

基于贝叶斯理论的裂缝性介质 叠前地震同步反演方法

汤 婕^{1,2},吴国忱²,邓小凡³

(1.安东石油(技术)集团有限公司,北京 100102; 2.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580;
3.中国石化石油工程地球物理有限公司华东分公司,江苏 南京 210009)

摘要:裂缝的发育使储层表现出方位各向异性,而不同方位的叠前地震数据则表现出在振幅等属性上存在一定差异。所以,基于方位地震数据的叠前地震同步反演方法能获得储层裂缝相关参数,进而进行储层裂缝预测。为此,从方位各向异性介质的基本理论出发,介绍描述裂缝性介质的岩石物理参数,并给出各向异性参数与裂缝参数之间的转换关系。针对分步反演法可能产生累积误差的缺点,结合贝叶斯理论,提出裂缝性介质叠前地震同步反演方法。模型测试和实际资料测试结果均表明,新方法具有较好的可靠性和稳定性。

关键词:叠前地震同步反演 页岩 方位各向异性 裂缝 裂缝参数

中图分类号:P631.445

文献标识码:A

Pre-stack seismic synchronous inversion method for fractured media based on Bayesian theory

TANG Jie^{1,2}, WU Guochen², DENG Xiaofan³

(1. Anton Oilfield Services(Group)Ltd., Beijing City, 100102, China;
2. School of Geosciences, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China;
3. East China Company, Petroleum Engineering Geophysics Ltd., SINOPEC, Nanjing City, Jiangsu Province, 210009, China)

Abstract: The development of fractures results in azimuthal anisotropy of reservoirs, while the pre-stack seismic data of different orientations show differences in amplitude and other properties. Therefore, pre-stack seismic synchronous inversion method based on azimuthal seismic data can be used to get the relevant parameters of reservoir fractures and then predict reservoir fractures. For this reason, starting from the basic theory of azimuthal anisotropic medium, rock physical parameters describing fractured medium were introduced, and the relation between anisotropic parameters and fracture parameters was given. Aiming at the disadvantage that the stepwise inversion method may generate accumulated error, combined with Bayesian theory, the pre-stack seismic synchronous inversion method for fractured media was proposed. The results of both model test and real data test show that the new method has good reliability and stability.

Key words: pre-stack seismic synchronous inversion; shale; azimuthal anisotropy; fracture; fracture parameters

随着石油天然气勘探开发进程的不断推进,目前的勘探方向已经由构造油气藏转向岩性油气藏,比较典型的是碳酸盐岩缝洞型油气藏和页岩裂缝型油气藏^[1]。根据美国能源信息署2013年发表的评估报告,理论上可开采的页岩气量约为 206×10^{12} m³,大约占总资源量的1/3。中国页岩油气储量丰富,随着中国经济的持续快速发展、能源战略安全

的需要以及人们环保意识的不断增强,其对本土页岩油气藏的开采需求日益迫切。

研究证实,全球已发现油气藏的储层大多发育天然裂缝,天然裂缝有利于流体的储集和流动。页岩具有自生自储的特点,因此页岩既是烃源岩,又是储集岩^[2-3]。页岩储层中裂缝发育是一种非常普遍的现象^[4-6]。由于页岩储层中独特的矿物结构和

收稿日期:2018-08-02。

作者简介:汤婕(1993—),女,山东东营人,硕士,从事叠前地震反演研究。联系电话:18354201632, E-mail: TangJie_Jenny@163.com。
基金项目:国家科技重大专项“基于宽方位叠前地震反演的中深层复杂储层表征及油气检测技术”(2016ZX05024-001-008)。

