文章编号：1004—5589（2018）01—0282—07

基于人工鱼群算法和SCA等效理论的井中横波速度预测方法

魏忠宇[1]，刘财[1]，郭智奇[1]，张冰[1]，刘喜武[2,3,4]

1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026；
2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室，北京 100083；
3. 中国石化 页岩油气勘探开发重点实验室，北京 100083；
4. 中国石化 石油勘探开发研究院，北京 100083

摘要：在建立页岩岩石物理模型的基础上，根据等效自相容近似（SCA）岩石物理模型，构建出岩石的纵波速度、横波速度与岩石密度、组分和孔隙度等的定量关系，得出使理论纵波速度和实际纵波速度最接近的孔隙纵横比，进而将该孔隙纵横比作为约束条件来实现横波速度预测。反演算法利用人工鱼群算法来计算最佳孔隙纵横比，并将预测的横波速度与实际测得的横波速度对比，证明了人工鱼群算法的有效性。

关键词：人工鱼群算法；等效自相容近似；页岩；孔隙纵横比；横波速度预测

中图分类号：P588.3；P631.443　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.027

Shear wave velocity prediction based on artificial fish-swarm algorithm and SCA equivalent theory

WEI Zhong-yu[1], LIU Cai[1], GUO Zhi-qi[1], ZHANG Bing[1], LIU Xi-wu[2,3,4]

1. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;
3. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, SinoPEC, Beijing 100083, China;
4. Exploration & Production Research Institute, SinoPEC, Beijing 100083, China

Abstract: Based on the rock physics model of shale, according to the rock physics model of equivalent self consistent approximation (SCA), the authors build the quantitative relationship between P-wave, S-wave and the rock density, rock composition and rock porosity to find a pore aspect ratio can minimize the error of the theoretical P-wave velocity and the actual P-wave velocity. Then the authors use this pore aspect ratio as the constraint condition to achieve the prediction of shear wave velocity. The inversion algorithm uses the artificial fish swarm algorithm to calculate the optimal aspect ratio, and compares the predicted shear wave velocity with the actual measured shear wave velocity which proves the effectiveness of the artificial fish-swarm algorithm.

Key words: artificial fish-swarm algorithm; equivalent self consistent approximation; shale; pore aspect ratio; shear wave velocity prediction

收稿日期：2017-01-11；**改回日期**：2017-05-12

基金项目：国家自然科学基金重点项目（41430322）、国家自然科学基金青年项目（41404090）、国家自然科学基金石油化工联合基金（U1663207）、页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室开放基金资（G5800-16-ZS-KFZY002）联合资助.

通讯作者：刘财（1963-），男，博士生导师，主要从事地震波场正反演理论、地震数据处理及结合地质、地球物理等研究. E-mail：liucai@jlu.edu.cn

0　引言

在地震勘探的很多应用中，横波速度都有着非常重要的作用。但是横波测井的成本相对较高，解释难度相对较大，在实际的生产中并未在每口井中都采集。

目前对横波速度预测的主要方法是基于岩石物理理论。为了弥补横波速度在实际生产的常规测井数据中缺少的问题，很多学者通过岩石物理的测量来创建横、纵波速度之间的关系。Castagna 等[1]提出了描述含水碎屑岩中地震波的纵波、横波速度关系的经验公式（Castagna 关系式）；Han 等[2]测量了多种压力下的 70 多块岩石的样本，计算得到了横、纵波速度之间的线性回归方程；Xu 等[3]结合 Kuster-Tok-soz 模型、Gassmann 方程与微分等效介质理论，创建了 Xu-White 模型；Nur 等[4]假设干岩石弹性模量和岩石孔隙度线性相关的情况下预测横波速度，建立了临界孔隙度模型；Xu 等[5]用泥岩孔、粒间孔、砂岩孔与微裂缝 4 种类型替换了 Xu-White 模型中的泥岩孔隙与砂岩孔隙，通过对 Xu-White 模型的这种改变，实现了碳酸盐岩的横波速度预测。中国学者也对横波速度预测做了很多相关研究。李宏兵等[6]通过把 Gassmann 方程和 DEM 解析模型相结合，利用非线性模拟退火的方法反演岩石孔隙纵横比，进而将孔隙纵横比作为约束条件来实现横波速度预测；刘欣欣等[7]提出了一种计算碳酸盐岩岩性的方法，采用自适应遗传算法反演矿物组成成分的体积模量和剪切模量；罗永亮等[8]对 Pride 模型和 Lee 模型进行了改进，把目标函数最优化的问题转换成线性矩阵方程迭代求解的问题预测横波速度。

