

文章编号: 1001-1749(2023)04-0411-09

基于改进 Xu—White 模型的富有机质页岩 横波预测方法研究

乔汉青^{1,2}, 方 慧^{1,2}, 杜炳锐^{1,2}, 许德鑫³

(1. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000;

2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 廊坊 065000;

3. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 长春 130026)

摘要: 横波速度是储层表征描述、AVO 分析和流体识别的重要信息。干酪根是富有机质页岩的重要成分且具有非固体非流体的特殊弹性性质, 常规处理方法是将其等效为流体。这里提出了一种基于变化孔隙纵横比 Xu—White 模型的富有机质页岩横波预测方法, 首先将干酪根同时等效为基质矿物和孔隙流体引入模型中, 然后利用模拟退火粒子群算法, 在约束条件下, 反演出变化孔隙纵横比, 并以变化孔隙纵横比初始化, 模型构建富有机质变化孔隙纵横比 Xu—White 模型, 最后结合测井信息与岩石物理模型预测横波速度。将该方法应用于中国西南部四川盆地东南焦石坝地区某井位, 通过对比固定孔隙纵横比 Xu—White 模型方法与干酪根流体等效的变化孔隙纵横比 Xu—White 模型预测结果, 验证了该方法的适用性和准确性。本方法将为富有机质页岩的研究提供更准确的横波速度资料。

关键词: Xu—White 模型; 变化孔隙纵横比; 富有机质页岩; 模拟退火粒子群; 横波速度预测

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.04.01

0 引言

横波速度在叠前地震 AVO 分析和叠前地震反演中必不可少, 同时也是裂缝流体识别、储层物性分析和岩石物性反演的重要参数。因受限于井位条件、技术手段和测井成本, 实际测井资料中横波速度信息较为匮乏, 因此准确地预测横波速度信息意义重大。为了获取准确的横波速度信息, 许多学者利用常规测井资料和相关理论方法预测横波速度, 主要有经验公式法、岩石物理模型法和机器学习智能预测法。

基于经验公式的方法是在横波速度和测井数据

之间建立了简单且直接的关系, Castagna 等^[1]建立含水碎屑硅酸盐岩中横波速度和纵波速度之间的线性关系; Han 等^[2]改进了速度、孔隙度和粘土含量的关系并且给出了不同压力下新的方程; Castagna 等^[3]通过对实验数据的最小二乘多项式拟合建立了横波速度和纵波速度之间的关系; Yan 等^[4]将 Han 方程和 Xu—White 模型结合得到了一个新的拟合方程, 并考虑了纵横比对速度的影响; Vernik 等^[5]研究了一种基于 Greenberg—Castagna 方法的混合技术, 将干酪根考虑在内并改进了横波速度预测方法。

近年来, 基于机器学习和人工神经网络的智能预测方法不断涌现^[6-8]。智能预测方法可以获得准

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 中国地质调查局基本科研项目(AS2022J04); 中国地质调查项目(DD20230233); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41904065)

第一作者: 乔汉青(1990—), 男, 硕士, 主要从事岩石物理、地震各向异性和地震正反演等方面的研究, E-mail: qiaohanqir@mail.cgs.gov.cn.

确的横波速度信息,但是这些方法需要目标参数的真实数据来训练系统,因此缺乏超出训练数据范围的外推。岩石物理模型描述了微观结构对岩石整体属性的影响,因此可以建立速度或模量与微观结构属性之间的关系。Berryman^[9]假设岩石是具有不同纵横比的椭球体成分的混合物,提出了等效介质自相容模型(SCM);Xu 和 White^[10-11]建立了泥质砂岩的速度与孔隙和粘土含量之间的关系,提出了 Xu-White 模型;Keys 等^[12]将干岩石模量的近似方程引入 Xu-White 模型;白俊雨^[13]利用可变纵横比替换固定纵横比修正了 Xu-White 模型;Guo 等^[14]利用结合给定的岩石属性、纵横比和各组分的体积分数 SCM 模型估计了 Barnett 页岩的横波速度;Sohail 等^[15]评估了经验公式法和岩石物理模型法预测横波速度,认为修正后的 Xu-White 模型是目前可用的最佳选择。

干酪根是页岩储层含油气性的重要指标,其体积模量与剪切模量较小,既不属于固体矿物也不属于流体,体积模量数值近似于水,与固体矿物差别较大,但具有剪切模量,在常规岩石物理建模时将干酪根等效为流体。岩石基质的弹性性质和孔隙流体性质会随实际围岩的压力和温度等条件变化。在常规 Xu-White 模型中采用的是固定孔隙纵横比,忽略了岩石物性参数随深度变化。因此,笔者提出了一种基于变化孔隙纵横比 Xu-White 模型的富有机质页岩横波速度预测方法,该方法根据干酪根的特性将其同时等效为基质矿物和孔隙流体,以 Xu-White 模型为基础,引入 Gassmann 流体替换方程、Voigt-Reuss-Hill 平均理论、Wood 公式,利用模拟退火粒子群算法(SA-PSO)求解以纵波速度为约束的变化孔隙纵横比,构建变化孔隙纵横比的 Xu-White 模型,进而预测横波速度。通过对实际页岩常规测井资料进行测试,验证了该方法的有效性,并与固定孔隙纵横比 Xu-White 模型和干酪根流体等效的变化孔隙纵横比 Xu-White 模型预测结果相比较,验证了方法的适用性和准确性。

