

陈怀震, 印兴耀, 高成国等. 2014. 基于各向异性岩石物理的裂隙流体因子 AVAZ 反演. 地球物理学报, 57(3):968-978, doi:10.6038/cjg20140326.

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, doi:10.6038/cjg20140326.

## 基于各向异性岩石物理的裂隙 流体因子 AVAZ 反演

陈怀震<sup>1</sup>, 印兴耀<sup>1</sup>, 高成国<sup>2</sup>, 张广智<sup>1</sup>, 陈娇娇<sup>1</sup>

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266555

2 新疆油田勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000

**摘要** 裂缝型储层表现出较强的各向异性特征. 裂隙中充填不同流体时, 裂缝储层的地震响应特征也不相同. 本文从各向异性岩石物理模型出发, 引入可有效识别裂隙流体的指示因子, 并研究裂隙充填流体类型、饱和度以及裂隙纵横比与流体因子的相互关系, 进而分析不同流体充填时介质的地震响应特征, 并基于 AVAZ 反演方法估测裂隙流体指示因子. 首先对裂隙流体因子的敏感性进行了分析, 讨论当裂隙充填不同流体时, 裂隙流体因子值的变化特征, 同时研究了不同流体类型充填时裂缝储层反射系数随方位角和入射角的变化特征. 某工区测井数据和复杂裂缝模型应用表明, 基于各向异性岩石物理的裂隙流体因子 AVAZ 反演方法合理、可靠, 且具有良好的抗噪性, 即当对合成地震记录添加信噪比不小于 1/2 的随机噪声时, 利用 AVAZ 反演方法估测所得流体因子值与真实值仍然吻合较好.

**关键词** 裂缝, 流体因子, 岩石物理, 方位角道集, 各向异性, 叠前反演

doi:10.6038/cjg20140326

中图分类号 P631

收稿日期 2013-04-24, 2014-01-25 收修定稿

### AVAZ inversion for fluid factor based on fracture anisotropic rock physics theory

CHEN Huai-Zhen<sup>1</sup>, YIN Xing-Yao<sup>1</sup>, GAO Cheng-Guo<sup>2</sup>, ZHANG Guang-Zhi<sup>1</sup>, CHEN Jiao-Jiao<sup>1</sup>

1 School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China

2 Xinjiang Oilfield Company Exploration and Development Research Institute, Karamay Xinjiang 834000, China

**Abstract** The fractured reservoirs show strong anisotropy. When the fracture is filled with different types of fluids, the seismic response characteristics of fractured reservoir are not the same. Starting from the anisotropic rock physics theory, this article introduces the identification factor that can effectively distinguish fracture fluid; studies the relationship of fluid factor to fluid types, saturation and crack aspect ratio; analyzes the seismic response characteristics when the fracture is full of different fluids; and ultimately puts forward the method to estimate the crack fluid factor based on AVAZ inversion. Firstly, the sensitivity of crack fluid factor is analyzed in this paper. Secondly, the features of fluid factor and fractured reservoir's reflection coefficient variation when the fracture is filled with different types of fluids are discussed. At last, well-log

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划“973”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资助(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, 山东泰安人, 中国石油大学(华东)博士研究生, 主要从事碳酸盐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

data and complex fracture model are used to verify the inversion method. The results show that the method to estimate the crack fluid factor is reasonable and reliable. And the estimation results of the fluid factor can match the true value well when the synthetic seismic traces contain a random noise.

**Keywords** Fracture, Fluid factor, Rock physics, Azimuth angle dataset, Anisotropy, Pre-stack inversion

## 1 引言

裂缝储层的预测和缝隙流体的识别成为当前研究的重点(张春贺等,2011;孔丽云等,2012;彭真明等,2008).而裂缝岩石物理模型可以将储层缝隙特征、流体充填类型与地震响应较好地联系起来,为储层反演和流体识别奠定了基础.随着宽方位地震采集和处理技术的发展,对地震数据的振幅解释也越来越深入(李凡异等,2012;曲寿利等,2012;尹志恒等,2012).大量研究表明,裂缝储层表现出较强的各向异性,其地震反射系数随入射角和方位角的变化(AVAZ)特征明显,因此基于 AVAZ 特征分析的裂缝储层反演和缝隙流体预测工作也越来越受关注.

针对裂缝岩石物理模型建立和缝隙流体识别工作,国内外地球物理学家们做了大量探索. Xu 等(1999)对碳酸盐岩孔隙类型进行了研究,并且提出碳酸盐岩岩石物理模型的构建流程. Kumar 和 Han(2005)致力于碳酸盐岩孔隙度和孔隙纵横比的定量分析,实现了碳酸盐岩孔隙的合理划分. Xu 和 Payne(2009)讨论了碳酸盐岩的弹性性质,对比了碎屑岩和碳酸盐岩的纵横波速度特征,并对碳酸盐岩横波速度进行了预测. Hudson(1980)提出了薄硬币形状的微小裂隙的岩石物理理论, Schoenberg(1980)构建了大尺度裂缝线性滑动模型. Bakulin 等(2000)将 Hudson 模型和 Shoenberg 模型结合起来,分析缝隙充填物对各向异性参数的影响.

Mallick 等(1998)最先利用地震方位角道集数据进行弹性参数反演; Bachrach 等(2009)对裂缝储层进行了重构,提出 AVAZ 反演估测裂缝储层参数的方法; Downton 等(2010)基于 Schoenberg 线性滑动模型进行了岩石物理参数的反演. 张广智等(2012)研究了各向异性 AVO 特征,并对裂缝弹性参数叠前反演方法进行了试算. Neut 等(2007)分析缝隙流体对储层各向异性 AVO 梯度的影响,初步提出缝隙流体因子反演方法. Shaw 和 Sen(2006)利用 AVOA 地震数据估算垂直裂缝介质的流体因子. Chen 等(2012)依照岩石物理分析,结合各向同性流体识别方法,对各向异性储层流体识别进行了初探.

