

基于 CCT 模型的基底式胶结疏松砂岩 声波速度修正模型

韩学辉¹, 郭俊鑫¹, 李峰弼¹, 杨 龙², 唐 俊¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 新疆油田实验检测研究院, 新疆克拉玛依 834000)

摘要:针对 CCT(contact cement theory)模型中胶结物中心厚度为 0 的假设与基底式胶结疏松砂岩的地质特征不符合的问题,重新推导得到基底式胶结疏松砂岩的胶结半径表达式,给出基于 CCT 模型的基底式胶结疏松砂岩声波速度修正模型及其统计近似式,并将人造基底式胶结疏松砂岩的纵、横波速度的修正模型及近似式预测结果与试验测量值进行比较。结果表明:利用新推导的胶结半径表达式修正的 CCT 模型可应用于基底式胶结的疏松砂岩;修正模型统计近似式有效地提高了计算效率;修正模型及其近似式相对原 CCT 模型能够更好地预测基底式胶结的疏松砂岩声波速度。

关键词:孔隙介质声学; 声波速度模型; CCT 模型; 胶结物中心厚度; 基底式胶结疏松砂岩; 模型统计近似

中图分类号:P 584 **文献标志码:**A

Modified acoustic velocity model for basal cemented loose sandstone based on contact cement theory

HAN Xue-hui¹, GUO Jun-xin¹, LI Feng-bi¹, YANG Long², TANG Jun¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Research Institute of Experiment and Detection, Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China)

Abstract: A modified acoustic velocity model and its approximation for basal cemented loose sandstone were proposed based on contact cement theory(CCT) model which was used for the pore basal cemented loose sandstone. The thickness of the cement layer's center is set to be zero in the CCT model, which contradicts with characters of the basal cemented loose sandstone. To solve this problem, the expression of cementation radius of the basal cemented loose sandstone was re-derived considering the effect of the thickness of the cement layer's center. Thus, the modified acoustic velocity model was developed and its approximation was then given. The man-made basal cemented loose sandstone samples were used to test the modified model and its approximation. The results show that the newly derived cementation radius expression is better than the original one. With the new expression, CCT model can be applied in the basal cemented loose sandstone. The approximation can improve the calculation efficiency effectively. The modified model and its approximation can predict both compressional and shear wave velocities better than the original CCT model.

Key words: porosity medium acoustics; acoustic velocity models; contact cement theory(CCT) model; thickness of cement layer's center; basal cemented loose sandstone; approximation of model

声波测井和地震勘探作为重要的勘探手段,用于准确求取孔隙度等地质参数的前提是建立适用的声波速度模型。当前,疏松砂岩声波速度模型主要分为两大类。第一类针对非固结疏松砂岩,此类砂岩基本无胶结作用,主要靠岩石周围的压力将岩石

颗粒聚合在一起,其主要模型有:Herz-Mindlin 模型、Brandt 模型、Digby 模型和 HMHS 模型等^[1-9]。第二类模型主要针对具有弱胶结作用的疏松砂岩,此类疏松砂岩胶结物模量通常很小(通常为泥质胶结),胶结作用弱,同时其埋藏一般较浅,受压实作用较

弱,导致其岩石较为疏松,其对应模型主要有 CCT (contact cement theory) 模型、恒量胶结模型等^[5,10-15]。第一类模型种类较多,且在非固结疏松砂岩储层中取得了较好的应用^[5],而第二类模型种类较少,且应用范围有很大局限性。例如:CCT 只适用于孔隙式胶结的疏松砂岩^[10],恒量胶结模型针对的是分布有分散颗粒的孔隙式胶结疏松砂岩储层^[12]。除了孔隙式胶结,弱胶结的疏松砂岩中普遍存在着基底式胶结,由于基底式胶结为杂基支撑,而孔隙式胶结为颗粒支撑^[14],两者支撑类型不同,其声波传播规律也不同。笔者在 CCT 模型的基础上,进一步考虑胶结物中心厚度对疏松砂岩声波速度的影响,通过修正胶结半径表达式获得基底式胶结疏松砂岩声波速度模型和统计近似式,并考察其应用效果。

1 CCT 模型及其不足

Jack Dvorkin 等^[10]提出的 CCT 模型中考察了疏松砂岩的弹性特性和声波速度。模型使用的颗粒与胶结物之间的接触模型如图 1 所示。图 1 中,作用在颗粒上的力为 F ,颗粒半径为 R ,颗粒的接触处有胶结物分布,且接触面积为圆形,半径为 a ,胶结物的中心厚度为 h ,体积为 V 。

