中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 5 期: 589 ~ 600
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

基于等效各向异性和流体替换的地下裂缝地震预测方法

陈怀震[①], 印兴耀[①], 高建虎[②], 刘炳杨[②], 张广智[①*]

① 中国石油大学地球科学与技术学院, 青岛 266580;
② 中国石油勘探开发研究院西北分院, 兰州 730020
*联系人, E-mail: zhanggz@upc.edu.cn

收稿日期: 2014-07-16; 接受日期: 2014-10-23; 网络版发表日期: 2015-04-22
国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2013CB228604, 2014CB239201)、国家科技重大专项项目(编号: 2011ZX05014-001-010HZ)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 14CX06015A)资助

摘要 地下裂缝是油气聚集和运移的重要通道, 而裂缝岩石物理是裂缝参数与地震响应之间联系的桥梁. 从裂缝岩石物理出发, 探索利用地震数据预测地下裂缝的方法. 首先通过构建裂缝岩石物理等效模型, 弥补测井横波的缺失, 并且实现裂缝岩石物理参数的预测; 然后推导了裂缝岩石物理参数与地震响应之间的近似关系式, 同时探索裂缝岩石弹性参数和岩石物理参数的地震直接反演方法; 最后分别利用测井数据和实际工区地震数据对裂缝岩石物理等效模型的可靠性以及裂缝岩石物理参数直接反演方法的精度进行了验证. 结果表明, 构建的裂缝岩石物理等效模型可以实现裂缝岩石纵横波速度及岩石物理参数的可靠估测, 而且裂缝岩石物理参数地震直接反演方法具有较高的抗噪性, 在实际目标工区弹性参数和裂缝岩石物理参数的估算中具有较好的应用结果.

关键词
岩石物理
裂缝
地震反演
各向异性

地下裂缝系统是碳酸盐岩储层和非常规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. 研究表明, 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和Martinez, 2012). 同时, 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. 因此, 本文旨在基于裂缝岩石物理, 选取能够用来识别地下裂缝的岩石物理参数, 利用宽方位地震信息, 实现地下裂缝的可靠预测. 开展裂缝岩石物理参数地震反演方法研究, 可以直接获得与裂缝参数(裂缝密度、缝隙充填物)有关的岩石物理参数, 避免了由弹性参数向岩石物理参数转换过程中引起的误差.

关于裂缝岩石物理方面, 地球物理学家们做了大量研究. 目前常用的裂缝系统岩石物理等效模型有Hudson(1981)的微小裂隙模型和Schoenberg(1980)的裂缝线性滑动模型. 这两种等效模型的区分在于缝隙尺度不同, 微小裂隙模型假定岩石中包含薄硬币形状的椭球缝隙, 假定界面两侧位移连续, 然而线性滑动模型假定具有粗糙表面的滑动裂缝, 其裂缝面两侧位移不连续. 一些学者对Hudson模型和Schoenberg模型进行了推广, Cheng(1978, 1993)基于

中文引用格式: 陈怀震, 印兴耀, 高建虎, 等. 2015. 基于等效各向异性和流体替换的地下裂缝地震预测方法. 中国科学: 地球科学, 45: 589–600
英文引用格式: Chen H Z, Yin X Y, Gao J H, et al. 2015. Seismic inversion for underground fractures detection based on effective anisotropy and fluid substitution. Science China: Earth Sciences, 58: 805−814, doi: 10.1007/s11430-014-5022-1

含有椭球包含物的各向同性固体矿物内部应变的静态解的研究, 推导了有缝隙的各向异性介质等效模型, 改善了Hudson模型中缝隙高宽比要求过于理想的假设. Schoenberg等(1989)详细研究了成层状的各向异性等效模型, 将含有平行裂缝或定向排列微裂隙的岩石等效为一组各向异性介质, 在长波长限制条件下, 研究弹性波通过滑动裂缝界面的响应特征. 同时, Schoenberg等(1995)分析了地下实际裂缝对地震传播特征的影响, 并指出裂缝岩石的地震响应可以等效为两部分综合作用的结果, 分别为无裂缝的各向同性岩石背景部分和由平行或定向排列裂缝所引起的各向异性扰动部分. Schoenberg等(1997)将发育垂直裂缝的水平层状介质等效为正交介质, 并模拟了地震波在正交介质等效模型中的传播特征. 另一方面, 常用的孔隙流体对地震波传播影响研究可主要划分为两个方面, 以Biot理论(Biot, 1956a, 1956b)为代表的孔隙弹性波动理论和以Gassmann方程(Gassmann, 1951)为基础的流体替换方法, 前者研究了速度和频率的关系, 后者主要讨论地震频率范围内孔隙流体变化的影响. 然而, 如果孔隙之间通过裂缝连通, 当地震波穿过岩石时就会引起孔隙流体通过裂缝流动, 引起地震波能量的转换和衰减. Batzle等(1999, 2006)研究了流体运动及频率对岩石纵横波速度的影响, 分别考虑不同饱和度及岩石微观机制时速度及品质因子随频率的变化特征. Chapman(2009)模拟了多孔岩石中含有多组中观尺度裂缝时对岩石频率依赖的各向异性特征的影响, 分析了包含张开裂缝和闭合裂缝的岩石速度随方位角的变化规律. Quintal等(2010a, 2010b, 2011)分别研究了部分饱和流体岩石中由于流体流动对地震衰减的影响以及流体饱和度对反射系数的影响, 同时Quintal等(2012)分析了由于波动引起的流体流动对横波衰减的影响. 唐晓明(2011)将Biot理论进行了推广, 提出了含孔隙、裂隙介质弹性波动统一理论, 既分析了裂隙对介质本身的影响, 而且考虑了由于挤喷效应导致的弹性波衰减和频散. 地震频带范围约为几十到上百赫兹, 在此范围内, 固液之间粘滞耦合力非常大, 地震波衰减很小, 且孔隙之间挤喷作用主要发生在高频段, 因此这些因素的影响均可以忽略. 本文致力于构建适用于地震频带范围的岩石物理等效模型, 并考虑由于裂缝存在引起的地震各向异性, 选取各向异性岩石流体替换方程, 研究裂缝对流体替换的影响. Brown等(1975)从Gassmann方程出发, 研究了当各向异性岩石的骨架由各向异性矿物组成时流体替换方程. 通过构建裂缝岩石物理等效模型, 综合考虑矿物基质、孔隙-裂缝及各向异性岩石中流体替换的影响, 从测井数据上估测纵横波速度以及裂缝岩石物理参数, 不仅可以弥补横波速度测井数据的缺失, 而且对比速度和裂缝岩石物理参数的变化特征, 可以直接从测井数据上识别裂缝位置, 为后续地震反演结果验证提供依据.

