

doi: 10.11720/wtyht.2019.1192  
侯波,康洪全,程涛.综合成岩作用和孔隙形状的岩石物理模型及其应用[J].物探与化探,2019,43(1):161-167.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1192  
Hou B, Kang H Q, Cheng T. A new rock physics model integrating diagenesis and pore shape and its application[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 161-167.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1192

# 综合成岩作用和孔隙形状的岩石物理模型及其应用

侯波,康洪全,程涛

(中海油研究总院有限责任公司,北京 100028)

**摘要:**横波速度对于地震模拟、AVO 分析以及流体识别具有重要意义,实际测井数据中横波速度信息缺乏,因此横波速度预测已经成为岩石物理研究的一个焦点。综合 Xu-White 模型以及 Pride 模型,提出了一种新的用于计算干岩石模量的岩石物理模型。该模型综合考虑了孔隙形状和成岩作用对干岩石体积模量、剪切模量的影响,因此该模型更加合理并具有更高的精度。同时联合 Gassmann 理论,建立了饱和流体岩石的纵波、横波速度计算模型。将该模型成功地应用于实验室测量数据和实际测井数据的横波速度预测中,预测结果表明,基于本文提出的岩石物理模型的横波速度预测方法是行之有效的。

**关键词:**固结参数;纵横比;岩石物理;横波速度预测

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2019)01-0161-07

## 0 引言

联合纵波、横波信息在储层预测和流体识别中具有重要意义,与单一的纵波信息相比,纵波、横波信息相结合可以有效地降低储层预测的风险以及提高流体识别的精度。叠前地震模拟、AVO 分析同样需要横波速度信息。尽管横波信息可以通过测井信息获得,但由于横波测井作业成本较高,实际野外测井数据中往往缺乏横波数据。AVO 反演尽管可以通过地震数据直接获得横波速度信息,但反演之前通常需要低频的纵波、横波速度信息<sup>[1]</sup>。因此利用纵波速度联合其他储层参数(泥质含量、孔隙度、密度等)进行横波速度预测具有重要的实际意义。Castagna 等<sup>[2]</sup>首先给出了水饱和碎屑硅酸岩的纵波速度—横波速度经验公式,也就是著名的泥岩基线公式。Han 等<sup>[3]</sup>通过对 75 块岩样在不同压力下的测量结果,给出了纵波速度—横波速度之间的经验

回归公式。Krief 等<sup>[4]</sup>利用 Raymer-Hunt-Gardner 经验公式<sup>[5]</sup>推导了干岩模量与基质模量之间的关系,并建立了纵波速度平方与横波速度平方的准线性关系。Greenberg 和 Castagna<sup>[6]</sup>结合 Gassmann 理论<sup>[7]</sup>和不同岩性的纵波速度—横波速度经验公式提出了结合经验公式和理论模型的横波速度预测方法。Castagna 和 Backus<sup>[8]</sup>对经验回归公式做了很好的总结,分别给出了砂岩、泥岩、白云岩以及石灰岩等单一岩性的纵波速度—横波速度经验回归公式。以上经验关系式虽然计算简单,但缺乏理论基础。为了弥补经验公式这一缺陷,Xu 和 White<sup>[9-11]</sup>联合 K-T 模型<sup>[12]</sup>、微分等效介质理论<sup>[13]</sup>以及 Gassmann 理论<sup>[7]</sup>提出了砂—泥混合岩石的理论模型(Xu-White 模型)。该模型考虑了孔隙形状对纵波、横波速度的影响,物理意义明确而且具有较高的精度,已被广泛应用<sup>[14-16]</sup>。为了避免微分等效介质理论复杂的计算,Keys 和 Xu<sup>[17]</sup>提出了一种微分等效介质的解析近似算法,大大提高了 Xu-White 模型的计算效

收稿日期: 2018-05-16;修回日期: 2018-11-24  
基金项目: “十三五”国家科技重大专项课题“西非—南美洲重点区油气地质评价及关键技术研究”(2017ZX05032-001)  
作者简介: 侯波(1983-),男,博士,2009年毕业于中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业,获硕士学位,2012年毕业于中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业,获博士学位,现主要从事岩石物理及多分量地震叠前反演方面的研究工作。