1　方法原理

1.1　自相容近似岩石物理模型

Berryman[9,10]提出等效介质自相容近似模型（self-consistent approximationg 简称 SCA 模型）。模型中用等效基质代替岩石中的实际背景介质来模拟 SCA 包含物间的弹性互动，兼顾孔隙形状与固体颗粒形状的影响。通过对背景介质弹性参数的调试，使多向弹性介质的参数与背景介质弹性参数匹配，此时的背景介质弹性模量既为多相弹性介质等效弹性模量。

N 相混合物自相容弹性模量的公式为：

$$\sum_{i=1}^{N} x_i (K_i - K_{SC}^*) P^{*i} = 0 \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{N} x_i (\mu_i - \mu_{SC}^*) Q^{*i} = 0 \tag{2}$$

式中：i 表示第 i 种材料；x_i 代表体积含量；K_i 代表体积模量；μ_i 代表剪切模量。P、Q 的上标 $*i$ 代表该几何因数是针对有自相容等效模量 K_{sc}^* 和 μ_{sc}^* 的背景介质中包含物材料 i。孔隙纵横比 α，任意 α 的椭球体包含物的 P、Q 的值为：

$$P = \frac{1}{3} T_{iijj} \tag{3}$$

$$Q = \frac{1}{5}\left(T_{ijij} - \frac{1}{3} T_{iijj} \right) \tag{4}$$

张量 T_{ijkl} 将均匀远场应变场和椭球包含物内的应变联系起来。Berryman 给出了计算 P、Q 所需的相关标量：

$$T_{iijj} = \frac{3F_1}{F_2} \tag{5}$$

$$T_{ijij} - \frac{1}{3} T_{iijj} = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4 F_5 + F_6 F_7 - F_8 F_9}{F_2 F_4} \tag{6}$$

其中：

$$F_1 = 1 + A\left[\frac{3}{2}(f + \theta) - R\left(\frac{3}{2} f + \frac{5}{2}\theta - \frac{4}{3} \right) \right] \tag{7}$$

$$F_2 = 1 + A\left[1 + \frac{3}{2}(f + \theta) - \left(\frac{R}{2} \right)(3f + 5\theta) \right] + B(3 - 4R) + \left(\frac{A}{2} \right)(A + 3B)(3 - 4R)\left[f + \theta - R(f - \theta + 2\theta^2) \right] \tag{8}$$

$$F_3 = 1 + A\left[1 - \left(f + \frac{3}{2}\theta \right) + R(f + \theta) \right] \tag{9}$$

$$F_4 = 1 + \left(\frac{A}{4} \right)\left[f + 3\theta - R(f - \theta) \right] \tag{10}$$

$$F_5 = A\left[-f + R\left(f + \theta - \frac{4}{3} \right) \right] + B\theta(3 - 4R) \tag{11}$$

$$F_6 = 1 + A[1 + f - R(f + \theta)] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \quad (12)$$

$$F_7 = 2 + (\frac{A}{4})[3f + 9\theta - R(3f + 5\theta)] + B\theta(3 - 4R) \quad (13)$$

$$F_8 = A[1 - 2R + (\frac{f}{2})(R - 1) + (\frac{\theta}{2})(5R - 3)] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \quad (14)$$

$$F_9 = A[(R - 1)f - R\theta] + B\theta(3 - 4R) \quad (15)$$

式中 A, B, R 分别为:

$$A = \frac{\mu_i}{\mu_m} - 1 \quad (16)$$

$$B = \frac{1}{3}(\frac{K_i}{K_m} - \frac{\mu_i}{\mu_m}) \quad (17)$$

$$R = \frac{(1 - 2\upsilon_m)}{2(1 - \upsilon_m)} \quad (18)$$

在 $\alpha \leqslant 1$ 时函数 θ 为:

$$\frac{\alpha}{(1 - \alpha^2)^{\frac{3}{2}}}[\arccos\alpha - \alpha(1 - \alpha^2)^{\frac{1}{2}}] \quad (19)$$

