

文章编号: 1000-7598(2009)09-2559-06

岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究

李元辉^{1,2}, 刘建坡¹, 赵兴东¹, 杨宇江¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004; 2. 中国科学院岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 应用声发射及其定位技术, 通过单轴受压岩石破坏声发射试验, 对岩石破裂过程中的声发射 b 值和空间分布分形维值随不同应力水平的变化趋势进行了研究。研究表明: 声发射分形维值 D 和 b 值反映了岩石破坏过程中微裂纹的初始和扩展; 在小尺度微裂纹所占比例较高的加载初期, 分形维值和 b 值在较高的水平波动变化, 部分岩石试件分形维值和 b 值呈现升高现象; 随着载荷的增加, 岩石内部微裂纹的空间分布由无序向有序转变, 大尺度裂纹所占比例增加, 声发射定位事件出现群集现象, 分形维值和 b 值开始较快速下降并在岩石失稳破坏时达到最低值。在岩石破坏过程中, 声发射分形维值和 b 值的变化趋势相近。由于实际应用时, 分形维值和 b 值的最小值(临界点)难以确定, 故可将 2 个参数相结合, 以分形维值 D 和 b 值较快速下降作为前兆特征, 以提高现场岩体稳定性监测的准确性。

关 键 词: 声发射; 岩石破坏; 分形维值; b 值

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Study on b -value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process

LI Yuan-hui^{1,2}, LIU Jian-po¹, ZHAO Xing-dong¹, YANG Yu-jiang¹

(1. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Acoustic emission (AE) experiments of rock failure are carried out under uniaxial compression loading with AE location technique. Relationships between different stress levels with spatial distribution fractal dimension and b -value of AE events are studied. The results show that fractal dimension D and b -value of AE events can directly reflect the evolutionary process of microcracks initiation and propagation. In the initial stage of loading, on account of high proportion of small scale microcracks, the value of fractal dimension and b -value are higher and appear fluctuating, and in some rock samples they are increasing. With the increase of load, the distribution of microcrack turns from random to order, large scale microcrack are increasing, acoustic emission location events begin to cluster, fractal dimension and b -value begin to drop much quickly. The fractal dimension and b -value reach to the minimum value at the critical point of rock failure. During rock failure process, variable tendencies of fractal dimension and b -value are similar. Although it is difficult to confirm the minimum value of fractal dimension and b -value in practical application, continually declining of the two parameters can be seen as precursors of rock failure. Consequently, fractal dimension and b -value can be combined used to improve the accuracy of rock mass monitoring and forecasting in-situ.

Key words: acoustic emission; rock failure; fractal dimension; b -value

1 引 言

对于脆性岩石材料而言, 岩石的破坏过程与其内部微裂纹演化过程是一致的, 岩石破裂主要表现为其内部的微裂纹的初始扩展。微裂纹的产生与扩

展, 伴随有弹性波的释放并在岩石内快速释放和传播, 即声发射(acoustic emission, AE)。国内外研究证明: 每一个声发射事件都包含着岩石内部状态变化的丰富信息, 对其进行处理、分析, 可以判断岩石内部裂纹演化过程, 进而捕捉岩石失稳破坏的

收稿日期: 2008-04-18

基金项目: 中国科学院岩土力学重点实验室开放基金(No.Z110607); 国家高技术研究发展计划项目(No.2007AA06Z107); 教育部新世纪优秀人才支持计划(No.NCET-07-0163); 国家科技支撑计划项目(No.2008BAB34B02)。

第一作者简介: 李元辉, 男, 1968年生, 博士, 教授, 主要从事矿山地压控制和矿山微震监测研究。E-mail: liyuanhui@mail.neu.edu.cn

前兆信息^[1-4]。声发射事件的位置构成一个点集的空间分布,其中每一个点对应着岩石内部物理空间中一个微裂纹表面或者微裂纹体积^[5]。岩石内部微裂纹的演化过程具有分形特征,对岩石破裂过程中声发射事件进行分形计算可以得到微裂纹空间分布的分形特征,有助于进一步认识岩石的破坏机制,提出合理的岩石破坏前兆判据。与声发射分形特征密切相关的另外一个参数是震级-频度关系式中的 b 值。 b 值随时间的差异,反映了岩石内部不同时间所承受的平均应力和内部平均强度的变化,同时也反映了岩石内部微裂纹尺度的变化情况^[6]。