近年来, 随着宽方位地震采集和处理的发展, 使得利用地震信息预测地下裂缝成为研究的热点. 当地下岩石发育着大量定向排列的垂直或者近似垂直的裂缝时, 该岩石可以等效为具有水平对称轴的横向各向同性介质(HTI, Horizontal Transverse Isotropic). 为了研究各向异性对地震波传播特征的影响, Thomsen(1986)提出了弱各向异性的理论, 提出了用来表征各向异性影响的参数. Schoenberg等(1992)用拟Zoeppritz公式系数矩阵的子矩阵计算了平面波反射系数精确解. Ruger(1996, 1997, 1998)对各向异性介质反射特征进行了研究, 推导出HTI介质反射系数近似方程. 研究表明, 振幅随偏移距变化(AVO/AVA, Amplitude Variation With Offset/Angle)特征分析已经成为油气储层预测的重要手段. 由HTI介质反射系数公式研究可以看出, 地震波在含垂直裂缝介质中传播时, 其反射振幅不仅随偏移距变化而且随测线接收方位变化(即AVOZ, AVAZ或者AVOAZ, Amplitude Variation With Offset/Angle And Azimuth). 因此, 利用方位地震数据预测地下裂缝是行之有效的. Mallick等(1998)率先利用AVOZ数据进行裂缝介质弹性参数反演. Bachrach等(2009)提出通过对裂缝储层的弹性参数和各向异性参数进行重构, 完成裂缝储层弹性参数和裂缝参数的地震叠前反演. Downton等(2006)对方位角道集预测裂缝的不确定性进行了分析. 国内大量地球物理工作者对碳酸盐岩缝洞储层预测及特征描述做了大量研究. 唐文榜等(2002)研究了溶洞充填物判别的频率差异分析技术, 并利用塔河油田数据进行了方法应用. 姚姚等(2003, 2012)分别研究了深层碳酸盐岩岩溶风化壳洞缝型油气藏检测的方法以及溶洞型储层数值模拟波场分析与识别方法, 提供了缝洞型储层的识别和检测的新

方法和新认识. 撒利明等(2011)研究了缝洞型储层的地震响应特征与识别方法, 并通过模型和实际数据分析实现了地下溶洞特征描述. 然而, 当前关于利用方位地震数据直接估测裂缝岩石物理参数的研究较少, 通过推导地震反射系数与裂缝岩石物理参数的公式, 开展裂缝岩石物理参数地震直接反演方法研究, 避免了原有的弹性参数地震反演结果向岩石物理参数转换的误差, 而且综合利用岩石物理模型、测井及方位地震数据大大提高了地下裂缝预测的精度.

本文中, 我们提出了一种利用方位地震信息实现地下裂缝可靠预测的方法, 即从岩石物理等效模型构建出发, 估测裂缝岩石的速度和岩石物理参数, 将其作为初始模型约束, 选择过井线叠前方位角度地震道集反演得到裂缝弹性参数和岩石物理参数剖面. 该方法既能从测井数据上获得地层各向异性特征的强弱, 而且通过地震反演得到的裂缝岩石物理参数剖面可以描述目标工区裂缝发育展布, 在碳酸盐岩储层和非常规储层的勘探和开发中具有更为广泛的应用前景.

1　裂缝型岩石物理模型构建及裂缝岩石物理参数敏感性分析

当裂缝尺度远小于地震波长时, 地震波在各向异性岩石中的传播的旅行时及反射振幅都会表现出各向异性特征, 可以利用等效介质理论分析裂缝对地震波场的影响(Liu和Martinez, 2012). 通过构建裂缝型岩石物理模型, 计算裂缝岩石的刚度系数矩阵, 进而估算裂缝型岩石的速度及岩石物理参数.

1.1　裂缝型岩石物理模型的构建

裂缝型岩石物理模型的构建主要包括矿物平均、裂缝干岩石骨架的形成以及各向异性岩石的流体替换. 文中以裂缝型碳酸盐岩为例, 研究裂缝型碳酸盐岩岩石物理等效模型的构建(图1). 岩石物理模型构建步骤解析如下:

第(1)步: 利用Voigt-Reuss-Hill平均(Hill, 1952)计算方解石、白云石和泥质混合的弹性模量.

Voigt-Reuss-Hill平均计算公式为

$$M_{\mathrm{VRH}}=\frac{M_V+M_R}{2}, \tag{1}$$

式中, $M_V=\sum_{i=1}^{N}f_iM_i$, $\frac{1}{M_R}=\sum_{i=1}^{N}\frac{f_i}{M_i}$, M_{VRH}, M_V和M_R可以是任何模量, 如体积模量、剪切模量或杨氏模量等, f_i是第i个组分的体积分量, M_i是第i个组分的弹性模量.

第(2)步: 利用DEM模型(Zimmerman, 1991)计算各向同性干岩石骨架.

利用DEM计算干岩石骨架等效体积模量K^*和剪切模量μ^*的耦合的微分方程组可以表示为

$$(1-y)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}y}[K^*(y)]=(K_2-K^*)P^{(*2)}(y), \tag{2a}$$

$$(1-y)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}y}[\mu^*(y)]=(\mu_2-\mu^*)Q^{(*2)}(y). \tag{2b}$$

初始条件是$K^*(0)=K_1$, $\mu^*(0)=\mu_1$. 其中, K_1和μ_1是主相的体积和剪切模量, K_2和μ_2是逐步加入的包含物的体积和剪切模量, y是包含物的含量, 项P和Q是包含物的几何因数.

第(3)步: 利用Schoenberg裂缝模型计算裂缝型干岩石速度和裂缝岩石物理参数(正向差值Δ_{N}, 切向差值Δ_{T}).

已知裂缝岩石的刚度系数矩阵$\boldsymbol{C}$定义如式(3)所示(Bakulin等, 2000):

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}
(\lambda+2\mu)(1-\Delta_{\mathrm{N}}) & \lambda(1-\Delta_{\mathrm{N}}) & \lambda(1-\Delta_{\mathrm{N}}) & 0 & 0 & 0\\
\lambda(1-\Delta_{\mathrm{N}}) & (\lambda+2\mu)\left(1-\left(\frac{\lambda}{\lambda+2\mu}\right)^2\Delta_{\mathrm{N}}\right) & \lambda\left(1-\frac{\lambda}{\lambda+2\mu}\Delta_{\mathrm{N}}\right) & 0 & 0 & 0\\
\lambda(1-\Delta_{\mathrm{N}}) & \lambda\left(1-\frac{\lambda}{\lambda+2\mu}\Delta_{\mathrm{N}}\right) & (\lambda+2\mu)\left(1-\left(\frac{\lambda}{\lambda+2\mu}\right)^2\Delta_{\mathrm{N}}\right) & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1-\Delta_{\mathrm{T}}) & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1-\Delta_{\mathrm{T}})
\end{bmatrix}, \tag{3}$$

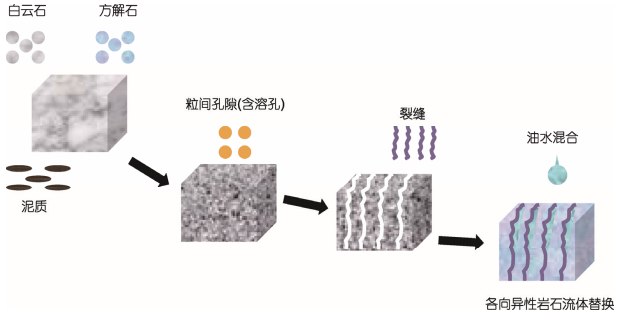


图 1　裂缝型碳酸盐岩岩石物理等效模型构建流程

式中, λ和μ是不含裂隙岩石的拉梅参数, Δ_N为正向差值, 表示垂直裂缝面上裂缝对地震波的影响, Δ_T为切向差值, 表示平行于裂缝面上裂缝对地震波的影响, 两者数值变化范围均为0~1.

