

陈怀震, 印兴耀, 张金强等. 2014. 基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数反演方法研究. 地球物理学报, 57(10): 3431-3441, doi:10.6038/cjg20141029.

Chen H Z, Yin X Y, Zhang J Q, et al. 2014. Seismic inversion for fracture rock physics parameters using azimuthally anisotropic elastic impedance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(10):3431-3441, doi:10.6038/cjg20141029.

基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石 物理参数反演方法研究

陈怀震¹, 印兴耀¹, 张金强², 张广智¹

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

2 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 裂缝储层岩石物理参数的准确获得对地下裂缝预测具有重要意义, 而叠前地震反演是获得裂缝岩石物理参数的有效手段. 本文从裂缝岩石物理等效模型的构建出发, 从测井数据上估测了裂缝岩石物理参数, 通过推导含裂缝岩石物理参数的方位各向异性弹性阻抗公式, 探讨了基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数地震反演方法. 实际工区地震数据应用表明, 基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数反演方法合理、可靠, 可以降低裂缝岩石物理参数估测的不确定性, 为地下裂缝预测提供有力的依据.

关键词 方位各向异性; 弹性阻抗; 裂缝; 岩石物理; 地震反演

doi:10.6038/cjg20141029

中图分类号 P631

收稿日期 2014-01-14, 2014-09-22 收修定稿

Seismic inversion for fracture rock physics parameters using azimuthally anisotropic elastic impedance

CHEN Huai-Zhen¹, YIN Xing-Yao¹, ZHANG Jin-Qiang², ZHANG Guang-Zhi¹

1 *China University of Petroleum (East China), School of Geosciences, Qingdao 266580, China*

2 *SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China*

Abstract It is important to obtain the accurate rock physics parameters of fractured reservoirs for underground fractures prediction. Pre-stack seismic inversion is an efficient means to estimate rock physics parameters. This paper begins with the building of fractured rock physics equivalent model. The velocity and fracture rock physics parameters can be estimated from well-log data by using the model. The paper also deduces the azimuthal elastic impedance formula which contains the fracture rock physics parameters. Based on the formula, it presents the method of direct inversion for fracture rock physics parameters using azimuthal elastic impedance. The practical test shows that the method is more stable and reasonable, which leads to reduce the uncertainty for the estimation of fracture rock physics parameters. And the method is a strong tool for fracture prediction.

Keywords Azimuthal anisotropy; Elastic impedance; Fracture; Rock physics; Seismic inversion

基金项目 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB228604, 2014CB239201), 国家油气重大专项(2011ZX05014-001-010HZ), 中央高校基本科研业务费专项资金(14CX06015A), 中国石化地球物理重点实验室开放研究基金资助.

作者简介 陈怀震, 男, 1989年生, 中国石油大学(华东)博士研究生, 主要从事岩裂缝储层岩石物理、储层预测和流体识别方面的研究.
E-mail: chenhz2011@gmail.com

1 引言

地下裂缝系统是碳酸盐岩储层和非常规储层(页岩气、致密气和致密油储层)研究的重要部分,裂缝系统不仅可以连通孤立的孔隙,增加储层的有效孔隙度,而且可以为油气运移提供通道,提高储层的渗透率.当前基于地震各向异性理论识别地下裂缝的技术已经取得了较好的应用效果(Liu, 2012).研究表明,裂缝岩石物理研究为利用地震数据进行裂缝储层预测搭建了有效的桥梁,而且储层弹性参数和裂缝岩石物理参数的可靠获得对刻画裂缝具有重要意义.而叠前地震反演是获得裂缝储层弹性参数和裂缝岩石物理参数的有效途径.因此,本文主要探索了基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数地震直接反演方法,为储层裂缝的预测提供可靠的依据.

关于裂缝岩石物理方面,国内外学者进行了大量研究,目前常用的两个模型为薄硬币形状裂隙模型(Hudson, 1980)和线性滑移模型(Schoenberg, 1983).两者的不同在于前者面向研究微裂隙对岩石的影响,后者主要用于描述裂隙对岩石的影响.关于两者的等价关系,Schoenberg等(1988)指出当裂隙面比较平缓、且裂隙包含物模量较小时,分别利用薄硬币形状裂隙模型和线性滑移模型计算的介质弹性模量相等.由于薄硬币形状裂隙模型考虑了裂隙形状、裂隙密度及裂隙充填物的影响,因此鉴于两个模型的等价关系,可以研究线性滑移模型中裂缝岩石物理参数与裂隙形状、裂隙密度及裂隙充填物的关系.Mavko等(2009)分析了薄硬币形状模型的假设条件应用限制,指出在地震频带范围内应先计算含裂缝干岩石骨架的弹性模量,再利用流体替换方法计算饱和岩石的弹性模量.研究表明,定向排列的裂缝可以引起地震波传播的各向异性特征(Liu and Martinez, 2012),因此在裂缝型干岩石的流体替换过程中不能忽略岩石各向异性的特征.同时,Mavko等(2009)在岩石物理手册中展示了Gassmann(1951)各向异性岩石的流体替换方程,该方程可以用来实现裂缝型饱和岩石弹性模量、裂缝岩石物理参数的求解.本文从岩石物理等效理论出发,选取线性滑移模型和各向异性岩石的流体替换方程实现裂缝型岩石物理等效模型的构建.

裂缝岩石物理研究是联系裂缝特征参数与地震

响应的桥梁.利用地震反演得到与裂缝特征相关的岩石物理参数,可以指导地下裂缝预测,因此探索裂缝岩石物理参数与地震反射之间的关系式,进而开展裂缝岩石物理参数叠前地震反演研究显得尤为重要.Connolly(1999)率先提出了弹性阻抗的概念.其后,国内外大量学者研究了弹性阻抗反演以及基于弹性阻抗的参数估测方法(王保丽等, 2005, 2008; 李爱山等, 2009; 张广智等, 2011; 宗兆云等, 2012; 印兴耀等, 2013).考虑到由于定向排列裂缝引起的各向异性,推导适用于裂缝型储层的各向异性弹性阻抗公式显得尤为重要.研究表明,裂缝型储层各向异性弹性阻抗表现出随入射角和方位角同时变化的特征,也将其称为方位各向异性弹性阻抗(孔丽云等, 2012; 陈怀震等, 2013; 陈怀震等, 2014).当储层中发育着垂直或近似垂直的裂缝时,可以将其等效为具有水平对称轴的横向各向同性介质(HTI, Horizontal Transverse Isotropic).Martins(2006)推导了HTI介质的弹性阻抗表达式,并分析了HTI介质弹性阻抗随入射角和方位角的变化特征.但由于其推导的HTI介质弹性阻抗的表达式过于繁琐,无法较好地应用于后续的弹性参数反演工作中.因此,推导包含纵横波阻抗参数和岩石物理参数的方位各向异性弹性阻抗公式,探索利用方位地震数据反演得到可靠的方位各向异性弹性阻抗数据体,进而提取裂缝储层的纵横波阻抗和裂缝岩石物理参数,为裂缝型储层的预测和描述提供重要的地球物理依据.

