

流体饱和孔隙材料的 Biot 弹性常数的 声学测量 *

诸国桢

郭宏智

陈丽英

(清华大学物理系 北京 100084) (地质矿产部北京计算中心 北京 100083)

1997 年 9 月 8 日收到

摘要 本文研究用声学方法测量流体饱和孔隙介质的 Biot 4 个弹性常数, 4 个弹性常数主要是通过测量水饱和的孔隙样品中的 3 种体波速度去计算的(流体压缩系数已知)。为了讨论和验证测量结果, 我们还进行了两个实验, 一是测量空气饱和样品的切变波速度和纵波速度, 并求得框架的体积模量和切变模量; 二是测量空气饱和样品中的慢纵波速度, 并验证样品曲折度的大小。

关键词 流体饱和和多孔材料, Biot 弹性常数, 慢纵波, 曲折度

Acoustic measurements of Biot elastic constants in FSPM

Zhu Guozhen Guo Hongzhi

(Tsinghua Univ, Beijing 100084)

Chen Liying

(Beijing Computer Center of Ministry of Geology and Mineral Resources, Beijing 100083)

Abstract In this paper, we applied an acoustic method for the measurements of Biot elastic constants of fluid-saturated porous samples. The main part of our paper calculates the Biot's 4 elastic constants by the measurements of three kinds of bulk wave in water-saturated porous samples (the compressional coefficient of the fluid is given). For further discussions and examinations of the measured results, two additional experiments were carried out. One is the measurement of compressional and shear waves of air-saturated samples and the calculation of the compressional modulus and shear modulus of the frame; the other is the measurement of the second compressional wave of air-saturated samples and the examination of the tortuosity of the samples.

Key words Fluid-saturated porous material(FSPM), Biot elastic constants. Slow wave, Tortuosity

* 国家自然科学基金资助项目

1 引言

Biot 理论^[1]定义了4个弹性常数 P, Q, R, N (附录1), 并给出4个弹性常数的静态测量方法^[2]。在静态测量中, 把样品放在流体中, 各向同性加压去测量样品的体积模量, 测量要分别在样品加套(jacketed)和不加套(unjacketed)的情况下进行, 加套的情况还要分为两种: 一种是腔压和围压一起改变; 另一种是只改变围压而腔压自由。在框架切变模量已知的情况下, 根据3次测量结果即可求出4个弹性常数。静态测量要求有专门的加压设备以及对样品的加套等的工艺条件, 实现起来比较困难。因此, 本文希望实现一种用一般的声学仪器就可以测定 Biot 弹性常数的较为简单准确的方法。

我们的测量是在流体中进行的, 样品是流体饱和的, 首先, 需要直接测量样品的3种声速(有关原理参见附录2), 即: 样品中快纵波声速 C_{fast} , 样品中慢纵波声速 C_{slow} , 样品中切变波声速 C_t , 然后, 再根据样品孔隙度 ϕ , 流体密度 ρ_f , 框架密度 ρ_1 以及曲折度 α (Tortuosity) 计算确定 Biot 的4个弹性常数 P, Q, R, N , 或用相应的常数 k_a, K_s, k_f, N 表示(附录1)。

用声学方法还可以直接测量干燥样品的切变波速度和纵波速度从而求得 N 和 k_a , 这

样, 一方面可以和利用声速推算出的结果进行比较验证, 另一方面, 对测不出慢波的样品, 还可以用测出的 N 和 K_a 来推算慢波速度和 K_s 。

因为声学测量比静态测量多出一个曲折度 α , 因此本文对利用空气作为饱和流体时的慢纵波进行测量, 从而推算出曲折度(附录2)。我们对样品曲折度的测量结果与[6]理论公式一致, 说明本文的方法还可以推广, 去测量和研究那些不可计算情况下的曲折度。

2 水饱和样品中3种声速的测量

2.1 样品

我们选用的样品是用玻璃微珠制成的, 分为胶粘的和烧结的两种。在测量声速之前, 我们先对其几何形状(包括直径、厚度、颗粒大小)进行了测量, 然后用3次称重法测量了孔隙度以及密度(包括框架密度和材料密度), 测量结果见表1。因为实验是在水饱和情况下进行的, 为了得到充分的水饱和, 样品在实验之前要放在水中抽真空, 由于室温下水的蒸汽压为20mmHg, 所以样品中残留气体的压强约为20mmHg。

