

水平层理缝岩石物理建模及其地震响应特征

陈双全^{1,2}, 钟庆良³, 李忠平³, 张敏⁴, 赵欣^{1,2}, 李向阳^{1,2,5}

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球物理学院, 北京 102249;
3. 中国石化 江汉油田分公司地球物理研究院, 湖北 武汉 430035; 4. 中国石油 青海油田公司采油三厂, 青海 茫崖 816400;
5. 英国联邦地质调查局 爱丁堡各向异性研究组, 英国 爱丁堡 EH14 4AP]

摘要: 裂缝介质的岩石物理建模及其地震响应特征分析, 是利用地震资料进行裂缝性储层预测的重要基础, 通过岩石物理建模可以建立起有效的地震反演及储层描述方法。针对非常规页岩油气储层具有的水平层理缝特征, 开展了岩石物理建模方法及其地震响应特征研究。利用实际岩样数据与测井数据, 采用 Voigt-Reuss-Hill (VRH) 边界和等效自相容近似 (SCA) 理论, 将非粘土、粘土、孔隙和流体进行组合得到岩石背景介质; 结合实际裂缝产状和发育规律信息, 通过 Chapman 多尺度裂缝岩石物理模型引入水平层理缝; 采用传播矩阵方法正演得到地震响应。基于此, 结合实际工区资料, 形成了一套基于多尺度裂缝岩石物理模型的水平层理缝建模方法及技术流程, 并在江汉油田页岩油储层中进行了应用研究。正演结果表明: 页岩储层的水平层理缝较发育, 地震响应具有明显的频变特征, 而且水平层理缝的裂缝长度与裂缝密度是影响其地震各向异性最重要的参数, 以上参数可以很好地应用于水平层理缝地震预测中。

关键词: Chapman 模型; 频变特征; 地震各向异性; 水平层理缝; 岩石物理建模

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Petrophysical modeling of horizontal bedding-parallel fractures and its seismic response characteristics

Chen Shuangquan^{1,2}, Zhong Qingliang³, Li Zhongping³, Zhang Min⁴, Zhao Xin^{1,2}, Li Xiangyang^{1,2,5}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geophysics, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
3. Geophysical Research Institute of Jiangnan Oilfield Branch Company Ltd., SINOPEC, Wuhan, Hubei 430035, China;
4. No. 3 Oil Extraction Factory, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Mangya, Qinghai 816400, China;
5. Edinburgh Anisotropy Project, British Geological Survey, Edinburgh, EH14 4AP, U. K.]

Abstract: Petrophysical modeling of fractures and its seismic response characteristics serve as an important foundation for the fractured reservoir prediction using seismic data, for which we may propose effective seismic inversion and reservoir characterizing methods. With regard to the horizontal bedding-parallel fractures in unconventional shale oil and gas reservoirs, we conducted a study on the petrophysical modeling and its seismic response characteristics. We obtained the rock background media by integrating non-clay and clay minerals, pores and fluids, using actual sample testing and well-logging data, also adopting both the Voigt-Reuss-Hill (VRH) method and self-consistent approximation (SCA) theory. Combined with the information of actual fracture occurrence and growth patterns, we established the petrophysical modeling of horizontal bedding-parallel fractures based on the Chapman's petrophysical modeling of multi-scale fractures. Finally, the seismic responses were generated using propagator matrix modeling. In combining the above-mentioned test data and the field data, we proposed a workflow of petrophysical modeling of horizontal bedding-parallel fractures based on the petrophysical model of multi-scale fractures, and applied it to the shale reservoirs in the Jiangnan oilfield. The forward modeling results show that the horizontal bedding-parallel fractures were well developed in the shale reservoirs, and the seismic responses are significantly frequency-dependent. Meanwhile, the fracture length and density, major target parameters for seismic prediction of horizontal bedding-parallel fractures, are the most important parameters inducing

收稿日期: 2019-03-03; 修订日期: 2019-04-12。

第一作者简介: 陈双全 (1975—), 男, 研究员, 地球物理勘探。E-mail: chensq@cup.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项 (2017ZX05049005-008); 国家自然科学基金项目 (41574108)。

seismic anisotropy.

Key words: Chapman's model, frequency-dependent characteristic, seismic anisotropy, horizontal bedding-parallel fracture, petrophysical modeling

裂缝作为油气储层的有效存储空间,同时也是油气渗流的主要通道,往往控制着油气的赋存和产能,即裂缝发育常预示着油气的富集与高产。因此,裂缝发育对于致密油气藏、碳酸盐油气藏等储层的油气富集和成藏起着至关重要的作用。对裂缝性储层中裂缝的产状以及分布规律的准确描述,有利于更好地进行裂缝油藏描述^[1]。裂缝油藏描述需要综合地质、地震及测井信息开展工作,进行地质甜点及地球物理甜点的预测,其中地球物理甜点预测主要是利用地震各向异性属性参数开展研究。

裂缝介质岩石物理模型包括具有水平对称轴的横向各向同性介质(HTI)和具有垂直对称轴的横向各向同性介质(VTI)。目前,对于 HTI 介质模型的裂缝预测方法相对比较成熟,可以利用叠后几何类地震属性和叠前方位各向异性反演属性进行预测^[2]。然而,对于 VTI 介质中的水平裂缝,目前还没有很好的办法和工具进行有效的预测。因此,从裂缝发育的地质特征出发,研究水平层理缝的地震响应特征,是开展利用地震数据进行水平层理缝及低角度层理缝预测的基础和前提。

为了进行裂缝性储层描述,需要建立起介质的等效模型。经典的等效介质模型包括 Schoenberg 等提出的线性滑动模型^[3]及 Hudson 裂隙岩石物理模型^[4],但是,这类模型不能准确描述裂缝的几何结构,且没有考虑背景介质中是否包含孔隙和流体,不能很好地解释地震波在裂缝性储层中的频散和衰减特征。裂缝性储层岩石属于裂缝孔隙介质,岩石中的孔隙、裂缝以及两者之间由于地震波的传播产生的流体流动,在岩石物理建模都应该被考虑到。为了能够准确地描述裂缝性储层,需要建立更加完善的等效介质模型,才能得到裂缝几何结构等更详细的储层信息^[5]。Chapman 等提出了一种动态等效介质模型,该模型考虑到了等径孔隙与微裂隙(颗粒尺度)和介观裂缝(介观尺度),以及存在这两种尺度裂隙时的地震波传播产生的耦合流体流动效应。Chapman 岩石物理模型能够描述裂缝性孔隙介质弹性性质,合理解释地震波在传播时引起的速度频散和衰减现象,相比其他岩石物理模型具有更好的表征能力^[6-8]。

论文主要针对非常规页岩油气储层、层理缝发育的优质储层地球物理甜点预测方面的岩石物理建模及其各向异性响应特征模拟问题开展研究。将页岩储层

假设成 VTI 介质,通过引入层理缝表征参数建立岩石物理模型,并开展地震响应特征正演分析。利用实际页岩油探区目的层段的岩心测试数据、矿物成分、以及测井数据,基于 Chapman 多尺度裂缝岩石物理模型建立了具有水平层理缝的岩石物理建模方法,实现了正反演研究其频变特征、裂缝参数(包括裂缝长度和裂缝密度)对地震各向异性参数的影响。

