Z表示在 $x=-l_1$ 端处棒的力阻抗。式中，$Z_{S_1}=\rho C I_{P_1}$。代(10)入(11)式中，并改写为:

$$Z=jZ_{S_1}\mathrm{tg}(kl_1+\varphi_2)$$

其中，$\mathrm{tg}\,\varphi_2=Z_{S_2}\cdot\mathrm{tg}(kl_2)/Z_{S_1}$

故频率方程为 $\mathrm{tg}(\varphi_1+\varphi_2)=0$ (12)

式中 $\varphi_1=kl_1$。

当 $S_1=S_2$ 时，即同种材料做成的均匀截面棒，(12)式变为:

$\mathrm{tg}\,k(l_1+l_2)=0$，基频时，$l_1+l_2=\frac{\lambda}{2}$。

λ 为杆中波长。

当 $S_1\neq S_2$ 时，且 $l=l_1=l_2$，上面的频率方程为:

$$\frac{I_{P_1}+I_{P_2}}{I_{P_1}\mathrm{ctg}kl-I_{P_2}\mathrm{tg}\,kl}=0$$

基频时，$kl=\frac{\pi}{2}$，即 $l=\frac{\lambda}{4}$。

从上可知，当 $l_1=l_2=l$，或者 $S_1=S_2=S$ 时，由(4)式得出的结论只是阶梯形扭振杆的一种特殊情形。究其原因，可能是组成阶梯形扭振杆的两部分因为其截面、形状都是均匀和相似的，故由扭振方程得到的两部分的解也相同，再由边界条件推得的频率方程就有一定的局限性。而声传输线方程则是从整体上去研究之。

上面结论与纵振阶梯形变幅杆的结论完全类似[3]。

参 考 文 献

[1] 阮世勋，广西大学学报（自然科学版），16-4 (1991)，46—51。

[2] 何祚镛等，声学理论基础，国防工业出版社，1981，62。

[3] 林仲茂，超声变幅杆的原理和设计，科学出版社，1987，98—99。

用声波测井资料确定碎屑岩储集层的胶结指数

王 正 付

（河南石油勘探局技工学校 南阳 473132）

1993 年 5 月 17 日收到

本文通过讨论 Biot 系数 β 与地层因素 F 之间的关系，定义了一个参数 $F_{ac}=\beta^{-1}\phi^{-1.5}$，并用纯砂岩的实验资料证明了该参数与地层因素 F 是相等的。在实际应用中，为了获得系数 β 和孔隙度 ϕ，我们首先建立了纯地层中声波传播的速度方程。然后，用弹性模量的并联等效公式把它扩展到泥质地层中。最后，用实例对文中的结果进行检验。

ABSTRACT

Through discussing the relation of Biot's coefficint β and the formation factor F, a parameter F_{ac} is difined: $F_{ac}=\beta^{-1}\phi^{-1.5}$. Using the experimental data of pure sandstone, it is proved that $F_{ac}=F$. in the real application, for the determination of the porosity ϕ and Biot's coefficint β, we build up a velocity equation for the elastic wave propagation in a pure sandstone, and then extend it to clay-sandstone by the parallel equivalence of elastic modulus in the elasticity theory. Finally, some examples of application are given.

一、引　言

1942年，阿尔奇提出了地层因素的概念．其数学表达式为：

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{1}{\phi^m} \tag{1}$$

式中，F是地层因素；R_0是含水岩石的电阻率；R_w是水的电阻率；ϕ是孔隙度；m是岩石的胶结指数．该公式把岩石的电性和物性有机地结合起来，为用测井资料定量评价储集层奠定了基础．

许多测井分析家都用直接测量岩石电阻率的方法对胶结指数m作了大量的研究，指出了胶结指数m的变化范围[1]：在碎屑岩剖面上为1.5—2.5；在碳酸盐岩剖面上为1—4．但是，在泥质地层中，由于存在泥质附加导电性的影响，使得用直接测量法求得的m值往往偏低．并且，随泥质含量的增加或孔隙度的减小，泥质附加导电性的影响加剧．因此，需要用一种与直接测量电阻率不同的方法来确定岩石的胶结指数m．

本文试图用声波测井资料来确定胶结指数m．具体作法是，首先用实验资料建立了地层因素F与Biot系数β和孔隙度ϕ之间的关系．然后给出了如何用声波测井资料确定β和ϕ的方法．最后，用实例对文中的结果进行了检验．

