

岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究

尹贤刚^{1,2}, 李庶林³, 唐海燕², 裴建良¹

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 长沙矿山研究院, 湖南 长沙 410012; 3. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 通过岩石加载的室内试验方法, 测试不同岩石破裂全过程的力学特征及其声发射特性, 得到岩石破坏全过程力学特性——岩石的全应力-应变曲线、声发射事件累积数、声发射事件率等相关曲线及参数, 给出声发射事件数、事件率与应力水平、时间之间的关系。着重讨论一次性加载过程中塑性变形阶段明显的岩石在加载接近峰值强度时单位时间内的应力增长速度减小, 也即这一阶段出现明显的“耗时”现象; 并且在此阶段监测到的声发射事件率出现明显下降, 出现声发射相对平静阶段; 而对于塑性变形阶段不明显的岩石来说, 这一阶段则基本不存在明显的“耗时”现象, 声发射的监测中也没有发现声发射相对平静期现象。另外, 还运用分形理论, 研究分析处于不同加载应力比的岩样在各个阶段的声发射分形维数, 特别是研究声发射平静期维数变化情况。指出在加载初期分形维数处于较低值, 且分形维数随加载应力增加而逐步增加; 在加载到峰值应力的40%左右时, 分形维数开始下降; 在加载接近到峰值应力时, 即处于声发射平静期阶段时分形维数逐步降到最低, 且此时预示着岩石的破坏。此外, 结合室内试验, 还对现场岩体失稳破坏声发射监测中的一些实际问题进行总结和分析, 为更好地应用声发射手段进行岩体稳定性现场监测预报提供理论依据、方法和手段。

关键词: 岩石力学; 岩石破坏; 声发射平静期; 分形维数

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)增2-3383-08

STUDY ON QUIET PERIOD AND ITS FRACTAL CHARACTERISTICS OF ROCK FAILURE ACOUSTIC EMISSION

YIN Xiangang^{1,2}, LI Shulin³, TANG Haiyan², PEI Jianliang¹

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. Changsha Institute of Mining Research, Changsha, Hunan 410012, China; 3. Collage of Architectural and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361105, China)

Abstract: Through the load test of rock, different rocks are tested and the mechanical and acoustic emission(AE) characteristics of rocks are studied. Stress-strain curves, AE accumulative total number and AE rate of rock failure are gotten. And AE features including the relationships between AE and time, AE and stress are studied. This study discusses emphatically the AE quiet period of the loading processes to those rocks whose plastic deformation is obvious. In this AE quiet period, the stress increment will be diminished in unit time when stress approaches to peak value strength and it will need more time. Moreover, AE rate will be declined and AE quiet period will also appear in this stage. But for those rocks whose plastic deformation is not obvious, this AE quiet period will not appear. In addition, by fractal theory, the AE values of different stress rates especially at quiet period are calculated and analyzed. It is found that the fractal values are lower in initial loading stages and increase gradually along with stress, about at the 40% of stress rate, fractal values begin to fall down. The fractal values go down to the minimum near the peak value stress and foreshow rock failure. Furthermore, combined with indoor experiment,

收稿日期: 2008-10-17; **修回日期:** 2009-01-04

基金项目: 国家“十一五”科技攻关项目(2006BAB02B05-1); 国家自然科学基金资助项目(10572122); 科研院所社会公益研究专项(2004DIB3J137)

作者简介: 尹贤刚(1971-), 男, 1996年毕业于昆明理工大学资源开发与利用系采矿工程专业, 现为博士研究生、高级工程师, 主要从事采矿技术及矿山岩石力学方面的研究工作。E-mail: yinxiangang@163.com

some problems of in-situ monitoring and prediction are discussed, It gives the theoretical basis and methods for in-situ rock mass monitoring and forecast by AE technology.