1 岩石物理建模

1.1 VTI 介质模拟

对于页岩 VTI 储层介质,采用 VRH 边界方法计算岩石背景的等效模量^[9]。VRH 边界由 Voigt 上界,Reuss 下界和 Hill 平均组成。Voigt 为等应变平均,其假设混合物各相具有相等的应变,混合物弹性模量表达式为:

$$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i \quad (1)$$

式中: f_i 是第 i 相的体积分数,%; M_i 是第 i 相的弹性模量,GPa; N 为总相数。

Reuss 为等应力平均,其假设各相具有相同的应力,混合物弹性模量表达式为:

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} \quad (2)$$

Hill 指出 Voigt 和 Reuss 的算术平均数可以作为等效弹性模量,其公式为:

$$M_{VRH} = \frac{M_V + M_R}{2} \quad (3)$$

同时,采用 SCA 模型^[10]在岩石基质中添加粘土和带有束缚水的孔隙^[3],对于 N 种混合成分计算表达式为:

$$\sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_{SC}^*) P_i = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_{SC}^*) Q_i = 0 \quad (5)$$

式中: x_i 为各矿物成分的比例,%; P_i 和 Q_i 是第 i 种组分的矿物形状因子,可根据不同扁率和形状进行计算; K_i 和 μ_i 分别是体积模量和剪切模量,GPa; K_{SC}^* 和 μ_{SC}^* 分别是用 SCA 计算出的等效体积模量和剪切模量,GPa。

1.2 水平层理缝模拟

基于 Chapman 多尺度裂缝岩石物理模型^[6],在

VTI 介质中引入一组水平定向排列的裂缝来模拟水平层理缝。Chapman 模型中考虑了不同尺度孔隙之间的流体喷射引起的地震波频散和衰减特性,其频变刚度系数计算表达式如下:

$$C_{ijkl} = C_{ijkl}(\lambda, \mu, \omega, \tau, \Phi, \varepsilon, K_f) \quad (6)$$

式中: λ 和 μ 为拉梅系数; ω 为角频率, Hz; τ 为松弛时间, s; Φ 为孔隙度, %; ε 为裂缝密度; K_f 为流体体积模量, GPa。

考虑在岩石基质的各向同性弹性张量 C_{ijkl}^{iso} 基础上,在裂缝、微裂隙和孔隙的附加作用 C_{ijkl}^1 影响下,各向异性弹性张量 C_{ijkl} 可以表式为:

$$C_{ijkl} = C_{ijkl}^{\text{iso}}(\lambda, \mu) - C_{ijkl}^1(\lambda, \mu, \omega, \Phi, \varepsilon, K_f). \quad (7)$$

进而可以得到 P 波速度与逆品质因子 (Q^{-1}):

$$V_p = \left(\text{Re} \left[\frac{1}{V} \right] \right)^{-1} \quad (8)$$

$$Q^{-1} = \frac{\text{Im}[V^2]}{\text{Re}[V^2]} \quad (9)$$

式中: V_p 为拟 P 波速度, km/s; V 为弹性模量求解 Christoffel 方程得到的最大特征向量值^[11], $\text{Re}[\cdot]$ 和 $\text{Im}[\cdot]$ 分别为取复数的实部与虚部。

1.3 建模流程

基于上述的岩石物理建模方法,在实际数据应用中可以根据矿物成分、测井数据等信息建立页岩储层的岩石物理模型。通过数值模拟计算与正演分析地震响应特征,得到可以用于实际数据储层预测的地震各向异性等特征,实现实际页岩油气储层水平层理缝的预测。同时,通过将岩石物理模型计算和实际井数据的 P 波速度进行对比,反演得到裂缝长度和裂缝密度,并且可以反演得到 P 波速度和 VTI 介质各向异性参数 ε 和 δ 。具体的岩石物理建模流程图如图 1 所示。

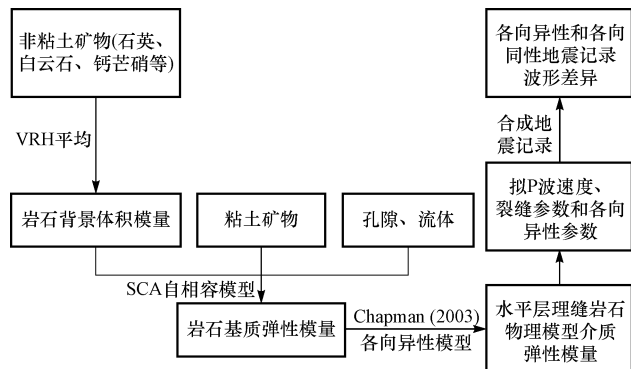


图1 页岩岩石物理建模流程图

Fig.1 The workflow of shale petrophysical modeling

2 实际数据应用

2.1 研究区储层地质条件

利用本文的水平层理缝岩石物理建模方法与技术流程,对江汉盆地的页岩油储层开展了应用研究。江汉盆地的潜江凹陷属于基底埋藏、沉降速度快,潜江组在沉积时期发生盆地沉降、沉积和汇水,并且在高盐度、封闭、和强蒸发的环境下存在盆地的浓缩和成盐。在江汉盆地的油气勘探初期,潜江凹陷地区发现了盐间油浸白云岩。之后又发现潜江凹陷盐间地层存在比较明显的油浸现象,具有很大的勘探潜力^[12-15]。目前,研究资料表明,凡是盐间钻遇裂缝的井均具有很好的油气产能。研究区内的测井资料与岩心资料描述结果表明:江汉油田的潜江凹陷盐间页岩储层表现出明显的 VTI 特征。同时,盐间的页岩储层的水平层理裂缝十分发育^[16-17](图 2)。因此,针对水平层理缝如何进行预测与储层描述,是目前地球物理勘探中研究的难点。

2.2 岩石物理建模及其地震响应特征

针对江汉页岩油储层的特点,在岩石物理建模与地震响应特征研究方面,实现了基于 VTI 介质模型的水平层理缝地震响应特征分析。同时,利用测井数据与岩心矿物成分测试数据,开展了水平层理缝的地震各向异性参数正反演研究。

首先,建立了如图 3 所示的简单的两层的 VTI 介质模型,在研究目的层内通过 Chapman 多尺度裂缝岩石物理模型,模拟了不同裂缝参数的地震响应特征。设置裂缝长度分别为 0.15、0.3、0.6 和 1.2 m,正演得到裂缝长度变化的纵波速度及纵波反射系数的响应特征。裂缝介质中的流体影响因素在本研究中没有进行考虑,因为主要研究目的层为页岩油储层。因此,裂缝介质中主要以充填油进行裂缝长度与裂缝密度的岩石物理建模分析。图 4 所示为不同裂缝长度的计算结果,包括拟纵波速度 (V_p) 和逆品质因子 (Q^{-1}) 随频率变化的特征^[18-20]。图 5 为计算得到的反射系数随入射角和频率变化的频变特征响应特征。从图 5 中可以看出,在频变 AVO 响应中,随着裂缝长度增大,反射系数幅值随频率增大的幅度减小,这一现象同样也可以在图 4 中进行解释。在 10 Hz 到 100 Hz 频率范围,随着裂缝长度增大, P 波速度频散和衰减减小,所以 PP 波的频变 AVO 反射系数随频率变化的幅度减小。对于常规的 AVO 响应,随着裂缝长度增大,反射系数幅

