

岩石破裂实验数据采集分析系统的研制

庄灿涛¹⁾ 徐 速¹⁾ 张伟学²⁾ 许昭永³⁾ 梅世蓉¹⁾

- 1) 中国北京 100036 国家地震局分析预报中心
2) 中国北京 100863 中国科学院计算机室
3) 中国昆明 650041 云南省地震局

摘 要

为了研究岩石加压过程的三维破裂图象和它的动力学性质,特研制了岩石破裂实验数据采集分析系统.它用了8通道实时记录加压岩样从出现微破裂直至最后主破裂过程中所激发的完整波形,这些数据以数字形式存储在IBM个人计算机(或286、386型个人计算机)的硬盘中,也可以用软盘保存.每一道采样率高达10MHz.

该系统对加压岩样中每一声发射事件用8个通道采集数据,并通过对均匀各向异性岩样中声发射事件走时的数学建模,将位置的三个分量和速度的三个分量作为未知量,建立方程组作联合反演,以对声发射事件作三维定位和动态速度求解,从而为全面地研究岩石破裂动态过程打下基础.

关键词 声发射;三维定位;数据采集

一、引 言

地震的孕育和发生是复杂的力学过程.多年来,地震学家一直在寻求各种方式,以期了解这一过程.在实验室中考察加载岩石样品从开始出现微破裂到最终发生主破裂的全过程是模拟研究地震孕育发生过程的一条有效途径.因此,真实地记录加载岩样的微破裂事件的波形,准确地定出微破裂的空间位置,则是深入进行研究的先决条件.早期Scholz^[1]和Mogi^[2]采用模拟磁带机和对示波器照相的方法记录事件,Sondergeld^[3]用双线记忆示波器记录事件.这些方法受到当时的技术条件限制,一次试验能记录到事件的个数很少.楠濂勤一郎等^[4]用多台瞬态波存仪记录事件,因为存储量有限(1K字)只能记录一个事件的前半段波形,每两个记录事件之间的等待时间(以下称为“死时间”)长达几十秒.出原理等^[5]用固态存储器暂存波形后,再转到模拟磁带上记录的方法,此方法也只存1K字数据,“死时间”下降到1—2s左右,尽管这时间已比较短,但对于主破裂前,大量微震破裂密集发生的状况仍会有部分事件无法记录到,另外定期更换磁带时占用的等待时间就更长,有可能漏记不少事件.

我们研制了本系统,采用固态存储器缓存,然后直接用微计算机的硬盘记录事件波形

的方法, 整个数据采集过程由缓存和硬盘直接交换, 并自动完成, 微计算机可以是 IBM-PC/XT, AT 和它的兼容机, 采用 286 型微机和 100MB 硬盘后, 使“死时间”下降到平均 40ms 以内, 每道使用的缓存大小可设定, 一般取 4K 字, 最大达 8K 字, 这就可以记录完整的事件波形. 取 4K 字缓存时可记录事件的容量多达 3000 个以上. 数据处理的事件定位采用人机联合方法. 在加压过程中速度是随时在变化的量, 并因各方向加压不同速度值是各向异性的. 所以在定位时速度的三个分量均为未知量, 与待求的微破裂震源位置的三个分量一起, 建立联合方程求解.

本系统 1987 年 9 月研制成功以后, 在云南省地震局和北京大学地球物理实验室使用两年多, 并于 1990 年 1 月通过国家地震局组织的鉴定.

二、岩石微破裂数据采集分析系统的基本原理

本系统的基本结构如图 1 所示, 它主要由信号放大(低噪声放大、衰减、带通滤波、主放大)、模拟数字转换、系统控制和缓存、8 通道触发器、电源、微计算机等部分组成. 系统共有 8 道信号采集, 采样率从 10MHz 到 70KHz 八档可变, 增益由 0—60 分贝以 10 分贝步进可变. 系统有自动触发功能和连续记录功能. 从压电探头产生的信号经信号放大部件后, 又经过高速模数转换器变成数字量, 数字数据在系统逻辑控制下, 存在缓冲存储器里. 若工作在待触发方式, 缓冲存储器的数据处在循环更替状态, 8 道触发器不断地作发现事件处理, 当符合事件存在的触发条件时, 由系统控制单元产生直接存储信号, 把已触发数据存入硬磁盘. 为了防止触发器事件数据的前几个波形数据丢失, 存储器里保留了触发信号之前的一部分数据. 若工作在连续触发方式, 则一旦缓冲存储器的数据存满, 就在系统控制单元作用下, 把缓冲存储器数据存入硬磁盘. 带通滤波器既作带外噪声抑制, 又作去假滤波用. 滤波器频带为 10—800KHz. 字长 8 位, 波形存储为 2—8 千字节分档可变. 系统研制时采用 IBM-PC/XT, 硬磁盘为 10MB, 当微计算机技术发展后采用 286 型微计算机和 100MB 硬磁盘. “死时间”主要是磁盘的数据存放时间.