Key words: rock mechanics; rock failure; AE quiet period; fractal dimension

1 引言

所谓岩石声发射现象是指岩石类材料在受载时,其内部微裂纹萌生、扩展和断裂并以应力波的形式释放能量的现象,这个现象是和岩石材料本身的物理力学性质以及加载的过程及方式密切相关的,其因岩石材料性质以及加载方式和过程的不同而有所不同。声发射平静期是指岩石材料在加载过程中的某段时间内特别是峰值应力前声发射现象很少或者难以观察到的现象,其产生的内在原因主要是主破裂前声发射集结区应力松弛和应力的内部调整,导致这一时段岩样内部破坏减少,声发射率降低。

关于岩石的声发射,许多学者的研究主要是针对岩石受压、张拉、剪切和断裂试验条件下的声发射特性研究,且主要研究的是岩石峰值强度前的应力、应变与声发射参数的关系^[1~4],对于声发射参数与时间之间的特征关系则少有研究,得出的结果也大都认为岩石峰值破坏前声发射会激增。实际上,这一结果是有待商榷的,其原因在于在应力应变与声发射关系曲线上人们没有考虑时间因素的影响,而岩石在一次性加载过程中峰值破坏前所消耗的时间往往更多,故而考虑“耗时”因素,这一阶段的声发射率是降低的,会出现明显的声发射平静现象。关于声发射平静这一现象,不少学者进行过这一方面的研究:徐东强等^[5]在研究大姚铜矿砂岩声发射特征时发现,主破裂前声发射保持相对平静;张茹等^[6,7]在对花岗岩破裂过程研究中观察到声发射平静现象;曹树刚等^[8]在研究煤岩破裂时指出接近峰值强度时的声发射平静;王善勇等^[9]通过数值模拟的方法指出岩爆也具有“平静期”和“损伤愈合”的特性;梁正召等^[10]也指出岩石弱层大破裂到来之前通常有一个声发射平静期;在地震学及其相关研究中,马胜利等^[11~14]对大地震之前地震活动的平静异常也进行了较多的研究;特别是马胜利等^[12]在对不同断层类型破坏的声发射特征研究中更明确指出:挤压型雁列断层、含宏观凹凸体断层、III型剪切断层等非连续断层临近滑动失稳前,声发射活动

均出现了明显的相对平静现象。在这些研究中,学者们仅仅是指出了岩石声发射试验中有声发射平静期这一客观现象,不少人也认为这一现象可以作为岩石破坏的前兆,然而,对于什么类型的岩石在试验中会出现声发射平静期这一破坏前兆,如何利用声发射平静期这一破坏前兆进行现场监测,以及在声发射平静期何种参数可以量化则少有研究。

本文在2类不同性质的岩石声发射试验基础上,讨论了2类岩石声发射现象的差异,特别指出岩石声发射的平静期现象是相对于时间尺度上的相对的概念。不能简单地认为在岩石加载达到峰值应力临近破坏前存在的声发射激增的现象就表明这个阶段声发射事件率增加,从而忽视这一阶段的声发射平静现象,因为这一阶段所耗费的时间往往更多,故而考虑加载时间因素,声发射平静期正好处于这一阶段。并且,对于声发射监测技术的现场应用来说,则主要是依据声发射参数对时间的变化过程来对岩体的稳定性进行评价,故而时间变量是很重要的,分析中不应该被忽视^[15,16]。

此外,本文还讨论了加载过程中不同加载应力比的岩石声发射的分形维数,采用关联维数的计算方法,研究了声发射平静期的维数变化,并对平静期的声发射参数进行了量化,以此来探讨岩石破坏的前兆,便于现场监测运用。

2 岩石声发射试验及结果分析

试验采用加载控制系统和声发射监测系统2套装置。试验加载设备是MTS815型刚性压力机,声发射系统为便携式智能声发射仪^[16]。对取自三山岛金矿、厂坝铅锌矿等的绢英岩化花岗岩、结晶灰岩、铅锌矿石、黑云母片岩、辉绿岩、石英片岩以及湖南常德的砂岩等岩石进行单轴受力变形直至破坏的全过程试验,监测岩石受力变形破坏过程的声发射参数特征和时间过程特征等。试验时,保持加载过程与声发射监测过程在时间上的同步,以等应力增量间隔或等时间间隔,读取声发射仪记录的声发射事件数,并抽样存储声发射事件的波形。

