

韩学辉,郭俊鑫,李峰弼等. 2014. 连续胶结声速理论胶结半径表达式的一般性推广及应用. 地球物理学报, 57(7): 2235-2243, doi:10.6038/cjg20140718.

Han X H, Guo J X, Li F B, et al. 2014. Generalization of the expression of cementation radius in Contact Cement Theory and its application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7): 2235-2243, doi:10.6038/cjg20140718.

连续胶结声速理论胶结半径表达式的一般性推广及应用

韩学辉¹, 郭俊鑫¹, 李峰弼¹, 杨龙²

1 中国石油大学地球科学与技术学院, 青岛 266580

2 新疆油田实验检测研究院, 克拉玛依 834000

摘要 针对 Dvorkin 和 Nur (1996) 提出的连续胶结声速理论(CCT)中的胶结半径表达式仅适用于孔隙式胶结疏松砂岩的局限性,通过胶结物与颗粒之间的空间几何关系,在胶结物中心厚度不为零的前提下,推导了胶结物胶结半径的一般表达式,并考察了胶结物中心厚度对疏松砂岩声波速度的影响,探讨了该表达式在基底式胶结疏松砂岩纵横波速度预测中的应用. 结果表明:随胶结物中心厚度变大,纵、横波速度均减小,且孔隙度越大,胶结物含量越少,速度下降越快;孔隙度或胶结物含量不变时,纵横波速比随胶结物中心厚度的增大而增大;纵横波速比随孔隙度的变化规律与胶结物中心厚度有关,当胶结物中心厚度较小时,孔隙度增大,纵横波速比略微减小,而当胶结物中心厚度较大时,孔隙度的增大会引起纵横波速比略微增大;对于基底式胶结疏松砂岩,使用推广后表达式修正的 CCT 模型相对原 CCT 模型能够更好地预测其声波速度,同时发现,利用其纵横波速比无法预测由孔隙度或胶结物含量变化引起的疏松砂岩软硬的变化,但是在胶结物含量或孔隙度不变的情况下,纵横波速比可指示由胶结物中心厚度变化引起的疏松砂岩软硬的变化.

关键词 连续胶结声速理论;声速;胶结半径;胶结物中心厚度;基底式胶结疏松砂岩

doi:10.6038/cjg20140718

中图分类号 P631

收稿日期 2013-03-20, 2014-05-29 收修定稿

Generalization of the expression of cementation radius in Contact Cement Theory and its application

HAN Xue-Hui¹, GUO Jun-Xin¹, LI Feng-Bi¹, YANG Long²

1 School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2 Research Institute of Experiment and Detection, Xinjiang Oilfield Company, Karamayi 834000, China

Abstract The general expressions of cementation radius in the loose sandstone are proposed on the basis of the geometry relationship between the grain and cement with the assumption that the contact thickness is not zero. The expressions of cementation radius of Contact Cement Theory (CCT) proposed by Dvorkin et al. (1996) don't consider the effect of contact thickness, which makes it only applicable for the pore cemented loose sandstone. To solve this problem, the general expressions of cementation radius are proposed. With the general expressions, the effect of contact thickness on the velocity of loose sandstone is analyzed and its application in the prediction of the compressional and shear wave velocity of basally cemented loose sandstone is

基金项目 国家油气专项(2011ZX05009-003)和国家留学基金管理委员会(201306455002)资助.

作者简介 韩学辉,男,1974年生,博士,副教授,研究方向为储层岩石物理. E-mail: hanxuehui@upc.edu.cn

discussed. The results show that when the contact thickness increases, the compressional and shear wave velocity decreases, the trend is more obvious when the porosity increases or the content of cement decreases. The ratio of compressional wave velocity to the velocity of shear wave (V_p/V_s) increases with the contact thickness if the porosity or cement content stays stable. V_p/V_s changes with porosity in different way for different contact thickness. When the thickness is small, the ratio decreases a little with the increase of porosity, but when the thickness becomes large, it goes in the other way. For the basally cemented loose sandstone, the modified model using the general expression of cementation radius predicts both the compressional and the shear wave velocity better than the original CCT, the study also shows that the change of the rigidity of the basally cemented loose sandstone caused by porosity or cement content change can't be predicted by V_p/V_s , but it can predict that caused by the change of contact thickness.

Keywords Contact Cement Theory; Acoustic velocity; Cementation radius; Contact thickness; Loose sandstone with basal cementation

1 引言

疏松砂岩油气藏是重要的油气藏类型之一,新增储量中相当大一部分来自疏松砂岩油气藏,老油田中也有相当比例的油气藏是疏松砂岩油气藏. 声波测井与地震勘探作为重要的勘探手段之一,用于准确求取孔隙度等地质参数的前提是合适的声波速度模型.