目前国内外学者对于不同路径加载条件下岩石破裂过程中声发射参数特征进行了大量的试验研究。如李庶林、付小敏^[7-8]等对单轴压缩条件下的声发射特征进行了研究,张茹^[9]等研究了多级加载下的声发射特征,赵兴东、李元辉等^[10]基于声发射定位技术对岩石裂纹动态演化过程进行了研究,但以上研究多集中在声发射率、能量,定位等随时间的变化特征。高峰、尹贤刚^[11-12]等研究了岩石破裂过程中的声发射分形特征,曾正文等^[13]对岩石破裂过程中的 b 值动态演化特征进行了讨论。以上研究均将 b 值和分形特征分开进行研究的。董毓利^[14]等研究了混凝土受压过程中声发射 b 值和分形特征。但将岩石破裂过程中声发射 b 值和分形特征结合在一起进行研究的还较少。

本文对单轴受压条件下岩石破裂过程中声发射分形维值 D 和 b 值随应力的变化特征进行了试验研究,同时对二者之间的关系进行了讨论,力图为难以确定的岩石失稳破坏临界值问题寻找一种解决办法,为岩体声发射监测预报技术的应用提供依据,以提高岩体稳定性监测的准确性。

2 岩石声发射试验

2.1 岩样的制备

本试验所采用的试样为粗粒花岗岩、大理岩和砂岩几种常见的脆性岩石,严格按照国际岩石力学试验规范,加工成 $75\text{ mm}\times 75\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 长方体,试件表面抛光,其平行度、平整度和垂直度都符合试验规程。

2.2 试验设备

试验采用的声发射仪器是由加拿大 ESG 生产的 Hyperion 超声波系统 (Hyperion Ultrasonic System, HUS),该设备是多通道超声波采集处理系统,能够连续实时采集声发射信号,并记录事件的波形,然后通过内置 A/D 转换卡转换成数字信号存

进计算机硬盘。随机携带的后处理程序,可以计算出声发射事件的位置和主要参数(时间、震级、能量、最大振幅等)并存入数据库。此声发射仪器有 8 个通道,采样频率设定为 2 MHz,其阈值设定为 100 mV。试验加载系统采用 NYL-500 型压力机,最大加载能力 500 kN。在试验过程中,采用动态应变仪对载荷、位移进行连续监测,并能自动绘制出岩石破裂过程的荷载-位移曲线。试验装置系统见图 1。

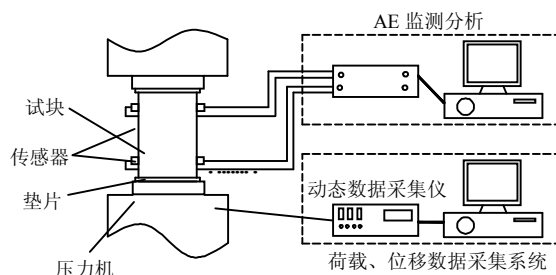


图 1 岩石声发射试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental instrument

2.3 传感器布置方式

试验采用 Nano30 型传感器,其频率响应范围为 125~750 kHz;前置放大器型号为 1220A-AST,其增益为 40 dB。传感器 4 个一组均匀布置在岩石上、下部分的 4 周(图 2)。为保证传感器与试件的耦合效果,在二者接触部位涂凡士林,再用橡胶带把传感器固定在试样侧面。

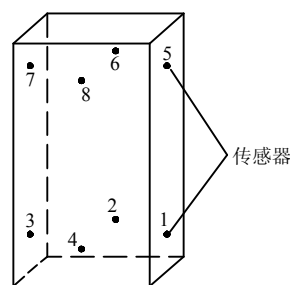


图 2 传感器布置图

Fig.2 Arrangement of AE sensors

3 试验结果分析

3.1 声发射分形特征

盒维数(Box dimension)是应用最广泛的维数之一,它的普遍应用主要是由于这种维数的数学计算及经验估计相对容易一些^[15]。

设 F 为 R^n 中任意非空的有界子集, $N_\delta(F)$ 为直径最大为 δ ,可以覆盖 F 的集的最少数,则 F 的下、上盒维数分别定义为

$$\underline{Dim}_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \quad (1)$$

$$\overline{Dim}_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \quad (2)$$

如果这两个值相等, 则称这个共同的值为 F 的盒维数, 记为

$$Dim_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \quad (3)$$

这样, 能覆盖 F 的直径为 δ 的集合的最少个数大约是 δ^{-s} 阶, 其中 s 就等于 $Dim_B F$ 。

本文盒维数的计算方法采用边长为 r 的三维立方体, 把整个岩石试样覆盖起来。这样, 试样空间中有的小立方体是空的 (内部没有声发射事件), 有的小立方体里面有声发射事件, 即覆盖了声发射事件的分布空间。统计非空立方体的数目记为 $N(r)$, 当 $r \rightarrow 0$ 时, 根据式 (3) 就可以计算出此分布的分维值 D 。