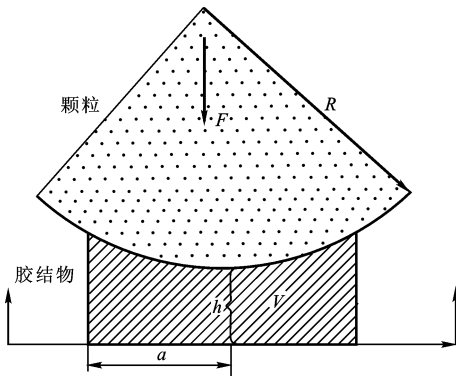


图 1 颗粒与胶结物之间的接触模型

Fig. 1 Contact model between grain and cement

通过两个砂岩颗粒以及胶结物之间的力学关系可得出法向接触刚度 S_n 和切向接触刚度 S_τ 的表达式:

$$S_n = - \frac{4\pi R G_c (1 - v_c) k_n}{1 - 2v_c \Delta_n},$$

$$S_\tau = - 2\pi R G_c \frac{k_\tau}{\Delta_\tau},$$

$$k_n = \int_0^\alpha \frac{H_n(t) t dt}{\varepsilon + t^2/2},$$

$$k_\tau = \int_0^\alpha \frac{H_\tau(t) t dt}{\varepsilon + t^2/2}. \quad (1)$$

式中, G_c 为胶结物剪切模量; v_c 为胶结物的泊松比; k_n 和 k_τ 分别正比于作用在颗粒上的法向力和切向力; $H_n(t)$ 和 $H_\tau(t)$ 分别为胶结物的法向和切向压缩量; Δ_n 和 Δ_τ 分别表示力所引起的颗粒的法向和切向压缩量; ε 为胶结物中心厚度 h 与颗粒半径的比值(归一化的胶结物中心厚度); α 为胶结半径与颗粒半径的比值(归一化的胶结半径)。

利用式(1)并结合等效介质模型^[2,16-18],可得疏松砂岩的体积模量 K_{eff} 和剪切模量 G_{eff} :

$$K_{\text{eff}} = \frac{n(1 - \varphi_0)}{12\pi R} S_n,$$

$$G_{\text{eff}} = \frac{n(1 - \varphi_0)}{20\pi R} \left(S_n + \frac{3}{2} S_\tau \right). \quad (2)$$

式中, n 为每个颗粒周围与之接触的颗粒数; φ_0 为临界孔隙度。

式(1)中考虑了胶结物中心厚度 h 的影响,只要获知归一化胶结半径 α 的表达式,就可由式(1)、(2)求取颗粒直接接触(孔隙式胶结)和颗粒不直接接触(基底式胶结)两种胶结模式下的疏松砂岩弹性模量和声波速度。Jack Dvorkin 等在假设“胶结物中心厚度为 0”的前提下,对胶结物仅分布在颗粒接触处(分布方式 1)或均匀分布在颗粒的周围(分布方式 2)两种分布形式推导出 α 的表达式^[5]:

$$\text{分布方式 1} \quad \alpha = \frac{a}{R} = 2 \left[\frac{\varphi_0 - \varphi}{3n(1 - \varphi_0)} \right]^{0.25}, \quad (3)$$

$$\text{分布方式 2} \quad \alpha = \frac{a}{R} = \left[\frac{2(\varphi_0 - \varphi)}{3(1 - \varphi_0)} \right]^{0.5}. \quad (4)$$

式中, φ 为疏松砂岩孔隙度。

由于式(3)、(4)均是在 h 为 0 的假设前提下得到的,仅适用于颗粒直接接触的孔隙式胶结疏松砂岩,对于基底式胶结的疏松砂岩,由于颗粒之间基本无直接接触,即 h 不为 0,所以无法用 CCT 模型准确得到基底式胶结疏松砂岩的声波速度。

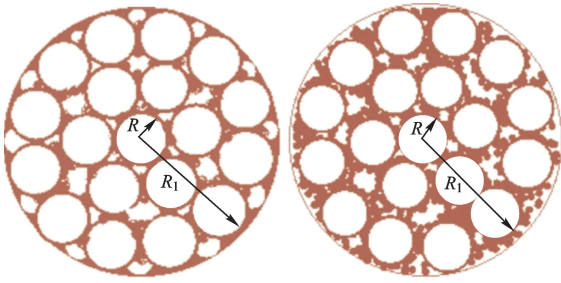
2 CCT 模型的修正

2.1 基底式胶结疏松砂岩模型

对于基底式胶结疏松砂岩,假设疏松砂岩由球状颗粒堆积而成,胶结物中心厚度 h 不为 0,颗粒之间无直接接触,其胶结物存在两种分布形式,其模型可用图 2 中的(a)和(b)表示。