疏松砂岩主要包括两大类,第一类为非固结疏松砂岩,如海底松散沉积物等,此类砂岩基本无胶结作用,适用的模型主要有: Herz-Mindlin 模型、Walton, Digby, Brandt 模型等 (Mindlin, 1949; Digby, 1981; Walton, 1987; Brandt, 1995; Dvorkin and Nur, 1996; Bahrami et al., 2005; 邓继新等, 2011; 刘瑜和夏唐代, 2011; 夏唐代等, 2011); 第二类为弱胶结的疏松砂岩, 主要适用的模型有: 连续胶结声速理论 (Contact Cement Theory, 简写 CCT)、恒量胶结模型等 (Dvorkin et al., 1994; Dvorkin and Yin, 1995; Dvorkin and Nur, 1996; Dvorkin et al., 1999; Avseth, 2000; 姜在兴, 2003; 宋丽莉等, 2004). 对于第一类疏松砂岩, 对应的模型较多, 对该类砂岩的弹性力学性质及声波传播规律都进行了详细的分析和描述, 在实际应用中也取得了较好的应用效果 (Dvorkin and Nur, 1996; Bahrami et al., 2005; 夏唐代等, 2011). 对于第二类疏松砂岩, 对应的模型较少, 已有模型基本都是在 CCT 理论上发展而来, 如恒量胶结模型即结合 CCT 理论和 Hashin-Strikman 模型而来. 由于第二类疏松砂岩不仅颗粒之间具有相互作用, 颗粒和胶结物之间还存在复杂的力学关系, 利用现有模

型预测其声波速度仍存在很大不足, 需要进一步发展其模型, 而 CCT 理论作为该类砂岩的主要模型, 可作为研究基础.

CCT 理论中, 其在假设“胶结物中心厚度为 0”的前提下得到了胶结物仅分布在颗粒接触处或均匀分布在颗粒周围两种方式的胶结半径表达式. 由于采用了“胶结物中心厚度为 0”的假设前提 (Dvorkin and Nur, 1996), CCT 理论仅适用于孔隙式胶结的疏松砂岩的纵横波速度预测, 无法推广应用到基底式等胶结模式疏松砂岩的纵横波速度预测.

针对以上问题, 本文在假设“胶结物中心厚度不为 0”的前提下, 推导了胶结物仅分布在颗粒接触处或均匀分布在颗粒的周围两种方式的胶结半径的一般表达式, 基于 CCT 理论考察了胶结物中心厚度对弱胶结疏松砂岩声波速度的影响, 并探讨了该表达式的应用.

2 CCT 理论中胶结半径的定义及其不足

由等效介质模型 (Digby, 1981; Winkler, 1983; Mavko et al., 1998; 陈颢和黄庭芳, 2001) 可知, 疏松砂岩的体积模量、剪切模量与法向、切向刚度的关系为

$$K_{\text{eff}} = \frac{n(1-\phi)}{12\pi R} S_n, \quad G_{\text{eff}} = \frac{n(1-\phi)}{20\pi R} \left(S_n + \frac{3}{2} S_r \right), \quad (1)$$

式中 n 为每个颗粒周围与之接触的颗粒数, R 为颗粒半径, ϕ 为孔隙度, K_{eff} 和 G_{eff} 分别为疏松砂岩的体积和剪切模量.

为求出(1)式中的法向和切向刚度, Dvorkin 等(1994)提出了 CCT 理论. 该理论使用的颗粒与胶结物之间的接触模型如图 1 所示, 作用在颗粒上的力为 F , 颗粒半径为 R , 颗粒之间有胶结物分布, 且胶结面为圆形, 半径为 a , 胶结物的中心厚度为 h , 体积为 V .

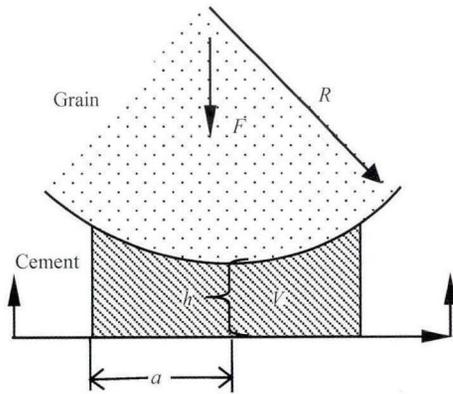


图 1 颗粒与胶结物之间的接触模型

Fig. 1 Contact model between the grain and cement

Dvorkin 等(1994)通过砂岩颗粒以及胶结物之间的力学关系, 得出法向接触刚度 S_n 和切向接触刚度 S_τ 的表达式为

$$\begin{aligned} S_n &= -\frac{4\pi R G_c (1 - \nu_c)}{1 - 2\nu_c} \frac{k_n}{\Delta_n}, \\ S_\tau &= -2\pi R G_c \frac{k_\tau}{\Delta_\tau}, \\ k_n &= \int_0^a \frac{H_n(t) t dt}{\epsilon + t^2/2}, \\ k_\tau &= \int_0^a \frac{H_\tau(t) t dt}{\epsilon + t^2/2}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 R 为颗粒半径, G_c 为胶结物剪切模量, ν_c 为胶结物的泊松比, k_n 和 k_τ 分别表示作用在颗粒上的法向力和切向力, $H_n(t)$ 和 $H_\tau(t)$ 分别表示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和胶结物的总的法向和切向压缩量, ϵ 表示胶结物中心厚度 h 与颗粒半径 R 的比值(归一化的胶结物中心厚度), α 表示胶结半径与颗粒半径的比值(归一化的胶结半径).

已知疏松砂岩体积模量和剪切模量, 即可求出其纵、横波速度为

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{\text{eff}} + 4/3 G_{\text{eff}}}{\rho}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{G_{\text{eff}}}{\rho}}, \quad (3)$$

式中 ρ 为疏松砂岩密度, V_p 和 V_s 分别为疏松砂岩的纵波和横波速度.