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{-\lg r} \quad (4)$$

由于声发射事件集合是由点构成的, 所以当 r 小到一定值 $|U|$ ($|U| = \inf\{|X - Y|: X, Y \in U\}$, 其中 U 为声发射事件的集合) 后, $N(r)$ 就会是一个固定值, 即声发射事件的总数目, 而不再继续随着 r 的减小而增加。所以, 在实际的应用中, 通常的作法是求一系列的 r 和 $N(r)$, 然后以双对数坐标中 $\lg N - \lg r$ 的直线斜率作为分形维值 D 。考虑标度不变性的影响, 立方体边长 r 取值范围为 5~15 mm。图3为典型花岗岩试件声发射事件的 $\ln N(r) - \ln r$ 双对数图。大理岩和花岗岩试件声发射分形维值 D 随应力的变化曲线见图4。

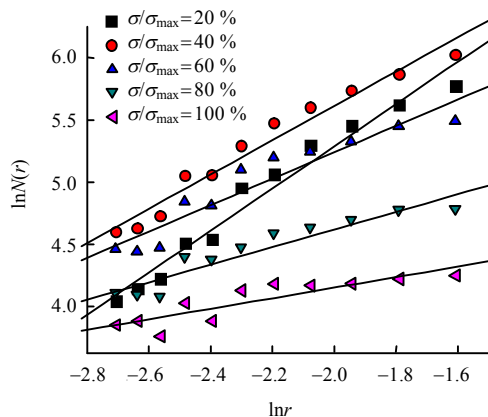


图3 典型花岗岩试件声发射事件的 $\ln N(r) - \ln r$ 双对数图

Fig.3 $\ln N(r) - \ln r$ plot of AE events of granite samples

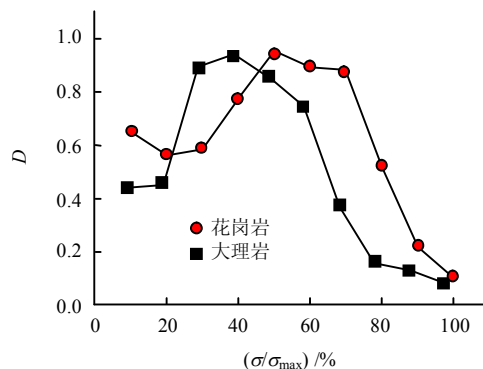


图4 不同应力水平分形维值 D 变化曲线
Fig.4 Variation curves of fractal dimension D with different stress levels

声发射分形维值作为岩石内部微裂纹无序性的度量, 很好地反映了这些微破裂的统计演化规律。试验计算结果表明: 在加载初期, 大理岩和花岗岩试件的声发射分形维值较大, 并随着载荷的增加逐渐增大, 这是因为在较小应力水平时, 试件内部以小尺度的微破裂为主, 声发射小事件所占的比例较多且有所增加, 岩石处于相对稳定阶段。当载荷增加到一定程度时 (花岗岩为峰值应力的 50%, 大理岩为峰值应力的 40%), 声发射分形维值开始出现下降趋势, 这意味着声发射大事件所占的比例增加, 试件内较大尺度的微破裂增多, 岩石内裂纹扩展从无序逐渐向有序的发展。随着载荷的继续增加, 两种岩石破裂声发射分形维值均出现较快速的下降, 并在岩石破坏前下降到最低值, 表明岩石内部微破裂逐渐连接贯通形成最终破坏面导致岩石失稳破坏。

岩石在破裂过程中发射分形维值在达到一定应力水平后呈现下降趋势, 特别是在试件破坏前下降到最低的现象, 反映了岩石破裂的分维规律性, 这表明岩石失稳破坏是一个降维有序的过程, 可以将其作为岩体失稳破坏的前兆, 对实际岩体工程的稳定性进行监测。

3.2 b 值变化特征

1941 年 Gutenberg 与 Richter 在研究世界地震活动性时提出了地震震级与频度之间统计关系的著名 $G-R$ 关系式:

$$\lg N = a - bM \quad (5)$$

式中: M 为震级; N 为震级在 ΔM 中的声发射次数; a , b 为常数, 其中 b 值是声发射相对震级分布的函数, 因此, b 值也是裂纹扩展尺度的函数。 b 值不仅是一个统计学上的分析参数, 它还有直接的物理意义^[6]。