图 2 中,球状颗粒半径为 R ,球状岩石半径为

R_1 。根据图2所示模型,可对原CCT模型中胶结半径表达式进行修正,推导考虑胶结物中心厚度的归一化胶结半径表达式,使改进后的模型能够应用于基底式胶结的疏松砂岩。



(a) 胶结物仅分布在颗粒之间 (b) 胶结物均匀分布在颗粒表面

图2 基底式胶结疏松砂岩模型

Fig.2 Models of basal cemented loose sandstone

2.2 归一化胶结半径 α 表达式修正

2.2.1 胶结物分布方式 1

由图1可得胶结物体积 V 的表达式如下:

$$V = \int_0^a 2\pi r \left(h + \frac{r^2}{2R} \right) dr = \pi a^2 h + \frac{a^4}{4} \frac{\pi}{R}. \quad (5)$$

由式(5)可知,单个颗粒上胶结物的体积为

$$V_1 = \left(\pi a^2 h + \frac{a^2}{4} \frac{\pi}{R} \right) n. \quad (6)$$

式中, n 为每个颗粒周围的颗粒数。

设图2(a)岩石中颗粒总数为 m ,则整个岩石的总的胶结物体积为

$$V_2 = \left(\pi a^2 h + \frac{a^2}{4} \frac{\pi}{R} \right) nm. \quad (7)$$

岩石的总体积为

$$V_3 = \frac{4}{3} \pi R^3. \quad (8)$$

岩石中的颗粒所占体积为

$$V_4 = \frac{4}{3} \pi m R^3. \quad (9)$$

由临界孔隙度^[19-20]的定义可知, V_3 与 V_4 存在如下关系:

$$V_4 = (1 - \varphi_0) V_3. \quad (10)$$

式中, φ_0 表示岩石的临界孔隙度。

由式(8),(9),(10)可得

$$R_1^3 = \frac{mR^3}{1 - \varphi_0}. \quad (11)$$

由式(7),(8),(11)可得胶结物在岩石中的体积分数为

$$\varphi_c = \frac{\left(\pi a^2 h + \frac{a^2}{4} \frac{\pi}{R} \right) nm}{\frac{4}{3} \pi \frac{mR^3}{1 - \varphi_0}}. \quad (12)$$

设岩石孔隙度为 φ ,则有

$$\varphi_c = \varphi_0 - \varphi, \quad (13)$$

联立式(12)和(13),可得

$$\frac{3n}{16} \alpha^4 + \frac{3n\varepsilon}{4} \alpha^2 - \frac{\varphi_0 - \varphi}{1 - \varphi_0} = 0. \quad (14)$$

通过求解式(14)可得

$$\alpha = \sqrt{-2\varepsilon + 2\sqrt{\varepsilon^2 + \frac{4}{3n} \frac{\varphi_0 - \varphi}{1 - \varphi_0}}}. \quad (15)$$

若取 $\varepsilon = 0$,则式(15)可表示为

$$\alpha = 2 \left[\frac{\varphi_0 - \varphi}{3n(1 - \varphi_0)} \right]^{0.25}. \quad (16)$$

式(16)与式(3)相同,式(3)为胶结物中心厚度为0时式(15)的一个特例。

2.2.2 胶结物分布方式 2

如图2(b)所示,若胶结物均匀分布在颗粒上,则岩石颗粒上胶结物的厚度为

$$h = \frac{a^2}{2R}. \quad (17)$$

故岩石中胶结物的体积为

$$V_2 = \left[\frac{4}{3} \pi \left(R + \frac{a^2}{2R} \right)^3 - \frac{4}{3} \pi R^3 \right] m = \frac{4}{3} \pi m \left(\frac{3}{2} a^2 R + \frac{3}{4} \frac{a^4}{R} + \frac{a^6}{8R^3} \right). \quad (18)$$

