳定程度与级别,这对保证工程现场的安全有很大的意义。

参考文献:

[1] Rudajev V, Vilhelm J, Lokajicek T. Laboratory studies of acoustic

emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, 37: 699-707.

[2] Darot M, Reuschle T. Acoustic wave velocity and permeability evolution during pressure cycles on a thermally cracked granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, 37: 1019-1026.

[3] Butt S D, Mukherjee C, Lebnans G. Evaluation of acoustic attenuation as an indicator of roof stability in advancing headings[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, 37: 1123-1131.

[4] 蔡美峰. 原位地应力测量的原理和方法(第 175 次香山科学会议《深部高应力下的资源开采与地下工程》学术讨论会交流材料)[R]. 2001.

[5] 蔡美峰. 金属矿山采矿设计优化与地压控制——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 291-300.

[6] 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土断裂声发射自相似性识别特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 157-160.

[7] 卢清国, 蔡美峰. 采空区下方厚矿体安全开采的研究与决策[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1), 86-91.

[8] Carpenter S H. Sources of acoustic emission generated during plastic deformation of 7075 Aluminium Alloys[J]. Metallurgical, 1977, 8(10): 3-8.

[9] 邢修三. 固体断裂非平衡统计理论[J]. 自然科学进展, 2000, 10(4): 289-298.

[10] 来兴平. 基于非线性动力学的采空区稳定性集成监测分析与预报系统研究及其应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2002.

[11] 蔡美峰, 来兴平. 声发射在复合材料支护采空区非线性动力失稳监测中的应用(中国岩石力学与工程学会第七次学术大会)[R]. 西安, 2002.

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的核心期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行人。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、展望 21 世纪岩土力学、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊 1999 年、2001 年两次获“自然科学基金性、高科技学术期刊经费”资助; 本刊于 1992 年、1996 年、2000 年 3 次被确认为我国核心期刊; 本刊被《中国学术期刊文摘》、《中国科学引文数据库》、《中国科技论文统计与分析数据库》收录; 本刊被美国《工程索引》(Ei) 确认为 Ei Page One 数据库收录期刊; 本刊被 Geotechnical Engineering International Resources Center (GE-IRC) 确认为岩土工程核心期刊。

凡本刊刊登的文稿均收入相应光盘版及 Internet 网。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为双月刊, 大 16 开本, 双栏排版, 120 页左右, 单月 30 日出版。每期定价 10 元, 全年 60 元。漏订或缺者请向编辑部邮购。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000-4548, 国内统一刊号 CN32-1124/TU, 国内发行代号 28-62, 国外发行代号 BM520。

本刊还承办广告业务, 欢迎惠顾。

编辑部地址: (210024) 南京虎踞关 34 号

(南京水利科学研究院土工所内)

电话: (025) 5829553, 5829556 传真: (025) 5829555

E-mail: ge@njhri.edu.cn

网址: <http://www.cgejournal.com> 或 <http://ytgc.chinajournal.net.cn>

(本刊编辑部)