二、F与β和ϕ之间的关系

如果用K_b和K_m分别表示干燥岩石和岩石骨架的体积弹性模量，那么，Biot系数为：

$$\beta = 1 - K_b/K_m \tag{2}$$

从方程(2)可以看出，当岩石的孔隙度为0时，即$K_b = K_m$，则$\beta = 0$；随着孔隙度ϕ的增加，即K_b减小，则β增加；当孔隙度为1时，即$K_b = 0$，则$\beta = 1$．下面将见到，系数β与地层因素的倒数具有相同的变化规律．因此，我们有可能用系数β来确定地层因素F．

根据Biot的研究[2]，系数β的变化范围是：

$$\phi < \beta < 1 \tag{3}$$

根据碎屑岩储集层中m值的变化范围有：

$$\frac{1}{\phi^{1.5}} < F < \frac{1}{\phi^{2.5}} \tag{4}$$

比较方程(3)和方程(4)知，系数β总是大于地层因素F的倒数．若用$\phi^{1.5}$去乘方程(3)中的每一项，并定义：

$$F_{ac} = \frac{1}{\beta\phi^{1.5}} \tag{5}$$

则有：

$$\frac{1}{\phi^{1.5}} < F_{ac} < \frac{1}{\phi^{2.5}} \tag{6}$$

可以看出，参数F_{ac}与地层因素F不仅有某种单调变化趋势，而且有相接近的变化范围．为了确定F_{ac}与F之间的关系，我们选用了从64块泥质含量小于3%、孔隙度为11—33.5%的岩芯分析资料中获得的F_{ac}和F进行交会．如图1所示．从图1中可以看出，参数F_{ac}与地层因素F的值符合得很好．因此，可用F_{ac}取代F，即令

$$F_{ac} = F \tag{7}$$

把方程(1)和(5)代入方程(7)中，容易解出：

$$m = 1.5 + \lg\beta/\lg\phi \tag{8}$$

三、β和ϕ的确定方法

由方程(2)知，系数β与干燥岩石的体积弹性模量有简单的关系．在实验室里，干燥岩石的体积弹性模量K_b是容易获得的；但在地下条件下，岩石都是由流体所饱和的，根本不存在干燥的情况．因此，无法直接测量出来．

1956年、Biot报道了由固体骨架和孔隙流体构成的双相多孔弹性介质中的声波传播的理论[3]．在他的理论中，描述低频时的声波速度方程为：

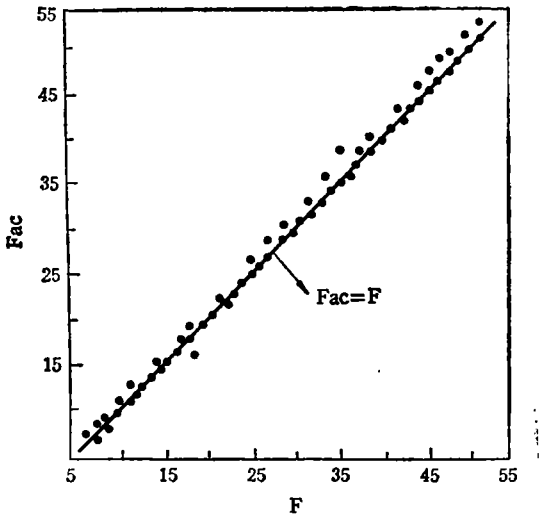

图 1 F_{ac} 与 F 交会图

$$\begin{cases} \rho v_p^2 = \dfrac{\beta^2}{\dfrac{\beta-\phi}{K_m}+\dfrac{\phi}{K_f}} + K_b + \dfrac{4}{3}N_b \\ \rho v_s^2 = N_b \end{cases} \tag{9}$$

式中，v_p、v_s 分别是纵横波速度；K_m、K_b 和 K_f 分别是岩石骨架、干燥岩石和孔隙流体的体积弹性模量；N_b 是干燥岩石的切变弹性模量；β 是 Biot 系数；ϕ 是岩石的孔隙度；ρ 是岩石的体积密度，且：

$$\rho = (1-\phi)\rho_m + \phi\rho_f \tag{10}$$

式中，ρ_m、ρ_f 分别是岩石骨架、孔隙流体的体积密度。

由方程(9)容易解出：

$$\frac{1}{\beta} = \frac{K_m}{K_m - \rho\left(v_p^2 - \dfrac{4}{3}v_s^2\right)} + \frac{K_f}{\phi(K_f - K_m)} \tag{11}$$

ϕ 可由下式计算[4]：

$$\phi = \frac{1-\sqrt{1-4AB}}{2A} \tag{12}$$

式中，

$$A = 1 - \rho_f/\rho_m$$

$$B = \frac{K_f(1 - v_s^2/v_{sm}^2)}{\rho_m\left(v_p^2 - \dfrac{v_{sm}^2}{v_{pm}^2}v_s^2\right)}$$

