

岩石中孔隙流体含量对超声波衰减影响的实验研究

李造鼎 刘忠敏 位亚娜

(东北工学院)

1986年3月6日收到

目前,关于岩石中孔隙流体含量对超声波衰减影响的实验数据还很少.本文介绍的由瞬态波形存储器 and 微机控制系统组成的超声波信号采集与数字处理系统,适于实验室内测量超声衰减与流体含量的变化关系.作者以砂岩试件作了实验并取得一些有价值的数

据.实验研究结果,表明砂岩中横波衰减随饱和度增加而增加,纵波衰减随饱和度增加有一个明显的峰值出现.砂岩中声波衰减的品质因数 Q 值比声波速度 v 值反映岩石的物理力学性质更灵敏.从所得数据看,同一岩石的 Q 值随含水量变化量为速度变化量的五倍以上.

一、实验系统及方法

在自然状态下,岩石中孔隙及其流体含量对岩石的力学性质有很大影响. Marlin 等人认为“孔隙中水的表面化学作用,可使岩石中裂纹扩展所需的应力,比没有水时下降一半,对硅酸盐类可降到五分之一”.因之,测定出岩石中的孔隙及其流体含量,对研究岩石的力学性质,岩体工程勘探和评价岩体的稳定性均有重要的实际意义.

利用穿透岩石介质的声波所携带的信息,进行岩石物理力学性质的研究是一种有效的方法.一些学者^[2-8]在声频范围内,测定了部分饱和和岩石中声波的衰减,指出孔隙的流体含量与几何形状均对衰减有明显影响.

现有的声波衰减实验研究方法,是以测量品质因数 Q 值为主. Toksöz 等人^[8]利用频谱比法在超声范围内测量了干燥与饱水情况下声波衰减的 Q 值.他认为在 0.1—1.0MHz 范围内,声波的衰减系数 $\alpha = \gamma f$, γ 为常数, f 为声波频率,且 Q 值与频率无关.本文的实验工作也是依据这个假定进行的.

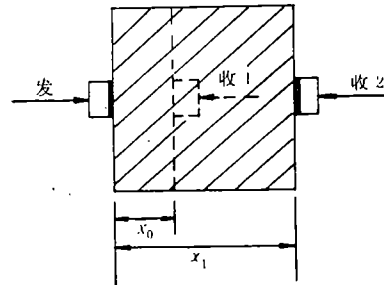


图1 岩石试件二次截断测量 Q 值示意

根据频谱比法原理^[8-9],结合我们实验室的条件,提出一个岩石试件二次截断求 Q 值的方法,如图1所示.

在长度为 x_1 的试件上,接收到的声波穿透信号的振幅谱为:

$$A_1(f, x_1) = G(x_1)A_r(f)e^{-\alpha x_1} \quad (1)$$

然后将试件在 x_0 处截断,在 x_0 处接收到的声波信号振幅谱:

$$A_0(f, x_0) = G(x_0)A_r(f)e^{-\alpha x_0} \quad (2)$$

这相当于在一个试件的不同传播距离上接收到同一信号源的两个穿透信号,类似频谱比法的推导,得

$$\ln \frac{A_0(f, x_0)}{A_1(f, x_1)} = (x_1 - x_0)\gamma f + \ln \frac{G_0(x_0)}{G_1(x_1)} \quad (3)$$

上式中的 x_1, x_0 可直接量出, $(x_1 - x_0)r$ 由实验所得直线的斜率求出, 则岩石的 Q 值经计算可得。

岩石试件在截断过程中含水量将发生变化, 含水量的改变对 Q 值的影响正是本文的研究内容, 必须加以考虑。为此采用真空加压饱和方法使岩石试件在截断前后的含水量近于不变。所以岩石试件二次截断法只有在完全干燥或饱和的两种情况下才能适用。在部分饱和和情况下很难准确的进行实验。对部分饱和情况我们采用下述办法。