本文结合线性滑动模型,选择有效的缝隙流体指示因子,并研究流体因子与缝隙孔隙度、缝隙纵横比、缝隙流体类型和饱和度之间关系. 完成了基于裂缝岩石物理模型的储层反射系数近似公式和缝隙流体因子的 AVAZ 反演方法的理论推导,并利用工区实际测井数据和复杂裂缝模型对 AVAZ 缝隙流体因子反演方法进行试算,取得了较好效果.

## 2 基本原理

### 2.1 裂缝介质刚度矩阵

基于弱各向异性理论,具有水平对称轴的高角度裂缝介质弹性系数矩阵  $\mathbf{C}$  可以描述为各向同性背景系数矩阵  $\mathbf{C}^{\text{iso}}$  与各向异性扰动  $\mathbf{C}^{\text{ani}}$  之和:

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}^{\text{iso}} + \mathbf{C}^{\text{ani}}, \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{C}^{\text{iso}}$  以及  $\mathbf{C}^{\text{ani}}$  分别为

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

$$C^{iso} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix},$$

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

$\lambda$  和  $\mu$  是不含裂隙岩石的拉梅参数,  $\Delta_N$  和  $\Delta_T$  是 Schoenberg 线性滑动理论中的裂隙正向差值和切向差值, 数值变化为 0~1.

Hsu 和 Schoenberg (1993) 研究了裂隙正向差值  $\Delta_N$  和切向差值  $\Delta_T$  与裂隙柔度系数  $K_N$  和  $K_T$  之间的关系:

$$\Delta_N = \frac{(\lambda + 2\mu)K_N}{1 + (\lambda + 2\mu)K_N}, \quad \Delta_T = \frac{\mu K_T}{1 + \mu K_T}. \quad (2)$$

从上式可知,  $\Delta_N$  和  $\Delta_T$  独立地与裂隙柔度系数有关, 不存在相关性.

### 2.2 裂隙流体指示因子

Schoenberg 和 Sayers (1995) 提出  $K_N/K_T$  可以用来指示裂隙流体. 根据方程 (2) 可得

$$\frac{K_N}{K_T} = \frac{\frac{\Delta_N}{(\lambda + 2\mu)(1 - \Delta_N)}}{\frac{\Delta_T}{\mu(1 - \Delta_T)}} = g \frac{\Delta_N(1 - \Delta_T)}{\Delta_T(1 - \Delta_N)}, \quad (3)$$

其中,  $g = \frac{\mu}{\lambda + 2\mu}$ .

正差值和切差值与裂隙参数 (裂隙纵横比, 裂隙密度) 以及充填物的相互关系如下:

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

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

式中,  $k'$  和  $\mu'$  是裂隙中充填物的体积模量和剪切模量,  $a$  是裂隙纵横比,  $e$  为裂隙密度. 建立裂隙储层模型, 分别讨论裂隙流体指示因子  $K_N/K_T$  与裂隙纵

横比  $a$ 、裂隙密度以及裂隙充填物之间的关系, 裂隙充填流体 (油、气、水) 的弹性参数 (体积模量  $K$ 、剪切模量  $\mu$ ) 以及背景介质的弹性参数 (纵波速度  $\alpha$ 、横波速度  $\beta$ 、密度  $\rho$ ) 如表 1 所示.

表 1 裂隙充填流体与背景介质的相关参数

Table 1 Parameters of fracture filled fluid and background media

	裂隙充填物			背景介质
	油	气	水	
$K/\text{GPa}$	1.02	0.00013	2.25	—
$\mu/\text{GPa}$	0	0	0	—
$\alpha/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				4630
$\beta/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				2440
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$				2.43

图 1 为不同裂隙纵横比  $a$ , 不同裂隙密度  $e$  和不同流体充填时  $K_N/K_T$  的变化. 图 1a 为不同流体充填时, 流体指示因子  $K_N/K_T$  与裂隙纵横比  $a$  之间的相互关系, 图中可以发现当裂隙含气时流体指示因子随裂隙纵横比的变化较为明显. 图 1b 为当裂隙充填油水时, 不同含水饱和度和不同裂隙密度下流体因子值, 可以看出油水混合时流体因子值较小, 趋近于 0; 图 1c 和 1d 代表水气混合和油气混合、不同流体饱和度和不同裂隙密度时流体因子值变化特征, 可以看出两种情况下的流体因子值均较大, 而且裂隙含气时流体因子的变化特征基本相同. 图 1 验证了  $K_N/K_T$  可以作为裂隙中充填流体类型的指示参数. 因此, 推导出包含流体信息的裂隙储层反射系数近似公式, 在已知叠前地震数据信息的前提下, 结合测井信息, 即可实现裂隙储层流体因子的 AVAZ 反演.

### 2.3 基于流体因子参数的裂缝介质反射系数

从弹性系数矩阵  $C$  出发,根据各向异性参数  $\delta^{(V)}$ ,  $\epsilon^{(V)}$  和  $\gamma$  的定义,结合 Schoenberg 线性滑动模型得到各向异性参数和裂缝差值之间的关系:

$$\begin{aligned} \delta^{(V)} &= \frac{(C_{13} + C_{55})^2 - (C_{33} - C_{55})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{55})} \\ &= \frac{-2g[(1-2g)\Delta_N + \Delta_T][1 - (1-2g)\Delta_N]}{[1 - \Delta_N(1-2g)^2] \left[ 1 + \frac{g\Delta_T - \Delta_N(1-2g)^2}{1-g} \right]}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\epsilon^{(V)} = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} = \frac{-2g(1-g)\Delta_N}{1 - (1-2g)^2\Delta_N}, \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{C_{44} - C_{66}}{2C_{66}} = \frac{\Delta_T}{2}. \quad (7)$$

依照弱各向异性理论分别对  $\delta^{(V)}$ ,  $\epsilon^{(V)}$  进行线性化:

$$\delta^{(V)} \approx -2g[(1-2g)\Delta_N + \Delta_T], \quad (8)$$

$$\epsilon^{(V)} \approx -2g(1-g)\Delta_N. \quad (9)$$

Ruger(1996)详细研究了 HTI 介质反射特征,并推导了 HTI 介质的反射系数近似公式:

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, \phi) &= \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - \left( \frac{2\bar{\beta}}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} + \left[ \Delta\delta^{(V)} + 2 \left( \frac{2\bar{\beta}}{\alpha} \right)^2 \Delta\gamma \right] \cos^2 \phi \right\} \sin^2 \theta \\ &+ \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \Delta\epsilon^{(V)} \cos^4 \phi + \Delta\delta^{(V)} \sin^2 \phi \cos^2 \phi \right\} \sin^2 \theta \tan^2 \theta, \end{aligned} \quad (10)$$

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

将方程(7)、(8)和(9)带入方程(10),同时基于弱各向异性近似理论,将 HTI 介质反射系数  $R_{PP}(\theta, \phi)$  可表示为各向同性背景反射系数和各向异性部分扰动相加的近似形式:

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, \phi) &\approx \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right] + \left[ \frac{\Delta\alpha}{2\bar{\alpha}} - 4g \frac{\Delta\beta}{\beta} - 2g \frac{\Delta\rho}{\rho} \right] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \sin^2 \theta \tan^2 \theta \\ &+ (\cos^2 \phi \sin^2 \theta + \sin^2 \phi \cos^2 \phi \sin^2 \theta \tan^2 \theta) \left\{ -g[(1-2g)R_{\Delta_N} + R_{\Delta_T}] \right\} \\ &+ (\cos^4 \phi \sin^2 \theta \tan^2 \theta) [-g(1-g)R_{\Delta_N}] + [g \cos^2 \phi \sin^2 \theta] (2R_{\Delta_T}), \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $R_{\Delta_N} = \Delta_{N_2} - \Delta_{N_1}$ ;  $R_{\Delta_T} = \Delta_{T_2} - \Delta_{T_1}$ .  $\Delta_{N_1}, \Delta_{N_2}, \Delta_{T_1}, \Delta_{T_2}$  分别代表上下两层的正向差值和切向差值.

假定现有不同方位角  $\phi_1$  和  $\phi_2$  的叠前角度道集,当入射角  $\theta$  小于  $30^\circ$  时,可舍掉  $\sin^2 \theta \tan^2 \theta$ , 两者反射系数差值为

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, \phi_2) - R_{PP}(\theta, \phi_1) &= -g(1-2g)(\cos^2 \phi_2 \sin^2 \theta - \cos^2 \phi_1 \sin^2 \theta) R_{\Delta_N} \\ &+ g[\cos^2 \phi_2 \sin^2 \theta - \cos^2 \phi_1 \sin^2 \theta] R_{\Delta_T}. \end{aligned} \quad (12)$$

上式描述了裂缝正向差值  $\Delta_N$  和切向差值  $\Delta_T$  与裂缝介质反射系数  $R_{PP}(\theta, \phi)$  之间的关系,将地震记录和裂缝岩石物理有效地联合起来. 通过地震记录 AVAZ 反演求解裂缝正向差值  $\Delta_N$  和切向差值  $\Delta_T$ , 利用方程(3)可求得缝隙流体因子值.

### 2.4 含流体裂缝储层地震响应特征

引用 Shaw 和 Sen(2006)发表的文章中不同流体充填的裂缝模型,研究含流体裂缝储层的反射系数随入射角和方位角的变化特征(AVAZ),为流体因子地震 AVAZ 反演奠定基础. 该模型上层为各向同性储层,下层为垂直裂缝充填的各向异性储层(见表 2):(a) 缝隙充填气, (b) 缝隙部分充填油水, (c) 完

表 2 含不同流体裂缝介质模型 (Shaw and Sen, 2006)  
Table 2 Fractured medium with fluid of different types (Shaw and Sen, 2006)

介质	$\rho/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$\alpha/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\beta/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\Delta_N$	$\Delta_T$
各向同性	2.21	2170	1200	0	0
垂直 裂缝	2.0	2000	1000	(a) 缝隙含气	0.15 0.10
				(b) 油水部分 充填	0.03 0.10
储层				(c) 油水完全 充填	0.00 0.15

全充填油水.

从图 2 可以看出,当缝隙含气,部分充填油水和完全充填油水时,其反射系数随入射角和方位角的变化特征具有较大差别. 因此通过分析储层的 AVAZ 特征,进而实现储层缝隙流体的 AVAZ 反演.

### 2.5 流体因子 AVAZ 反演

本文通过求解不同方位的地震反射系数,从而实现正向差值  $\Delta_N$  和切向差值  $\Delta_T$  的反演,进而求取流体指示因子.

不同入射角时,方程(12)可以改写为矩阵形式:

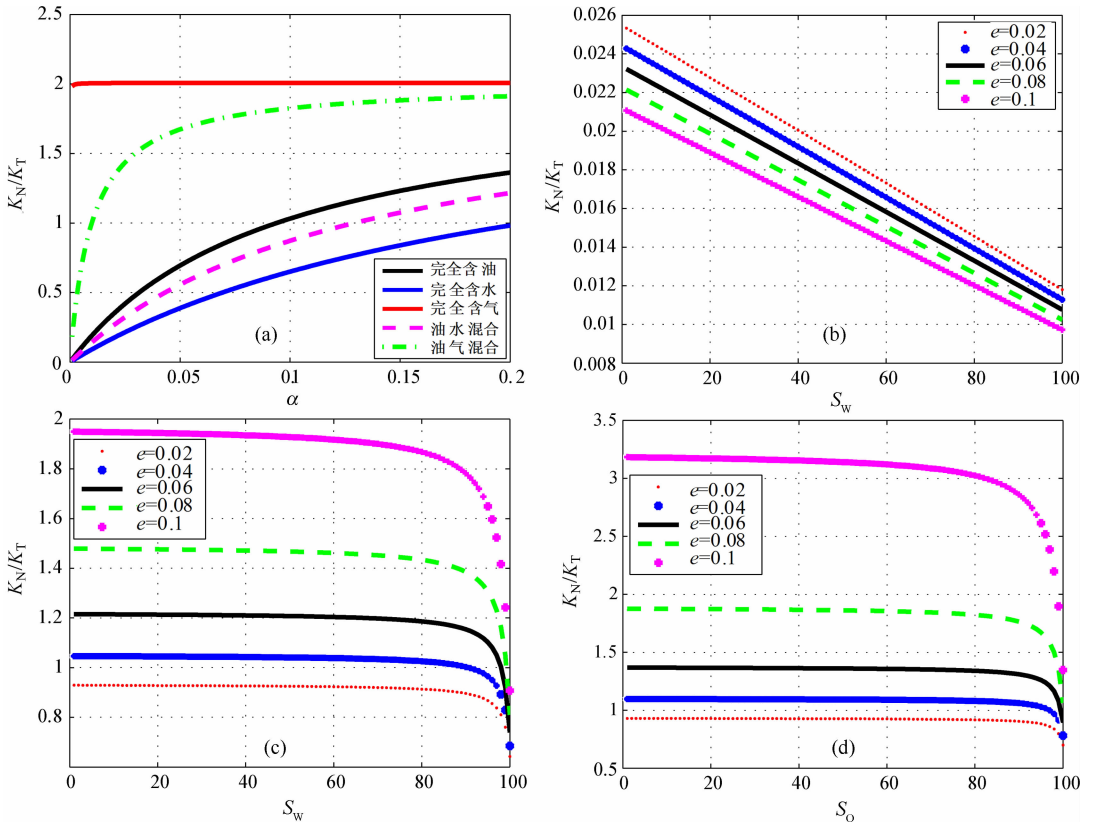


图 1 流体指示因子  $K_N/K_T$  与裂缝纵横比  $\alpha$ 、裂缝密度及缝内流体之间的关系 ( $S_w$ 、 $S_o$  分别为含水饱和度和含油饱和度)

Fig. 1 Fluid factor variation with fracture aspect ratio, fracture density and filled fluid type

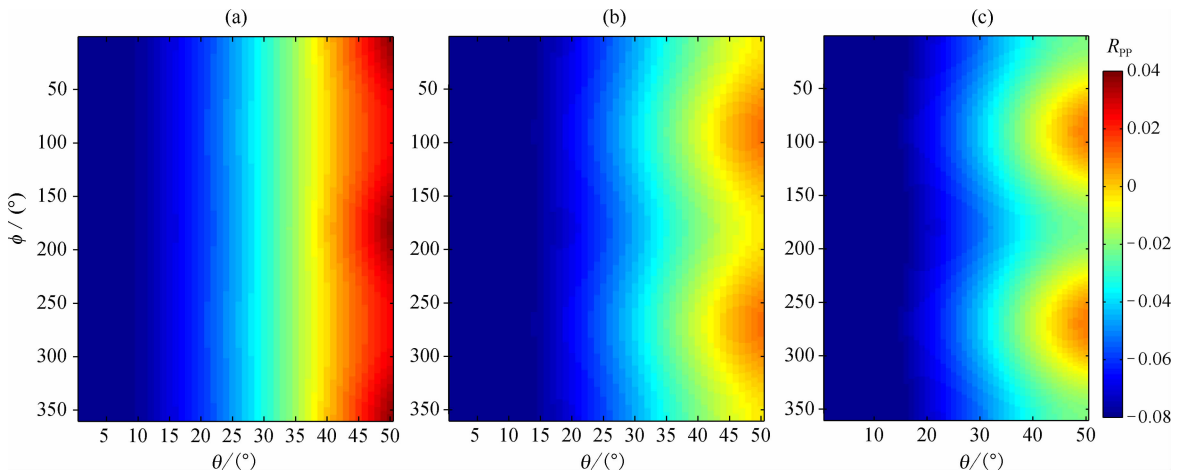


图 2 不同流体充填裂缝介质的反射系数特征

(a) 缝内含气; (b) 缝内部分含油; (c) 完全充填.

Fig. 2 Reflection coefficient variation with incidence and azimuth angle

(a) Gas filled; (b) Partially filled; (c) Fluid filled.

$$\begin{bmatrix} R_{PP}(\theta_1, \phi_2) - R_{PP}(\theta_1, \phi_1) \\ R_{PP}(\theta_2, \phi_2) - R_{PP}(\theta_2, \phi_1) \\ \vdots \\ R_{PP}(\theta_n, \phi_2) - R_{PP}(\theta_n, \phi_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g(1-2g)\sin^2\theta_1(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) & g\sin^2\theta_1(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) \\ -g(1-2g)\sin^2\theta_2(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) & g\sin^2\theta_2(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) \\ \vdots & \vdots \\ -g(1-2g)\sin^2\theta_n(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) & g\sin^2\theta_n(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\Delta_N} \\ R_{\Delta_T} \end{bmatrix}, \tag{13}$$

假定,

$$d = \begin{bmatrix} R_{PP}(\theta_1, \phi_2) - R_{PP}(\theta_1, \phi_1) \\ R_{PP}(\theta_2, \phi_2) - R_{PP}(\theta_2, \phi_1) \\ \vdots \\ R_{PP}(\theta_n, \phi_2) - R_{PP}(\theta_n, \phi_1) \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} -g(1-2g)\sin^2\theta_1(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) & g\sin^2\theta_1(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) \\ -g(1-2g)\sin^2\theta_2(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) & g\sin^2\theta_2(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) \\ \vdots & \vdots \\ -g(1-2g)\sin^2\theta_n(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) & g\sin^2\theta_n(\cos^2\phi_2 - \cos^2\phi_1) \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} R_{\Delta_N} \\ R_{\Delta_T} \end{bmatrix}.$$

当添加随机噪声  $N$  时,未知数  $X$  可以利用反复迭代最小二乘法进行求解:

$$X = (G^T G)^{-1} G^T (d + N). \quad (14)$$

### 3 数据试算

#### 3.1 缝隙流体因子计算和分析

选取某碳酸盐岩裂缝发育工区 A 井数据进行缝隙流体指示因子的试算. A 井纵波速度  $\alpha$ , 横波速度  $\beta$ , 密度  $\rho$  以及各向异性参数  $\delta^{(V)}$ ,  $\epsilon^{(V)}$  和  $\gamma$  如图 3 所示.