1 基本原理

1.1 Xu-White 岩石物理模型

Xu 和 White 考虑孔隙度、岩石基质性质、孔隙流体和孔隙纵横比等因素,基于 Gassmann 流体替换方程、K-T 方程和微分等效介质理论(DEM)提出了具有较大孔隙纵横比的砂相关孔隙和较小孔隙

纵横比的粘土相关孔隙的 Xu-White 模型。公式表达如下:

$$\phi = \phi_s + \phi_c \quad (1)$$

$$\phi_s = f_s \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (2)$$

$$\phi_c = f_c \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (3)$$

$$K_d - K_0 = \frac{1}{3}(K_1 - K_0) \cdot \frac{3K_d + 4\mu_0}{3K_0 + 4\mu_0} \sum_{l=s,c} \phi_l T_{ijj}(\alpha_l) \quad (4)$$

$$\mu_d - \mu_0 = \frac{(\mu_1 - \mu_0)}{5} \cdot \frac{6\mu_d(K_0 + 2\mu_0) + \mu_0(9K_0 + 8\mu_0)}{5\mu_0(3K_0 + 4\mu_0)} \cdot \sum_{l=s,c} \phi_l F(\alpha_l) \quad (5)$$

$$F(\alpha) = T_{ijj}(\alpha) - \frac{T_{ijj}(\alpha)}{3} \quad (6)$$

为了避免 DEM 微分计算中迭代运算计算量过大的问题,Keys 等^[12]对 Xu-White 模型进行改进,利用求解一阶线性常微分方程组确定岩石骨架弹性模量,表达式如下:

$$K_d = K_0(1 - \phi)^p \quad (7)$$

$$\mu_d = \mu_0(1 - \phi)^q \quad (8)$$

式(1)~式(8)中: ϕ 、 ϕ_s 、 ϕ_c 分别为总孔隙度、砂相关孔隙度、粘土相关孔隙度; f_s 和 f_c 为砂的体积分数和粘土的体积分数; K_d 和 K_0 分别为岩石骨架和岩石基质的体积模量; μ_d 和 μ_0 分别为岩石骨架和岩石基质的剪切模量; $F(\alpha)$ 、 $T_{ijj}(\alpha)$ 、 $T_{ijj}(\alpha)$ 为关于孔隙纵横比 α 的函数; p 和 q 为几何因数。

p 和 q 的关系式如下:

$$p = \frac{1}{3} \sum_{l=s,c} f_l T_{ijj}(\alpha_l) \quad (9)$$

$$q = \frac{1}{5} \sum_{l=s,c} f_l F(\alpha_l) \quad (10)$$

式中: f_l 为相关矿物组分的体积分数。

Berryman^[9]提出了 N 相混合物自相容近似模型(SCA)来估计多相介质的等效弹性模量,同时给出计算了 p 和 q 所需的标量。

$$T_{ijj}(\alpha_l) = \frac{3F_1}{F_2} \quad (11)$$

$$F(\alpha_l) = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4 F_5 + F_6 F_7 - F_8 F_9}{F_2 F_4} \quad (12)$$

其中:

$$F_1 = 1 + A \left[\frac{3}{2}(f + \theta) - R \left(\frac{3}{2}f + \right. \right.$$

$$\frac{5}{2}\theta - \frac{4}{3}] \quad (13)$$

$$F_2 = 1 + A[1 + \frac{3}{2}(f + \theta) - R(\frac{3}{2}f + \frac{5}{2}\theta)] + B(3 - 4R) + \frac{A}{2}(A + 3B)(3 - 4R) \cdot$$

$$[f + \theta - R(f - \theta + 2\theta^2)] \quad (14)$$

$$F_3 = 1 + A[1 - (f + \frac{3}{2}\theta) - R(f + \theta)] \quad (15)$$

$$F_4 = 1 + \frac{A}{4}[f + 3\theta - R(f - \theta)] \quad (16)$$

$$F_5 = A[-f + R(f + \theta - \frac{4}{3})] + B\theta(3 - 4R) \quad (17)$$

$$F_6 = 1 + A[1 + f - R(f + \theta)] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \quad (18)$$

$$F_7 = 2 + \frac{A}{4}[3f + 9\theta - R(3f + 5\theta)] + B\theta(3 - 4R) \quad (19)$$

$$F_8 = A[1 - 2R + \frac{f}{2}(R - 1) + \frac{\theta}{2}(5R - 3)] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \quad (20)$$

$$F_9 = A[(R - 1)f - R\theta] + B\theta(3 - 4R) \quad (21)$$

上式中部分参数由下式求出:

$$A = \frac{\mu_j}{\mu_m} - 1, B = \frac{1}{3}(K_j/K_m - \mu_j/\mu_m), R = (3\mu_m)/(3K_m + 4\mu_m), \theta = \alpha/(1 - \alpha^2)^{3/2}[\arccos \alpha - \alpha(1 - \alpha^2)^{1/2}], f = [\alpha^2/(1 - \alpha^2)](3\theta - 2)$$