率。Xu 和 Payne<sup>[18]</sup> 通过把碳酸岩孔隙分成四种类型分别计算,将砂—泥混合岩石的 Xu-white 模型推广到了碳酸岩中。Yin 等<sup>[19]</sup> 以及 Wang 等<sup>[20]</sup> 将 Xu-White 模型应用于碳酸岩介质的横波速度预测,取得了较好的预测结果。影响岩石纵波、横波速度的因素除了物理几何因素(孔隙形状等)外,另一个重要的因素就是成岩作用<sup>[21]</sup>。成岩过程中岩石颗粒之间胶结作用的强弱对岩石速度有着重要影响。Pride<sup>[22]</sup> 通过引入固结参数来描述成岩过程中胶结作用对干岩模量的影响,建立了干岩模量与基质模量之间的关系。Lee<sup>[23]</sup> 对 Pride 模型的参数做了调整,参数选择更具有自适应性,并将 Pride 模型应用于横波速度预测<sup>[24]</sup>。侯波等<sup>[25]</sup> 提出了临界孔隙度模型并应用到横波预测中,取得了较好预测效果。孙福利等<sup>[26]</sup> 和李琳等<sup>[27]</sup> 以及张佳佳等<sup>[28]</sup> 将 Pride 模型应用于横波速度的预测,取得了较好的结果。

对于横波速度预测,经验公式没有具体考虑各种沉积因素和物理因素对纵波、横波速度的影响,而将各种因素综合到一个经验回归关系式上。它虽具有计算简洁的优点<sup>[29]</sup>,但当孔隙结构和成岩作用变化较大时,预测精度通常不高。Xu-White 模型通过考虑孔隙形状对纵波、横波速度的影响,但忽略了成岩作用对纵波、横波速度的影响。Pride 模型仅考虑了成岩作用对纵波、横波速度的影响,而忽略了其它因素的影响。本文通过综合 Xu-white 模型和 Pride 模型提出了一种综合考虑孔隙形状和成岩作用对干岩模量影响的岩石物理模型,该模型有较好的物理意义和地质意义,将该模型应用于实验室测量数据和实际测井数据的横波速度预测,取得了较好预测结果。

## 1 岩石物理模型

岩石物理模型的一个重要的研究内容就是建立干岩模量与基质模量之间的关系,Xu-White 模型的一个重要意义就在于,建立干岩模量与基质模量的关系时,考虑了孔隙形状对干岩模量的影响。经典的 Xu-White 模型借助 K-T 模型和微分等效介质来计算干岩模量,计算过程需要迭代求解微分方程,其计算复杂且计算量较大,不利于实际应用。为了避免直接求解微分方程,Keys 和 Xu<sup>[17]</sup> 给出了微分等效介质的一个很好的近似计算公式,大大降低了计算复杂度,从而节省了计算量。微分等效介质的近似计算公式如下:

$$K_d = K_0(1 - \phi)^p, \quad (1)$$

$$\mu_d = \mu_0(1 - \phi)^q, \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $K_d$  和  $\mu_d$  分别为干岩体积模量和剪切模量, $K_0$  和  $\mu_0$  分别为基质的体积模量和剪切模量, $\phi$  为孔隙度, $p$  和  $q$  分别代表了孔隙形状对干岩石体积模量和剪切模量的影响,并由式(3)、(4)给出:

$$p = \frac{1}{3} \sum_{l=S,C} v_l T_{ijj}(\alpha_l), \quad (3)$$

$$q = \frac{1}{5} \sum_{l=S,C} v_l F(\alpha_l), \quad (4)$$

式(3)、(4)中, $v_s$  和  $v_c$  分别为岩石骨架中砂岩和泥质的体积分数, $\alpha$  为孔隙的横纵比, $T_{ijj}(\alpha)$  和  $F(\alpha)$  为  $\alpha$  的函数,并由附录给出。

式(1)、(2)可以直接求解而无需迭代,用式(1)、(2)代替 Xu-white 模型中微分等效介质方法,可以大大地降低 Xu-white 模型的计算复杂度,节约计算成本<sup>[16]</sup>。尤其是在横波速度预测过程中需要多次迭代优化参数,更能体现近似公式的优越性。直接应用经典的 Xu-White 模型计算较大,而借助式(1)、(2)可以大大提高参数优化的效率。

