

测井资料 Xu-White 模型预测横波速度的一些新观点^①

石双虎¹, 邓志文¹, 白光宇¹, 李红星², 蔡敏贵¹

(1. 东方地球物理公司, 河北 涿州 072751; 2. 东华理工大学核工程与地球物理学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 目前横波预测的方法大致可以分为两种: 经验公式预测和理论岩石物理模型。由于经验公式预测一般具有区域性, 研究者更重视岩石物理模型预测。目前大多数岩石物理模型预测横波的方法假定地下流体的物性参数(速度和密度)不受地层深度的影响, 且孔隙扁率是恒定的, 实际上这并不科学。因为矿物的体积模量和剪切模量随所处地层深度发生改变, 而对于孔隙扁率则随颗粒形状、孔隙度等的变化有较大变化。针对这些情况, 提出一种新的改进的 Xu-White 横波预测方法, 并可取得较好的效果。

关键词: 横波预测; 岩石物理模型; 测井 Xu-White 模型; 孔隙度; 弹性模量

中图分类号: TU470; P542.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2015)04-1109-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1109

New Viewpoints on S-wave Velocity Prediction Using Xu-White Model Based on Well Logging Data

SHI Shuang-hu¹, DENG Zhi-wen¹, BAI Guang-yu¹, LI Hong-xing², CAI Min-gui¹

(1. BGP, CNPC, Zhuozhou 072751, Hebei, China;

2. School of Nuclear Engineering and Geophysics, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: Physical quantities such as the Poisson ratio and Lamé modulus, which represent fluid properties, can be obtained using S-wave velocity. These parameters can be used to reduce the multiple interpretations of seismic amplitudes. Thus, although it is very important to use S-wave velocity in performing seismic data AVO analysis, prestack inversion, and fluid identification, there is seldom information about this velocity in actual logging data. Currently, methods for S-wave velocity prediction can be divided into two types: empirical formula method and theoretical rock-physics-model-prediction method. The former is simple, limited to some exploration area, and requires larger workloads to increase its general overall applicability. Compared with the empirical formula method, the rock physics model method is complex, but it has universal application in different areas. Most rock physics model methods for predicting S-wave velocity assume that the physical parameters of an underground fluid (velocity and density) are not affected by the depth of the stratum or pore aspect ratio. However, this is not a valid assumption even for the most popular rock physics model, the Xu-White model. In fact, the bulk modulus and shear modulus of minerals change with the depth of a reservoir. For fluid parameters, this type of effect will increase. With respect to the pore aspect ratio, its change is fundamentally related to the particle

① 收稿日期: 2014-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(41364004; 41104073)

作者简介: 石双虎(1980—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事地震勘探数据采集技术研究工作。E-mail: dgtgha@126.com。

shape formation pressure and porosity, i.e., it is not constant. The aspect ratio has clearer geological implications: bigger aspect ratios correspond to reservoirs with higher porosity and permeability, and lower aspect ratios correspond to reservoirs with lower porosity and permeability. In addition to these parameters, most studies have also neglected some assumptions for the prediction of S-wave velocity. In this study, we investigate these assumptions and present a new and improved Xu-White method. We all know that the compressional wave time difference, S-wave time difference, and mineral formation density are affected by depth, which is usually neglected. Tolerance stacks may be large in some special geological situations, which should be investigated by geophysicists in the future.

Key words: S-wave prediction; rock physics model; well logging; Xu-White model; porosity; elastic modulus

0 引言

利用横波速度可以得到泊松比、拉梅模量等反映流体性质的物理量,从而减少地震振幅解释的多解性,因此横波速度对于地震资料的 AVO 分析、地震叠前反演、流体识别等具有重要意义。从这个意义上说,横波速度是岩石各种物理性质和地震勘探的桥梁。在实际测井资料中横波速度通常比较缺乏,因此对其进行预测是非常有必要的。