表1 FSPM 样品参数的测量值

样品	13#	15#	17#	20#
直径 (mm)	85.46	74.50	76.10	86.00
厚度 d(mm)	14.36±0.03	13.88±0.03	20.15±0.05	12.20±0.03
颗粒直径 (μm)	100-300	200-400	50-200	100-300
孔隙度 ϕ	0.312±0.009	0.344±0.009	0.312±0.009	0.334±0.009
$\rho_1(10^3\text{kg/m}^3)$	1.592±0.001	1.561±0.001	1.699±0.001	1.570±0.001
$\rho_s(10^3\text{kg/m}^3)$	2.312±0.002	2.379±0.003	2.470±0.002	2.357±0.003
曲折度 α (a)		2.08±0.06		
曲折度 α (b)	2.10±0.06	1.95±0.06	2.10±0.06	2.00±0.06

此表中的 (a) 表示是用测量空气饱和样品中的慢纵波的速度而计算出的曲折度
(b) 表示是用式 (5) 计算出的曲折度

2.2 换能器

我们选用的换能器频率为1MHz, 这个频率正好落在 Plona^[4] 选择的窗口中。换能

器是用 3-3 型复合材料压电片制成的, 直径17mm, 有前匹配和后背衬。其中一个换能器用阶跃信号激发, 另一个换能器同轴地放在距

第一个换能器 177mm 处接收，接收到的波形如图 1 所示。

2.3 测量原理

我们采用 Plona 的实验装置测量 FSPM 中的 3 种声速。如图 2 所示，发射换能器发出声波经过样品后分成 3 束，快纵波、横波、慢纵波，这 3 种波到达接收换能器的时间是不同的，根据接收换能器接收到的这 3 种波的时间和无样品时接收到的直发直收的时间，利用 (1) 式即可分别算出 3 种波的声速。

$$V = \frac{V_f d}{\{[V_f(t - t_f) + d \cos \theta]^2 + d^2 \sin^2 \theta\}^{1/2}} \tag{1}$$

式中： V — 待测的快纵波、横波或慢纵波的声速
 V_f — 水中声速
 d — 样品厚度
 θ — 入射角
 t — 有样品时到达的时间
 t_f — 直发直收到达的时间

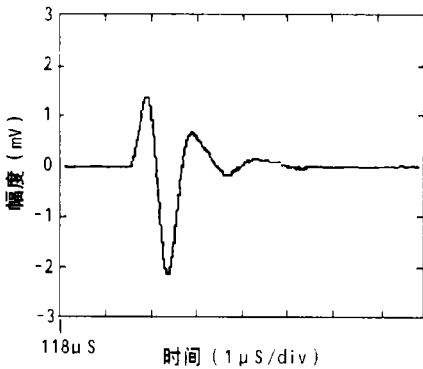


图 1 一对 1MHz 换能器直发直收的波形 (距离 177mm)

2.4 实验装置与实验步骤

本实验是在如图 3 的旋转实验台上进行的，水槽固定在转盘上，样品置于水槽的中心，可以和水槽一起转动，发射和接收换能器通过支架分别固定在不随转盘转动的定臂和动臂上，并悬于水槽中，调节支架可以使换能器沿水平轴和垂直轴移动。实验之前，先调节支