利用(1)、(2)、(3)式求取疏松砂岩模量与速度, 需要获知归一化胶结半径 α 的表达式. Dvorkin 和

Nur(1996)等人仅在归一化胶结物中心厚度 ϵ 为 0 (颗粒直接接触)的前提下, 给出了两种胶结物分布形式对应的胶结半径表达式为

$$\text{分布方式 1: } \alpha = \frac{a}{R} = 2 \left[\frac{\phi_0 - \phi}{3n(1 - \phi_0)} \right]^{0.25}, \quad (4)$$

$$\text{分布方式 2: } \alpha = \frac{a}{R} = \left[\frac{2(\phi_0 - \phi)}{3(1 - \phi_0)} \right]^{0.5}, \quad (5)$$

对于分布方式 1, 胶结物仅分布在颗粒接触处; 对于分布方式 2, 胶结物均匀分布在颗粒表面. 由于(4)、(5)式假设归一化胶结物中心厚度 ϵ 为 0 (颗粒直接接触), 故仅适用于孔隙式胶结, 与基底式胶结等胶结模式的地质特征不相符. 因此, (4)和(5)式无法应用于基底式胶结的疏松砂岩声波速度预测, 需要考虑胶结物中心厚度对胶结半径的影响, 推导更一般的胶结半径表达式, 应用于基底式胶结疏松砂岩声波速度的预测.

3 CCT 理论中胶结半径的一般性表达式的推导

3.1 基底式胶结疏松砂岩模型

对于基底式胶结疏松砂岩, 假设其由球状颗粒堆积而成, 胶结物中心厚度 h 不为 0, 则其模型可用图 2 表示.

图 2 中, 球状颗粒半径为 R , 球状岩石半径为 R_1 , 胶结物只分布在两颗粒之间(分布方式 1, 图 2a)或者均匀分布在砂岩颗粒表面(分布方式 2, 图 2b).

3.2 胶结物分布方式 1 下归一化胶结半径 α 一般表达式的推导

由图 1, 颗粒的每个胶结处的胶结物体积 V 表示为

$$V = \int_0^a \left(h + \frac{r^2}{2R} \right) 2\pi r dr = \pi a^2 h + \frac{a^4}{4} \frac{\pi}{R}, \quad (6)$$

则整个岩石的总的胶结物体积为

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

式中 n 表示每个颗粒周围的颗粒数(配位数), m 表示图 2a 所示岩石的颗粒数.

故胶结物在岩石中的含量为

$$C_1 = \frac{\left(\pi a^2 h + \frac{a^4}{4} \frac{\pi}{R} \right) nm}{\frac{4}{3} \pi R_1^3}, \quad (8)$$

由临界孔隙度与孔隙度的定义可知(Nur, 1992; 郭继亮等, 2012), 胶结物含量也可表示为

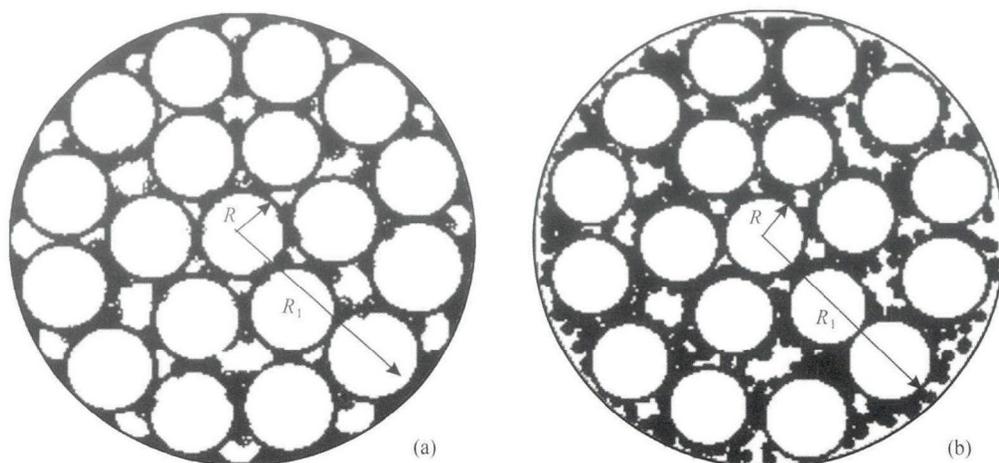


图2 疏松砂岩模型

(a) 胶结物仅分布在颗粒之间的基底式胶结疏松砂岩模型; (b) 胶结物均匀分布在颗粒表面时的基底式胶结疏松砂岩模型.

Fig. 2 The model of loose sandstone with basal cementation

(a) The basal cemented loose sandstone with the cement only distributed between the grains;

(b) The basal cemented loose sandstone with the cement evenly distributed around the grains.

$$C_1 = \phi_0 - \phi, \quad (9)$$

式中 ϕ 与 ϕ_0 分别表示岩石的孔隙度与临界孔隙度.