尽管 Xu-White 模型有较好的理论基础和明确的物理意义。但该模型中微分等效介质理论的推导过程中,假设岩石骨架是由一个整体构成,未考虑岩石颗粒之间的胶结作用对岩石弹性模量的影响,而实际岩石骨架是由岩石颗粒经胶结物粘合在一起构成的。当颗粒之间胶结较好时,岩石骨架表现为更加坚硬,也就具有更高的弹性模量;当颗粒之间胶结较差时,岩石骨架表现为更加疏松,也就具有较低的弹性模量。胶结程度对岩石的纵波、横波速度有重要影响,在岩石物理模型中考虑成岩作用对弹性模量的影响具有重要的实际意义。Pride 通过引入固结参数来描述岩石矿物颗粒之间的胶结程度,建立了干岩模量与基质模量之间的关系:

$$K_d = \frac{K_0(1 - \phi)}{1 + c\phi}, \quad (5)$$

$$\mu_d = \frac{\mu_0(1 - \phi)}{1 + 1.5c\phi}, \quad (6)$$

式(5)、(6)中, $c$  为固结参数,其他参数同式(1)和(2)。式(6)中的 1.5 的选取存在随意性,但通常能产生一个比较精确的纵横波速度比,用因子 2 或 5/3 来代替式(6)中的 1.5 也是合理的<sup>[22]</sup>。为了避免式(6)中因子 1.5 选取的随意性,Lee<sup>[23]</sup> 将干岩石的剪切模量计算式(6)修改为:

$$\mu_d = \frac{\mu_0(1 - \phi)}{1 + \gamma c\phi}, \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{1 + 2c}{1 + c}, \quad (8)$$

其中,式(8)中  $\gamma$  是为了使式(7)更为简洁,并无特殊含义。式(5)和(7)即为 Lee<sup>[23]</sup> 给出的 Pride 模型,根据 Lee 给出的 Pride 模型可以实现干岩模量的计算。

由式(1)、(2)和式(5)、(7)可以看出,岩石物理模型的关键是建立干岩模量和岩石基质模量之间的关系式。微分等效介质理论或其近似模型通过引入孔隙形状和孔隙度两个参数建立了干岩模量与基质模量之间的关系式,该模型仅考虑了孔隙形状对干岩模量的影响,未考虑相同孔隙度和孔隙形状下成岩作用对干岩模量的影响。Pride 模型通过引入固结参数和孔隙度两个参数,给出了干岩模量与基质模量之间的关系式,该模型仅考虑了成岩作用对干岩模量的影响,未考虑孔隙形状对干岩模量的影响。对比式(1)和式(2)以及式(5)和式(7),微分等效介质理论近似模型以及 Pride 模型均是建立在  $K_d = K_0(1 - \phi)$  和  $\mu_d = \mu_0(1 - \phi)$  所表征的干岩模量与基质模量的线性关系之上的改进模型,微分等效介质理论近似模型通过在指数上增加孔隙形状的函数来表征孔隙形状对干岩模量的影响,而 Pride 模型通过在分母上增加固结参数的函数来表征成岩作用对干岩模量的影响。综合微分等效介质理论近似模型以及 Pride 模型,在干岩模量与基质模量的线性关系之上,同时在指数上增加孔隙形状的函数并在分母上增加固结参数的函数来同时表征孔隙形状、孔隙度和固结参数对干岩模量的影响,本文提出了以下的公式用于描述干岩模量与基质模量之间的定量关系:

$$K_d = \frac{K_0(1 - \phi)^p}{1 + c\phi}, \quad (9)$$

$$\mu_d = \frac{\mu_0(1 - \phi)^q}{1 + \gamma c\phi}. \quad (10)$$

式(9)、(10)中的参数意义同式(1)、(2)。

由式(9)、(10)可以看出,当  $c$  等于零时,即完全固结时,式(9)、(10)又可以退化为式(1)、(2)。即当完全固结时,式(9)、(10)可以退化为微分等效介质模型的近似模型。

由式(9)、(10)计算得到干岩模量,再借助 Gassmann 方程<sup>[7]</sup>可以得到饱和和流体岩石体积模量和剪切模量,进而实现饱和和流体岩石的纵波、横波速度的计算:

首先计算饱和和流体岩石的体积模量,

$$K_{\text{sat}} = K_d + \frac{\left(1 - \frac{K_d}{K_0}\right)^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1 - \phi}{K_0} - \frac{K_d}{K_0^2}}. \quad (11)$$