架，使两个换能器同轴且同高，同高是为了保证两换能器轴线与转盘底面平行，同轴是为了使接收换能器收到的信号最大，调好后固定动臂。

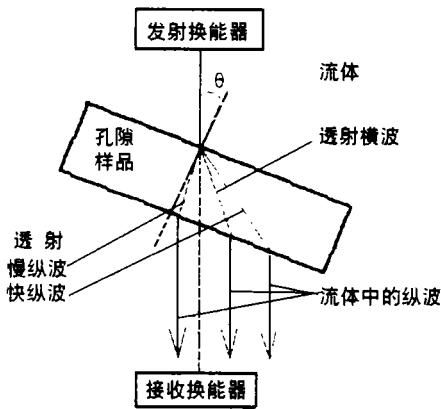


图 2 Plona 实验原理图

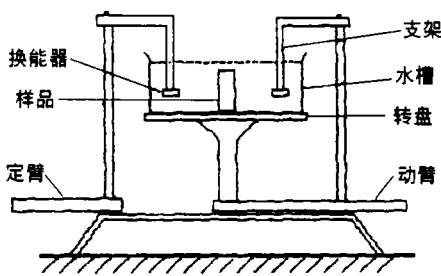


图 3 旋转实验台

实验开始，先记录下无样品时直发直收到达的波形与时间 t_f ，然后放上样品，调节样品与两个换能器垂直，这时可以从换能器上接收到来自样品两表面的多次反射信号，调节到使多次反射信号最强，说明换能器与样品垂直。再通过转动转盘来调节声波对样品的入射角 θ ，并同时记录下有样品时直达波的波形与时间 t 。这样可以得到不同入射角时的实验数据。我们测出多个角度的数据，再用最小二乘法拟合得到最后的速度结果 (见表 2)。表 2 中 (a) 行给出了用测量的水饱和和样品中的 3 种声速计算出的 N 和 K_a 。

入射角为零度时，只能得到快纵波的波

形,随着入射角的不断增大,横波和慢纵波也出现,图4给出了当 $\theta = 33^\circ$ 时透过17#样品后出现的3种波的波形。

2.5 误差分析

声速的测量误差主要由以下几个物理量引起:角度、水中声速、时间、厚度,其中:

绝对误差 $\Delta\theta = \pm 0.2^\circ$, $\Delta V_f = \pm 1\text{m/s}$, $\Delta t = \pm 0.04\mu\text{s}$,厚度的误差见表1,这样就可以从(1)式求出声速的测量误差。

几个月以后,我们抽取其中两块样品重新测量其声速,测量的结果都在误差范围内,因此,我们的测量具有重复性。

表 2 测量的样品声速及其弹性常数

样品	13#	15#	17#	20#
纵波 $C_{fast}(\text{m/s})$	2462±47	2253±38	3315±69	2562±55
慢纵波 $C_{slow}(\text{m/s})$	865±8	851±8	955±7	914±9
横波 $C_t(\text{m/s})$	1308±12	1151±10	1758±16	1350±13
$N(\text{GPa})$ (a)	3.0±0.1	*2.3±0.1	5.8±0.2	3.2±0.1
$N(\text{GPa})$ (b)	3.16±0.07	2.41±0.06	5.9±0.1	3.16±0.08
$K_s(\text{GPa})$	14.2±2	*12±2	27±5	16±3
$K_a(\text{GPa})$ (a)	4.9±0.7	*4.1±0.4	11±1	5.6±0.6
$K_a(\text{GPa})$ (b)	4.0±0.2	4.1±0.2		4.7±0.3

此表中的 (a) 表示是用测量水饱和和样品中的三种声速计算出的结果
(b) 表示是用测量空气饱和和样品的体波声速计算出的结果
* 表示 15# 样品的 N, K_s, K_a 是用 $\alpha = 2.08$ 计算的

表 3 框架切变模量 N 的测量

样品	13#	15#	17#	20#
$\Delta t(\mu\text{s})$	10.2±0.1	11.2±0.1	10.8±0.1	8.6±0.1
$N(\text{GPa})$	3.16±0.07	2.42±0.06	5.9±0.1	3.16±0.08

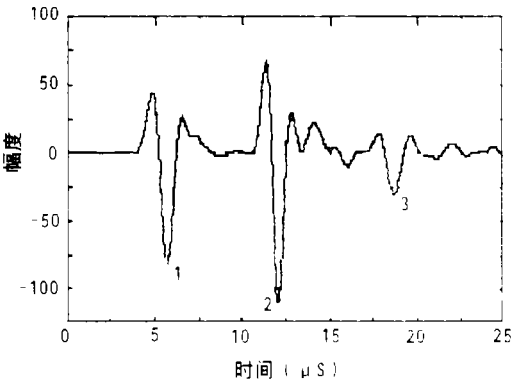


图 4 透过 17# 样品的 3 种体波的波形
1— 快纵波 2— 慢纵波 3— 横波

3 样品框架的体积和剪切模量的测量

为了验证用声速推算出的结果,我们又补充做了下面两个实验。

3.1 框架剪切模量 N 的测量

如图5所示, T和R是一对频率为320kHz的切变波换能器,用普通PZT材料制成,有重背衬。在样品干燥的情况下,测出换能器之间夹入样品时和换能器直接接触时接收到信号的时间差,利用式(2)即可算出固体框架的切变模量 N 。测量结果见表3。