本文首先从裂缝型岩石的岩石物理等效模型构建出发,利用测井数据估测可靠的纵横波速度和裂缝岩石物理参数,分析裂缝岩石物理参数的变化特征,直接从测井曲线上识别出裂缝储层位置,指导后续裂缝储层的地震反演预测.其次,通过推导含纵横波阻抗和裂缝岩石物理参数的方位各向异性弹性阻抗公式,探索利用不同方位的地震角度叠加地震道集反演方位各向异性弹性阻抗数据体的方法.最后,研究了基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数地震直接反演方法,实现裂缝岩石物理参数的可靠估测.该流程不仅依靠岩石物理模型从测井上直接估测岩石物理参数,识别裂缝储层位置,而且充分利用不同方位的部分角度叠加地震道集反演方位各向异性弹性阻抗,进而提取整个工区的纵横波阻抗和裂缝岩石物理参数,为储层裂缝预测和描述提供可靠的支撑.

2 方法原理

2.1 裂缝型岩石物理等效模型

本文对裂缝型碳酸盐岩岩石物理模型(张广智等,2013)的构建流程进行了改进,如图 1 所示.其中,选用线性滑移模型来研究裂缝对各向同性背景岩石的影响,并直接估测裂缝岩石物理参数(Δ_N 和 Δ_T),避免了由各向异性参数向裂缝岩石物理参数

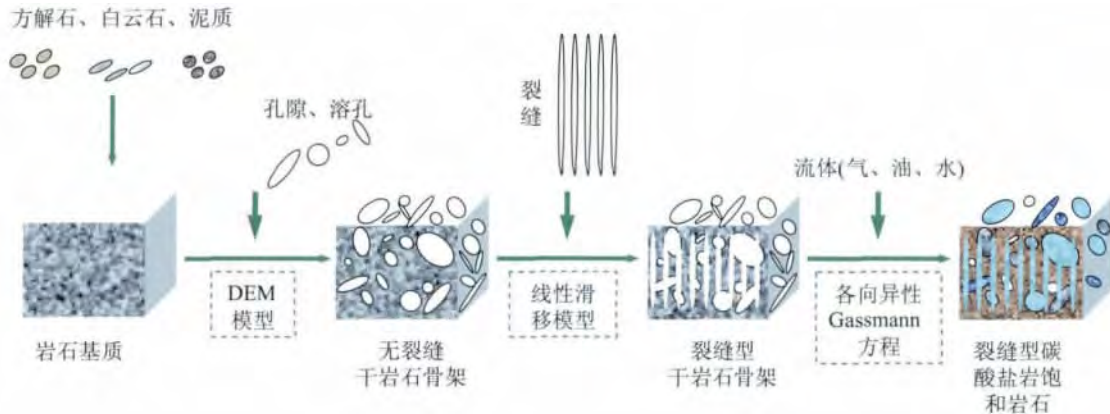


图 1 改进的裂缝型碳酸盐岩岩石物理等效模型构建示意图

Fig. 1 Improved fractured carbonate rock physics model

对裂缝型碳酸盐岩岩石物理等效模型构建过程中的步骤(3)和步骤(5)进行具体分析.如图 1 所示,本文选用线性滑移模型(Schoenberg,1983)实现裂缝的添加,选取各向异性的 Gassmann 方程(Mavko

转换过程中引入的误差.其构建步骤为:

- (1)方解石、白云石和泥质基质矿物混合;
- (2)添加孔隙形成不含裂缝的碳酸盐岩干岩石骨架;
- (3)添加裂缝扰动影响,形成裂缝型碳酸盐岩干岩石骨架;
- (4)按照测井解释结果,确定油气水的比例,计算流体模量;
- (5)各向异性岩石的流体替换,计算饱和和各向异性岩石的模量和裂缝岩石物理参数.

et al.,2009)完成裂缝型饱和岩石的模量的计算.

2.1.1 线性滑移模型

已知线性滑移模型描述的裂缝型岩石的刚度矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu)(1 - \Delta_N) & \lambda(1 - \Delta_N) & \lambda(1 - \Delta_N) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1 - \Delta_N) & (\lambda + 2\mu)\left(1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}\right)^2 \Delta_N\right) & \lambda\left(1 - \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \Delta_N\right) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1 - \Delta_N) & \lambda\left(1 - \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \Delta_N\right) & (\lambda + 2\mu)\left(1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}\right)^2 \Delta_N\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1 - \Delta_T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1 - \Delta_T) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, λ 和 μ 是不含裂隙岩石的拉梅参数, Δ_N 表示垂直裂缝面上裂缝对地震波的影响, Δ_T 表示平行于裂缝面上裂缝对地震波的影响.

根据薄硬币裂隙模型和线性滑移模型的关系,可以对裂缝岩石刚度矩阵中的 Δ_N 和 Δ_T 进行求解.

$$\Delta_N = \frac{4e}{3g(1-g) \left[1 + \frac{1}{\pi(1-g)} \left(\frac{K' + \frac{4}{3}\mu'}{\mu\alpha} \right) \right]}, \quad (2a)$$

$$\Delta_T = \frac{16e}{3(3-2g) \left[1 + \frac{4}{\pi(3-2g)} \left(\frac{\mu'}{\mu\alpha} \right) \right]}, \quad (2b)$$

其中, e 是裂缝密度, K' 和 μ' 分别是裂隙充填物的体积模量和剪切模量, α 为裂缝高宽比, $g = \mu/(\lambda + 2\mu)$.

研究表明,在地震频带范围内构建裂缝型岩石物理等效模型时,应先利用线性滑移模型添加干裂缝($K' = 0, \mu' = 0$)形成裂缝型干岩石骨架,再进行流体替换形成饱和裂缝型岩石.

2.1.2 各向异性岩石的流体替换

基于岩石是各向同性的假设, Gassmann(1951)研究了岩石的流体替换方法, 同时推导了饱和岩石的模量计算公式. 然而, 当岩石中发育着裂缝时, 该岩石就会表现出较强的各向异性特征, 不符合 Gassmann 流体替换方程的假设条件. 因此本文选用了适用于各向异性岩石的流体替换方程, 实现饱和流体的裂缝型岩石模量的求取.

Mavko 等(2009)在岩石物理手册中介绍了适用于各向异性岩石的流体替换方程, 同时指出该方程可以较好地应用于饱和和裂缝型岩石的模量和速度求取.

$$c_{ijkl}^{\text{sat}} = c_{ijkl}^{\text{dry}} + \frac{(K_0 \delta_{ij} - c_{ijaa}^{\text{dry}}/3)(K_0 \delta_{kl} - c_{ibkl}^{\text{dry}}/3)}{(K_0/K_{fl})\phi(K_0 - K_{fl}) + (K_0 - c_{cddd}^{\text{dry}}/9)}, \quad (3)$$

其中, c_{ijkl}^{dry} 是干岩石的有效弹性刚度系数, c_{ijkl}^{sat} 是饱和流体岩石的有效弹性刚度系数, K_0 为干岩石骨架的

体积模量, K_{fl} 是缝隙流体的体积模量, ϕ 为孔隙度.

本文中岩石物理等效模型构建流程继承了原有模型的矿物平均、添加孔隙、油水混合及各向异性岩石流体替换步骤, 主要改进了裂缝添加步骤, 选取了线性滑移模型进行裂缝添加, 最终实现裂缝岩石物理参数(Δ_N 和 Δ_T)的直接计算, 为后续含裂缝岩石物理参数的方位各向异性弹性阻抗公式的推导和方位各向异性弹性阻抗地震反演提供基础.