式中: K_j 和 μ_j 分别为各矿物组分的体积模量和剪切模量; K_m 和 μ_m 分别为岩石基质的体积模量和剪切模量。

1.2 横波速度预测

Gassmann 流体替换方程^[16]可以通过一种流体饱和岩石速度预测另外一种流体饱和岩石速度,同样也可以用岩石骨架速度预测流体饱和岩石速度,其关系式如下:

$$\frac{K_{\text{sat}}}{K_0 - K_{\text{sat}}} = \frac{K_d}{K_0 - K_d} + \frac{K_1}{\phi(K_0 - K_1)} \quad (22)$$

$$\mu_{\text{sat}} = \mu_d \quad (23)$$

式中: K_{sat} 和 K_1 分别为流体饱和岩石和孔隙流体的体积模量; μ_{sat} 和 μ_1 分别为流体饱和岩石和孔隙流体的剪切模量。

根据岩石弹性参数与岩石地震波传播速度关系,波速可以用流体饱和岩石体积模量、剪切模量、

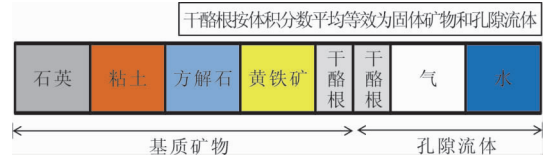


图 1 富有机质页岩物质组成

Fig. 1 Composition of organic-rich shale

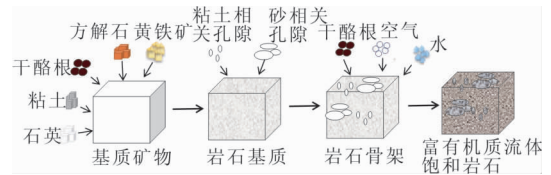


图 2 富有机质页岩岩石物理模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rock physics model of organic-rich shale

密度来表示:

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}\mu_{\text{sat}}}{\rho}} \quad (24)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu_{\text{sat}}}{\rho}} \quad (25)$$

式中: ρ 为流体饱和岩石密度; V_p 、 V_s 为流体饱和岩石的纵、横波速度。

1.3 基于改进 Xu-White 模型的页岩横波速度预测

干酪根与页岩储层含油气性相关,成熟度表征了其赋存形态,成熟度越高转化成油的程度越高。干酪根具有较小的弹性模量,常规岩石物理建模时往往将其等效为孔隙流体,忽略了其剪切模量的存在,造成了模型的误差,所以在建模时需要充分考虑干酪根的赋存形态、孔隙和纵横比对页岩的影响。实际研究中发现,干酪根的孔隙结构属于极细微孔隙,故在建模中不考虑其孔隙结构问题。

笔者将干酪根同时等效为固体矿物和孔隙流体,如图 1 所示,将成熟度较低的干酪根等效为固体矿物,成熟度较高的干酪根等效为孔隙流体。因无法明确干酪根的具体成熟度,故将模型岩石基质等效为石英、长石和粘土等无机岩石矿物与干酪根的混合物,孔隙流体等效为水、气和干酪根的混合物,其中干酪根按体积分数平均分配到岩石基质和孔隙流体。

如图 2 所示,首先利用粘土、石英、方解石和等分体积的干酪根组成富有机质页岩的岩石基质,然后向岩石基质中加入粘土相关孔隙和砂相关孔隙构成富有机质页岩的岩石骨架,将水、气和等分体积的

干酪根作为孔隙流体填充到岩石骨架中,最终组成了富含有机质流体饱和岩石,使其更符合实际地质情况。

Voigt-Reuss-Hill 平均理论^[17]在不考虑矿物几何形状下可求取 N 相矿物组成的混合物的等效弹性模量。模型基质的等效弹性模量如下:

$$M_H = \frac{\frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N f_i M_i + \frac{1}{2} f_k M_k \right) + 1}{\sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} + \frac{1}{2} \frac{f_k}{M_k}} \quad (26)$$

式中: i 为基质中某一无机矿物; M_i 为无机矿物所对应的模量; f_i 为无机矿物所对应的体积分数; M_k 为干酪根的模量; f_k 为干酪根的体积分数, M_H 为 Hill 有效模量。

利用 Wood 公式^[18]可以计算页岩孔隙流体混合物的等效模量如下:

$$\frac{1}{K_f} = \frac{f_w}{K_w} + \frac{f_g}{K_g} + \frac{1}{2} \frac{f_k}{K_k} \quad (27)$$

式中: f_w 、 f_g 、 f_k 分别为水、气和干酪根的体积分数; K_f 、 K_w 、 K_g 和 K_k 分别为混合流体的等效体积模量、水的体积模量、气的体积模量和干酪根的体积模量,其中 $f_w = S_w$ 为含水饱和度, $f_w + f_g + \frac{1}{2} f_k = 1$ 。