$$N = \frac{d^2}{(\Delta t)^2} \rho_1 \tag{2}$$

式中 d 为样品厚度, ρ_1 为样品框架密度。

3.2 框架体积模量 K_a 的测量

测量原理同图5,只是换能器改为纵波换能器, T和R是一对频率为1.5MHz的纵波换能器,用普通PZT材料制成,加有重背衬。在样品干燥的情况下,测出换能器之间夹入样品时和换能器直接接触时接收到信号的时间差,利用式(3)即可算出 K_a 。测量结果见表4。

表 4 框架体积模量 K_a 的测量

样品	13#	15#	20#
$\Delta t(\mu s)$	6.40 ± 0.04	6.48 ± 0.04	5.12 ± 0.04
$N(\text{GPa})$ (a)	3.0 ± 0.1	2.3 ± 0.1	3.2 ± 0.1
$K_a + 4N/3(\text{GPa})$	8.0 ± 0.1	7.16 ± 0.09	8.9 ± 0.2
$K_a(\text{GPa})$	4.0 ± 0.2	4.1 ± 0.2	4.7 ± 0.3

此表中的 (a) 表示是用测量水饱和和样品中的 3 种声速计算出的 N

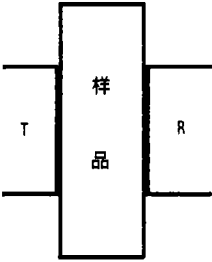


图 5 测量框架的弹性模量 N 的实验示意图

$$C_{fast}^2 = \frac{K_a + \frac{4}{3}N}{\rho_1} \quad (3)$$

在测量 N 和 K_a 的实验中我们使用的耦合剂是脱水蜂蜜,因为它粘度大且易于清洗。

表 2 中 (b) 行也给出了用测量干燥样品的体波声速而计算出的 N 和 K_a ,与 (a) 行用水饱和和样品中 3 种声速计算出的结果进行比较,可以看出两种方法符合的程度在误差范围内。此外,有些样品只能在水槽中测出 C_{fast} 和 C_t ,这时,也可以通过先测出 N 和 K_a 后再求出 K_s 。

4 曲折度 α 的测量

用声学的方法推算 Biot 的 4 个弹性常数还需知道样品的曲折度,对于球形堆积的样品,文献 [6] 已给出较为准确的计算公式,但我们对样品的曲折度进行测量比较还是有必要的。

我们在空气饱和样品中测出慢波的方法和文献 [3] 一样,如图 6 所示, T 和 R 是一对频率为 136KHz 的纵波换能器,是用 3-3 型复合材料压电片制成的,加有重背衬,在已知空气声速

=339.8m/s 的情况下,测出有无样品时接收到信号的时间差,根据式 (4) 算出 C_{slow} ,再根据式 (A2.10a) 即可算出曲折度 α 。测量结果见表 5。另外,我们还测量了黄铜珠样品的曲折度,黄铜珠样品曾用来做声弛豫实验 [5]。表 5 同时也给出了利用式 (5) 孔隙度计算出的曲折度的结果,可以看出,两种方法的误差在 8% 以内。

$$C_{slow} = \frac{d \cdot C_f}{\Delta t \cdot C_f + d} \quad (4)$$

图 7 是用 HP54503A 数字示波器记录的 136kHz 换能器透过空气饱和和黄铜样品后慢波的波形,可以看出我们做的换能器的波形比文献 [3] 的要好。

文献 [3] 中所用的样品的厚度都在 1-2mm 左右,而我们在 15.6mm 厚的样品中也看到了慢波 (表 5, 14# 样品),但有些厚的样品还是测不出慢波,对于这些样品,它们的曲折度是用下式求得的 [6]。