2.2 含裂缝岩石物理参数的方位各向异性弹性阻抗公式

在裂缝型岩石物理等效模型构建的基础上, 本文提出含裂缝岩石物理参数 Δ_N 和 Δ_T 的方位各向异性弹性阻抗公式, 为利用地震信息直接预测裂缝岩石物理参数提供了依据. 定向排列的垂直裂缝岩石等效为 HTI 介质, Ruger(1996)提出了 HTI 介质反射系数公式.

$$R_{PP}(\theta, \phi) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} - \left(\frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} + \left[\Delta \delta^{(V)} + 2 \left(\frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \Delta \gamma \right] \cos^2 \phi \right\} \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} + \Delta \epsilon^{(V)} \cos^4 \phi + \Delta \delta^{(V)} \sin^2 \phi \cos^2 \phi \right\} \sin^2 \theta \tan^2 \theta, \quad (4)$$

式中, $G = \rho \beta^2$, $Z = \rho \alpha$, θ 为入射角, ϕ 为方位角, α 、 β 分别为纵、横波速度, ρ 为密度, $\Delta \alpha / \bar{\alpha}$ 是纵反射系数, $\Delta \delta^{(V)}$, $\Delta \epsilon^{(V)}$ 和 $\Delta \gamma$ 为上下两层各向异性参数差值.

从 Ruger 的 HTI 介质反射系数公式出发, 本文推导了含裂缝岩石物理参数的方位各向异性弹性阻抗公式. 已知 $\Delta \delta^{(V)}$, $\Delta \epsilon^{(V)}$, $\Delta \gamma$ 与 Δ_N , Δ_T 之间的关系 (Bakulin 等, 2000):

$$\begin{aligned} \epsilon^{(V)} &= -2g(1-g)\Delta_N, \\ \delta^{(V)} &= -2g[(1-2g)\Delta_N + \Delta_T], \\ \gamma &= \frac{\Delta_T}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

小角度入射情况下, 舍掉密度反射系数项, 就可得到含岩石物理参数的发育定向排列的垂直或近似垂直裂缝岩石的反射系数近似公式.

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, \phi) &= R_{PP}^{\text{iso}}(\theta) + \Delta R_{PP}^{\text{ani}}(\phi, \theta) \\ &= \sec^2 \theta R_P - 8g \sin^2 \theta R_S \\ &\quad - (g \cos^2 \phi \sin^2 \theta)(1-2g)R_{\Delta_N} \\ &\quad + (g \cos^2 \phi \sin^2 \theta)R_{\Delta_T}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{aligned} R_{PP}^{\text{iso}}(\theta) &= \sec^2 \theta R_P - 8g \sin^2 \theta R_S, \\ \Delta R_{PP}^{\text{ani}}(\theta, \phi) &= -(g \cos^2 \phi \sin^2 \theta)(1-2g)R_{\Delta_N} \\ &\quad + (g \cos^2 \phi \sin^2 \theta)R_{\Delta_T}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_P &= \frac{I_{P2} - I_{P1}}{I_{P2} + I_{P1}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta I_P}{I_P}, R_S = \frac{I_{S2} - I_{S1}}{I_{S2} + I_{S1}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta I_S}{I_S}, \\ R_{\Delta_N} &= \Delta_{N2} - \Delta_{N1}, R_{\Delta_T} = \Delta_{T2} - \Delta_{T1}, \Delta_{N1}, \Delta_{N2}, \Delta_{T1}, \Delta_{T2} \end{aligned}$$

分别代表上下层的正向差值和切向差值.

Connolly(1999)关于弹性阻抗的定义是

$$R_{PP} \approx \frac{EI_n - EI_{n-1}}{EI_n + EI_{n-1}} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta EI}{EI}, \quad (7)$$

其中, $n-1$ 和 n 代表上层和下层介质. 对于方位各向异性介质来说, $R_{PP} = R_{PP}(\theta, \phi)$, $EI = EI(\theta, \phi)$.

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta EI}{EI} \approx \frac{1}{2} \left(\sec^2 \theta \frac{\Delta I_P}{I_P} - 8g \sin^2 \theta \frac{\Delta I_S}{I_S} \right) + \Delta R_{PP}^{\text{ani}}(\theta, \phi), \quad (8)$$

相对反射系数 I_P / \bar{I}_P , I_S / \bar{I}_S 和 EI / \bar{EI} 可以用下式来代替:

$$\Delta \ln \left(\frac{x}{x_0} \right) = \frac{\Delta x}{\bar{x}}, \quad (9)$$

其中, x_0 是常数. 在介质具有连续性且界面两侧差异较小的假设下, 公式(9)可用对数的导数形式表示, 即: $\Delta \ln(x/x_0) \rightarrow d \ln(x/x_0)$, $\Delta x \rightarrow dx$, $\bar{x} \rightarrow x$.

公式(8)可以表示为:

$$\begin{aligned} d \ln \left(\frac{EI}{EI_0} \right) &= \sec^2 \theta d \ln \left(\frac{I_P}{I_{P0}} \right) - 8g \sin^2 \theta d \ln \left(\frac{I_S}{I_{S0}} \right) \\ &\quad + 2dR_{PP}^{\text{ani}}(\theta, \phi), \end{aligned} \quad (10)$$

其中, EI_0 , I_{P0} 和 I_{S0} 为入射角为零的弹性阻抗值, 纵

波阻抗和横波阻抗的平均值. 对公式(10)两边取积分:

$$\int d\ln\left(\frac{EI}{EI_0}\right) = \sec^2\theta \int d\ln\left(\frac{I_P}{I_{P0}}\right) - 8g\sin^2\theta \int d\ln\left(\frac{I_S}{I_{S0}}\right) + 2 \int dR_{PP}^{ani}(\theta, \phi), \quad (11)$$

因此方位各向异性弹性阻抗公式为

$$EI(\theta, \phi) = EI^{iso}(\theta) \Delta EI^{ani}(\theta, \phi), \quad (12)$$

其中, $EI^{iso}(\theta) = I_{P0} \left(\frac{I_P}{I_{P0}}\right)^{a(\theta)} \left(\frac{I_S}{I_{S0}}\right)^{b(\theta)}$, $a(\theta) = \sec^2\theta$, $b(\theta) = -8g\sin^2\theta$, 即标准化的各向同性的弹性阻抗. $\Delta EI^{ani}(\theta, \phi) = \exp\left[2 \int dR_{PP}^{ani}(\theta, \phi)\right]$, 即各向异性扰动弹性阻抗.

下面对各向异性弹性阻抗扰动中的 $2 \int dR_{PP}^{ani}(\theta, \phi)$ 的解析式进行分析, 参照介质界面两侧连续性的假设, $R_{\Delta_N} \rightarrow d(\Delta_N)$, $R_{\Delta_T} \rightarrow d(\Delta_T)$.

$$2 \int dR_{PP}^{ani}(\theta, \phi) = 2 \int \left[- (g\cos^2\phi\sin^2\theta)(1-2g)d(\Delta_N) + (g\cos^2\phi\sin^2\theta)d(\Delta_T) \right] \\ = -2(g\cos^2\phi\sin^2\theta)(1-2g)\Delta_N + (2g\cos^2\phi\sin^2\theta)\Delta_T \\ = c(\theta, \phi)\Delta_N + d(\theta, \phi)\Delta_T, \quad (13)$$

其中, $c(\theta, \phi) = -2(g\cos^2\phi\sin^2\theta)(1-2g)$, $d(\theta, \phi) = 2g\cos^2\phi\sin^2\theta$.