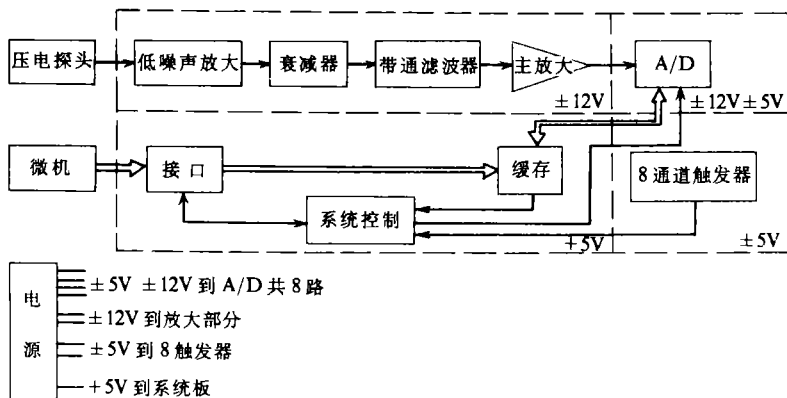


图 1 岩石微破裂数据采集分析系统的原理框图

为了保证整个硬件系统运行, 编制了三个专用程序和一个定位程序. 三个专用程序分别是采集控制程序, 波形人机处理程序和绘图打印程序.

采集控制程序主要完成系统的数据采集和记录,它把数据存在缓存中,并保证在连续采集和触发采集两种不同状态下,采集系统能正常工作.触发方式时,能将每一事件的数据作成文件,自动转存到硬磁盘中;连续记录方式时,能将缓存中的全部数据自动作成文件,存硬磁盘.

