

不同应力途径三轴压缩下岩石的声发射*

陈 颤

(国家地震局地球物理研究所)

摘要

在不同加载方式的三轴实验中, 观测了济南辉长岩和北京昌平花岗岩的声发射 (围压达1.3千巴)。当最大主应力增加使岩样破坏时 (A型), 平均声发射率逐渐增加, 离破裂强度约几百巴时声发射急剧增多。而当岩石处于一定的高应力状态, 通过减小围压使岩样破坏时 (B型), 声发射的急剧增加仅出现在离破裂差应力20—30巴的情况下, 而且这种破裂过程声发射总数只有A型的1/3左右。在B型加载情况下, 从应力场的球张量部分 (流体静压力)来看, 是一个卸载过程, 而从偏张量部分来看, 是一个加载过程。这种卸载过程的存在很可能是造成声发射不同特征的主要原因。

一、引言

许多作者详尽地研究了常规三轴压缩下岩石的声发射^[1-4]。随着差应力增加, 岩石平均声发射率也增加, 并且与岩石的非弹性变形有直接关系。对于大多数岩石而言, 这种声发射在破坏过程中的变化似乎是共同的特性。然而, 地震也是一种声发射现象, 而不同地震所表现出的声发射特征却可以十分不同。在研究这个问题时有几种不同的思路。一种认为声发射现象的不同主要与介质均匀程度有关^[5], 另一种认为, 岩石在破裂和粘滑时产生的声发射亦不同^[6]。还有人认为, 声发射与岩石中应力的变化方式——即应力途径有关^[7]。本文则主要是从实验角度研究不同应力途径下岩石的声发射特征。实验中应力途径主要有三种:

A——增加最大主应力 σ_1 , 保持围压不变 ($\sigma_2 = \sigma_3 = p$), 直至岩样破坏。实际上A型实验即为常规三轴实验。

B——从某一应力状态 (通常选取接近岩石屈服强度, 大约为破坏强度80%的状态)开始, 保持 σ_1 , 减小围压 σ_3 , 直至岩样破坏。

C——从一较高应力状态 (超过岩石屈服强度, 大约为破坏强度90%左右)开始, 保持 σ_1 为常数, 增加围压 σ_3 。在C型实验情况下, 岩样不发生破坏。

二、实验设备

关于实现以上三种应力途径的压力设备、高压容器以及实验程序, 均在文献[8]中有

* 1979年5月9日收到。

详细描述, 此处不再赘述。声发射测量仪器如图 1 所示。整套仪器增益约为 60 分贝, 记录频带宽度为 5—20 千赫。本实验所采用的岩石样品有两种: 济南辉长岩和房山花岗岩。圆柱形样品, 高 11 厘米, 直径 5 厘米。

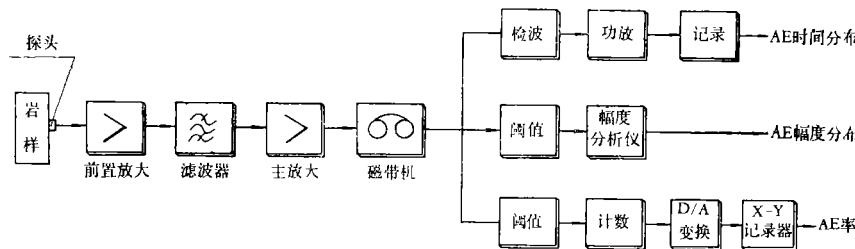


图 1 声发射记录和处理系统方框图

三、实验结果

实验中, 我们观测了声发射的以下特性:

声发射率 n 即单位时间内声发射事件的次数。

声发射总数 N 即从某时刻开始计算的声发射总数。

声发射时间序列 本实验所用的声发射幅度分析仪阈值分档较粗(只有四档)。它们记录经过放大后声发射讯号的电压幅度分别是: I 道 [0.2 V, 3 V]; II 道 [0.3 V, 0.45 V]; III 道 [0.45 V, 0.67 V]; IV 道 [0.67 V, 0.9 V]。其记录仅用来作为了解声发射序列特征的参数。关于 A 型、B 型和 C 型实验中的声发射特点分别叙述如下:

1. A 型实验

图 2 是利用数字式事件记录器(7502 型, 丹麦 B & K 公司)记录到岩石声发射的波形。其中 (a) 是探头直接放在岩石样品上的波形记录, (b) 是探头放在盛放样品的试件

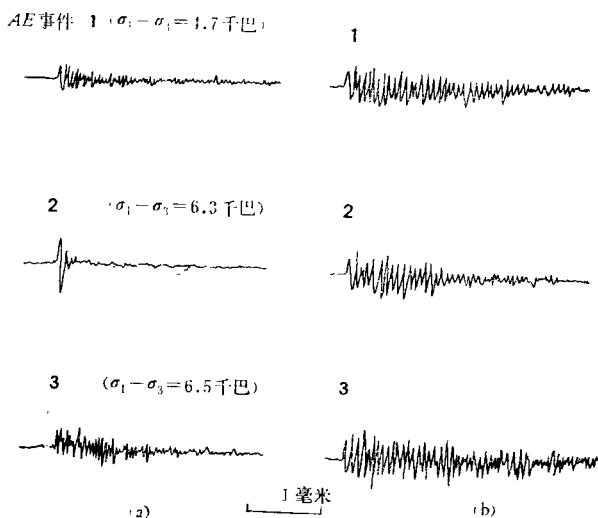


图 2 声发射事件的波形记录

装置上的记录。从图 2 可以看出, 声发射讯号的主要频率约为 10—15 千赫。初至较大, 其后续至波很快地衰减。我们知道, 波形能够提供关于声发射源精细结构的信息^[8], 但是放在钢制试件装置和放在岩石样品上记录到的声发射, 波形则明显不同, 这表明由于在样品和高压容器内波的多次反射与折射, 产生了一种结构效应, 这种效应在很大程度上确定了波的形状, 而混淆了有关声发射源的讯息。因此, 如何从记录中排除这种影响, 更有效地提取声发射源的讯息是一个重要的研究课题。A 型实验岩石声发射的特点与以前许多作者的研究结果是类似的。概括起来就是: 当轴向载荷加于样品之上, 声发射先是缓慢增加, 幅度不大, 声发射率不高, 当差应力达到其强度 90% 左右时, 声发射显示增加。特别当岩石达到其极限强度(破坏开始点)后, 声发射率急剧增加, 幅度也显著变大(图 3)。

2. B 型实验

当差应力达到岩石强度 80% 左右时, 声发射水平总的来说是不高的。而当围压减小时, 尽管随着差应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的增加, 但最初声发射活动性变化不大, 只有非常临近破坏时, 声发射的数目才有急剧的增长。图 4(b), (c), (d), (e) 给出了 B 型实验声发射时间序列记录。作为对比, 图 4(a) 给出了 A 型实验的结果。从图 4 可以看出, B 型实验声发射的急剧增多从时间上来说比 A 型实验要晚的多。图 5 的声发射幅度记录也表明了这一点。不仅如此, 如果从某一时刻起, 声发射率连续超过该时刻前平均声发射率的两倍, 我们就叫做声发射急剧增加。从下表中给出的各种实验条件下声发射急剧增加的应力值可以看出, A 型实验差应力离破坏还有几百巴时声发射就急剧增多了。而在 B 型情况下, 声发射的急剧增多仅发生在离强度几十巴的范围。因此, 从声发射急剧增加的应力水平来看, B 型较 A 型高。从出现声发射急剧增多的应力范围来看, B 型实验比 A 型要小一个数量级。

图 6 给出了两种加载情况下临破坏前 100 秒岩石的声发射总数, A 型加载(辉长岩 2-9)的声发射总数比 B 型(辉长岩 3-6, 3-7, 4-9)要大三倍左右。因此, 同样一种岩石, 在不同应力途径三轴压缩时破裂过程的声发射总数也是不同的, B 型较 A 型为小。

3. C 型实验

若岩石处在较高应力状态时, 声发射保持很高的水平。如果围压增大, 差应力减小, 实验发现岩石声发射不立即随差应力减小而降低, 却仍然保持较高水平, 表现出一种滞后的性质。图 7 给出花岗岩 8-14 在 C 型实验加载时的声发射情况。

