

印兴耀, 李龙. 基于岩石物理模型的纵、横波速度反演方法[J]. 石油物探, 2015, 54(3): 249-253

Yin Xingyao, Li Long. P-wave and S-wave velocities inversion based on rock physics model[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(3): 249-253

## 基于岩石物理模型的纵、横波速度反演方法

印兴耀<sup>1</sup>, 李 龙<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010)

**摘要:**纵、横波速度是储层特征评价、流体识别的重要参数。针对勘探生产中缺乏速度测井资料的情况, 研究并提出了基于岩石物理模型的速度反演预测方法。首先介绍了前人给出的速度-孔隙度关系式和基于岩石物理模型的速度估算过程; 然后以岩石孔隙参数为基础, 建立测井数据与岩石弹性参数之间的岩石物理关系; 最后重构反演目标函数, 通过模拟退火反演获得可靠的纵、横波速度。实验室数据和实际测井资料的计算结果表明, 该方法能够在不使用速度测井信息作为先验约束的情况下得到可信度较高的速度预测结果。

**关键词:**纵波速度预测; 横波速度预测; 模拟退火; Xu-White 模型; Raymer 公式

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-1441(2015)03-0249-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1441.2015.03.001

## P-wave and S-wave velocities inversion based on rock physics model

Yin Xingyao<sup>1</sup>, Li Long<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Institute of Exploration and Development, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, China)

**Abstract:** P-wave velocity and S-wave velocity are two important parameters in reservoirs evaluation and fluid identification. Well log is an efficient approach to obtain these parameters. Velocity inversion based on rock physics model is proposed for the case of a lack of velocity logging data in exploration. Firstly, we introduce the relationship between velocity and porosity and velocity estimation process based on rock physics model, and then establish the rock physics relationship between logging data and rock elastic parameters on the basis of rock pore parameters. Finally, we reconstruct objective function and obtain reliable P-wave and S-wave velocities by simulated annealing inversion. The results based on experimental data and actual logging data show P-wave and S-wave predictions based on rock physics model are reliable without velocity logging data as priori constraints, which offers an efficient method for accurate reservoir evaluation.

**Keywords:** P-wave velocity estimation, S-wave velocity estimation, simulated annealing, Xu-White model, Raymer equation

纵、横波速度是储层评价和流体识别的重要保证, 在缺乏速度测井资料的情况下, 岩石的纵、横波速度可以通过基于岩石物理分析的方法或非弹性参数拟合的方法求取。基于岩石物理分析的方法是借助于速度关系式和岩石物理模型。速度关系式考虑了岩石的速度与孔隙度、密度等的关系。Raymer 等<sup>[1]</sup>给出了速度-孔隙度关系式, 可以用矿物和流体计算岩石的地震速度。Nur<sup>[2]</sup>提出的临

界孔隙度模型则是岩石速度与孔隙度关系研究的重要进展之一。随着岩石物理研究的深入, 许多专家和学者提出了利用岩石物理模型计算饱和岩石速度的技术手段。岩石物理模型考虑了岩石的孔隙结构, 适合描述结构更复杂的岩石<sup>[3-4]</sup>。Xu 等<sup>[5]</sup>推导出反映砂泥岩孔隙结构的关系式, 进而计算岩石速度。张广智等<sup>[6]</sup>将 Xu-White 模型改进后应用于碳酸盐岩储层。印兴耀等<sup>[7]</sup>基于 Biot 相治理

收稿日期: 2014-04-08; 改回日期: 2014-10-15。

作者简介: 印兴耀(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事石油勘探地球物理理论与方法的教学与科研工作。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB228604)和国家科技重大专项项目(2011ZX05030-004-002, 2011ZX05019-003)共同资助。

论计算了致密砂岩弹性参数。非弹性参数拟合的方法主要考虑了岩石速度与非弹性参数之间的联系,如利用视电阻率等曲线拟合法、神经网络分析法、邻井拟合法等方法来计算岩石速度。与该方法相比,基于岩石物理分析的方法参数之间具有更加明确的弹性关系。

受采集测量条件的影响,测井数据的测量误差与实验测量数据相比较。为得到可靠速度,在利用测井曲线直接计算速度的基础上加入了反演手段。反演方法基于纵、横波速度与弹性参数之间的关系,将已知的一类速度作为约束构建目标函数,从而求取另一类速度。如果生产中遇到测井数据中没有速度信息,或已知的速度信息不准确时,就无法利用弹性参数构建目标函数。