设在长度为 x_1 的岩石试件上, 测出在不同饱和度时, 声波信号的振幅谱分别为。

$$A_1(f, x_1), A_2(f, x_1), \dots, A_i(f, x_1) \dots, A_n(f, x_1)$$

脚标 1 表示干燥状态, n 表示饱和状态, i 表示部分饱和和状态。

将岩石试件在 x_0 处截断并烘乾与真空加压后, 利用截断法求得干燥状态的 Q_1 值。因为

$$r = \frac{\pi}{Qv}, v \text{ 为波速, 经推导得:}$$

$$\ln \frac{A_1(f, x_1)}{A_i(f, x_1)} = x_1 \left(\frac{\pi}{Q_1 v_i} - \frac{\pi}{Q_1 \cdot v_1} \right) f + \ln \frac{G_1(x_1)}{G_i(x_1)} \quad (4)$$

式中, $i = 2, 3, \dots, n$ 。 v_i, v_1 为声波穿透速度可直接测量。干燥状态下的 Q_1 值可量取截断法实验直线的斜率求得。干燥状态下的 $A_1(f, x_1)$, 可由 Q 值已知的标准试件上测得。

$$\ln \frac{G_1(x_1)}{G_i(x_1)}$$

为声波非指数几何衰减因子之对数比, 可视为常数, 即频谱比实验所得直线的截距。

根据上述, 我们设计并组成一套岩石试件声波衰减的实验系统, 如图 2 所示。

本系统包括: 1. 超声波的发生, 接收与放大部分。2. 数字化采样部分。本部分是将瞬态波形存储器中的声波信号输出线和采样控制线直接联到微机的 PIO 接口, 并用汇编语言进行采样, 加快了采样速度。3. 信号的数字处理部分。本部分进行品质因数 Q 值等的计算并打印

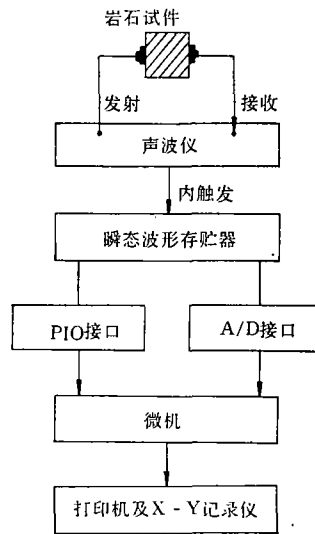


图 2 岩石试件声波衰减实验系统框图

结果。4. 测定岩石中最大含水量的真空饱水部分。整个系统能进行岩石试件声波穿透信号的实时处理。

本实验是采用红阳矿区与新滨地区的中、粗砂岩作成的试件, 其尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。此类砂岩具有明显的多孔特性。经计算所选试件的尺寸满足声学要求。所用的声波换能器是窄脉冲宽频带, 谐振的频率为 3 MHz , 直径 1.5 cm , 其指向性好, 接收的波形尾随脉冲少, 稳定且光滑。

计算 Q 值用的程序主要包括, 读取声波数据文件中的振幅谱值, 计算干燥与不同饱水情况下声波振幅谱的比值, 计算并绘制振幅谱比的线性回归曲线及其相关系数等。

二、实验结果及其讨论

根据实验数据(图 3), 经处理后得砂岩试件的纵, 横波速度与衰减随其饱水程度变化的曲线, 如图 4 所示。砂岩与相似材料试件在不同饱水度时纵波的速度 v_p 与衰减品质因数 Q_p 的一些数据列于表 1, 供参考。