保持剪切模量不变,

$$\mu_{\text{sat}} = \mu_d, \quad (12)$$

根据下式计算饱和和流体岩石的体积密度,

$$\rho = \rho_s(1 - \phi) + \rho_f\phi, \quad (13)$$

最终实现饱和和流体岩石的纵波速度和横波速度计算,

$$v_p = \sqrt{\left(K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}\mu_{\text{sat}}\right)/\rho}, \quad (14)$$

$$v_s = \sqrt{\mu_{\text{sat}}/\rho}, \quad (15)$$

式(11)~(15)中,  $K_f$  为流体体积模量,  $K_{\text{sat}}$  和  $\mu_{\text{sat}}$  分别为饱和和流体岩石的体积模量和剪切模量,  $v_p$  和  $v_s$  分别为饱和和流体岩石的纵波、横波速度,  $\rho$  为饱和和流体岩石的体积密度,  $\rho_s$  为基质的体积密度,  $\rho_f$  为流体体积密度。其他参数意义同式(1)~(2)。

式(9)~(15)即为本文建立的综合成岩作用和孔隙形状的饱和和流体岩石物理模型,利用该模型可以进行饱和和流体岩石的纵波、横波速度计算。

## 2 横波速度预测

在缺乏横波速度测井数据的情况下,利用文中提出的饱和和流体岩石物理模型式(9)~(15)可以实现横波速度的预测。模型中孔隙度、泥质含量、密度以及纵波速度由野外测量的测井数据得到。横波速度预测时,利用本文提出的岩石物理模型实现饱和和流体岩石纵波速度的计算,通过优化模型中的泥质孔隙纵横比  $\alpha_c$ ,其取值范围为 0.02~0.05<sup>[20]</sup>,砂质孔隙纵横比  $\alpha_s$ ,其取值范围为 0.1~0.15<sup>[20]</sup>,以及固结参数  $c$ ,其取值范围为 2~20<sup>[22]</sup>,使饱和和流体岩石的计算纵波速度和测井测量纵波速度误差达到最小:

$$\min(|V_p^*(\alpha_c, \alpha_s, c) - V_p^m|), \quad (16)$$

优化得到孔隙纵横比  $\alpha_c$ 、 $\alpha_s$  以及固结参数  $c$  后,即可利用本文提出的岩石物理模型实现横波速度的计算。在横波速度预测中,各种矿物的弹性模量和密度参数值如表 1 所示。横波速度预测具体计算流程如下:

1) 利用表 1 给出的矿物模量,借助 Hill 平均计算岩石基质的弹性模量<sup>[30]</sup>。

2) 计算砂质部分和泥质部分的孔隙度,孔隙度近似表示为  $\phi_s = V_s \frac{\phi}{1 - \phi}$  和  $\phi_c = V_c \frac{\phi}{1 - \phi}$ ,  $\phi$  为总孔隙



度,  $V_s$  和  $V_c$  分别为砂质部分和泥质部分的体积分数<sup>[11]</sup>。

3) 给定孔隙纵横比  $\alpha_c$ 、 $\alpha_s$  以及固结参数  $c$  的初始值分别为 0.12、0.03 和 10, 根据本文提出的岩石物理模型计算饱和流体岩石的纵波速度  $V_p^*(\alpha_c, \alpha_s, c)$ 。如果计算纵波速度与测量纵波速度  $V_p^m$  之间的误差较大, 即  $|V_p^*(\alpha_c, \alpha_s, c) - V_p^m| > \varepsilon$ , 采用非线性优化方法<sup>[31]</sup> 进行优化孔隙纵横比  $\alpha_c$ 、 $\alpha_s$  以及固结参数  $c$ , 直到满足  $|V_p^*(\alpha_c, \alpha_s, c) - V_p^m| < \varepsilon$  为止, 输出优化后的孔隙纵横比  $\alpha_c$ 、 $\alpha_s$  以及固结参数  $c$ 。

4) 由优化后的孔隙纵横比  $\alpha_c$ 、 $\alpha_s$  以及固结参数  $c$ , 借助本文提出的饱和流体岩石物理模型计算饱和流体岩石的横波速度, 即为预测横波速度值。

表 1 各种矿物的弹性参数值<sup>[32]</sup>

弹性参数	使用值
石英体积模量	38 GPa
石英剪切模量	44 GPa
泥质体积模量	21 GPa
泥质剪切模量	7 GPa
水体积模量	2.29 GPa
石英密度	2.65 g/cm <sup>3</sup>
泥质密度	2.58 g/cm <sup>3</sup>
水密度	1.0 g/cm <sup>3</sup>