由式(8),(11),(18)可得胶结物在岩石中的体积分数为

$$\varphi_c = \frac{\frac{4}{3} \pi m \left(\frac{3}{2} a^2 R + \frac{3}{4} \frac{a^4}{R} + \frac{a^6}{8R^3} \right)}{\frac{4}{3} \pi \frac{mR^3}{1 - \varphi_0}}. \quad (19)$$

根据孔隙度与临界孔隙度的定义有

$$\varphi_c = \varphi_0 - \varphi. \quad (20)$$

联立式(19)和(20),通过整理可得

$$\frac{3}{2} \alpha^2 + \frac{3}{4} \alpha^4 + \frac{1}{8} \alpha^6 = \frac{\varphi_0 - \varphi}{1 - \varphi_0}. \quad (21)$$

由 $\alpha < 1$ 可知, $\alpha^6 \ll \alpha^4 \ll \alpha^2$,故可忽略 α^6 和 α^4 ,由此可得归一化胶结半径如下:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2(\varphi_0 - \varphi)}{3(1 - \varphi_0)}}. \quad (22)$$

式(22)与式(4)相同,说明胶结物中心厚度对第二种胶结物分布方式下的归一化胶结半径影响可以忽略。

在得到修正后的归一化胶结半径表达式(15)和(22)后,结合式(1)和(2)便可求取基底式胶结下(一般为泥质胶结)的疏松砂岩弹性模量和声波速度。由于CCT模型的限制(胶结半径不宜过

大)^[10],改进模型适用性与 CCT 模型类似,主要受孔隙度控制。结合 CCT 模型适用范围^[11,21],并通过改进模型应用效果进行测试,认为对于第一种分布方式的基底式胶结疏松砂岩,改进模型的最佳应用范围为孔隙度大于 25%,对于第二种分布方式的基底式胶结疏松砂岩,改进模型的最佳应用范围为孔隙度大于 15%。

3 改进模型的统计近似式

利用改进后的 CCT 模型求取基底式胶结的疏松砂岩的弹性模量,需要利用数值解法求解式(1)中的 $-k_n/\Delta_n$ 和 $-k_\tau/\Delta_\tau$ ^[10],其编程复杂,计算速度慢,实际应用困难。为了提高模型的计算速度,需要对模型进行近似,在保证计算精度的前提下提高模型的计算效率。利用数值计算的结果,对其进行统计回归分析,可得

$$-K_n/\Delta_n = A_n(\Lambda_n, \varepsilon)\alpha^2 + B_n(\Lambda_n, \varepsilon)\alpha + C_n(\Lambda_n, \varepsilon), \quad \varepsilon \leq 0.008 \text{ 时}$$

$$A_n = -(6216.7\varepsilon^2 - 22.783\varepsilon + 0.1646) \times \Lambda_n^{(13667\varepsilon^2 - 55.333\varepsilon - 0.658)},$$

$$B_n = (9916.7\varepsilon^2 - 35.883\varepsilon + 0.5643) \times \Lambda_n^{(6166.7\varepsilon^2 - 25.833\varepsilon - 0.514)},$$

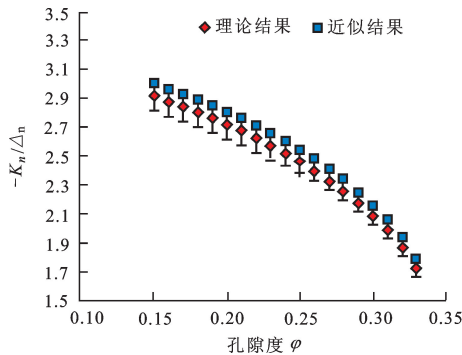
$$C_n = -(-183.33\varepsilon^2 - 0.5833\varepsilon - 0.0037) \times \Lambda_n^{(12667\varepsilon^2 + 132.67\varepsilon - 1.112)},$$

$$0.008 < \varepsilon \leq 0.05 \text{ 时}$$

$$A_n = -(-43\varepsilon^2 + 8.5493\varepsilon + 0.1451) \times \Lambda_n^{(2.381\varepsilon^2 + 14.445\varepsilon - 0.7159)},$$

$$B_n = (-276.67\varepsilon^2 + 24.839\varepsilon + 0.4696) \times \Lambda_n^{(-95.238\varepsilon^2 + 11.605\varepsilon - 0.5706)},$$