大量研究指出, 当裂缝面比较平缓, 且缝隙中充填物的体积模量和剪切模量较小时, Hudson裂隙模型和Schoenberg裂缝模型具有一定的等价关系(Bakulin等, 2000). 基于此, 我们研究了裂缝岩石物理参数Δ_N和Δ_T与裂缝密度及缝隙充填物之间的关系:

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

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

式中, e是裂缝密度, K'和μ'分别是缝隙充填物的体积模量和剪切模量, α为裂缝高宽比, $g=\mu/(\lambda+2\mu)$. 在向干岩石骨架中添加裂缝时, 应先假设$K'=0$, $\mu'=0$, 然后利用各向异性岩石的流体替换方程实现饱和岩石弹性参数和裂缝岩石物理参数的求取.

第(4)步: 利用Wood公式(1955)求解混合流体的模量和密度, 公式如下:

$$\frac{1}{K_R}=\sum_{i=1}^{N}\frac{f_i}{K_i}, \tag{5a}$$

$$\rho=\sum_{i=1}^{N}f_i\rho_i, \tag{5b}$$

式中, K_R是混合物的Reuss平均, ρ是平均密度. f_i, K_i和ρ_i分别是各组分的体积含量、体积模量和密度.

第(5)步: 利用各向异性岩石流体替换方程, 计算饱和裂缝型岩石的刚度系数矩阵.

发育大量裂缝的岩石表现出各向异性特征, Gurevich(2003)分别研究了含裂缝无孔隙饱和岩石和含裂缝有孔隙饱和岩石的弹性系数矩阵的计算方法. 本文参照Brown等(1975)推导的各向异性岩石流体替换方程, 通过计算刚度系数矩阵实现饱和各向异性岩石模量的求取.

$$c_{ijkl}^{\mathrm{sat}}=c_{ijkl}^{\mathrm{dry}}+\frac{\left(K_0\sigma_{ij}-c_{ijaa}^{\mathrm{dry}}/3\right)\left(K_0\sigma_{kl}-c_{bbkl}^{\mathrm{dry}}/3\right)}{\left(K_0/K_{fl}\right)\phi\left(K_0-K_{fl}\right)+\left(K_0-c_{ccdd}^{\mathrm{dry}}/9\right)}, \tag{6}$$

式中, 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是矿物的体积模量, K_{fl}是流体的体积模量, ϕ为孔隙度.

$$\sigma_{ij}=\begin{cases}1 & i=j,\\ 0 & i\neq j.\end{cases} \tag{7}$$

从裂缝岩石的刚度矩阵出发, 根据坐标变换关系(Mavko等, 2009), 对各向异性岩石流体替换方程进行重新推导, 选取了与裂缝岩石物理参数有关的流体替换方程(Huang等, 2013).

$$\begin{aligned}
C_{11}^{\mathrm{sat}}&=(\lambda+2\mu)(1-\Delta_N)\\
&+\frac{\left(K_0-K_{\mathrm{iso}}^{\mathrm{dry}}+\Delta_N K_{\mathrm{iso}}^{\mathrm{dry}}\right)^2}{\left(K_0/K_{fl}\right)\phi\left(K_0-K_{fl}\right)+K_0-K_{\mathrm{iso}}^{\mathrm{dry}}\left(1-\Delta_N K_{\mathrm{iso}}^{\mathrm{dry}}/(\lambda+2\mu)\right)},\\
C_{33}^{\mathrm{sat}}&=(\lambda+2\mu)\left(1-\frac{\lambda^2\Delta_N}{(\lambda+2\mu)^2}\right)\\
&+\frac{\left(K_0-K_{\mathrm{iso}}^{\mathrm{dry}}+\lambda\Delta_N K_{\mathrm{iso}}^{\mathrm{dry}}/(\lambda+2\mu)\right)^2}{\left(K_0/K_{fl}\right)\phi\left(K_0-K_{fl}\right)+K_0-K_{\mathrm{iso}}^{\mathrm{dry}}\left(1-\Delta_N K_{\mathrm{iso}}^{\mathrm{dry}}/(\lambda+2\mu)\right)},\\
C_{44}^{\mathrm{sat}}&=\mu,\\
C_{55}^{\mathrm{sat}}&=\mu(1-\Delta_T),
\end{aligned} \tag{8}$$

式中, C_{11}^{sat}, C_{33}^{sat}, C_{44}^{sat}及C_{55}^{sat}为饱和流体裂缝岩石的刚度系数, $K_{\mathrm{iso}}^{\mathrm{dry}}$为各向同性干岩石的体积模量.

第(6)步: 求解饱和裂缝型岩石的纵横波速度及裂缝岩石物理参数.

利用Thomsen(1986)关于各向异性参数的定义, 可以求解饱和裂缝型岩石的纵横波速度, 如式(9)所示:

$$\begin{aligned}
\alpha&=\sqrt{\frac{C_{33}^{\mathrm{sat}}}{\rho}},\\
\beta&=\sqrt{\frac{C_{55}^{\mathrm{sat}}}{\rho}}.
\end{aligned} \tag{9}$$

本文引用了Bakulin等(2000)推导的各向异性参数($\delta^{(V)}$, $\varepsilon^{(V)}$及γ)与裂缝岩石物理参数(Δ_N和Δ_T)之间的关系(式(10)).

$$\begin{aligned}\varepsilon^{(V)} &= -2g(1-g)\Delta_N,\\ \delta^{(V)} &= -2g\left[(1-2g)\Delta_N+\Delta_T\right],\\ \gamma &= \frac{\Delta_T}{2}.\end{aligned} \tag{10}$$

利用式(11)可以实现裂缝岩石物理参数的求解:

$$\begin{aligned}\Delta_N &= \frac{C_{33}^{sat}\left(C_{11}^{sat}-C_{33}^{sat}\right)}{4C_{55}^{sat}\left(C_{55}^{sat}-C_{33}^{sat}\right)},\\ \Delta_T &= 2\frac{C_{55}^{sat}-C_{44}^{sat}}{2C_{44}^{sat}}.\end{aligned} \tag{11}$$

本文中构建的模型改进了张广智等(2013)构建的裂缝型碳酸盐岩岩石物理模型，直接利用Schoenberg线性滑移模型添加干裂缝，并利用式(4a)和式(4b)计算裂缝型干岩石的Δ_N和Δ_T(即令K'=0, μ'=0)，同时计算裂缝型干岩石骨架的刚度系数矩阵. 在求得缝隙混合流体的体积模量K_{fl}之后，通过各向异性岩石的流体替换式(8)实现饱和裂缝型岩石的刚度矩阵计算，求得裂缝型饱和岩石的纵横波速度和裂缝岩石物理参数(Δ_N和Δ_T). 该流程可以避免通常由各向异性参数($\delta^{(V)}$, $\varepsilon^{(V)}$及γ)向裂缝岩石物理参数(Δ_N和Δ_T)转换过程中引入的误差.

1.2　裂缝岩石物理参数敏感性分析

该部分主要研究裂缝岩石物理参数与裂缝密度及充填物的关系，用于说明裂缝岩石物理参数估测的必要性，为后续裂缝岩石物理参数的地震反演预测奠定基础.

根据Hudson模型和Schoenberg裂缝模型之间的关系(式(10))，分析不同裂缝密度及充填物时裂缝岩石物理参数的变化特征，为地下裂缝密度及缝隙流体预测提供理论依据(图2).