故有:

$$\frac{(\pi a^2 h + \frac{a^1}{4} \frac{\pi}{R}) nm}{\frac{4}{3} \pi R_1^3} = \phi_0 - \phi, \quad (10)$$

岩石总体积 V_3 与岩石中颗粒所占体积 V_1 存在如下关系为

$$V_1 = (1 - \phi_0) V_3, \quad (11)$$

式中 V_3 与 V_1 的表达式分别为

$$V_3 = \frac{4}{3} \pi R_1^3, \quad V_1 = \frac{4}{3} \pi m R^3, \quad (12)$$

由(11),(12)式可得:

$$R_1^3 = \frac{m R^3}{1 - \phi_0}, \quad (13)$$

将(13)式代入(10)式,通过整理可得:

$$\frac{3n}{16} \alpha^4 + \frac{3n\epsilon}{4} \alpha^2 - \frac{\phi_0 - \phi}{1 - \phi_0} = 0, \quad (14)$$

式中 $\alpha = \frac{a}{R}$, 即归一化的胶结半径; $\epsilon = \frac{h}{R}$, 即归一化的胶结物中心厚度.

通过求解式(14)可得 α 的表达式为

$$\alpha = \sqrt{-2\epsilon + 2\sqrt{\epsilon^2 + \frac{4}{3n} \frac{\phi_0 - \phi}{1 - \phi_0}}}, \quad (15)$$

若取 $\epsilon=0$, 则(15)式可简化为

$$\alpha = 2 \left[\frac{\phi_0 - \phi}{3n(1 - \phi_0)} \right]^{0.25}. \quad (16)$$

式(16)与式(4)相同, 由此可知(4)式为胶结物中心厚度为 0 时(15)式的一个特例.

3.3 胶结物分布方式 2 下归一化胶结半径 α 一般表达式的推导

若胶结物均匀分布在颗粒上(图 2b), 则岩石颗粒上胶结物的厚度为

$$H = \frac{a^2}{2R}, \quad (17)$$

式中 a 为胶结半径; R 为颗粒半径.

故岩石中胶结物的体积为

$$\begin{aligned} V_5 &= \left[\frac{4}{3} \pi \left(R + \frac{a^2}{2R} \right)^3 - \frac{4}{3} \pi R^3 \right] m \\ &= \frac{4}{3} \pi m \left(\frac{3}{2} a^2 R + \frac{3}{4} \frac{a^4}{R} + \frac{a^6}{8R^3} \right), \end{aligned} \quad (18)$$

故胶结物在岩石中的含量为

$$C_2 = \frac{\frac{4}{3} \pi m \left(\frac{3}{2} a^2 R + \frac{3}{4} \frac{a^4}{R} + \frac{a^6}{8R^3} \right)}{\frac{4}{3} \pi \frac{m R^3}{1 - \phi_0}}. \quad (19)$$

根据孔隙度与临界孔隙度的定义有

$$C_2 = \phi_0 - \phi, \quad (20)$$

联立(19)式和(20)式, 通过整理可得

$$\frac{3}{2} \alpha^2 + \frac{3}{4} \alpha^4 + \frac{1}{8} \alpha^6 = \frac{\phi_0 - \phi}{1 - \phi_0}, \quad (21)$$

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为

$$\alpha = \sqrt{\frac{2(\phi_0 - \phi)}{3(1 - \phi_0)}}. \quad (22)$$

式(22)与式(5)相同, 与胶结物中心厚度无关, 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. 得到(15)式和(22)式后,

结合(1)式、(2)式及(3)式,可求得基底式胶结疏松砂岩的模量和声波速度,并可讨论胶结物中心厚度对此类疏松砂岩声波速度的影响。

4 胶结物中心厚度对疏松砂岩声波速度的影响

4.1 理论计算条件

为了定量分析胶结物中心厚度对疏松砂岩声波速度的影响,使用如下参数进行数值计算:砂岩颗粒选用石英颗粒,体积和剪切模量分别为 38 GPa 和 44 GPa,密度为 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;胶结物选用制作人工疏松砂岩时常用的环氧树脂(Dvorkin et al., 1999),体积和剪切模量分别为 6.8 GPa 和 2 GPa,密度为 $0.98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;砂岩临界孔隙度为砂岩颗粒随机紧密排列时的孔隙度(Dvorkin and Nur, 1996),大小为 36%,此时对应的配位数约为 9(Murphy, 1982);孔隙度变化范围为 15%~35%;归一化的胶结物中心厚度变化范围为 0~0.05。

4.2 数值计算结果分析

使用上述参数,分别数值计算了孔隙度为 15%,20%,25%,30%,35%时两种胶结物分布方式下归一化胶结物中心厚度对疏松砂岩纵横波速度及纵横波速比的影响,归一化胶结物中心厚度变化范围为 0~0.05,结果如图 3 所示。

分析图 3 可得如下认识:

(1)在两种胶结物的分布方式下,声波速度随胶结物中心厚度的增大均减小。这主要是因为当胶结物中心厚度增大时,疏松砂岩的法向接触刚度和切向接触刚度减小,导致砂岩变得相对“柔软”,从而使其声波速度下降。

(2)孔隙度越大,胶结物中心厚度对声波速度的影响越大,声波速度随胶结物中心厚度的增大减小的越快。说明孔隙度越大,胶结物含量越少,疏松砂岩颗粒间的接触刚度及砂岩模量对胶结物中心厚度的变化越敏感,当孔隙度接近临界孔隙度时(如 35%),含极少胶结物,此时胶结物中心厚度的变化对疏松砂岩的接触刚度及模量影响很大,从而导致速度快速下降。