最后得到标准化的垂直裂缝发育介质的方位各

向异性弹性阻抗公式(14):

$$EI(\theta, \phi) = I_{P0} \left(\frac{I_P}{I_{P0}}\right)^{a(\theta)} \left(\frac{I_S}{I_{S0}}\right)^{b(\theta)} \exp[c(\theta, \phi)\Delta_N + d(\theta, \phi)\Delta_T], \quad (14)$$

公式(14)与原有方位各向异性弹性阻抗公式(陈怀震等, 2013)的不同在于原有公式旨在研究方位各向异性弹性阻抗与各向异性梯度的关系, 而本公式中引入了裂缝岩石物理参数 (Δ_N 和 Δ_T), 直接建立了方位各向异性弹性阻抗与裂缝岩石物理参数的关系, 为后续基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数反演提供理论支撑.

2.3 基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数反演

裂缝岩石物理参数的方位各向异性弹性阻抗反演主要包括方位各向异性弹性阻抗的反演和裂缝岩石物理参数的提取. 已知不同方位角度的部分角度叠加地震数据体, 从中反演得到不同方位角度的方位各向异性弹性阻抗, 以测井数据和岩石物理预测结果为约束, 最终提取裂缝岩石物理参数. 具体流程如图 2 所示.

对标准化的方位各向异性弹性阻抗公式(14)两边取对数, 可以得到线性化的方位各向异性弹性阻抗表达式, 能够用来求取裂缝岩石物理参数 Δ_N 和 Δ_T , 式(15)为不同方位的大中小角度叠加道集表达式:

$$\ln\left[\frac{EI(\theta_1, \phi_1)}{I_{P0}}\right] = a(\theta_1)\ln\left(\frac{I_P}{I_{P0}}\right) + b(\theta_1)\ln\left(\frac{I_S}{I_{S0}}\right) + c(\theta_1, \phi_1)\Delta_N + d(\theta_1, \phi_1)\Delta_T, \\ \ln\left[\frac{EI(\theta_2, \phi_2)}{I_{P0}}\right] = a(\theta_2)\ln\left(\frac{I_P}{I_{P0}}\right) + b(\theta_2)\ln\left(\frac{I_S}{I_{S0}}\right) + c(\theta_2, \phi_2)\Delta_N + d(\theta_2, \phi_2)\Delta_T, \\ \ln\left[\frac{EI(\theta_3, \phi_3)}{I_{P0}}\right] = a(\theta_3)\ln\left(\frac{I_P}{I_{P0}}\right) + b(\theta_3)\ln\left(\frac{I_S}{I_{S0}}\right) + c(\theta_3, \phi_3)\Delta_N + d(\theta_3, \phi_3)\Delta_T. \quad (15)$$

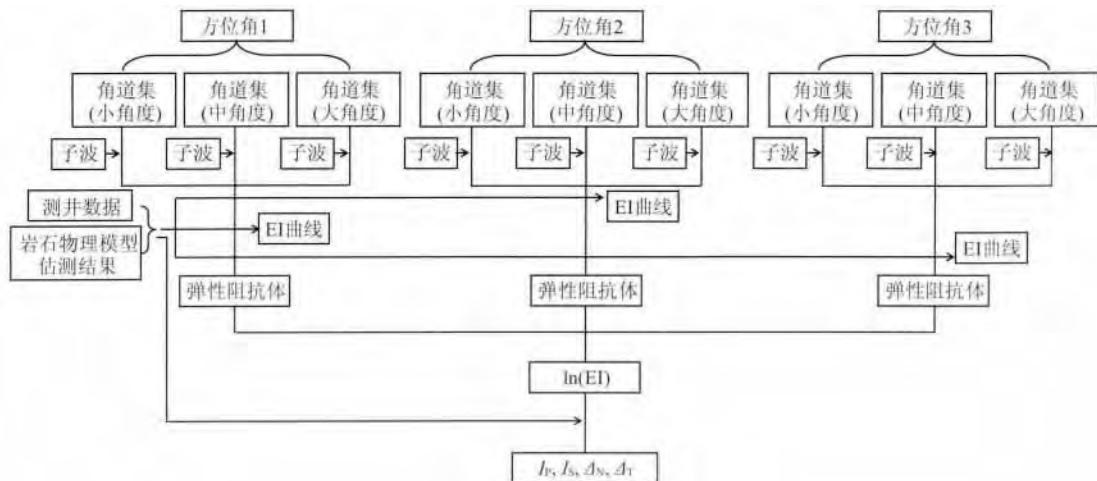


图 2 裂缝岩石物理参数方位各向异性弹性阻抗反演流程

Fig. 2 Fracture rock physics parameters estimation using azimuth anisotropic elastic impedance

通过测井数据和岩石物理估测结果可以计算出 $a(\theta), b(\theta), c(\theta, \phi), d(\theta, \phi), I_{P0}$ 和 I_{S0} , 将不同方位角提取的大中小角度弹性阻抗代入式(15), 即可求得 I_P, I_S, Δ_N 和 Δ_T .

3 数值分析

3.1 基于岩石物理等效模型的裂缝岩石物理参数预测

选取我国某碳酸盐岩工区过裂缝储层的 A 井数据进行裂缝型岩石物理等效模型的验证, 估算裂缝岩石物理参数, 为后续的方位各向异性弹性阻抗反演提供初始模型约束. 图 3 为测井解释结果, 分别是声波时差曲线(AC), 密度曲线(D_{en}), 孔隙度曲线(P_{or}), 泥质含量曲线(V_{sh})及含水饱和度曲线(S_w). 图 4 为从测井数据上利用岩石物理等效模型估测的裂缝岩石物理参数.

对比图 3 和图 4 可以看出, 裂缝岩石物理参数与测井解释信息的变化趋势具有一定的相关性, 而

且通过分析裂缝岩石物理参数的数值变化可以从测井数据上识别裂缝发育位置.

3.2 裂缝层方位各向异性弹性阻抗特征分析

选取 A 井的岩石物理估测结果, 计算裂缝层、上覆层及下伏层的方位各向异性弹性阻抗, 同时求取裂缝层上下界面的反射系数, 分析裂缝层的方位各向异性弹性阻抗和反射系数变化特征(模型参数见表 1).