图2((a), (b)), ((c), (d))及((e), (f))分别为裂缝饱含水、饱含油及饱含气时裂缝岩石物理参数(Δ_N和Δ_T)与横纵波速度比(β/α)及裂缝密度的关系. 裂缝饱含水、饱含油及饱含气时Δ_N和Δ_T随裂缝密度的增加都呈现增加趋势，Δ_N数值的变化幅度对比为裂缝饱含气>裂缝饱含油>裂缝饱含水. 而不论裂缝饱含气、裂缝饱含油及裂缝饱含水时，Δ_T数值变化幅度基本相同，说明裂缝充填流体类型对Δ_T影响不大，这就有助于从Δ_T反演结果中估测裂缝密度. 因此通过地震反演得到Δ_N和Δ_T，结合岩石物理分析，可以估测地下裂缝密度及裂缝充填流体类型.

2　裂缝岩石物理参数地震 AVAZ 反演

2.1　含岩石物理参数的裂缝岩石反射系数近似公式

基于Ruger(1996)推导的HTI介质反射系数近似公式，本文结合裂缝岩石物理理论，提出含裂缝岩石物理参数Δ_N和Δ_T反射系数近似公式，这就为利用地震信息预测裂缝提供了依据.

HTI介质的近似反射系数公式如式(12)所示:

$$\begin{aligned}R_{PP}(\theta,\phi) = {}& \frac{1}{2}\frac{\Delta Z}{\overline{Z}}+\frac{1}{2}\left\{\frac{\Delta\alpha}{\overline{\alpha}}-\left(\frac{2\overline{\beta}}{\overline{\alpha}}\right)^2\frac{\Delta G}{\overline{G}}\right.\\ &\left.+\left[\Delta\delta^{(V)}+2\left(\frac{2\overline{\beta}}{\overline{\alpha}}\right)^2\Delta\gamma\right]\cos^2\phi\right\}\sin^2\theta\\ &+\frac{1}{2}\left\{\frac{\Delta\alpha}{\overline{\alpha}}+\Delta\varepsilon^{(V)}\cos^4\phi+\Delta\delta^{(V)}\sin^2\phi\cos^2\phi\right\}\\ &\times\sin^2\theta\tan^2\theta,\end{aligned} \tag{12}$$

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

将式(10)代入式(12)，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.

$$\begin{aligned}R_{PP}(\theta,\phi) = {}& \sec^2\theta R_P-8g\sin^2\theta R_S\\ &-\left(g\cos^2\phi\sin^2\theta\right)(1-2g)R_{\Delta_N}\\ &+\left(g\cos^2\phi\sin^2\theta\right)R_{\Delta_T},\end{aligned} \tag{13}$$

式中，$R_P=\frac{I_{P2}-I_{P1}}{I_{P2}+I_{P1}}=\frac{1}{2}\frac{\Delta I_P}{\overline{I_P}}$，$R_S=\frac{I_{S2}-I_{S1}}{I_{S2}+I_{S1}}=\frac{1}{2}\frac{\Delta I_S}{\overline{I_S}}$，$R_{\Delta_N}=\Delta_{N2}-\Delta_{N1}$，$R_{\Delta_T}=\Delta_{T2}-\Delta_{T1}$. I_{P1}，I_{P2}，I_{S1}，I_{S2}分别为上下两层的纵波阻抗和横波阻抗. Δ_{N1}，Δ_{N2}，Δ_{T1}, Δ_{T2}分别代表上下两层的正向差值和切向差值.

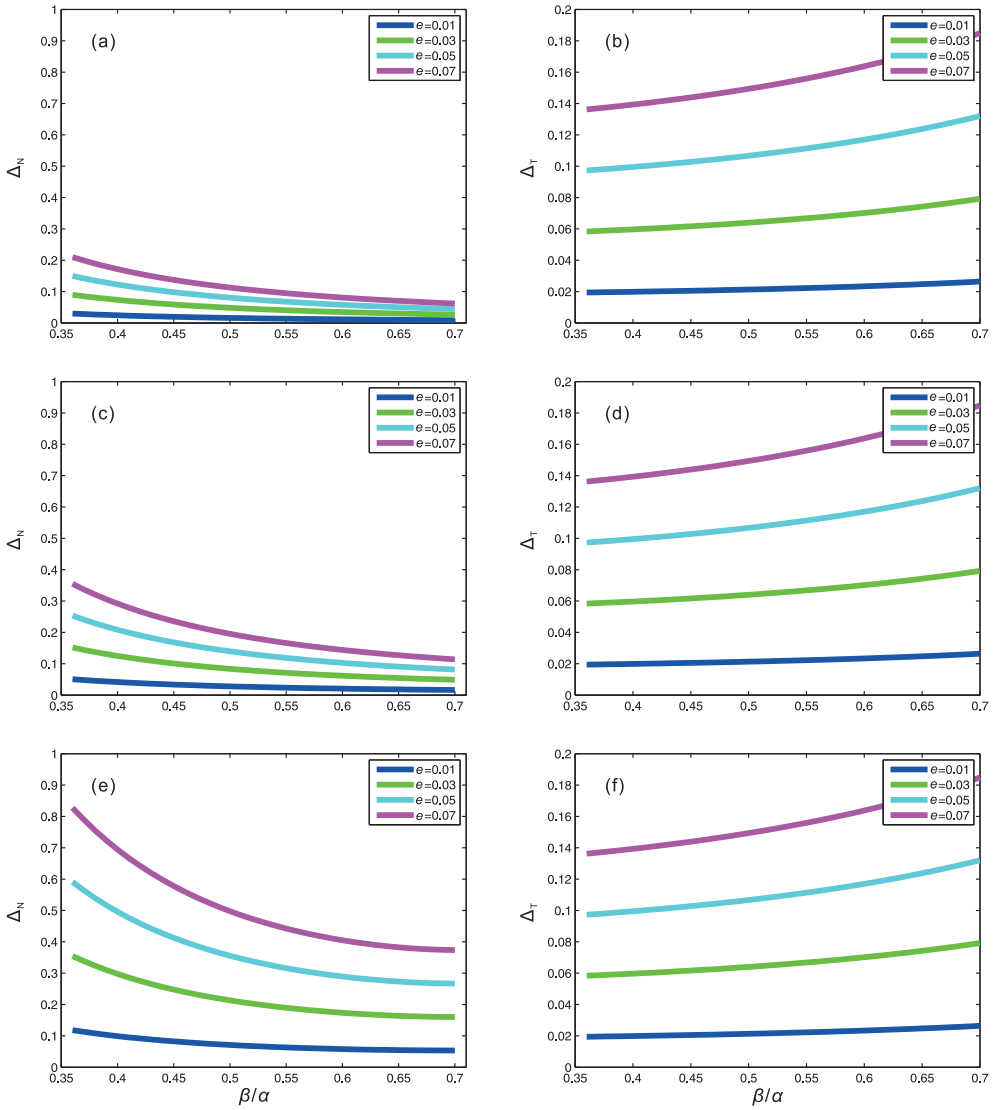


图 2　裂缝岩石物理参数与裂缝密度及充填物之间的关系

2.2　裂缝岩石弹性参数和岩石物理参数 AVAZ 反演方法

由式(13)可以看出裂缝岩石的反射系数与地震波入射角和方位角有关, 假设现有m个方位、n个入射角的叠前地震道集, 以矩阵形式描述地震记录正演过程(式(14)).

