

岩石受载破坏前兆特征——声发射平静研究*

尹贤刚^{1,2} 李庶林³

(1 四川大学; 2 长沙矿山研究院; 3 厦门大学)

摘 要 通过岩石加载室内试验方法,测试了不同岩石破裂全过程的力学特征及其声发射特性,得到了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,研究了声发射事件数、事件率与应力水平、时间之间的关系。研究着重讨论了一次性加载过程中非脆性破坏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。而对于脆性破坏岩石来说,这一阶段则基本不存在明显的“耗时”现象,声发射的监测也没有声发射相对平静期现象。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问题进行了总结和分析,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了理论依据、方法和手段。

关键词 岩石破坏 时间 声发射相对平静期 监测和预报

Study on Acoustic Emission Quietude-omen Characteristic of Failure of Compressed Rock

Yin Xiangan^{1,2} Li Shulin³

(1 Sichuan University; 2 Changsha Institute of Mining Research; 3 Xiamen University)

Abstract Through indoor rock loading method, mechanical characteristics of acoustic emission properties of different rocks in their whole failure process are tested. The mechanical characteristics of the whole rock failure process are obtained, including the relevant curves and parameters such as whole stress-strain curves, number of acoustic emission events and acoustic emission event rate, and the relationships of the number and rate of acoustic emission event with the stress level and time are studied. The stress is laid on the decrease of stress increment in unit time when the stress strength is near to its peak value in one-time loading on non-brittle rock, an evident time-consuming phenomenon occurs in this stage. In addition, the rate of the acoustic emission event monitored in this stage decreases obviously and acoustic emission quietude occurs. However, for brittle rocks, there is basically neither evident “time-consuming” phenomenon nor relative acoustic emission quietude in this stage. Combining with the indoor test, some issues in the monitoring of the acoustic emission in in-situ rock-mass failure are summarized and analyzed, hereby providing a theoretical basis, method and means for the field monitoring and forecast of rock mass stability by means of acoustic emission.

Keywords Rock failure; Time; Acoustic emission quietude period; Monitoring and forecast

如今在岩土工程界, 矿山岩体受采动影响导致的发声或矿震、煤岩开采中的冲击地压、处于高山之下水电工程或隧道工程开挖中经常遇到的岩爆等岩体声发射现象是早已为人们所熟知的现象。实际上, 早在上个世纪二三十年代, 美国的 L. Obert 就发现矿山岩体产生声发射现象, E. A. Hodgson 提出利用这一现象来预报地震, 40 年代 L. Obert 等人先后把声发射技术应用于较深且易发生岩爆的阿米克铜矿矿柱岩体稳定性和岩爆的监测预报中。尽管如此, 人们真正地进行大量的声发射研究却是近几十年的事情, 我国则从上个世纪 70 年代才有学者开始

接触并进入这一领域的研究。到如今, 岩体声发射技术在国内外岩土工程和矿山岩体稳定性监测方面得到广泛的推广和应用^[1-2]。

岩石声发射是岩石受外力破坏过程中其内部微破裂萌生、扩展和断裂时伴随的声学现象。研究这一现象的手段大体可以分为 2 种, 其一是通过室内试验对岩样加载的同时采用声发射仪器监测并记录伴

* 国家自然科学基金项目 (编号: 10572122); 国家科技部社会公益项目 (编号: 2004DIB3J137)。

尹贤刚 (1971—), 男, 四川大学水利水电学院, 博士研究生; 长沙矿山研究院安全中心, 工程师, 410012 湖南省长沙市岳麓山。

随试验过程的声发射事件, 并对记录的声发射事件进行整理和分析, 以便于得出相关结论; 其二是直接利用声发射仪器在岩土工程现场对伴随岩体开挖或采动引起的岩体破坏这一类灾害进行监测, 处理并分析所记录的声发射数据, 对岩体工程灾害进行评价或预测预报。在监测仪器上, 虽然仍旧是便携式和多通道仪器的共存的局面, 但随电子技术的进步, 无论是实验室或工程现场都已经逐步发展到开始利用数字式的高精度监测系统。