从图 5 可以看出, 裂缝上覆层和下伏层方位各向异性弹性阻抗随入射角变化明显, 随方位角变化不明显, 而裂缝层段的方位各向异性弹性阻抗随入

表 1 裂缝发育层段弹性参数和裂缝岩石物理参数

Table 1 Elastic and fracture rock physics parameters of the fractured layer

	$\alpha / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\beta / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Δ_N	Δ_T
上覆层	5505.3	3009	2690	0.005	0.023
裂缝层	5386.5	2851	2595	0.18	0.5763
下伏层	5508.1	3055	2667	0.003	0.009

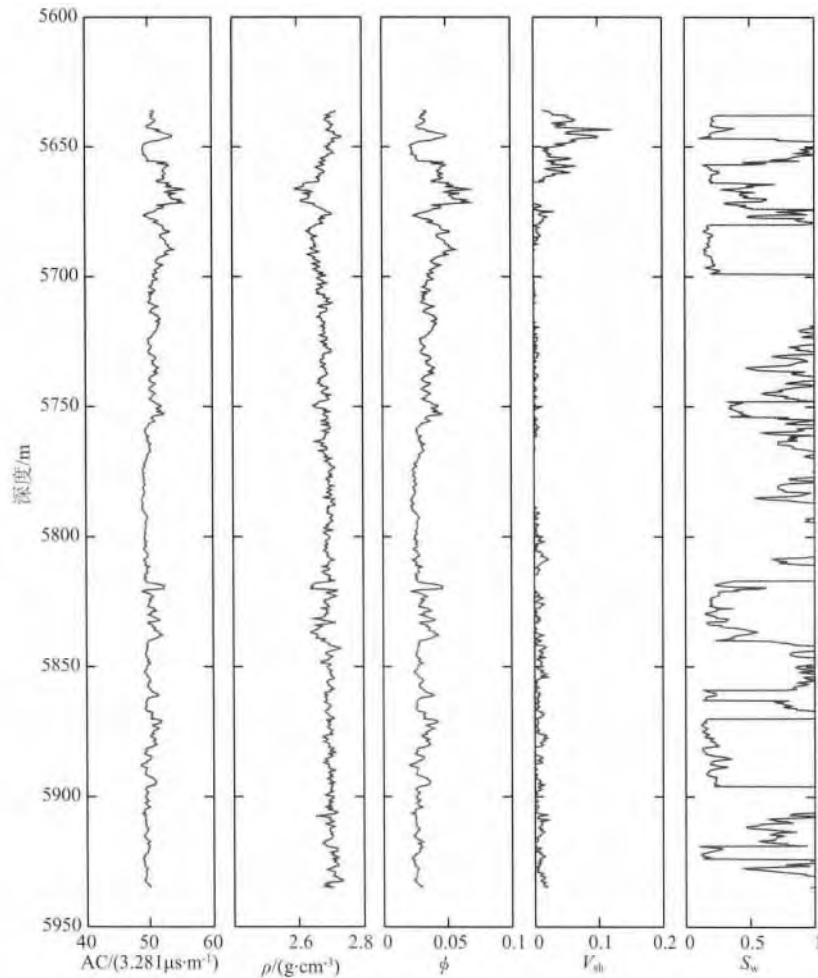


图 3 A 井测井解释结果

Fig. 3 Log interpretation results of well A

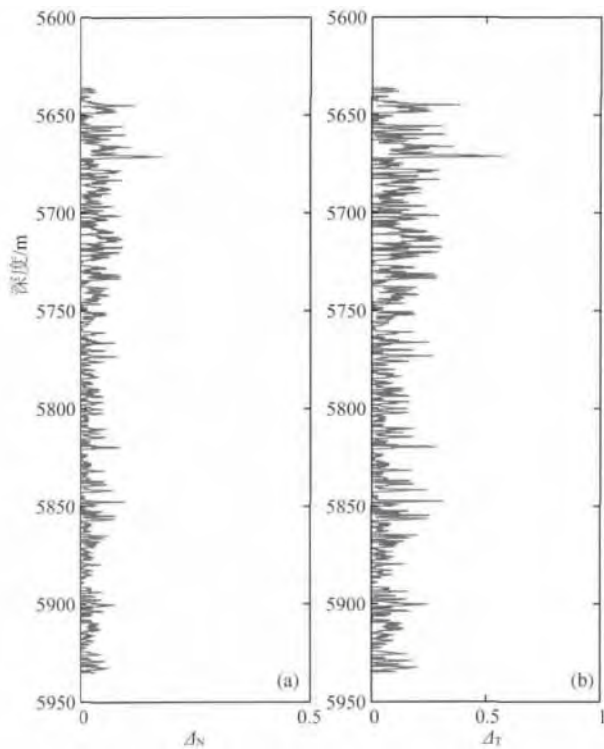


图 4 A 井裂缝岩石物理参数估测结果
Fig. 4 Fracture rock physics parameters estimation results of well A

射角和方位角均有明显变化,而且入射角越大,其随方位角变化越明显.图 6 表明,裂缝发育层段上下界面的反射系数随入射角和方位角均有变化,即表现出明显 AVAZ(Amplitude versus with incident and azimuthal angle)特征,这就为利用不同方位地震数据进行裂缝层预测提供了理论依据.

3.3 基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数提取

对裂缝发育的碳酸盐岩工区进行方位各向异性弹性阻抗反演,提取目的层段的纵横波阻抗及裂缝岩石物理参数,分析裂缝发育储层的特征,为裂缝储层的勘探提供理论依据.不同的方位的大中小角度叠加道集如图 7 所示,图 8 为反演得到的不同方位的大中小角度弹性阻抗.

将图 8 中所有的弹性阻抗体取对数,按照公式(15)求得目的层的 I_P, I_S, Δ_N 和 Δ_T ,进而识别裂缝储层,分析裂缝储层特征.

图 9 为基于方位各向异性弹性阻抗直接反演的纵横波阻抗和裂缝岩石物理参数,反演结果与测井数据对应较好,验证了反演算法的有效性.而且从纵横波阻抗和裂缝岩石物理参数剖面上可以看出,裂