$$C_n = -(-9.2381\varepsilon^2 + 1.8876\varepsilon - 0.0145) \times$$



$$\Lambda_n^{(-472.38\varepsilon^2 + 38.719\varepsilon - 1.1876)}. \quad (23)$$

$$-K_\tau/\Delta_\tau = A_\tau(\Lambda_\tau, \varepsilon)\alpha^2 + B_\tau(\Lambda_\tau, \varepsilon)\alpha + C_\tau(\Lambda_\tau, \varepsilon), \quad \varepsilon \leq 0.004 \text{ 时}$$

$$A_\tau = -(-189200\varepsilon^2 + 659.2\varepsilon + 0.5819) \times \Lambda_\tau^{(-45500\varepsilon^2 + 148.5\varepsilon - 0.389)},$$

$$B_\tau = (-151900\varepsilon^2 + 622.1\varepsilon + 1.7838) \times \Lambda_\tau^{(-15000\varepsilon^2 + 56\varepsilon - 0.271)},$$

$$C_\tau = -(-21000\varepsilon^2 - 69.8\varepsilon - 0.0269) \times \Lambda_\tau^{(-95000\varepsilon^2 + 423\varepsilon - 0.688)}.$$

$$0.004 < \varepsilon \leq 0.05 \text{ 时}$$

$$A_\tau = -(-124.33\varepsilon^2 - 30.79\varepsilon + 1.9189) \times \Lambda_\tau^{(-109.21\varepsilon^2 + 0.5713\varepsilon - 0.1583)},$$

$$B_\tau = (-407.4\varepsilon^2 + 1.1729\varepsilon + 3.2628) \times \Lambda_\tau^{(-51.498\varepsilon^2 + 5.2906\varepsilon - 0.1819)},$$

$$C_\tau = -(-147.98\varepsilon^2 + 11.199\varepsilon - 0.018) \times \Lambda_\tau^{(-128.33\varepsilon^2 + 11.621\varepsilon - 0.3323)}.$$

胶结物分布方式 1:

$$\alpha = \sqrt{-2\varepsilon + 2\sqrt{\varepsilon^2 + \frac{4}{3n} \frac{\varphi_0 - \varphi}{1 - \varphi_0}}},$$

胶结物分布方式 2: $\alpha = \sqrt{\frac{2(\varphi_0 - \varphi)}{3(1 - \varphi_0)}}$,

$$\Lambda_n = \frac{2G_c(1-v)(1-v_c)}{\pi G} \Lambda_\tau = \frac{G_c}{\pi G}.$$

统计回归范围如下: $\alpha \in [0.1, 0.7]$, $v \in [0.08, 0.20]$, $\Lambda_n \in [0.007, 0.04]$, $\Lambda_\tau \in [0.0007, 0.014]$, $\varepsilon \in [0, 0.05]$ 。

在统计回归范围内,理论计算结果和统计近似式计算结果的相关系数达到 0.98 以上,计算误差小于 3% (图 3)。

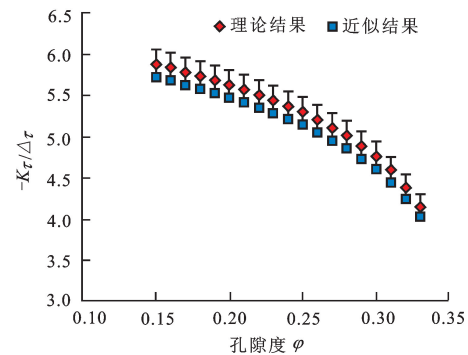


图 3 理论计算结果与近似式计算结果对比

Fig. 3 Comparison of theoretical results and approximation results

上述统计范围对于一般疏松砂岩储层都是适用的。故在改进模型适用的孔隙度范围内,都可利

用式(23),并结合式(1)和(2),快速求出基底式胶结疏松砂岩的弹性模量和声波速度。

4 模型应用实例

为了考察修正模型的预测精度,制作了18块基底式胶结(第二种分布方式)的人造砂岩,图4为其中一块岩样的铸体薄片(蓝色为铸体)。其中,砂岩骨架颗粒选为石英,体积模量为38 GPa,剪切模量44 GPa,密度 2.65 g/cm^3 ;胶结物为环氧树脂和高岭