值得指出的是, 声发射的这种滞后效应只有在较高应力状态时才会发生。

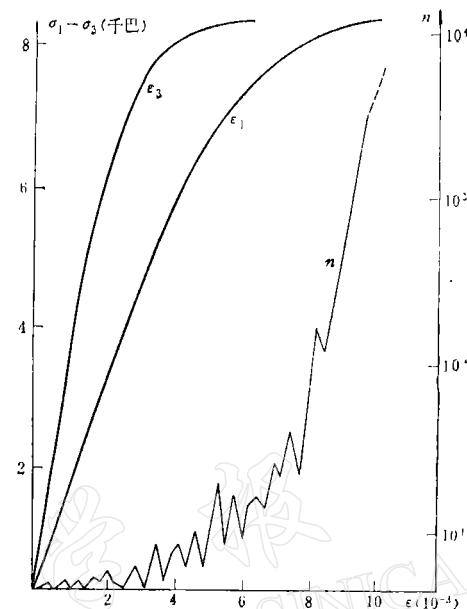


图 3 辉长岩应力-应变-声发射率记录

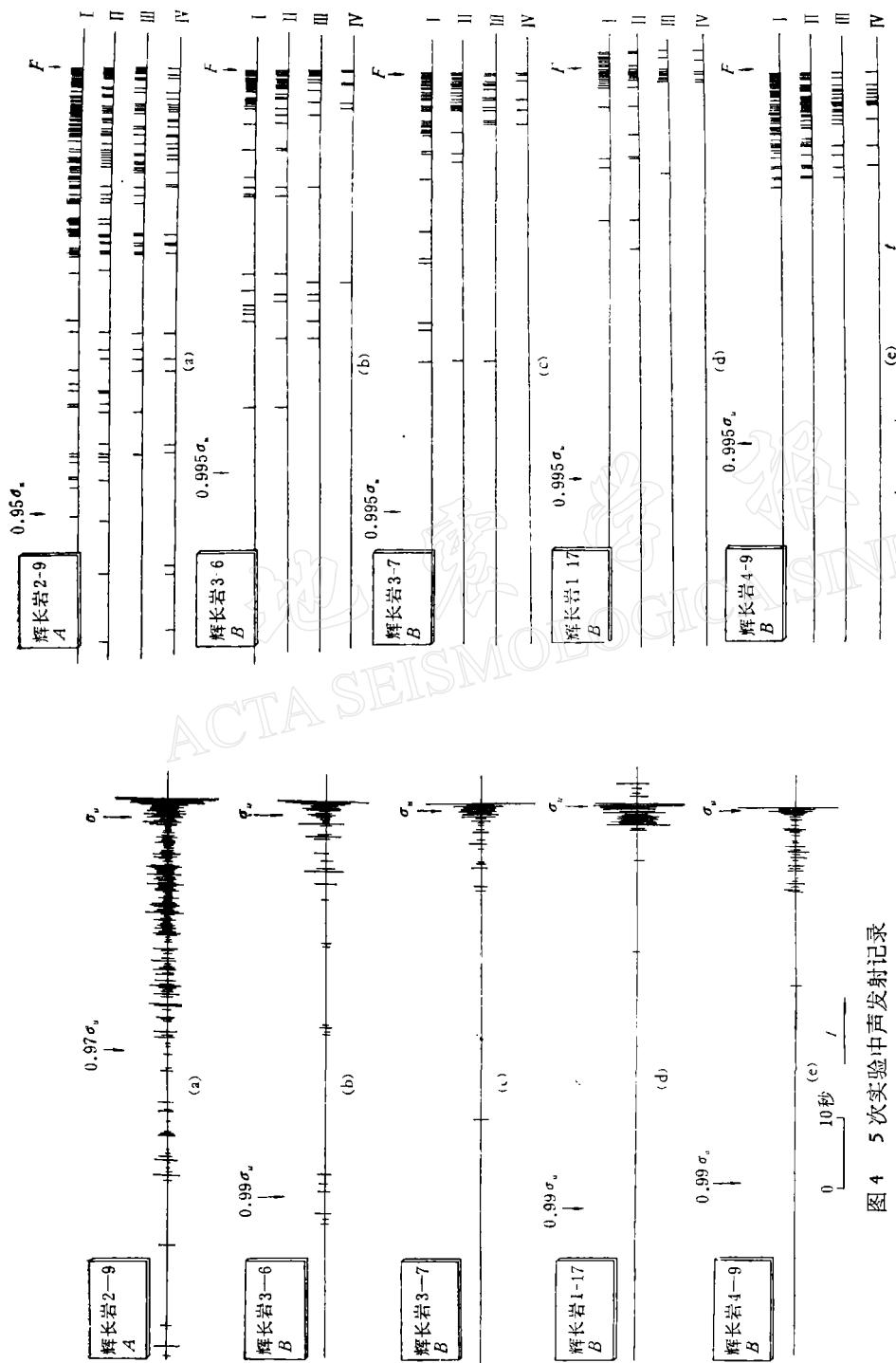


图 4 5 次实验中声发射记录

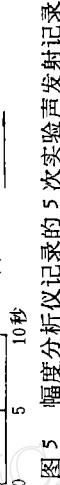


图 5 幅度分析仪记录的 5 次实验声发射记录

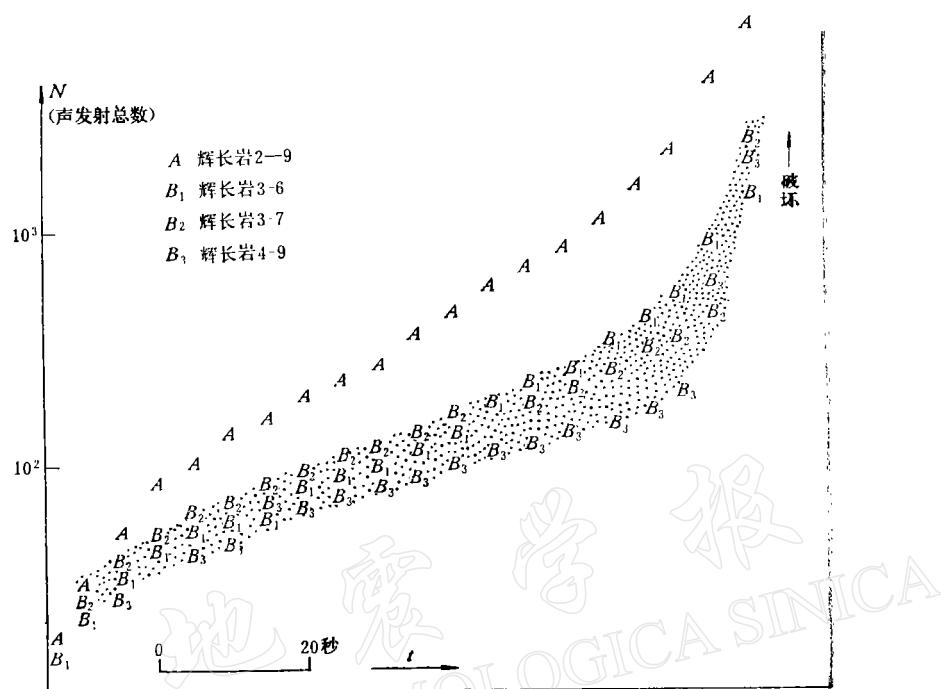


图 6 破坏前 100 秒声发射总数

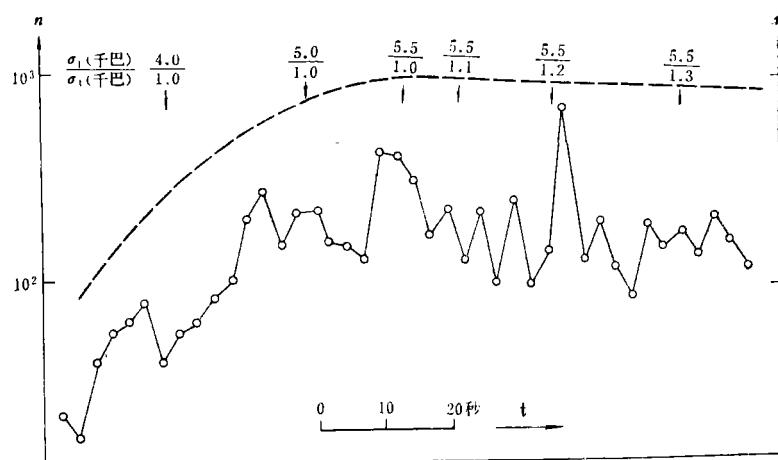


图 7 C 型实验中的声发射率记录

表