$$\begin{bmatrix} seis(\theta_1,\phi_1) \\ seis(\theta_2,\phi_2) \\ \vdots \\ seis(\theta_n,\phi_m) \end{bmatrix} = wvlt \times \begin{bmatrix} R_{pp}(\theta_1,\phi_1) \\ R_{pp}(\theta_2,\phi_2) \\ \vdots \\ R_{pp}(\theta_n,\phi_m) \end{bmatrix}$$

$$= wvlt \times \begin{bmatrix} c_1(\theta_1) & c_2(\theta_1) & c_3(\theta_1,\phi_1) & c_4(\theta_1,\phi_1) \\ c_1(\theta_2) & c_2(\theta_2) & c_3(\theta_2,\phi_2) & c_4(\theta_2,\phi_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_1(\theta_n) & c_2(\theta_n) & c_3(\theta_n,\phi_m) & c_4(\theta_n,\phi_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\mathrm{P}} \\ R_{\mathrm{S}} \\ R_{\Delta_{\mathrm{N}}} \\ R_{\Delta_{\mathrm{T}}} \end{bmatrix}, \tag{14}$$

式中, $seis$ 为地震记录, $wvlt$ 为地震子波矩阵, $c_1(\theta)=\sec^2\theta$, $c_2(\theta)=-8g\sin^2\theta$, $c_3(\theta,\phi)=-\left(g\cos^2\phi\sin^2\theta\right)(1-2g)$, $c_4(\theta,\phi)=g\cos^2\phi\sin^2\theta$.

为了获得未知数R_{P}, R_{S}, $R_{\Delta\mathrm{N}}$和$R_{\Delta\mathrm{T}}$, 将式(14)简写为

$$d = GX, \tag{15}$$

其中,

$$d=\begin{bmatrix} seis(\theta_1,\phi_1) \\ seis(\theta_2,\phi_2) \\ \vdots \\ seis(\theta_n,\phi_m) \end{bmatrix},\qquad X=\begin{bmatrix} R_{\mathrm{P}} \\ R_{\mathrm{S}} \\ R_{\Delta_{\mathrm{N}}} \\ R_{\Delta_{\mathrm{T}}} \end{bmatrix},$$

$$G=wvlt*\begin{bmatrix} c_1(\theta_1) & c_2(\theta_1) & c_3(\theta_1,\phi_1) & c_4(\theta_1,\phi_1) \\ c_1(\theta_2) & c_2(\theta_2) & c_3(\theta_2,\phi_2) & c_4(\theta_2,\phi_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_1(\theta_n) & c_2(\theta_n) & c_3(\theta_n,\phi_m) & c_4(\theta_n,\phi_m) \end{bmatrix}.$$

本文利用基于模型约束的阻尼最小二乘法求解纵波阻抗反射系数R_{P}, 横波阻抗反射系数R_{S}, 正向差值反射系数$R_{\Delta\mathrm{N}}$, 切向差值反射系数$R_{\Delta\mathrm{T}}$.

$$X=\mathrm{mod_}X+\left[G^TG+\sigma I\right]^{-1}G^{\mathrm{T}}(d-G*\mathrm{mod_}X), \quad (16)$$

式中, mod_X为基于岩石物理计算的未知数初始模型, G^{T}为矩阵G的转置矩阵, σ为阻尼因子, I为单位矩阵. 在实际反演过程中, 阻尼因子的选择主要依靠实验, 它起到在解估计的分辨率和方差之间的调节作用(杨文采, 1997). 但是很多地球物理学家研究了阻尼因子选取的方法, 目前较为普遍的是利用噪音方差矩阵和待求参数的方差逆矩阵求解阻尼因子(Downton, 2005).

3　应用举例

选取我国西部某裂缝型碳酸盐岩工区测井数据和不同方位角叠前地震数据进行地下裂缝预测方法应用说明. 以裂缝型岩石物理等效模型为基础, 首先从测井数据上估测横波速度和裂缝岩石物理参数, 将估测结果当做初始模型约束, 利用方位角叠前角度道集反演目标区裂缝岩石的弹性参数和裂缝岩石物理参数, 描述地下裂缝发育情况.

3.1　基于岩石物理等效模型的裂缝岩石横波速度和岩石物理参数估测

本文选择目标工区A井测井曲线, 主要包括声波时差曲线、密度曲线、孔隙度曲线、泥质含量曲线及含水饱和度曲线. 依照裂缝型岩石物理模型的构建步骤, 最终实现饱和裂缝型岩石弹性系数矩阵的求解, 进而完成纵横波速度(α, β)、裂缝岩石参数(Δ_{N}, Δ_{T})的估测(图3).

从图3中可以看出, 利用裂缝岩石物理等效模型估测的纵波速度与测井速度之间吻合较好, 误差较小, 满足应用要求. 而且, 通过分析估测的Δ_{N}和Δ_{T}以及速度值的变化特征可以从测井数据上识别地下裂缝位置. 结合成像测井解释结果可知, 当地下存在裂缝时, 其纵横波速度降低, Δ_{N}和Δ_{T}值都升高.

3.2　反射系数对比分析

利用A井计算的纵横波速度及裂缝岩石物理参数, 我们对本文推导的裂缝岩石反射系数近似方程进行分析, 选取45 HZ的雷克子波, 制作不同方位角的合成地震记录, 将其与Schoenberg等(1992)各向异性介质精确公式计算结果进行对比(图4).