在 $\alpha > 1$ 时函数 θ 为:

$$\frac{\alpha}{(\alpha^2 - 1)^{\frac{3}{2}}}[\alpha(\alpha^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - \operatorname{arccosh}\alpha] \quad (20)$$

f 为:

$$f = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2}(3\theta - 2) \quad (21)$$

用 K_{SC}^*和 μ_{SC}^*分别代替式 17 中的 K_m 和 μ_m，用同时迭代方法求耦合的公式，能够得出岩石在 SCA 模型下的密度、等效体积和 ρ 剪切模量。

1.2 人工鱼群算法的原理

人工鱼群算法（artificial fish-swarm algorithm 简称 AFSA）。在一片水域中，鱼一般能够自己或者通过跟随其他的鱼到达这片水域中营养最丰富的地点。人工鱼群算法是通过分析鱼类的行动方式，凭借构造人工鱼来模拟鱼类的一些行为而提出的人工智能优化算法[11]。人工鱼群算法是在目标函数可行解空间范围内，利用一定数量的可行解来进行搜索，结果渐渐收敛于最优解的过程。建模时，假设人工鱼个体为（$X = x_1$，x_2，x_3，……，x_n），其中 x_i 表示要找到的最优变量。该算法中 Visual 代表人工鱼可以感知的距离，这个距离限制人工鱼的活动范围；Step 代表人工鱼的可移动最大步长；np 代表鱼群的规模数，把拥挤度因子作为约束鱼群规模的一个参数，用 σ 来表示；MAXGEN 代表迭代的次数，尝试的次数用 Try-number 来表示，此方法的具体实现：

觅食行为 X_i 为人工鱼的当前状态，在该人工鱼的视野范围内，随机选定一个状态，把它设为 X_j，判断 X_i 与 X_j 哪一个更优，若 X_j 更优则移动到 X_j，若 X_i 更优则选定人工鱼感知范围内 X_j 以外的另一个状态。若经过 Try-number 次判断后依然没有找到更优的状态，那么人工鱼随机移动一步，换一片视野。

聚群行为 X_i 为人工鱼的当前状态，nf 为该人工鱼视野内的伙伴的数目；X_c 为伙伴的中心位置，如果 $nf/np < \sigma$，则说明 X_c 不拥挤，与此同时，判断 X_i 与 X_c 哪一个更优，如果 X_c 更优，则向 X_c 前进一步，如果 X_i 更优，则继续进行觅食行为。

追尾行为 X_i 为人工鱼的当前状态，$X_{\max}$为该人工鱼视野内最优伙伴；判断 X_i 与 $X_{\max}$哪一个更优，如果 $X_{\max}$更优，则向 $X_{\max}$前进一步，如果 X_i 更优，则继续进行觅食行为。

随机行为 X_i 是人工鱼的当前状态，随机行为实际就是人工鱼在觅食行为中没有找到更优状态情况下随机移动一步，选择另一状态 X_j，换一片新视野。

移动策略 让各个人工鱼先进行（3）、（4）步骤，接着选择食物浓度值比较高的状态，即营养物质最丰富的地方，对于没有前进的人工鱼再进行觅食行为。

公告板 设置公告板，在每个人工鱼找到自己的最优状态后，将此状态与公告板上的状态进行对比，如果自己的当前状态更优，则用当前状态来替换公告板上的状态，这样就可一在公告板上得知所有人工鱼的最优状态。