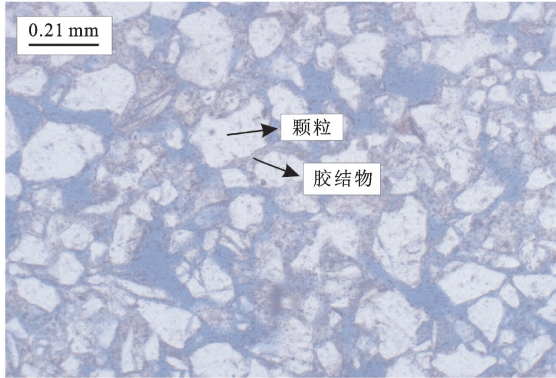


图4 人造疏松砂岩铸体薄片

Fig. 4 Thin section of man-made loose core sample

石的混合物,体积模量为2.24 GPa,剪切模量为1.57 GPa,密度 1.38 g/cm^3 ;根据砂岩颗粒体积(可由砂岩颗粒总质量和密度求出)及岩样的总体积,

求得岩心临界孔隙度为40%;胶结物含量为临界孔隙度与岩心孔隙度的差值;每个颗粒周围的颗粒数约为8.5;通过对铸体薄片的测量得归一化胶结物中心厚度约为0.03。

该批人工岩样虽然孔隙度较小(平均孔隙度20%),但是胶结物模量很低,颗粒之间基本无直接接触(由铸体薄片可看出),导致岩石整体模量很小,测量的声波速度很低(表1、表2),符合疏松砂岩的特点,属于基底式胶结的疏松砂岩。由于人工岩样的最小孔隙度为14.7%,符合改进模型的应用条件,可利用改进模型及其近似式进行速度预测。岩样声波速度的测量使用中国石油大学(华东)研究制造的声波多参数测量仪,仪器参数如下:纵/横波晶片频率为1.2 MHz/0.6 MHz,探头纵/横波频率为0.25 MHz/0.12 MHz,纵/横波探头各自由多个晶片组合而成。纵波速度测量相对不确定度小于0.5%,横波速度测量相对不确定度小于1%^[22]。为保证试验精度,在常温常压下对试验样品进行了三次重复测量。试验测量结果与CCT模型、修正后的CCT模型以及修正模型的近似公式的纵、横波速度预测结果如表1和表2所示。

表1 纵波试验测量值与模型预测值对比结果

Table 1 Comparison of compressional wave velocities measured by experiments and those predicted by models

岩样号	孔隙度 $\varphi/\%$	胶结物体积分数 $\varphi_c/\%$	纵波速度 $v_p/(m \cdot s^{-1})$				误差 $\omega_p/\%$		
			试验测量	CCT模型	改进模型	近似模型	CCT模型	改进模型	近似模型
1	17.1	22.9	2434	2875	2311	2316	18.03	-5.14	-4.92
2	15.0	25.0	2442	2892	2340	2345	18.41	-4.18	-3.96
3	15.7	25.3	2445	2892	2340	2345	18.25	-4.31	-4.09
4	20.8	19.2	2151	2844	2259	2264	32.22	5.01	5.24
5	25.3	14.7	2130	2770	2141	2146	30.05	0.52	0.75
6	15.5	24.5	2505	2892	2340	2345	15.42	-6.61	-6.39
7	19.2	20.8	2118	2855	2278	2282	34.81	7.53	7.76
8	14.7	25.3	2320	2892	2340	2345	24.64	0.86	1.09
9	21.8	18.2	2190	2819	2217	2222	28.69	1.24	1.45
10	25.6	14.4	2082	2750	2111	2116	32.08	1.37	1.61
11	17.6	22.4	2392	2866	2295	2230	19.78	-4.08	-3.87
12	31.4	8.6	1896	2612	1905	1914	37.70	0.45	0.91
13	28.8	11.2	1856	2677	2001	2007	44.27	7.82	8.18
14	16.3	23.7	2488	2884	2326	2331	15.90	-6.52	-6.31
15	20.5	19.5	2179	2832	2239	2244	29.99	2.76	2.98
16	21.9	18.1	2103	2819	2217	2222	34.01	5.42	5.65
17	23.2	16.8	2000	2804	2194	2199	40.21	9.71	9.94
18	15.4	24.6	2521	2892	2340	2345	14.71	-7.18	-6.96

由表1和表2可得,利用CCT模型预测的纵波速度平均高出试验测量值27%以上,横波速度平均高出试验测量值33%以上。这是因为原始模型假设的是颗粒之间直接接触,而实际岩样中颗粒无直接接触,导致原始模型估计的岩石模量过大,速度过

高。而利用修正模型预测速度,考虑了胶结物中心厚度对砂岩模量的影响,可以得到更准确的预测值。利用修正模型及其近似模型预测的纵波速度与试验结果比较表明,其偏差在10%以内,而横波速度预测值与试验结果偏差在12%以内。由此可见,较