虽然岩体声发射监测仪器以及监测技术的理论和应用研究方面已取得很大的成就, 但对岩体失稳的预测预报的准确性, 迄今为止还有很大的难度。这主要是因为岩石材料本身结构和破坏过程的复杂性使得实际监测预报大多是基于经验判断, 这也是制约声发射监测应用技术的一个关键点。因此, 通过研究岩石受力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, 有助于进一步认识岩石的破坏机理, 提出合理的基于声发射参数的岩石破坏的前兆判据^[3-4]。

在岩石受力破坏过程的声发射特性方面, 国内外一些学者进行过广泛的室内试验研究, 包括岩石受压、张拉、剪切和断裂试验条件下的声发射特性研究等, 且主要是研究岩石峰值强度前的应力、应变与声发射参数之关系方面^[5-6]。而对岩石受力变形过程的声发射参数与时间之间的特征关系则少有研究, 特别是声发射参数与时间的关系达到什么样一个程度岩石就会破坏, 也就是对其破坏的前兆特征是什么研究较少。而对于岩石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石的稳定与否进行评价, 时间是监测预报的一个基本变量^[7-11]。

基于这种思考, 本研究就岩石加载破坏室内试验所伴随的声发射现象来研究岩石破坏的机理, 特别是对岩石声发射破坏过程中的平静期现象进行重点的讨论, 从而为岩体声发射监测预报技术的应用提供依据, 提高岩体稳定性监测预报的准确率。

1 岩石声发射试验

1.1 试验设备及装置

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, 该系统配置了基于 Windows 平台的可视化操作软件, 可跟踪记录当前荷载、应力、位移、应变值的大小、荷载-位移、应力-应变曲线等。声发射监测系统为

自行研制的便携式智能声发射仪, 该仪器可对声发射事件自动计数、存储, 可与计算机通讯, 实现对声发射的实时监测。试验装置见文献 [7]。

1.2 试验内容及测试方法

对取自某矿的绢云母化花岗岩、结晶灰岩、铅锌矿石、黑云母片岩、石英片岩以及某地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在时间上同步, 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。加载控制采取轴向位移控制加载, 加载速率为 $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, 同时设定声发射监测采样间隔为 $50 \mu\text{s}$, 频率范围为 $100 \sim 10^4 \text{ Hz}$, 为尽可能减少噪音的干扰, 选择合适的声发射事件放大倍数以及较高的声信号触发电平 ($4 \sim 5 \text{ mV}$), 使试验只测定岩石受力破坏的声发射大事件。

2 试验结果与分析

2.1 岩石受力变形与声发射特征

所有参与试验的岩样中, 其受力变形特征大体上可以分为 2 类。第 1 类岩样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, 这一阶段要经过较长的时间加载岩样才破坏, 存在塑性阶段的“耗时”现象, 在破坏形式上是非脆性破坏, 岩样破坏时基本上不发出响声或响声较小, 岩样碎片不会四处飞出; 而第 2 类岩样与第 1 类岩样主要区别在于塑性阶段不明显, 也就是说这类岩样在破坏形式上是脆性破坏, 在载荷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, 岩样破坏时发出明显的响声, 岩样碎片四处飞出。加载过程中的声发射特点是初期压密阶段声发射率较低, 而弹性阶段声发射率有所增加, 但处于较低水平; 到弹性阶段后期和塑性阶段前期声发射率开始增加并达到一个较高的水平。第 1 类非脆性破坏的岩石在峰值前会出现声发射率相对的平静现象, 而第 2 类脆性破坏的岩样基本上观察不到声发射率平静现象。如图 1 所示, 图 1(a) 和图 1(b) 的结晶灰岩和砂岩石英片岩试验曲线属于第 1 类岩样受力变形特点, 图 1(c) 和图 1(d) 的石英片岩试验曲线则属于第 2 类岩样受力变形特点。所记录的典型声发射波形如图 2 所示。