其中，v_{pm}、v_{sm} 分别骨架的纵、横波速度。

把用方程(10)和方程(11)计算出的 β 和 ϕ 代入方程(8)中，可以求出胶结指数 m。

但是，在实际情况下，几乎所有的储集层中都会含有一定量的泥质。也就是说，储集层是由骨架、流体和泥质等三种介质组成的。因此，方程(9)不能直接用于这类地层。

根据岩石体积模型的概念，宏观上可以把泥质地层等效成纯岩石和纯泥质两个单元。如图 2 所示。在利用等效后各单元的弹性模量估

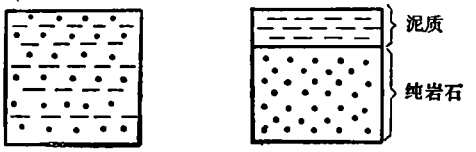

图 2 岩石等效模型示意图

算总体岩石的弹性模量时，一般有并联和串联两种等效方法。并联等效方法适用于泥质砂岩，在这岩石中，泥质含量与泥质孔隙度的乘积小于其孔隙度。串联等效方法适用于砂岩泥质，在这种岩石中，泥质含量与泥质孔隙度的乘积等于其孔隙度。在碎屑岩剖面上的储集层，一般均为泥质砂岩层。因此，可采用并联等效方法来估算其弹性模量。根据弹性理论中弹性模量的并联等效公式，我们有：

$$\begin{cases} \rho v_p^2 = (1-c)\rho_1 v_{p1}^2 + c\rho_c v_c^2 \\ \rho v_s^2 = (1-c)N_{b1} + cN_c \end{cases} \tag{13}$$

式中，v_p、v_s 分别是岩石的纵、横波速度；c 是泥质含量；v_{p1}、v_c 分别是等效后纯岩石和纯泥质的纵波速度；N_{b1}、N_c 分别是等效后纯岩石和纯泥质的切变弹性模量；ρ 是岩石的体积密度，且

$$\rho = (1-c)\rho_1 + c\rho_c \tag{14}$$

式中，ρ_1、ρ_c 分别是等效后纯岩石、纯泥质的体积密度，且

$$\rho_1 = (1-\phi_1)\rho_m + \phi_1\rho_f \tag{15}$$

式中，$\phi_1 = \phi/(1-\phi)$ 是等效后纯岩石的孔隙度；ϕ 是总体岩石的孔隙度。

用方程(13)中的第一式减去第二式的 4/3

倍，并忽略泥质部分的影响(因为泥质含量 c 较小)可得：

$$\rho\left(v_p^2-\frac{4}{3}v_i^2\right)=\rho_1 v_{p1}^2-\frac{4}{3}N_{b1} \quad (16)$$

由于 $\rho_1 v_{p1}^2$ 是等效后纯岩石的弹性模量，因此，它可以写成方程(9)中第一式的形式：

$$\rho_1 v_{p1}^2=\frac{\beta_1^2}{\frac{\beta_1-\phi_1}{K_m}+\frac{\phi_1}{K_f}}+K_{b1}+\frac{4}{3}N_{b1} \quad (17)$$

式中，$\beta_1=1-K_{b1}/K_m$；K_{b1} 是等效后纯岩石在干燥条件下的体积模量。

联立方程(16)和(17)可以解出：

$$\frac{1}{\beta_1}=\frac{K_m}{K_m-\rho\left(v_p^2-\frac{4}{3}v_i^2\right)}+\frac{K_f}{\phi_1(K_f-K_m)} \quad (18)$$

应该指出，用方程(18)计算的 β_1 是等效后纯岩石的 Biot 系数。因此，计算胶结指数 m 时，必须用 ϕ_1 代替方程(8)中的 ϕ，即

$$m=1.5+\frac{\lg\beta_1}{\lg\phi_1} \quad (19)$$

四、应用实例

表 1 是用直接测量法(方程(1))和本文公式(方程(19))计算的胶结指数的对比。从表 1 中可以看出，当泥质含量较小或孔隙度不太小时，用本文公式计算的胶结指数与用直接测量法获得的胶结指数吻合很好；随着泥质含量的增加或孔隙度变小，用方程(1)和方程(19)计算的胶结指数的差别增加，并且用方程(19)计算的胶结指数要大。这与直接测量法没有考虑泥质附加导电性的观点是一致的。

为了验证方程(19)的正确性，我们让用方程(1)和方程(19)计算的胶结指数 m 差别较大的几块岩样(表 1 中的 1、3、5、6、13、14、15)含一定量的油，并测量出它们的电阻率。然后，分别将用方程(1)计算的 m 值和用方程(19)计算的 m 值代入泥质地层的电阻率测井的响应方程中，求解出相应的含油饱和度。其计算结果如表 2 所示。