(3)两种胶结物分布形式下,疏松砂岩的纵横波速比均随胶结物中心厚度的增大而增大,说明随着胶结物中心厚度增大,横波速度减小的速率比纵波快。

(4)两种胶结物分布方式下,胶结物中心厚度不

变的情况下,疏松砂岩的纵横波速比随孔隙度的变化规律随胶结物中心厚度的变化而发生变化。当胶结物厚度较小时,随孔隙度增大,胶结物含量减小,纵横波速比略微减小,而当胶结物中心厚度较大时,趋势正好相反。分析认为,当胶结物中心厚度较小时,颗粒间处于接触或基本接触状态,此时其剪切模量随孔隙度增大而减小较慢,从而使纵波波速减小速率略大于横波减小速率,纵横波速比略微减小;当胶结物中心厚度达到一定值时,颗粒间不直接接触,剪切模量随孔隙度增大减小较快,导致纵横波速比随孔隙度增大而略微增大。

(5)相同孔隙度和胶结物中心厚度下,分布方式 1 对应的声波速度明显大于分布方式 2,这是因为分布方式 1 下两颗粒之间的胶结物含量比分布方式 2 大,使岩石的抗压缩和抗剪切能力均增强,即砂岩颗粒之间的法向刚度和切向刚度均增大,从而导致更高的横波和纵波速度。

5 推广表达式的应用

为了考察利用推广后的胶结半径表达式修正的 CCT 理论对基底式胶结疏松砂岩声波速度的预测精度,制作了 15 块基底式胶结的人造疏松砂岩,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 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;胶结物为环氧树脂和高岭石的混合物,体积模量为 2.24 GPa,剪切模量为 1.57 GPa,密度 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;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%,对应的配位数约为 8.5 个(Murphy, 1982);胶结物含量为临界孔隙度与岩心孔隙度的差值;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。

声波测量采用中国石油大学(华东)研究制造的声波多参数测量仪,仪器探头纵/横波频率:0.25 MHz/0.12 MHz。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%(韩学辉等, 2012)。为了保证测量精度,在常温常压下对干岩样进行了三次声波速度测量,并将测量结果(保留四位有效数字)与模型预测结果进行比较,如表 1 和表 2 所示。

