

不同单轴加压方式下岩石声发射的 时间过程与频率特征

臧绍光 范建利

(北京大学地球物理系)

摘 要

本文利用两个频率通道同时接收花岗岩标本及石灰岩标本在不同单轴加压方式下的声发射信号,研究了从加压到破坏的整个形变过程中,不同频道接收到的声发射率的变化特征。发现在各种加压方式下,花岗岩和石灰岩在破坏前,由不同频率通道接收到的声发射率均急剧增长;而在破坏的瞬间,高频通道接收的声发射率增长快于较低频率通道的声发射率。这两点可用来预测岩石的破坏。

声发射率随轴向应力的变化与加压方式有关。匀速加压,加压过程中保持一段时间恒压或降压均对应一定的声发射率状态。有可能通过追踪声发射情况,推测应力变化趋势。

一、前 言

六十年代以来,许多作者利用声发射技术对岩石力学性质及破裂过程进行了研究^[1,2,3],大致可分如下几个方面:(1)声发射率随载荷的变化;(2)声发射振幅的分布;(3)声发射的频率特性;(4)声发射源位置的确定;(5)声发射源的力学性质。这些研究从不同角度对岩石的破坏过程提供了有用的信息。例如利用声发射振幅的分布可以监测脆性岩石的稳定性;声发射源的确定可以用于确定破裂区的位置。

声发射频率特性的研究受到很大重视,认为它可以反映岩石的破裂过程。对声发射振幅谱随载荷的变化曾作了大量工作,但结果却常常不一致。由于声发射量很大,而且即使在相近的时间发生的声发射的波形也不一样,所以进行振幅谱分析相当困难。大中康誉等人^[4]提出利用两个不同频率通道接收的声发射率来研究破裂过程声发射活动的频率特性。他们得出在递增加压过程中,新小松安山岩等岩石在接近破坏时,低频通道的声发射率比高频通道的声发射率增加的要快得多,并提出这可能是监测岩石破裂和预报大震的可能手段。但由于实验结果较少,此结果尚未得到确认。为了进一步研究岩石破裂过程中声发射的频率特性,并考虑到岩石和地下岩体的自然状况及受力方式的多样性,本文利用类似大中的观测方法研究了不同加压方式下和水饱和状态下岩石声发射的频率和轴向应力的关系,以期寻求破裂前声发射的频率特征。

本文1985年5月21日收到,1985年12月30日收到修改稿。

二、实验方法

实验装置：本实验使用“DY-100型”万能材料试验机，对岩石标本进行单轴加压，用SF-02A双通道声发射综合参数测试仪测试声发射信号，使用锆钛酸铅压电换能器作为接收器。接收到的声发射信号经前置放大，输送到双通道声发射测试仪，经滤波、放大。仪器有选择信号的门槛电压装置，仅对主放后大于门槛电压的信号计数；计数由数字显示系统直接显示，同时由记录仪记录；用双踪示波器监视声发射信号波型和其它情况。

实验中使用不同压电换能器和不同的滤波器组成的三个频率通道，分别称低频通道 L ，中频通道 I ，高频通道 H ，它们总的频率响应见图1。

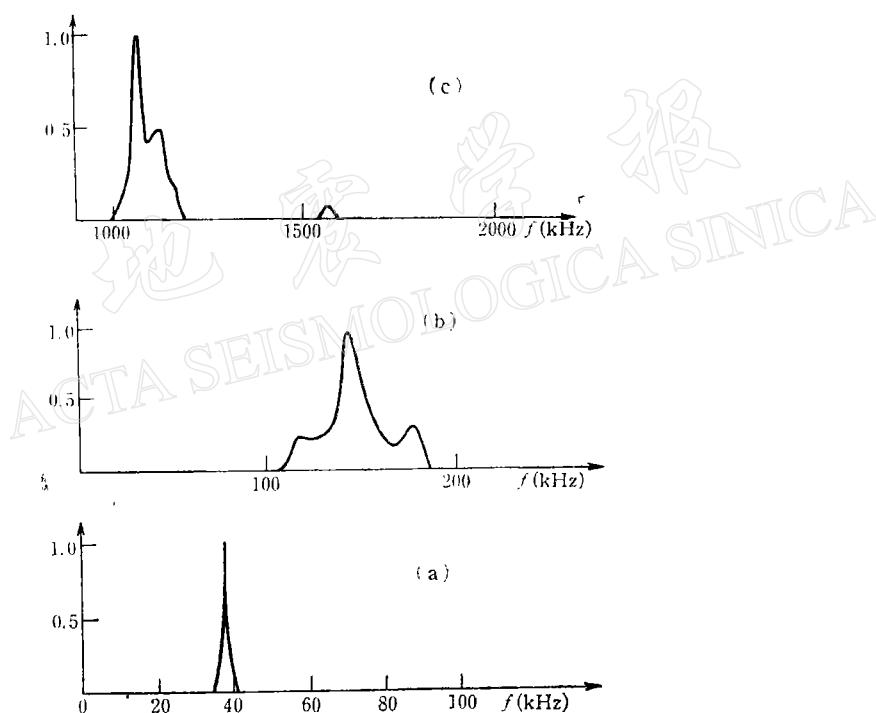


图1 三个不同频率通道的频率响应

(a) 低频通道 L (b) 中频通道 I (c) 高频通道 H

Fig. 1 Responses of the three frequency windows

(a) low frequency window L (b) intermediate frequency window I
 (c) high frequency window H

对花岗岩各频率通道的门槛电压和增益的选择见表1。对黑灰岩标本，中频门槛为0.3V，主放增益50dB，其它选择和花岗岩相同。

对每块标本，用两个频率通道同时观测。以每30秒的声发射数作为声发射率， $n(H)$, $n(I)$, $n(L)$ 分别表示高频通道 H , 中频通道 I , 低频通道 L 接收的声发射率。

实验过程中采用了匀速加压，连续重复匀速加压，隔日重复匀速加压及阶梯匀速加压。

表 1 各频率通道的增益和门槛电压

Table 1 The gain and the threshold voltage for the three frequency windows

通 道	频 率 MHz	前放增益 dB	主放增益 dB	门 槛 电 压 V
H (高频)	1.05—1.15	40	50	0.3
I (中频)	120—180	40	47	0.5
L (低频)	35—38	40	50	0.3

的不同加压形式，目的是研究岩石在不同的受力状态下，破裂过程中声发射的频率特性。在各种加压方式中的匀速加压阶段的加压速率均相同，对小标本为 1.9 MPa/min ，大标本为 1.7 MPa/min 。