常用的横波速度预测方法是经验公式预测法和理论岩石物理模型预测法。经验法预测速度简单,但通常具有区域性,推广应用工作量较大、重复工作较多;相较而言理论岩石物理模型预测法虽然复杂,但具有普遍性,更应受到广泛推广。目前最为普遍的岩石物理模型是 Xu-White 模型。但是在利用 Xu-White 模型预测横波速度时,很多人会忽视预测中的一些不确定因素,并在此基础上又进行假设,从而对结果产生较大影响。本文对这些不确定因素进行梳理,又增加一些常常被忽视却影响较大的因素,并采用变化的孔隙扁率及随地层深度变化的物性参数对横波进行预测,以期提高预测精度。

1 改进的 Xu-White 横波预测方法

1.1 Xu-White 模型预测原理

两相介质中传播时岩石的等效弹性模量可以基于波散射理论,考虑夹杂体弹性性质、体积百分比和形状的影响进行确定^[1]。孔隙度和泥质含量对岩石速度有较大的影响^[2],在此基础上结合 Gassmann 方程、K-T 模型及差分等效介质理论 (DEM),同时考虑岩石基质性质、孔隙度、孔隙扁率及流体,Xu 和 White 提出了一种利用孔隙度和泥质含量估算泥质砂岩纵波和横波速度的方法,即 Xu-White 模型预测法^[3-4]。针对 Xu-White 模型,有

些学者通过求解线性常微分方程来确定岩石骨架弹性模量^[5]。

基于 DEM 理论的 K-T 方程求解可以得到岩石骨架弹性模量的简单解析表达式:

$$\begin{cases} K_{\text{dry}} = K_m (1 - \phi)^p \\ \mu_{\text{dry}} = \mu_m (1 - \phi)^q \end{cases} \quad (1)$$

其中: K_{dry} 和 μ_{dry} , K_m 和 μ_m 分别为岩石骨架和岩石基质的体变模量和剪切模量。 p 和 q 的表达式如下:

$$p = \frac{1}{3} \sum_{l=S,SH} V_l T_{ijj}(\alpha_l) \quad (2)$$

$$q = \frac{1}{5} \sum_{l=S,SH} V_l F(\alpha_l) \quad (3)$$

其中: T 和 F 为孔隙纵横比的函数,定义于 Eshelby 张量^[6-7];S 代表砂岩,而 SH 为页岩; V_l 和 α_l 为砂泥岩的体积百分比和孔隙纵横比。

1.2 基本流程

Xu-White 模型建立在双相介质(岩石骨架和孔隙流体)理论的基础上,考虑了孔隙度、泥质含量、孔隙扁率等对岩石弹性属性的影响。该模型首先通过 Wyllie 时间平均方程进行基质弹性模量的计算,然后通过 K-T 模型以及 DEM 模型进行干岩石弹性模量的计算,最后利用 Gassmann 模型计算饱和岩石物理模量。通过地层物性参数不断调整、优化参数进行迭代计算横波速度预测,直至拟合纵、横波与实测纵、横波达到较好匹配时,利用调整好的模型参数对没有实测横波资料的井进行横波拟合。其详细流程见图 1。

1.3 岩石基质的弹性模量

通过使用 Wyllie 时间平均方程进行估算泥质砂岩或砂质泥岩的纵横波传播时间,Wyllie 时间平均方程的表达式为:

$$T_m^p = (1 - V_{SH}') T_S^p + V_{SH}' T_{SH}^p \quad (4)$$

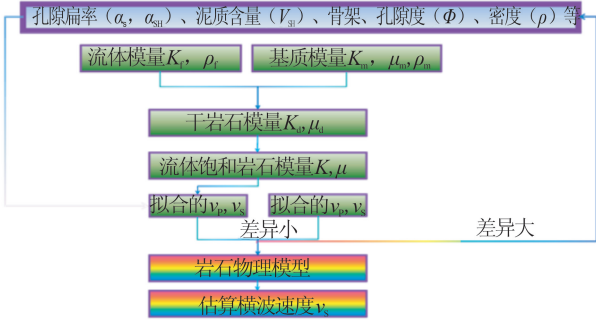


图 1 基于岩石物理模型横波预测流程

Fig.1 Flow chart of shear wave prediction based on rock physics model

$$T_m^S = (1 - V_{SH}) T_S^S + V_{SH} T_{SH}^S \tag{5}$$

岩石基质的密度由下列方程来求解:

$$\rho_m = (1 - V_{SH}) \rho_S + V_{SH} \rho_{SH} \tag{6}$$

其中: T_S^P 、 T_{SH}^P 和 T_m^P 分别是砂岩颗粒、泥岩矿物和砂岩-泥岩混合物的纵波波传播时间; T_S^S 、 T_{SH}^S 和 T_m^S 对应于砂岩颗粒、泥岩矿物和砂岩-泥岩混合物的横波传播时间; ρ_S 、 ρ_{SH} 、 ρ_m 分别是砂岩颗粒、泥岩矿物和砂岩-泥岩混合物的密度; V_{SH} 是由固体骨架标准化的泥岩体积,可表达为

$$V_{SH} = V_{SH} / (1 - \varphi) \tag{7}$$

砂岩颗粒和泥岩矿物的混合物的弹性体积模量和剪切模量为

$$K_m = \rho_m \left[\frac{1}{(T_m^P)^2} - \frac{4}{3(T_m^S)^2} \right] \tag{8}$$

$$\mu_m = \rho_m / (T_m^S)^2 \tag{9}$$

表 1 是一些基础数据,根据式(6)、(8)和(9)可分别求得基质岩石密度和弹性模量。其中流体的参数只具有参考约束的作用,实际横波预测中这些参数不应该是固定值。

表 1 砂岩、泥岩及流体的岩石物理性质

Table 1 Rock physical properties for sandstone, mudstone and fluid

矿物或流体	体变模量 K/GPa	剪切模量 μ/GPa	纵波时差 t_P / (μs·m ⁻¹)	横波时差 t_S / (μs·m ⁻¹)	密度 ρ/ (g·cm ⁻³)
砂岩	-	40.89	166	256	2.68
泥岩	-	16.74	230	394	2.60
水	2.25	0	667	0	1.00
盐水	-	0	617	0	1.05
油	1.02	0	885	0	0.8
气	0.12	0	212	0	0.54

1.4 岩石骨架的弹性模量

在式(2)、式(3) p 和 q 的计算中,标量 T 和 F 是由 Keys 等^[5]提供的公式进行计算的。由于大量研究人员引用参考文献[1]和[3]中的公式进行这两

个标量的计算,而经验证明这两个文献中 ϑ 的计算有误,因此重新将这些公式列出如下^[8]:

$$T_{ijj}(\alpha) = 3F_1 / F_2 \tag{10}$$

$$F(\alpha) = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4 F_5 + F_6 F_7 - F_8 F_9}{F_2 F_4} \tag{11}$$

$$F_1 = 1 + A \left[\frac{3}{2}(g + \vartheta) - R \left(\frac{3g}{2} + \frac{5\vartheta}{2} - \frac{4}{3} \right) \right] \tag{12}$$

$$F_2 = 1 + A \left[1 + \frac{3}{2}(g + \vartheta) - \frac{R}{2}(3g + 5\vartheta) \right] + B(3 - 4R) + \frac{A}{2}(A + 3B)(3 - 4R) \cdot$$

$$\left[g + \vartheta - R(g - \vartheta + 2\vartheta^2) \right] \tag{13}$$

$$F_3 = 1 + \frac{A}{2} \left[R(2 - \vartheta) + \frac{1 + \alpha^2}{\alpha^2} g(R - 1) \right] \tag{14}$$

$$F_4 = 1 + \frac{A}{4} [3\vartheta + g - R(g - \vartheta)] \tag{15}$$

$$F_5 = A \left[R(g + \vartheta - \frac{4}{3}) - g \right] + B\vartheta(3 - 4R) \tag{16}$$

$$F_6 = 1 + A [1 + g - R(g + \vartheta)] + B(1 - \vartheta)(3 - 4R) \tag{17}$$

$$F_7 = 2 + \frac{A}{4} [9\vartheta + 3g - R(3g + 5\vartheta)] + B\vartheta(3 - 4R) \tag{18}$$

$$F_8 = A \left[1 - 2R + \frac{g}{2}(R - 1) + \frac{\vartheta}{2}(5R - 3) \right] + B(1 - \vartheta)(3 - 4R) \tag{19}$$