从实验的结果看砂岩试件在饱水时纵波的穿透速度最大, 在部分饱和时速度较小而变化趋于不明显, 低饱和时开始有所回升。在一般

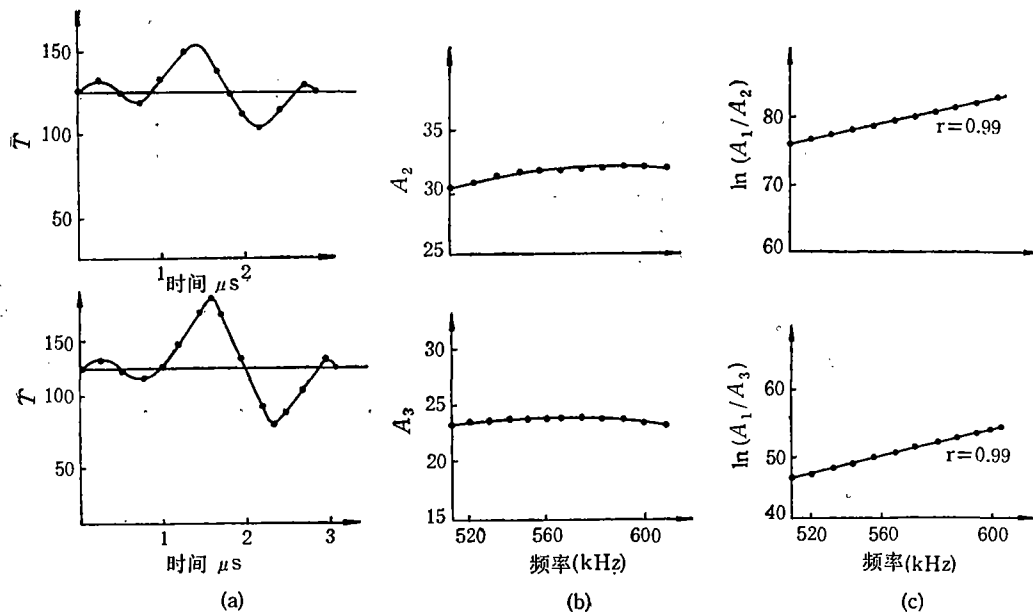


图3 实验所得数据示例

(a) 砂岩试件实测波形采样图; (b) 实测波形的振幅谱图; (c) 振幅谱比的对数图

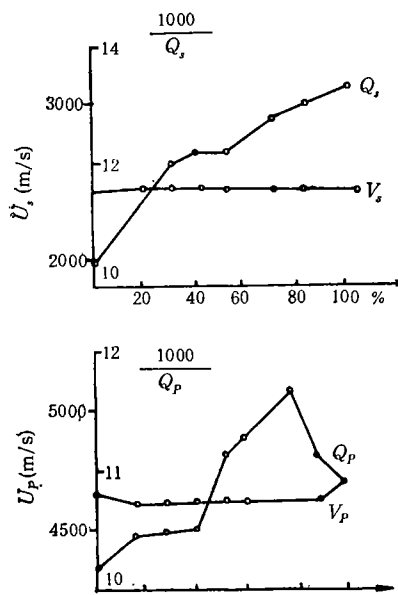


图4 砂岩试件的波速、衰减与饱和度的变化关系曲线示例

- (a) 砂岩试件纵波速度 v_p 衰减品质因数 Q_p 与饱和度的关系曲线;
 (b) 砂岩试件横波速度 v_s 衰减品质因数 Q_s 与饱和度的关系曲线

情况下,在非完全饱和的岩石中,随饱和度的增加,砂岩的密度加大而弹性模量降低。但是,对小孔隙砂岩,后者的影响变小,结果使砂岩在低

饱和时的声速随饱和度增加有所下降。在饱和情况下则不同,孔隙内水的压缩模量同砂岩骨架的压缩模量有相同的数量级。在部分饱和时孔隙水的压缩模量近于零。因此,饱和时砂岩的压缩模量大于部分饱和时的压缩模量,其结果使饱和时纵波速度大于部分饱和的纵波速度。但是,对切变模量不具有上述性质。切变模量随饱和度增加而稍有减少,结果使横波速度随饱和度增加而减小。

声波在岩石中传播时的衰减包括传播衰减和吸收衰减。本文讨论的 Q 值是针对吸收衰减的。吸收衰减对应于非完全弹性岩石介质中波传播时的能量损失。声波属于小振幅应力波,能量衰减主要是由岩石中流体粘性流动造成的。对纵波而言,在完全饱和时能量损失较小,孔隙内流体的可压缩性甚小,声波扰动在流体中产生的动压力梯度降低。在部分饱和时,气体与水的混合物导致孔隙流体的可压缩性增加,区域压力梯度增大,流体运动加剧,造成能量损失加大。在低饱和度时,砂岩中声波衰减随饱和度增加而加大。图4给出,当饱和度大于50%时衰减随饱和度增加而剧烈加大。当饱和度大于80%时,衰减随饱和度增加又开始

表1 不同饱和度纵波声速 v_p 和 Q_p 数值表.