岩石标本及其性状见表 2。实验中主要使用小标本，文中通称标本，用大标本时特别说明。

表 2 标本及其性质和形状

Table 2 Specimen and their properties and forms

岩 石	产 地	孔隙度 (%)	结晶状况	标本规格 (cm^3)
花岗岩	四川 白虎洞	1.92	粗晶粒较均匀	小标本 $8 \times 4 \times 4$
黑灰岩	北京 房山	0.52	细粒、均匀、 沿轴向有层理	大标本 $12 \times 6 \times 6$ 小标本 $8 \times 4 \times 4$

三、实验结果及分析

1. 花岗岩实验结果

(1) 匀速加压 指以恒定加压速率加压，目的是研究在这种简单的加压情况下破裂过程中声发射的频率特性。图 2 是花岗岩标本在匀速加压下的 $n(I)-t$, $n(H)-t$ 曲线， t 是加压时间，由于是匀速加压，标本所受应力和加压时间成正比， $n(I)$, $n(H)$ 随时间的变化可看作是随应力的变化，因此在以下讨论中即按应力划分阶段。

由图 2(a) 看出 $n(I)$ 随应力变化大致有五个阶段：

阶段 1 应力在 0 — 10% σ_f (σ_f 为岩石峰值强度)，有较高的声发射率， $n(I)$ 随应力增加而减小。

阶段 2 应力在 10% — 28% σ_f , $n(I)$ 很小。

阶段 3 应力在 28% — 50% σ_f , $n(I)$ 增大，但基本不随应力增加而变化。

阶段 4 应力在 50% — 80% σ_f , $n(I)$ 随应力增加而以指数函数的形式增加。

阶段 5 应力在 80% σ_f 以上， $n(I)$ 随应力增加以更快的速度增加。

$n(H)$ 随应力变化也大致可分为五个阶段：

阶段 1 0 — 25% σ_f , $n(H)$ 很小。

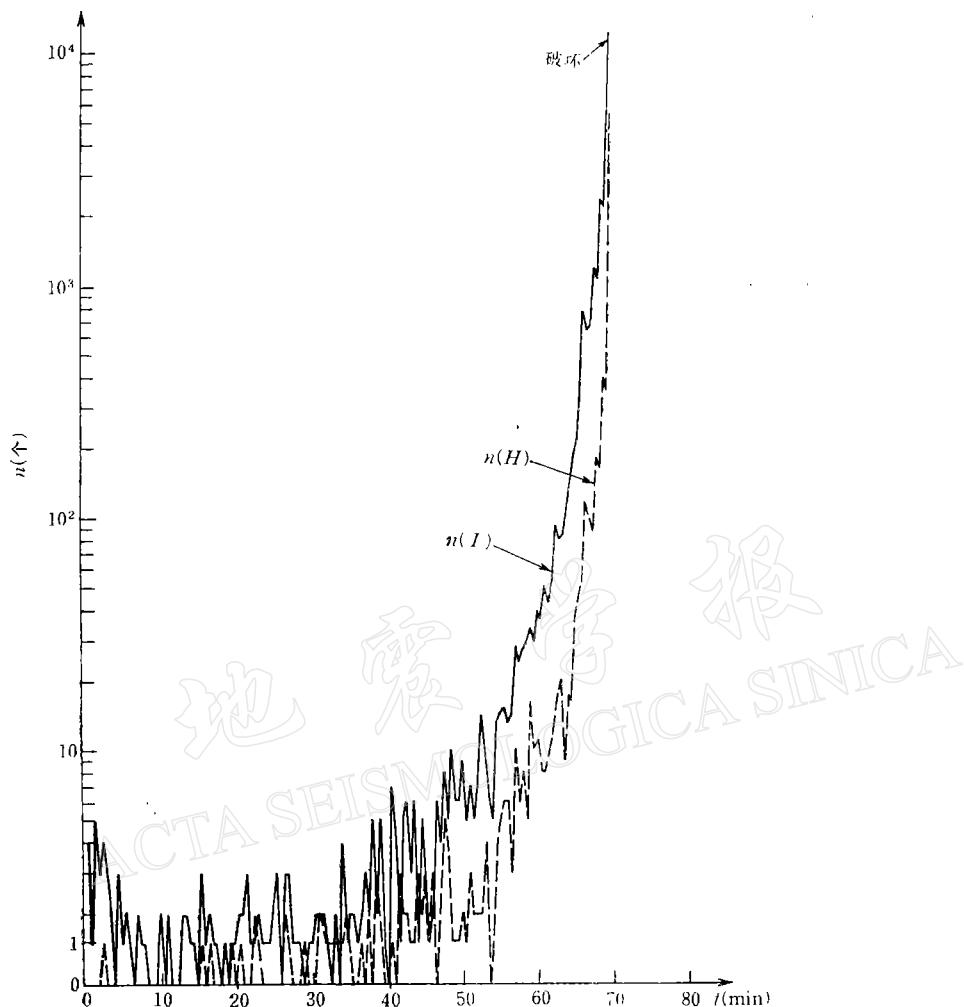


图2 (a) 匀速加压下花岗岩声发射率特性随时间的变化

Fig. 2 (a) Curves of $n(I)$ vs. t and $n(H)$ vs. t for granite under compression with constant rate. $n(I)$ —rate of acoustic emission through the intermediate frequency window, $n(H)$ —the rate through the high frequency window

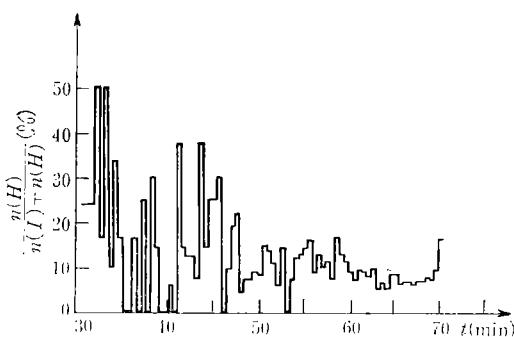


图2 (b) 比值 $n(I)/[n(I) + n(H)]$ 随时间的变化

Fig. 2 (b) the curve of $n(H)/[n(I) + n(H)]$ vs. t

阶段 2 25%—60% σ_f , 随应力的增加 $n(H)$ 变化很小。

阶段 3 60%—70% σ_f , $n(H)$ 有所增大, 但不随应力变化。

阶段 4 70%—93% σ_f , $n(H)$ 随应力增加而以指数函数形式增加。

阶段 5 应力大于 93% σ_f , $n(H)$ 随应力的增加以更快的速度增加。

可以看出: $n(I)-t$, $n(H)-t$ 有差别, 主要是小应力下 (0—10% σ_f) $n(H)$ 小, 而 $n(I)$ 足够大; 在应力超过 50% σ_f 时, $n(I)$ 随应力增加比 $n(H)$ 更快。为了研究破裂前 $n(I)$, $n(H)$ 变化情况, 图 2(b) 给出了在应力大于 50% σ_f $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 随 t 的变化。