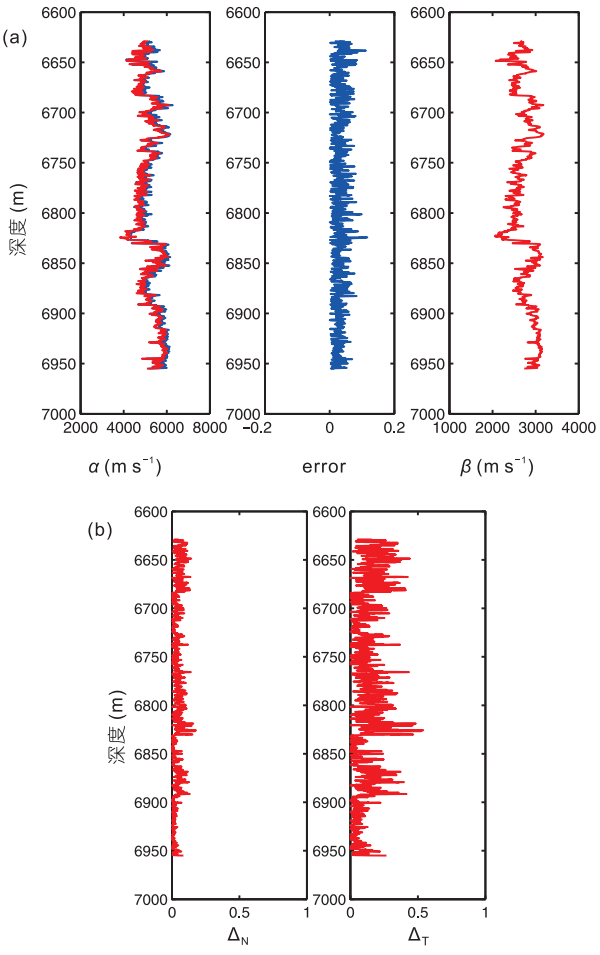


图 3　A 井速度及裂缝岩石物理参数估测结果

(a) A 井速度估测结果(红线)与测井结果对比(蓝线); (b) A 井裂缝岩石物理参数ΔN 和ΔT 估测值

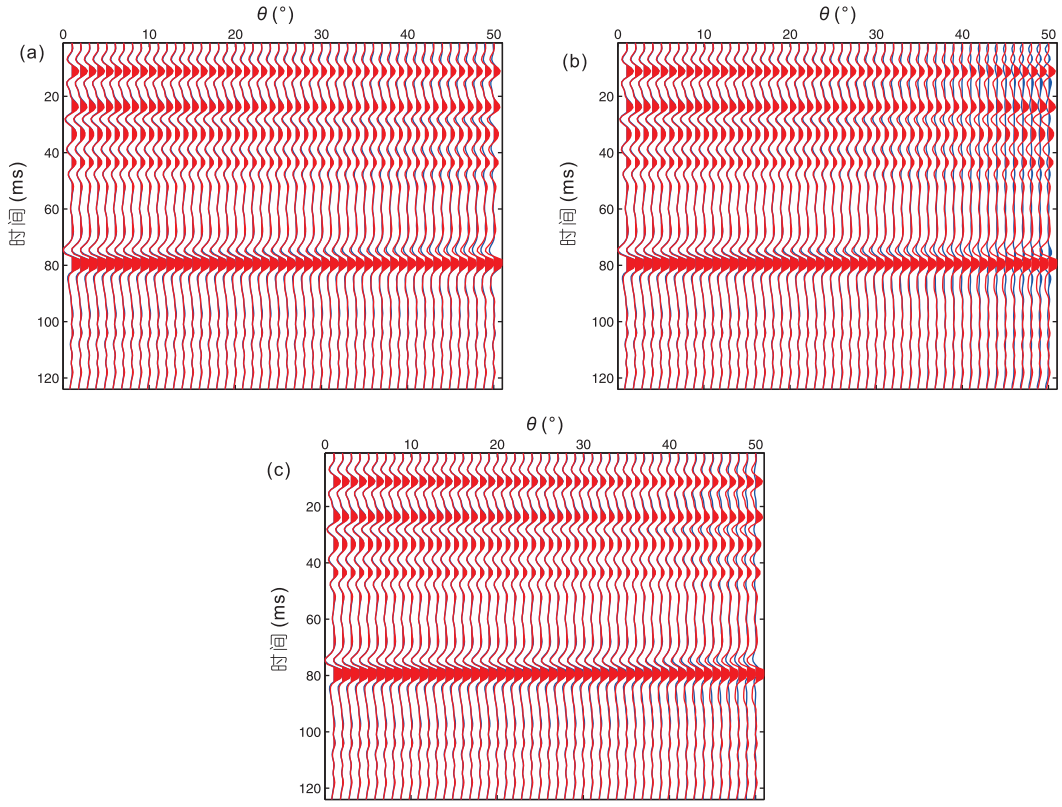


图 4　裂缝岩石反射系数近似解和精确解合成记录对比

(a) 方位角为 0°时近似解(红色)和精确解(蓝色)对比; (b) 方位角为 60°时近似解(红色)和精确解(蓝色)对比; (c) 方位角为 120°时近似解(红色)和精确解(蓝色)对比

从图4中可以看出, 在不同方位角时, 如果入射角小于30°, 利用含裂缝岩石物理参数的反射系数近似解合成的地震记录与各向异性介质精确解合成的地震记录吻合较好, 说明我们推导的含岩石物理参数的裂缝岩石反射系数近似公式精度满足后续反演的应用要求.

3.3　工区储层弹性参数和裂缝岩石物理参数AVAZ直接反演

利用A井测井数据, 选取45 HZ雷克子波合成不同方位角地震记录, 并添加不同信噪比的随机噪声, 将其应用于A井弹性参数和裂缝岩石物理参数的反演估测, 分析AVAZ反演算法的抗噪性(图5). 工区A井的弹性参数和裂缝岩石物理参数AVAZ反演结果与真实结果对比如图6所示.

从图6可以看出, 选取添加信噪比为1随机噪声的合成地震记录进行反演, 得到的地层的弹性参数和裂缝岩石物理参数与测井数据之间仍然吻合较好, 说明该反演方法就有较高的抗噪性.

选用实际工区的不同方位的叠前地震道集, 对目的层弹性参数和裂缝岩石物理参数进行AVAZ反演, 识别地下裂缝的位置, 描述裂缝发育特征. 图7为选取的实际工区某一CDP的不同方位叠前道集, 图8为不同方位叠前道集的差值.

从图7和8中可以看出, 在小偏移距范围内, 不同方位的叠前道集差别较小, 而随着偏移距的增大, 不同方位道集之前的差别增大.

利用工区不同方位的叠前地震道集, 该道集已进行过偏移成像及面向AVO反演的地震资料处理工作, 满足本文反演方法试算的要求. 参照式(16), 选取合适的阻尼因子, 实现裂缝储层纵横波阻抗及裂缝岩石物理参数的预测(图9).

从图9可以看出, 地下裂缝发育位置的纵横波阻抗(I_P和I_S)呈现低值, 而其裂缝岩石物理参数(Δ_N和Δ_T)

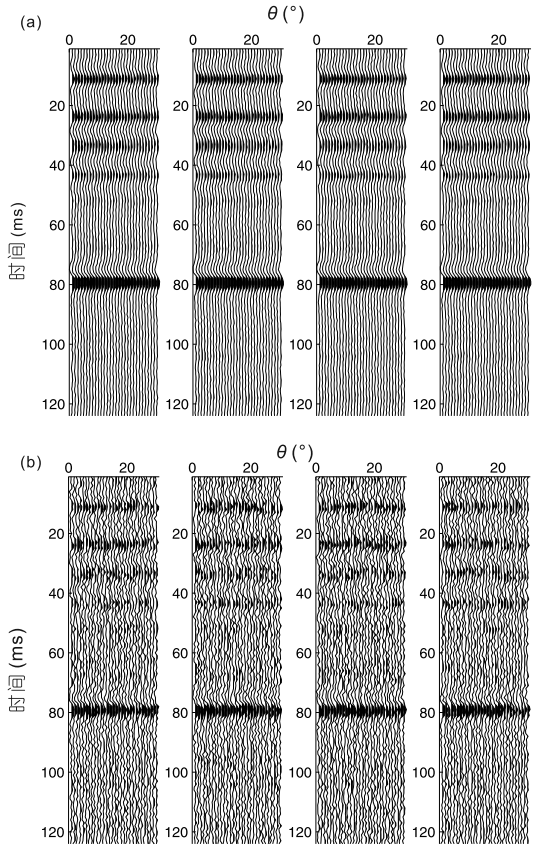


图 5　不同方位角的 A 井合成地震记录

(a) 信噪比为 4; (b) 信噪比为 1

则表现为高值, 与理论研究一致. 实际资料叠前反演过程中虽然引入了不同方位的地震道集, 但是噪声对反演结果的影响依然较大, 而且反演结果对模型的依赖较强. 因此该反演方法适用于具有较高信噪比叠前地震资料的工区, 且能够利用测井及岩石物理模型构建出合理可靠的初始模型约束.

Schoenberg等(1995)提出了能够合理区分缝隙流体类型的指示参数, 该参数与横纵波速度比及裂缝岩石物理参数密切相关. 因此, 当求得裂缝储层纵横波阻抗及裂缝岩石物理参数后, 即可求解缝隙流体指示参数, 区分缝隙流体类型.