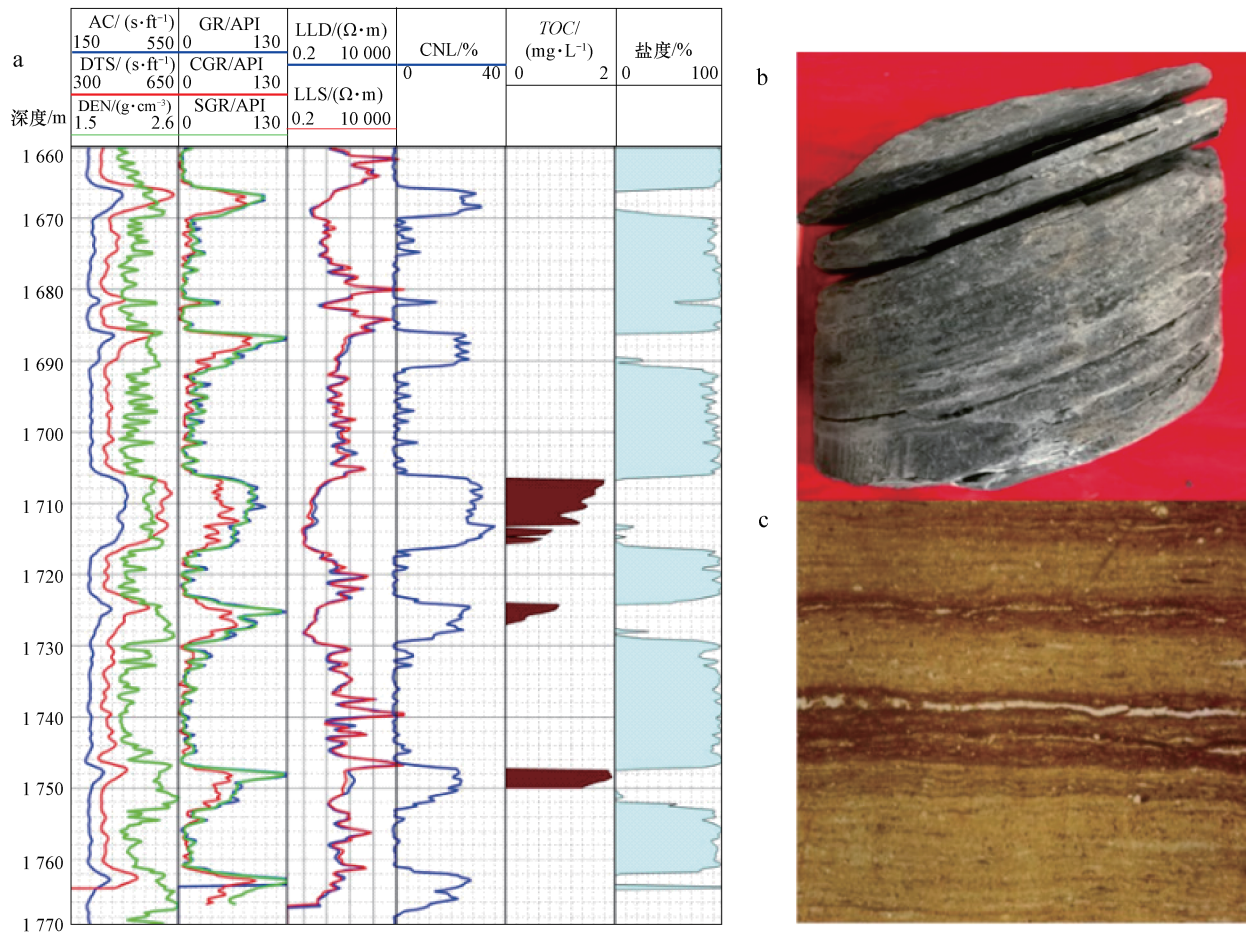


图2 江汉盆地 Wang99 井测井曲线、岩心及薄片

Fig. 2 The comparison of logging curves of Well Wang99 in Jiangnan Basin, and pictures of core and thin section from therein
a. 测井曲线包括 AC, DTS, DEN, GR, CGR, SGR, LLD, LLS, CNL, TOC, SALT; b. 岩心; c. 岩心薄片

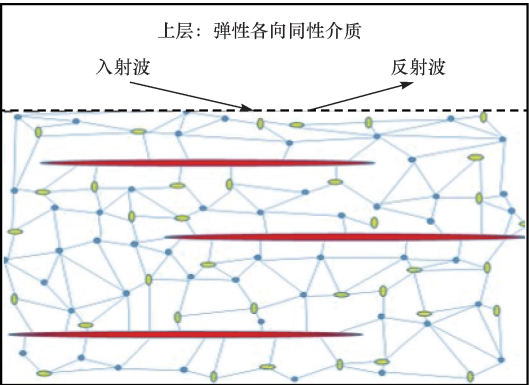


图3 上层为弹性各向同性介质,下层为裂缝各向异性介质的 VTI 模型

Fig. 3 The VTI model with an elastic isotropic medium for the upper part and the lower part a fracture anisotropic medium

值随入射角变化的幅度减小,并且入射角较大情况下(如大于 20°),不同裂缝尺寸对反射系数幅值的影响更明显。

在保持其他参数不变的情况下,通过改变裂缝密

度参数,分别设为 0.01,0.04,0.07 和 0.1 时,正演并分析了裂缝长度对 P 波速度及其反射系数的影响。图 6 所示为不同裂缝密度的计算结果,包括拟纵波速度(V_p)和逆品质因子(Q^{-1})随频率变化的特征。图 7 为计算得到的反射系数随入射角和频率变化的频变特征响应特征。从图 7 中可以看出,在频变 AVO 响应中,不同入射角下反射系数随频率变化的幅度和裂缝密度呈正相关,这一现象可以从图 6 中得到解释,P 波速度的频散和衰减幅度随着裂缝密度的增大而增大,导致反射系数随频率变化更明显。对于常规 AVO 分析,反射系数幅值随入射角的变化幅度和裂缝密度值成反比,并且入射角较大情况下(如大于 30°),不同裂缝密度对反射系数幅值的影响更明显。

在完成不同裂缝参数对水平层理缝地震响应的频变特征模拟后,再利用实际岩样的矿物成分进行岩石物理建模,并计算得到各向异性参数,最后进行合成地震记录正演。采用如图 1 所示的流程图,最后得到各向同性和各向异性介质情况下的合成地震记录,分析

