

# 泥岩的声学特性与其力学特性的相关关系 \*

孙永联 周楚良 陆士良

(中国矿业大学采矿系 徐州 221008)

1992年2月10日收到

本文建立并完善了岩石全应力应变过程声学特性的实验装置和测量系统，进行了泥岩试件的全应力应变过程声学特性的实验研究，初步得到了振幅谱参数随应力应变的变化规律。实验结果表明，泥岩声学特性的变化是其内部结构变化的综合反映。本文介绍的实验研究方法是研究岩石声学特性的一条可行的新途径。

## 一、前言

随着数字信号处理技术及微处理机的广泛应用，岩石声波技术得到了很快的发展和提高。它通过检测声波信号在岩石内传播过程中参数的变化，来间接了解岩石介质的力学特性及其结构特征。其优点是：用微机采样可避免人工读数误差；对全波列进行分析处理可充分利用声波信息；对某一力学特征或过程可用多指标声学参数进行分析，进而提高判别的准确性和可靠度。

近年来，国内中科院岩土所<sup>[1]</sup>，国外 Toksoz<sup>[2]</sup>较多地开展了岩石声波特性的实验研究工作。但就目前的发展状况来看，岩石声波技术的研究和应用还很有限。这突出表现在以下两方面。

1. 缺乏对携有大量信息的全波列波形参数的综合研究；

2. 缺乏对岩石全应力应变过程声学特性的系统研究。

要改变这种局面，使岩石声波技术更好地应用于岩体工程，解决实际问题，就得从以上两方面进行探讨，这正是本文研究的出发点。

## 二、实验原理

对实测的一组时域信号采样，经快速富氏

变换(FFT)转换成频域信号，再对时域、频域信号进行分析，试图用振幅谱参数来反映岩石介质的结构特征及应力状态。图1为在干燥泥岩试件纵向实测所得的时域波形及其频谱图的例。

频谱分析的原理<sup>[3]</sup>和方法为：将一时域脉冲波形  $s(t)$  分解成若干不同频率、不同振幅和不同相位的正弦波的叠加。由采样定理知，若采样间隔  $\Delta \leq 1/(2f_{\max})$  ( $f_{\max}$  为最高频率)，则被分解的正弦波序列  $s_0, s_1, \dots, s_{n-1}, s_n$  可完全取代  $s(t)$ 。据离散傅利叶变换，有

$$s(m, d) = \Delta \sum_{n=0}^N s(n) e^{-2\pi j m n / N}$$

式中  $m$ ——采样点数， $m = 0, 1, \dots, N - 1$ ，  
 $\Delta, d$ ——分别为时域、频域采样间隔， $s(m, d)$ ——频域第  $m$  点的谱值， $s(n)$ ——时域第  $n$  点的振幅值， $N$ ——采样点数。

频谱分析是由编程在微机中实现的。

实验中所用的声学参数主要是振幅谱参数，是以下四参数的总称：时域振幅  $A_t$  (时域波形的最大振幅)，时域平均振幅  $A_{t_p}$  (所有采样点处时域振幅的加权平均值)，频域振幅  $A_f$  (频域信号的最大谱值) 和谱面积  $M_0$  (频域信号的包络线与横轴间所围面积)。我们认为，振幅谱参数比波速更能有效地反映介质的内部特