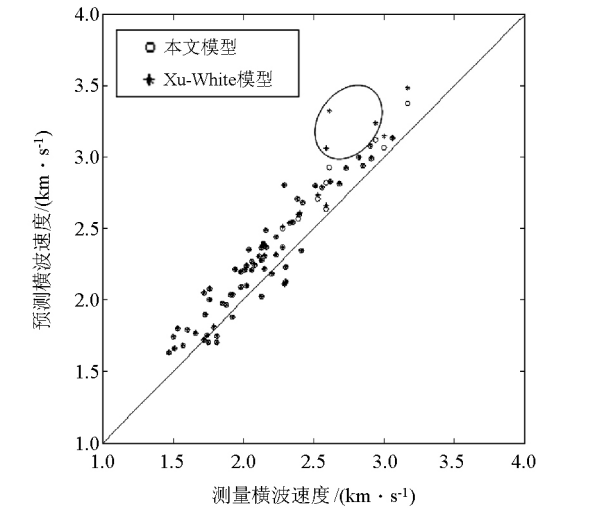


图 1 两种模型对实验室测量数据横波速度预测的结果比较  
Fig.1 Comparison of shear wave velocities predicted by two different models applied to laboratory measured data

文中对综合成岩作用和孔隙形状的岩石物理模型与经典的 Xu-White 模型进行了比较。首先将综合成岩作用和孔隙形状的岩石物理模型和经典的 Xu-White 模型分别应用到 5 MPa 下的实验室测量数据<sup>[3]</sup>。由图 1 可以看出对于大部分岩样, 综合成岩作用和孔隙形状的岩石物理模型与经典的 Xu-

White 模型预测结果相当, 且分布在斜率为 1 的完美理论直线附近, 说明大部分岩样在成岩过程中具有较好的胶结作用, 岩石颗粒之间固结程度比较好。但也可以看出椭圆标记处存在一些点, 基于 Xu-White 模型的预测结果严重偏离了斜率为 1 的完美理论直线, 说明这些点对应的岩样颗粒之间固结程度较差。Xu-White 模型中, 岩石骨架被认为是一个整体, 但实际岩石骨架是由固体颗粒胶结而成的, 颗粒之间的胶结程度不好会降低岩石的速度, 但对纵波和横波的降低程度不同, 对横波降低程度更大, 因此, 不考虑胶结的纵横波速度比要小于实际的纵横波速度比。即 Xu-White 模型的纵横波速度比要小于实际的纵横波速度比。而预测过程中纵波速度已知, 因此 Xu-White 模型预测的横波速度就偏大, 预测误差较大。而基于本文提出的岩石物理模型综合考虑了成岩作用和孔隙形状对纵波速度和横波速度的影响, 具有更高的速度预测精度, 预测结果更加接近斜率为 1 的完美理论直线。

进一步将两种模型应用于野外实际测井数据的横波速度预测。如图 2 所示, 给出了 w 井横波速度预测所需测井曲线, 包括孔隙度曲线、泥质含量曲线、纵波速度曲线以及体积密度曲线。测井层段主要是砂泥岩层, 测井解释结果显示砂泥岩均未发育裂隙, 砂岩储层主要为含油层和含水层以及油水同层, 整个测井层段未见气层显示。

图 3 给出了基于两种模型的横波速度预测结果, 并分别与测量横波速度进行了比较。由图 3a 可

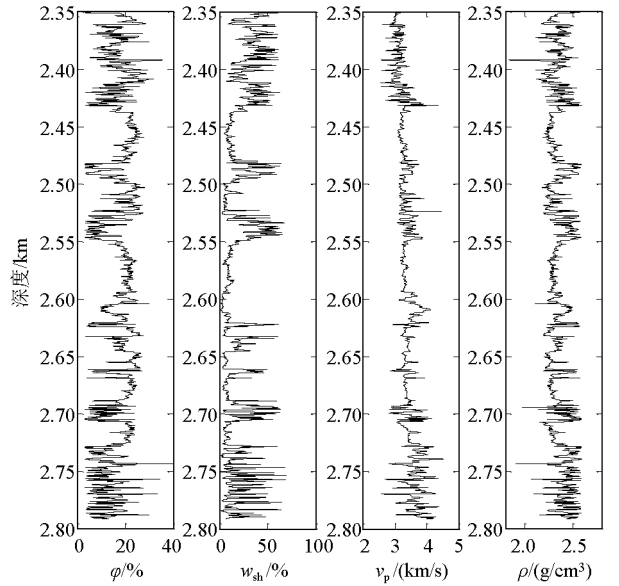
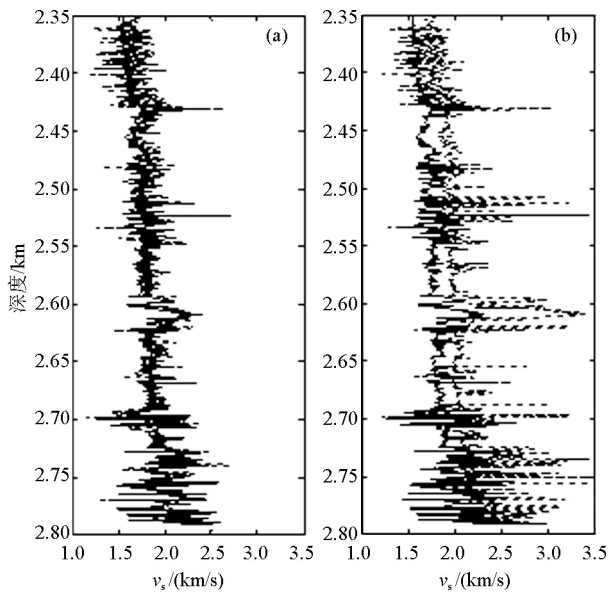