构造活动的影响,储层中多发育近垂直裂缝,可以等效为HTI介质,所以页岩等裂缝性介质通常表现出方位各向异性。裂缝的发育关系到页岩储层的储量和开采难度,因此裂缝的识别对页岩油气勘探至关重要。目前,储层裂缝的检测方法主要有3种:①通过野外露头识别裂缝分布,进而分析地下储层裂缝发育情况。②通过电阻率和成像等测井技术识别裂缝。③通过地震勘探手段来探测储层裂缝的发育^[7]。即通过地震数据预测得到裂缝方向、裂缝密度和充填流体的性质等裂缝参数。叠前地震同步反演方法是在吴国忱等提出的扰动弹性阻抗^[8]基础上,将地震数据反演得到弹性参数和根据弹性参数与物性参数之间的岩石物理关系估算物性参数两步,改进为从地震数据、叠前正演模型和岩石物理模型直接反演得到物性参数,减小了中间步骤造成的误差。为此,笔者利用叠前地震同步反演方法进行页岩储层的裂缝参数预测,取得了较好的效果。

1 方法建立

1.1 叠前地震正演模型

SIMMONS等通过反演,得到的线性纵波反射率、横波反射率和密度反射率的计算式^[9]分别为

$$R_p = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (1)$$

$$R_s = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (2)$$

$$R_D = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3)$$

根据GARDNER公式^[10], ρ 与 V_p 及 V_s 与 V_p 的关系式分别为

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1}{4} \frac{\Delta V_p}{V_p} \quad (4)$$

$$V_s = \frac{V_p - 1360}{1.16} \quad (5)$$

通过式(4)和式(5),纵波速度变化率可表示为

$$\frac{\Delta V_p}{V_p} \approx \Delta \ln V_p \quad (6)$$

根据式(1)和式(6),可将反射率较小时的纵波反射率近似为

$$R_{pi} \approx \frac{1}{2} \Delta \ln Z_{pi} = \frac{1}{2} (\ln Z_{p(i+1)} - \ln Z_{pi}) \quad (7)$$

假设有 N 个样本反射率,式(7)的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} R_{p1} \\ R_{p2} \\ \vdots \\ R_{pN} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & -1 & 1 & \cdots \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{p1} \\ L_{p2} \\ \vdots \\ L_{pN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$L_{pi} = \ln Z_{pi} \quad (9)$$

利用正演褶积模型,将地震道看作地震子波和反射率的褶积,则地震道的矩阵表示形式为

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & \cdots \\ w_2 & w_1 & 0 & \cdots \\ w_3 & w_2 & w_1 & \cdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{p1} \\ R_{p2} \\ \vdots \\ R_{pN} \end{bmatrix} \quad (10)$$

结合式(8)和式(10),得到将地震道同纵波波阻抗对数相关联的正演模型为

$$T = \frac{WDL_p}{2} \quad (11)$$

其中

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & \cdots \\ w_2 & w_1 & 0 & \cdots \\ w_3 & w_2 & w_1 & \cdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & -1 & 1 & \cdots \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$L_p = \ln Z_p \quad (14)$$

吴国忱等提出的基于法向弱度和切向弱度的反射系数近似方程式^[8]为

$$R_{pp}(\theta, \varphi) = a(\theta)R_{ip} + b(\theta)R_{is} + c(\theta)R_p + d(\theta, \varphi)R_{\Delta_N} + e(\theta, \varphi)R_{\Delta_T} \quad (15)$$

其中

$$a(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \tan^2 \theta) \quad (16)$$

$$R_{ip} = \Delta I_p \sqrt{I_p} \quad (17)$$

$$b(\theta) = -4g \sin^2 \theta \quad (18)$$

$$R_{is} = \Delta I_s \sqrt{I_s} \quad (19)$$

$$c(\theta) = -\frac{1}{2}(\tan^2 \theta - 4g \sin^2 \theta) \quad (20)$$

$$R_p = \Delta \rho \sqrt{\rho} \quad (21)$$

$$d(\theta, \varphi) = -[g(1 - 2g) \cos^2 \varphi \sin^2 \theta] \quad (22)$$

$$R_{\Delta_N} = \Delta_{N_2} - \Delta_{N_1} \quad (23)$$

$$e(\theta, \varphi) = g \cos^2 \varphi \sin^2 \theta \quad (24)$$

$$R_{\Delta_T} = \Delta_{T_2} - \Delta_{T_1} \quad (25)$$

对于给定的角道集 $T(\theta, \varphi)$,结合式(11)和式(15),将式(11)中给出零偏移距(或者角度)道集扩展,可得

$$T(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} a(\theta) W(\theta) D L_p + \frac{1}{2} b(\theta) W(\theta) D L_s + c(\theta) W(\theta) D L_D + d(\theta, \varphi) W(\theta) D \Delta_N + e(\theta, \varphi) W(\theta) D \Delta_T \quad (26)$$