分析 A 井的纵横波速度和密度曲线,并结合各

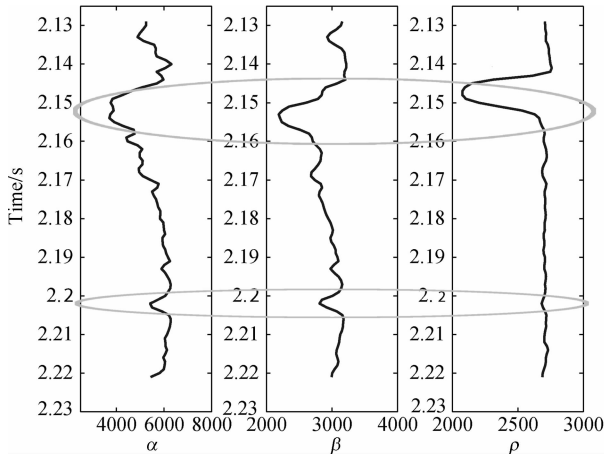


图 3 A 井弹性参数和各向异性参数

Fig. 3 Elastic parameters and anisotropic parameters of well A

向异性参数曲线可知,该井通过两套裂缝储层(如图中圈注).对比上下层弹性参数和各向异性参数变化,两套储层的纵横波速度和密度均有减小,各向异性参数的变化也较为明显,但变化幅度不同.

利用 A 井弹性参数和各向异性参数,反推计算 A 井各点的弹性矩阵,进而计算各点的正向差值  $\Delta_N$  和切向差值  $\Delta_T$ , 结果如图 4 所示.

从图 4 中展示的正向差值  $\Delta_N$  和切向差值  $\Delta_T$  变化特征,可以进一步标定两套储层的位置和储层中裂缝的发育程度,同时表明两套储层中裂缝对各向同性背景介质的影响并不相同.

根据公式(3)计算流体指示因子,识别缝隙流体

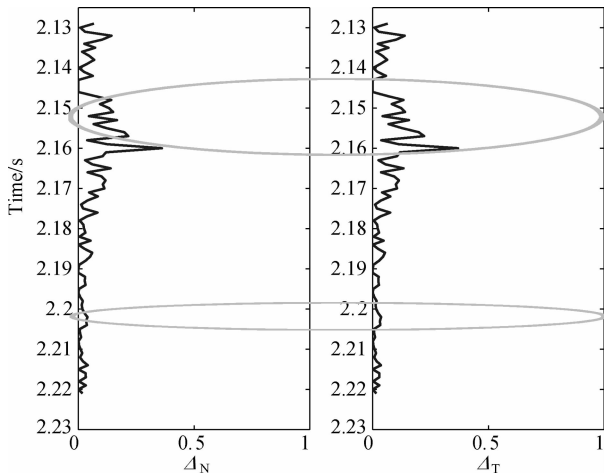
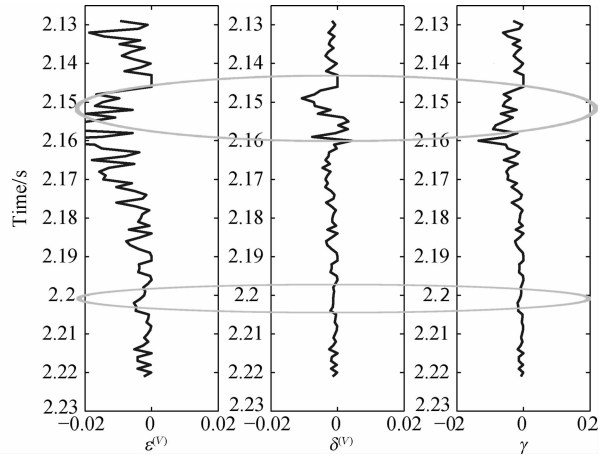


图 4 A 井正向差值和切向差值

Fig. 4  $\Delta_N$  and  $\Delta_T$  of well A

类型.

如图 5 所示,两套裂缝储层的流体因子值并不相同.依照图 1 中探讨的流体因子和缝隙流体类别以及裂缝密度的关系,结合钻井资料和测井地质分析,可以得出如下结论:该井经过的第一个裂缝储层中含气,第二个裂缝储层中为油水混合;第一个储层比第二个储层的裂缝密度要大.

#### 3.2 缝隙流体因子地震 AVAZ 反演

##### (1) 实际工区井试算

利用 A 井的合成地震记录对缝隙流体因子的反演算法进行试算.选取拟 Zoeppritz 方程求解界面精确反射系数,利用 45 Hz 的 Ricker 子波,依照褶积模型制作合成地震记录,并添加不同信噪比的随机噪声.方位角为  $0^\circ, 30^\circ$  和  $60^\circ$ 、不同信噪比的合成

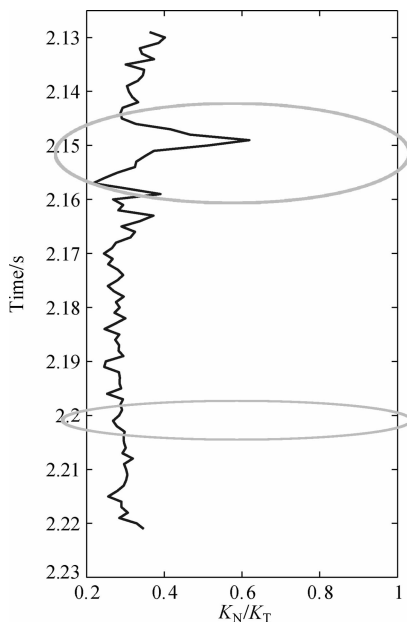


图 5 A 井流体因子变化特征

Fig. 5 Fluid factor variation characteristic of well A

地震记录分别如图 6 所示。

通过反褶积提取不同信噪比,不同方位角的反射系数.按照公式(13)定义,将不同方位角反射系数做差,通过最小二乘反演方法求取裂缝正向差值  $\Delta_N$  和切向差值  $\Delta_T$ ,进而求得流体因子  $K_N/K_T$  反演值,其结果如图 7 所示。