$$\alpha = \frac{1}{2}(1 + \phi^{-1}) \quad (5)$$

上式适用于人工烧结球形堆积样品,其中 ϕ 为样品孔隙度。

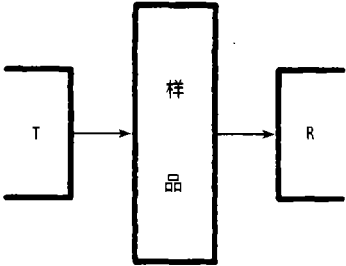


图 6 测量曲折度 α 的实验装置示意图

表 5 空气饱和和样品的慢纵波 C_{slow} 和曲折度 α 的测量

样品	10#	14#	15#	21#	24#	黄铜珠样品
厚度 $d(\text{mm})$	12.9	15.60	13.88	10.27	5.70	6.28
颗粒直径 (μm)	150-300	100-300	200-400	150-500	300-400	200-300
$\Delta t(\mu\text{m})$	16.4	18.0	18.0	11.2	6.0	8.4
曲折度 α (a)	2.06	1.94	2.08	1.88	1.85	2.11
曲折度 α (b)	2.02	1.82	1.95	2.03	1.90	2.02

此表中的 (a) 表示是用测量空气饱和和样品中的慢纵波的速度而计算出的曲折度
(b) 表示是用式 (5) 计算出的曲折度

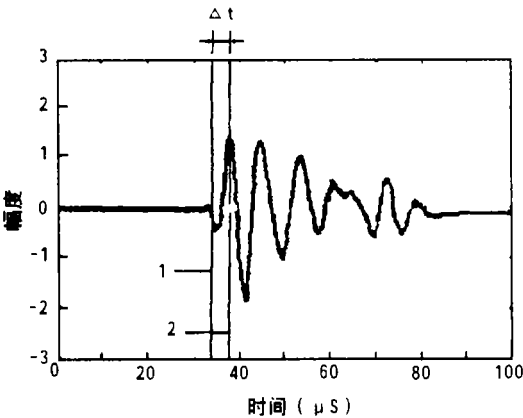


图 7 136kHz 换能器透过空气饱和和黄铜珠样品后的波形

5 讨论

(1) 测出水饱和和孔隙样品的 3 种体波声速 (水的声速已知) 来求孔隙样品的 Biot 4 个弹性常数是可行的, 其中有两个常数 N 和 K_a 是可以声学法在干燥样品上检验的, 检验结果在误差范围内是一致的。进一步的工作应当和静态法测量的结果比较。

(2) 关于换能器问题

我们在水槽中测量 3 种体波的一对换能器, 其一发一收的波形有一个幅值为 1.8V 的最大主波 (图 1), 和文献 [4] 大致相同。我们测量空气饱和和样品用的换能器有 3 个主波, 优于文献 [3] 所用的换能器 (8 个主波, 并且只能测量厚度小于 2mm 的样品)。以上两种换能器是我们实验室制作的, 国内市场上还不易得到。

(3) 目前的测量限于人工样品, 大多数天然样品是测不出慢波的, 但水饱和和样品的纵波

和横波是可以测出的, 加上干燥样品的 K_a 和 N 是可以求出全部 Biot 弹性常数的。

(4) 关于曲折度问题

对于球形堆积成的样品, 我们测量的结果和文献 [6] 给出的理论基本一致。但对于天然样品, 由于孔隙结构更复杂, 不可能和理论一致。本文所用的方法对于研究天然样品的曲折度是有用的。

致谢 王晖在 1992 年制作了不少人工样品, 并做过部分测量; 王岳波协助换能器制作, 样品支架和换能器支架的制作; 陈烨帮助制作了一对 1MHz 的换能器。换能器材料由中国科学院声学所庄咏謩, 刘永怀老师提供。