其中

$$L_s = \ln Z_s \quad (27)$$

$$L_D = \ln \rho \quad (28)$$

由式(26)可以看出,地震子波与入射角和方位角有关,因此,式(26)可用于反演。

HAMPSON 等假设纵波波阻抗的对数与横波波阻抗的对数和密度的对数之间均呈线性关系^[11],其表达式分别为

$$\ln Z_s = k \ln Z_p + k_c + \Delta L_s \quad (29)$$

$$\ln Z_D = m \ln Z_p + m_c + \Delta L_D \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} T(\theta_1, \varphi_1) \\ T(\theta_1, \varphi_2) \\ \vdots \\ T(\theta_N, \varphi_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(\theta_1)W(\theta_1)D & b_1(\theta_1)W(\theta_1)D & c(\theta_1)W(\theta_1)D & d(\theta_1, \varphi_1)W(\theta_1)D & e(\theta_1, \varphi_1)W(\theta_1)D \\ a_1(\theta_1)W(\theta_1)D & b_1(\theta_1)W(\theta_1)D & c(\theta_1)W(\theta_1)D & d(\theta_1, \varphi_2)W(\theta_1)D & e(\theta_1, \varphi_2)W(\theta_1)D \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_1(\theta_N)W(\theta_N)D & b_1(\theta_N)W(\theta_N)D & c(\theta_N)W(\theta_N)D & d(\theta_N, \varphi_N)W(\theta_N)D & e(\theta_N, \varphi_N)W(\theta_N)D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_p \\ \Delta L_s \\ \Delta L_D \\ \Delta_N \\ \Delta_r \end{bmatrix} \quad (34)$$

1.2 岩石物理模型

岩石的弹性性质使地震波能够在弹性介质中传播,不同的岩石具有不同的弹性特征。同一岩石中包含不同流体时,其弹性性质也相应地改变,这就是流体替代技术的物理基础。Gassmann 方程是流体替代技术的理论支撑,通常采用岩石骨架速度来预测流体饱和岩石的地震速度。

笔者利用刘欣欣建立的页岩储层岩石物理模型^[12],具体建模方法为:①利用 Voigt-Reuss-Hill 平均来计算成岩矿物的混合弹性模量,将其等效为岩石背景基质的弹性参数。②利用 Kuster-Toksöz 模型,向岩石背景基质中加入包含束缚水的泥质孔隙和干燥连通孔隙,建立各向同性岩石骨架。③根据 Gassmann 理论,向干燥岩石中加入流体,得到等效饱和和各向同性背景岩石。④裂缝形状与被有机质填充孔隙形状相同,均为单一狭长椭球形,且两者排列方向相同的条件下,使用 Eshelby-Cheng 模型,向各向同性背景岩石中加入干燥的定向排列裂缝和有机质占据的孔隙空间,通过 Bond 变换将坐标轴旋转,最后得到等效各向异性岩石骨架。⑤采用 GRECHKA 提出的不连通孔隙的各向异性流体/固体替换方程^[13],向裂缝中加入流体,并向被占据的孔隙空间中加入有机质。在建模过程中,需要以下已知条件:裂缝孔隙度、裂缝形状和有机质填充孔隙形状,根据建模需要,笔者假设裂缝和有机质填充孔隙的纵横比均为 0.001。⑥根据测井数据,计算各向异性参数,根据裂缝参数(法向弱度和切向弱度)与各向异性参数之间的转换关系,进而计算得到测井裂缝参数。转换关系表达式为

将式(29)和式(30)变形整理并代入式(26),

$T(\theta, \varphi)$ 的表达式变为

$$T(\theta, \varphi) = a_1 W(\theta) D L_p + b_1 W(\theta) D \Delta L_s + c(\theta) W(\theta) D \Delta L_D + d(\theta, \varphi) W(\theta) D \Delta_N + e(\theta, \varphi) W(\theta) D \Delta_r \quad (31)$$