2.2 应力、声发射与时间参数的关系

在通常所进行的常规岩石力学试验中, 研究得

最多的是全应力 - 应变曲线中应力与应变之间的关系, 对时间效应的考虑往往较少, 然而岩土工程现场稳定性监测中, 例如对应力监测、应变和位移监测中往往要考虑这些变量和时间参数之间的变化关系, 正是应用它们与时间参数之间的变化来对工程进行

评价, 特别是声发射监测评价中, 时间更是必不可少的参量。这样一来, 在时间参数的研究应用上, 室内岩石力学研究与现场监测应用之间就存在一定的反差, 因此, 时间参数同样是室内岩石力学研究应该关注的对象。

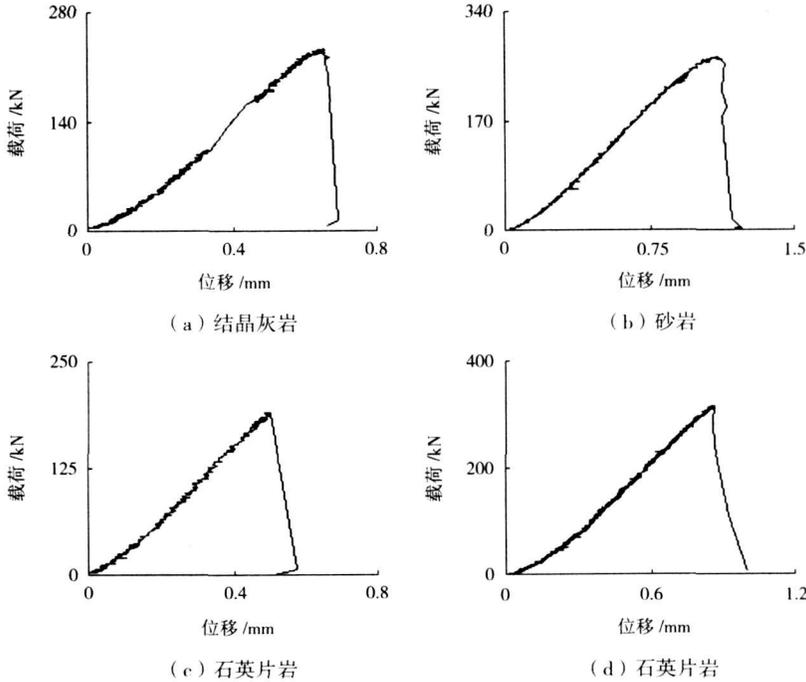


图 1 岩石的试验曲线

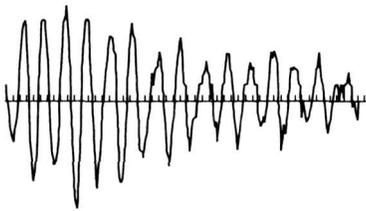


图 2 典型的声发射波形

本次研究表明, 对于脆性破坏类岩样, 其应力、应变以及声发射累积数随时间变化的关系基本上是线性变化的, 临近峰值应力观察不到声发射平静期现象; 而对于非脆性破坏的岩样, 在弹性阶段的应力、应变以及声发射累积数随时间变化的关系也大体上存在这样的关系, 对于脆性破坏以及非脆性破坏弹性阶段的声发射累积数与时间的关系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 - 应变之间有相似的关系这些结论与其它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。而在非脆性破坏的塑性变形阶段, 特

别是临近破坏的峰值应力时, 应力、声发射累积数随时间变化却并不存在上述相似关系, 在峰值应力处岩样破坏前可以明显地观察到声发射的平静现象。图 3 是 2 类岩石破坏声发射累积数、声发射率、应力与时间关系的拟合曲线, 从图 3 (a) 中以及 (b) 的弹性阶段明显存在这种线性关系, 而且从图 3 (b) 可以清楚地观察到声发射平静现象。