比较改进模型与原模型预测的相对误差随孔隙度变化规律(图 5)可发现,原模型的纵、横波预测结果普遍高于实验测量值,平均相对误差分别高于

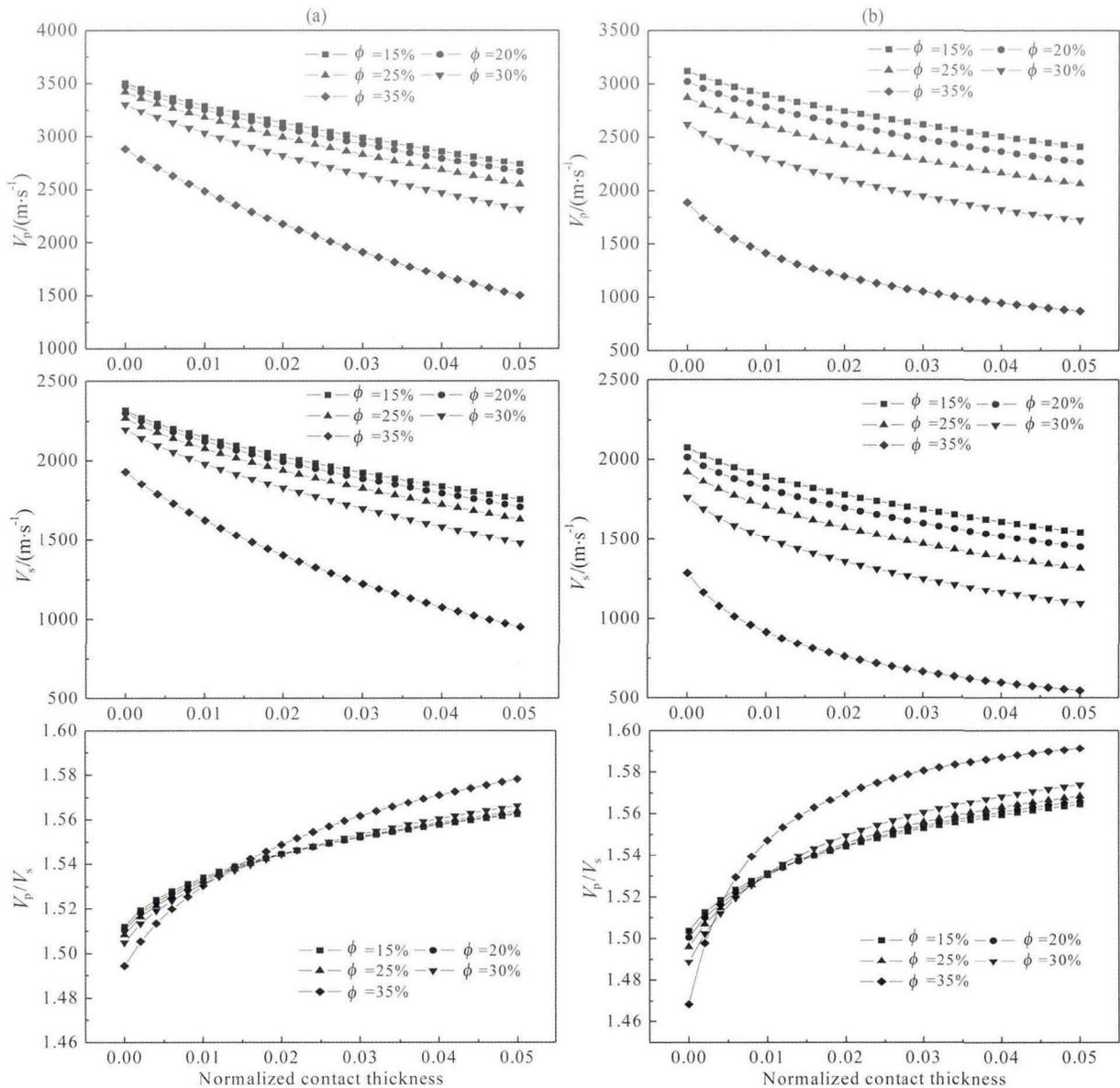


图3 胶结物中心厚度对疏松砂岩声波速度的影响

(a)分布方式1(胶结物分布在两颗粒之间)胶结物中心厚度对声波速度影响;(b)分布方式2(胶结物均匀分布在颗粒周围)胶结物中心厚度对声波速度影响.

Fig. 3 The effect of the thickness of the cement layer's center on the velocity of loose sandstone

(a)Arrangement 1(cement accumulates at the grain contacts);(b)Arrangement 2(cement evenly distributes around the grain).

28%和31%,属于系统误差;而改进模型纵、横波预测结果与实验结果偏差均在9%以内,且相对误差随机分布在正负之间,属于随机误差.考察原模型的假设条件可发现,原模型预测结果的系统误差主要来自模型的假设条件,其假设砂岩颗粒之间直接接触,从而导致岩石模量估计值过高,速度预测过大,而改进模型考虑了胶结物中心厚度的影响,从而使砂岩模量及速度的预测结果更为合理.因此,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.

进一步考察纵横波速比与孔隙度的关系(图6),可以看出本例中修正模型理论预测的纵横波速

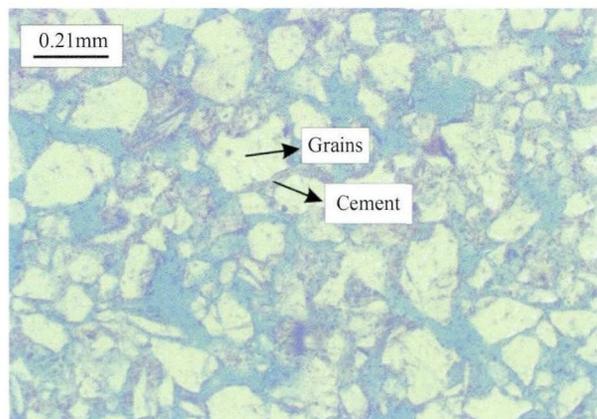


图4 人造疏松砂岩铸体薄片

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

表 1 纵波实验测量值与模型预测值对比结果

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

岩样号	孔隙度 (%)	胶结物含量 (%)	实验测量纵波速度 ($m \cdot s^{-1}$)	CCT 预测纵波速度 ($m \cdot s^{-1}$)	改进模型预测纵波速度 ($m \cdot s^{-1}$)	CCT 预测误差 (%)	改进模型预测误差 (%)
1	17.1	22.9	2330	2874	2309	23.36	-0.89
2	31.4	8.6	1897	2596	1883	36.87	-0.73
3	15.5	24.5	2450	2888	2333	17.87	-4.78
4	19.2	20.8	2118	2853	2274	34.72	7.36
5	14.0	26.0	2320	2899	2353	24.95	1.42
6	28.8	11.2	1856	2683	2009	44.55	8.26
7	17.6	22.4	2392	2870	2301	19.97	-3.79
8	14.7	25.3	2310	2894	2344	25.27	1.46
9	20.5	19.5	2179	2838	2249	30.26	3.22
10	16.3	23.7	2410	2881	2321	19.55	-3.68
11	20.8	19.2	2151	2835	2243	31.78	4.28
12	15.0	25.0	2380	2892	2340	21.49	-1.69
13	25.3	14.7	2130	2764	2132	29.78	0.10
14	21.8	18.2	2190	2821	2222	28.83	1.45
15	25.6	14.4	2082	2758	2123	32.49	1.98