针对勘探生产中缺乏速度测井资料的情况,本文提出了基于岩石物理模型的速度反演方法,讨论了岩石孔隙度与岩石弹性、物性参数之间的关系,基于孔隙特征建立岩石物理分析方法,进而构建反演目标函数,通过模拟退火反演预测岩石的纵波速度和横波速度。

## 1 岩石物理模型建立

### 1.1 基于岩石物理模型的速度估算方法

砂岩的孔隙特征对声波速度具有很大影响,对于胶结程度较好的砂岩,Raymer 公式<sup>[1]</sup>给出了岩石中声波测井孔隙度与速度的关系:

$$v_{pr} = (1 - \varphi_t)^2 v_{pm} + \varphi_t v_{pf} \quad (\varphi_t < 37\%) \quad (1)$$

式中:  $v_{pr}$ ,  $v_{pm}$ ,  $v_{pf}$  分别为岩石、岩石基质、孔隙流体中的声波速度;  $\varphi_t$  为岩石声波测井孔隙度。Raymer 公式适用于计算高频条件下岩石中声波速度,其孔隙流体不能自由流动,因此  $\varphi_t$  又可以看作是总孔隙度。

Raymer 公式没有考虑孔隙类型和孔隙形状对速度的影响。Xu 和 White 通过将岩石孔隙划分为孔隙纵横比较大的砂岩孔隙和孔隙纵横比较小的泥岩孔隙,给出了表征砂泥岩速度-孔隙度关系的 Xu-White 模型<sup>[5]</sup>。根据 Xu-White 模型,基于 Kuster-Toksöz 理论<sup>[8]</sup>、DEM 模型<sup>[9]</sup> 和 Gassmann 方程<sup>[10]</sup>,可以计算出岩石的纵波速度和横波速度。

首先利用砂岩和泥岩体积各自所占百分比  $V_s$  和  $V_c$  以及总孔隙度  $\varphi_t$ ,分别估计砂岩孔隙度  $\varphi_s$  和泥岩孔隙度  $\varphi_c$ :

$$\varphi_s = V_s \frac{\varphi_t}{1 - \varphi_t} \quad (2)$$

$$\varphi_c = V_c \frac{\varphi_t}{1 - \varphi_t} \quad (3)$$

利用 Voigt-Reuss 上限计算岩石基质的弹性模量  $M$  (代表基质的体积模量  $K_m$  和剪切模量  $\mu_m$ ) 和密度  $\rho$ :

$$M = \frac{V_s}{1 - \varphi_t} M_s + \frac{V_c}{1 - \varphi_t} M_c \quad (4)$$

$$\rho_m = \frac{V_s}{1 - \varphi_t} \rho_s + \frac{V_c}{1 - \varphi_t} \rho_c \quad (5)$$

假设干岩石的泊松比是常量,得到干岩石骨架体积模量  $K_d$  和剪切模量  $\mu_d$  的近似简化公式:

$$K_d = K_m (1 - \varphi_t)^P \quad (6)$$

$$\mu_d = \mu_m (1 - \varphi_t)^Q \quad (7)$$

式中:系数  $P$  和  $Q$  与基质模量和孔隙形状有关。

Nur 等<sup>[11]</sup> 和 Brown 等<sup>[12]</sup> 通过实验室数据分析,得出砂岩孔隙纵横比不是定值。数值模拟结论反映出孔隙纵横比较小的泥岩孔隙其孔隙纵横比变化对于饱和岩石速度的影响要远小于砂岩孔隙。因此,在计算过程中将泥岩孔隙纵横比设为 0.035,砂岩孔隙纵横比  $\alpha$  表示为随孔隙度和泥质含量变化的参数,更加切合实际岩石的孔隙纵横比。

$$\alpha = 0.171\,140 - 0.244\,770\varphi + 0.004\,314V_c \quad (8)$$

最后,利用 Gassmann 方程计算饱和流体的体积模量  $K_{sat}$  和剪切模量  $\mu_{sat}$ ,通过这些参数可以得到纵波速度和横波速度。