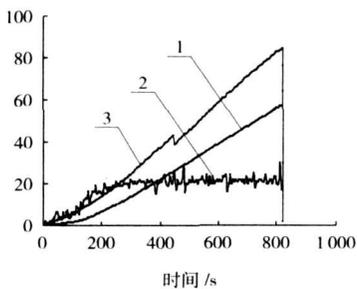
本次试验还着重关注了岩样在塑性阶段“耗时”这一特点, 发现非脆性破坏岩样在加载应力达到其峰值强度的 85% ~ 90% 之后就开始出现这一特点, 这一阶段应力增长缓慢、对应的应变量则明显增加。具有这种“耗时”特点的岩样, 在这一阶段所监测到的声发射事件率明显降低, 出现声发射平静期现象。而第 2 类不存在“耗时”现象的岩样, 峰值强度前看不出应力增长缓慢、对应应变明显增加这个特点, 同时声发射监测中也观察不到声发射平静现象。为更清楚地显示这一特点, 将典型的非脆性破坏和脆性破坏 2 类岩样按等应力增量统计其对应的时间间隔量和声发射事件数增量 (表 1), 可清楚显示峰值应力前 85% ~ 90% 之后这一阶段的“耗

时”现象,以绢英岩化花岗岩岩样为例,峰值前 11 MPa 应力增量仅耗时 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 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

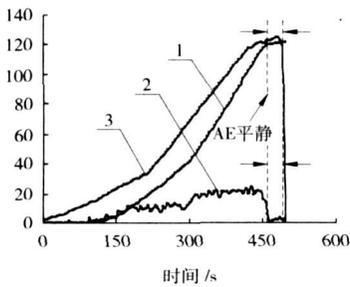
次,为明显的声发射率降低现象;而石英片岩 2 在峰值应力前之所以耗时较多,原因在于试验过程中岩样有一个小破坏,产生了一个应力降后应力又重新增加的原因,且从声发射率的变化来看前后基本上变化不大,也不存在声发射平静现象。

表 1 峰值强度前的应力、时间与声发射事件数的试验结果

岩石名称	内容	量 值											
非脆性破坏	绢英岩化花岗岩	应力 / MPa	50	55	60	65	70	75	80	85	90	96 (峰值)	
		时间间隔 / s		23	26	23	24	23	23	30	28	63	
		声发射数 / 次		4	2	5	3	3	2	7	6	2	
脆性破坏	辉绿岩	应力 / MPa	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125 (峰值)
		时间间隔 / s		28	26	25	27	26	29	34	30	56	52
		声发射数 / 次		1	7	6	2	18	8	7	10	18	9
脆性破坏	结晶灰岩	应力 / MPa	30	35	40	45	50	55	(峰值)				
		时间间隔 / s		20	25	35	35	35					
		声发射数 / 次		68	128	109	93	58					
脆性破坏	黑云母片岩	应力 / MPa	90	95	100	105	110	115	120	125	(峰值)		
		时间间隔 / s		25	25	20	20	20	25	45			
		声发射数 / 次		90	98	81	84	84	107	84			
脆性破坏	石英片岩 1	应力 / MPa	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170 (峰值)
		时间间隔 / s		20	20	20	20	18	12	20	26	19	24
		声发射数 / 次		86	86	86	85	84	88	86	107	88	106
脆性破坏	石英片岩 2	应力 / MPa	53	58	63	68	73	78	83	88	93	98	103 (峰值)
		时间间隔 / s		10	11	11	11	9	10	10	10	11	25
		声发射数 / 次		23	28	32	32	35	36	39	38	37	94



(a) 脆性破坏



(b) 非脆性破坏

图 3 声发射累积数、声发射率以及应力与时间关系曲线

1- AE 累积数 / 次; 2- AE 率 / (次 / s); 3- 应力 / MPa

2.3 关于声发射平静期的讨论

基于上述试验结果,证实声发射平静期这一现

象是客观存在的,同时,有不少其他学者在试验研究中也的确发现了这一现象,而且并不是个别的现象,这说明声发射平静是岩体破坏的所固有的现象。然而,这种岩石固有的破坏现象在岩土工程的现场监测之中却遇到了问题,在此之前,曾有不少学者基于现场监测发现过大的灾害之前声发射的平静现象,但通过单纯的声发射监测又同时发现灾害的来临和声发射平静期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,而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是无规律可寻。这样就存在一种矛盾,室内试验的确发现它存在而现场应用中又难以利用这一现象和规律,反之也证明这种室内试验所固有的现象在现场监测中却受诸多复杂因素的影响。