表 2 横波实验测量值与模型预测值对比结果

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

岩样号	孔隙度 (%)	胶结物含量 (%)	实验测量纵波速度 ($m \cdot s^{-1}$)	CCT 预测纵波速度 ($m \cdot s^{-1}$)	改进模型预测纵波速度 ($m \cdot s^{-1}$)	CCT 预测误差 (%)	改进模型预测误差 (%)
1	17.1	22.9	1425	1930	1510	35.45	5.94
2	31.4	8.6	1219	1754	1228	43.85	0.77
3	15.5	24.5	1490	1939	1525	30.10	2.36
4	19.2	20.8	1549	1917	1486	23.77	-4.05
5	14.0	26.0	1525	1945	1538	27.56	0.87
6	28.8	11.2	1374	1809	1312	31.65	-4.54
7	17.6	22.4	1519	1927	1504	26.88	-0.96
8	14.7	25.3	1532	1942	1532	26.78	0.02
9	20.5	19.5	1350	1908	1470	41.31	8.89
10	16.3	23.7	1485	1934	1518	30.27	2.20
11	20.8	19.2	1474	1905	1466	29.27	-0.54
12	15.0	25.0	1491	1941	1530	30.17	2.60
13	25.3	14.7	1482	1861	1393	25.57	-6.02
14	21.8	18.2	1385	1897	1452	36.98	4.84
15	25.6	14.4	1393	1857	1387	33.33	-0.44

比(胶结物中心厚度为 0.03)随孔隙度的增大而略微增大(从 1.52 变为 1.53),与第 4 部分讨论结果相同.而实验所得纵横波速比与孔隙度无明显关系,与周继宏等(1999)所得实验结果一致.分析认为,由于纵横波速比随孔隙度变化不明显且实验带来了一定的误差,从而导致无法从纵横波速比中获知由孔

隙度或胶结物含量变化引起的疏松砂岩的“软硬”变化,但是孔隙度或胶结物含量不变情况下,由图 3 及其分析知,胶结物中心厚度引起的纵横波速比变化较大,故此时的纵横波速比可指示由胶结物中心厚度引起的疏松砂岩的“软硬”变化,胶结物中心厚度越大,疏松砂岩越软,纵横波速比越大.

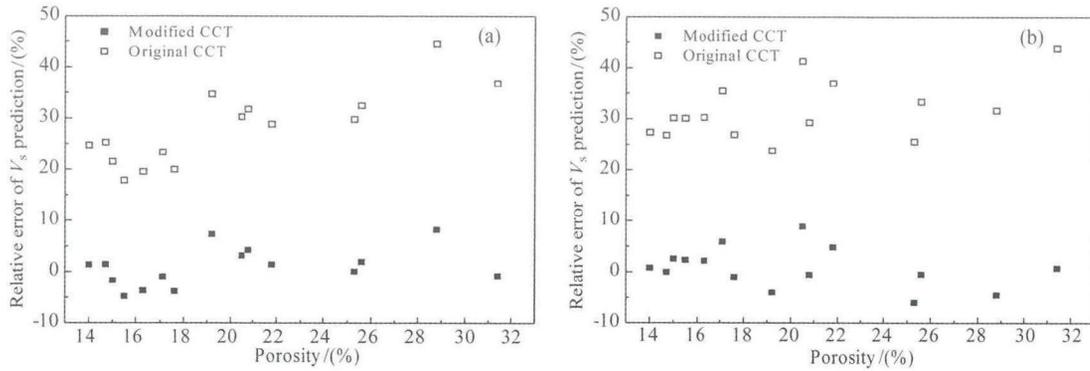


图 5 模型预测纵横波速相对误差随孔隙度变化规律

(a)模型纵波预测值相对误差随孔隙度变化规律;(b)模型横波预测值相对误差随孔隙度变化规律。

Fig. 5 The relative error of compressional wave and shear wave velocity predicted by models versus porosity

(a) The relative error of compressional wave velocity predicted by models versus porosity;

(b) The relative error of shear wave velocity predicted by models versus porosity.

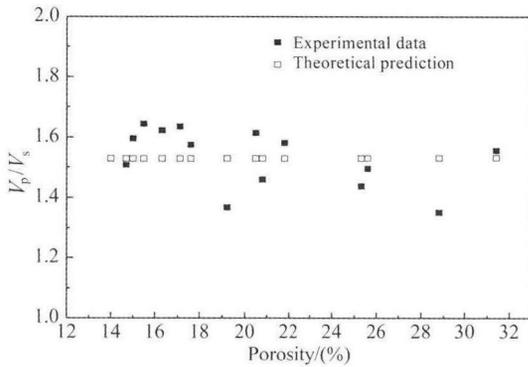


图 6 孔隙度与纵横波速比关系

Fig. 6 The ratio of compressional wave velocity to shear wave velocity versus porosity

6 结论

(1)在“胶结物中心厚度不为 0”的假设前提下推导的胶结半径一般表达式提供了考察胶结物中心厚度对声波速度影响的理论基础,使用对象不再局限于孔隙式胶结疏松砂岩,扩展了 CCT 理论的应用范围. CCT 理论中胶结半径表达式仅为一般表达式在胶结物中心厚度为 0 时的特例.

(2)随胶结物中心厚度变大,疏松砂岩的声波速度减小,且孔隙度越大,胶结物含量越少,声波速度随胶结物中心厚度的增大减小越快. 孔隙度或胶结物含量不变时,纵横波速比随胶结物中心厚度的增大而增大;纵横波速比随孔隙度的变化规律与胶结物中心厚度有关,当胶结物中心厚度较小时,孔隙度增大,纵横波速比略微减小,而当胶结物中心厚度较大时,孔隙度的增大会引起纵横波速比略微增大.