$$K_{sat} = K_d + \frac{1 - \frac{K_d}{K_m}}{\frac{\varphi_c}{K_f} + \frac{1 - \varphi_c}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}} \quad (9)$$

$$\mu_{sat} = \mu_d \quad (10)$$

$$v_{pX} = \sqrt{\frac{K_{sat} + 4\mu_{sat}/3}{\rho_{sat}}} \quad (11)$$

$$v_{sX} = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad (12)$$

式中:  $\varphi_e$  为有效孔隙度;下标  $X$  表示由 Xu-White 模型估算。

### 1.2 孔隙参数分析

岩石孔隙特征是岩石物理模型分析中的重要参数。Xu-White 模型中将岩石孔隙分为砂岩孔隙和泥岩孔隙。Dvorkin 等<sup>[13]</sup> 发现岩石中含束缚水的泥岩孔隙(即无效孔隙)对岩石速度具有影响,将岩石中的孔隙分为砂岩孔隙、连通的泥岩孔隙和无效孔隙。通过分析可以看出这几种孔隙度之间有如下关系:

$$\begin{aligned}\varphi_t &= \varphi_s + \varphi_c \\ &= [\varphi_s + (1-q)\varphi_c] + q\varphi_c = \varphi_e + \varphi_{ue}\end{aligned}\quad (13)$$

式中:  $\varphi_s$ 、 $\varphi_c$ 、 $\varphi_e$ 、 $\varphi_{ue}$  分别为砂岩孔隙度、泥岩孔隙度、有效孔隙度和无效孔隙度; 比例因子  $q$  代表泥岩孔隙中连通孔隙与非连通孔隙的体积关系。

有效孔隙度  $\varphi_e$  可以由密度测井获得<sup>[14]</sup>:

$$\varphi_e = \frac{\rho_m - \rho_{sat}}{\rho_m - \rho_f} \quad (14)$$

式中:  $\rho_{sat}$ 、 $\rho_m$ 、 $\rho_f$  分别为饱和岩石、岩石基质和孔隙流体的密度。

在测井数据中缺少纵、横波速度信息的情况下, 声波测井孔隙度未知, 通过密度测井资料可以计算有效孔隙度。假设声波测井孔隙度已知, 结合(2)式、(3)式、(13)式、(14)式, 可以确定砂岩和泥岩孔隙度, 进而可以确定比例因子  $q$ , 就可以确定有效孔隙中砂岩和泥岩孔隙的体积。

### 1.3 岩石物理建模

在建模过程中, 将岩石孔隙整体上分为有效孔隙和无效孔隙, 含流体的无效孔隙的影响利用 DEM 模型来描述。

$$(1-y) \frac{d}{dy} [K^*(y)] = (K_f - K'_m) P^{(*2)}(y) \quad (15)$$

$$(1-y) \frac{d}{dy} [\mu^*(y)] = -\mu'_m Q^{(*2)}(y) \quad (16)$$

式中:  $K'_m$  和  $\mu'_m$  是含束缚流体的岩石基质体积模量和剪切模量。在此基础上使用 Xu-White 模型和 Gassmann 方程进行有效孔隙内的流体替换。

## 2 速度估算

### 2.1 构建目标函数

前人通过实验室测量和数值计算表明了饱和岩石的速度与孔隙度、密度、矿物等参数密切相关。通过反演手段估算速度, 通常需要另外已知至少一种速度作为约束, 因此只能在井数据中具有可靠速度信息的情况下适用。为了克服这一限制, 基于孔隙关系建立 Raymer 公式估算纵波速度  $v_{PR}$  与 Xu-White 模型估算纵波速度  $v_{PX}$  之间的联系, 将反演目标函数定义为:

$$F = \left| \frac{v_{PR} - v_{PX}}{\max(v_{PR}, v_{PX})} \right| \quad (17)$$

反演算法中采用非线性的快速模拟退火方法寻取全局最优解<sup>[15]</sup>, 当目标函数收敛时, 可以得到最优纵、横波速度。

### 2.2 反演流程

基于岩石物理模型的纵、横波速度反演方法流程见图 1, 对总孔隙度进行寻优以求得岩石的纵、横波速度。在搜索区间上应注意  $\varphi_e < \varphi_t$ , 且  $\varphi_t + V_c < 1$ 。