其中

$$a_1 = \frac{1}{2} a(\theta) + \frac{1}{2} k b(\theta) + m_c \quad (32)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} b(\theta) \quad (33)$$

$T(\theta, \varphi)$ 矩阵形式,即叠前地震正演褶积模型为

$$\begin{cases} \delta^{(v)} = -2g[(1-2g)\Delta_N + \Delta_r] \\ \varepsilon^{(v)} = -2g(1-g)\Delta_N \\ \gamma = -\gamma^{(v)} = \frac{\Delta_r}{2} \end{cases} \quad (35)$$

其中

$$g = \frac{V_s^2}{V_p^2} \quad (36)$$

1.3 反演目标函数

基于贝叶斯理论的反演框架,根据储层待反演参数的先验分布信息和采集到的地震信息,求解待反演参数的后验概率分布,对反演求解问题的不稳定性进行分析,再根据后验概率分布求解最优化的待求参数,得到可靠的反演结果^[14]。基于贝叶斯理论的叠前地震同步反演的目标函数为

$$F(m) = F_c(m) + F_c(m) + F_{el}(m) = (d - Gm)^T (d - Gm) + 2\sigma_n^2 \sum_{l=1}^M \ln \left(1 + \frac{m_l^2}{\sigma_m^2} \right) + \alpha_{el} (\xi - Cm)^T (\xi - Cm) \quad (37)$$

其中

$$\xi = \frac{1}{2} \ln \frac{EI((\theta, \varphi), t)}{EI((\theta, \varphi), t_0)} \quad (38)$$

$$C = \int_{t_0}^t d\tau \quad (39)$$

由式(37)表示的反演目标函数 $F(m)$, 是假设模型参数服从柯西分布,并通过添加模型约束项得到的,分别将方位部分角度叠加地震数据,以及叠前地震正演模型、岩石物理模型代入该目标函数,求解该目标函数极小值,便可得到最为合理的裂缝参数反演结果^[15-16]。

2 方法可靠性和稳定性验证

2.1 模型试算

一种新方法的实现不仅需要扎实、可靠的理论基础,还需经过实际数据的检验。为了验证所建方法的可靠性和稳定性,将该方法应用于一维模型进行测试,并对方法的优缺点进行分析。

选取中国东部某油区过裂缝型储层的W井建模,进行基于贝叶斯理论的叠前地震同步反演方法测试。叠前地震同步反演主要步骤包括:测井岩石物理分析,层位标定,分角度子波提取,不同子波均衡角度部分叠加数据体之间振幅、频率和相位差异对比,叠前初始模型建立及叠前地震同步反演等^[17]。W井弹性参数以及各向异性参数曲线如图1所示。

根据测井解释结果和已知测井曲线分析,可知W井900~1 000 ms层段发育一套含气储层。利用该井已知的各向异性参数计算得到相应的法向弱度和切向弱度并绘制对应曲线,与反演结果对比可知,两者结果基本一致(图2a),说明反演得到的裂缝参数是准确的。从图2亦可看出,900~1 000 ms层段法向弱度相对较高、切向弱度相对较低,这与裂缝型储层含气时表现出的特征一致,进一步证明了反演结果的准确性。

利用W井测井数据制作合成地震记录,用于储层裂缝参数反演方法测试。在制作合成地震记录时,选取方位角为15°和105°,入射角为16°和24°。不同信噪比下的反演结果表明:当信噪比为5:1时,反演结果与模型真实值吻合较好(图2b);当信噪比为2:1时,反演结果虽与模型真实值之间存在一定误差(图2c),但仍在误差允许范围内,依然能较为准确地反映出实际模型参数。充分说明该方法具有