2.1 岩石受力变形破坏特征

所有参与试验的岩样中, 其受力变形特征大体上可以分 2 类: 第一类岩样(主要为砂岩、辉绿岩、铅锌矿石、绢英岩化花岗岩和结晶灰岩等)基本上经历压密阶段、弹性阶段、塑性阶段和峰后破坏 4 个阶段。这类岩样塑性阶段明显, 此阶段要经过较长时间的加载岩样才破坏, 存在塑性阶段的“耗时”现象, 此时应力增加缓慢而相对应应变增加较快。这样的岩样破坏时基本上不发出响声或响声较小, 岩样碎片也不会四处飞散。而第二类岩样(主要为石英片岩)则塑性阶段不明显, 也就是说这类岩样在破坏前塑性变形不大, 在荷载位移曲线上基本上看不出塑性阶段, 不存在塑性阶段的“耗时”现象, 该类岩样在破坏时发出明显的响声, 岩样碎片四处飞散; 试验曲线如图 1 所示, 图 1(a)属于第一类岩样受力变形特点, 图 1(b)则属于第二类岩样受力变形特点。

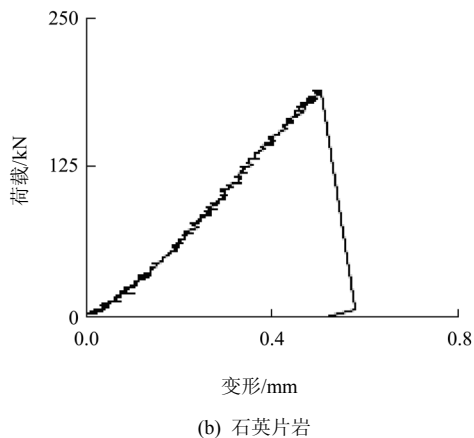
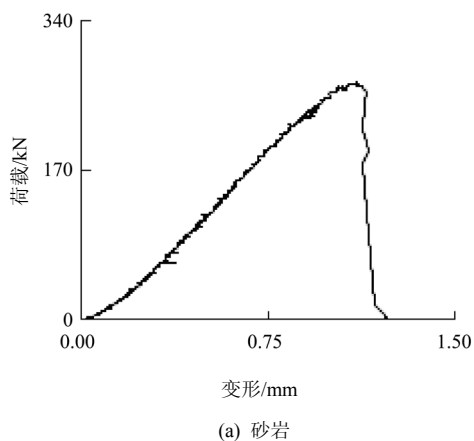