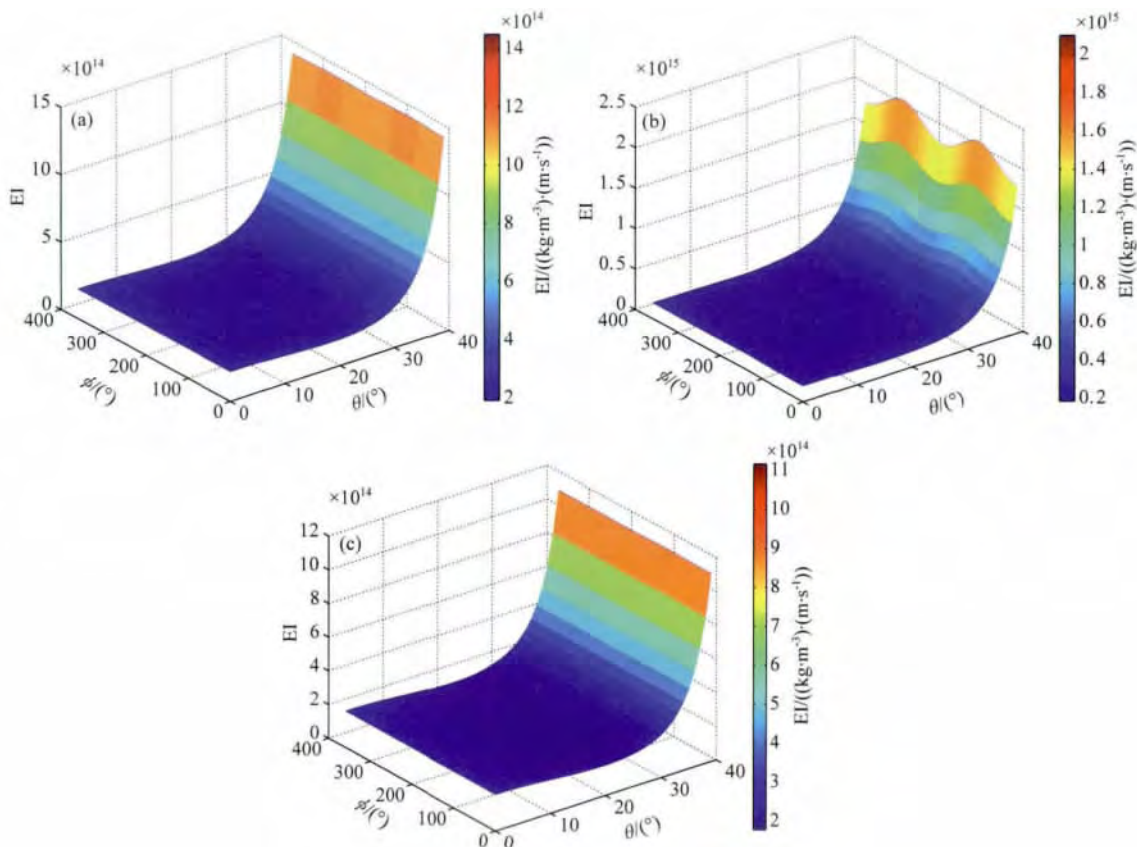


图 5 方位各向异性弹性阻抗随入射角和方位角变化特征
(a) 上覆层; (b) 裂缝层; (c) 下伏层.

Fig. 5 Azimuthal elastic impedance with incidence and azimuth angle

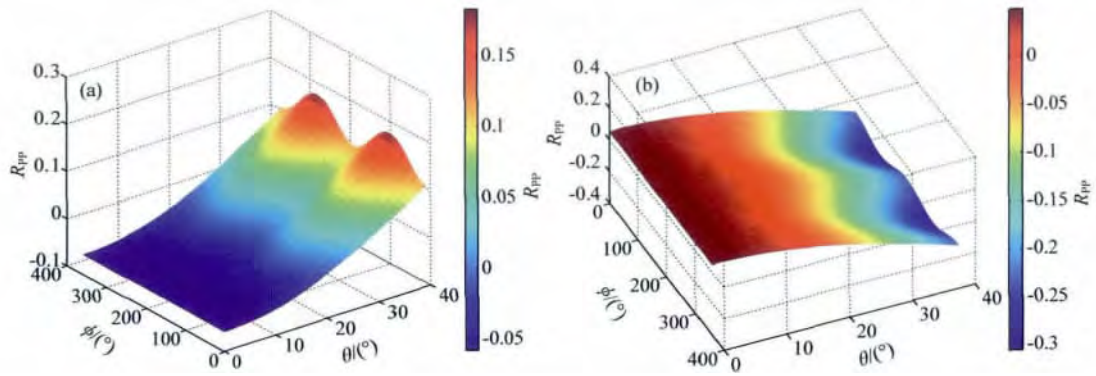


图6 利用方位各向异性弹性阻抗计算裂缝层反射系数随入射角和方位角变化特征
(a) 裂缝层上界面; (b) 裂缝层下界面。

Fig. 6 Reflection coefficient variation with incidence and azimuth angle

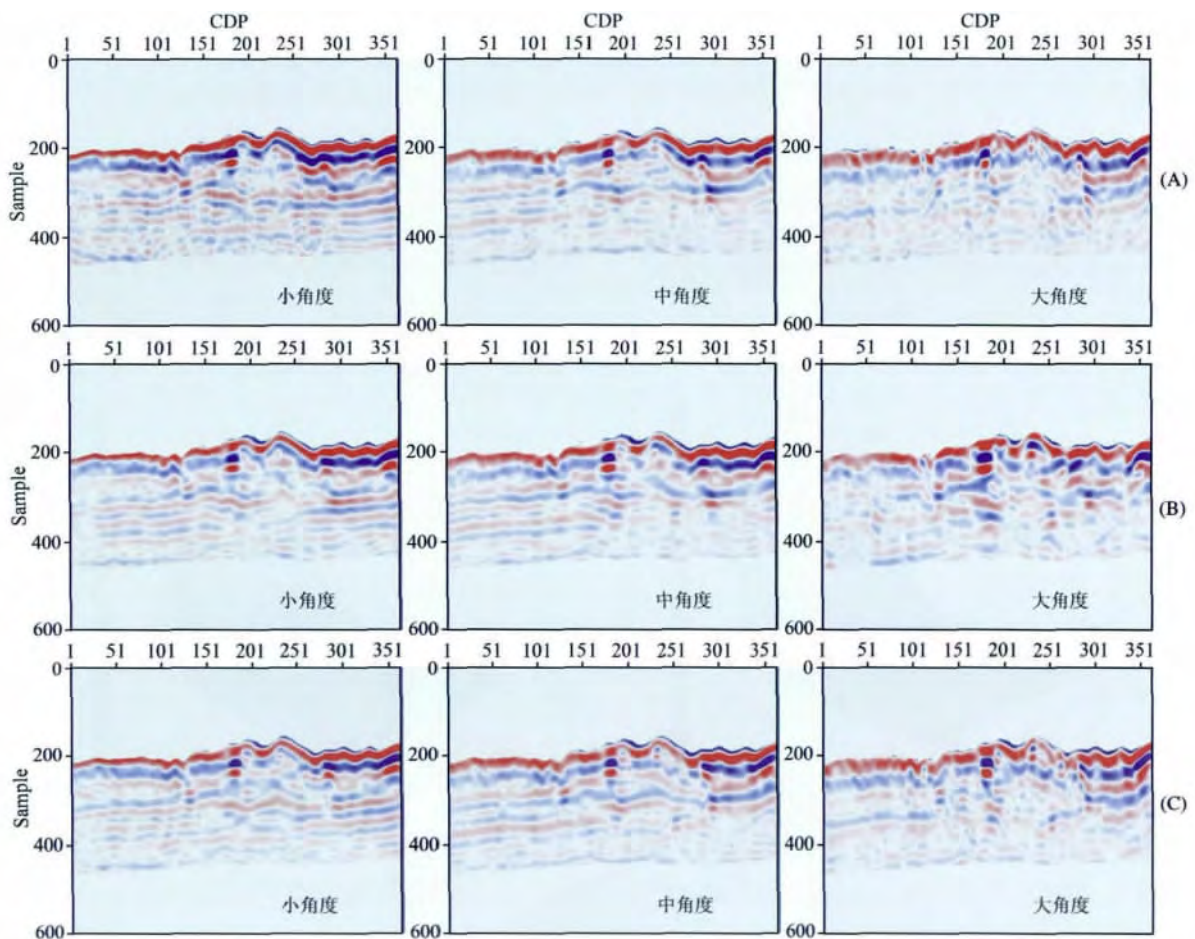


图7 不同方位的角度叠加道集

(A) 方位1; (B) 方位2; (C) 方位3.