参 考 文 献

- 1 Biot M A. *J.Acoust.Soc.Am.*, 1956, **28**(2): 168-191.
- 2 Biot M A, Willis D G. *Journal of Applied Mechanics*, Dec. 1957: 594-601.
- 3 Peter B N, Adler L, Bonner B P. *Appl.Phys.Lett.*, Jun.1990, **18**: 2504-2506.
- 4 Plona T J. *Appl.Phys.Lett.*, 1980, **36**(4): 259-261.
- 5 Zhu Guozhen, Pan Yongdong. *J.Acoust.Soc.Am.*, Jun.1993, **93**(6): 1-5.
- 6 Johnson D L, Plona T J, Scala C. *Physical Review Letters*, Dec.1982, **49**(25): 1840-1844.
- 7 Johnson D L, Plona T J. *J.Acoust.Soc.Am.*, Aug.1982, **72**(2): 556-565.
- 8 王晖. 流体和流体饱和多孔材料界面声反射规律的研究, 清华大学硕士论文, 1993.
- 9 诸国桢. 应用声学, 1994, **13**(4):

附录 1 Biot 的四个弹性常数

(附录 1, 2 所用符号脚标的意义同一般连续介质力学, 所用的公式均可参考文献 [1] 和 [7])

Biot 理论把流体部分和固体框架部分看成是均匀的, 分别定义固体部分的密度 ρ_1 和流体部分的密度 ρ_2 为:

$$\rho_1 = (1 - \phi)\rho_s \quad (\text{A1.1a})$$

$$\rho_2 = \phi\rho_f \quad (\text{A1.1b})$$

式中 ϕ 为孔隙度, ρ_s, ρ_f 分别为框架材料和流体材料的密度。分别定义流体和固体部分的位移为 U 和 u , 则流体和固体的形变 ϵ 和 e_{ij} 分别为:

$$\epsilon = U_{i,i} \quad (\text{A1.2a})$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (\text{A1.2b})$$

流体部分和固体部分的应力分别表示为 S 和 σ_{ij} 。如果把样品放在流体中, 在不加套 (un-

jailed) 的情况下加压力 P , 则应有:

$$S = -\phi P \quad (\text{A1.3a})$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -(1 - \phi)P \quad (\text{A1.3b})$$

Biot 给出的弹性定律为:

$$\sigma_{ij} = 2Nu_{ij} + Ae\delta_{ij} + Qe\delta_{ij} \quad (\text{A1.4a})$$

$$S = Qe + R\epsilon \quad (\text{A1.4b})$$

和各向同性固体的胡克定律相比, Biot 的四个弹性常数分别是, N 和 A (相当于拉梅系数), R (和流体弹性模量、孔隙度有关), Q (代表流体和框架的弹性相互作用)。

Biot 的四个弹性常数可以用四个更为直观的弹性常数来表示, 这就是: 框架、框架材料、流体的体积模量分别为 K_a 、 K_s 、 K_f 和框架的切变模量 N 。两组常数之间的换算关系如下:

$$A + 2N = P = \frac{(1 - \phi)(1 - \phi - K_a/K_s)K_s + \phi K_a K_s / K_f}{1 - \phi - K_a/K_s + \phi K_s / K_f} + \frac{4}{3}N \quad (\text{A1.5a})$$

$$Q = \frac{(1 - \phi - K_a/K_s)\phi K_s}{1 - \phi - K_a/K_s + \phi K_s / K_f} \quad (\text{A1.5b})$$

$$R = \frac{\phi^2 k_s}{1 - \phi - K_a/K_s + \phi K_s / K_f} \quad (\text{A1.5c})$$

当 $K_f \ll K_a, K_s$ 时, 应有:

$$P = K_a + \frac{4}{3}N \quad (\text{A1.6a})$$

$$Q = 0 \quad (\text{A1.6b})$$

$$R = 0 \quad (\text{A1.6c})$$

附录 2 流体饱和孔隙介质 (FSPM) 中的弹性波

从 Biot 动力学方程可以解出横波速度 C_t 和快纵波速度 C_{fast} 和慢纵波速度 C_{slow} 为

$$C_t^2 = \frac{N}{\left(\rho_{11} - \frac{\rho_{12}^2}{\rho_{22}}\right)} \quad (\text{A2.1})$$

$$C_{fast,slow}^2 =$$

$$\frac{\Delta \pm \sqrt{\Delta^2 - 4(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)(PR - Q^2)}}{2(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)} \quad (\text{A2.2})$$

$$\Delta = P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2\rho_{12}Q \quad (\text{A2.3})$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } \rho_{11} &= \rho_1 - \rho_{12} \\ \rho_{22} &= \rho_2 - \rho_{12} \\ \rho_{12} &= -(\alpha - 1)\phi\rho_f \end{aligned}$$

ρ_{12} 代表固体和流体的耦合质量密度, (A2.2) 式中 “+” 号对应于 C_{fast} , “-” 号对应于 C_{slow} .