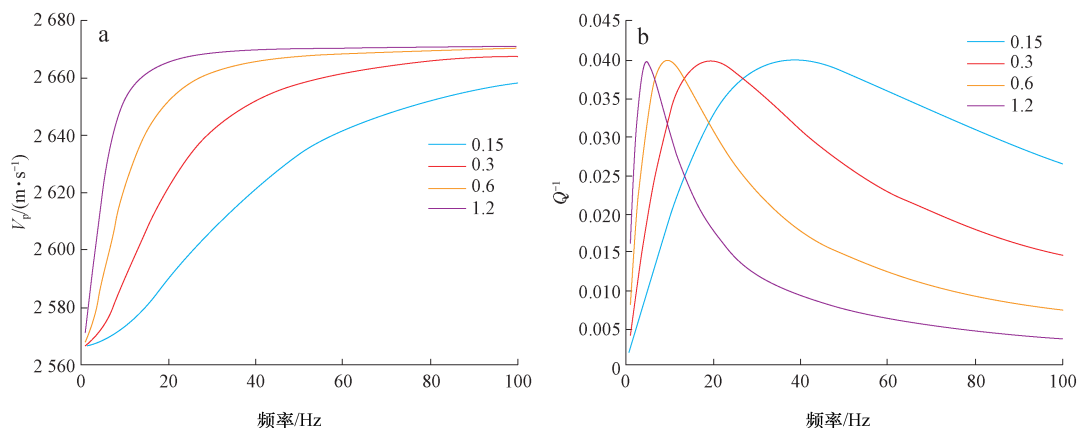


图 4 不同裂缝长度的水平裂缝的 VTI 介质的 P 波速度 V_p (a) 和逆品质因子 Q^{-1} (b) 随频率变化曲线对比

Fig. 4 The comparison of frequency-dependent V_p (a) and Q^{-1} (b) for the horizontal fracture

VTI medium with different fracture length

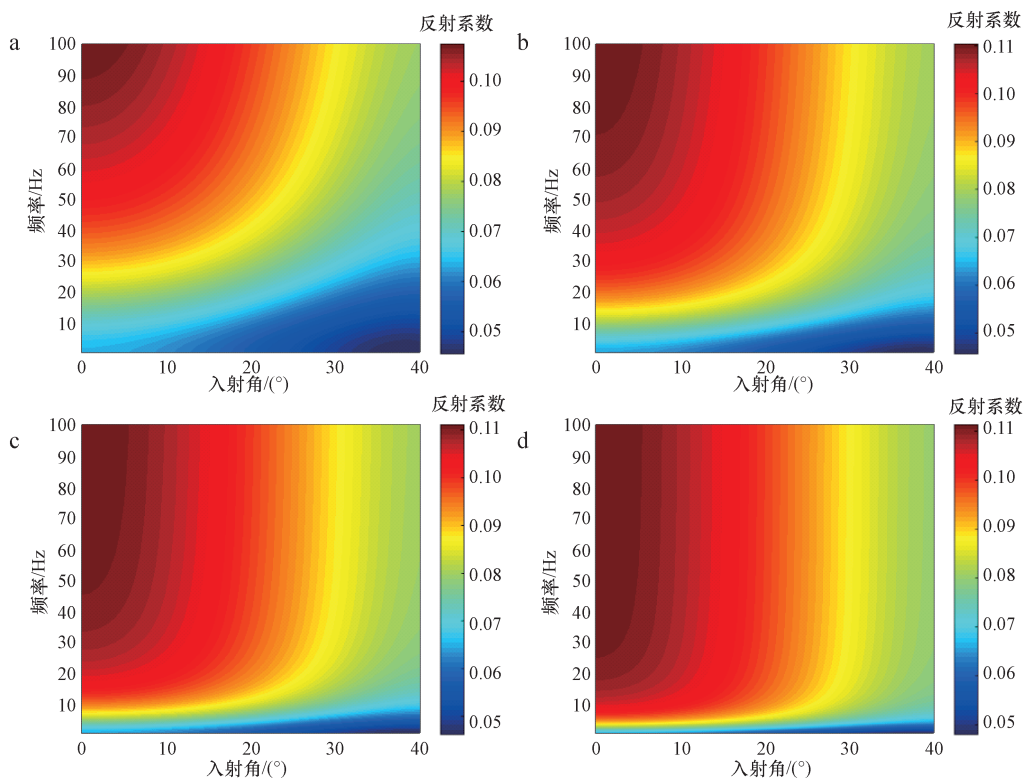


图 5 不同裂缝长度时反射系数幅值随入射角和频率变化

Fig. 5 Variations of reflection coefficient with different incident angles and frequencies for fractures of various length

a. 0.15 m ; b. 0.3 m ; c. 0.6 m ; d. 1.2 m

各向异性特征在水平层理缝中的地震响应的影响因素。文中采用江汉油田实际井的 Eq_3^4 10 韵律层对应的岩相、井曲线和裂缝密度统计数据,盐间页岩储层发育水平层理缝^[16]。根据已有的实际地区的矿物成分信息,可以得到 1 676.5 ~ 1 683.6 m 之间 30 个不同深度点的矿物成分(图 8),其对应的矿物的体积模量、剪切模量和密度参数如表 1 所示。

基于实际测井的矿物成分数据和水平层理缝发育

特征,在背景介质中引入水平定向排列的裂缝,在模型中设定可变参数为裂缝长度和裂缝密度,正演得到了裂缝密度和裂缝长度对 P 波速度的频变响应特征(图 9)。从图 9 中可以看出裂缝长度影响 P 波速度频散的频段范围,而裂缝密度影响 P 波速度频散的幅度,两者综合影响 P 波速度值。因此,可以通过反演裂缝参数大小使得模型的 P 波速度拟合于实际速度。图 10 为综合水平层理缝的裂缝参数(包括裂缝长度、

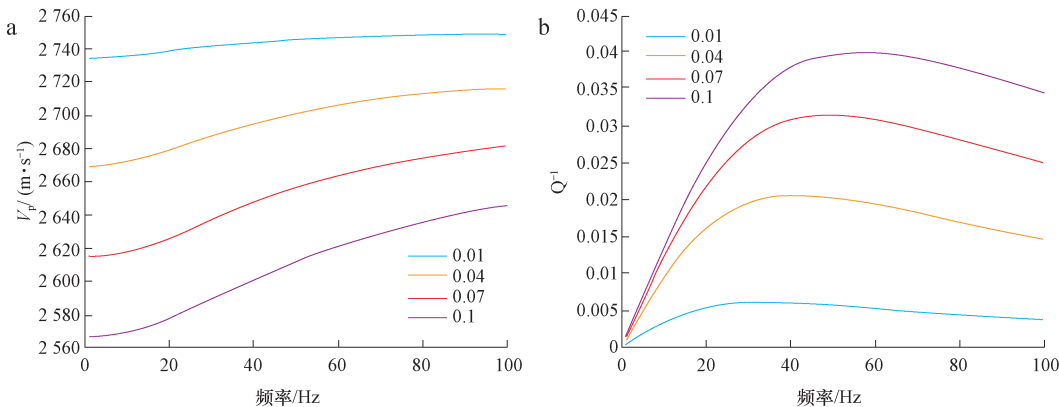


图 6 不同裂缝密度的水平裂缝的 VTI 介质的 P 波速度(a)和逆品质因子(b)随频率变化曲线对比
Fig. 6 The comparison of frequency-dependent P-wave velocity (a) and Q-1 (b) for the horizontal fracture VTI medium with different fracture density