\* 本研究项目得到中国统配煤矿总公司出国留学人员基金的资助

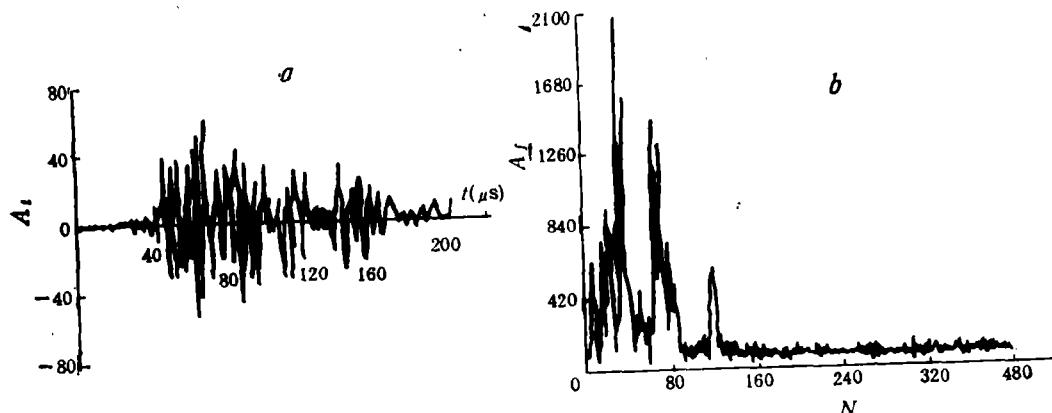


图 1 声波波形图及其频谱图

a. 波形图; b. 频谱图

性,因而被列作主要的声学指标而加以研究和应用。

### 三、实验系统及方法

本研究主要进行了泥岩试件在单轴应力作用下全应力应变过程的声学特性的测试实验工作。实验设备可分为三大系统,参见图 2。图中各数字表示:1、2——上、下加压板,3——垫板,4、6——发射换能器,5、7——接收换能

器,8——压力传感器,9——球形垫板,10——可调垫板,11——胶木板,12、13——横向、纵向位移计,14——动态应变仪,15——函数记录仪,16——SD 声波检测仪,17——KC-85 计算机,18——磁带记录仪,19——四色打印机,20——试件,21——刚性组件。这三大系统是:

1. 加载系统,包括压力试验机及三根实心钢柱组成的刚性组件。引入刚性组件,可提高试验机的整体刚度,使其满足全应力应变的实验要求。

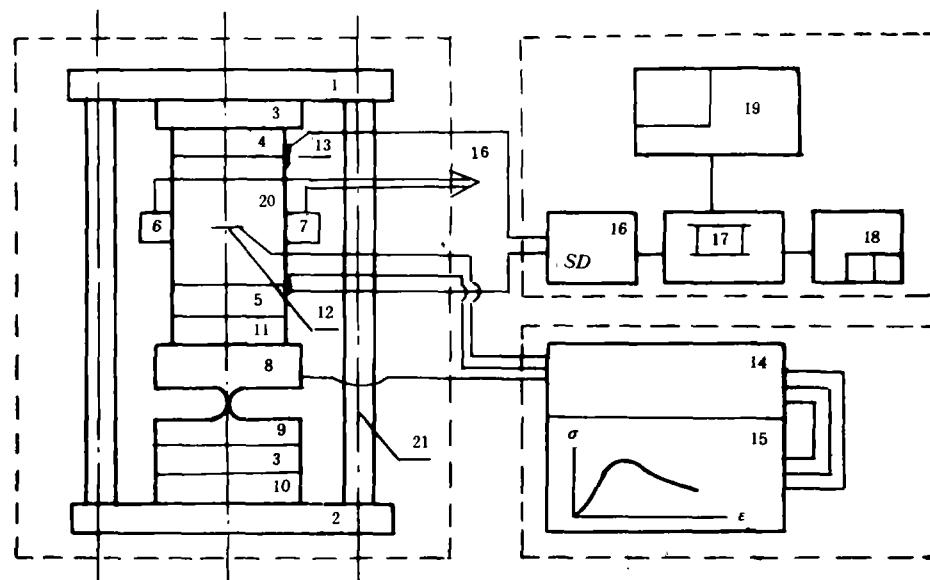


图 2 全应力应变过程声波测试实验系统图

**2. 应力应变测量系统**,由压力传感器和位移计组成。该系统可使信号通过动态应变仪放大后输出到函数记录仪,以记录纵向载荷与纵向位移及横向位移间的关系。

**3. 声波采集系统**,由超声探头、声波检测仪、微机、磁带记录仪及打印机组成。波谱分析是在微机中用软件来实现的。实验中所用纵向探头频率为500kHz,横向探头频率为378kHz。

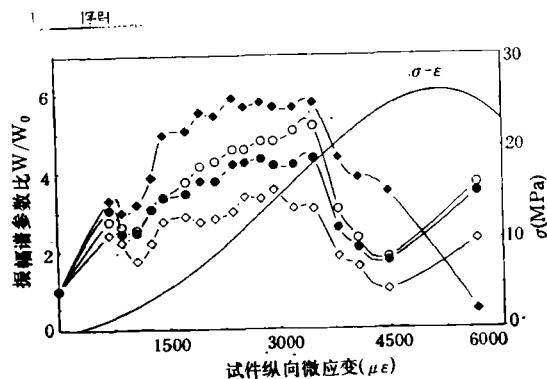


图3 泥岩试件1纵向声学特性与其力学特性的相关关系

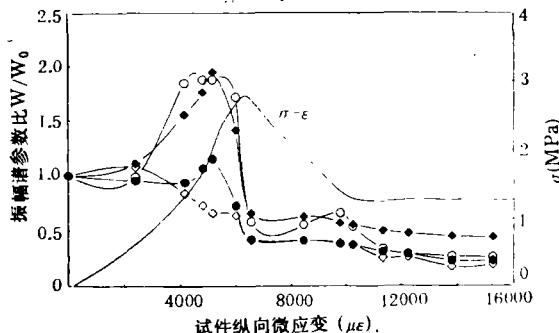


图4 泥岩试件2纵向声学特性与其力学特性的相关关系

#### 四、实验结果与分析

实验室进行了多块泥岩试件的声学特性实验,这里取其中的二块来加以分析说明。泥岩试件的尺寸为 $\phi 70\text{mm} \times 140\text{mm}$ ,均取自煤矿下围岩。

实验结果见图3及图4。图中横轴为试件的纵向压应变值,纵轴( $w/w_0$ )表示某一应变状态时的振幅谱参数与其在零应变状态时的比

值。其中,曲线○—○表示 $A_t/A_{t0}$ ,曲线·—·为 $A_{tp}/A_{tp0}$ ,曲线◊—◊为 $A_f/A_{f0}$ ,曲线◆—◆为 $M_s/M_{s0}$ 。纵轴采用比值的方式可消除测量的系统误差,同时使得测量所得的各振幅谱参数可比。泥岩试件1和2分别处于自然干燥状态及饱水状态。

经数据分析与处理,同时参见实验结果图可得如下关系和初步解释<sup>[4]</sup>:

**1.** 在纵向单轴加压的情况下,纵向振幅谱参数的变化较横向的要有规律,这在以剪切破坏形式为主呈塑性断裂的泥岩中表现得尤为显著。

**2.** 在应力峰值前区,纵向振幅谱参数经历了缓慢增长、快速递增、直至衰减的变化过程。若以 $\epsilon_p$ 表示应力峰值处的纵向压应变,则由图可以看出,当试件的纵向压应变 $\epsilon$ 在 $0-0.4\epsilon_p$ 范围时,纵向振幅谱参数处于缓慢增长阶段。这时试件所受的压应力主要使试件内部的微裂隙闭合。当 $\epsilon$ 等于 $0.4-0.9\epsilon_p$ 时,各振幅谱参数均有显著的增长。这一阶段,外加应力的主要作用就是压实、压实试件,使试件中新闭合的裂隙数目远大于其新张开的数目,从而使声能损耗减小。其后,外加应力的作用使得试件内新生裂隙及新张开裂隙的数目开始大于试件内新闭合裂隙的数目,从而使声能损耗增加,振幅谱参数开始递减。

**3.** 在应力峰值后区,振幅谱参数递减很快,直至应变软化出现之前( $\epsilon$ 约为 $1.2\epsilon_p$ ),这时振幅谱参数开始接近某一较低值。其后,其变化趋于平缓,直至试件的完全破裂。

**4.** 振幅谱参数由递增到递减的变化过程表明试件由弹性状态进入了塑性状态。

**5.** 振幅谱参数的峰值往往出现在应力峰值之前,这说明试件在达到应力强度极限之前已有大量新裂隙的产生与扩展。其后振幅谱参数的衰减过程反映了试件裂隙的扩展、贯通、直至试件破坏的全过程。

**6.** 在泥岩试件受压变化过程中,各振幅谱参数的变化幅度和变化趋势大体上比较接近,其中以时域振幅( $A_t$ )和谱面积( $M_s$ )更能

较好地反映泥岩介质内部结构的变化过程。

7. 对全波列波形图的研究表明,试件在全应力应变过程中的波形图也在发生变化。试件在不同力学阶段波形的变化,是由于试件在受力作用后,宏观上或压密强化,或松弛破坏;微观上或旧裂隙的闭合与张开、或新裂隙的产生、贯通与扩展,最终致使首波到达时间延迟,振幅衰减,能量损耗,散射波成分增加等,进而引起各振幅谱参数的变化。