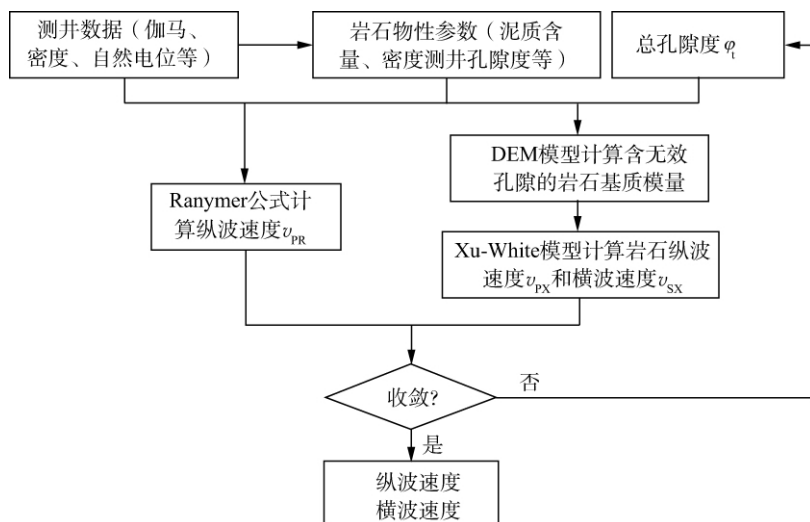


图 1 基于岩石物理模型的纵、横波速度反演方法流程

## 3 方法验证

为验证基于岩石物理模型速度预测方法的可行性和稳定性, 本文分别采用实验数据和实际测井资料进行试算。

### 3.1 实验数据验证

将 Raymer 的砂岩声波速度公式和修正的 Xu-White 模型应用于 Han<sup>[16]</sup> 的实验室测量数据。计算过程所用的矿物组分参数如表 1 所示。数据计算结果如图 2 和图 3 所示。