岩石样品	应力途径	声发射急剧增加时的差应力 σ_e (千巴)	三轴强度 σ_3 (千巴)	$\sigma_3 - \sigma_e$ (千巴)
辉长岩 2-9	A	6.6	7.9	1.3
辉长岩 5-7	A	6.1	6.5	0.4
花岗岩 8-28	A	1.6	2.0	0.4
花岗岩 8-30	A	2.9	3.6	0.7
花岗岩 8-34	A	5.9	6.6	0.7
辉长岩 3-6	B	7.03	7.07	0.04
辉长岩 3-7	B	6.95	6.98	0.03
辉长岩 3-8	B	6.25	6.27	0.02
辉长岩 1-17	B	5.10	5.08	0.02
辉长岩 4-9	B	6.39	6.42	0.03
辉长岩 4-11	B	5.70	5.72	0.02
辉长岩 3-11	B	6.27	6.30	0.03
花岗岩 8-15	B	5.35	5.38	0.03
辉长岩 7-12	C(后转为 B)			
花岗岩 8-14	C			

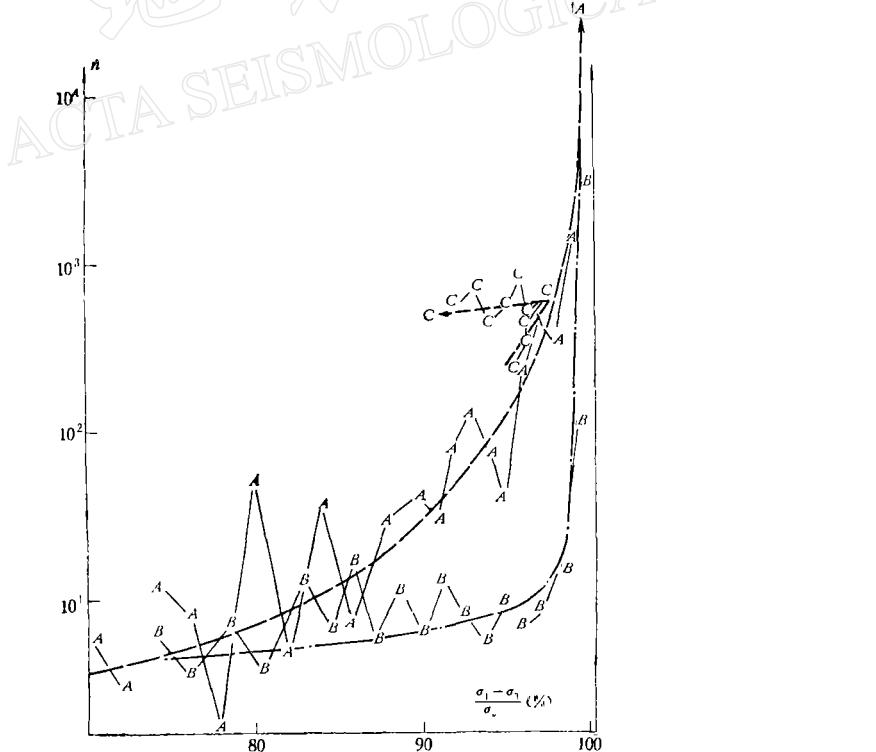


图 8 A型、B型和C型实验中岩石声发射一差应力曲线

四、讨 论

1. 在地壳条件下, 使岩石发生脆性破裂或摩擦滑动所需应力为数千巴。而许多大地震测量到的应力降很少超过 100 巴。因此, 这样小的应力变化是很难造成岩石声发射活动性的明显变化。本实验表明, 如果岩石应力状态的变化不限于最大主应力的变化, 则岩石破坏前的前兆现象比过去仅仅从常规三轴实验得到的结果要复杂得多。例如, 当围压发生 20—30 巴的变化时, 就能造成声发射活动性的明显变化。因此, 岩石的声发射行为不仅仅与岩石应力状态有关, 还与应力状态的变化——应力途径有关。