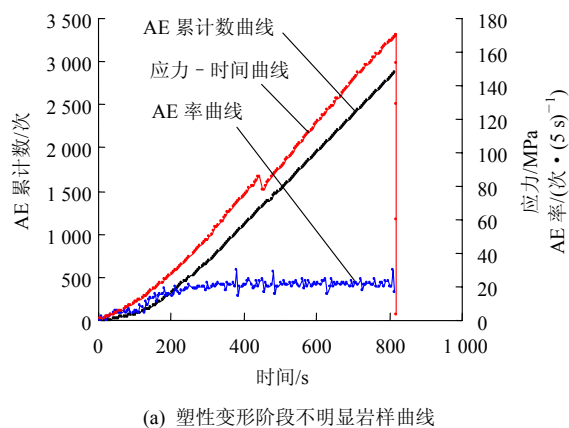
图 1 岩石的试验曲线

Fig.1 Typical experimental curves of rocks

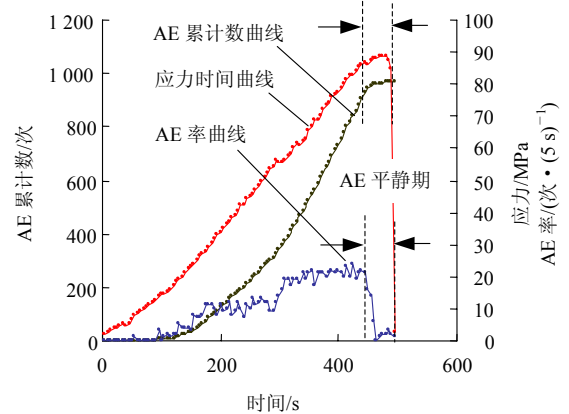
2.2 应力、声发射与时间参数的关系

本次研究表明, 对于塑性变形阶段不明显类岩样, 其应力、应变和声发射累积数随时间变化的关系曲线基本上是线性变化的, 临近应力峰值观察不

到声发射平静期现象; 而对于塑性变形阶段明显的岩样, 在弹性阶段的应力、应变和声发射累积数随时间变化的关系曲线也大体存在线性的关系, 此关系曲线类似于全应力 - 应变曲线中的应力 - 应变关系, 也就是说应力 - 应变关系与声发射事件累积数 - 应变关系之间有相似的特点, 这些结论与其他研究人员所得结果基本是一致的, 也正是应力、应变与时间之间存在的这种等时增长的线性关系, 故在常规试验研究中可以忽略时间效应的影响。但是, 对于塑性变形阶段明显的岩样, 特别在临近破坏的峰值应力这一阶段, 此时, 应力增加极其缓慢。而且, 应力、声发射累积数随时间的变化并不存在上述相似关系, 在峰值应力附近可以明显地观察到声发射的平静现象。图 2 是 2 类岩石破坏声发射累积数、声发射率、应力与时间曲线, 图 2(a), (b)的弹性阶段明显存在这种线性关系, 而且从图 2(b)可以清楚地观察到声发射平静现象。



(a) 塑性变形阶段不明显岩样曲线



(b) 塑性变形阶段明显岩样曲线

图 2 声发射累积数、声发射率以及应力与时间曲线
Fig.2 Curves of AE count, AE rate and stress with time

本次试验还着重关注了岩样在塑性阶段“耗时”

这一特点，发现塑性变形阶段明显的岩样在加载应力达到其峰值强度的 85%~90%之后就开始出现这一特点，这一阶段应力增长缓慢、对应的应变量则明显增加。具有这种“耗时”特点的岩样，在这一阶段所监测到的声发射事件率明显降低，出现声发射平静期现象。而第二类不存在“耗时”现象的岩样，峰值强度前看不出应力增长缓慢、对应的应变量明显增加这个特点，同时声发射监测中也观察不到声发射平静现象。为更清楚地显示这一特点，将典型的塑性变形阶段明显和塑性变形阶段不明显 2 类岩样按等应力增量统计其对应的时间间隔量和声发射事件数增量(见表 1, 2)，可清楚显示峰值应力前 85%~90%之后这一阶段的“耗时”现象，以绢云母化花岗岩岩样为例，峰值前 11 MPa 应力增量耗时达 121 s，而此时声发射增量仅仅 15 次。大体上，在这一阶段岩石等应力增量的时间是弹性阶段的 1.5~2.0 倍以上。对于结晶灰岩来说，虽然临近峰值前的等应力增量时间间隔没有增加，但声发射事件从前一个应力增量段的 93 次降为 58 次，为明显的声发射率降低现象；而石英片岩 2 在峰值应力前之所以耗时较多，原因在于试验过程中岩样有一个小破坏，产生了一个应力降后又重新增加的现象，且从声发射率的变化来看前后基本上变化不大，也不存在声发射平静现象。

3 声发射平静期分维数计算与分析

3.1 声发射分形维数计算模型

众所周知，岩石破坏是一个逐渐降维的耗散结构的过程，谢和平^[17]论证了岩石材料从微断裂到破碎的损伤断裂过程都具有分形特征，而声发射作为表征材料受载变形破坏的物理量，理论上每一个微断裂就对应着一个声发射事件，故而声发射具有分形特征，朱传镇等^[18]证明了声发射事件在时间域和空间域上的分布都具有分形特征。

一般地，常用的声发射表征参数为：声发射累积数、声发射率、声发射振幅等，这些参数均可形成独立的声发射时间序列。根据分维^[17, 19]的概念，仅由声发射时间序列本身确定维数是有很大局限的，会严重制约人们对时间序列内在机制的理解，所以，在实际问题中，对于给定的时间序列人们通常将其扩展到三维或者更高维的空间中，以便于把时间序列中蕴藏的信息充分显现出来，这就是延迟

表 1 峰值强度前的应力、时间与声发射事件数的试验结果 (塑性变形阶段明显的岩样)

Table 1 Test results of stresses, intervals of time and AE events before peak strength(rocks whose plastic deformation is obvious)

岩样	应力/MPa	时间间隔/s	声发射数/次
绢英岩化花岗岩	50		
	55	23	4
	60	26	2
	65	23	5
	70	24	3
	75	23	3
	80	23	2
	85	30	7
	90	28	6
	96(峰值)	63	2
辉绿岩	75		
	80	28	1
	85	26	7
	90	25	6
	95	27	2
	100	26	18
	105	29	8
	110	34	7
	115	30	10
	120	56	18
125(峰值)	52	9	
结晶灰岩	30		
	35	20	38
	40	25	128
	45	35	109
	50	35	93
	55(峰值)	35	58
黑云母片岩	90		
	95	25	90
	100	25	98
	105	20	81
	110	20	84
	115	20	84
	120	25	107
	125(峰值)	45	84
砂岩	30		
	35	17	3
	40	16	5
	45	13	4
	50	12	10
	55	16	17
	60	13	16
	65	32	7
	71(峰值)	25	6