流体饱和页岩岩石的密度由以下公式给出:

$$\rho = (1 - \phi) \rho_0 + \phi \rho_f \quad (28)$$

$$\rho_0 = f_s \rho_s + f_c \rho_c + \frac{1}{2} f_k \rho_k \quad (29)$$

$$\rho_f = (1 - S_w - \frac{1}{2} f_k) \rho_{gas} +$$

$$S_w \rho_{water} + \frac{1}{2} f_k \rho_k \quad (30)$$

式中: ρ_0 和 ρ_f 分别为矿物基质的密度和饱和流体的密度; ρ_s 、 ρ_c 、 ρ_{gas} 、 ρ_{water} 和 ρ_k 分别为砂、粘土、空气、水和干酪根的密度。

常规 Xu-White 模型采用的是固定孔隙纵横比,该模型不能准确描述储层孔隙结构,特别是在预测岩石物性参数时,会存在较大的偏差。基于前人的研究结果,发现粘土相关孔隙纵横比对模型预测结果影响较大。利用这一特点,笔者采用基于孔隙纵横比变化条件下的 Xu-White 模型,该模型采用纵波速度作为约束条件,拟合出变化的粘土相关孔隙纵横比,以变化孔隙纵横比初始化 Xu-White 模型。

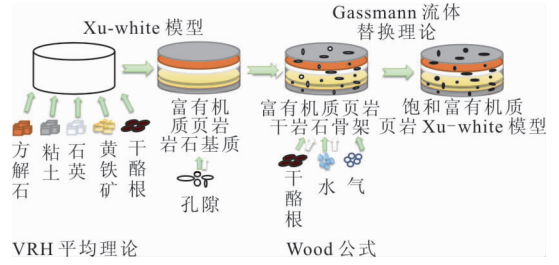


图3 富含有机质页岩 Xu-White 模型建模流程
Fig. 3 Modeling process of organic-rich shale Xu-White model

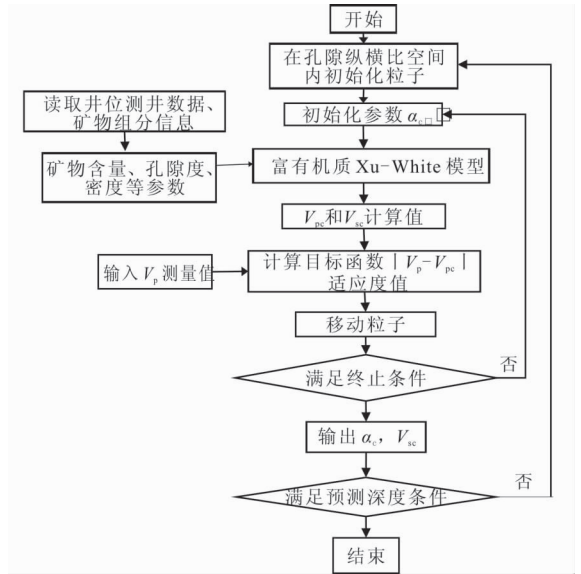


图4 富含有机质页岩横波速度预测流程图
Fig. 4 Flow chart of shear wave velocity prediction of organic-rich shale

Sams 等^[19]给出了考虑泥质含量对砂相关孔隙纵横比的公式为式(31)。

$$\alpha_s = 0.17114 - 0.24477\phi + 0.004314f_c \quad (31)$$

以纵波速度作为约束条件,目标函数为如下形式:

$$F(\alpha_c) = |V_p - V_{pc}| \quad (32)$$

$$V_{pc} = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu_{sat}}{\rho}} \quad (33)$$

其中: α_c 为粘土相关孔隙纵横比; V_p 为常规测井曲线中纵波速度; V_{pc} 为利用富含有机质 Xu-White 模型计算的纵横波速度。

模拟退火粒子群算法(SA-PSO)是一种集群优化算法,能解决反演中非线性目标函数求解问题,其基于模拟退火思想,改善粒子群算法中局部寻优能力,已被应用于储层描述的非线性反演问

题^[20-21]。将它应用于求解目标函数,通过搜索参数 $|V_p - V_{pc}|$ 的最优解,使后验信息 $F(\alpha_c)$ 最大。

在富有机质页岩中构建孔隙纵横比变化条件下的 Xu-White 模型,当给定砂、粘土、干酪根和孔隙的体积分数、密度和固有模量,砂相关孔隙和粘土相关孔隙的纵横比,通过模型计算出岩石的矿物基质、饱和流体、骨架的弹性模量,利用 Gassmann 流体替换方程计算出流体饱和岩石的弹性模量,最后利用速度方程计算出横波速度(图 3)。

2 实际资料处理与分析

笔者选取中国西南部四川盆地东南焦石坝地区某井位实际测井资料进行处理研究。研究区域处于构造过渡部位,构造主体形变较弱,构造层形态基本一致,构造单元整体呈现背斜形态,顶部宽缓、两翼陡倾^[22]。目标层段位于志留统龙马溪组的底部,有机质含量较高,上下地层均是孔隙性较差的页岩,起到了良好的密闭作用。钻探结果表明,富有机质页岩厚度约 80 m~120 m 之间,底部干酪根含量较高,具有约 20 m~40 m 优质页岩稳定分布,此井段为目标储层井段。目标井位测井资料完整且具有井位相关地质信息和岩芯资料,实测横波速度信息,可用以对比预测结果,验证本文方法的有效性。