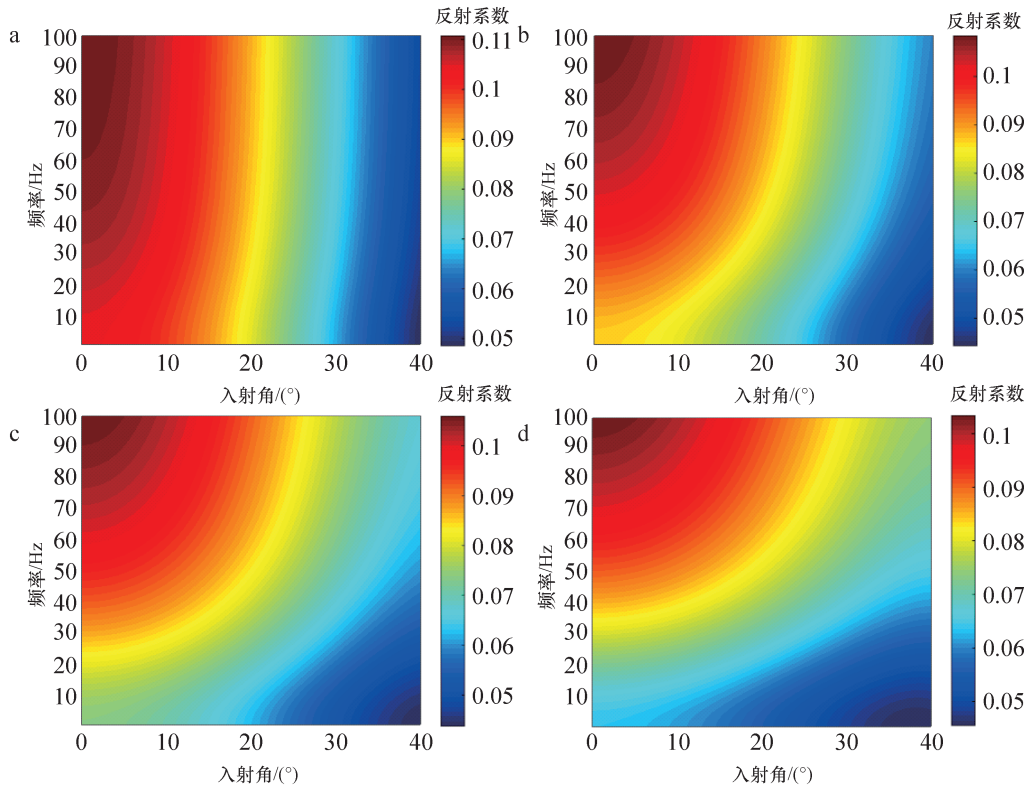


图 7 不同裂缝密度时反射系数幅值随入射角和频率变化
Fig. 7 Variations of reflection coefficient with different incident angles and frequencies for fractures of various density
a. 裂缝密度 0.01 条/m; b. 裂缝密度 0.04 条/m; c. 裂缝密度 0.07 条/m; d. 裂缝密度 0.1 条/m

裂缝密度)、各向异性参数,计算得到的 P 波速度曲线与实际测井数据的对比结果。从图中可以明显地看出,没有水平层理缝的背景各向同性介质 P 波速度与实际测井数据相差很大。综合裂缝参数和各向异性参数计算得到的结果与实际测井数据完全吻合,而图 11 分别对比了裂缝密度和裂缝长度单独对 P 波速度曲线的影响。对比图 10 和图 11,可以看到裂缝密度和裂缝长度同时影响 P 波速度曲线。因此,水平层理缝引起的各向异性、频变特征对 P 波速度具有很重要的作用。

最后,基于各向异性参数,以及 P 波速度等信息,正演得到了实际井的叠前合成地震记录。如图 12 所示,由于水平层理缝的各向异性特征存在,叠前道集中存在较明显的差异。