表 2 峰值强度前的应力、时间与声发射事件数的试验结果 (塑性变形阶段不明显的岩样)

Table 2 Test results of stresses, intervals of time and AE events before peak strength(rocks whose plastic deformation is not obvious)

岩样	应力/MPa	时间间隔/s	声发射数/次
石英片岩 1	120		
	125	20	86
	130	20	86
	135	20	86
	140	20	85
	145	18	84
	150	12	88
	155	20	86
	160	26	107
	165	19	88
	170(峰值)	24	106
石英片岩 2	53		
	58	10	23
	63	11	28
	68	11	32
	73	11	32
	78	9	35
	83	10	36
	88	10	39
	93	10	38
	98	11	37
	103(峰值)	25	94

坐标状态空间重构法, 即时间延迟法。用此法可以对原数据序列进行高维嵌入而重建相空间, 较为适用的算法是由 P. Grassberger 和 I. Procaccia 提出的, 简称 G-P 算法。对于试验测得的时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n, \dots$, 若能选定适当嵌入维数 m 和时间迟滞参数 τ , 则可重构相空间:

$$Y(t_i) = [x(t_i), x(t_i + \tau), x(t_i + 2\tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)] \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

按照 Takens 定理就可以在拓扑等价的意义下恢复吸引子的动力学特性, 也就可以从这些相点相互关联的角度计算关联维数:

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i, j=1}^N \theta(r - |Y(t_i) - Y(t_j)|) \quad (2)$$

$$\theta(r - |Y(t_i) - Y(t_j)|) = \begin{cases} 1 & (r - |Y(t_i) - Y(t_j)| \geq 0) \\ 0 & (r - |Y(t_i) - Y(t_j)| < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $|Y(t_i) - Y(t_j)|$ 为相点 $Y(t_i)$ 和 $Y(t_j)$ 之间的距离; $\theta(r)$ 为 Heaviside 函数; $C(r)$ 为一个累积分布函数, 表示相空间中吸引子上两点之间距离小于 r 的概率; r 为量测尺度。

在关联维数中能否求出 D , 关键在于 r 的取值范围, 若 r 取得太大, 则 $C(r) = 1, \ln C(r) = 0$, 这样 r 就反映不了系统内部的性质, 适当缩小 r , 可能在一段 r 区间内有

$$C(r) = r^D \quad (4)$$

注意到分形维数就是客体大小与量测尺度之间呈指数规律的那个指数, 式(4)中的 D 正是该系统的吸引子的维数。对于某个适当范围, 吸引子的维数 $D(m)$ 与累积分布函数 $C(r)$ 应满足对数线性关系:

$$D(m) = \ln C(r) / \ln r \quad (5)$$

拟合求出对应于 m_0 的关联维数估计值 $D(m_0)$ 。增加嵌入维数 $m_1 > m_0$, 重复上述计算, 直到相应的维数估计值随 m 的增加在一定误差范围内不变为止, 此时得到的 D 即为吸引子的关联维数, 如图 3 所示, 随嵌入维数 m 的增加, 在双对数曲线上, 直线段的斜率逐渐收敛为一个稳定值, 也就是说关联维数 D 逐渐达到饱和。若 D 随 m 的增加而增加且并不收敛于一个稳定的值, 则表明所计算的系统为一个随机的时间序列。

