

# 岩石破坏过程声发射特征参数的研究

陶纪南

(西安建筑科技大学 西安 710055)

张克利 郑晋峰

(胡家峪铜矿 垣曲 043704)

**提要** 提出岩石声发射特征参数的表达形式和岩石声发射特征参数随时间的表述规律。岩石声发射特征参数应根据声发射脉冲和按频率展开的振幅谱都不连续的特点定义事件频度和声发射能率。

**关键词** 岩石, 破坏, 声发射

## 1 引言

岩石在荷载作用下会产生声、光、电磁和变形等物理效应,随着荷载的增大直至破坏,这些效应各具其特有的规律,利用这些特有的规律可评价其所处的状态并预测失稳时间。

早在1930年,欧美等国家已经注意到利用岩石声发射对矿山、隧道、边坡等进行监测,并为此生产了一些声发射接收仪,以后这个领域的发展十分迅速。80年代,我国也研制了类似仪器,主要用于矿山采空区监测。近年,也有人试图将其用于临震前的地震预测。本文仅就岩石破坏过程声发射特征参数的形式以及这些参数随时间的表述规律进行研究。这些问题是岩石失稳破坏预测预报和仪器设计的基础,似乎更显得重要。

## 2 岩石破坏过程声发射特征参数的曲线

### 2.1 岩石试件受弯破坏声发射参数曲线

图1所示为花岗岩试件受弯破坏的声发射率 $f$ 和声发射事件累计数 $N$ 的历时曲线。从声发射率 $f$ 的历时曲线可以看出,岩石在破坏前其声发射有一段相对平静的过程,这一普遍规律是监测预报必须谨慎对待的问题。

### 2.2 现场岩体失稳破坏声发射特征参数曲线

图2为某磷矿实际监测的声发射率 $f$ 和声发射累计数 $N$ 的历时曲线,由图可见,它同样有相对平静的问题。对应 $f-t$ 曲线相对平静段, $N-t$ 曲线为凸型;过了相对平静段, $N-t$ 曲线由凸型转凹型。无论是凸型或凹型,曲线都具有明显的指数函数形式,这一特征是用灰色预测岩体失稳破坏的数学基础。

1996年3月29日收到初稿,1996年9月24日收到修改稿。

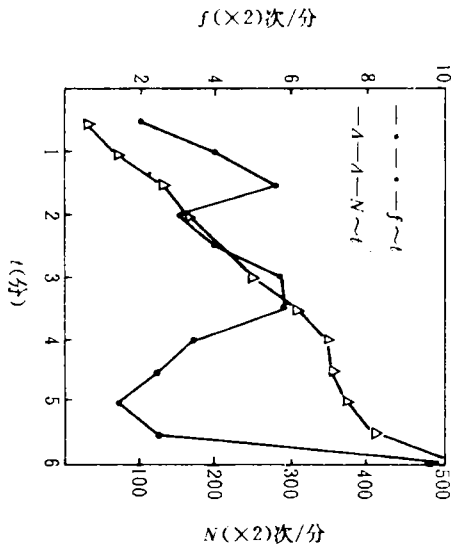


图 1 花岗岩受弯破坏声发射  $f-t$  和  $N-t$  曲线  
Fig. 1  $f-t$  and  $N-t$  curves of AE for granite

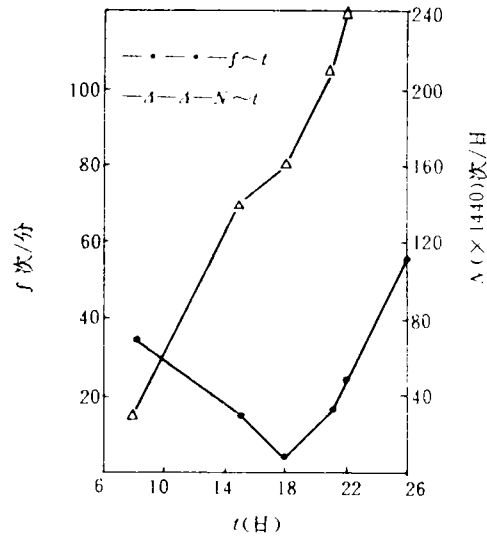


图 2 某磷矿实测  $f-t$  和  $N-t$  曲线  
Fig. 2  $f-t$  and  $N-t$  curves obtained in a phosphatic mine