(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,而使用推广后表达式修正的 CCT 模型相对 CCT 模型能够更好地预测基底式胶结的疏松砂岩声波速度. 对纵横波速比与孔隙度关系的考察可知,利用纵横波速比无法预测由孔隙度或胶结物含量变化引起的疏松砂岩软硬的变化,但是在胶结物含量或孔隙度不变的情况下,纵横波速比可指示由胶结物中心厚度变化引起的疏松砂岩软硬的变化,胶结物中心厚度越大,疏松砂岩越软,纵横波速比越大.

References

Avseth P. 2000. Combining rock physics and sedimentology for seismic reservoir characterization of North Sea turbidite systems [Ph. D. thesis]. Stanford: Stanford University.

Bahrami M, Yovanovich M M, Culham J R. 2005. A compact model for spherical rough contacts. *Journal of Tribology*, 127(4): 884-889.

Brandt H. 1995. A study of the speed of sound in porous granular media. *Appl. Mech.*, 22: 479-486.

Chen Y, Huang T F. 2001. Rock Physics (in Chinese). Beijing: Peking University Press.

Deng J X, Han D H, Wang S X. 2011. A study of the influence of stress relaxation on the elastic properties of granular materials and the calibration of effective media model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(4): 1079-1089, doi:10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 04. 02.

Digby P J. 1981. The effective elastic moduli of porous granular rocks. *Appl. Mech.*, 48(4): 803-808.

Dvorkin J, Berryman J, Nur A. 1999. Elastic moduli of cemented sphere packs. *Mechanics of Materials*, 31(7):461-469.

- Dvorkin J, Nur A, Yin H Z. 1994. Effective properties of cemented granular materials. *Mechanics of Materials*, 18(4): 351-366.
- Dvorkin J, Nur A. 1996. Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets. *Geophysics*, 61(5): 1363-1370.
- Dvorkin J, Yin H Z. 1995. Contact laws for cemented grains: implications for grain and cement failure. *International Journal of Solids and Structures*, 32(17): 2497-2510.
- Guo J L, Niu B H, Sun C Y, et al. 2012. Seismic wave propagation based on critical porosity model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(11): 3813-3820, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.028.
- Han X H, Li L L, Yang L, et al. 2012. Petrophysical experimental research in Tanan tuffaceous pyroclastic rock reservoir. *Journal of China University of Petroleum* (in Chinese), 36(3): 69-75, doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.011.
- Jiang Z X. 2003. *Sedimentary* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press.
- Liu Y, Xia T D. 2011. Experimental study on influence of particle roughness on shear wave velocity of sand. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* (in Chinese), 33(2): 285-290.
- Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. 1998. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media*. New York: Cambridge University Press.
- Mindlin R D. 1949. Compliance of elastic bodies in contact. *Journal of Applied Mechanics*, 16: 259-268.
- Murphy W F. 1982. Effects of microstructure and pore fluids on the acoustic properties of granular sedimentary materials [Ph. D. thesis]. Stanford: Stanford University.
- Nur A. 1992. Critical porosity and the seismic velocities in rocks. *Eos, Trans. Am. Geophys Union*, 73: 43-66.
- Song L L, Ge H K, Wang B S. 2004. Study of model for elastic wave velocity of unconsolidated sandstone. *Journal of the University of Petroleum* (in Chinese), 28(6): 38-40.
- Walton K. 1987. The effective elastic moduli of a random packing of spheres. *Mech. Phys. Solids*, 35(2): 213-226.
- Winkler K W. 1983. Contact stiffness in granular and porous materials: comparison between theory and experiment. *Geophysical Research Letters*, 10(11): 1073-1076.
- Xia T D, Liu Y, Wu M, et al. 2011. Shear wave velocity in deep buried sand based on spheres-contact theory. *Journal of Harbin Institute of Technology* (in Chinese), 43(4): 99-103.
- Zhou J H, Zhang C G. 1999. Ultrasonic test of loose sandstone and the result analysis. *OGP* (in Chinese), 34(3): 290-294.

附中文参考文献

- 陈颀, 黄庭芳. 2001. 岩石物理学. 北京: 北京大学出版社.
- 邓继新, 韩德华, 王尚旭. 2011. 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. *地球物理学报*, 54(4): 1079-1089, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.02.
- 郭继亮, 牛滨华, 孙春岩等. 2012. 基于临界孔隙度模型的地震波传播. *地球物理学报*, 55(11): 3813-3820, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.028.
- 韩学辉, 李来林, 杨龙等. 2012. 塔南凝灰质火山碎屑岩储层岩石物理试验研究. *中国石油大学学报*, 36(3): 69-75, doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.011.
- 姜在兴. 2003. 沉积学. 北京: 石油工业出版社.
- 刘瑜, 夏唐代. 2011. 砂土颗粒粗糙度对剪切波速影响的试验研究. *岩土工程学报*, 33(2): 285-290.
- 宋丽莉, 葛洪魁, 王宝善. 2004. 疏松砂岩弹性波速模型的研究. *石油大学学报(自然科学版)*, 28(6): 38-40.
- 夏唐代, 刘瑜, 吴明等. 2011. 基于颗粒接触理论的深层砂土剪切波速度. *哈尔滨工业大学学报*, 43(4): 99-103.
- 周继宏, 章成广. 1999. 疏松砂岩超声测试及其结果分析. *石油地球物理勘探*, 34(3): 290-294.

(本文编辑 张正峰)