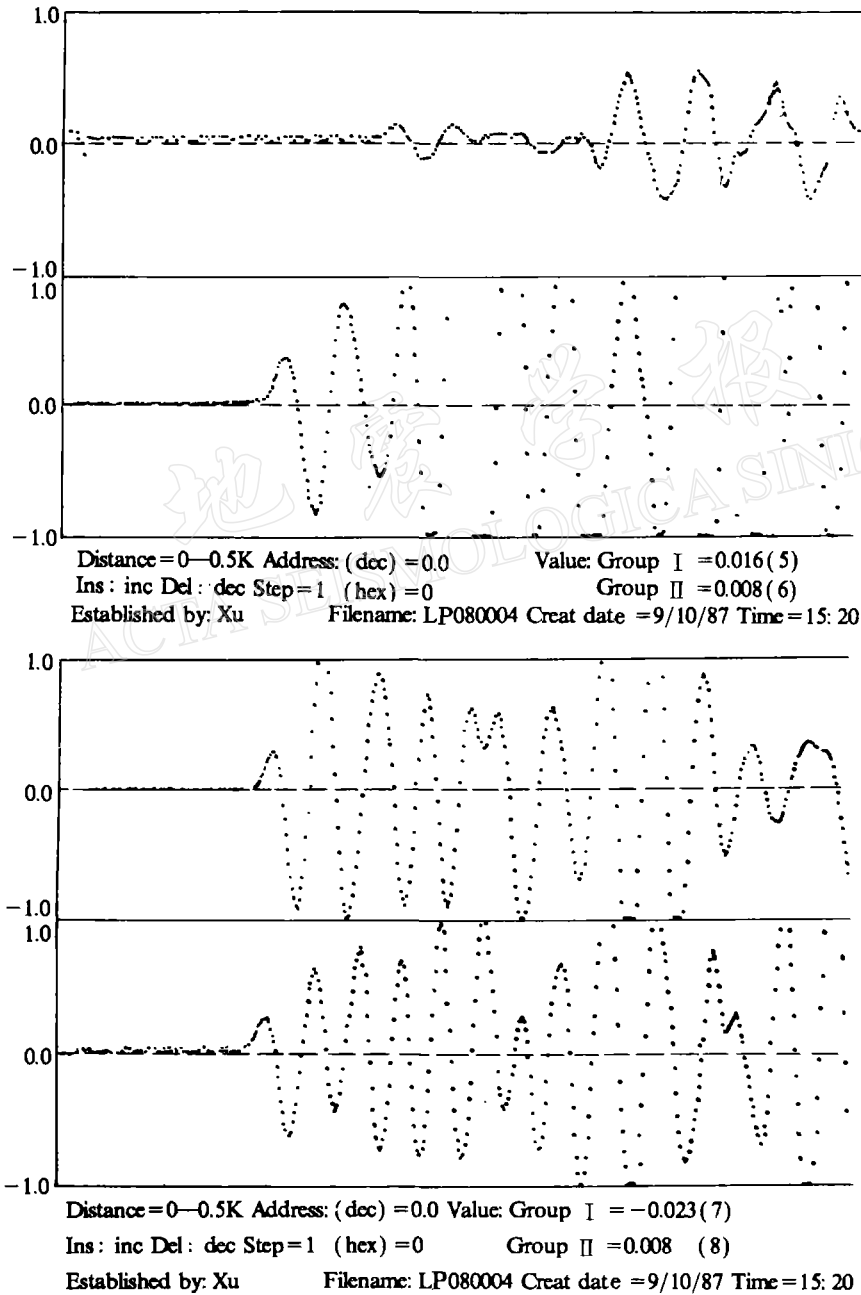


图2 计算机显示器显示的事件波形

波形人机处理程序主要完成对采集事件数据的显示和人机结合读取事件的初至波到时,通过回放数据文件,能从 8 道记录中任选两道显示,选择不同的步长还可对波形展宽或压缩,并通过光标读取初至波到时,在显示波形同时还标出了与波形有关的各类参数.微计算机上显示的整幅图形能用打印机作全屏幕复制.图 2 是打印机复制显示器显示的事件波形例子.

绘图打印程序能利用 132 行 24 点阵打印机同时打印 8 道波形,它可清楚反映出各探头在记录同一事件的相对走时差和各道波形的完整形状.本程序也可以从 8 道中任意选择所要的道数绘制波形图.

三、事件定位

岩石实验微破裂事件的定位与天然地震事件的定位不同.在实验过程中岩石内各点的波速随着岩石加压而发生变化,而且由于各个方向上加压不同波速是各向异性的.对于均匀的岩样,考虑主破裂之前的微破裂.假定岩体为均匀的各向异性体.波形的速度也可以认为是各点均匀的,但每一点不同方向上的值不同.图 3 表示了各向异性体的示意图,令 i 为破裂点, j 为放置探头的接收点,设沿直角坐标的速度分别为 v_1^i, v_2^i, v_3^i , 则沿 i, j 连线方向的速度为 v_{ij} . 将 x, y 子轴取成与加压方向一致,则可以认为速度最大的方向与最大加压方向一致.这时 v_{ij} 满足下式

$$\frac{v_{ij}^2 \cos^2 \alpha_{ij}}{(v_1^i)^2} + \frac{v_{ij}^2 \cos^2 \beta_{ij}}{(v_2^i)^2} + \frac{v_{ij}^2 \cos^2 \gamma_{ij}}{(v_3^i)^2} = 1 \quad (1)$$

式中, $(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij})$ 为 ij 连线的方向与三个坐标轴的夹角, 并且有

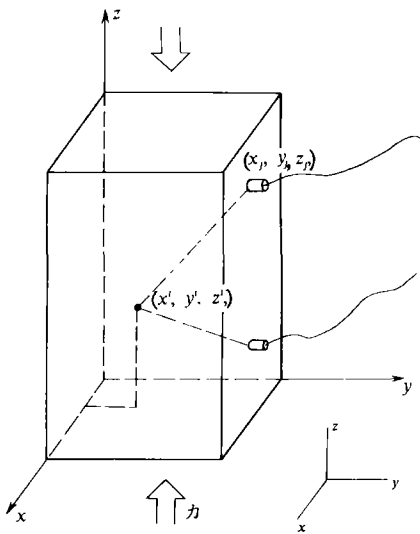


图 3 各向异性体内事件定位示意图

$$\begin{cases} \cos \alpha_{ij} = \frac{x' - x_j}{l_{ij}}, \quad \cos \beta_{ij} = \frac{y' - y_j}{l_{ij}}, \\ \cos \gamma_{ij} = \frac{z' - z_j}{l_{ij}} \\ l_{ij} = [(x' - x_j)^2 + (y' - y_j)^2 + (z' - z_j)^2]^{1/2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, (x', y', z') 为第 i 个微破裂的坐标, (x_j, y_j, z_j) 为第 j 个接收器的坐标. 将(2)代入(1)并整理后可以得到第 i 个微破裂到第 j 个接收器之间走时

$$T_j^i = T_j^i(X^i, V^i) = \left[\frac{(x' - x_j)^2}{(v_1^i)^2} + \frac{(y' - y_j)^2}{(v_2^i)^2} + \frac{(z' - z_j)^2}{(v_3^i)^2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

上式中, $X^i = (x', y', z')$, $V^i = (v_1^i, v_2^i, v_3^i)$.