表 1　方程(1)与方程(19)计算的 m 值对比

序号	v_p (m/s)	v_s (m/s)	ϕ (%)	c (%)	胶结指数 m	
					公式(1)	公式(19)
1	4320	2672	12.7	7.45	1.703	1.802
2	4161	2474	15.7	11.45	1.870	1.871
3	3926	2293	17.0	9.75	1.722	1.797
4	3904	2291	18.0	6.60	1.723	1.764
5	3696	2108	20.0	15.10	1.719	1.804
6	3545	2061	22.0	14.00	1.619	1.747
7	3543	2025	23.7	8.25	1.776	1.768
8	3108	1623	24.7	4.25	1.616	1.664
9	3280	1804	25.9	12.75	1.734	1.738
10	3284	1818	26.4	19.45	1.744	1.771
11	3123	1681	26.7	1.70	1.629	1.662
12	3142	1709	27.6	4.65	1.634	1.683
13	3110	1680	28.1	21.10	1.667	1.745
14	2967	1555	28.9	24.20	1.652	1.722
15	2829	1460	32.3	23.16	1.646	1.717

表 2　用方程(1)和(19)提供的 m 值计算含油饱和度对比

序号	实际含油饱和度 (%)	计算含油饱和度(%)	
		m 用公式(1)计算	m 用公式(19)计算
1	50.7	55.12	51.84
3	53.2	56.55	53.92
5	51.4	55.54	52.25
6	46.5	51.82	48.92
13	60.3	62.81	61.03
14	41.6	47.33	43.41
15	38.8	43.67	39.69

表 2 中的结果表明，在测井解释中，使用本文公式给出的 m 值所计算的含油饱和度更接近于实际含油饱和度。因此，可以认为本文给出的公式是正确的。

当地层中的流体是水和烃(油或气)的混合物时，则有：

$$\frac{1}{K_f}=\frac{s_w}{K_w}+\frac{1-s_w}{K_n} \quad (20)$$

式中，s_w 是含水饱和度；K_w、K_n 分别是水、烃的体积弹性模量。这就是说，要求出 Biot 系数 β，还必须知道含水饱和度 s_w。

在这种情况下，我们可以把方程(18)、(19)、(20)和电阻率测井的响应方程联立起来，利用逐次逼近法求解出胶结指数m和地层的含水饱和度s_w.

五、结　论

1. 利用弹性理论中弹性模量的并联等效公式把纯岩石中的 Biot 速度方程扩展到泥质地层中，拓宽了它的应用范围.

2. 胶结指数m是测井解释中评价储集层含油饱和度的重要参数. 本文给出的方法，可以连续提供不同深度储集层的胶结指数. 改变了在测井解释中使用由经验确定的固定m值的方法，使测井解释的结果更趋合理.

致谢　本文的实验资料是由我油田测井公司岩芯实验室的赵怀玉高级工程师、彭燕明工程师等同志完成，并提供给本研究工作. 在此深表谢意.

参考文献

[1] 曾文冲、欧阳键，测井地层分析与油气评价(上)，石油工业出版社，1981,20—22.
[2] A. 蒂穆尔，声波测井，石油工业出版社，1985,310—311.
[3] Amos Nur，双相介质中波的传播，石油工业出版社，1986,163～174.
[4] 王正付，应用声学，**13**—4,(1994),15—20.

用时域自易法测量超声换能器灵敏度

邓明晰　　林靖波　　水永安

(重庆后勤工程学院　重庆　630042)　　(南京大学声学所)

1993 年 9 月 7 日收到

超声换能器的灵敏度是实际应用中很重要的物理参量，传统测试方法是在消声水槽中用连续正弦波进行逐点频率测量，过程较繁复，测量频率范围也受到限制，并且不能获得重要的相位信息.

本文所采用的时域自易法是一种新颖的换能器校准方法. 通过对超声换能器的激励电流和回波电压脉冲进行傅氏变换，可得到灵敏度的幅频相频特性，且具有测量速度快、频带宽和易于操作等优点. 把时域自易法所测得结果与频域法测量所得结果进行比较，证实相符.

Abstract

The transmitting and receving sensitivities of ultrasonic transducers are very important parameters in ultrasonic applications. In the conventional measurement, continuous wave is used. The measurement procedure is complicated, the measured frequency band limited, and the phase information of the trsnsducer not acquired.

In this paper, the method of time domain self-reciprocity calibration is applied. The sensitivities of the ultrasonic transducers can be obtained by performing Fourier transforms of the excited and the echo time domain pulses. It possesses such advantages as high measurement speed, wide frequency band and simple operation procedure. By comparing the results of this time domain self-reciprocity calibration with those obtained by using the frequency domain method, it is found that the two results well agree.