由此可见,岩石的结构特征和力学状态的改变与各振幅谱参数的变化有其内在的相关性,这为现场声测数据的分析、处理与利用奠定了理论基础和依据。

## 五、结 论

泥岩试件单轴受压全应力应变过程声学特性的实验研究表明:泥岩声学参数的改变与其试件中原有裂隙的压密、新裂隙的产生、贯通与扩展,以及试件的破坏过程有着密切的关系,由此可用泥岩声学参数的变化来推断其内部的损伤状况。现归纳如下:

1. 充分利用岩石内传播的声波信息,借助振幅谱参数来推断岩石的内部结构特征及所处的力学状态是一种有效的新方法,它为岩石损

伤状况及岩石声学特性的研究开辟了一条可行的新途径。

2. 泥岩振幅谱参数的变化,集中反映了泥岩内部裂隙的闭合、张开、产生、贯通及扩展的微观变化过程。

3. 泥岩在受力作用过程中振幅谱参数的变化是泥岩在不同力学阶段声波传播特性的反映。试件由弹性状态进入塑性状态,振幅谱参数先递增后又呈现明显的衰减现象。因此,可用振幅谱参数由递增到递减的变化来判别岩石的弹性、屈服和破坏状态,以及岩体的破坏区、塑性区和原岩应力区。

4. 在各振幅谱参数中,时域振幅( $A_t$ )和谱面积( $M_0$ )的变化较为敏感,能较好地反映泥岩介质内部结构及力学状态的变化过程。

5. 岩石声波技术仍在发展和完善之中。声波信息的开发和利用,如不同力学阶段波形的变化规律、高次谐波的产生原因、以及尾波的识别与利用等都还有待进一步的研究。

## 参 考 文 献

- [1] 蔡忠理等,岩土工程学报, 11-3(1989), 60—69.
- [2] Toksoz M. N., et al., *Geophysics*, 44-4 (1979), 681—711.
- [3] 王正光等,数据采集与处理,国防工业出版社, 1983.
- [4] 孙永联,中国矿业大学学报, 21-2 (1992), 52—58.

## 压电复合材料换能器

压电复合材料是将压电陶瓷与聚合物材料按一定的连通方式、一定的体积百分比和一定的空间分布复合而成的。它可以提高材料的某些压电性能,并具有常用压电陶瓷材料所没有的某些优良性能。在过去的十几年中材料研究者们做了大量工作并取得实用性进展。

1—3型压电复合材料,由于其具有较高的厚度模机电耦合系数 $k_t$ (~0.6—0.7),较低的特性阻抗 $\rho C$ (~10M $\Omega$ ·s),较小的机械品质因素 $Q$ 值、厚度模单纯,易于做成高频、窄脉冲等特点,得到了广泛的研究与应用。

中国科学院声学研究所八室超声换能器课题组研制的1—3型压电复合材料,其性能不仅达到国外同类产品的先进水平,而且在消除横向结构共振模式方面以及在可以灵活设计以适应一些特殊需要方面优于国

外产品。已率先把压电复合材料用于制做横波换能器,研制出厚度切变模式单纯、灵敏度高、脉冲窄的横波换能器。

目前已用压电复合材料研制出下列几类换能器产品。

超声空气换能器(频率从200kHz—1200kHz),宽频带换能器(频率从300kHz—5MHz),点聚焦换能器与绳声束聚焦换能器,声波测井换能器,无损检测用直探头和斜探头,岩石测量用纵波换能器和横波换能器(频率从200kHz—3MHz),医学超声用换能器,以及首次波幅比大于1的测量用换能器和高斯型声场换能器等。还可以按要求研制供特殊用途的专用换能器。

(中科院声学所 耿学仓)