图 2 中的黑色圈为实测值, 绿色圈和黄色圈分

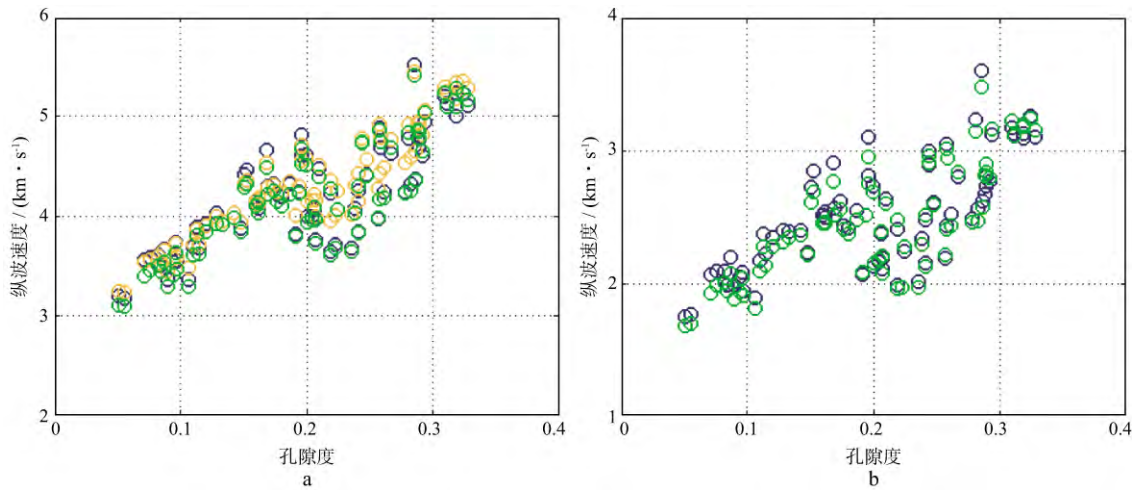


图 2 实验室测量数据的纵波速度(a)和横波速度(b)直接计算结果

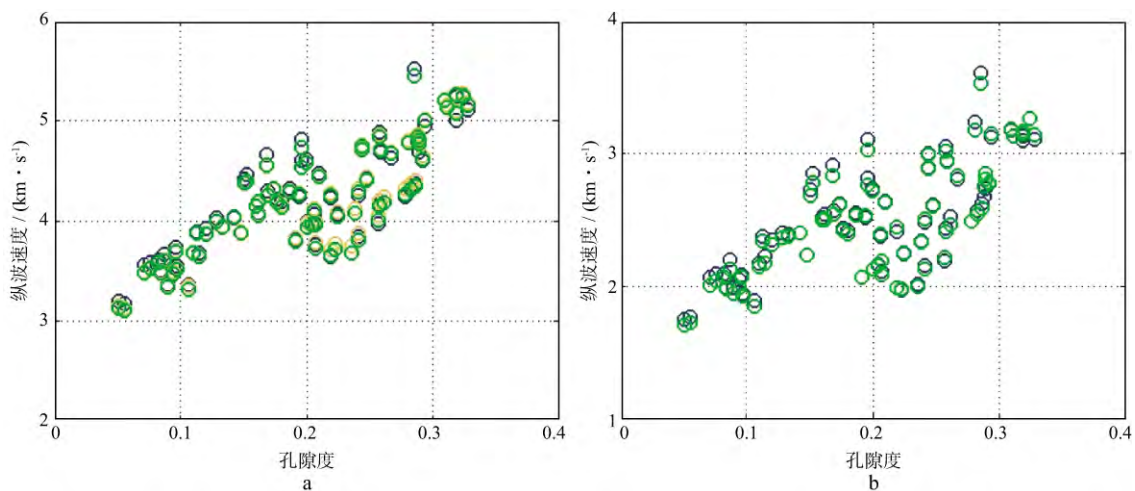


图 3 实验室测量数据的纵波速度(a)和横波速度(b)反演预测结果

表 1 实验数据验证计算所用的矿物组分参数

矿物或流体	砂岩	泥岩	盐水
体积模量/GPa	39.00	21.00	2.50
剪切模量/GPa	33.00	7.00	0
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.65	2.60	1.05

别为 Raymer 公式计算结果和修正的 Xu-White 模型计算结果。从图 2 中可以看出,在实验室测量条件下,模型直接计算结果与实测数据比较吻合。说明利用岩石物理模型计算岩石速度的方法是可靠的。图 3 中的黑色圈为实测值,绿色圈为利用反演手段预测的结果,与图 2 对比可以看出,基于岩石物理模型利用反演方法得到的结果与直接计算结果一致,且预测的纵、横波速度与实验数据相符。