目标井位测井资料给出了常规测井曲线:伽马射线(GR)、纵波速度(V_p)、横波速度(V_s)、密度(ρ)、孔隙度(ϕ)和含水饱和度(S_w),如图 5 所示。图 5 中伽马射线测线指示出岩石放射性强度,间接反应矿物组分的放射性,总体与速度曲线呈负相关趋势。纵、横波速度曲线呈现较强的相关性,明显的速度变化能识别 2 354 m 和 2 380m 地层分界。密度曲线随深度增加呈减小趋势。井位深度内各矿物组分信息如图 6 所示,目标区域内地层矿物主要是粘土(Clay)、石英(Quartz)、方解石(Carbonate)、干酪根(Kerogen)和黄铁矿(Pyrite),孔隙流体为水(Water)、气(Gas)和部分干酪根(Kerogen),其中干酪根含量随深度增加逐渐升高。

根据目标井位测井资料,结合各矿物组分的弹性参数,如表 1 所示,将干酪根按体积分数均分,一半等效为基质矿物组分,一半等效为孔隙流体。通过 VRH 平均理论计算富有机质页岩基质的弹性参数,构建富有机质页岩的固定孔隙纵横比 Xu-White 模型,利用 Wood 公式计算混合流体的等效模量,使用 Gassmann 流体替换方程计算出流体饱

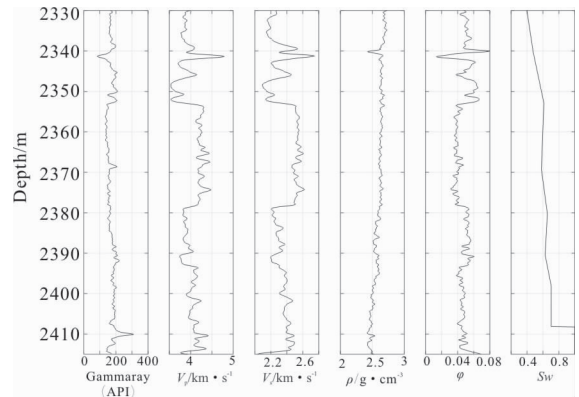


图 5 目标井位常规测井曲线

Fig. 5 Conventional logging curves of target wells

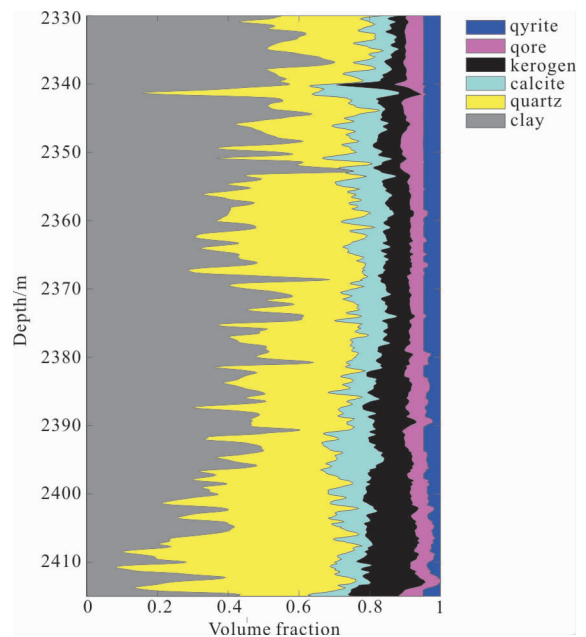


图 6 目标井位地层矿物组分信息

Fig. 6 Mineral composition information of target well

和富有机质页岩的弹性模量,利用速度方程计算出

表 1 矿物组分和孔隙流体弹性参数

Tab. 1 Mineral composition and pore fluid elastic parameters

	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	密度 /g·cm ⁻³
石英	37.00	44.00	2.65
方解石	76.80	32.00	2.71
粘土	25.00	9.00	2.55
黄铁矿	147.4	132.5	4.93
干酪根	2.90	2.70	1.30
水	2.21	—	1.09
气	0.18	—	0.26

表 2 不同模型预测的 V_s 的误差均方根(RMSE)和相关系数(r)Tab. 2 RMSE and correlation coefficient (r) of V_s predicted by different models

模型	RMSE of V_s	r of V_s
富有机质固定孔隙纵横比 Xu-White 模型	0.230 41	0.739 95
富有机质变化孔隙纵横比 Xu-White 模型	0.093 85	0.924 65
干酪根流体等效的变化孔隙纵横比 Xu-White 模型	0.278 56	0.690 37