经过 MAXGEN 次迭代之后，能够确定该水域中营养最多的位置，也就得到了目标函数在可行解空间内的全局最优解。

1.3 基于岩石物理模型的横波预测的原理

在其他条件不变时，孔隙刚度会随孔隙纵横比的增大而增加，而随着岩石总刚度的增加，地震波

的速度会随之增大。这说明岩石的弹性模量受到孔隙纵横比的影响，进而影响岩石的纵波速度与横波速度。因此可以找到使理论纵波速度和实际纵波速度误差最小的孔隙纵横比，把该纵横比作为约束条件来预测横波速度。

设定低孔低渗条件下的 SCA 模型，ρ 为空隙间混合流体密度，K 为空隙间混合流体的体积模量，由实际的测井资料给出矿物的组成成分，用 Reuss 平均理论算出 ρ_R 与 K_R，计算公式为：

$$\frac{1}{K_R} = \sum_{i=1}^{N} \frac{x_i}{K_i} \qquad (22)$$

$$\rho_R = \sum_{i=1}^{N} x_i \rho_i$$

式中：x_i 为各孔隙流体的体积分量；K_i 为各孔隙流体的体积模量；ρ_i 为各孔隙流体的密度。

SCA 模型计算出岩石的等效弹性模量，进而计算出饱和岩石的纵波速度与横波速度：

$$v_p = \sqrt{\frac{(K + \frac{4\mu}{3})}{\rho}} \qquad (23)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

式中：K 为饱和岩石的体积模量；μ 为饱和岩石的剪切模量；σ 为饱和岩石的密度。

图 1 为 SCA 等效理论建模流程图，图 2 为根据图 1 中的模型反演孔隙纵横比的流程图。

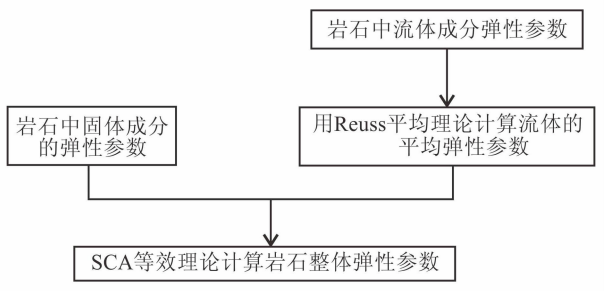


图 1　SCA 建模流程图

Fig. 1　Flow chart of SCA modeling

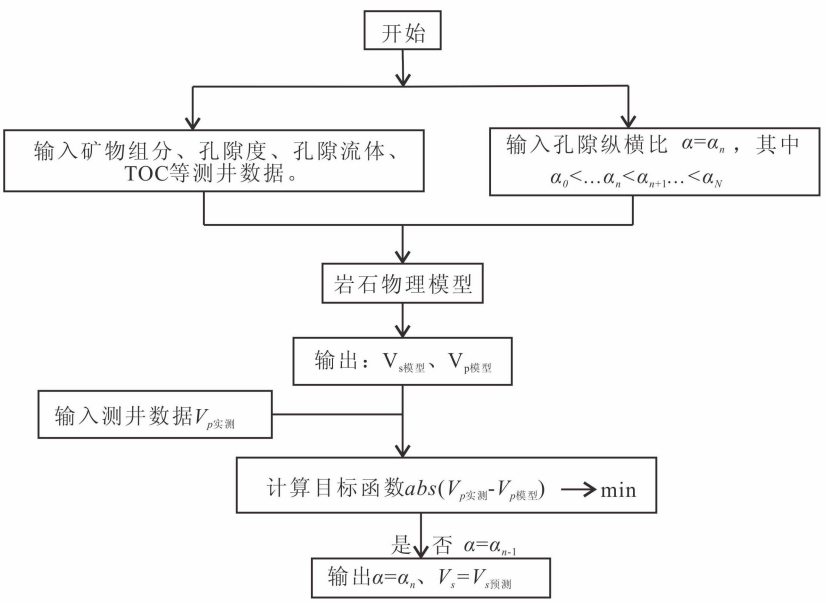


图 2　横波速度预测流程图

Fig. 2　Flow chart of shear wave velocity prediction

1.4　基于人工鱼群算法的横波速度预测原理

在人工鱼群算法中，把 abs（$V_{p实测} - V_{p模型}$）→ min 设定为目标函数，其中 $v_{实测}$ 为实际测得的纵波速度，$v_{模型}$ 为通过 SCA 模型得到的纵波速度。反演过程就是找到其孔隙纵横比，使它可以满足所设定的目标函数，通过这个孔隙纵横比来预测实际数据的横波速度。