### 3 声发射信号的表征参数

声发射过程不是连绵不断而是离散的，而且每一次声发射包含的频段也很宽，从零点几赫兹到上兆 Hz。如果将单个声发射信号用傅里叶变换展开，得到单个声发射事件的振幅谱。图 3 为大理岩某个声发射事件振幅谱<sup>[1]</sup>，可以看出，频谱为分立的尖峰，尖峰出现在某些频率附近，而其它频率处频谱分量处于零，表明振幅也是离散的。对于这种离散的声发射信号，表征参数应充分体现这一特征。为阐述方便下面分两个问题讨论。

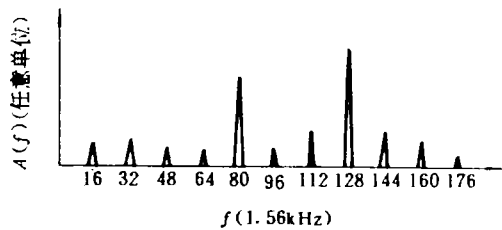


图 3 大理岩声发射振幅谱

Fig. 3 AE amplitude spectrum of marble

#### 3.1 事件数和事件频度

根据阈值电压选择方法的不同，事件数的确定有两种方法；

(1) 以第一个监测周期各次声发射的最大幅值  $A_{max}(f_i)$  的平均值为阈值，即

$$\bar{A}_{max} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l A_{max}(f_i) \quad l = \frac{\Delta T}{\Delta}$$

式中  $\Delta T$  为第一监测周期采样时间， $\Delta$  为

采样间隔。凡各分列频谱峰值达到  $\frac{1}{m} \bar{A}_{max}$  即为一个事件 ( $m$  取 2 或 3)，达到  $\bar{A}_{max}$  者为一个大事件。

(2) 以某一电压值为阈值。目前很多声发射接收仪以 0.5 伏为阈值，凡各分立频谱幅值达到 0.5 伏者为一个事件，达到 1.5 伏者为一个大事件。

而单位时间的事件数和大事件数称为事件频度  $n$  和大事件频度  $n_0$ ，设某个采样间隔  $\Delta t$  的事件数为  $P_i$ ，大事件数为  $\tau_i$ ，时间取分钟为单位，则有：

$$n = \frac{60}{\Delta T} \sum_{i=1}^l P_i, \quad l = \frac{\Delta T}{\Delta}$$

$$n_0 = \frac{60}{\Delta T} \sum_{i=1}^l \tau_i$$

上述第一个方法反映了计数对象的声发射特征，但计算工作量较大，且只有数字智能化仪器才能实现；第二个方法只受增益大小的影响，由人为主定。

### 3.2 单个声发射信号的能量 ( $I_E$ ) 和单位时间声发射的能率 ( $E$ )

单个声发射信号的能量  $I_E$  应包含所分析的频率范围内辐射的各种频率成分的能量之和，即

$$I_E = \frac{\Delta}{R} \sum_{s=1}^m A^2(s)$$

式中  $m$  为采样点数， $R$  为输入阻抗， $A$  为幅值，故每分钟的能率为

$$E = \left(\frac{60}{\Delta T}\right) \sum_{j=1}^{\Delta T/\Delta} I_E(s) = \left(\frac{60\Delta}{R\Delta T}\right) \sum_{j=1}^{\Delta T/\Delta} A^2(s)$$

而声发射模拟信号的能量定义为： $\tilde{E} = \frac{1}{R} \int_0^\infty A^2(t)dt$ 。因此，模拟信号能量为沿波形的包络积分，因而混入了间断处的虚假值。这正是声发射模拟信号用能率预测比用事件预测效果差的原因。