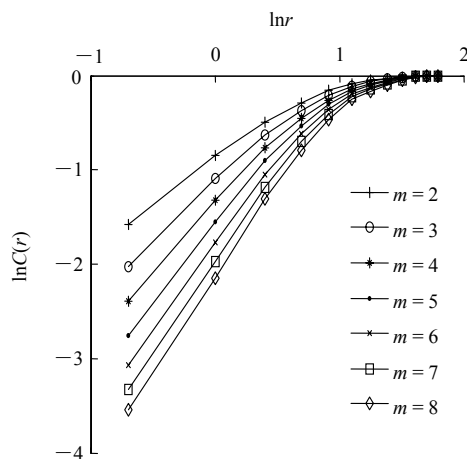


图 3 $\ln C(r)$ - $\ln r$ 关系曲线
Fig.3 Curves of $\ln C(r)$ - $\ln r$

3.2 声发射分维分析结果

根据上述计算方法, 由监测中得到的声发射时间序列, 编制计算程序分别计算塑性破坏明显的岩样从试验开始到结束岩石试件在各个阶段的分维值 (在此选择声发射事件率时间序列为例进行计算), 整个试验过程被分为 5 个阶段分别进行计算。通过

计算发现，在加载初期分形维数 D 较低，试件处于压密阶段，微破裂很少；随着试验过程的进行，声发射分维值总的趋势开始上升，说明试件破坏以小尺度的微破裂为主且在试件中均匀分布；随加载的继续进行，声发射分维值 D 又开始下降，意味着试件中较大尺度破坏的微破裂增加且逐渐向主破裂面靠近；在试件峰值破坏前即声发射处于平静期这一阶段，声发射分维值 D 下降至最低值，说明此时大的破裂已经形成，试件即将破坏。计算结果如表 3 所示，分维值随加载应力比变化趋势的曲线如图 4 所示。

表 3 岩样在不同加载应力水平 D 值的计算结果
Table 3 Fractal values of samples at different stress rates

岩样编号	加载应力比(σ/σ_{max})	分维值(D)
1	0.0~19.4	0.55
	19.4~42.0	1.15
	42.0~70.2	1.23
	70.2~89.7	1.19
	89.7~100.0	0.97
2	0.0~15.7	0.62
	15.7~31.9	1.33
	31.9~58.4	1.07
	58.4~69.4	1.15
	69.4~100.0	0.87
3	0.0~19.1	0.62
	19.1~39.0	1.15
	39.0~68.3	1.02
	68.3~86.4	0.81
	86.4~100.0	0.65
4	0.0~22.6	0.47
	22.6~46.7	1.60
	46.7~69.4	1.33
	69.4~88.1	1.48
	88.1~100.0	0.87

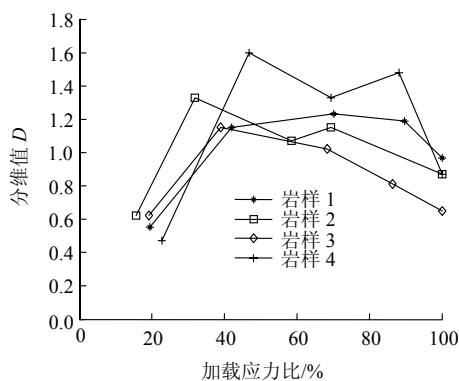


图 4 岩样加载应力比与分维值关系曲线
Fig.4 Curves of stress rate and fractal value

4 关于声发射平静期的讨论

本文所做单轴试验，岩样处于一维应力状态，但是在 MTS 刚性压力机上进行岩石破坏全过程的声发射特性研究，利用了刚性压力机的闭环伺服原理来调整压力，而处于三维应力状态的工程围岩体对自身所受应力状态是具有自组织(重分配)能力的，这与刚性压力机的原理有相似之处。因此，利用在刚性压力机上进行试验得到的声发射特征，可以解释工程中静力破坏过程与声发射之间的关系。

基于前述试验结果，笔者认为，声发射平静期这一现象是客观存在的，而且并不是个别的现象，应该是岩体破坏的所固有的现象。然而，这种岩石所固有的破坏现象在岩土工程的现场监测的应用之中却遇到了问题。在此之前，也曾有不少学者观察到现场监测中大的灾害来临之前声发射的平静现象，但又同时发现灾害的来临和声发射平静现象并不是一一对应的，也就是说，大的灾害来临之前有声发射平静期现象，但是现场的声发射平静却并不一定就对应着灾害的发生，而且它们之间基本上无规律可寻。这样就存在一种矛盾，室内试验的确实发现它存在而现场应用中又难以运用这一现象和规律，这也证明了这种室内试验所固有的现象在现场监测中往往受诸多复杂因素的影响。