Fig. 7 Angle stack gathers of different azimuthal angles

缝发育层段纵横波阻抗(I_P 和 I_S)表现为低值, 裂缝岩石物理参数(Δ_N 和 Δ_T)为高值。

4 结论

本文主要研究了基于方位各向异性弹性阻抗的

裂缝岩石物理参数直接反演方法, 首先通过构建裂缝岩石物理模型通过测井数据实现裂缝储层的纵横波速度和各向异性岩石物理参数估测; 其次通过推导方位各向异性弹性阻抗公式, 探索了利用不同方位叠加地震道集反演方位各向异性弹性阻抗的方法; 最终, 从反演的方位各向异性弹性阻抗数据体中

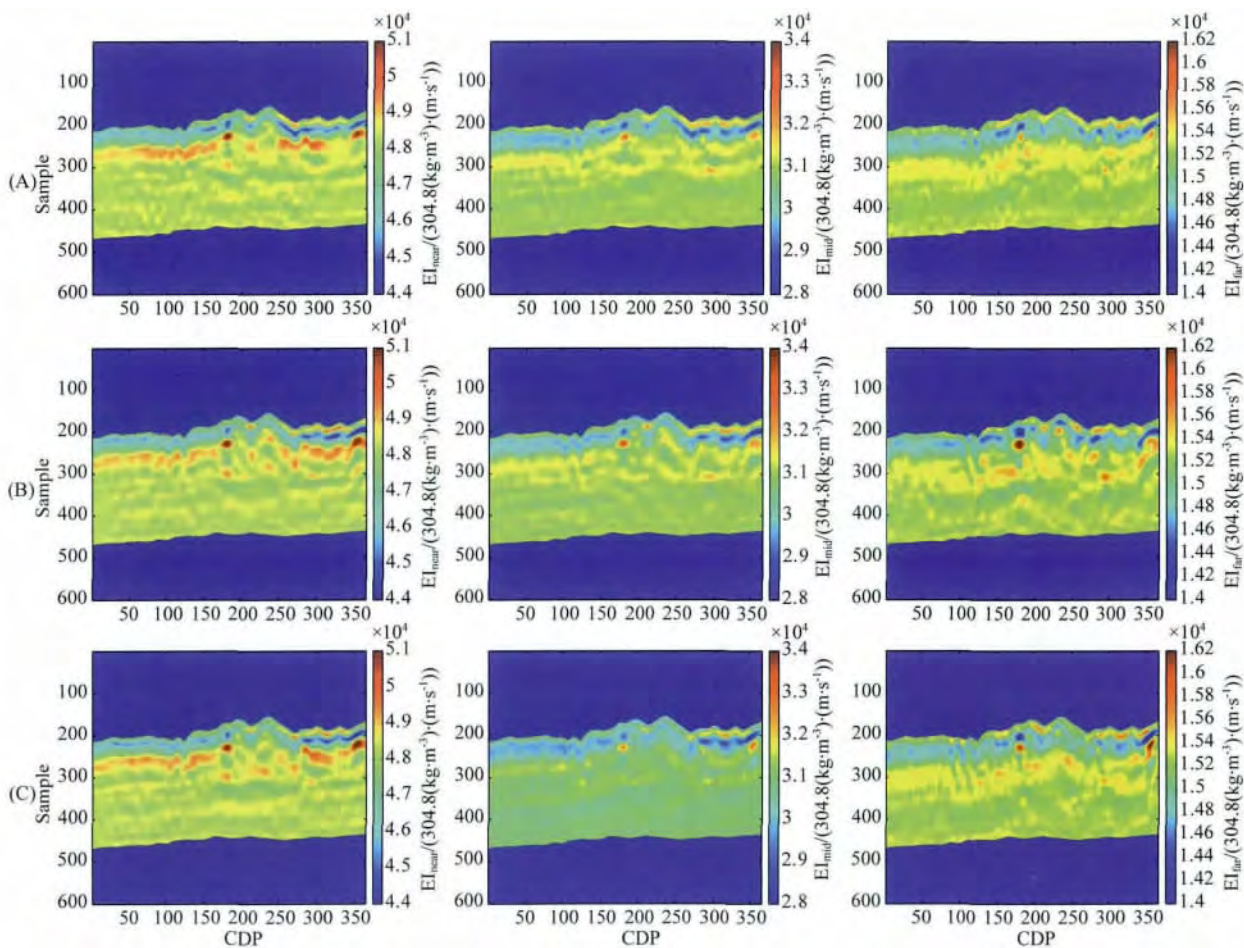


图 8 不同方位的不同角度的弹性阻抗

(A) 方位 1; (B) 方位 2; (C) 方位 3.

Fig. 8 Elastic impedance of different azimuthal angles

提取裂缝储层的纵横波阻抗和裂缝岩石物理参数,为地下裂缝储层预测提供可靠的地球物理资料.选取了某裂缝型碳酸盐岩工区测井数据和宽方位部分叠加地震数据对所构建的裂缝型岩石物理等效模型和基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数反演方法进行了验证.结果表明,本文构建的岩石物理等效模型可以有效地估测裂缝储层的纵横波速度及裂缝岩石物理参数,指导地下裂缝位置的识别.同时,基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝储层地震反演结果表明,推导的方位各向异性弹性阻抗公式合理可靠,且提取的裂缝储层纵横波阻抗和岩石物理参数与测井结果吻合较好,验证了反演方法可靠性.

本文综合利用测井、岩石物理及不同方位地震数据,依靠岩石物理模型和方位各向异性弹性阻抗反演方法实现裂缝储层弹性参数和岩石物理参数的预测,对地下裂缝储层的刻画具有重要意义.综上,可以得到结论及后续研究工作安排如下:

(1)实际方位各向异性弹性阻抗数据体反演过

程中,需要初始模型的约束.而利用构建的裂缝型岩石物理模型可较准确地估测出裂缝岩石物理参数,依照方位弹性阻抗公式即可获得方位弹性阻抗反演所需的初始模型.

(2)实际工区数据验证表明,利用本文方法可以从方位各向异性弹性阻抗数据体中得到裂缝层纵横波阻抗和裂缝岩石物理参数,且反演结果与测井值对应较好,进而说明在实际工区中利用该方法可以较为可靠地预测地下裂缝.

(3)研究表明,裂缝岩石物理参数和裂缝参数(裂缝密度、缝隙充填物及裂缝高宽比)之间具有密切关系.本文研究的后续工作为利用反演得到的纵横波阻抗及裂缝岩石物理参数预测裂缝密度,识别缝隙充填物类型,为更加精细的裂缝储层描述提供理论依据.同时,由于单纯依靠方位纵波数据预测裂缝储层具有一定的局限,后续拟开展利用纵波和转换波地震资料联合反演方法研究,进而达到地下裂缝储层位置可靠预测的目的.