4　结语

基于岩石物理分析建立的裂缝岩石物理参数与地震响应之间的关系, 可以直接利用地震数据反演裂缝岩石物理参数, 避免了由弹性参数向岩石物理参数转换过程中引起的误差. 利用裂缝岩石物理等效模型可以实现裂缝岩石测井横波速度、裂缝岩石物理指示参数的可靠估测, 从而为后续反演提供约束条件. 地震AVAZ直接反演方法综合利用了地震反射振幅随方位角和入射角变化的特征, 降低了参数反演的不确定性, 该方法具有较好的抗噪性, 能够反演出较为准确的裂缝岩石纵横波阻抗及裂缝岩石物理参数, 在实际工区应用中具有较好的效果.

本文研究的后续工作安排如下: (1) 碳酸盐岩缝洞储层非均质较强, 而散射现象较强. 因此在实际工区资料反演过程中, 应率先考虑散射信息的提取和

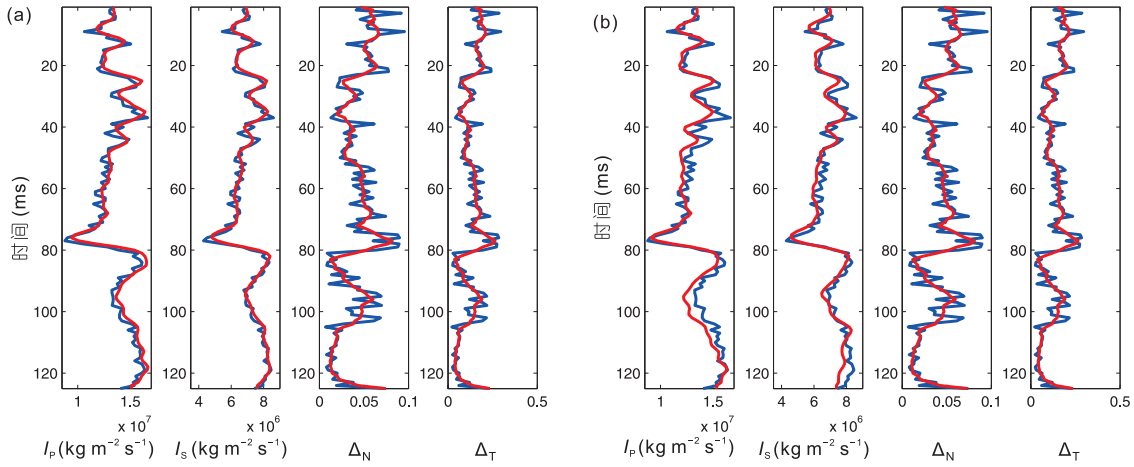


图 6　A 井弹性参数和裂缝岩石物理参数反演结果(红线)与真实值(蓝线)对比

(a) 信噪比为 4; (b) 信噪比为 1

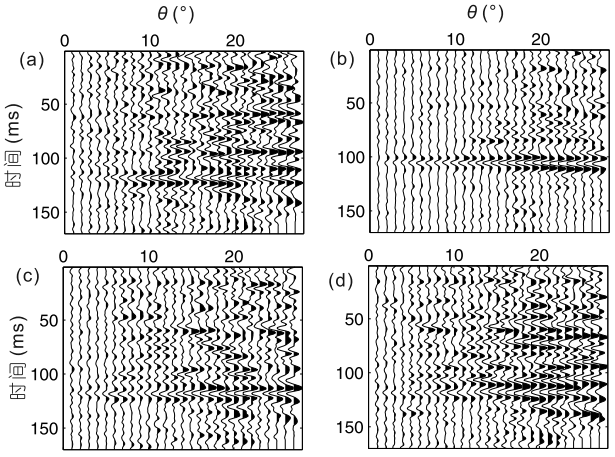


图 7　不同方位的叠前道集

(a) 方位 1; (b) 方位 2; (c) 方位 3; (d) 方位 4

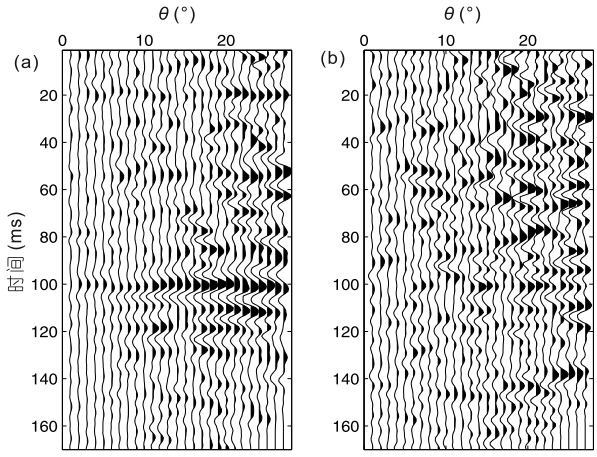


图 8　不同方位地震道集差值

(a) 方位 2 与方位 1 的差值; (b) 方位 4 与方位 3 的差值

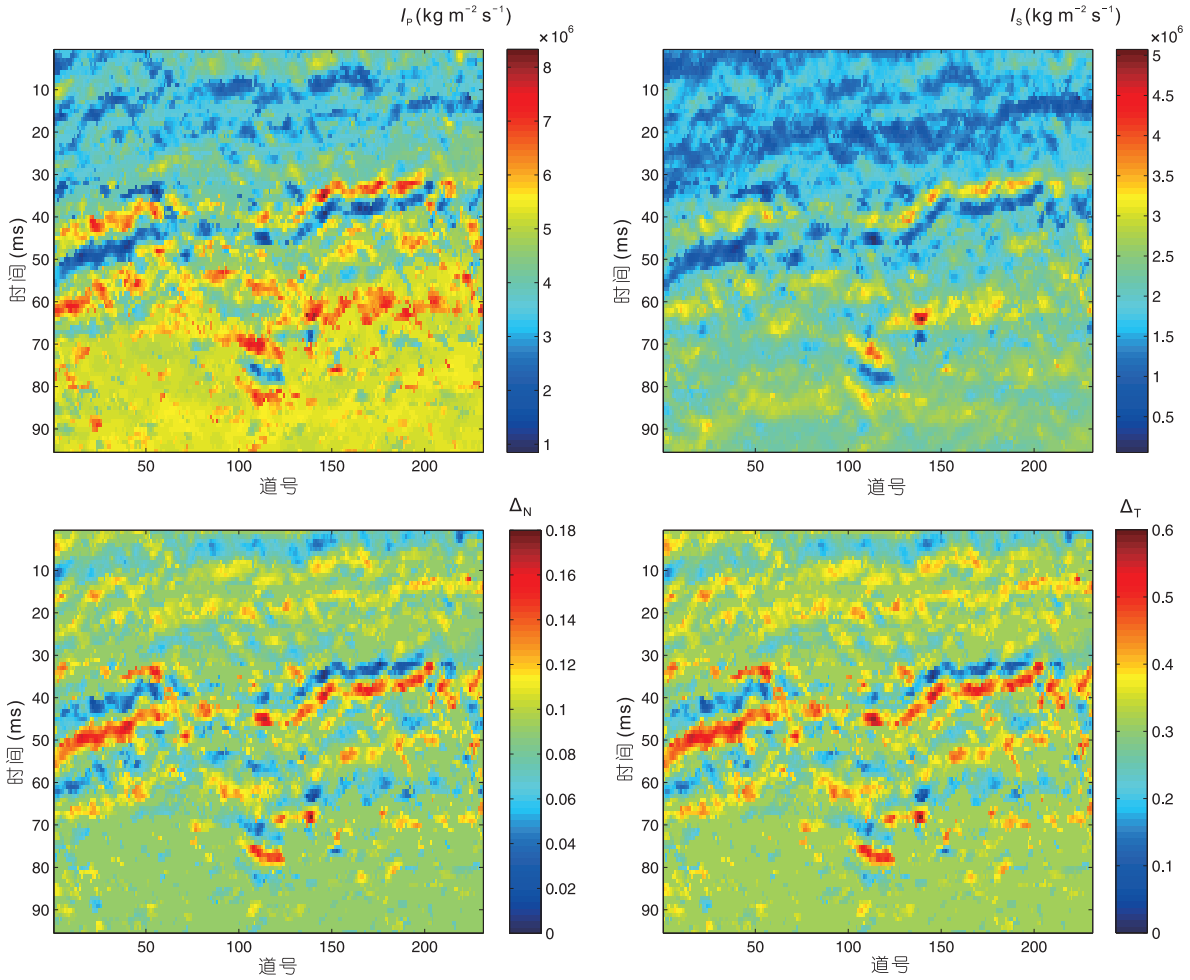


图 9　工区过井线弹性参数和裂缝岩石物理参数反演结果

分析, 有利于提高裂缝预测的精度. (2) 开展面向实际工区叠前资料反演的更加稳定反演方法研究, 减少反演方法对初始模型约束的依赖, 进一步提高方法的抗噪性. (3) 探索更加合理可靠的缝隙流体指示因子, 并尝试利用不同方位叠前地震资料实现缝隙流体指示因子的直接反演预测.

参考文献

撒利明, 姚逢昌, 狄帮让, 等. 2011. 缝洞型储层地震响应特征与识别方法. 岩性油气藏, 23: 23–28

唐文榜, 刘来祥, 樊桂芳, 等. 2002. 溶洞充填物判识的频率差异分析技术. 石油与天然气地质, 23: 41–44

唐晓明. 2011. 含孔隙、裂隙介质弹性波动的统一理论——Biot理论的推广. 中国科学: 地球科学, 41: 784–795

姚姚, 唐文榜. 2003. 深层碳酸盐岩岩溶风化壳洞缝型油气藏可检测性的理论研究. 石油地球物理勘探, 38: 623–629

姚姚, 唐文榜, 奚先, 等. 2012. 溶洞型储层数值模拟波场分析与识别方法. 岩性油气藏, 24: 1–6

杨文采. 1997. 地球物理反演的理论与方法. 北京: 地质出版社

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: 1707–1715

Bachrach R, Sengupta M, Salama A, et al. 2009. Reconstruction of the layer anisotropic elastic parameter and high resolution fracture characterization from P-wave data: A case study using seismic inversion and Bayesian rock physics parameter estimation. Geophys Prospect, 57: 253–262

Bakulin 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: 1788–1802

Batzle M, Han D H, Castagna J. 1999. Fluids and frequency dependent seismic velocity of rocks. Seg Tech Prog Exp Abs, 18: 5–8

Batzle M, Han D H, Hofmann R. 2006. Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity—Direct measurements. Geophysics, 71: 1–9

Biot M A. 1956a. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid: A. Low-frequency range. J Acoust Soc Am, 28: 168–179

Biot M A. 1956b. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid: B. Higher frequency range. J Acoust Soc Am, 28: 180–191

Brown R, Korringa J. 1975. On the dependence of the elastic properties of a porous rock on the compressibility of the pore fluid. Geophysics, 40: 608–616

Chapman M. 2009. Modeling the effect of multiple sets of mesoscale fractures in porous rock on frequency-dependent anisotropy. Geophysics, 74: D97–D103

Cheng C H. 1978. Seismic Velocities in Porous Rocks: Direct and Inverse Problems. Doctoral Dissertation. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology

Cheng C H. 1993. Crack models for a transversely anisotropic medium. J Geophys Res, 98: 675–684

Downton J. 2005. Seismic Parameter Estimation from AVO Inversion. Doctoral Dissertation. Alberta: University of Calgary

Downton J, Gray D. 2006. AVAZ parameter uncertainty estimation. Seg Tech Prog Exp Abs, 25: 234–238