较强稳定性,反演结果准确可靠。

2.2 实际资料测试

选取中国东部某泥页岩裂缝型储层,其内部发育三组近东西向断层,并被近北东向、北西向断层切割成众多断块。储层段为深湖一半深湖沉积,发育一套泥质烃源岩,主要岩性为暗黑色泥岩、油泥岩和油页岩等,泥页岩发育稳定且是目标储层最为有利的烃源岩。由于受地质构造活动和断层的影响,目的层段泥页岩裂缝型油气藏为研究区油气的主要赋存层位。

由于目标储层具有方位各向异性特征,因而研究区采用的是全方位三维地震勘探方法。采集得到的全方位三维地震数据覆盖次数均匀,炮检距和方位角分布合理,只有大方位角数据和炮检距小方位角数据部分缺失。因此,地震数据满足裂缝性介质叠前地震同步反演的要求。目前,收集到的地震数据有0°~30°,30°~60°,60°~90°,90°~120°,120°~150°和150°~180°共6个方位的叠前道集,每个方位分别有8°,16°和24°等3个部分角度的叠加道集,一共18个地震数据。在测井数据方面,有1口井含有声波时差、横波时差、密度、裂缝密度、孔隙度和测井解释等测井曲线,可根据测井曲线计算目的层段方位各向异性参数。

在常规的方位弹性阻抗反演中,由于裂缝参数对地震数据的贡献较小,在同时提取裂缝储层背景介质弹性参数和裂缝参数时,由于噪声等的影响,极易导致裂缝参数反演不稳定,甚至会导致反演得到的法向弱度和切向弱度为负数,与实际不符^[8]。图3为利用本文方法得到的法向弱度和切向弱度反演剖面,由于测井曲线较短,在图中只能显示极小一段。由图3可知,2 400~2 500 ms层段存在裂缝,这与测井解释结果一致,且反演的裂缝参数与测井