### 3.2 测井数据验证

选取某油田具有实测可靠纵、横波信息的测井数据,图 4 是分别利用 Raymer 公式与 Xu-White 模型直接进行速度计算的结果,图 5 是基于岩石物

理模型速度反演方法估算的结果。

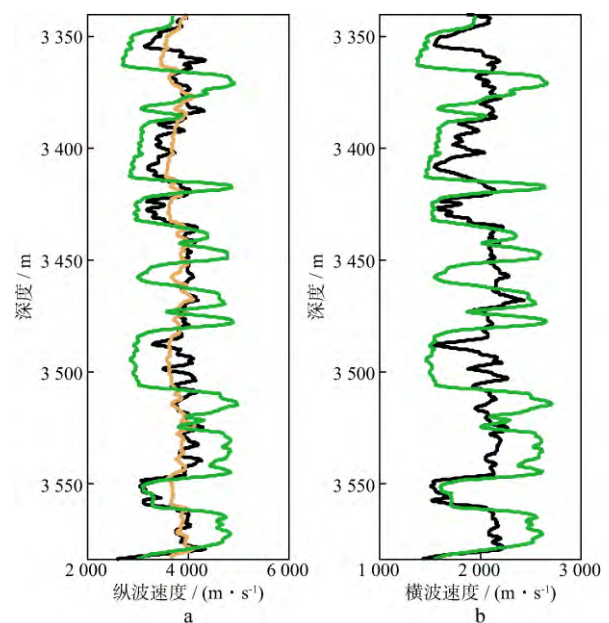


图 4 实际测井数据的纵波速度(a)和横波速度(b)直接计算结果

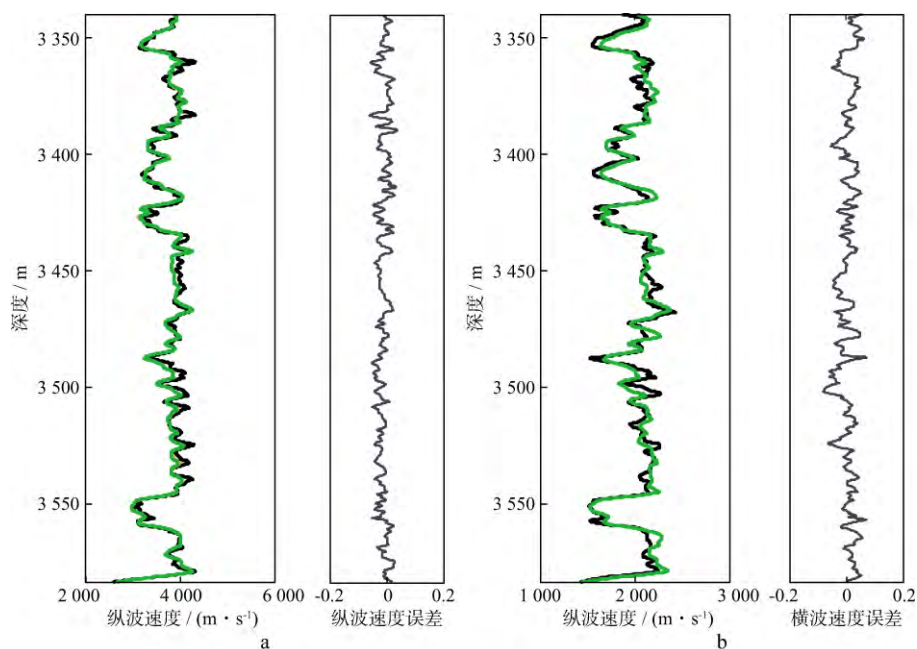


图5 实际测井数据的纵波速度(a)和横波速度(b)反演预测结果及速度误差曲线

图4中的黑色曲线为实际测井数据,绿色曲线和黄色曲线分别为Raymer公式计算结果和修正的Xu-White模型计算结果。从图4中可以看出,与实际测井数据相比,两者计算的结果与实际测井结果的误差较大。可见成岩之后岩石孔隙的改造作用和测井过程中测量误差的影响,造成直接计算得到的速度与实测速度之间存在较大误差,因此利用测井资料直接计算速度的方法不合适。图5中的黑色曲线为实际测井数据,绿色曲线为利用反演手段预测的结果,与图4相比可以看出,基于岩石物理模型的速度反演方法预测结果的精度明显提高,证实了该方法的有效性。

## 4 结论

本文提出了基于岩石物理模型的纵、横波速度反演方法。以岩石孔隙结构分析为基础,运用Raymer公式和改进的Xu-White模型分别求出饱和岩石的纵波速度,代入重构的目标函数,利用非线性优化算法迭代反演,最后将反演得到的最优总孔隙度代入模型,预测出岩石的纵、横波速度。该方法在不使用测井纵波或横波信息作为先验约束的情况下可以得到可信度较高的预测结果,并可以实现对已有速度信息的进一步修正。

### 参考文献

[1] Raymer L L, Hunt E R, Gardner J S. An improved sonic transit time-to-porosity transform[C]// SPW-

LA. 21<sup>st</sup> Annual Logging Symposium, USA; SPW-LA, 1980; 11-24

[2] Nur A. Critical porosity and the seismic velocities in rocks[J]. EOS Transactions American Geophysical Union, 1992, 73(1): 43-66

[3] 邵才瑞, 印兴耀, 张福明, 等. 利用常规测井资料基于岩石物理和多矿物分析反演横波速度[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2009, 34(4): 699-707

Shao C R, Yin X Y, Zhang F M, et al. Using conventional logging data inverse S-wave velocity based on rock physics and multi-mineral analysis[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(4): 699-707

[4] 周中彪. 基于岩石物理模型的测井约束横波速度计算方法研究[J]. 物探化探计算技术, 2010, 32(5): 536-541

Zhou Z B. S-wave velocity estimation based on rock physics[J]. China University of Petroleum, 2010, 32(5): 536-541

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

[6] 张广智, 李呈呈, 印兴耀, 等. 基于修正 Xu-White 模型的碳酸盐岩横波速度估算方法[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 32(5): 717-722