Gassmann F. 1951. Uber die elastizitat poroser medien. Vierteljahrsschrift Naturforschenden Gesellschaft Zurich, 96: 1–23

Gurevich B. 2003. Elastic properties of saturated porous rocks with aligned fractures. J Appl Geophys, 54: 203–218

Hill R. 1952. The elastic behavior of crystalline aggregate. Proc Phys Soc, 65: 349–354

Huang L, Jiang T, Omoboya B, et al. 2013. Fluid substitution for an HTI medium. Seg Tech Prog Exp Abs, 32: 2659–2663

Hudson J A. 1981. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. Geophys J R Astr Soc, 64: 133–150

Liu E, Martinez A. 2012. Seismic Fracture Characterization. Netherlands: EAGE Publication

Mallick S, Craft K L, Meister L J, et al. 1998. Determination of the principal directions of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data. Geophysics, 63: 692–706

Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. 2009. The Rock Physics Handbook. Cambridge: Cambridge University press

Quintal B, Schmalholz S M, Podladchikov Y. 2010a. Impact of fluid saturation on the reflection coefficient of a poroelastic layer. Seg Tech Prog Exp Abs, 29: 2730–2735

Quintal B, Steeb H, Frehner M, et al. 2010b. Finite element modeling of seismic attenuation due to fluid flow in partially saturated rocks. Seg Tech Prog Exp Abs, 29: 2564–2569

Quintal B, Schmalholz S M, Podladchikov Y. 2011. Impact of fluid saturation on the reflection coefficient of a poroelastic layer. Geophysics, 76: 1–12

Quintal B, Steeb H, Frehner M, et al. 2012. Pore fluid effects on S-wave attenuation caused by wave-induced fluid flow. Geophysics, 77: 13–23

Ruger A. 1996. Reflection Coefficient and azimuthal AVO analysis in anisotropic media. Doctoral Dissertation. Colorado: Colorado School of Mines

Ruger A. 1997. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry. Geophysics, 62: 713–722

Ruger A. 1998. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media. Geophysics, 63: 935–947

Sa L M, Yao F C, Di B R, et al. 2011. Seismic response characteristics and identification method of fracture-cavity reservoir. Lithologic reservoirs, 23: 23–28

Schoenberg M. 1980. Elastic wave behavior across linear slip interface. J Acoust Soc Am, 68: 1516–1521

Schoenberg M, Helbig K. 1997. Orthorhombic media: Modeling elastic wave behavior in a vertically fractured Earth. Geophysics, 62: 1954–1974

Schoenberg M, Muirt F. 1989. A calculus for finely layered anisotropic media. Geophysics, 54: 581–589

Schoenberg M, Protazio J. 1992. 'Zoeppritz' rationalized and generalized to anisotropy. J Seism Explor, 1: 125–144

Schoenberg M, Sayers C M. 1995. Seismic anisotropy of fractured rock. Geophysics, 60: 204–211

Thomsen L. 1986. Weak elastic anisotropy. Geophysics, 51: 1954–1966

Wood A W. 1955. A Textbook of Sound. New York: McMillan Co

Zimmerman R W. 1991. Elastic moduli of a solid containing spherical inclusions. Mech Mater, 12: 17–24