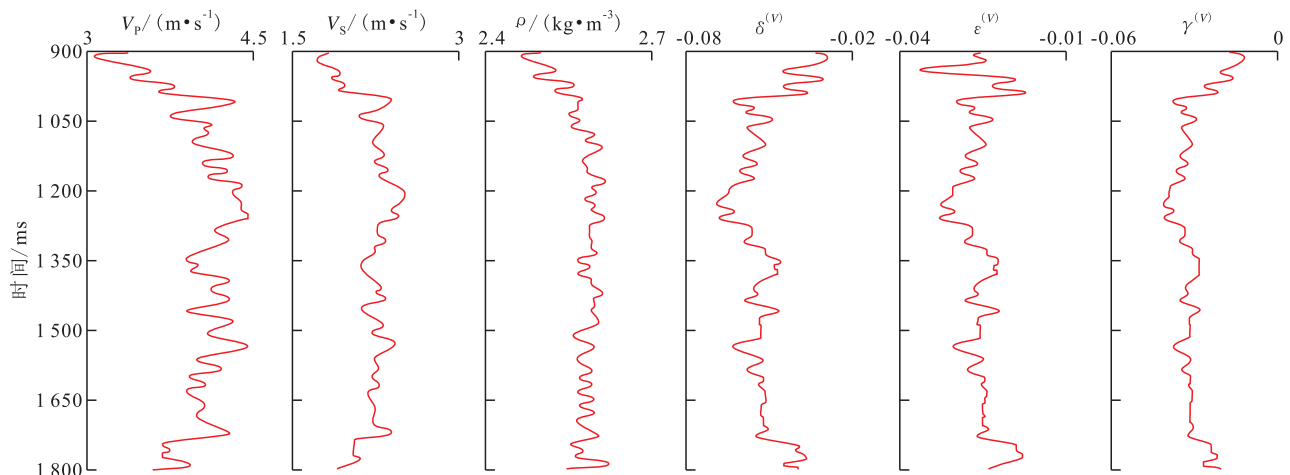


图1 W井弹性参数和各向异性参数
Fig.1 Anisotropic parameters and elastic parameters of Well W

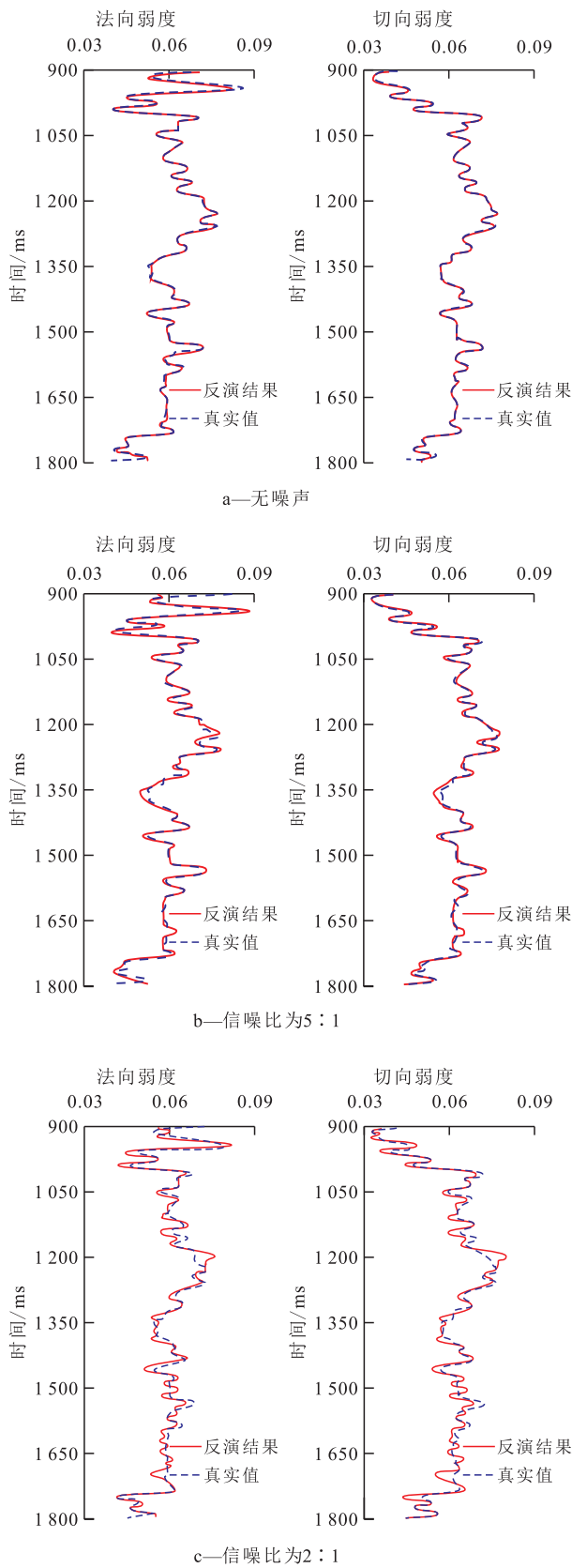


图2 不同信噪比下裂缝参数反演结果

Fig.2 Inversion results of fracture parameters at different signal-to-noise ratios