$$F_9 = A [g(R - 1) + R\vartheta] + B\vartheta(3 - 4R) \tag{20}$$

$$A = \frac{\mu'}{\mu} - 1 \tag{21}$$

$$B = \frac{1}{3} \left(\frac{K'}{K} - \frac{\mu'}{\mu} \right) \tag{22}$$

$$R = \left(\frac{3\mu}{3k + 4\mu} \right) \tag{23}$$

$$g = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} (3\vartheta - 2) \tag{24}$$

$$\vartheta = \frac{\alpha^2}{(1 - \alpha^2)^{(\frac{3}{2})}} \left[\cos^{-1}(\alpha) - \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} \right] \tag{25}$$

将这些参数代入式(1)、(2)和(3),即可求出岩石骨架的弹性模量。

1.5 流体的弹性模量和密度

根据测井资料,利用 Bazle-Wang 公式^[9],已知温度、压力、矿化度可计算地层水密度、速度、体积模量;已知温度、压力、油比重、气油比可计算油气密度、速度及体积模量,然后应用 Wood 方程计算混合流体体积模量(K_f)和密度(ρ_f):

$$K_f = \frac{1}{\frac{s_o}{K_o} + \frac{s_g}{K_g} + \frac{(1-s_o-s_g)}{K_w}} \quad (26)$$

$$\rho_f = s_o \rho_o + s_g \rho_g + (1-s_o-s_g) \rho_w \quad (27)$$

式中: s 是饱和度; o, g 和 w 分别表示油、气、水。

在很多岩石物理模型中,流体的参数都是固定的,这是一种近似的算法,流体的参数其实跟其储层深度有较大关系^[10]:

$$\begin{cases} \rho_w = 1.102 - 0.008 \, 2h + 0.000 \, 67h^2 \\ \rho_g = 0.016 + 0.05h - 0.001 \, 35h^2 \\ \rho_o = 0.758 - 0.004 \, 1h - 0.000 \, 36h^2 \end{cases} \quad (28)$$

其对应的体积模量为:

$$\begin{cases} K_w = 2.02 + 0.304h - 0.057 \, 2h^2 \\ K_g = 0.000 \, 14 + 0.009 \, 46h + 0.001 \, 45h^2 \\ K_o = 1.19 - 0.362h + 0.042h^2 \end{cases} \quad (29)$$

对于含气、液混合流体岩石,如果知道岩石的总密度,其流体的密度可表示为:

$$\rho_f = \frac{[\rho + (\phi - 1)\rho_m]}{\phi} \quad (30)$$

1.6 流体饱和和岩石的弹性模量和密度

通常人们所述的流体饱和和岩石是由岩石基质和流体组成的,其中基质和流体都是由几种矿物组成的多相体。通过 Gassmann 方程^[11-12]可以得到流体饱和和岩石的等效体变模量和剪切模量。

Gassmann 方程假设岩石骨架是单矿物的,因此需先求取岩石骨架和流体的等效弹性模量和等效密度,再结合 Gassmann 方程求取流体饱和和岩石的弹性模量和密度:

$$K = K_{dry} + \frac{\left(1 - \frac{K_{dry}}{K_m}\right)}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{(1-\phi)}{K_m} - \frac{K_{dry}}{K_m^2}} \quad (31)$$

$$\mu = \mu_{dry} \quad (32)$$

$$\rho = \phi \rho_f + (1-\phi) \rho_m \quad (33)$$

其中: K, μ 分别为饱和和孔隙流体岩石的等效体积模量和等效剪切模量; ρ 为等效密度。根据这些参数

即可求出岩石的纵横波速度(v_p 和 v_s)。

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (34)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (35)$$

1.7 变化的孔隙纵横比

横波预测需对储层孔隙的纵横比进行估算,此参数具有较为明确的地质意义,即大孔隙纵横比对应储层较高的孔渗性,小孔隙纵横比对应储层较差孔渗性。

通过对实验室数据进行的分析表明与砂岩有关的孔隙纵横比不是固定的值,它与地层压力等参数有关^[13-14]。砂岩孔隙纵横比与孔隙度之间的非线性关系表现为^[13]

$$\alpha_s = 0.176 \, 2e^{-2.22\phi} \quad (36)$$

$$\alpha_s = 0.171 \, 14 - 0.244 \, 77\phi + 0.004 \, 314V_{SH} \quad (37)$$

式(37)考虑了泥质含量对砂岩孔隙度的影响^[15]。

1.8 孔隙度

储层孔隙度是油气勘探与开发中的一个关键参数。一般有三种方法预测:

第一种方法为测井一次解释,一般是在岩心归位之后,拟合测试孔隙度和三孔隙度曲线得到一个简单的相关式,可以计算其他未取芯的孔隙度值;但是这种方法具有明显不足,即未考虑压实效应和泥质含量的影响;因此在二次解释中,Por 程序中的计算公式就考虑了压实校正系数 C 和泥质含量的影响;

第二种方法可以通过地震反演,建立地震属性-泥质含量-孔隙度的反演模型;用地震资料求孔隙度一般应用 Wyllie 时间平均方程^[16-17],并在后来的文献中进行了修改。有些是采用实验拟合的方法,重建求孔隙率的公式。石英砂岩孔隙度随速度没有明显改变,因此据速度提高孔隙率的精度较难。另外,利用地震资料求速度至今仍是一个值得研究的课题。通常使用如下方程进行孔隙度的求取:

$$\phi = \frac{(\rho v \Delta t_m - \rho_m)}{\rho v (\Delta t_m - \Delta t_f) - (\rho_m - \rho_f)} = \frac{(I \Delta t_m - \rho_m)}{I (\Delta t_m - \Delta t_f) - (\rho_m - \rho_f)} \quad (38)$$

式中: $\Delta t_m, \Delta t_f$ 分别为岩石基质和流体时差; I 为声波阻抗; v 为声波速度。

第三种方法就是实验室测量方法,如气体体积膨胀法。

目前在很多 Xu-White 预测横波速度的文章中,基本上都是用测井资料提供的孔隙度,但对其测量方法不加探索和求证;也有一些文章通过地震反演进行孔隙度求取,然后再利用求取的孔隙度进行横波速度预测;还有一些文献利用虚拟孔隙度对孔隙度进行迭代求取^[18-19],这种方法是基于实测纵波速度与预测纵波速度一致的基础上,其结果有时跟实测的有较大差别。这也从侧面说明利用测井资料提供的孔隙度预测横波速度是值得探讨的。

2 应用实例分析

在实际预测过程中,整体流程按照 Xu-White

模型进行。由于泥岩的孔隙纵横比变化较小,根据以往这个地区的测试结果,泥岩孔隙纵横比取为 0.034,砂岩孔隙纵横比按式(37)进行修正,流体的速度和弹性模量则利用式(28)、(29)修正。图 2 是预测过程中砂岩孔隙纵横比与孔隙度和泥质含量的关系图。从图中可以看出,砂岩的孔隙扁率与孔隙度成反比,与泥质含量成正比,且孔隙度对砂岩孔隙扁率的影响较泥质含量要大。图 3 是某井通过声波时差曲线得到的纵波速度(v_p)曲线、由伽马曲线得到的泥质含量(V_{SH})曲线,以及 SP 得到的孔隙度