基于人工鱼群的横波速度预测实质就是利用

1.2 节中人工鱼群算法的原理，设定目标函数为 $abs\ (V_{p实测} - V_{p模型}) \rightarrow \min$，人工鱼 α_i 个体为（$\alpha_= \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \cdots, \alpha_n$），要寻优的变量为 α_i。最终找到可行解空间范围内最符合条件的最佳孔隙纵横比 α，此时的 α 作为约束条件，来实现横波速度的预测。

图 3 为基于人工鱼群算法反演孔隙纵横比的流程图。

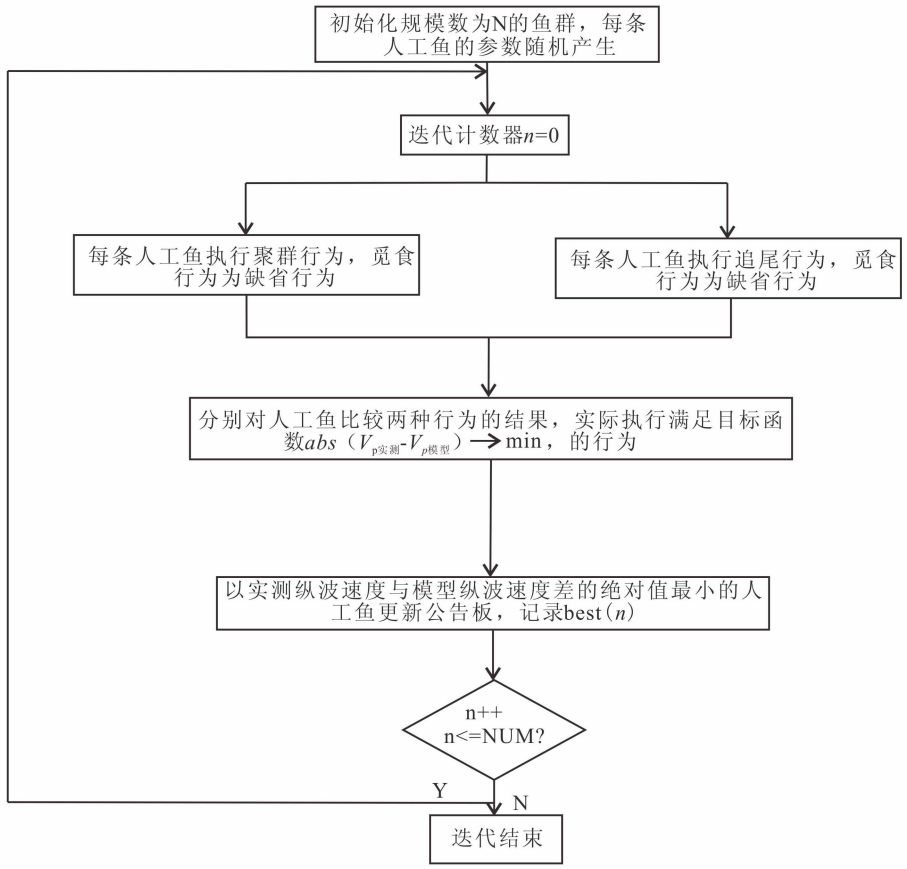


图 3 人工鱼群算法反演孔隙纵横比流程图

Fig. 3 Artificial fish swarm algorithm for retrieving pore aspect ratio flow chart