曲线吻合度较好,说明新建方法效果明显,适用于实际工区。

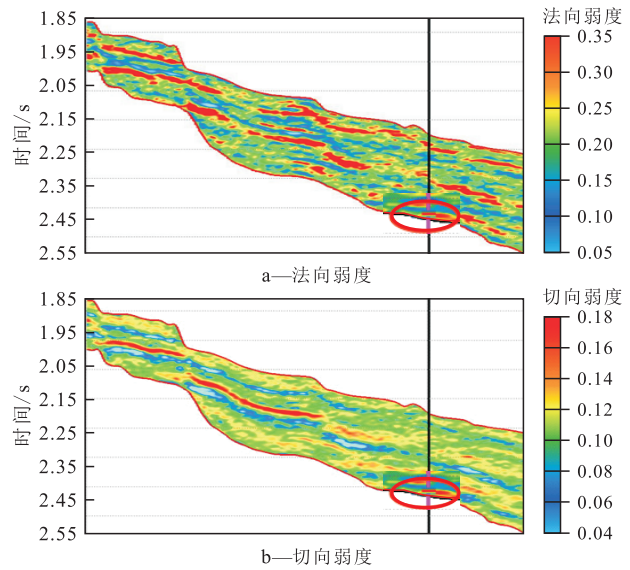


图3 法向弱度和切向弱度反演剖面

Fig.3 Inversion profiles of normal weakness and tangential weakness

3 结论

针对页岩裂缝型储层中裂缝参数(法向弱度和切向弱度)反演不稳定的问题,建立了一种基于贝叶斯理论的叠前地震同步反演方法,为裂缝参数反演提供了一种新的思路和解决方法。

虽然新建方法在储层裂缝参数反演方面取得了一定的效果,实际资料等的验证也证明了方法的可行性。但总的来说依旧存在问题,有待于进一步探讨:①对于裂缝性介质等方位各向异性储层,目前一般的做法是将其等效为弱各向异性介质进行研究和处理,然而,页岩储层发育裂缝时,储层的各向异性较强,这时弱各向异性近似的假设是否成立需要进一步确认,新方法对这种介质的适用性还需进一步验证。②含近垂直发育的裂缝具有方位各向异性,笔者讨论的背景介质为横向各向同性情况下的叠前地震同步反演。而储层可能在发育近垂直裂缝的同时,还发育水平层理,即正交各向异性介质,对于这类储层,还需要考虑水平层理引起的各向异性对地震数据的影响。

符号解释:

R_p ——纵波反射率; V_p ——纵波速度, m/s; ρ ——岩层密度, g/cm^3 ; R_s ——横波反射率; V_s ——横波速度, m/s; R_D ——密度反射率; R_{pi} ——反射率较小时界面 i 的纵波反射率; i ——上下两层间的分界面编号; Z_{pi} ——界面 i 的纵波波阻抗, $m/s \cdot g/cm^3$; N ——反射率样本总数, 个; T_j ——第 j 个地震道; j ——采样点数, 其值为 $1, 2, 3, \dots, N$; w_j ——第

j 个地震子波; T ——地震道; $R_{vp}(\theta, \varphi)$ ——基于法向弱度和切向弱度的纵波反射系数; θ ——入射角, rad; φ ——方位角, rad; R_{lp} ——纵波波阻抗反射系数; R_{ls} ——横波波阻抗反射系数; R_p ——密度反射系数; R_{Δ_N} ——法向弱度反射率; R_{Δ_T} ——切向弱度反射率; Δ_{N_2} , Δ_{N_1} ——反射下界面和上界面法向弱度; Δ_{T_2} , Δ_{T_1} ——反射下界面和上界面切向弱度; $T(\theta, \varphi)$ ——角道集; Δ_N ——法向弱度; Δ_T ——切向弱度; $W(\theta)$ ——地震子波矩阵; Z_p ——纵波波阻抗, $\text{m/s} \cdot \text{g/cm}^3$; Z_s ——横波波阻抗, $\text{m/s} \cdot \text{g/cm}^3$; k , m ——纵波波阻抗对数与横波波阻抗对数和密度对数曲线的斜率梯度; k_c , m_c ——纵波波阻抗的对数与横波波阻抗的对数和密度的对数曲线的截距; $\delta^{(0)}$ ——准纵波垂直传播与沿 45° 角传播时的各向异性程度; $\varepsilon^{(0)}$ ——垂直传播与水平传播时准纵波速度的差值; γ ——垂直传播和水平传播时 SH 波速度的差值; $\gamma^{(0)}$ ——HTI 介质中各向异性参数, 相对于 γ , HTI 介质的对称轴相对于 VTI 介质而言旋转了 90° ; $F(m)$ ——反演目标函数; m ——模型参数; $F_c(m)$, $F_l(m)$, $F_{EI}(m)$ ——不同子项; d ——带噪声的观测地震数据; G ——子波矩阵; σ_n^2 ——噪声方差; l ——模型参数个数; M ——模型参数总数; α_{EI} ——约束系数; m_l ——第 l 个模型参数; σ_m^2 ——模型参数方差; EI ——弹性阻抗, $\text{m/s} \cdot \text{g/cm}^3$; t ——时间, s; t_0 ——方位角为 φ 、入射角为 θ 时的时间, s; τ ——积分变量。

参考文献:

- [1] 汤婕, 吴国忱. 基于各向异性弹性阻抗的裂缝密度直接反演方法[C]. 北京: 中国地球科学联合学术年会, 2016.
TANG Jie, WU Guochen. Fracture density direct inversion based on isotropic elastic impedance [C]. Beijing: Annual Meeting of Chinese Geoscience Union, 2016.
- [2] 韩松财, 魏佳, 程远方, 等. 诱导应力下天然裂缝的稳定性及破坏特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(6): 168-174.
HAN Songcai, WEI Jia, CHENG Yuanfang, et al. Stability and failure features of the natural fault under the induced stress [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(6): 168-174.
- [3] 刘书会, 王长江, 罗红梅, 等. 泥页岩岩石物理参数测试与分析[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(6): 16-21.
LIU Shuhui, WANG Changjiang, LUO Hongmei, et al. Research on measurement and analysis of shale rock physical parameters [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(6): 16-21.
- [4] 徐旭辉, 郑伦举, 马中良. 泥页岩中有机质的赋存形态与油气形成[J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 423-428.
XU Xuhui, ZHENG Lunju, MA Zhongliang. Organic matter occurrence and hydrocarbon generation in shale [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 423-428.
- [5] 高凤琳, 宋岩, 姜振学, 等. 黏土矿物对页岩储集空间及吸附能力的影响[J]. 特种油气藏, 2017, 24(3): 1-8.
GAO Fenglin, SONG Yan, JIANG Zhenxue, et al. Influence of clay minerals on shale storage space and adsorptive capacity [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(3): 1-8.
- [6] 尉鹏飞, 张金川, 隆帅, 等. 四川盆地及周缘地区龙马溪组页岩微孔隙结构及其发育主控因素[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(5): 42-51.
WEI Pengfei, ZHANG Jinchuan, LONG Shuai, et al. Characteristics and controlling factors of microscopic pore structure of Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(5): 42-51.
- [7] 罗辑. 方位各向异性叠前地震反演方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
LUO Ji. Study on methodology of pre-stack seismic inversion for azimuthal anisotropic medium [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [8] 吴国忱, 赵小龙, 罗辑, 等. 基于扰动弹性阻抗的裂缝参数反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(2): 340-349.
WU Guochen, ZHAO Xiaolong, LUO Ji, et al. Fracture parameters inversion based on perturbation elastic impedance [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(2): 340-349.
- [9] SIMMONS J L, BACKUS M M. Waveform-based AVO inversion and AVO prediction-error [J]. Geophysics, 1996, 61(6): 1575-1588.
- [10] GARDNER G H F, GARDNER L W, GREGORY A R. Formation velocity and density-The diagnostic basics for stratigraphic traps [J]. Geophysics, 1974, 39(6): 770-780.
- [11] HAMPSON D P, RUSSELL B H, BANKHEAD B. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005, 24(24): 1633-1637.
- [12] 刘欣欣. 非均质储层地震岩石物理模型构建与波场特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
LIU Xinxin. Research on seismic rock physics modeling and wavefield characteristics in heterogeneous reservoirs [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [13] GRECHKA V. Fluid-solid substitution in rocks with disconnected and partially connected porosity [J]. Geophysics, 2009, 74(5): 89-95.
- [14] 李志勇, 钱峰, 胡光岷, 等. 储层弹性与物性参数地震叠前同步反演的确定性优化方法[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1706-1716.
LI Zhiyong, QIAN Feng, HU Guangmin, et al. Prestack seismic joint inversion of reservoir elastic and petrophysical parameters using deterministic optimization method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(5): 1706-1716.
- [15] RUGER A. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media [D]. Colorado: Colorado School of Mines, 1996.
- [16] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: theory and methods [M]. San Francisco: W H Freeman and Company, 1980.
- [17] 方中于, 朱江梅, 李勇, 等. 叠前地震同步反演方法及应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2014, 41(2): 152-156.
FANG Zhongyu, ZHU Jiangmei, LI Yong, et al. Study on pre-stack seismic simultaneous inversion and its application [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2014, 41(2): 152-156.