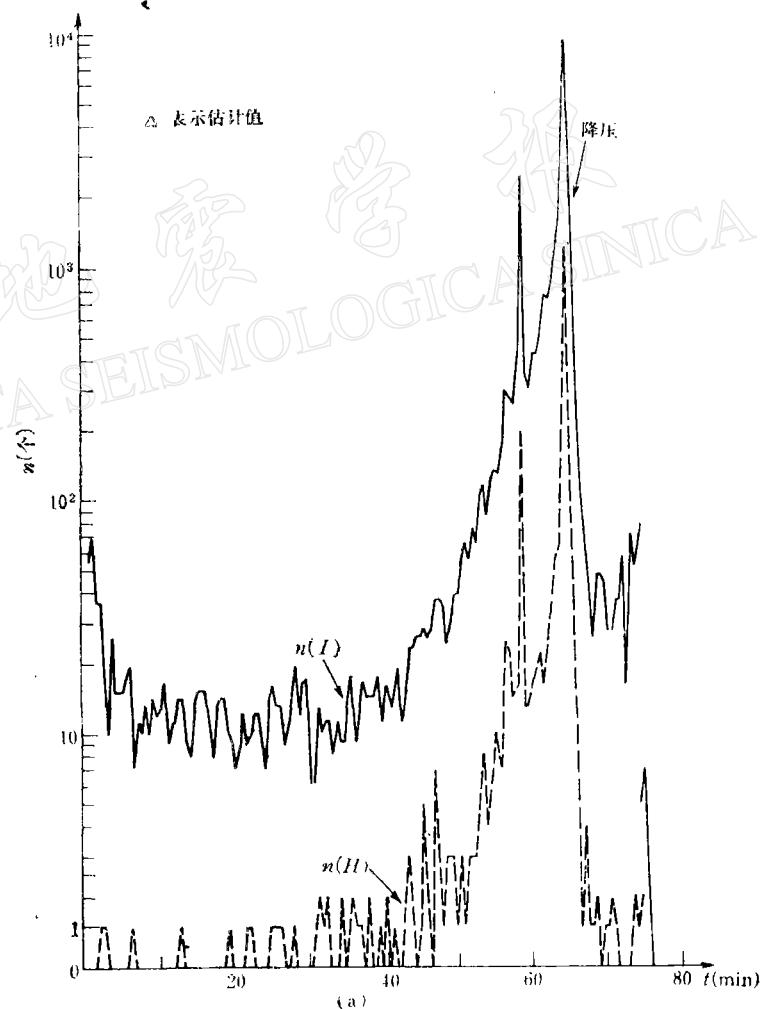


图 3 连续重复加压下花岗岩声

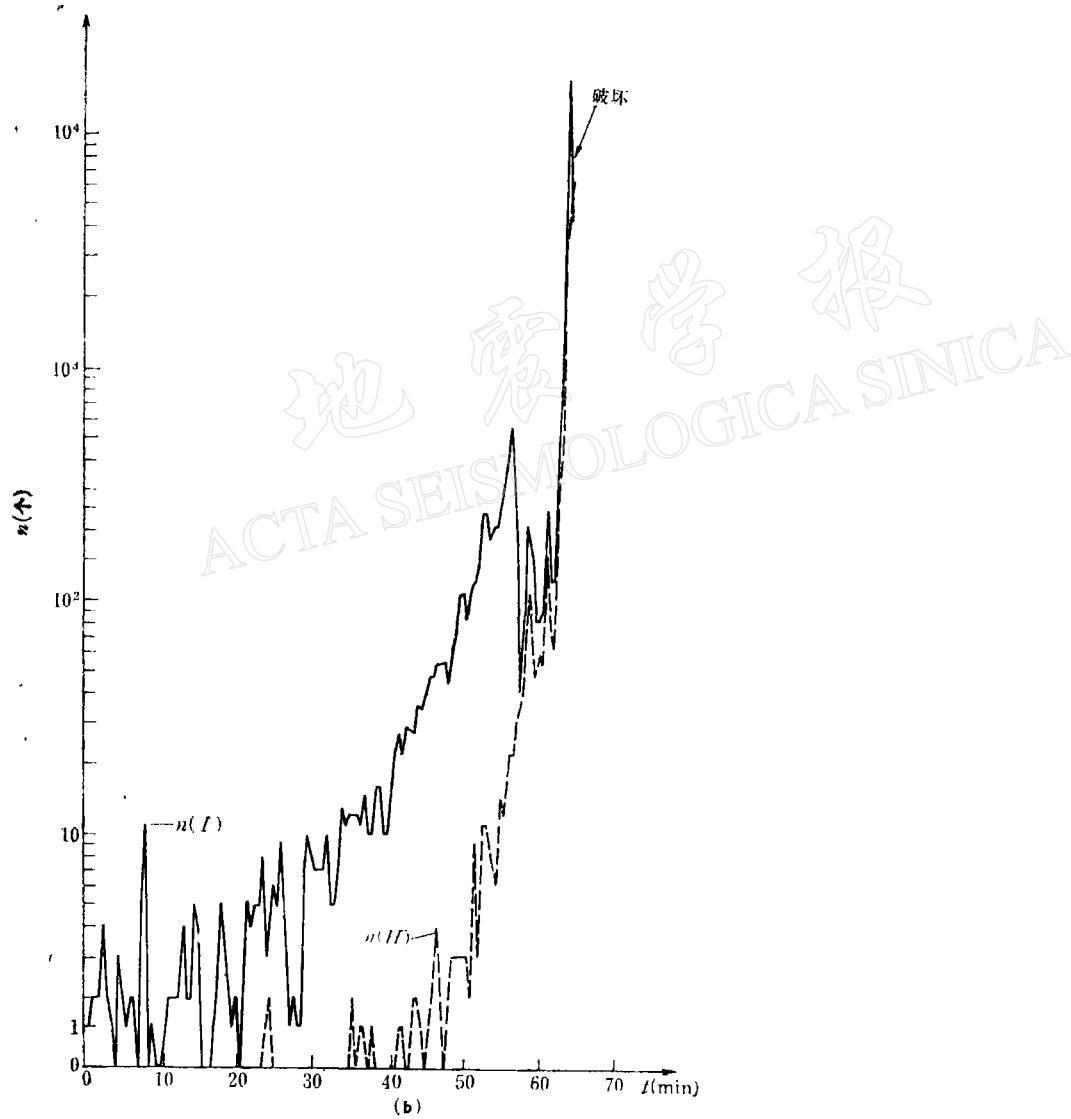
(a) 第一次加压

Fig. 3 The curves of $n(I)$ vs. t and $n(H)$ vs. t for granite under cycles of

(a) First cycle

可以看出应力在 $70\% - 83\% \sigma_f$ 时, $n(H)$ 和 $n(I)$ 的变化趋势基本一致,而在应力大于 $83\% \sigma_f$ 之后 $n(I)$ 增加比 $n(H)$ 快,因而 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 减小,但在临近破裂前和破裂的瞬间, $n(H)$ 的增加比 $n(I)$ 更快, $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 急剧增大。