CCT 模型,改进后的模型能够更好地预测基底式胶结的疏松砂岩的声波速度。同时,改进模型近似式

预测精度与改进模型基本相当,说明改进模型近似式是改进模型的良好近似。

表 2 横波试验测量值与模型预测值对比结果

Table 2 Comparison of shear wave velocities measured by experiments and those predicted by models

岩样号	孔隙度 $\varphi/\%$	胶结物体积分数 $\varphi_c/\%$	横波速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$				误差 $\omega_s/\%$		
			试验测量	CCT 模型	改进模型	近似模型	CCT 模型	改进模型	近似模型
1	17.1	22.9	1424	1931	1511	1518	35.53	6.04	6.60
2	15.0	25.0	1496	1941	1530	1538	30.21	2.63	3.17
3	15.7	25.3	1455	1941	1530	1538	33.41	5.15	5.71
4	20.8	19.2	1474	1904	1463	1470	29.16	-0.73	-0.24
5	25.3	14.7	1482	1864	1399	1406	25.81	-5.63	-5.16
6	15.5	24.5	1449	1941	1530	1538	33.90	5.54	6.10
7	19.2	20.8	1548	1918	1489	1496	23.89	-3.86	-3.38
8	14.7	25.3	1525	1941	1530	1538	27.30	0.33	0.87
9	21.8	18.2	1385	1895	1449	1456	36.87	4.64	5.15
10	25.6	14.4	1393	1852	1371	1386	32.98	-1.01	-0.50
11	17.6	22.4	1519	1925	1500	1508	26.69	-1.27	-0.76
12	31.4	8.6	1219	1763	1243	1252	44.70	1.99	2.72
13	28.8	11.2	1374	1805	1306	1314	31.41	-4.93	-4.36
14	16.3	23.7	1405	1936	1520	1528	37.78	8.21	8.78
15	20.5	19.5	1388	1912	1476	1484	37.69	6.36	6.89
16	21.9	18.1	1476	1895	1449	1456	28.38	-1.86	-1.37
17	23.2	16.8	1307	1886	1434	1441	44.26	9.65	10.19
18	15.4	24.6	1384	1941	1530	1538	40.21	10.50	11.10

5 结 论

(1)当胶结物仅分布在颗粒之间时,CCT 模型中的胶结半径表达式是一般表达式在胶结物中心厚度为 0 下的特例;当胶结物均匀分布在颗粒的周围,胶结物中心厚度对归一化胶结半径的影响可以忽略,表达式与 CCT 模型相同。应用胶结半径的一般表达式,可将 CCT 模型应用范围扩展到基底式胶结的疏松砂岩。

(2)改进后的模型与原模型类似,需要通过数值方法求解积分方程求得疏松砂岩模量,过程复杂,计算效率低,实际应用困难,通过统计近似得到了理论模型的统计近似模型,由其相关系数和误差可知统计模型是理论模型的良好近似,故可在基本不降低计算精度的前提下,有效提高计算效率。

(3)对于基底式胶结疏松砂岩,由于基底式胶结疏松砂岩的胶结物中心厚度不为 0,利用不考虑胶结物中心厚度的 CCT 模型将导致过大的速度和模量预测,而使用胶结半径一般表达式修正的 CCT 模型及其近似式相对 CCT 模型能够更好地预测基底式胶结的疏松砂岩声波速度。

参考文献:

[1] MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact [J]. Journal of Applied Mechanics, 1949,17:259-268.

[2] WALTON K. The effective elastic moduli of a random packing of spheres [J]. Mech Phys Solids, 1987,35: 213-226.

[3] DIGBY P J. The effective elastic moduli of porous granular rocks[J]. Appl Mech,1981,48:803-808.

[4] BRANDT H. A study of the speed of sound in porous granular media[J]. Appl Mech, 1955,22:479-486.

[5] DVORKIN J, NUR A. Elasticity of high-porosity sandstones; theory for two North Sea data sets [J]. Geophysics, 1996,61(5):1363-1370.

[6] BAHRAMI M, YOVANOVICH M M, CULHAM J R. A compact model for spherical rough contacts [J]. Journal of Tribology, 2005,127:884-889.

[7] 刘瑜,夏唐代. 砂土颗粒粗糙度对剪切波速影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(2):285-290.
LIU Yu, XIA Tang-dai. Experimental study on influence of particle roughness on shear wave velocity of sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011,33(2):285-290.