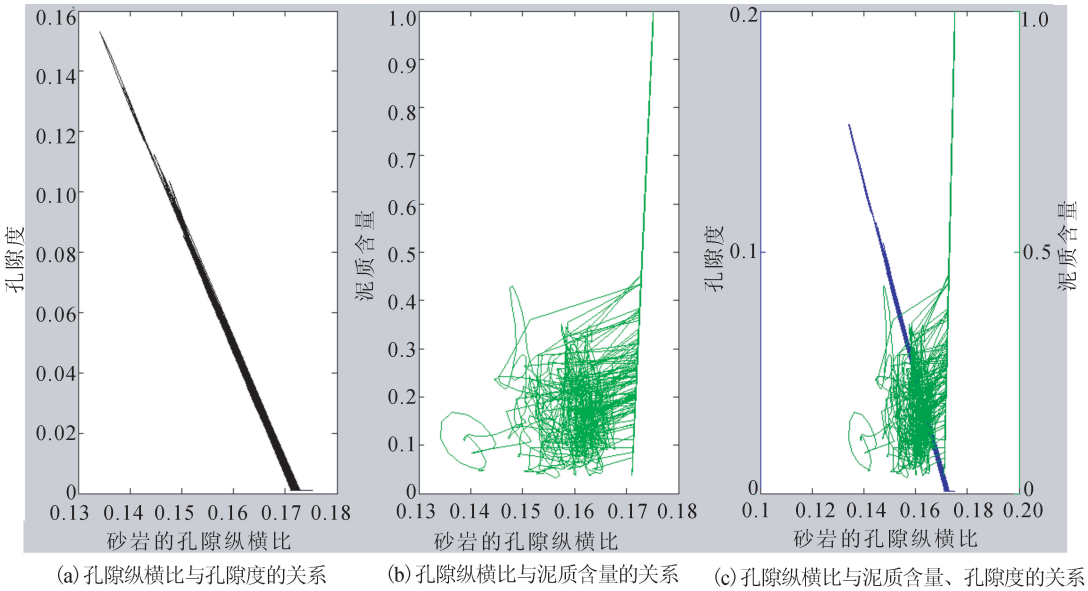


图 2 砂岩孔隙纵横比与孔隙度和泥质含量的关系图
Fig.2 Relation between aspect ratios with porosity and clay content for sandstone