试件	饱和度(%)	0	16.28	27.87	44.31	52.19	80.30	88.21	100
砂岩	v_p (m/s)	4652.17	4572.07	4672.26	4612.67	4612.67	4612.67	4612.67	4692.17
	Q_p	97.43	94.96	94.71	94.53	88.45	83.36	88.45	91.07
相似材料	饱和度(%)	0	36.06	65.54	85.42	100			
	v_p (m/s)	3076.90	3058.10	2994.01	2923.98	2832.86			
	Q_p	53.69	46.57	36.03	34.50	33.00			

下降,出现一个明显的峰值.

横波随饱和度而衰减的变化是很明显的,且与纵波衰减不同.横波随饱和度增加而衰减加大,没有类似纵波衰减时出现峰值的现象,在完全饱和时衰减最大.

三、几点结论

通过实验研究,看出用本文介绍的实验系统和方法,测量岩石中孔隙流体含量对超声波速度与衰减的影响是可行的.对红阳矿区和新滨地区砂岩的实验结果,得到如下几点初步结论,供今后继续开展此项研究时的参考.

1. 采用频谱比法求声波衰减的品质因数 Q 值的一个主要问题,是衰减系数 α 与频率之间能否满足线性关系.满足时 Q 值与频率无关.在本实验系统和试件的条件下,在 0.1—1.0 MHz 频率范围内,利用截断法测得的数据,表明声波在含水砂岩中传播时,衰减系数 α 与频率之间能满足线性关系,品质因数 Q 值在此频率范围内为常数.

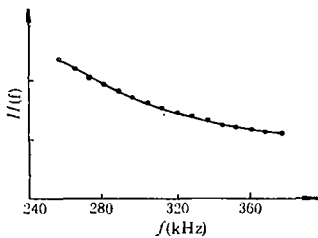


图5 相似材料试件的传递函数

为了证明上述关系,我们还测量了纵波在相似材料作的试件中的传递函数 $H(f)$,如图5所示.因为传递函数有如下形式

$$H(f)G e^{-\gamma f^n} \quad (5)$$

当接收振幅谱传播因子相同时 $G = 1$,故可用 $e^{-\gamma f^n}$ 对实验曲线进行最小二乘法回归.其结果 $\gamma x = 3.55 \times 10^{-6}$, $n = 1.039$,回归的相关系数为 0.9994,这样传递函数为

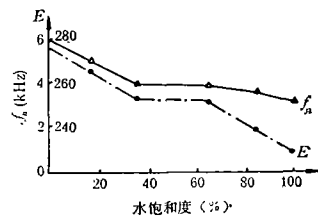
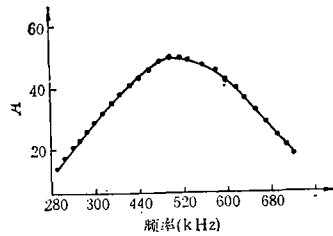
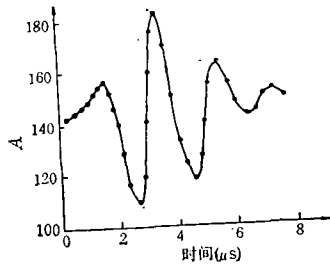


图6 相似材料试件实验数

- (a) 试件接收波形采样图;
- (b) 试件波形的振幅谱;
- (c) 试件波形谱面积 E , 谱主频 f_n 与饱和度的变化关系曲线

$$H(f) = e^{-3.554 \times 10^{-6} f^{1.039}} \quad (6)$$

从而证明了在我们研究的频率范围内, $n \approx 1$, 即 $\alpha = \gamma f$, 采用频谱比法测量的品质因数 Q 值

(下转第34页)