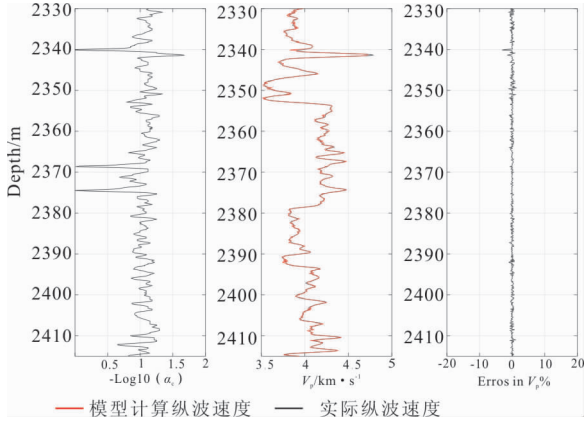


图 7 粘土相关孔隙纵横比曲线

Fig. 7 Clay related pore aspect ratio curve

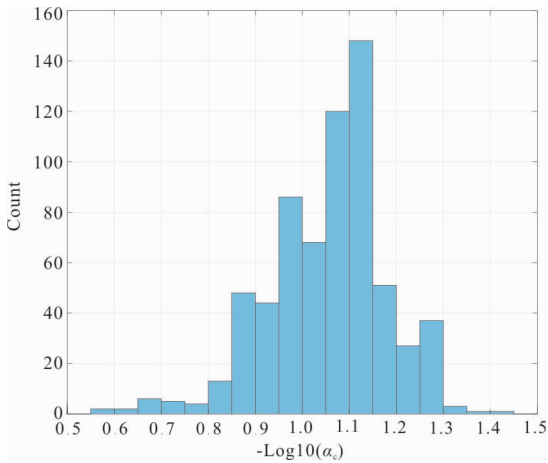


图 8 粘土相关孔隙纵横比分布直方图

Fig. 8 Histogram of aspect ratio distribution of clay-related pores

模型的纵波速度 V_{pc} , 在模拟退火粒子群算法框架内, 以纵波速度作为约束条件, 搜索参数 $|V_p - V_{pc}|$ 的最优解, 得到变化孔隙纵横比并以此初始化 Xu-White 模型, 构建富有机质页岩的变化孔隙纵横比 Xu-White 模型, 进而预测模型横波速度。再与固定孔隙纵横比 Xu-White 模型的预测结果相比较, 分析本文方法的优越性。

砂相关孔隙纵横比曲线可通过公式(31)直接计

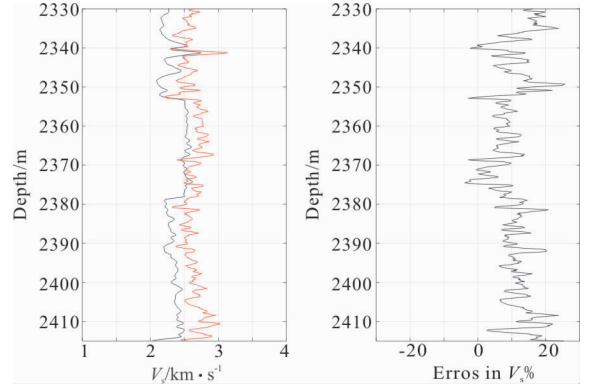


图 9 固定孔隙纵横比 Xu-White 模型的横波速度预测结果

Fig. 9 Prediction of shear wave velocity based on Xu-White model with fixed aspect ratio

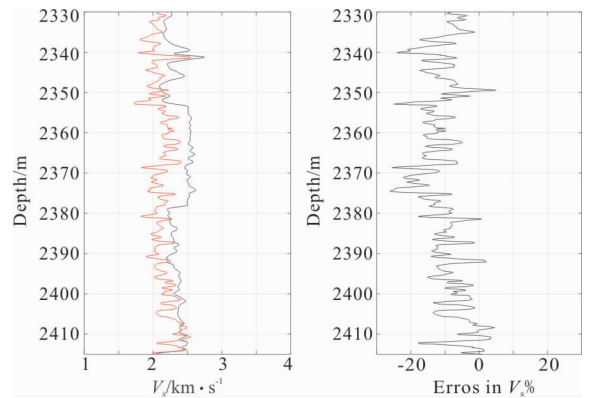


图 10 干酪根流体等效 Xu-White 模型的横波速度预测结果

Fig. 10 The prediction results of shear wave velocity based on Xu-White model based on kerogen fluid equivalence

算, 粘土相关孔隙纵横比曲线通过公式(32)拟合得出, 结果如图 7 所示, $|V_p - V_{pc}|$ 曲线拟合良好, 误差稳定且极小。图 8 为目标井位的粘土相关孔隙纵横比分布直方图, 形态近似为正态分布, 证明了所得粘土相关孔隙纵横比曲线的有效性。从图 8 可以看出, 上覆围岩(2 330 m~2 380 m)的孔隙纵横比变化范围较大, 而储层井段(2 380 m~2 415 m)孔隙纵横比较为稳定。