图 2 w 井横波速度预测所需测井曲线  
Fig.2 Input data of shear wave velocity prediction from w-well

以看出,基于本文提出的岩石物理模型的横波速度预测结果(虚线)与测量横波速度曲线(实线)吻合比较好,说明本文提出的岩石物理模型不仅具有明确的物理意义和地质意义,而且具有较高的速度预测精度。由图 3b 可以看出,基于 Xu-White 模型的预测结果明显大于实际测量的横波速度值。这是由于 Xu-White 模型没有考虑岩石颗粒之间的胶结作用对岩石弹性模量的影响。而当岩石颗粒之间胶结程度相对较差时,会降低岩石骨架的弹性模量,进而降低饱和流体岩石的纵波、横波速度,因而实际测量横波速度结果与 Xu-White 模型的预测结果相比具有相对较小的值。但由于文中提出的岩石物理模型在横波速度预测过程中,需要优化 3 个参数(即孔隙纵横比  $\alpha_c$ 、 $\alpha_s$  以及固结参数  $c$ ),与只需优化两个参数(即孔隙纵横比  $\alpha_c$ 、 $\alpha_s$ )的 Xu-white 模型相比,精度提高的同时,计算量会有所增加。



a—实线为测量横波速度,虚线为用本文模型预测的横波速度;  
b—实线为测量横波速度,虚线为用 Xu-White 模型预测的横波速度  
a—solid line represents shear wave velocities from well log, dashed line represents shear wave velocities predicted by model this paper proposed;b—solid line represents shear wave velocities from well log, dashed line represents shear wave velocities predicted by Xu-White model

图 3 两种模型对井 w 测井数据的横波速度预测结果比较  
Fig.3 Comparison of shear wave velocities predicted by two different models applied to w-well

3 结论

通过考虑成岩作用和孔隙形状以及孔隙度对于干

岩模量的影响,综合 Xu-White 模型和 Pride 模型,联合 Gassmann 理论,建立了一个新的饱和流体岩石物理模型。该模型能够从地质因素(成岩作用)和物理机制(孔隙几何形状)的角度解释干岩石弹性模量的影响机理,进行干岩模量的计算,具有明确的物理意义和地质意义。该模型成功地应用于实验室测量数据和实际野外测井数据的横波速度预测, Xu-White 模型没有考虑岩石颗粒之间的胶结程度对岩石速度的影响,横波预测值偏大,而本文提出的岩石物理模型,弥补了这一缺陷,因而具有更高的横波速度预测精度。同时也可以看出,横波速度预测过程中,本文提出的岩石物理模型比 Xu-White 模型多一个固结参数的优化,因而会增加一定的计算量。

参考文献(References):