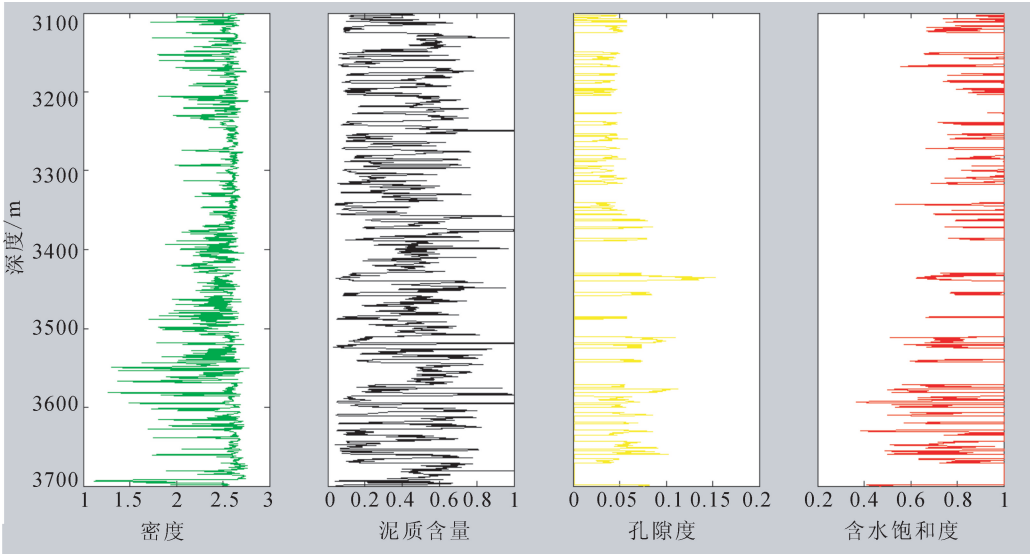


图 3 测井综合解释成果
Fig.3 Result of comprehensive logging interpretation

(ϕ)曲线和含水饱和度(S_w)曲线。图4是通过这种方法预测的纵横波速度。从图中可以看到,实测的纵横波速度与预测的纵横波速度吻合得都比较好,

且预测的精度在5.5%以内。分析结果表明,引进变化的砂岩孔隙纵横比和随深度变化的流体速度和密度能进行准确的横波速度预测。

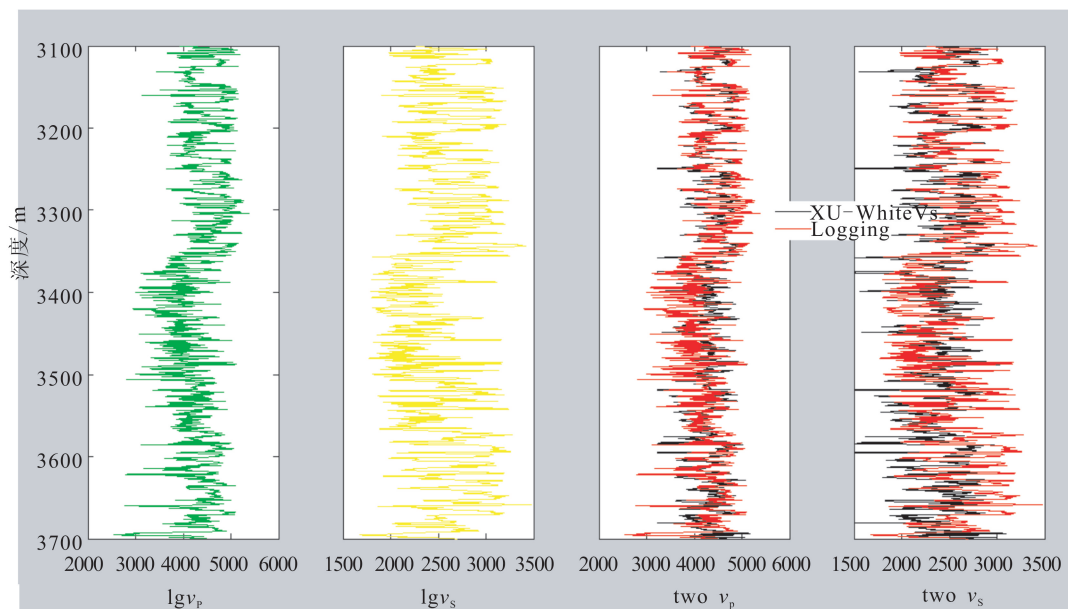


图4 实测纵横波速度与新模型预测的纵横波速度对比图

Fig.4 Comparison between measured v_p , v_s and predicted v_p , v_s by Xu-White model

3 结论

很多文献表明,利用 Xu-White 模型估算横波速度时假设孔隙流体(油、气、水)性质不随深度发生变化,实际上影响流体性质的关键因素,如围岩压力、温度是随深度变化的,所以有必要考虑这一点;将砂岩的孔隙纵横比假定为恒定也是不科学的。

本文基于 Xu-White 模型数值模型试验,利用变化的孔隙纵横比和流体性质,使其与现实更为接近。实践证明这种方式值得研究。当然,地层中矿物的纵波时差、横波时差和密度也随深度发生改变,目前矿物速度及密度不受深度影响的假设简化了物理参数,但也导致估算岩石基质弹性性质时并不准确。实际上在一些地区,通过现有的资料可以得到更为精确的岩石基质弹性参数,从而可以更加精确地预测纵横波速度。

参考文献(References)

- [1] Kuster G T, Toksz M N. Velocity and Attenuation of Seismic Waves in Two Phase Media; Part I: Theoretical Formulation [J]. Geophysics, 1974, 39: 587-606.
- [2] Han D H, Nur A, Morgan D. Effects of Porosity and Clay Content on Wave Velocities in Sandstones [J]. Geophysics, 1986,

51: 2093-2107.

- [3] Xu S, White R E. A New Velocity Model for Clay Sand Mixtures [J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43: 91-118.
- [4] Xu S, White R E. A Physical Model for Shear Wave Velocity Prediction [J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44: 687-717.
- [5] Keys R G, Xu S Y. An Approximation for the Xu White Velocity Model [J]. Geophysics, 2002, 67: 1406-1414.
- [6] Eshelby J D. The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion and Related Problems [J]. Proceedings of the Royal Society, 1957, A241: 376-396.
- [7] 赵密, 杜修力, 刘晶波, 等. P-SV 波斜入射时成层半空间自由场的时域算法 [J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 84-90.
ZHAO Mi, DU Xiu-li, LIU Jing-bo, et al. Time-domain Method for Free Field in Layered Half Space under P-SV Waves of Oblique Incidence [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 84-90. (in Chinese)
- [8] Wu T T. The Effect of Inclusion Shape on the Elastic Moduli of a Two-phase Material [J]. Internet J Solids and Struct, 1966, 2: 1-8.
- [9] Batzle M, Wang Z. Seismic Properties of Pore Fluids [J]. Geophysics, 1992, 57: 1396-1408.
- [10] 刘雯林. 油气田开发地震技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
LIU Wen-lin. Oil Gas Field Development Seismic Technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. (in Chinese)