为了核实以上特点,检查了所有匀速加压的结果,发现多数具有图 2(a) 的形态,少数没有 $n(I)$ 变化的第一阶段,即应力在 $30\% \sigma_f$ 以前 $n(I)$, $n(H)$ 很小,但在大于 $30\% \sigma_f$ 以后,变化趋势基本一致;多数标本也具有图 2(b) 上的 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 随应力的变化特点,少数标本缺少 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 随应力增加而明显减少的阶段,但没



发射率频率特性随时间的变化

(b) 第二次加压

compression with constant rate. $n(I)$ and $n(H)$ are the same as in Fig.2.

(b) Second cycle.

有出现相反的趋势,所有的标本均有在临近破裂及破裂瞬间 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 急剧上升的情况。

(2) 重复加压 指以匀速加压到一定压力之后,逐渐减压到零,再按相同的加压速率加压的多次循环,最后一次将岩石压破。减压速率为 6.1 MPa/min 。除最后一次以外,每次都加压到接近岩石的破裂强度。此实验的目的是研究预先加压历史对声发射频率特性的影响。

(a) 连续重复加压: 指第一次加压循环后马上进行第二次加压,直到破裂。图 3 是较典型的重复加压下, $n(I)$, $n(H)$ 随时间(应力)的变化。第一次加压到接近破裂然后降压、加压。

由图 3(a) 可见,第一次加压结果和匀速加压结果基本一致,只是在应力小于 $50\% \sigma_f$ 时, $n(H)$ 较大,在 $80\% \sigma_f$ 时 $n(I), n(H)$ 较高,这可能与岩石本身差别及局部小破坏有关。

降压后 $n(I), n(H)$ 立刻急剧减小, $n(H)$ 减小更迅速,马上接近于零,而 $n(I)$ 却

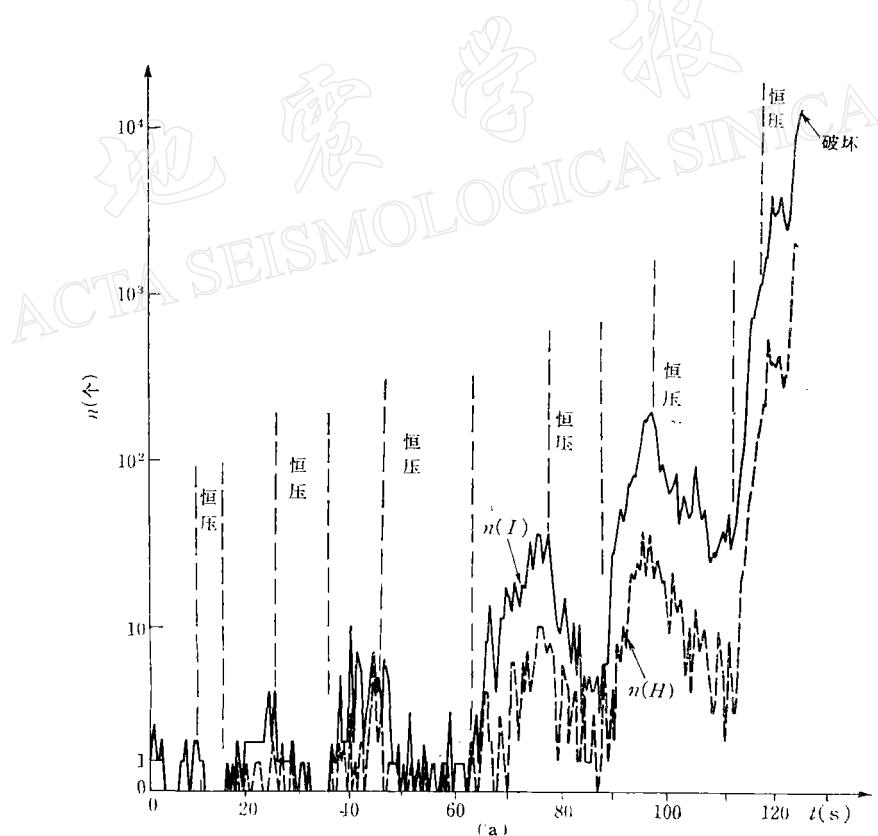


图 4 阶梯加压下,花岗岩标
(a) 加压全过程

Fig. 4 Curves of $n(I)$ vs.t and $n(H)$ vs.t for granite under step compression, that is, after new cycle of compression started
(a) The whole process of the step compression