工作状态下, R波信号不起控制作用, B型/M型图象的冻结由场同步信号控制进行冻结。另外一路经存储器送至 CRT 显示器 x 轴, 作心电图波同步冻结标志显示。原理框图如图 11 所示。

三、仪器特点和发展

1. 仪器特点

(1) 本仪器采用同步伺服原理, 实现声、电同步扫描。在国内首次实现用电子电路替代角度函数分解器以产生正余弦调制信号, 具有一定的优点即画面光栅均匀稳定、几何失真小。

(2) 采用宽带对数放大器和国产高灰阶显

(上接第 38 页)

是合理的。

2. 通过对相似材料试件所作实验, 还看出声波接收振幅谱的主频, 谱面积变化在一定程度上反映了声波衰减的情况, 如图 6 所示。

谱面积减少说明波在传播过程中发生衰减。岩石饱和度越大谱面积减少越多, 声波衰减也越大。同时, 声波的振幅谱主频的改变也反映其衰减特性。传播距离增加与衰减增大均使主频向低频偏移。当传播距离一定时, 主频向低频偏移越大, 表明衰减越大。从另一方面讲, 主频降低也表示声波能量相对减少, 即声波中的高频部分衰减得快。

3. 在本实验的条件下, 在相似材料试件与砂岩试件中, 声波衰减的品质因数 Q 值, 比声速反映试件的物理力学性质的变化更为灵敏。将大量实验数据经归一化处理后, Q 值的变化量为速度变化量的五倍以上。

4. 在砂岩试件中, 饱和状态的纵波速度大于干燥状态时的纵波速度, 横波速度随饱和度增加而减小。砂岩中纵波衰减随饱和度的变化出现一个明显的峰值, 横波衰减随饱和度增加而加大。根据对实验结果的分析, 可以认为在粘弹性岩石中流体的粘滞性流动是造成声波衰减特征的主要机制。

象管, 使显示图象清晰, 具有一定灰阶层次。

(3) 显示型式采用 B-ECG、M-ECG 复合切换显示, 并具有冻结功能。同时具有心电图 R 波触发冻结装置。

(4) 可在 B 型扇形超声图象的任何声束方向上取样, 即可切换成 M 型超声心动图。

2. 仪器发展动态

为发展提高超声诊断仪器水平, 为赶上世界先进水平。我们与清华大学共同研制了采用八位微机控制的多功能扇形超声诊断仪。该仪器具有 D. S. C、D. S. P、字符屏显示和脉冲超声多卜勒等功能, 该新一代的仪器不久将问世。

5. 本文重点是研究了岩石中孔隙流体含量对超声波速度与衰减的影响。但文中介绍的测量声波衰减的实验系统及方法, 原则上完全可以用在测量其它因素对声波衰减的影响。此外, 将 Q 值作为对岩体注浆加固效果的检验指标, 作为冻结凿井中冻结速度与厚度的检验指标, 以及作为岩体工程稳定性与地应力监测等指标可能是有意义的。

在实验研究过程中承蒙中科院声学所李明轩研究员大力帮助与指导, 谨表谢意!

车工物理系杨国华同志, 对本文提出过一些改进意见, 一并致以谢意!

参加本实验的还有金银东同志。

参 考 文 献

- [1] 陈颀, 地震研究, 4(1983), 61—64.
- [2] 耶格. J. C., 岩石力学基础, 科学出版社, 1981.
- [3] Biot, M. A., J. Acous, Soc. Am., 28-2 (1956), 179—191.
- [4] Biot, M. A., J. Appl, Phys, 12-2 (1941), 155—164.
- [5] 门福录, 科学通报, 17-3(1966), 140—142.
- [6] 门福录, 地球物理学报, 14—2(1965), 107—114.
- [7] Mavko, G. M., Nur, A. Racks, Geophysic, 44-2 (1979), 161—178.
- [8] 刘祖源, 地球物理学报, 27—4(1984), 349—359.
- [9] Toksöz. M. N., D. H. Johnston, Geophysics, 44 (1979), 681—711.