对含不同信噪比随机噪声的方位合成地震记录进行 AVAZ 流体因子反演,其结果对比如图 8 所示。

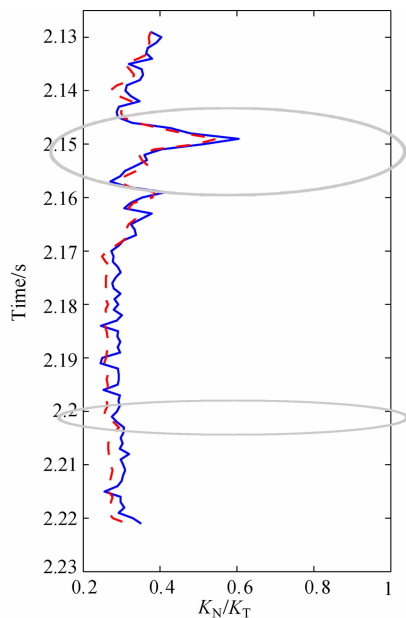


图 7 不含噪声时缝隙流体因子反演值(红线)与真实值(蓝线)对比

Fig. 7 The comparison between fluid factor estimation result (red line) and real well log data (blue line) (No noise)

从图 7 和图 8 曲线对比可知,即使添加信噪比为 1/2 的随机噪声时,流体因子 AVAZ 反演值与测井真实值之间差别不大,而且反演结果裂缝位置明确,缝隙流体性质指示明显,满足反演要求。

(2)复杂模型试验

选取 Aminzadeh 等(1997)和 Mulder 等(2006)构建的二维逆掩断层各向异性模型进行流体因子分

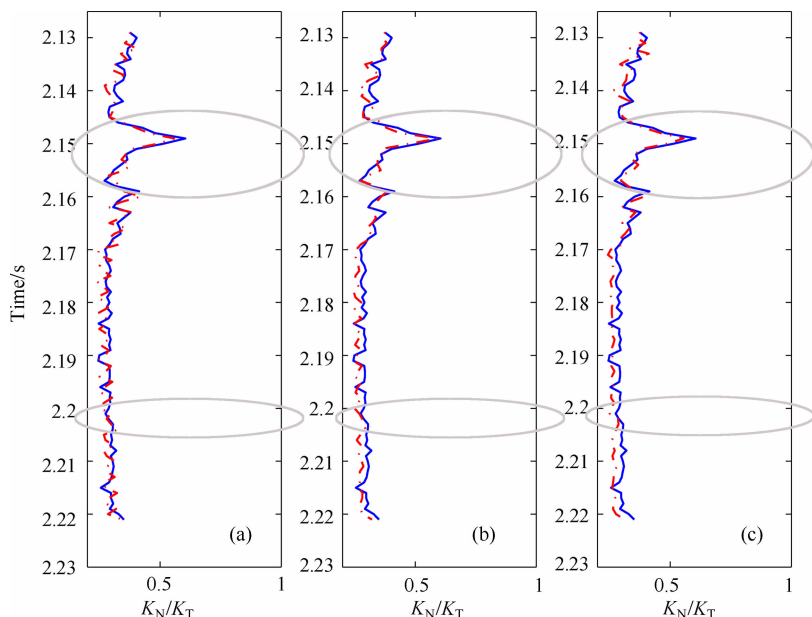


图 8 含不同信噪比随机噪声时缝隙流体因子反演值(红线)与真实值(蓝线)对比

(a)信噪比为 2;(b)信噪比为 1;(c)信噪比为 1/2.

Fig. 8 The comparison between fluid factor estimation result (red line) and real well log data (blue line) with different S/N ratios

(a) S/N=2; (b) S/N=1; (c) S/N=1/2.