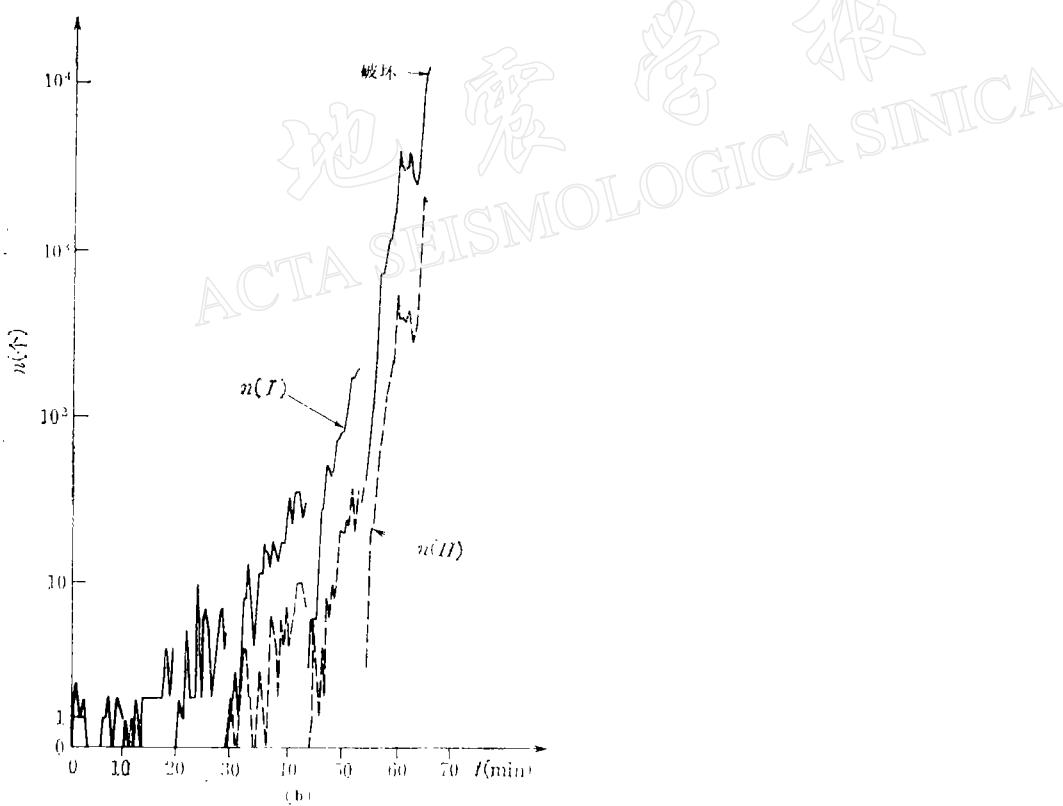
在一定数值上摆动。当压力降到零时, $n(I)$, $n(H)$ 为零。

第二次加压的声发射率特性见图 3(b)。可看出 $n(H)$ 与 $n(I)$ 的差别: $n(I)$ 在小应力下不为零, 在大于 30% σ_f 时以指数形式增加; 而 $n(H)$ 在小于 50% σ_f 前基本为零, 在大于 65% σ_f 后开始快速增加。

比较一下第一次加压和第二次加压结果, 可以看出声发射活动有较明显的变化: (1) 应力小于 50% σ_f 时, 后一次的 $n(I)$, $n(H)$ 均小于前一次, 而且后一次的 $n(H)$ 几乎为零。 (2) 应力分别约在 60% σ_f 和 75% σ_f 时, $n(I)$, $n(H)$ 开始赶上并超过前一次数值, (3) 后一次的 $n(I)$ 随应力增加的趋势出现的早。

以上结果在第一次降压前没有出现较明显的破裂 (指加压中出现宏观区域破裂和发声现象) 的标本中普遍存在, 只是细节上略有区别。但对第一次加压循环出现破裂现象后降压, 然后进行第二、第三次循环加压的结果略有不同。

(b) 隔日重复加压: 加压方式与连续重复加压基本相同, 不同的是前一次循环后标本放置一天, 再作下一次循环。目的是研究岩石受压后, 有一段时间间隔不受力可能产生



本声发射率随时间的变化

(b) 匀速递增加压过程

compression with constant rate the same pressure was kept constant for several minutes, then again until failure of the rock occurred

(b) Synthetic process of compression with constant rate, that is, the segments of constant pressure in Fig. (a) were cut out and the remaining parts are connected

的影响。

隔日重复加压曾进行了两次循环和三次循环的多次实验，将其结果与重复加压结果（如图 3）比较，发现两者没有什么明显的差异，即加压循环后标本放置一日对声发射及其频率特性没有明显影响。

(3) 阶梯加压 指均速加压到一定应力后，保持压力恒定一段时间，然后再匀速加压，再恒压的多次阶梯循环，最后使岩石破坏。研究不同应力阶段恒压对声发射及频率特性的影响。

阶梯加压结果见图 4。图 4 是加压全过程的 $n(I)$, $n(H)$ 随时间的变化。由于恒压的时间已知，仍可由加压时间得知各时刻对应的应力。由图 4(a) 可以看出，恒压下 $n(I)$, $n(H)$ 下降，但下降程度和应力大小有关。在应力小 50% σ_f , $n(I)$, $n(H)$ 很快降到零或接

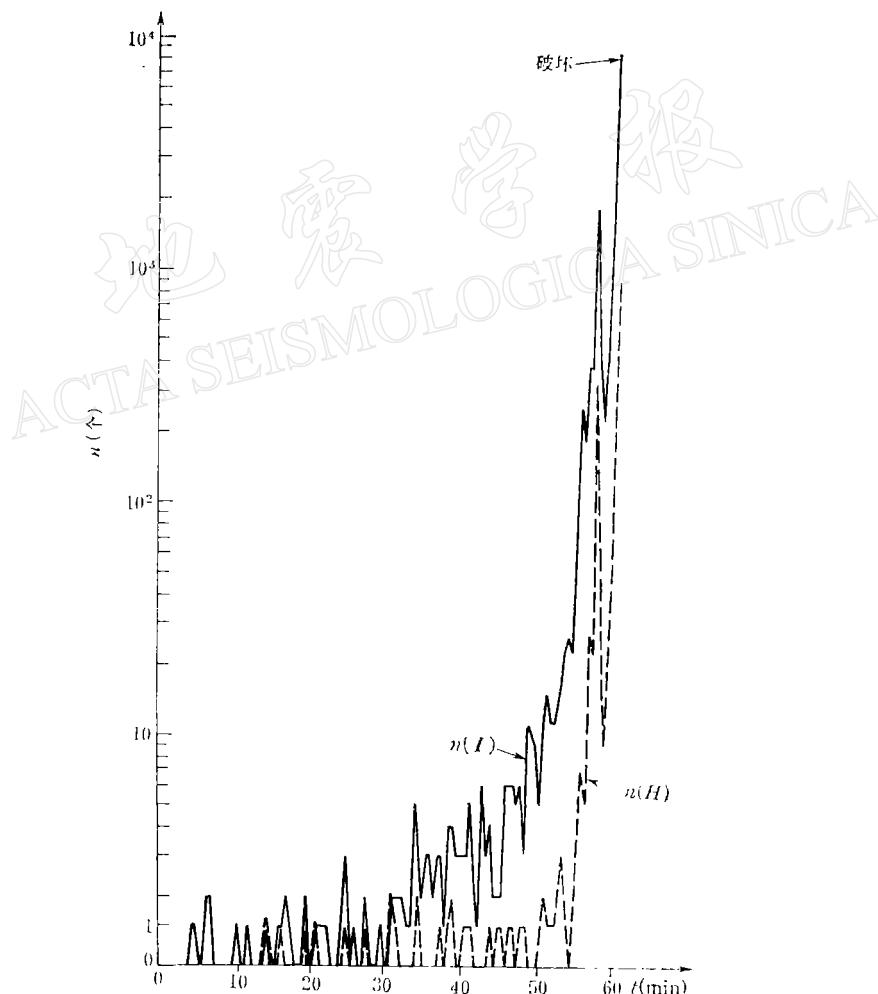


图 5 匀速加压下，水饱和花岗岩声发射率随时间的变化

Fig. 5 The curves of $n(I)$ vs.t and $n(H)$ vs.t for saturated granite under compression with constant rate