依据现场的监测经验,众所周知,现场岩土工程岩体是处于三维应力状态的,而实验室的岩样在单轴加载声发射试验中仅仅处于一维的应力状态,而且,至今为止,岩样在三轴应力状态下的声发射试验的相关文献还比较少见。因此,一维状态下的声发射平静期现象出现的条件是加载到岩石破坏,此一

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远比一维应力状态的岩样受力情况复杂得多,且受开挖和采动的影响应力经常出现转移,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灾害的来临。而且,采用便携式仪器进行抽样式的采取现场岩体声发射所得的信息量较少,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,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利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。

3 结 论

在我国当前的众多的岩土工程监测中,基于便携式仪器的岩体声发射技术已经应用得较为普遍,且由于便携式声发射仪有其廉价、轻便、使用灵活方便等优点,在现场使用的也较多。在监测中往往采用趋势预报的方法,即将声发射参数的激增作为评价工程稳定与否的前兆,然而,这种方式往往是不可靠的。因此本研究提出将声发射的平静期特性作为岩体破坏的前兆特征,但考虑到声发射与岩体破坏高应力(应力集中)的关系,可能因为开挖和采动等

动态施工的特点导致应力转移而出现声发射平静的假象,故应该把岩体声发射技术与应力监测等手段结合起来使用。并且,当前对声发射平静期的研究虽不时有文献发表,但目前的研究还相对较少,也很不充分,大量的研究还有待进一步进行。

参 考 文 献

- [1] Blake W. M. *Microseismic applications for mining—a practical guide* [R]. [S 1]: Bureau of Mines, U. S. Department of the Interior, 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.
- [3] 陈 颢. 声发射技术在岩石力学中的应用 [J]. 地球物理学报, 1977, 20(4): 312-322.
- [4] 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.
- [5] Mansurov V A. Acoustic emission from failing rock behaviour [J]. *Rock Engng*, 1994, 27(3): 173-182.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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): 2499-2503.
- [9] 秦四清, 李造鼎, 张俤元, 等. 岩石声发射技术概论 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [10] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 厂坝铅锌矿岩石力学性质研究 [J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(5): 12-16.
- [11] 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): 2584-2588.

(收稿日期 2008-05-30)

• 信息苑 •

中国地质调查局与紫金矿业实现强强联手

中国地质调查局与紫金矿业集团股份有限公司签署合作开展矿产勘查工作框架协议, 双方就如何充分发挥人才、技术、资金等方面的优势达成共识。

中国地质调查局将根据全国地质勘查规划和工作部署方案, 加强已有地质勘查成果资料的二次开发, 开展区域资源潜力评价和成矿预测, 研究提出重点成矿区带地质勘查总体部署方案。紫金矿业集团股份有限公司根据双方共同研究提出的合作区, 出资开展物探、化探以及矿产勘查和相关研究工作。对新发现的可供进一步勘查的靶区和矿产地加大勘查投入, 加快推进勘查。2008年中国地质调查局优

先安排在滇东南麻栗坡地区开展区域地质调查工作和关键地质问题攻关, 加快推进基础地质调查, 提高地质调查工作程度。

中国地质调查局所形成的公益性地质工作成果的归属、发布、使用及保密, 执行国家相关规定; 由紫金矿业集团股份有限公司出资形成的商业性地质成果资料, 与中国地质调查局共享, 在符合国家地质资料汇交管理有关规定的情况下, 执行紫金矿业集团股份有限公司相关技术成果保密规定。

(中国选矿选煤网 2008-06-24)