2.3 地震各向异性特征主控因素分析

通过对水平层理缝的岩石物理建模及其地震响应特征的研究,可以发现影响地震波的重要参数包括水平层理缝发育的长度和密度参数,二者不仅对 P 波速

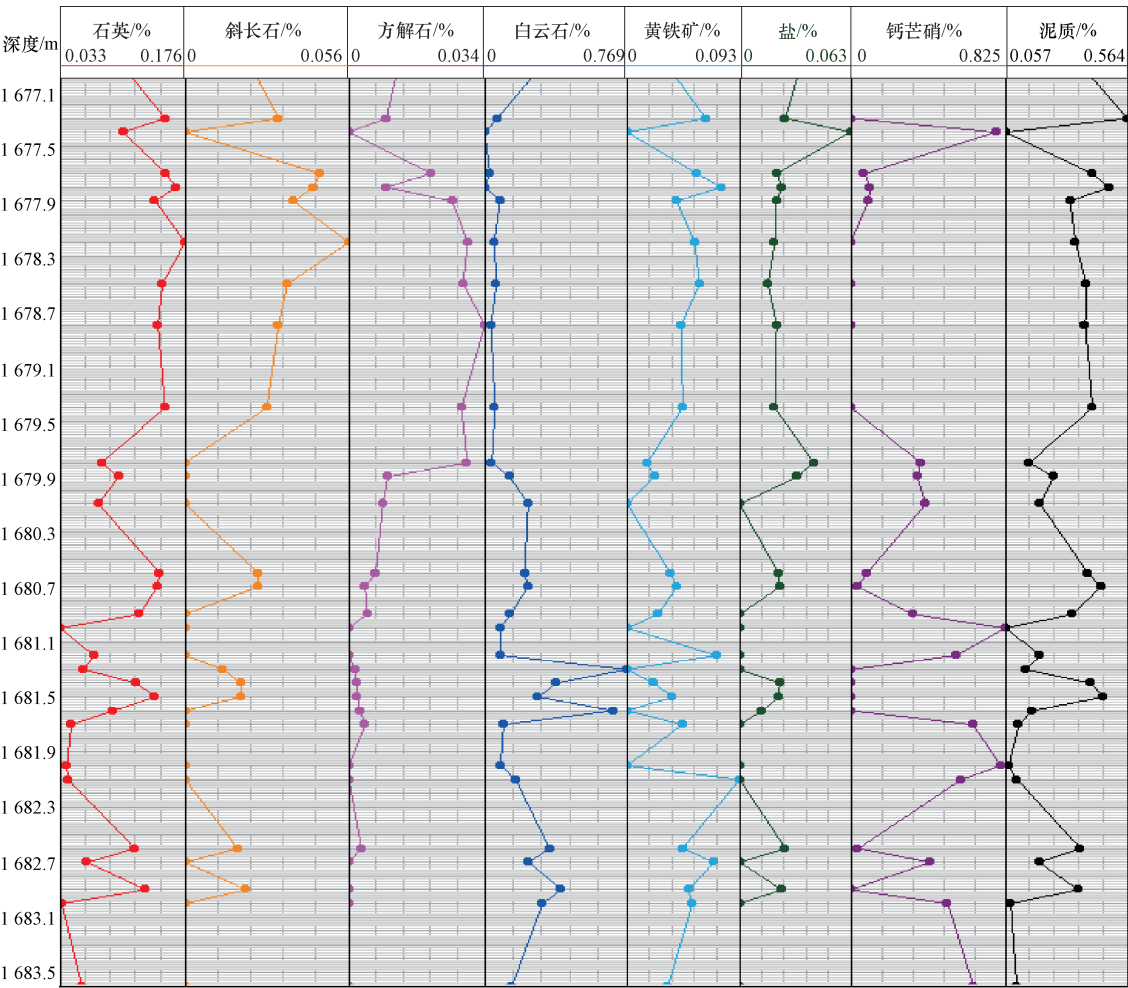


图 8 实际井岩心矿物成分

Fig. 8 The mineral composition diagram in actual wells

表 1 矿物成分的体积模量、剪切模量和密度参数

Table 1 Bulk modulus,shear modulus and density parameters of the mineral composition

岩石矿物组分	泥质	石英	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	盐	钙芒硝
体积模量/GPa	25.0	37.0	75.6	76.8	94.9	147.4	24.8	60.0
剪切模量/GPa	9.0	44.0	25.6	32.0	45.0	132.5	14.9	30.0
密度/(g·cm ⁻³)	2.55	2.65	2.63	2.71	2.87	4.93	2.16	2.70

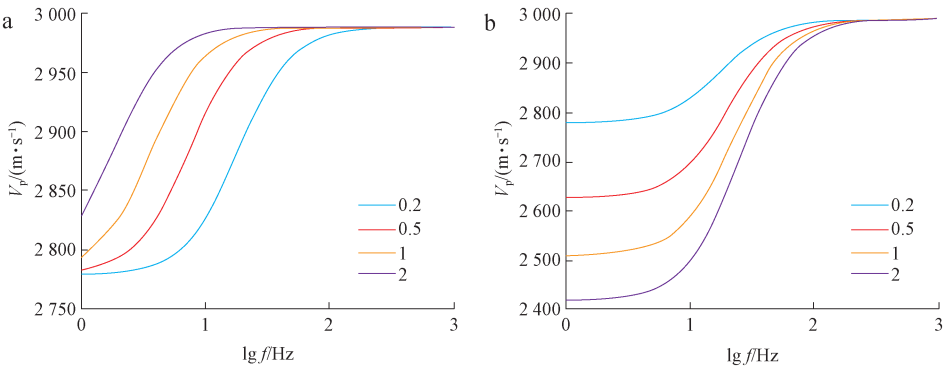


图 9 裂缝长度和裂缝密度变化时的 P 波速度随频率变化曲线对比

Fig. 9 Frequency-dependent characteristics of P-wave velocity with fractures of various length and density

a. 裂缝长度分别为 0.2 m、0.5 m、1 m 和 2 m；b. 裂缝密度分别 0.05、0.1、0.15 和 0.2 条/m

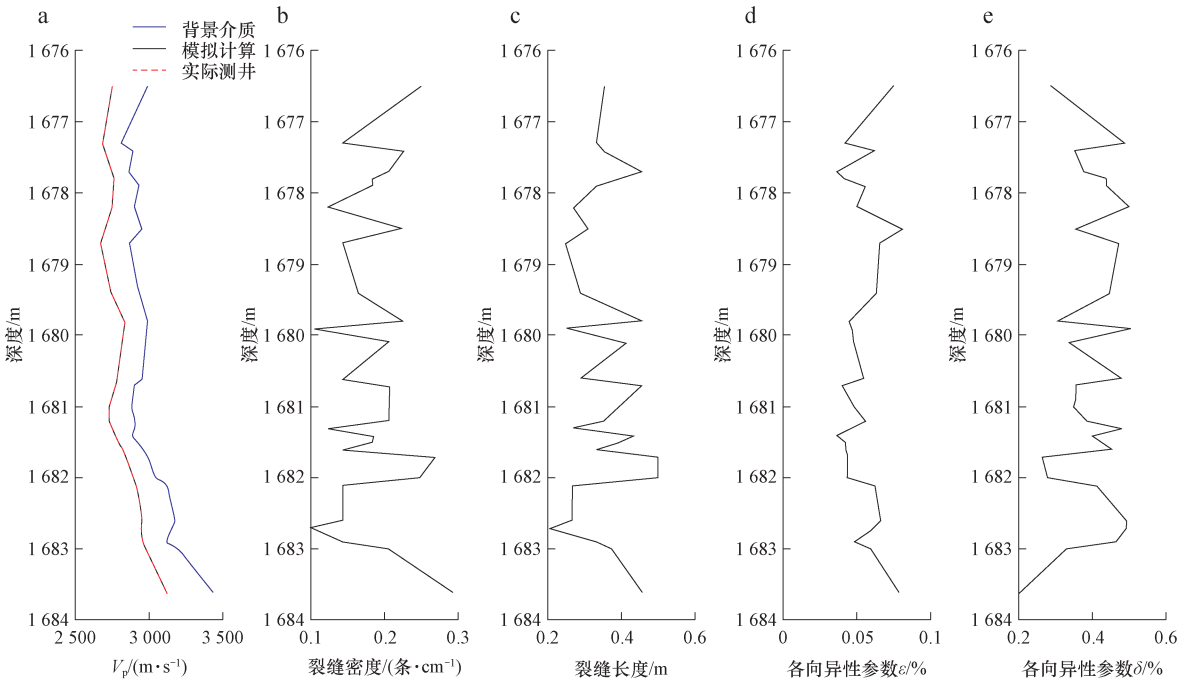


图 10 P 波速度与裂缝密度、长度及各向异性参数对比

Fig. 10 The comparison of P-wave velocity with fracture density, length and anisotropic parameters