2 实际数据算例

本文选用四川盆地下志留统龙马溪组页岩储层测井数据，岩性主要为页岩、含粉砂质页岩和碳质页岩。该井中有实测的横波速度资料，可对预测结果与实测数据进行误差分析。

图 4 为该井位地层的测井曲线，由图 4 可知，纵波速度曲线和横波速度曲线有很强的相关性。页岩层与周围地层相比，GR 值较大，密度值较小。

图 5 为测井深度范围内地层各矿物组分，该研究区域内的页岩矿物主要为黏土和石英。

表 1 所给出的数据为岩石物理模型中所用到的各矿物和流体的弹性性质。

表 1 矿物和孔隙流体经验弹性参数

Table 1 Elastic parameters of minerals and pore fluids

	ρ/kg·m^{-3}	Vs/m·s^{-1}	Vp/m·s^{-1}
黏土	2 550	4 320	2 200
石英	2 650	6 050	4 090
白云岩	2 870	7 340	3 960
方解石	2 710	6 640	3 440
黄铁矿	4 810	8 100	5 180
干酪根	1 400	2 600	1 200
气	110	620	0
水	1 040	147	0

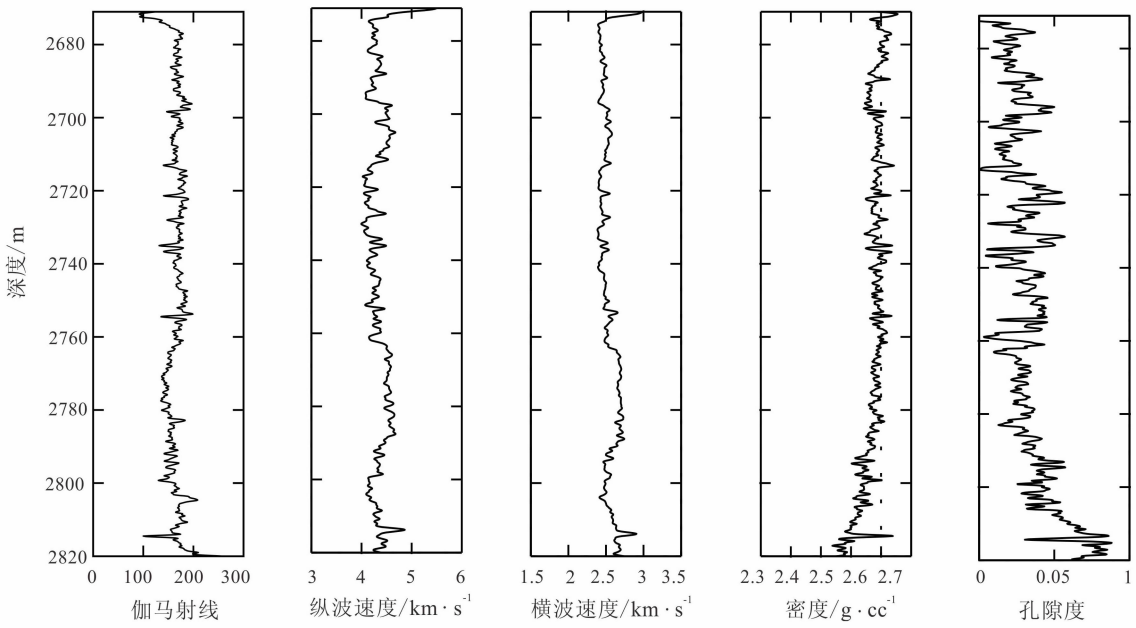


图 4　测井曲线

Fig. 4　Logging curve

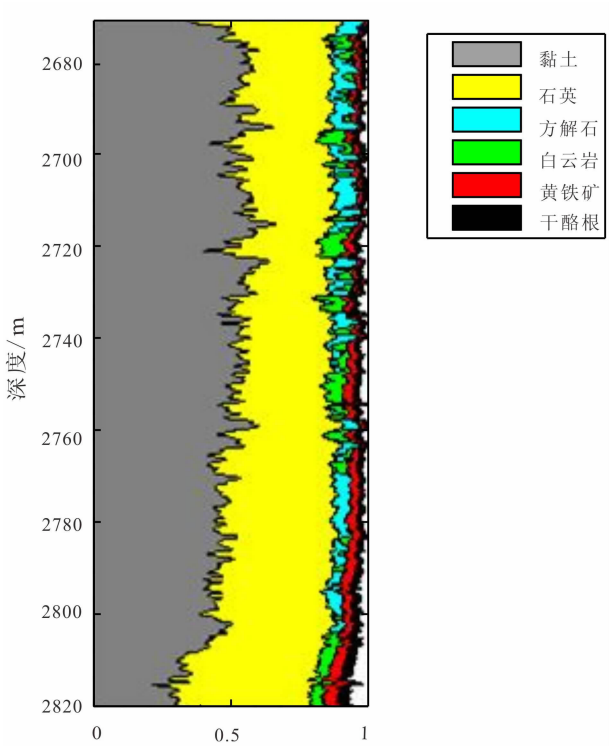


图 5　地层矿物组分

Fig. 5　Formation mineral composition

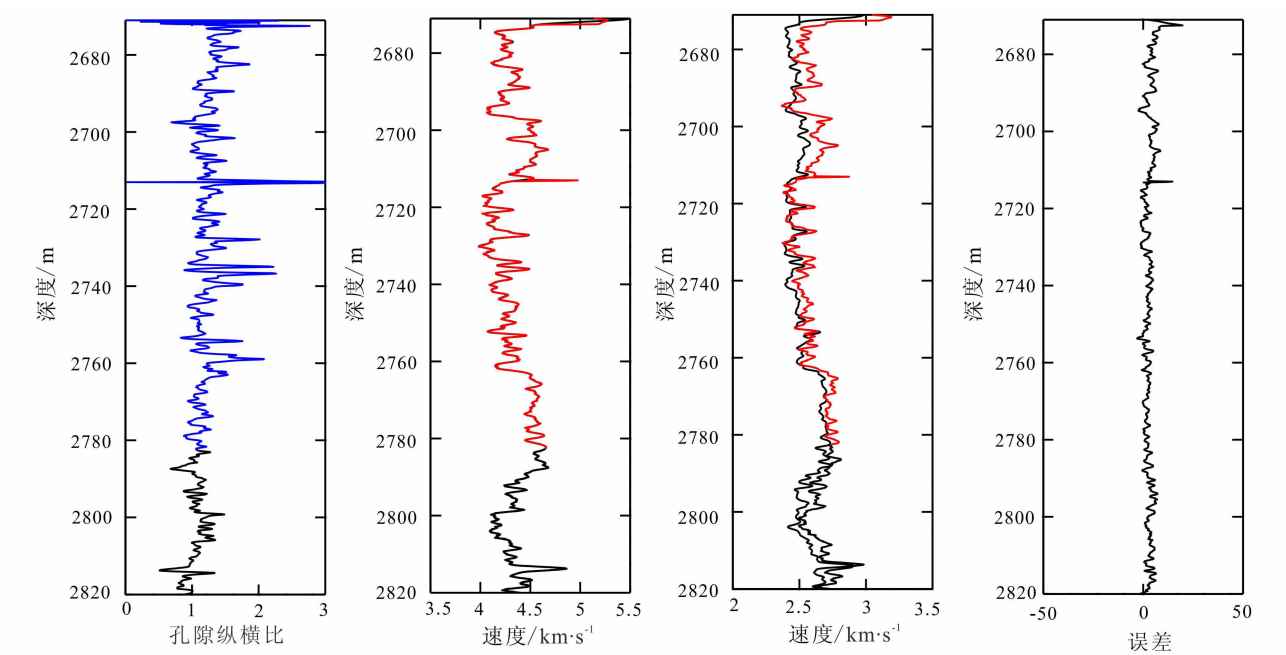
通过给出的实际测井资料和表中的经验弹性参数，进行实际数据反算。图 6 为采用人工鱼群算法反演出该区域井位的孔隙纵横比预测横波速度。从图中可以看出，孔隙纵横比的数值在页岩部分要比围岩部分更加稳定，得出，页岩的孔隙结构要比围岩更加稳定。在页岩层范围内，可以看到黑色曲线（实际测得横波速度曲线）和红色曲线（AFSA 算法预测的横波速度曲线）的变化趋势一致，两者吻合较好。人工鱼群算法得到的横波速度与实际测井数据的横波速度的偏差服从以 0.074 979 为均值、以 0.003 466 2 为方差的正态分布，误差均方根为 0.095 316。证明人工鱼群算法预测横波速度的误差较小，效果很好。