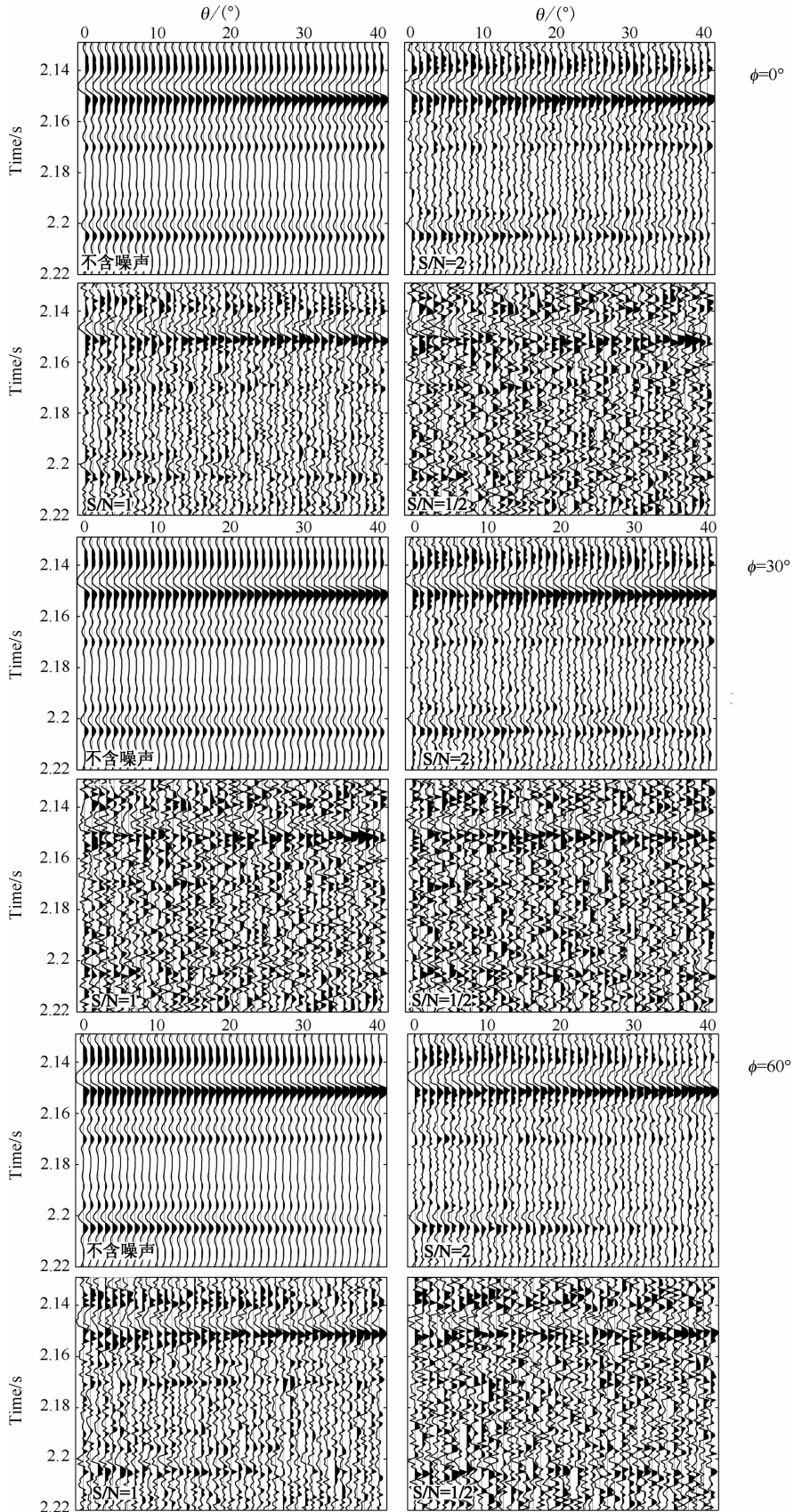


图 6 不同方位角合成地震记录

Fig. 6 Synthetic traces of different angles

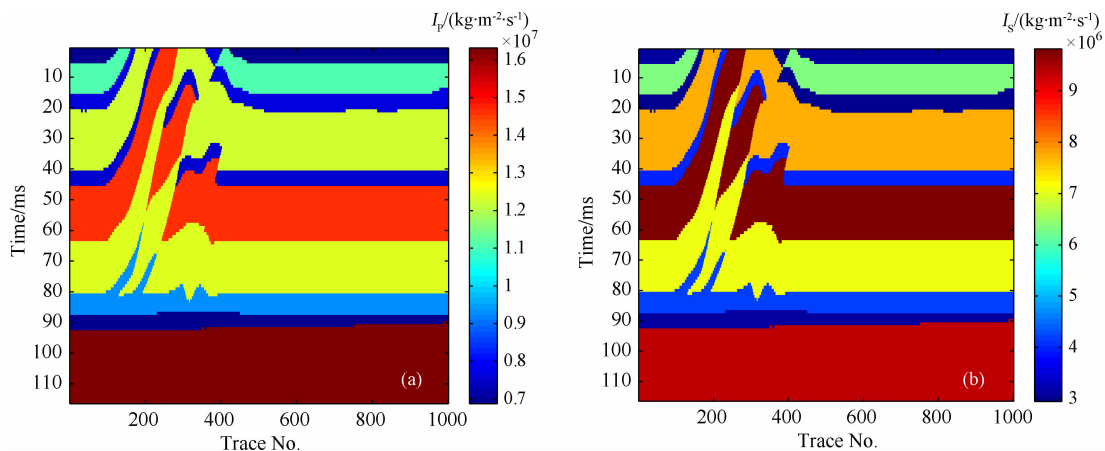


图9 逆掩断层模型的弹性参数

(a)纵波阻抗;(b)横波阻抗.

Fig. 9 Elastic parameters of overthrust model

(a) P wave impedance; (b) S wave impedance.

析和 AVAZ 反演试算,进一步验证流体因子 AVAZ 反演估测方法的适用性. 同样选取拟 Zoeppritz 方程对二维逆掩断层模型每一道求解反射界面的精确反射系数,采用 45 Hz 的 Ricker 子波,按照褶积模型制作方位角合成地震记录,在添加不同信噪比的随机噪声情况下,对合成地震记录进行弹性参数的 AVAZ 反演,在合理估测正向差值和切向差值的基础上实现缝隙流体指示因子的预测.

逆掩断层  $\Delta_N$ ,  $\Delta_T$  和  $K_N/K_T$  反演结果真实值和估测值对比如图 10 所示,当添加随机噪声时( $S/N=2$ ), AVAZ 反演估测的  $\Delta_N$  和  $\Delta_T$  与模型真实值之间吻合较好,而且估测值的横向连续性较好,能够较好地刻画出断层的边界,同时通过比较  $\Delta_N$  和  $\Delta_T$  的数值大小可识别裂缝储层. 另外,  $K_N/K_T$  反演值和模型真实值对比可以反映出缝隙流体特征.

## 4 结论和认识

当储层中发育较多垂直或近似垂直的缝隙时,储层会表现出较强的各向异性特征. 而当缝隙中充填不同流体(油、气、水)时,其地震响应特征也不相同. 本文主要研究了基于岩石物理的裂缝储层缝隙流体指示因子的 AVAZ 估测方法,从各向异性裂缝模型出发,引入可有效识别缝隙流体的指示因子,分析了不同流体充填时介质的地震响应特征,并验证了缝隙流体指示因子的 AVAZ 反演方法. 测井数据和二维逆掩断层模型试算表明,基于岩石物理的缝隙流体因子 AVAZ 反演方法合理、可靠,具有良好的抗噪性,即当对合成地震记录添加信噪比较小

的随机噪声时,利用 AVAZ 反演方法估测所得流体因子值与真实值仍然吻合较好. 与常规流体因子的 AVO 反演方法相比,该方法基于岩石物理模型,在求取储层中由于裂缝存在而产生的正差值和切差值的基础上,综合研究地震振幅随入射角和方位角的变化特征,进而预测缝隙流体因子,提高了流体因子预测的精度. 然而,在实际裂缝储层预测时,譬如缝洞型碳酸盐储层、缝发育的页岩气储层,除进行地层岩性特征的详细分析外,还要考虑其他缝隙充填物(方解石、泥,等)对缝隙流体因子的影响,着手构建适用于各种岩性储层的缝隙流体指示因子,并发展合理的 AVAZ 叠前反演估测方法,以便更好地进行裂缝型储层的预测和缝隙流体的识别.