a. 背景介质、模型计算和实际测井 P 波速度曲线; b. 裂缝密度; c. 裂缝长度; d. 各向异性参数 ϵ ; e. 各向异性参数 δ

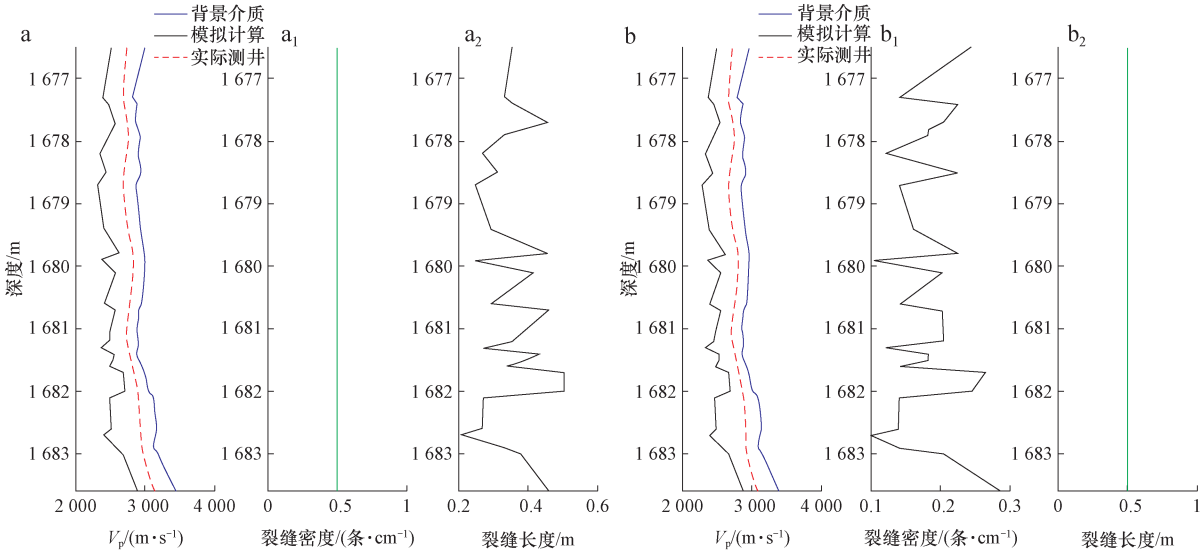


图 11 背景介质、模拟计算和实际测井 P 波速度对比

Fig. 11 The comparison of P-wave velocity in background medium, simulation calculation, and actual logging

a, a₁, a₂. 裂缝密度为定值 0.5/(条·cm⁻¹); b, b₁, b₂. 裂缝长度为定值 0.5 m

度的频变特征有明显的影响,同时还对叠前道集影响较大。因此,对于利用实际地震资料进行水平层理缝的预测,不仅要对裂缝的发育密度进行反演,同时还要对裂缝发育长度参数进行反演,才能保证反演结果的准确性。

在基于 VTI 介质的水平层理缝岩石物理建模中,两层介质分别为弹性介质和裂缝性孔隙衰减介质,两者界面的反射系数是复数值,和频率相关。裂缝性衰

减介质中速度和衰减共同影响反射系数幅值大小,反射系数实部主要受速度影响,虚部主要受衰减影响。在此模型中,随着裂缝长度增大,各频率下衰减介质的相速度值增大,衰减值减小,两者共同作用下不同频率的反射系数幅值增大。PP 波频变反射系数对裂缝长度和裂缝密度的变化具有一定的敏感性,因而在理论上可以在反射 P 波数据中通过频变 AVO 反射技术获取裂缝长度和密度等参数。

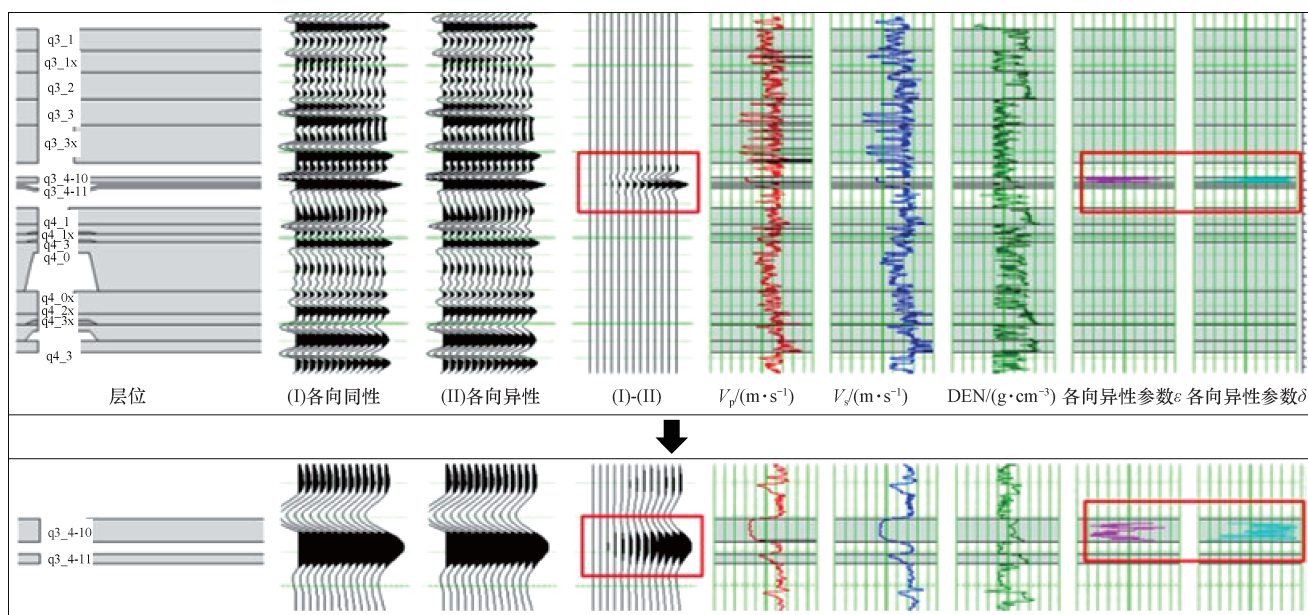


图 12 合成的各向同性和各向异性地震记录对比

Fig. 12 The comparison of seismic records in synthetic isotropic and anisotropic media

3 结论

完成了实际页岩油储层的水平层理缝地震响应特征的正演模拟研究,建立了基于 Chapman 多尺度岩石物理模型的实际井数据的水平层理缝岩石物理建模方法,并结合实际测井资料完成了从岩石物理模型到地震 AVO 响应特征的研究。依据实际岩石矿物成分建立起各向同性的 VTI 介质模型,并引入水平层缝进行 P 波速度、反射系数和叠前道集数据的正演。研究结果表明:页岩油气储层中水平层理缝发育的裂缝长度和裂缝密度对 P 波速度频散的频率范围和变化大小产生很大的影响。同时,实际测井数据的 P 波速度对比发现,裂缝长度与裂缝密度同时控制 P 波速度的变化,水平层理缝的各向异性参数直接反演在叠前地震道集数据中。因此,利用叠前道集数据反演出能够表征水平层理缝的各向异性参数,再根据叠前数据的频变 AVO 特征联合反演得到水平层理缝的发育密度与裂缝长度参数,能够有效地实现页岩油气储层水平裂缝的地球物理预测。