3　结论

（1）利用 SCA 等效理论进行岩石物理建模，构建出岩石的纵波速度、横波速度与岩石密度、组分和孔隙度等的定量关系。

（2）利用人工鱼群算法进行孔隙纵横比的反演，将实际测得的纵波速度与通过 SCA 模型得到的纵波速度的差取绝对值，将其最小值作为目标函数来反演孔隙纵横比，并将该孔隙纵横比作为约束条件来进行横波速度预测。

（3）将预测得到横波速度与实际测得的横波速度相拟合，得到反演结果。从反演结果可以看出用人工鱼群算法预测的横波速度的结果与实际测得



（红色为 AFSA 算法的横波速度预测曲线，黑色为实际测得的横波速度曲线）

图 6 采用 AFSA 算法计算出的孔隙纵横比和横波速度

Fig. 6 Pore aspect ratio and shear wave velocity calculated by AFSA

的横波速度误差很小，因此证明了本文算法的可行性及有效性。

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, Nur A, Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones [J]. Geophysics, 1986, 51 (11): 2093-2107.

[3] Xu S, White R E. A new velocity model for clay-sand mixtures [J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43 (1): 91-118.

[4] Nur A, Mavko G, Dvorkin J. Critical porosity: a key to relating physical properties to porosity in rocks [J]. The Leading Edge, 1998, 17 (3): 357-362.

[5] Xu S, Payne M A. Modeling elastic properties in carbonate rocks [J]. The Leading Edge, 2009, 28 (1): 66-74.

[6] 李宏兵，张佳佳，姚逢昌，岩石的等效孔隙纵横比反演及其应用 [J]. 地球物理学报，2013，56 (2)：608-615.
LI Hong-bing, ZHANG Jia-jia, YAO Feng-chang. Inversion of effective pore aspect ratios for porous rocks and its applications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56 (2): 608-615.

[7] 刘欣欣，印光耀，张峰. 一种碳酸盐岩储层横波速度估算方法 [J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2013，37 (1)：42-49.
LIU Xin-xin, YIN Guang-yao, ZHANG Feng. S-wave velocity estimation method in carbonate reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2013, 37 (1): 42-49.

[8] 罗水亮，杨培杰，胡光明，等. 基于变形 P-L 模型的矩阵方程迭代精细横波预测 [J]. 地球物理学报，2016，59 (5)：1839-1848.
LUO Shui-liang, YANG Pei-jie, HU Guang-ming, et al. S-wave velocity prediction based on the modified P-L model and matrix equation iteration [J]. Chinese Journal of Geophys, 2016, 59 (5): 1839-1848.

[9] Berryman J G. Long-wavelength propagation in composite elastic media [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68: 1809-1831.

[10] Pride S R, Berryman J G, Harris J M. Seismic attenuation due to wave-induced flow [J]. Journal of Geophysical Research 2004, 109 (1): 59-70.

[11] 曲良东，何登旭，一种混沌人工鱼群优化算法 [J]. 计算机工程与应用，2010，(22)：40-42.
QU Liang-dong, HE Deng-xu. Novel artificial fish-school algorithm based on chaos search [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46 (22): 40-42.

[12] ZHOU Chao, FENG Xuan, ZHANG Bing, et al. Fracture property identification method based on shrinkage factor particle swarm optimization [J]. Global Geology, 2015, 18 (4): 232-237.