本文采用最小二乘法进行 b 值计算。在 b 值计

算过程中,选取 $\Delta M = 0.5$ 进行计算。为避免在某一震级范围内的声发射数过少对 b 值计算造成过大误差影响,取 1 000 个声发射事件作为一组数据,并以 100 个事件滑动进行取样计算,得到 b 值随声发射累计次数的变化规律,进而结合应力与声发射累计次数的对应关系,得到 b 值随应力的变化规律。

图 5 为不同岩石试件在单轴受压载荷作用下破裂过程中的 b 值随应力的变化曲线。在加载初期,花岗岩试件声发射 b 值呈现较小波动,反映了微破裂状态是缓慢变化的,不同大小的声发射事件比例变化不大,不同尺度的裂纹状态(即微破裂尺度分布)比较恒定,代表了一种渐进式稳定扩展的过程。随着载荷的增加,声发射 b 值开始增大,说明小尺度微裂纹所占比例开始增加;当应力达到峰值应力的 70 % 时,声发射 b 值出现较快速的下降,表明花岗岩岩石内部裂纹呈现出失稳扩展状态。大理岩和砂岩试件破裂过程中的声发射 b 值变化情况和花岗岩情况类似,只不过这两种岩石声发射 b 值出现较快速下降的应力水平为峰值应力的 85 %。在试件临近失稳破坏时,3 种岩石的声发射 b 值均下降到最低值。

Lei^[16]等人研究结果表明,岩石破坏失稳前 b 值下降的物理机制一是微破裂从张破裂为主转为剪破裂为主;二是裂纹相互作用明显增强,这两种因素联合作用使大事件明显增多、 b 值下降。

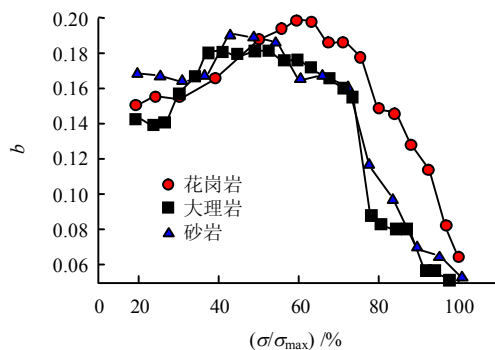


图 5 不同应力水平 b 值变化曲线
Fig.5 Variation curves of b -value with different stress levels

3.3 声发射 b 值与分形维值之间的关系

声发射分形维值 D 与 b 值有着密切的关系,Aki 和 Turcotte^[5]研究表明 b 值也具有分形特征,分形维值与 b 值均反映了岩石内部微裂纹产生、扩展的演化过程,二者的增大或减小反映了不同尺寸微裂纹所占比例的变化情况。理论研究表明,二者存在着下面的关系^[5, 14]:

$$D = 2b \quad (6)$$

虽然理论上声发射分形维值与 b 值存在着 2 倍的关系,但试验中验证却很困难。对于盒维数计算方法,由于在计算分形维值时立方体尺寸的取值范围(标度不变性的影响范围)会影响分形维值的大小,故 D 与 b 之间的 2 倍关系在大部分试验情况下并不成立。另外由于在本文计算过程中, b 值是以 1 000 个事件为一组进行计算,而分形维值是以每 10 % 的应力水平为样本进行计算的,所以二者的变化趋势也不一定是同步的。

图 6 为大理岩试件声发射分形维值与 b 值随应力的变化趋势。从图上可以看出,在加载初期阶段,分形维值与 b 值均较小,并呈现几乎同步的波动情况,伴随着应力水平的升高,二者同步持续升高。当应力增加到一定程度时,分形维值和 b 值均开始下降;当应力接近峰值强度时,二者均下降到最低值。从图 6 可以明显地看出,虽然分形维值与 b 值之间并不是 2 倍关系,但二者总体变化趋势相近。

图 7 为花岗岩在受压破坏过程中不同应力水平声发射事件空间分布情况。从图上可以看出,当应力水平小于 50 % 时,所得到的声发射定位事件很少,与之相对应的是声发射分形维值和 b 值处于增长阶段,这是因为在应力水平较小时,岩石以小尺度的微破裂为主,声发射信号的能量和幅值较小,对声发射事件的精确定位有一定的影响,所以得到较少的定位事件。当应力超过峰值应力的 60 % 时,能够定位的声发射事件开始迅速增加,并在局部部位出现群集现象,同时声发射分形维值和 b 值出现较快速的下降,这说明大尺度微裂纹所占的比例开始逐步增加。岩石内部的微破裂开始由无序向有序转变。当应力接近峰值强度时,声发射分形维值和 b 值下降到最低,声发射事件群集现象明显,岩石内部裂纹开始贯通并最终导致岩石失稳破坏。