取实际走时为 t_j^i . 并令第 j 个接收点的可靠性权为 W_j , 可建立目标函数

$$Q^i = \sum_{j=1}^8 W_j [t_j^i - T_j^i(X^i, V^i)]^2 \quad (4)$$

求解结果 $(X^i)^*$, $(V^i)^*$ 应是使目标函数达到最小的值, 即

$$Q^i [(X^i)^*, (V^i)^*] = \min\{Q(X^i, V^i) | X^i \in [0, X_h], V^i \in [V_1, V_2]\} \quad (5)$$

式中 V_1, V_2 是速度矢量的可能范围, X_h 是岩石的三维大小. (5) 式可以有多种求解方法, 这里采用最小阻尼二乘法. 初值 $(X^i)^0$ 用到达最快接收点的位置. $(V^i)^0$ 用对岩石初测到的速度值.

四、实验与计算定位结果

实验在北京大学地球地理系实验室的大隆机器厂造的压机上进行. 采用京郊的花岗岩为样品. 尺度为 $80 \times 80 \times 160 \text{mm}^3$. 表 1 是记录到事件个数与加载压的对应关系. 触发阈值取得稍高, 加到 93t 以上开始有触发. 如触发阈值选得略低, 可能会有触发, 但波形较小, 尤其是初至波难以辨认. 图 4 是系统采集到一个事件的 8 道记录波形. 纵坐标刻度已归一, 水平轴每隔 100 个采样点标一次数值. v_1, v_2, v_3 的初值定为 0.36 km/s. 位置初值取走时最小接收器的位置. 用阻尼最小二乘法, 一般经 6—10 次迭代, 就使目标函数达最小. 图 5 是破裂前 400 个事件的位置图.

表 1 加压压力与触发事件个数

加压值(t)	<93	93—100	100—104	104—107	107—109	109—110	110—112	112—全破	合计
触发事件个数	无	15	91	96	138	155	257	296	1048