依据监测经验，一维状态下的声发射平静现象出现的条件是加载到岩石破坏，此阶段不会出现加载的停止，也就是说不会出现应力转移；而现场监测中则不一样，处于三维应力状态的岩体的受力情况要远比处于一维应力状态的岩样的受力情况复杂得多。工程岩体要受到开挖和采动的影响，由于其本身的自组织功能，其应力状态经常出现转移，而应力转移可能导致岩体还未达到承载的峰值就卸载了。监测中得到的可能是岩体塑性变形的前期所产生的声发射现象，应力转移后，岩体卸载不再产生塑性变形破坏，此时进行的监测肯定是声发射事件减少而出现平静，当然也就不可能出现破坏并导致灾害的来临。而且，采用便携式仪器进行抽样式的监测所得的信息量较少，也往往会丢失更多有用的信息。所以，笔者认为，为更好地利用声发射平静期这一规律，现场声发射监测最好和其他常规的监

测手段相结合, 比如和应力监测相结合, 而且最好建立微震监测系统, 进行定点不间断的、长期的实时监测。这样, 就可以通过采取更多的有用信息并通过应力的变化情况更有效地运用声发射平静特点来对岩体稳定性进行评价, 从而提高监测预报的准确性。

此外, 比较上述声发射分维值与时间关系以及不同应力水平的计算结果可见, 试件在加载初期维值较低, 随着加载进行维值逐渐增加, 达到峰值应力的 40% 左右时达到最大值。此后, 维值逐步降低, 期间维值的变化虽有反复, 但总的趋势是逐步下降的, 特别在试件峰值应力破坏前降到最低, 而这阶段正是声发射的平静期, 这就是岩石破坏的分维规律性, 是岩石破坏的前兆。并且, 这也进一步验证了工程岩体失稳破坏是一个降维有序、耗散结构的形成过程, 无论是实验室岩样或是现场工程岩体, 分形规律都存在且相互统一。理论上, 岩石声发射分形维数是评价岩体失稳的有效指标, 分形维数的最低点就是岩体破坏这一类灾害的发生点。然而, 在现场监测中这个最低点也就是灾害发生时的维值的临界值究竟是多少, 这一直是一个难以解决的问题, 况且许多时候该最低点只能是灾害发生后的事后验证, 这正是直接影响声发射现场监测预报准确性的关键问题, 所以, 临界值的问题还有待进一步研究。

5 结 论

通过上述研究分析及计算结果, 本文有以下结论:

(1) 岩石声发射平静期是客观存在的, 对于塑性变形阶段不明显的岩石不容易观察得到, 在其破坏峰值应力前, 岩样不会出现应力增加缓慢而相对应应变增加较快的过程; 而对于塑性变形阶段明显的岩石, 则可以较容易观察到“耗时”这一现象, 此阶段应力增加缓慢而相对应应变增加较快, 声发射率降低, 出现相对声发射平静期。

(2) 通过计算可见, 岩样在加载过程中分形维数总的趋势是先有一个上升的过程, 在达到峰值应力的 40% 左右后开始逐步下降, 在应力加载到岩样破坏前, 声发射处于平静期时降到最低, 这就是岩石破坏的分形规律, 是岩石破坏的前兆。

(3) 声发射参数的分形维数是评价岩体失稳的有效指标, 在具体的工程运用中, 最好结合其他监测手段以充分利用声发射平静期及其分维特征, 建立微震监测系统对声发射进行实时监测, 对于岩石破坏声发射特征的临界值的问题还有待做更多的工作研究。并且本文试验所选用的岩样多为中等硬度以上的岩样, 为具有普遍代表性, 还应再做更多的不同种类的岩石加载声发射试验来确证本文所得的结果。

参考文献(References):

- [1] BLAKE W. Microseismic applications for mining—a practical guide[R]. [S. l.]: United States Bureau of Mines, 1982.
- [2] 勝山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1996.(KATSUYAMA K. Application of AE techniques[M]. Translated by FENG Xiating. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1996.(in Chinese))
- [3] 李俊平. 声发射技术在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 371 - 376.(LI Junping. Application of AE techniques in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(4): 371 - 376.(in Chinese))
- [4] 吴刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 82 - 85.(WU Gang, ZHAO Zhenyang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 82 - 85.(in Chinese))
- [5] 徐东强, 周昌达, 许昭永. 岩石试件刚度及压力机刚度对岩石主破裂前声发射相对平静的影响[J]. 地震研究, 1994, 17(8): 802 - 807.(XU Dongqiang, ZHOU Changda, XU Zhaoyong. Influence of rigidity of rock sample and pressure machine on relative quiet of acoustic emission prior to main rupture in rock[J]. Journal of Seismological Research, 1994, 17(8): 802 - 807.(in Chinese))
- [6] 张茹, 谢和平, 刘建锋, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 584 - 2 588.(ZHANG Ru, XIE Heping, LIU Jianfeng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 584 - 2 588.(in Chinese))
- [7] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 673 - 3 678.(ZHAO