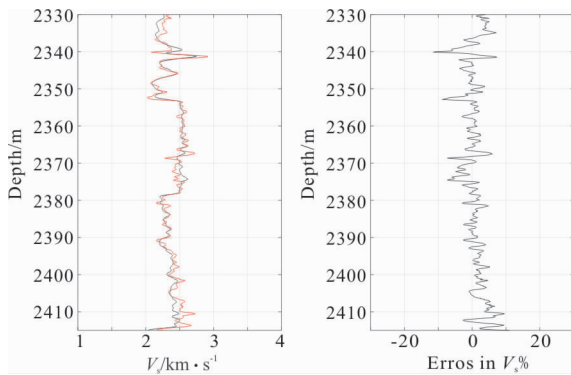


图 11 改进 Xu-White 模型的横波速度预测结果
Fig. 11 The prediction results of shear wave velocity based on improved Xu-White model

为了验证本文方法的准确性,采用富有机质页岩的固定孔隙纵横比 Xu-White 模型、变化孔隙纵横比 Xu-White 模型和干酪根流体等效的变化孔隙纵横比 Xu-White 模型对目标井位横波速度进行预测,其结果通过了误差均方根(RMSE)和相关系数(r)定量评价。评价公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{V}_i - V_i)^2} \quad (34)$$

$$r = \frac{\text{cov}(\tilde{V}, V)}{\sigma_{\tilde{V}} \sigma_V} \quad (35)$$

其中: i 为深度点位; V_i 和 V_i 为预测速度和实际速度; N 为深度点位总数; $\text{cov}(\cdot)$ 为协方差; σ 为速度的标准偏差。

三种方法对目标井位横波速度的预测结果如图 9~图 11 所示(红色为预测速度、黑色为实际速度),其误差评价如表 2 所示。

对比上述预测结果,验证了本文方法应用于富有机质页岩储层测井区域横波速度预测的有效性。基于富有机质固定孔隙纵横比 Xu-White 模型的预测结果如图 9 所示,图 9 中预测横波速度曲线与测井横波速度曲线变化趋势大体一致,相关性较高。但因模型采用固定孔隙纵横比,未考虑岩石孔隙纵横比与地层深度、围岩压力和岩石性质等因素的影响,预测结果的误差均方根较大并存在全局误差,储层井段结果误差随深度加深而逐渐增大。

基于干酪根等效流体的变化孔隙纵横比 Xu-White 模型预测结果如图 10 所示,预测横波速度曲线与测井横波速度曲线变化相似,但由于忽略了干酪根剪切模量,结果的误差均方根较大也存在全局

误差,整体差于基于富有机质固定孔隙纵横比 Xu-White 模型预测结果。

基于富有机质变化孔隙纵横比 Xu-White 模型的预测结果如图 11 所示,图中预测横波速度曲线与测井横波速度曲线拟合程度较高,相关性较其他两种方法预测结果大幅提高,误差均方根大幅下降,全局误差得到更正,对比基于干酪根等效流体的变化孔隙纵横比 Xu-White 模型,表明根据干酪根特殊性,将其同时等效为基质矿物和孔隙流体来构建富有机质 Xu-White 岩石物理模型的适用性,预测结果明显优于采用固定孔隙纵横比 Xu-White 模型方法。研究表明,在约束条件下,利用模拟退火粒子群算法反演出的孔隙纵横比,能真实反映岩石孔隙结构变化,以变化孔隙纵横比条件下构建的 Xu-White 模型能有效应用于富有机质页岩储层横波速度预测,避免了岩石物理参数为常数所造成的误差,验证了本文方法的准确性。

3 结论

笔者提出了一种基于变化孔隙纵横比 Xu-White 模型的富有机质页岩储层常规测井区域横波速度预测方法,简要介绍了富有机质储层中干酪根的弹性性质特点和常规 Xu-White 模型的建模方法,着重介绍了富有机质变化孔隙纵横比 Xu-White 模型的建模步骤和横波速度预测的工作流程。根据干酪根在建模时往往等效为孔隙流体和常规 Xu-White 模型采用固定孔隙纵横比所造成的误差,笔者将干酪根同时等效为基质矿物和孔隙流体引入建模流程中,避免了干酪根完全等效为流体时忽略其剪切模量的存在,并利用模拟退火粒子群算法,以纵波速度作为约束条件,反演出变化孔隙纵横比,以变化孔隙纵横比初始化模型构建富有机质变化孔隙纵横比 Xu-White 模型,避免了孔隙纵横比为固定参数所造成的误差。

通过对比常规预测方法与本文方法的预测结果,表明了本文方法能有效消除预测结果的全局误差,提升约束条件的相关性和拟合度,真实反映岩石孔隙结构变化,得到更为准确的横波速度信息,验证了方法的有效性和准确性,同时提高了模型在应用于富有机质页岩的适用性。本文方法能有效适用于

富有机质页岩常规测井区域横波速度预测,既而为后续火山岩储层流体属性识别、储层特征评价、裂缝分布识别、叠前地震反演和 AVO 分析提供重要参数。

参考文献:

- [1] CASTAGNA J P, BATZLE M L, EASTWOOD R L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks[J]. *Geophysics*, 1985, 50(4):571-581.
- [2] HAN D H. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones[J]. *Geophysics*, 1986, 51(11):2093-2107.
- [3] CASTAGNA J P, BACKUS M M. Offset-dependent reflectivity: theory and practice of AVO analysis[J]. *Front Matter*, 1993, 8:78-92.
- [4] YAN J, XIANGANG LI, LIU E. Effects of pore aspect ratios on velocity prediction from well-log data[J]. *Geophysical Prospecting*, 2010, 50(3):289-300.
- [5] VERNIK, LEV, CASTAGNA, et al. S-wave velocity prediction in unconventional shale reservoirs[J]. *Geophysics: Journal of the Society of Exploration Geophysicists*, 2018, 83(1):MR35-MR45.
- [6] RAJABI M, BOHLOLI B, AHANGAR E G. Intelligent approaches for prediction of compressional, shear and stoneley wave velocities from conventional well log data: a case study from the sarvak carbonate reservoir in the abadan Plain (Southwestern Iran)[J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(5):647-664.
- [7] 王晓光. 自适应 BP 神经网络在横波速度预测中的应用[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(5):86-88.
WANG X G. Application of self-adaptive BP neural network to the prediction of shear wave velocity[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(5):86-88. (In Chinese)
- [8] YAN ZHANG, HONG-RU ZHONG, ZHONG-YUAN WU, et al. Improvement of petrophysical workflow for shear wave velocity prediction based on machine learning methods for complex carbonate reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 192(107234):1-14.
- [9] BERRYMAN, JAMES G. Long-wavelength propagation in composite elastic media[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68(6):1820-1831.
- [10] XU S, WHITE R E. A new velocity model for clay-sand mixtu res[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] KEYS R G, XU S. An approximation for the Xu-White velocity model[J]. *Geophysics*, 2002, 67(5):1406-1414.
- [13] 白俊雨, 宋志翔, 苏凌, 等. 基于 Xu-White 模型横波速度预测的误差分析[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(2):589-595.
BAI JY, SONG ZH X, SU L, et al. Error analysis of shear-velocity prediction by the Xu-White model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(2):589-595. (In Chinese)
- [14] GUO Z, LI X Y. Rock physics model-based prediction of shear wave velocity in the Barnett Shale formation[J]. *Journal of Geophysics & Engineering*, 2015, 12(3):527-534.
- [15] SOHAIL G M, HAWKES C D. An evaluation of empirical and rock physics models to estimate shear wave velocity in a potential shale gas reservoir using wireline logs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 185(4):106666-106682.
- [16] GASSMANN, F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. *Geophysics*, 1951, 16(4):673-685.
- [17] HILL, R. The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1952, 65(5):349-354.
- [18] WOOD, A. W. A textbook of Sound[M]. New York: The MacMillan Co., 1955.
- [19] SAMS M S, ANDREA M. The effect of clay distribution on the elastic properties of sandstones[J]. *Geophysical Prospecting*, 2001, 49(1):128-150.
- [20] 刘财, 乔汉青, 郭智奇, 等. 基于粒子群算法的页岩孔隙结构反演及横波速度预测[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(02):689-695.
LIU C, QIAO HQ, GUO Z Q, et al. Shale pore structure inversion and shear wave velocity prediction based on particle swarm optimization (psa) algorithm[J]. *Progress in geophysics*, 2017, 32(2):689-695. (In Chinese)
- [21] 乔汉青. 基于改进粒子群算法的横波速度预测方法研

- 究[D]. 长春:吉林大学,2017. —36.
- QIAO H Q. Shear wave velocity prediction method based on improved Particle Swarm Algorithm [D]. Changchun:Jilin University,2017. (In Chinese)
- [22] 郭彤楼,张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发,2014,41(01):28
- GUO T L, ZHANG H R. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(01):28—36. (In Chinese)

Shear wave prediction method of organic—rich shale based on improved Xu—White model

QIAO Hanqing^{1,2}, FANG Hui^{1,2}, DU Bingrui^{1,2}, XU Dexin³

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China;

2. Laboratory of Geophysical EM Probing Technologies, MLR, Langfang 065000, China;

3. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130026, China)

Abstract: Shear wave velocity is essential information for reservoir characterization, AVO analysis, and fluid identification. Kerogen is a crucial component of organic—rich shale and has special elastic properties of non—solid and non—fluid. The conventional prediction method is equivalent to fluid. This paper proposes a shear wave prediction method for organic—rich shale based on the Xu—White model with variable aspect ratio. Firstly, kerogen is equivalent to the model's matrix minerals and pore fluid. Then, a simulated annealing particle swarm optimization algorithm is used to inverse the variable aspect ratio under constraint conditions. Thirdly, the Xu—White model with variable aspect ratio is constructed by initializing the variable aspect ratio model. Finally, the shear wave velocity is predicted by combining logging information and the rock physics model. The method is applied to a sound site in Jiaoshiba area of southeast Sichuan Basin in southwestern China. The prediction results of Xu—White model with fixed aspect ratio and Xu—White model with variable aspect ratio equivalent to kerogen fluid are compared to verify the applicability and accuracy of the method. This method will provide more accurate shear wave velocity data for studying organic—rich shale.

Keywords: Xu—white model; variable aspect ratio; rich organic shale; simulated annealing particle swarm; shear wave velocity prediction