## 4 岩石声发射特征参数的分布

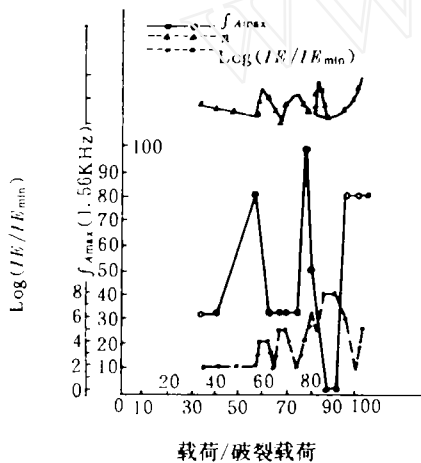


图4 辉长岩声发射振幅谱统计结果  
Fig. 4 AE amplitude spectrum of gabbro

图4为辉长岩在单轴压缩下声发射振幅谱统计结果<sup>[1]</sup>。可以看出，声发射主频  $f_{Amax}$  (振幅最大的频率定义为主频)随荷载增加出现波动变化，并且这种波动具有随机的性质。试验表明，多数岩石在临近破坏时主频有向低频方向移动的趋势。岩石声发射的主频在一个很大的范围内分布，北京大学刘兴平的试验结果认为与岩石种类没有明显关系，而和试件尺寸有关。多数作者的试验结果表明，随着试件增大主频降低<sup>[2]</sup>。既然主频随压力增加呈随机分布，因此可以求出它们的平均值和偏差。根据对大理岩和辉长岩的统计分析，一半以上声发射能量集中在  $72 \pm 32\text{Hz}$  频

率范围内，因此建议测量仪器的工作频率上限为  $100\text{Hz}$ 。考虑尺寸效应，欧美各国厂商把岩石声发射接收仪的频率窗口上限定在  $50\text{KHz}$  也许是适当的。而现场作业的背景噪声根据文献<sup>[3]</sup>的监测表明，大体在  $1\text{KHz}$  以下，其中  $200、300、400、700\text{Hz}$  为4个高峰，因此

有望将测量仪器频率窗口的下限定在 1KHz。以上所说均为仪器的工作频率范围, 对于传感器还要考虑其共振效应, 它的固有频率在 250—500KHz 以上。

岩石单个声发射信号释放的能量  $I_k$  随荷载增加亦呈随机分布(参见图 4), 且临近破坏时事件数(振幅谱的尖峰个数)存在一极大值, 也说明岩石接近宏观破坏时声发射包含丰富的频谱成分。但主频的上限不会太高, 文献[4]的试验结果表明, 岩石临近破坏时的电磁辐射频率范围约在 50K—1MHz。因此超过 50KHz 以上部分, 能量将主要以电磁辐射形式释放。这也从另一个侧面说明, 把仪器频率窗口定在 50KHz 以下, 可能是适当的。由于岩石声发射的现场系统测试的数据与谱分析都很少, 这个问题还有待进一步研究。

## 5 结语

(1) 岩石声发射信号的事件频度历时累计曲线和岩石对应的位移历时曲线具有几何相似性, 它们都具有指数函数规律, 这一规律是采用灰色理论预测的数学基础。

(2) 岩石临近破坏前声发射的相对平静具有普遍规律, 有些岩石还会出现多次。它是岩石逐次破坏、能量逐次释放过程中暂时平衡的反映。声发射相对平静的现象给预测带来一些麻烦, 要求预测工作者寻求对策。

(3) 岩石声发射信号占能量一半以上的主频在 100KHz 以内, 考虑尺寸效应, 国外学者将岩体声发射主频定在 50KHz 以内, 这有待现场大量监测数据的验证。

## 参 考 文 献

- 1 刘新年等: 单轴压缩条件下岩石样品声发射信号的频谱分析. 声学学报, 1986, (2): 17—24
- 2 席道瑛: 花岗岩破裂中的光脉冲和声发射特征. 见: 第三届岩石动力学会议论文集, 武汉测绘大学出版社, 1992
- 3 田时秀: 声发射监测在煤与瓦斯突出中的应用. 应用声学, 1993, (3): 21—27
- 4 郭自强: 岩石破裂电磁辐射的频率特征. 地球物理学报, 1995, (4): 57—65

## RESEARCH OF PARAMETER OF ACOUSTIC EMISSION UNDER ROCK FAILURE

Tao Jinan

Zhang Keli Zheng Jinfeng

(Xi'an University of Arch. & Tech., Xi'an 710055) (Hujiayu Mine of Copper, Yuanqu 043704)

**Abstract** The form of parameter of acoustic emission in rock and the law of parameter variation with time are described. The event frequency and the rate of energy of acoustic emission under rock failure are defined according to the fact that the pulse and vibrated pendulum of A. E. are not continuous.

**Key words** rock, failure, acoustic emission