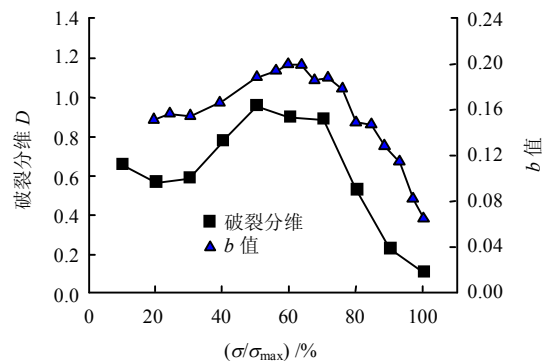


图 6 不同应力水平花岗岩分形维值 D 与 b 值变化曲线
Fig.6 Variation curves of fractal dimension D and b -value of granite samples with different stress levels

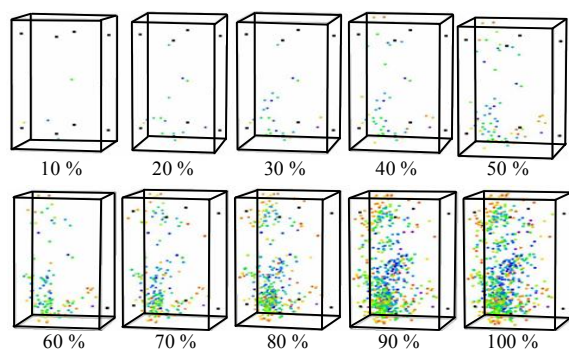


图7 不同应力水平花岗岩声发射事件空间分布特征
Fig.7 The distribution of AE events with different stress levels of granite samples

4 结 论

(1) 分形维值 D 和 b 值作为评价岩石失稳破坏的两个有效指标, 反映了岩石在受压破坏失稳过程中的岩石内部微裂纹初始、扩展的演化过程。在岩石破裂过程中, 分形维值和 b 值随应力的变化趋势相近; 在小尺度微裂纹所占比例较高的加载初期, 分形维值和 b 值在较高的水平变化反复, 部分岩石试件分形维值和 b 值呈现升高现象。随着应力水平的升高, 岩石内部大尺度微裂纹所占比例增加并出现群集现象, 微裂纹空间分布开始从无序分布向有序分布转变, 分形维值和 b 值开始较快速下降, 并在岩石失稳破坏前下降到最低。

(2) 声发射分形维值和 b 值在岩石破坏前较快速的下降现象, 可以应用于矿山岩体稳定性监测及地压引起的动力灾害的预测研究。但在现场岩体稳定性监测过程中, 灾害发生时声发射分形维值和 b 值的临界值究竟是多少, 仍是一个难以解决的问题, 这是一直影响现场监测准确性的关键问题。在实际应用中, 可以将分形维值和 b 值相结合对岩体稳定性进行分析, 以提高预测的准确性。

参 考 文 献

- [1] 胜山帮久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [2] LEI X L, SATOH T S. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage[J]. *Tectonophysics*, 2007, 431: 97—111.
- [3] LABUZ J F, BIOLZI L. Experiment with rock: Remarks on strength and stability issues[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, 44: 525—537.
- [4] LEI X L, MASUDA K, NISHIZAWA O, et al. Detailed analysis of acoustic emission activity during catastrophic fracture of faults in rock[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26: 247—258.
- [5] 谢和平. 分形—岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [6] 李全林, 于涛, 郝柏林, 等. 地震频度——震级关系的时空扫描[M]. 北京: 地震出版社, 1979.
- [7] 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): 2499—2503.
- LI Shu-lin, YIN Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(15): 2499—2503.
- [8] 付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究[J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 2005, 32(1): 17—21.
- FU Xiao-min. Experimental study on uniaxial compression deformation and acoustic emission property of typical rocks[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2005, 32(1): 17—21.
- [9] 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.
- ZHANG Ru, XIE He-ping, LIU Jian-feng, 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): 2584—2588.
- [10] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 944—949.
- ZHAO Xing-dong, LI Yuan-hui, YUAN Rui-fu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 944—949.
- [11] 高峰, 李建军, 李肖音, 等. 岩石声发射特征的分形分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2005, 27(7): 67—69.
- GAO Feng, LI Jian-jun, LI Xiao-yin, et al. Fractal analysis of the characteristics of acoustic emission of rock [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2005, 27(7): 67—69.