Zhang G Z, Li C C, Yin X Y, et al. Corrected Xu-White model for carbonate S-wave velocity estimation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 32(5): 717-722

[7] 印兴耀, 刘欣欣, 曹丹平. 基于 Biot 相洽理论的致密(下转第 281 页)

- 458-460
- [10] 林盛, 吴峰, 李衍达. 叠前相干干扰滤除——倾斜滤波法[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(3): 390-398  
Lin S, Wu F, Li Y D. Prestack coherent noise elimination—a slant filtering method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998, 33(3): 390-398
- [11] 王卫华. 利用中值相关滤波预测相干信号[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(3): 273-282  
Wang W H. Coherent signal prediction using mid-value correlative filtering[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(3): 273-282
- [12] 鲍祥生, 尹成, 田继东, 等. 中值滤波的一种快速算法[J]. 石油物探, 2005, 44(4): 325-328  
Bao X S, Yin C, Tian J D, et al. One kind of fast algorithm on the median filtering [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(4): 325-328
- [13] Necati G. Two different algorithms for seismic interference noise attenuation[J]. The Leading Edge, 2008, 27(2): 176-181
- [14] John B, Lawrence P, David C, et al. Optimizing the removal of seismic interference noise[J]. The Leading Edge, 2008, 27(2): 166-172
- [15] Ozdogan Y. Seismic data processing [M]. Tulsa: Published by Society of Exploration Geophysicists, 1987: 62-80, 497
- [16] 王云专, 王润秋. 信号分析与处理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 20-215  
Wang Y Z, Wang R Q. Signal analysis and processing[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 20-215
- [17] 李振春, 张军华. 地震数据处理方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 16-55  
Li Z C, Zhang J H. Seismic data processing method [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 16-55
- [18] 陈习峰, 薛永安, 俞华, 等. 三维 FKK 滤波技术在叠前去噪中的应用[J]. 复杂油气藏, 2013, 6(4): 34-38  
Chen X F, Xue Y A, Yu H, et al. Application of 3D-FKK filtering technology in pre-stack de-noising[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2013, 6(4): 34-38
- [19] 刘保童. 一种基于傅里叶变换的去假频内插方法及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(2): 63-67  
Liu B T. Dealiasing interpolation based on Fourier transform and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(2): 63-67
- [20] 韩文功, 于静, 张怀榜, 等. 干扰波调查方法在高密度地震采集中的应用[J]. 石油勘探, 2011, 50(5): 499-507  
Han W G, Yu J, Zhang H B, et al. Application of interference wave investigation methods in high-density seismic acquisition[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(5): 499-507
- [21] 李桂元. F-K 域滤波假频的消除方法[J]. 石油地球物理勘探, 1994, 29(增刊): 86-92  
Li G Y. The anti-alias method of F-K filtering[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1994, 29(S1): 86-92
- (编辑: 陈 杰)

(上接第 253 页)

- 砂岩弹性参数计算方法[J]. 石油物探, 2013, 52(5): 445-451  
Yin X Y, Liu X X, Cao D P. Tight sands elastic parameters calculation based on Biot consistent theory [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(5): 445-451
- [8] Kuster G T, Toksöz M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media[J]. Geophysics, 1974, 39(5): 587-608
- [9] Berryman J G. Single-scattering approximations for coefficients in Biot's equations of poroelasticity[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 91(2): 551-571
- [10] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. Geophysics, 1951, 16(4): 673-685
- [11] Nur A, Simmons G. Stress-induced velocity anisotropy in rock: an experimental study[J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(27): 6667-6674
- [12] Brown R J, Korrington 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
- [13] Dvorkin J, Mavko G, Gurevich B. Fluid substitution in shaley sediment using effective porosity[J]. Geophysics, 2007, 72(3): O1-O8
- [14] 张超谟, 雍世和. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996: 1-590  
Zhang C M, Yong S H. Logging data processing and integrated interpretation [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1996: 1-590
- [15] 陈华根, 李丽华, 许惠平, 等. 改进的非常快速模拟退火算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 1121-1125  
Chen H G, Li L H, Xu H P, et al. Improved very fast simulated annealing algorithm[J]. Journal of Tongji University (National Science), 2006, 34(8): 1121-1125
- [16] Han D. Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments[D]. USA: Stanford University, 1986
- (编辑: 朱文杰)