[4]

余小勇.基于 DMIS 和 UG 的 CMM 检测路径生成及仿真[J].现代电子技术,2006(1):119-122.
XU Xiao-yong.Form and Simulation of CMM Measuring Track Based on DMIS and UG[J].Modern Electronics Technique,2006(1):119-122.(in Chinese)

[5]

邹刚,王亚平,李永刚.三坐标测量机测量路径自动生成的研究[J].理论与实践,2004,24(3):6-7.
ZOU Gang,WANG Ya-ping,LI Yong-gang. Research about Measuring Path Auto-generation of CMM [J]. Theory and Practice,24,2004(3):6-7.(in Chinese)

[6]

宋春刚,兰诗涛,王文.自由曲面的接触式测量路径规划方法研究[J].机电工程,2003,20(5):3-5.
SONG Chun-gang,LAN Shi-tao,WANG Wen.Research on the Path Planning of Contact Measurement for Free Form Surfaces [J].Mechanical and Electrical Engineering Magazine,2003,20(5):3-5.(in Chinese)

[7]

李锋.面向坐标测量技术的 DMIS 标准的研究与软件接口开发

[D].西安:西安理工大学,2004.
LI Feng. The Study of DMIS Associated with CoOrdinate Measuring Technology &. Development of Interface Software [D].Xi'an: Xi'an University of technology,2004.(in Chinese)

[8]

意大利 Metro Staff 公司北京代表处. ARCO CAD 用户手册 [M].2010.
Beijing Representative Office of Italy Metro Staff Company. CAD ARCO User Manual[M].2010.(in Chinese)

[9]

Brian Overland.C++ 语言命令详解[M].北京:电子工业出版社,2000.
Brian Overland. C++ Language Command [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2000.(in Chinese)

[10]

HUANG Yun-bao,QIAN Xiao-ping. Dynamic B-splinesurface Reconstruction:Closing the Sensing-and-modeling Loop in 3D Digitization[J].Computer Aided Design,2007,39(11):987-1002.

(上接 1114 页)

[11]

Gassmann F.Elasticity of Porous Rock[J].Vierteljahrsschrift-der Naturfor Schenden Gesclls Chaft in Rich,1951,96:1-21.

[12]

White J E.Underground Sound:Application of Seismic Waves [M].Elsevier Science Publishing Co Inc,1983.

[13]

Nur A,Simmons G.The Effect of Saturation on Velocity in Low Porosity Rocks[J].Earth Planet Sci Lett,7:183-193.

[14]

Brown R,Korringa J.On the Dependence of the Elastic Properties of a Porous Rock on the Compressibility of the Pore Fluid[J].Geophysics,1975,40(4):608-616.

[15]

Yan J,Lubbe R,Pilar N.Variable Aspect Ratio Metod in the Xu-White Model for AVO[C]//EAGE 69th Conference & Exhibition,2007.

[16]

Wyllie M R J,Gregory A R,Gardner L W.Elastic Wave Velocity in Heterogeneous and Porous Media[J].Geophysics,1956,21(1):41-702.

[17]

Wyllie M R J,Gardner G H F.An Experimental Investigation of Factors Affecting Elastic Wave Velocity Porous Media[J].Geophysics,1958,23(3):459-493.

[18]

Bourbie T,Zinszner B.Hydraulic and Acoustic Properties as a Function of Porosity in Fontain Bleau Sandstone[R].Institute Franeaisdu.Petrole,1985.

[19]

文雯,陈宇军,王珏,等.地震安全性评价中地震动衰减关系的类型及其选取[J].地震工程学报,2013,35(3):709-713.
WEN Wen,CHEN Yu-jun,WANG Jue,et al.Type and Selection of the Ground Motion Attenuation Relations during Seismic Safety Evaluation [J]. China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):709-713.(in Chinese)