[8] 夏唐代,刘瑜,吴明,等. 基于颗粒接触理论的深层砂土剪切波速度[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):99-103.
XIA Tang-dai, LIU Yu, WU Ming, et al. Shear wave velocity in deep buried sand based on spheres-contact theory [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011,43(4):99-103.

[9] 邓继新,韩德华,王尚旭. 应力松弛对颗粒物质弹性性质的影响及等效介质模型校正研究[J]. 地球物理学

- 报,2011,54(4):1079-1089.
- DENG Ji-xin, HAN De-hua, WANG Shang-xu. A study of the influence of stress relaxation on the elastic properties of granular materials and the calibration of effective media model [J]. *Chinese J Geophys*, 2011, 54(4): 1079-1089.
- [10] DVORKIN J, NUR A, YIN H Z. Effective properties of cemented granular materials[J]. *Mechanics of Materials*, 1994, 18:351-366.
- [11] DVORKIN J, BERRYMAN J, NUR A. Elastic moduli of cemented sphere packs [J]. *Mechanics of Materials*, 1999, 31:461-469.
- [12] AVSETH P. Combining rock physics and sedimentology for seismic reservoir characterization of North Sea turbidite systems[D]. Stanford: Stanford University, 2000.
- [13] 宋丽莉,葛洪魁,王宝善. 疏松砂岩弹性波速模型的研究[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2004, 28(6): 38-40.
- SONG Li-li, GE Hong-kui, WANG Bao-shan. Study of model for elastic wave velocity of unconsolidated sandstone[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2004, 28(6): 38-40.
- [14] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- [15] DVORKIN J, YIN H Z. Contact laws for cemented grains: implications for grain and cement failure[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1995, 32(17):2497-2510.
- [16] WINKLER K W. Contact stiffness in granular and porous materials: comparison between theory and experiment [J]. *Geophysical Research Letters*, 1983, 10: 1073-1076.
- [17] 陈颢,黄庭芳. 岩石物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2001.
- [18] 葛瑞·马沃可,塔潘·木克基,杰克·德沃金. 岩石物理手册:孔隙介质中地震分析工具[M]. 徐海滨,戴建春,译. 合肥:中国科学技术大学出版社,2008.
- [19] NUR A. Critical porosity and the seismic velocities in rocks[J]. *Eos, Trans Am Geophys Union*, 1992, 73: 43-66.
- [20] 郭继亮,牛滨华,孙春岩,等. 基于临界孔隙度模型的地震波传播[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3813-3820.
- GUO Ji-liang, NIU Bing-hua, SUN Chun-yan, et al. Seismic wave propagation based on critical porosity model[J]. *Chinese J Geophys*, 2012, 55(11): 3813-3820.
- [21] AVSETH P, SKJEI N. Rock physics modeling of static and dynamic reservoir properties-a heuristic approach for cemented sandstone reservoirs[J]. *The Leading Edge*, 2011, 30(1): 90-96.
- [22] 韩学辉,李来林,杨龙,等. 塔南凝灰质火山碎屑岩储层岩石物理试验研究[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2012, 36(3): 69-75.
- HAN Xue-hui, LI Lai-lin, YANG Long, et al. Petrophysical experimental research in Tanan tuffaceous pyroclastic rock reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(3): 69-75.

(编辑 修荣荣)

(上接第75页)

- [4] MIKOLAJCZYK K, SCHIMID C. A Performance evaluation of local descriptors [J/OL]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(10): 1615-1630. [2012-11-05] http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1498756&tag=1.
- [5] YAN K, SUKTHANKAR R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors[C/OL]. // *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Volume 2)*, June 27-July 2, 2004: 506-513. [2012-11-06] http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1315206.
- [6] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al. Speeded-up robust features (SURF)[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [7] MOREL J M, YU G S. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison[J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Image Sciences*, 2009, 2(2): 438-469.
- [8] 李芳芳,肖本林,贾永红,等. SIFT算法优化及其用于遥感影像的自动配准[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2009, 34(10): 1245-1249.
- LI Fang-fang, XIAO Ben-lin, JIA Yong-hong, et al. Improved SIFT algorithm and its application in automatic registration of remotely-sensed imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University: Edition of Natural Science*, 2009, 34(10): 1245-1249.
- [9] SCHMID C, MOHR R, BAUCKHAGE C. Evaluation of interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 37(2): 151-172.

(编辑 修荣荣)