参 考 文 献

- [1] 张国君,冯珏,王典,等. 裂隙性油气藏发展现状[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2008,38:43-47.
Zhang Guojun, Feng Xuan, Wang Dian, et al. Present status of fractured oil and gas reservoirs [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38: 43-47.
- [2] Chen S Q, Zeng L B, Huang P, et al. The application study on the multi-scales integrated prediction method to fractured reservoir description [J]. Applied Geophysics, 2016, 13(1): 80-92.
- [3] Schoenberg M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(5): 1516-1521.
- [4] Hudson J A. Wave speeds and attenuation of elastic wave in material containing cracks [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1981, 64(1): 133-150.
- [5] 兰慧田. 裂缝性孔隙介质波场模拟与频变 AVO 储层参数反演 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
Lan Huitian. Wave field modelling in fractured porous media and frequency-dependent AVO reservoir parameters inversion [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [6] Chapman M. Frequency-dependent anisotropy due to meso-scale fractures in the presence of equant porosity [J]. Geophysical Prospecting, 2003, 51, 369-379.
- [7] Chapman M, Maultzsch S, Liu E, et al. The effect of fluid saturation in an anisotropic multi-scale equant porosity model [J]. Journal of Applied Geophysics 2003, 54 191-202.
- [8] Maultzsch S, Chapman M, Liu E, et al. Modelling frequency-dependent seismic anisotropy in fluid-saturated rock with aligned fractures; implication of fracture size estimation from anisotropic measurements [J]. Geophysical Prospecting, 2003, 51, 381-392.
- [9] 熊晓军, 李翔, 刘阳, 等. 基于孔隙分类理论的自相容模型横波速度预测方法 [J]. 石油物探, 2017, 56(2): 179-184.
Xiong Xiaojun, Li Xiang, Liu Yang, et al. Shear wave velocity estimation method by the porosity classification based on the self consistent model [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(2): 179-184.

(下转第 1287 页)

- Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1267–1271.
- [13] 王小林, 于立君, 李治平, 等. 特高含水期新型水驱特征曲线[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(6): 54–56.
Wang Xiaolin, Yu Lijun, Li Zhiping, et al. New water-flooding characteristic curves at the stage of extra-high water cut [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(6): 54–56.
- [14] 宋兆杰, 李治平, 赖枫鹏, 等. 高含水期油田水驱特征曲线关系式的理论推导[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 201–208.
Song Zhaojie, Li Zhiping, Lai Fengpeng, et al. Derivation of water flooding characteristic curve for high water-cut oilfields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 201–208.
- [15] 刘世华, 谷建伟, 杨仁锋. 高含水期新型水驱特征曲线[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(S1): 158–163.
Liu Shihua, Gu Jianwei, Yang Renfeng. New water-flooding characteristic curve at high water-cut stage [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(S1): 158–163.
- [16] 范海军, 朱学谦. 高含水期油田新型水驱特征曲线的推导及应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(1): 105–108.
Fan Haijun, Zhu Xueqian. Derivation and application of new water flooding characteristic curve in high water-cut oilfield [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(1): 105–108.
- [17] 侯健, 王容容, 夏志增, 等. 特高含水期甲型水驱特征曲线的改进[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 72–75.
Hou Jian, Wang Rongrong, Xia Zhizeng, et al. Improvement of water displacement curve for water flooded oil reservoirs at ultra-high water cut stage [J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(6): 72–75.
- [18] 高文君, 彭长水, 李正科. 推导水驱特征曲线的渗流理论基础和通用方法[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 56–60.
Gao Wenjun, Peng Changshui, Li Zhengke. A derivation method and percolation theory of water-drive characteristic curves [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000(5): 56–60.
- [19] 陈军, 杨峻懿, 刘启国. 特高含水期油藏采油速度研究及影响因素分析[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(4): 17–21.
Chen Jun, Yang Junyi, Liu Qiguo. Study on the speed of oil recovery and influence factors in extra-high water content period [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(4): 17–21.
- [20] 李珂, 胡书勇, 张金庆. 一种新型水驱特征曲线及其应用[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(2): 13–16.
Li Ke, Hu Shuyong, Zhang Jinqing. A new type water flooding characteristic curve and its application [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(2): 13–16.
- [21] 李立峰, 滕世婷, 冯绪波. 基于水驱开发全过程的新型水驱特征曲线[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 85–88.
Li Lifeng, Teng Shiting, Feng Xubo. A new water-flooding characteristic curve based on the whole water-flooding process [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 85–88.

(编辑 梁 慧)

(上接第1281页)

- [10] 张广智, 陈怀震, 王琪, 等. 基于碳酸盐岩裂缝岩石物理模型的横波速度和各向异性参数预测[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1707–1715.
Zhang Guangzhi, Chen Huaizheng, Wang Qi, et al. Estimation of S-wave velocity and anisotropy parameters using fractured carbonate rock physics model [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1707–1715.
- [11] Jakobsen M, Johansen T A, McCann C. The acoustic signature of fluid flow in complex porous media [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical, 2003, 54(3): 219–246.
- [12] 方志雄. 潜江凹陷隐蔽油藏成藏主控因素及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 804–812.
Fang Zhixiong. Main controlling factors and exploration direction of subtle oil reservoirs in Qianjiang Depression [J]. Oil and Gas Geology, 2006, 27(6): 804–812.
- [13] 杜小娟, 贺钦. 江汉盐湖盆地盐间泥质白云岩烃源岩特征[J]. 江汉石油科技, 2012, 22(1): 7–10.
Du Xiaojuan, He Qin. Characteristics of source rocks of inter-salt argillaceous dolomite in Jiangnan salt lake basin [J]. Jiangnan Petroleum Science and Technology, 2012, 22(1): 7–10.
- [14] 潘银华, 黎茂稳, 孙永革, 等. 江汉盆地潜江凹陷盐间云质页岩热压生排烃模拟实验研究[J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 551–558.
Pan Yinhua, Li Maowen, Sun Yongge, et al. Thermo-compression simulation of hydrocarbon generation and expulsion of inter-salt dolomitic shale, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 551–558.
- [15] 吴世强, 陈凤玲, 姜在兴, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组白云岩成因[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 201–208.
Wu Shiqiang, Chen Fengling, Jiang Zaixing, et al. Origin of Qianjiang Formation dolomite in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 201–208.
- [16] 龙玉梅, 陈曼霏, 陈凤玲, 等. 潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层发育特征及影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 59–64.
Long Yumei, Chen Manfei, Chen Fengling, et al. Characteristics and influencing factors of inter-salt shale oil reservoirs in Qianjiang formation, Qianjiang sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 59–64.
- [17] 吴世强, 唐小山, 杜小娟, 等. 江汉盆地潜江凹陷陆相页岩油地质特征[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2013, 36(3): 282–286.
Wu Shiqiang, Tang Xiaoshan, Du Xiaojuan, et al. Geologic characteristics of continental shale oil in the qianjiang depression, Jiangnan salt lake basin [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2013, 36(3): 282–286.
- [18] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [19] 杜启振, 杨慧珠. 线性黏弹性各向异性介质速度频散和衰减特征研究[J]. 物理学报, 2002, 51(9): 2101–2108.
Du Qizhen, Yang Huizhu. Velocity dispersion and attenuation in anisotropy linear viscoelastic media [J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(9): 2101–2108.
- [20] Wang Y J, Chen S Q, Li X Y. Anisotropic characteristics of mesoscale fractures and applications to wide azimuth 3D P-wave seismic data [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2015, 12(3): 448–464.

(编辑 张亚雄)