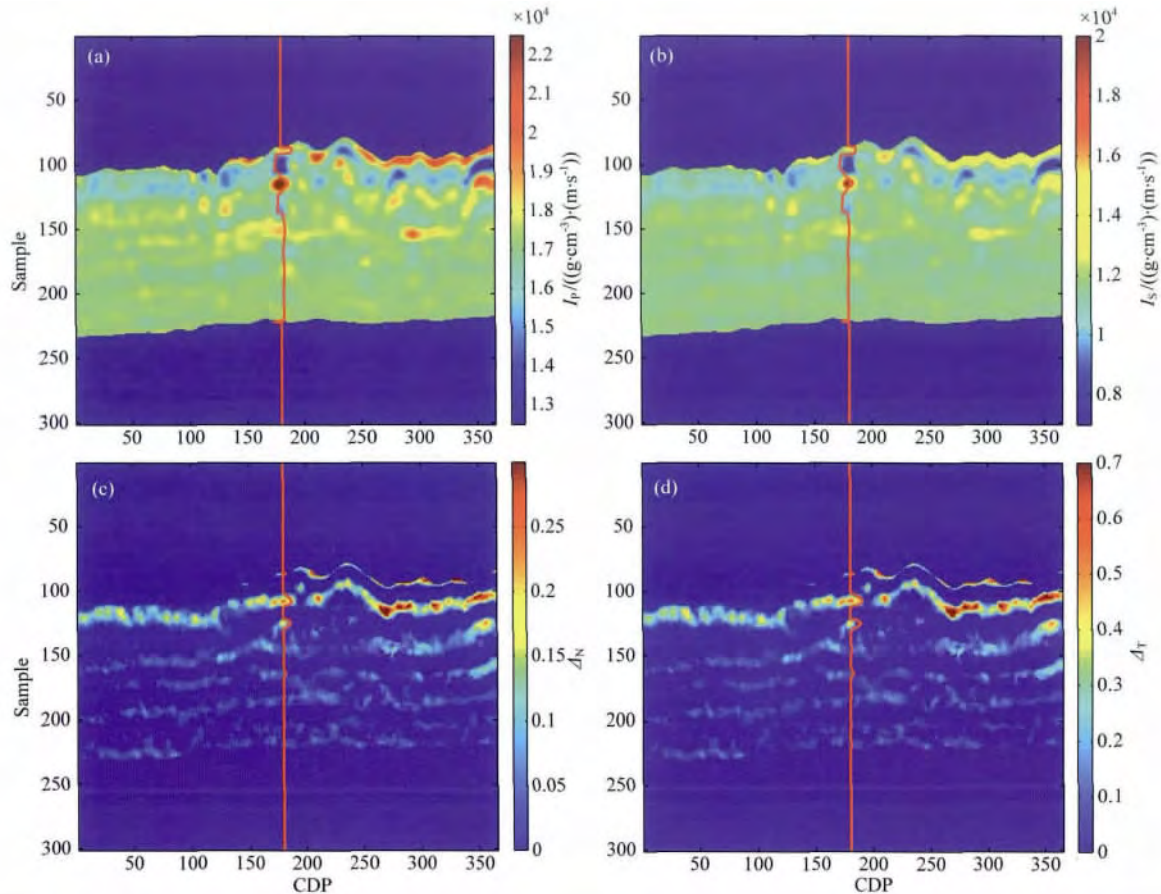


图 9 基于方位各向异性弹性阻抗提取的弹性参数和裂缝岩石物理参数

(a) I_P ; (b) I_S ; (c) ΔN ; (d) ΔT .

Fig. 9 Elastic and fracture rock physics parameters results estimated by using azimuthal elastic impedance

References

- Baku lin A, Grechka V, Tsvankin I. 2000. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part I: HTI model due to a single fracture set. *Geophysics*, 65(6): 1788-1802.
- Chen H Z, Yin X Y, Du B Y, et al. 2013. Azimuth anisotropic elastic impedance inversion in fractured layered carbonate rock reservoir. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 28(6): 3073-3079.
- Chen H Z, Yin X Y, Gao C G, et al. 2014. AVAZ inversion for fluid factor based on fracture anisotropic rock physics theory. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(3): 968-978.
- Connolly P. 1999. Elastic impedance. *The Leading Edge*, 18(4): 438-452.
- Gassmann F. 1951. Über die elastizität poröser medien. *Vier der Natur Gesellschaft in Zurich*, 96: 1-23.
- Hudson J A. 1980. Overall properties of a cracked solid. *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 88(2): 371-384.
- Kong L Y, Wang Y B, Yang H Z. 2012. Fracture parameters analyses in fracture-induced HTI double-porosity medium. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(1): 189-196.
- Li A S, Yin X Y, Zhang F C, et al. 2009. Elastic impedance in VTI media and parameter extraction. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(6): 1878-1885.
- Liu E R, Martinez A. 2012. Seismic fracture characterization. Netherlands: EAGE Publication.
- Martins J L. 2006. Elastic impedance in weakly anisotropic media. *Geophysics*, 71(3): D73-D83.
- Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. 2009. *The Rock Physics Handbook*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rüger A. 1996. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media. Doctoral Dissertation. USA: Colorado School of Mines.
- Schoenberg M. 1983. Reflection of elastic waves from periodically stratified media with interfacial slip. *Geophysical Prospecting*, 31(2): 265-292.
- Thomsen L. 1986. Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 51(10): 1954-1966.
- Wang B L, Yin X Y, Zhang F C. 2005. Elastic impedance inversion and its application. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 20(1): 89-92.
- Wang B L, Yin X Y, Zhang F C, et al. 2008. Elastic impedance equation based on Fatti approximation and inversion. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(1): 192-197.

- Yin X Y, Zhang S X, Zhang F. 2013. Two-term elastic impedance inversion and Russell fluid factor direct estimation method for deep reservoir fluid identification. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(7): 2378-2390.
- Zhang G Z, Wang D Y, Yin X Y, et al. 2011. Study on prestack seismic inversion using Markov Chain Monte Carlo. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(11): 2926-2932.
- Zhang G Z, Chen H Z, Wang Q, et al. 2013. Estimation of S-wave velocity and anisotropic parameters using fractured carbonate rock physics model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(5): 1707-1715.
- Zong Z Y, Yin X Y, Wu G C. 2012. Fluid identification method based on compressional and shear modulus direct inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(1): 284-292.
- 陈怀震, 印兴耀, 杜炳毅等. 2013. 裂缝型碳酸盐岩储层方位各向异性弹性阻抗反演. *地球物理学进展*, 28(6): 3073-3079.
- 陈怀震, 印兴耀, 高成国等. 2014. 基于各向异性岩石物理的缝隙流体因子 AVAZ 反演. *地球物理学报*, 57(3): 968-978.
- 孔丽云, 王一博, 杨慧珠. 2012. 裂缝诱导 HTI 双孔隙介质中的裂缝参数分析. *地球物理学报*, 55(1): 189-196.
- 李爱山, 印兴耀, 张繁昌等. 2009. VTI 介质中的弹性阻抗与参数提取. *地球物理学进展*, 23(6): 1878-1885.
- 王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 2005. 弹性阻抗反演及应用研究. *地球物理学进展*, 20(1): 89-92.
- 王保丽, 印兴耀, 张繁昌等. 2008. 基于 Fatti 近似的弹性阻抗方程及反演. *地球物理学进展*, 23(1): 192-197.
- 印兴耀, 张世鑫, 张峰. 2013. 针对深层流体识别的两项弹性阻抗反演与 Russell 流体因子直接估算方法研究. *地球物理学报*, 56(7): 2378-2390.
- 张广智, 王丹阳, 印兴耀等. 2011. 基于 MCMC 的叠前地震反演方法研究. *地球物理学报*, 54(11): 2926-2932.
- 张广智, 陈怀震, 王琪等. 2013. 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. *地球物理学报*, 56(5): 1707-1715.
- 宗兆云, 印兴耀, 吴国忱. 2012. 基于叠前地震纵横波模量直接反演的流体检测方法. *地球物理学报*, 55(1): 284-292.

(本文编辑 汪海英)