- Xingdong, TANG Chunan, LI Yuanhui, et al. Study on the AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 673 - 3 678.(in Chinese))
- [8] 曹树刚, 刘延保, 张立强. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 2 794 - 2 799.(CAO Shugang, LIU Yanbao, ZHANG Liqiang. Study on characteristics of acoustic emission in outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 2 794 - 2 799.(in Chinese))
- [9] 王善勇, 唐春安, 徐涛, 等. 矿柱岩爆过程声发射的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 754 - 759.(WANG Shanyong, TANG Chun'an, XU Tao, et al. Numerical simulation on acoustic emission during pillar rockburst[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 754 - 759.(in Chinese))
- [10] 梁正召, 唐春安, 杨天鸿, 等. 含弱层岩石破裂前兆规律的数值模拟分析[J]. 地震, 2003, 23(3): 65 - 70.(LIANG Zhengzhao, TANG Chun'an, YANG Tianhong, et al. Numerical simulation of precursory phenomenon before fracture of rocks containing incompetent layer[J]. Earthquake, 2003, 23(3): 65 - 70.(in Chinese))
- [11] 马胜利, 刘力强, 马瑾, 等. 基于试验结果讨论断层破裂与强震物理过程的若干问题[J]. 地学前缘, 2003, 10(增1): 225 - 232.(MA Shengli, LIU liqiang, MA jin, et al. A discussion on related issues of physical process of faulting and strong earthquake based on experimental results[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(Supp.1): 225 - 232.(in Chinese))
- [12] 马胜利, 蒋海昆, 扈小燕, 等. 基于声发射试验结果讨论大震前地震活动平静现象的机制[J]. 地震地质, 2004, 26(3): 426 - 435.(MA Shengli, JIANG Haikun, HU Xiaoyan, et al. A discussion on mechanism for seismic quiescence before large earthquakes based on experimental results of acoustic emission[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(3): 426 - 435.(in Chinese))
- [13] 蒋淳, 冯德益. 大震前地震活动平静异常的模糊识别与分析[J]. 中国地震, 1989, 5(3): 18 - 25.(JIANG Chun, FENG Deyi. Fuzzy recognition and analysis of quiet anomaly of seismic activity before large earthquakes[J]. Earthquakes Research in China, 1989, 5(3): 18 - 25.(in Chinese))
- [14] 薛艳, 宋治平, 武安绪, 等. 中国大陆地震活跃期及平静期判断的新方法与应用[J]. 华北地震科学, 2004, 22(2): 9 - 13.(XUE Yan, SONG Zhiping, WU Anxu, et al. A new approach to determine the active and quiet period of earthquakes in mainland of china and its application[J]. North China Earthquake Sciences, 2004, 22(2): 9 - 13.(in Chinese))
- [15] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏过程声发射特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(3): 9 - 11.(YIN Xiangang, LI Shulin, TANG Haiyan, et al. Study on acoustic emission features in the process of rock failure[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(3): 9 - 11.(in Chinese))
- [16] 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(in Chinese))
- [17] 谢和平. 分形 - 岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(XIE Heping. Introduction to fractal rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))
- [18] 朱传镇, 安镇文, 王林瑛, 等. 地震分形特征及其在地震预测中的意义[J]. 地震研究, 1991, 14(1): 73 - 88.(ZHU Chuanzhen, AN Zhenwen, WANG Linying, et al. Fractal features of earthquakes and its significance in earthquakes prediction[J]. Journal of Seismological Research, 1991, 14(1): 73 - 88.(in Chinese))
- [19] 吕金虎. 混沌时间序列分析及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.(LU Jinghu. Chaos time series analysis and application[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.(in Chinese))