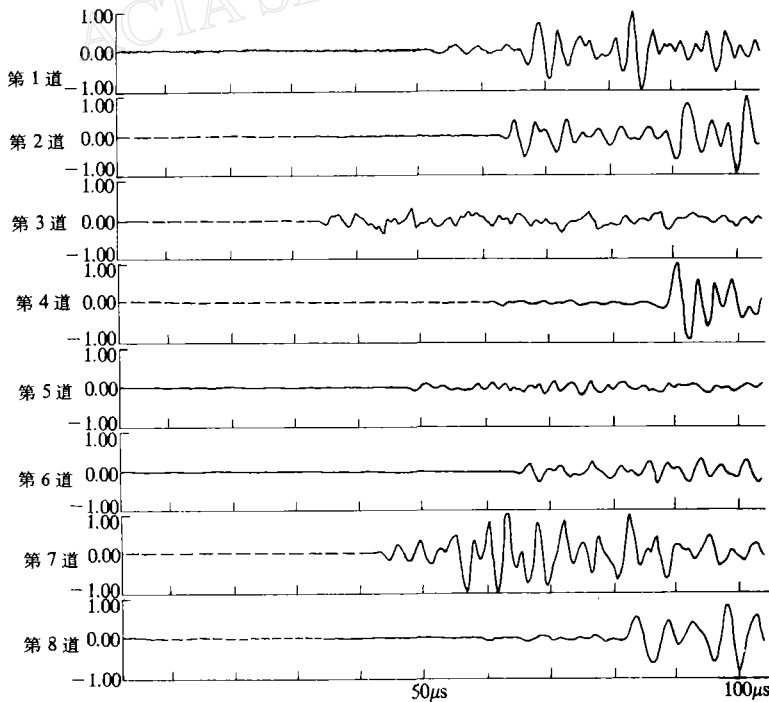


图 4 一个事件的八道记录波形

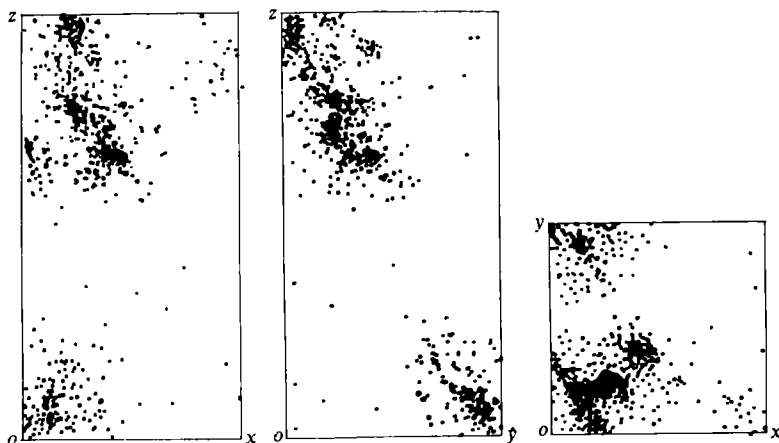


图 5 破裂前400个事件的位置图

五、讨 论

本系统是为岩石声发射实验研制的设备,它有如下主要特点:

1. 对于触发的事件,不是记录事件的前部波形,而是记录全部波形.
2. 快速缓存和直接存磁盘的数据记录方式使每次事件触发以后的数据存储时间(即死时间)减少到几十毫秒.
3. 采用每个事件以数据文件方式存磁盘,并用波形显示人机结合方式处理事件定位,提高了可靠性,缩短了处理时间.
4. 事件定位采用各向异性的速度模型,将三个速度分量作为未知量与三个位置未知量一起作联合反演,并对每一事件分别求解.与各向同性的速度模型相比有更高的精度.此外,也避免了在实验过程中要每次测量岩样速度值,而中断试验的困难.

通过使用还发现如下问题:

- (1) 由上述研究可知,在定位时共有 6 个未知量的 8 个方程.未知量的个数与方程数接近,对求解的精度有一定的影响,特别是实验过程中,常会有个别接收器脱落而记不到波形,更会影响求解.所以应增加记录道数,以得到更满意的解.
- (2) 在定位中,尽管由于采用速度为各向异性,使它比各向同性的模型更实际,但是仍然假定了速度均匀,这一点与实际还有偏差,特别当破裂比较多的主破裂前夕,“均匀”的假设会明显地影响定位精度.

本项工作得到地震科学联合基金会资助.

参考文献

- [1] Sholz, C. H., 1968. Experimental study of the fracturing process in brittle rock. *J. Geophys. Res.*, **73**, 4, 1447—1454.
- [2] Mogi, K., 1968. Source locations of elastic shocks in the fracturing process in rocks (1). *Bull. Earthq. Res.*

Inst., **46**, 1103—1125.

- [3] Sondergeld, C. H. and Estey, L. H., 1981. Acoustic emission study of microfracturing during the cyclic loading of westerly granite. *J. Geophys. Res.*, **86**, 2915—2924.
- [4] 楠瀬勤一郎、西沢修、小内薫, 1982. 一轴压缩下の岩石中に观测AE空域. 地震, **35**, 91—102.
- [5] 出原理、佐藤隆司、西沢修、楠瀬勤一郎, 1986. 三轴压缩应力下で発生するAEの震源分布と发震机构. 地震, **39**, 289—300.

RECORDING OF WAVEFORMS AND LOCALIZATION OF ACOUSTIC EMISSION EVENTS PRODUCED IN ROCK SAMPLES

Cantao Zhuang¹⁾, Su Xu¹⁾, Weixue Zhang²⁾, Zhaoyong Xu³⁾ and Shirong Mei¹⁾

1) Center for Analysis and Prediction, State Seismological Bureau

2) Computer Department, Academia Sinica

3) Seismological Bureau of Yunnan Province

Abstract

We have made the data collection and analysis system for recording microcracks in rock to study the three dimensional pattern of fracture and the dynamic properties of rock during pressurization. This system, with 8 channel data detection, records in real-time, from the initial microcracks to the final vibration waveform excited by the master fracture. The detected data are recorded by digit at the hard disk of an IBM personal computer (or 286, 386 personal computer) as well as transmitted to the disk. The sampling rate for each channel is 10 MHz.

Collecting every acoustic emission events in the loaded rock sample with 8 channels by this system, mathematically modelling the AE event travel time, and taking the coordinates of the AE event hypocenter and the three components of P wave velocity as unknown parameters, we set up a set of residual equations for joint inversion, so that the three dimensional localization of AE event hypocenters can be completed under variable velocities, which will lay foundations for the research on rock fracture clearly.