近于零；当应力大于 50% σ_f , $n(I)$, $n(H)$ 下降速度减慢；在应力大于 92% σ_f , $n(I)$, $n(H)$ 下降速度进一步减慢，且下降到一定程度后开始上升。图 4 所示标本即是在最后一次恒压阶段， $n(I)$, $n(H)$ 略有下降而后急剧上升，随之而破坏的。这表明声发射率不但和加压速率有关，而且和应力大小有关。岩石在接近破裂时，恒压可引起极大的声发射率，且岩石在蠕变下破坏。

为了研究恒压阶段对岩石声发射频率特性的影响，将图 4(a) 恒压阶段去掉，将各匀速加压阶段连接起来，作出图 4(b)。它反映的是 $n(I)$, $n(H)$ 在匀速加压阶段的变化。比较图 4(b) 和匀速加压的结果图 2(a)，可以看出 $n(I)$, $n(H)$ 随应力的整体变化趋势是一致的。分析阶梯加压的每一个恒压循环：每一次新的匀速加压的开始都使 $n(I)$, $n(H)$ 以更快的速度增长，很快达到恒压前的数值，然后以较慢的，接近于相同应力水平下一般匀速加压下增长速度随应力增长。这反映在岩石破裂过程中声发射率随应力的变化具有一定规律，至少阶梯加压方式对其影响不大。

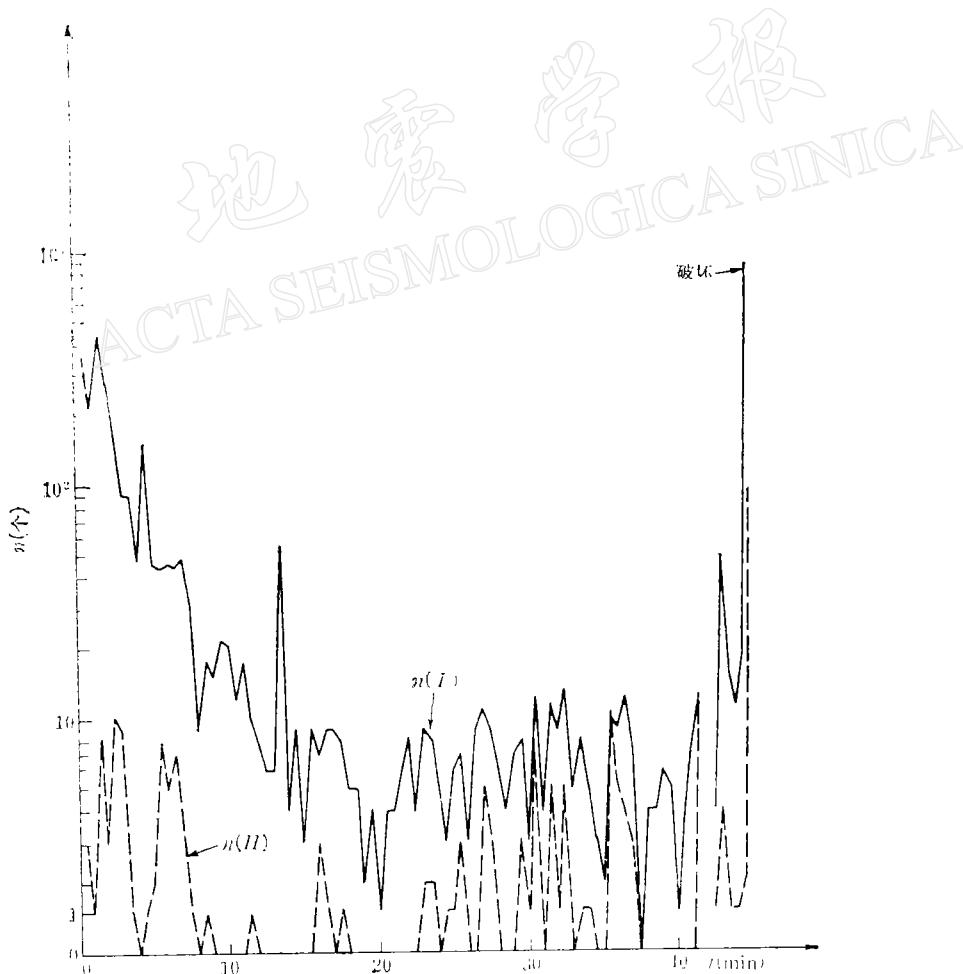


图 6 匀速加压下，黑灰岩声发射率随时间的变化

Fig. 6 The curves of $n(I)$ vs. t and $n(H)$ vs. t for limestone under compression with constant rate

(4) 匀速加压下水饱和花岗岩声发射 将标本处理使其水饱和, 对其匀速加压到破坏, 目的是研究水对声发射频率特性的影响。 $n(I)$, $n(H)$ 随时间(应力)的变化示于图 5。

由图 5 可见 $n(I)$, $n(H)$ 随应力的变化有明显的差异。 $n(I)$ 在约 55% σ_f 时, 开始随应力呈指数形式增加, 而在约 80% σ_f 时开始急剧增长; $n(H)$ 在小于 80% σ_f 前只在 0—2 摆动, 在 90% σ_f 时开始急剧增长。

比较水饱和与干花岗岩在匀速加压下的结果(图 5 和图 2), 水的影响有两点: (1) 使 $n(I)$, $n(H)$ 的数值在急剧增长阶段前(应力分别为 80% σ_f 和 90% σ_f) 明显减小, 特别是 $n(H)$; (2) 急剧增长阶段 $n(I)$, $n(H)$ 的增长速度更快。

2. 黑灰岩实验结果

为了研究不同岩石的声发射及其频率特性的差异, 按前所述方法对黑灰岩进行了匀速加压及连续重复加压实验。

图 6 是黑灰岩大标本匀速加压的结果。由图 6 可见: $n(I)$, $n(H)$ 有类似的变化, 在应力小于 20% σ_f 时, 有较高的值, 但随压力增加而减小; 应力在 20% σ_f —90% σ_f , $n(I)$,