[1] 印兴耀,王慧欣,曹丹平,等.利用三参数 AVO 近似方程的深层叠前地震反演[J].石油地球物理勘探,2018,53(1):129-135.  
Yin X Y, Wang H X, Cao D P, et al. Three term AVO approximation of  $K_t-K_m\rho$  and prestack seismic inversion for deep reservoirs [J]. OGP, 2018, 53(1): 129-135.  
[2] Castagna J P, Batzle M, Eastwood R. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks [J]. Geophysics, 1985, 50(4): 571-581.  
[3] Han D, Nur A, Morgan D. Effect of porosity and clay content on wave velocity in sandstones [J]. Geophysics, 1986, 51(11): 2093-2107.  
[4] Krief M, Garat J, Stellingwerff J, et al. A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full-waveform sonic) [J]. The LogAnalyst, 1990, 31(6): 355-369.  
[5] Raymer L L, Hunt E R, Gardner J S. An improved sonic transit time to porosity transform [C]//21<sup>st</sup> Annual Logging Symposium Transactions, Society of Professional Well Log Analysts, 1980.  
[6] Greenberg M L, Castagna J P. Shear-wave velocity estimation in porous rocks: Theoretical formulation, preliminary verification and applications [J]. Geophysical Prospecting, 1992, 40(2): 195-209.  
[7] Gassmann F. Über die Elastizität poröser Medien [J]. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gessellschaft in Zürich, 1951, 96: 1-23.  
[8] Castagna J P. AVO analysis-tutorial and review in offset dependent reflectivity theory and practice of AVO analysis [G]//Castagna J P, Backus M. Investigations in Geophysics; No. 8. Tulsa; Society of Exploration Geophysicists, 1993.  
[9] Xu S, White R E. A physical model for shear-wave velocity prediction [C]//Vienna: Extended Abstracts of 56<sup>th</sup> EAEG meeting, 1994: 117.  
[10] Xu S, White R E. A new velocity model for clay-sand mixtures [J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(1): 91-118.  
[11] Xu S, White R E. A physical model for shear-wave velocity prediction [J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44(4): 687-717.  
[12] Kuster G T, Toksöz M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media; Part 1, Theoretical formulations [J]. Geophys-

- ics, 1974, 39(5): 587–606.
- [13] Nishizawa O. Seismic velocity anisotropy in a medium containing oriented cracks transversely isotropic case[J]. Journal of the Physical Earth, 1982, 30(4): 331–347.
- [14] 郭栋, 印兴耀, 吴国忱. 横波速度计算方法与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(5): 535–538.
- Guo D, Yin X Y, Wu G C. Computational approach of S-wave velocity and application[J]. OGP, 2007, 42(5): 535–538.
- [15] 乔悦东, 高云峰, 安鸿伟. 基于 Xu-White 模型的优化测井横波速度预测技术研究与应用[J]. 石油天然气学报: 江汉石油学院学报, 2007, 29(5): 100–105.
- Qiao Y D, Gao Y F, An H W. Study and application of optimal technique of shear-wave velocity prediction based on Xu-White model[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(5): 100–105.
- [16] 郑旭桢, 王涛, 刘钊, 等. 泥岩基质弹性参数对 Xu-White 模型横波速度估算的影响[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(5): 990–998.
- Zheng X Z, Wang T, Liu Z, et al. Influence of clay elastic parameters on S-wave velocity estimation based on Xu-White model[J]. OGP, 2017, 52(5): 990–998.
- [17] Keys R G, Xu S. An approximation for the Xu-White velocity model[J]. Geophysics, 2002, 67(5): 1406–1414.
- [18] Xu S, Payne M A. Modeling elastic properties in carbonate rocks[J]. The Leading Edge, 2009, 28(1): 66–74.
- [19] Yin X Y, Li C C, Zhang G Z, et al. Estimation of S-wave velocity in carbonate rocks using the modified Xu-White model[C]//Vienna: 73<sup>rd</sup> EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2011: D003.
- [20] Wang H, Sun Z, Yang H, et al. Velocity prediction and secondary-pores quantitative inversion for complex carbonate reservoir[C]//Vienna: 73<sup>rd</sup> EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2011: D002.
- [21] Avseth P, Mukerji T, Mavko G. Quantitative seismic interpretation: applying rock physics tools to reduce interpretation risk[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [22] Pride S R. Relationships between seismic and hydrological properties[G]//Rubin Y, Hubbard S. Hydrogeophysics. New York: Kluwer Academy, 2005: 217–255.
- [23] Lee M W. Proposed moduli of dry rock and their application to predicting elastic velocities of sandstones[R]. U. S. Geological Survey, Scientific Investigations, 2005: 2005–5119.
- [24] Lee M W. A simple method of predicting S-wave velocity[J]. Geophysics, 2006, 71(1): F161–F164.
- [25] 侯波, 陈小宏, 张孝珍. 临界孔隙度 Pride 模型及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(2): 277–281.
- Hou B, Chen X H, Zhang X Z. Critical porosity pride model and its application[J]. OGP, 2012, 47(2): 277–281.
- [26] 孙福利, 杨长春, 麻三怀, 等. 横波速度预测方法[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 470–474.
- Sun F L, Yang C C, Ma S H, et al. An S-wave velocity predicted method[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 470–474.
- [27] 李琳, 马劲风, 张宪旭. 孔隙裂隙型砂岩横波速度预测方法[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 1065–1074.
- Li L, Ma J F, Zhang X X. S-wave velocity prediction in sandstones[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 1065–1074.
- [28] 张佳佳, 李宏兵, 刘怀山, 等. 几种岩石骨架模型的适用性研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1697–1702.
- Zhang J J, Li H B, Liu H S, et al. Accuracy of dry frame models in the study of rock physics[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(5): 1697–1702.
- [29] Jørstad A, Mukerji T, Mavko G. Model-based shear-wave velocity estimation versus empirical regressions[J]. Geophysical Prospecting, 1999, 47(5): 785–797.
- [30] Hill R. The elastic behavior of crystalline aggregate[M]. London: Proceedings of the Physical Society, 1952, A65: 349–354.
- [31] Sen M K, Stoffa P L. Bayesian inference, Gibbs sampler and uncertainty estimation in geophysical inversion[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44(2): 313–350.
- [32] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis in Porous media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