图 8 给出了在 A. B. C 三种应力途径下岩石声发射率随应力状态变化的实测结果。一方面可以看出, 对于给定的差应力声发射活动性因应力途径不同而异。对于给定的声发射活动水平, 不同应力途径对应的差应力亦不同。也就是说, 在同样的声发射水平时, 岩石离破坏的危险程度也因应力途径不同而异。

2. 三轴压缩时, 岩石受力可以分成两部份: 各向同性的流体静压力 σ_0 (应力的球对称张量)

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

和非各向同性的压, 拉和剪切作用 (应力场的偏张量部份)。在静压力 σ_0 作用下, 岩石体积将会发生变化, 因而贮存在岩石内的应变能 E_0 为

$$E_0 = \frac{3}{2} \frac{(1 - 2\gamma)}{E} \sigma_0^2$$

偏张量部份与岩石形状变化有关, 与此相应的应变能 E_1 为

$$E_1 = \frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

岩石内部的总应变能 E 为

$$E = E_0 + E_1$$

在 A 型加载中, E_0 与 E_1 两者都增加, E 也增加, 岩石经历了加载过程, 其声发射特征正是这种加载过程的反映。但在 B 型加载过程中, 从应力球张量部份来看, E_0 减少, 经历了卸载过程, 而 E_1 增加, 对偏张量部份来看, 是一个加载过程, B 型加载下的声发射特征就是与这种既有加载, 又有卸载的过程密切联系的。声发射的 Kaiser 效应表明声发射的不可逆性质。加载时的声发射与卸载时明显不同。本实验各种应力途径的三轴实验, 对应了即有加载, 又有卸载的复杂的应力变化。声发射活动的不同特点正是 Kaiser 效应的复杂化。这些现象给我们以启示, 在更真实和更复杂条件下, 弄清声发射的机理及它在各种环境下表现出的各种规律是很有意义的。

傅承义教授和陈运泰同志审阅全文并提出宝贵意见。姚孝新、郝晋昇、耿乃光, 张来风、刘端发和刘英等同志参加了实验工作, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] K. Mogi, Earthquakes as fracture in the earth, in "Advances in Rock Mechanics", Proc. 3rd. Conf. Int. Soc. Rock Mechanics, IA, 559—568, 1974.
- [2] C. H. Scholz, Experimental study of the fracturing process in brittle rocks, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1447—1454, 1968.
- [3] C. F. Bacon, Acoustic emission along the San Andreas fault in southern central California, *Materials evaluation*, **34**, 5, 1976.
- [4] J. D. Byerlee, A review of rock mechanics studies in the United States pertinent to earthquake prediction, *PAGEOPH*, **116**(4/5), 586—602, 1978.
- [5] K. Mogi, Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials, and its relation to the earthquake phenomena, *Bull. Earth. Res. Inst.*, **40**, 1, 125—173, 1962.
- [6] H. J. Alheid and F. Rummel, Acoustic emission during frictional sliding along shear planes in rock, in "Proc. First conf. on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geological Structure and Materials", 149—154, 1977.
- [7] R. Chen, N. G. Geng, and X. X. Yiao, Strength and volume changes of rocks under triaxial compression with various stress paths, Submitted to *Scientia Sinica*, **11**, 1093—1100, 1979.
- [8] R. W. B. Stephens, A. A. Pollock, Waveform and frequency spectra of acoustic emission, *J. of Acoustic Society of America*, **50**, 3, 904—910, 1970.

ACOUSTIC EMISSION OF ROCKS UNDER TRIAXIAL COMPRESSION ALONG VARIOUS STRESS PATHS

CHEN YONG

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

Acoustic emission of Jinan gabbro and Shangpin granite samples has been observed under triaxial compression along various stress paths (confining pressure up to 1.3 kb). When the maximum principal stress was increased until the rock sample failed (case A), the average acoustic emission rate gradually increased, an abrupt increase of acoustic emission occurred at about several hundred bars prior to rupture. When starting from a high stress state and the confining pressure was decreased (case B), an abrupt increase of acoustic emission occurred much later, only about 20—30 bars before rupture. The total number of acoustic emission in the fracture process was much less than one-third of that in case A. There were two processes in case B: loading process for differential tensor component of the stress field; unloading process for spherical symmetric tensor component (hydrostatic). It is possible that the different characteristics of acoustic emission is due to the existence of the unloading process.