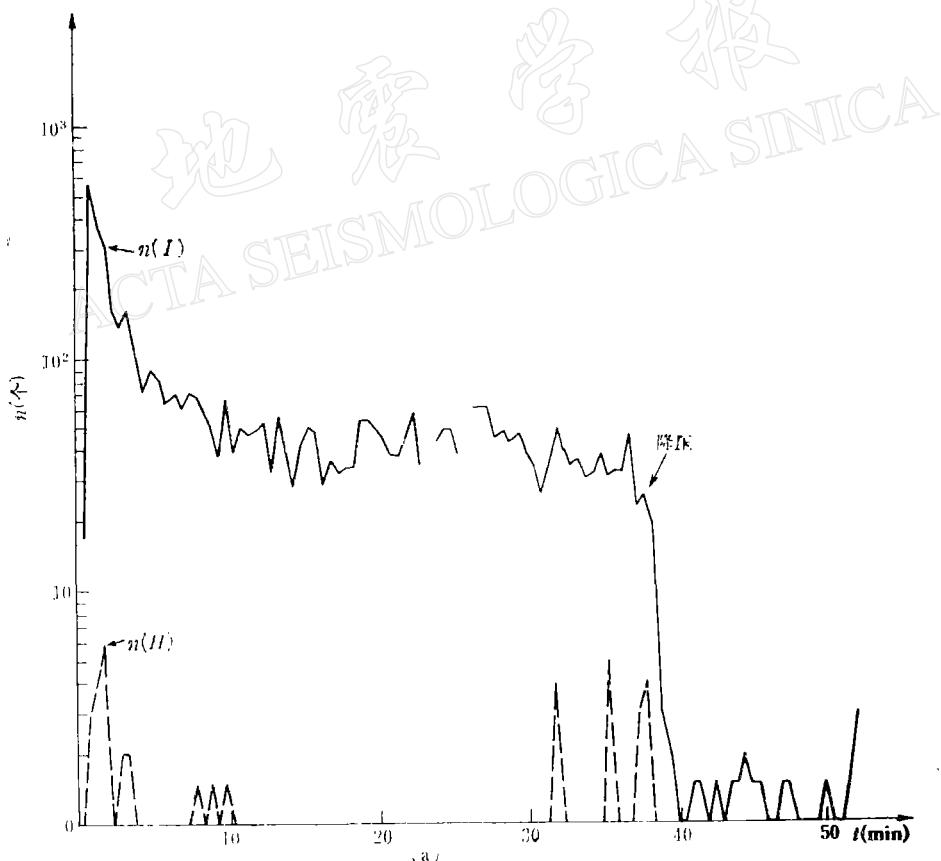


图 7 连续重复加压下, 黑
(a) 第一次加压

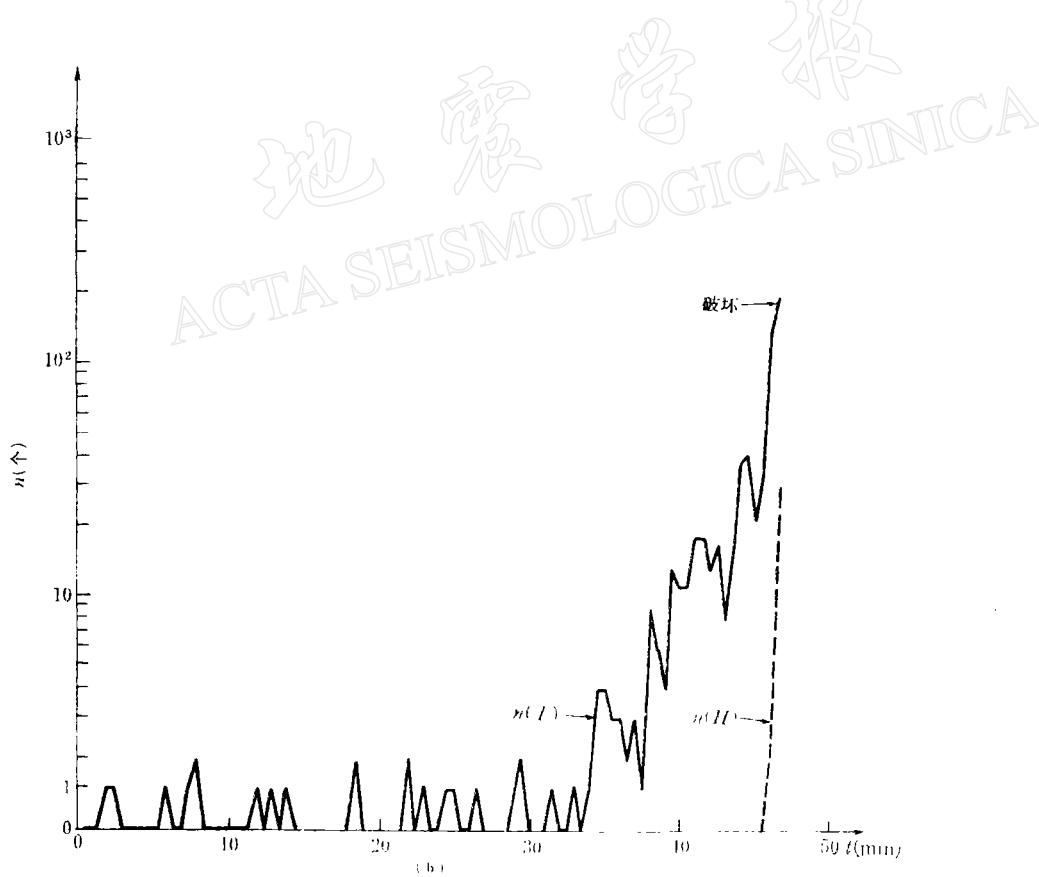
Fig. 7 The curves of $n(I)$ vs. t and $n(H)$ vs. t for
(a) First cycle

$n(H)$ 到一定数值后不随应力增加, 仅在一定数值范围内起伏, $n(H)$ 在应力为 70%—80% σ_f 时略有增加; 应力超过 92% σ_f , 数值增大, 接近破裂时急剧增加。

图 7 是黑灰岩标本连续重复加压的结果。图 7(a) 是第一次循环加压的结果, 约在 90% σ_f 时开始降压, 图 7(a) 的变化规律和图 6 相同, 仅数值不同。由图 7(b) 可见: 应力小于 75% σ_f 时, $n(I)$ 很小, 在 0—2 波动, 应力约为 75% σ_f 时, $n(I)$ 开始增长, 在 92% σ_f 后急剧增长; $n(H)$ 在破裂前为零, 在破坏时急剧增长。比较图 6、图 7(a) 和图 7(b), 前一次加压大大减弱了后一次加压时在破裂前的声发射率, 但在接近破坏和破坏时声发射频率特性变化不大。