## A new rock physics model integrating diagenesis and pore shape and its application

HOU Bo, KANG Hong-Quan, CHENG Tao

(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** Shear wave velocity plays an important role in seismic modeling, AVO analysis and fluid identification. However, realistic well logging data lack shear wave information, so shear wave velocity prediction becomes concentrated on rock physics research. Integrating K-T model and Pride model, the authors propose in this paper a new rock physics model which is used to calculate dry rock moduli. The new rock physics model proposed in this paper integrates effects of pore shape and diagenesis to bulk modulus and shear modulus of dry rock, so it is more rational and its accuracy is high. At the same time, in combination with Gassmann theory, P-wave velocity and S-wave velocity model of fluid saturated rock is established. The model is applied to S-wave velocity predicting of measured data in lab and realistic well logging data. The predicted results demonstrate that S-wave velocity prediction based on the new rock physics model proposed in this paper is effective.

**Key words:** consolidation parameter; aspect ratio; rock physics; shear wave prediction

(本文编辑: 叶佩)

附录:

孔隙纵横比函数表达式

$$\begin{aligned}T_{ijj}(\alpha) &= \frac{3F_1}{F_2} \\F(\alpha) &= \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4F_5 + F_6F_7 - F_8F_9}{F_2F_4} \\F_1 &= 1 + A \left[ \frac{3}{2}(g + \theta) - R \left( \frac{3}{2}g + \frac{5}{2}\theta - \frac{4}{3} \right) \right] \\F_2 &= 1 + A \left[ 1 + \frac{3}{2}(g + \theta) - \frac{R}{2}(3g + 5\theta) \right] + B(3 - 4R) + \frac{A}{2}(A + 3B)(3 - 4R) [g + \theta - R(g - \theta + 2\theta^2)] \\F_3 &= 1 + \frac{A}{2} \left[ R(2 - \theta) + \frac{1 + \alpha^2}{\alpha^2}g(R - 1) \right] \\F_4 &= 1 + \frac{A}{4} [3\theta + g - R(g - \theta)] \\F_5 &= A \left[ R \left( g + \theta - \frac{4}{3} \right) - g \right] + B\theta(3 - 4R) \\F_6 &= 1 + A [1 + g - R(\theta + g)] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \\F_7 &= 2 + \frac{A}{4} [9\theta + 3g - R(5\theta + 3g)] + B\theta(3 - 4R) \\F_8 &= A \left[ 1 - 2R + \frac{g}{2}(R - 1) + \frac{\theta}{2}(5R - 3) \right] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \\F_9 &= A [g(R - 1) - R\theta] + B\theta(3 - 4R) \\A &= \frac{\mu'}{\mu_0} - 1 \\B &= \frac{1}{3} \left( \frac{K'}{K_0} - \frac{\mu'}{\mu_0} \right) \\R &= \frac{3\mu_0}{3K_0 + 4\mu_0} \\g &= \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} (3\theta - 2) \\\theta &= \frac{\alpha}{(1 - \alpha^2)^{3/2}} [\cos^{-1}(\alpha) - \alpha\sqrt{1 - \alpha^2}]\end{aligned}$$

式中,  $K'$  和  $\mu'$  分别为孔隙中包含物的体积模量和剪切模量, 在计算干岩模量时取值均为 0。