由 (A2.1)、(A2.2) 式可知, C_{fast}, C_{slow} 和 C_t 是 P, Q, R 的函数, 再由 (A1.5) 可知 P, Q, R 是 K_a, K_s, N, K_f 的函数, K_f 已知, 3 种波速由实验测定, 所以 K_a, K_s, N 可由 3 个速度方程求解. 解方程组的过程较为简单, 最后归结为解一个一元四次方程 [8] .

当框架的密度和弹性模量均远大于流体的密度和弹性模量, 即 $K_a、N \gg K_f, \rho_1 \gg \rho_f$ 时 (例如气体饱和的孔隙介质), 根据 (A1.6),(A2.2), (A2.3) 可近似地推导出:

$$C_{slow} = \frac{C_f}{\sqrt{\alpha}} \tag{A2.4}$$

利用上式, 可以通过测量气体饱和样品中的 C_{slow} 来求得 α . (A2.4) 式是一个近似公式, 根据文献 [6] 的估计, 误差不超过 0.01% .

同样 (A2.2) 式中取 “+” 得到:

$$C_{fast}^2 = \frac{K_a + \frac{4}{3}N}{\rho_1} \tag{A2.5}$$

在同样条件下, 从 (A2.1) 式可推出:

$$C_t = \frac{N}{\rho_1} \tag{A2.6}$$

利用上两式, 可以通过测量干燥样品中的纵波和横波速度来求得 N 和 K_a .

(上接第 31 页)

声抗早孕的有效性、安全性和可行性. 充分显示出了它临床应用的广阔前景.

为把这项新技术早日推向临床, 扩大对猴子研究的案例数量和进一步探讨超声抗早孕的量效关系的工作, 正在有效地筹划之中.

超声治疗学的最新发展表明 [12,13] , 强超声治疗技术正在形成一个新的研究热点, 它对现代超声医学发展的重要贡献, 将可能成为继超声影像诊断技术之后的又一个里程碑. 我国科技工作者正在对这一崭新领域的开拓做出引人瞩目的贡献.

参 考 文 献

- 1 王智彪. 超声波抗早孕的动物实验. 博士学位论文, 重庆医科大学, 1993,5.
- 2 王智彪,王芷龙,冯若等. 重庆医科大学学报, 1994, 19(4): 298-300.

- 3 王智彪, 顾美礼, 凌萝达等. 中华超声影像杂志, 1995, 4(5): 222-226.
- 4 Wang Zhibiao, Liu Chengquan, Feng Ruo et al. *Journal of CAUME*, 1995, 1(1): 44-49.
- 5 王智彪, 顾美礼, 祝彼得等. 中国超声医学杂志, 1995, 11(2): 107-110.
- 6 王智彪,顾美礼,冯若等.中国超声医学杂志, 1995, 11(2): 111-115.
- 7 王智彪, 陆杰, 冯若等. 临床超声医学杂志, 1995, 6(1): 19-23.
- 8 王智彪,王芷龙,冯若等.中国超声医学杂志, 1995, 11(3): 201-206.
- 9 王智彪,王志刚,冯若等.临床超声医学杂志, 1995, 6(1): 24-28.
- 10 王智彪, 顾美礼, 冯若等. 中华超声影像杂志, 1995, 4(5): 227-231.
- 11 Wang Zhibiao, Gu Meili, Wang Zhigang et al. *Ultrasonic World Congress 1995 Proceedings*, 891-900.
- 12 冯若. 世界医疗器械, 1998, 4(1): 14-17.
- 13 *J.Acoust.Soc.Am.*, 1998, 103(5) Pt.2: 2867-2869.