四、讨 论

上节给出了实验的基本结果, 这些结果可能会由于各频道的宽度、增益、门槛电压不同, 在细节上有所不同, 但不会影响整体趋势。本节将进行几点讨论:



灰岩声发射率随时间的变化

(b) 第二次加压

limestone under cycle compression with constant rate

(b) Second cycle

1. 小应力下声发射率的误差 本实验为使相同类型标本的结果可比, 在标本受力面加云母薄片, 这样处理后破裂面基本通过标本中部, 且破裂强度接近一致。但云母片带来额外的声发射, 对此进行了实验, 其典型结果见表 3。表 3 是第一次加压的结果, 同一云母片在第二、第三次加压时 $n(I)$, $n(H)$ 均为零。所以云母片的额外声发射仅存在于第一次加压时应力小于 10% σ_f 内。上节提到在应力小于 10% σ_f 时 $n(I)$ 随压力增加而减小的情况中可能包含云母片的影响。

表 3 云母垫片对声发射的影响 (t 为加压时间)

Table 3 Effect of mica sheet on acoustic emission (t —the time of compression)

t (min)	0.5	1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
$n(I)$	1	1	3	2	5	1	4	1	1	1	1	1	0	0
$n(H)$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. 比值 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 在破裂前的变化 大中康誉等^[4]发现在破坏前(花岗岩约 97%—100% σ_f , 安山岩约 87%—100% σ_f), 比值 $n(I)/[n(H) + n(I)]$ 增加, 即本文所用 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 变小, $n(I)$ 比 $n(H)$ 增长快。本实验中所有匀速加压的结果均显示 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 在临近破坏和破坏瞬间急剧增大。但应力在 90% σ_f 到破坏前的结果却不一样, 多数标本显示出 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 明显下降, 如图 3(b), 少数下降不明显, 但没有增加的例子。对重复加压实验的最后一次加压循环的结果, $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 在应力大于 90% σ_f 时变化情况较为复杂一些, 有的在应力约为 92% σ_f 时开始下降, 临近破坏时急剧上升; 有的有极缓慢的上升趋势, 在临近破坏时急剧上升。综合各种结果, 可以看出 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 在破坏前的应力大于 90% σ_f 的变化趋势不确定, 对重复加压更是如此, 与大中康誉等^[4]的结果不一致。但在临近破坏时, 此值在缓慢变化的背景下急剧增长却是共同的特点, 或许可用来预报岩石的破坏。应指出大中康誉等^[4]也观测到了临近破坏时 $n(H)/[n(H) + n(I)]$ 更急剧的增大, 但他们认为是由于破裂时接受换能器附近形成应力集中, 而造成附加大量的微小破裂而引起的。作者不知他们具体的耦合方法, 本实验使用真空脂作为标本和接受换能器间的耦合剂, 在泡沫塑料骨架支撑下, 用橡皮筋使换能器粘附于标本上, 不可能产生引起这样强烈声发射的应力集中。作者认为临破坏前的这种声发射频率特性的变化可能是岩石破坏本身决定的。

3. 声发射率和加压状态的关系 实验结果表明: 加压过程中当应力大于 50% σ_f 后声发射率随应力增加而增加, 如图 3 所示; 在恒压过程中当应力处于 50%—90% σ_f 之间, 声发射率较缓慢下降, 当应力大于 90% σ_f 时, 恒压后声发射率先略有下降, 而后变为上升, 并可引起岩石破坏; 在降压过程中, 声发射率急剧下降。所以有可能利用追踪声发射率的状况来推测岩石所处的应力状态。

4. 岩石破裂前声发射率的变化特征 实验表明：不同岩石，不同加压方式下 $n(I)$, $n(H)$ 的变化是不同的，这反映了岩石本身所固有的特性，但在岩石接近破坏前却有一个明显的共同点，即应力在 95% σ_f 以后， $n(I)$, $n(H)$ 均以快于指数的形式急剧增长，这不但对 $n(I)$, $n(H)$ ，对 $n(L)$ 也如此。所以不同频道的声发射率同时以超指数形式急剧增加，可能是预报岩石破坏的有用指标。这意味着岩体内微小破裂在数量上急剧增加并由此引起它们之间的相互作用及相互连接，形成更大的裂隙以致最终导致岩石破坏。

感谢陈峰同志和赵鸿儒同志在实验过程中，在标本加工，压机操作，测试仪器等方面的帮助。

参 考 文 献

- [1] Scholz, C. H., Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1417—1432, 1968.
- [2] Mogi, K., Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena, *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, **40**, 125—173, 1962.
- [3] 陈颤，声发射技术在岩石力学研究中的应用，地球物理学报，**20**, 312—322, 1977.
- [4] Ohnaka, M. and K. Mogi, Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure, *J. Geophys. Res.*, **87**, 3873—3884, 1982.
- [5] Sondergeld, C. H. and L. H. Estey, Acoustic emission study of microfracturing during the cycle loading of Westerly granite, *J. Geophys. Res.*, **86**, 2915—2924, 1981.
- [6] Ohnaka, M. and K. Mogi, Frequency dependence of acoustic emission activity in rocks under incremental uniaxial compression, *Bull. earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, **55**, 67—89, 1981.

THE ACOUSTIC EMISSION AND ITS FREQUENCY CHARACTERISTICS IN ROCKS UNDER DIFFERENT TYPES OF UNIAXIAL COMPRESSION

ZANG SHAOXIAN AND FUAN JIANLI

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

The acoustic emission in granite and limestone samples during different types of uniaxial compression were simultaneously monitored through two different frequency windows. the variation of the rate of acoustic emission and the frequency characteristics of acoustic emission throughout the whole process from application of loading to the failure of the rock sample were studied. When the applied stress was less than 90% of the strength of rock samples, the variations of the rate of acoustic emission and its characteristics were different for different rocks. There were also some differences between the variations of the rate of acoustic emission under different types of uniaxial compression. When the applied stress was higher than about 95% of the strength of rock samples, the rate of acoustic emission through different frequency windows all increased supraexponentially. But the rate of acoustic emission through the higher frequency window increased more rapidly than that through the lower frequency window immediately before and during failure of the rocks. These two features could be used to predict the burst of rocks.

The variation of the emission rate with time depended upon the path of the loading. Loading with constant rate of increase; keeping the loading constant or decreasing the loading for a period of time during the loading process all brought to different kinds of variation of the rate of acoustic emission respectively. So it might be possible that the stress state could be deduced from the variation of the emission rate.