## References

- Aminzadeh F, Brac J, Kunz T. 1997. 3-D salt and overthrust models. USA: Society of Exploration Geophysicists.
- Bachrach R, Sengupta M, Salama A, et al. 2009. Reconstruction of the layer anisotropic elastic parameters and high resolution fracture characterization from P-wave data: a case study using seismic inversion and Bayesian rock physics parameter estimation. *Geophysical Prospecting*, 57(2): 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(6): 1788-1802.
- Chen H Z, Zhang G Z, Yin X Y. 2012. AVAZ inversion for elastic parameter and fracture fluid factor. 82nd Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 1-5.
- Downton J, Roure B. 2010. Azimuthal simultaneous elastic inversion for fracture detection. 80th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 1-5.
- Hsu C J, Schoenberg M. 1993. Elastic waves through a simulated

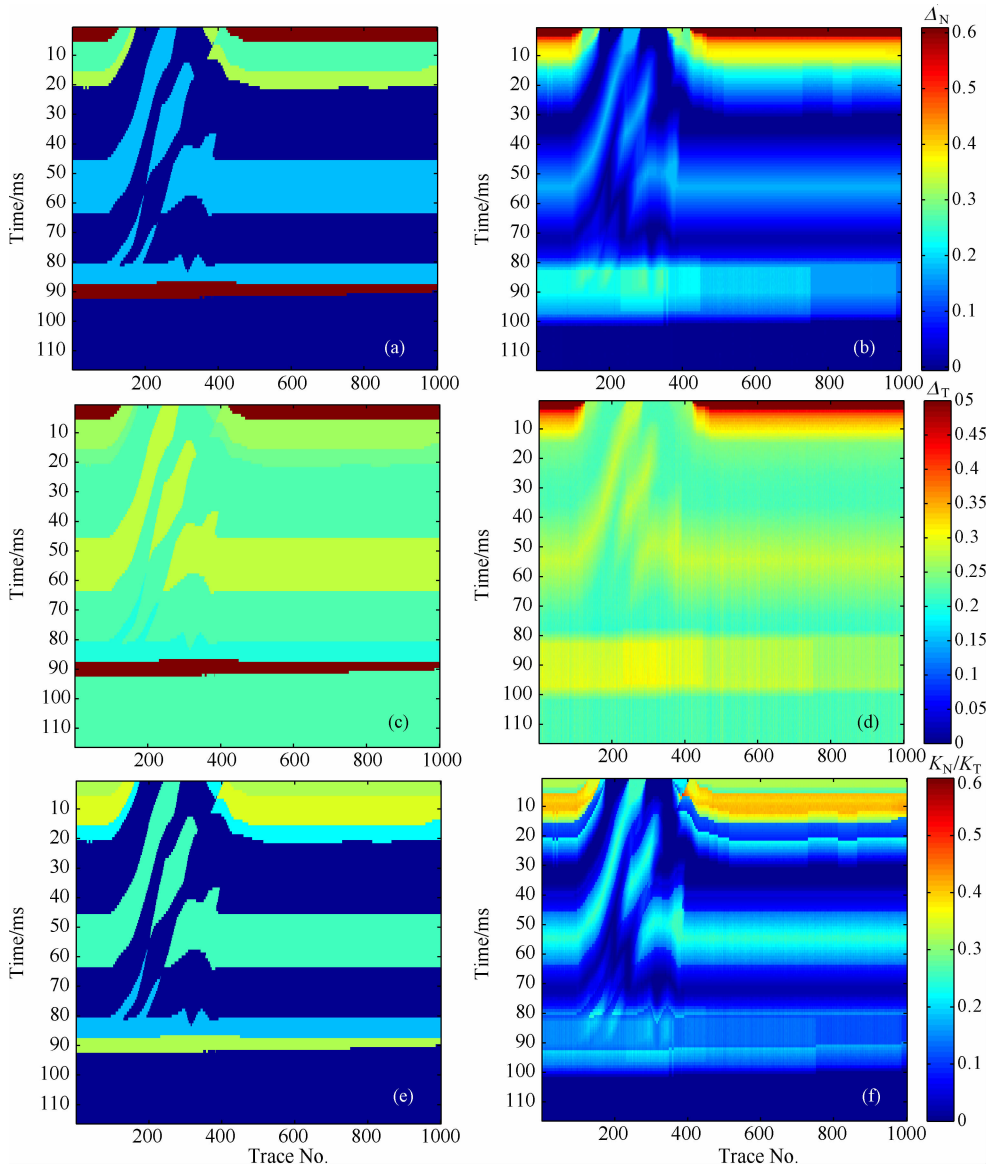


图 10 添加随机噪声时  $\Delta_N$ ,  $\Delta_T$  和  $K_N/K_T$  反演结果 ( $S/N=2$ )

(a)  $\Delta_N$  真实值; (b)  $\Delta_N$  估测值; (c)  $\Delta_T$  真实值; (d)  $\Delta_T$  估测值; (e)  $K_N/K_T$  真实值; (f)  $K_N/K_T$  估测值。

Fig. 10  $\Delta_N$ ,  $\Delta_T$  and  $K_N/K_T$  estimated results comparison with true value of all CDP gathers with noise

(a)  $\Delta_N$  true value; (b)  $\Delta_N$  estimation result; (c)  $\Delta_T$  true value; (d)  $\Delta_T$  estimation result; (e)  $K_N/K_T$  true value; (f)  $K_N/K_T$  estimation result.

fractured medium. *Geophysics*, 58(7): 964-977.

Hudson J A. 1980. Overall properties of a cracked solid. *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 88(2): 371-384.

Kumar M, Han D H. 2005. Pore shape effect on elastic properties of carbonate rocks. 75th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 1-5.

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 F Y, Di B R, Wei J X, et al. 2012. A method for estimating the width of carbonate fracture-cavern bodies. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(2): 631-636.

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(2): 692-706.

Mulder W A, Nicoletis L, Alkhalifah T. 2006. The EAGE 3D Anisotropic Elastic Modeling Project. Vienna: 68th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts, 1-5.

Neut J V D, Shaw R K, Sen M K. 2007. Estimation of the fluid indicator from azimuthal AVO gradient variations at a fractured reservoir. 77th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 1-5.

Peng Z M, Li Y L, Wu S H, et al. 2008. Discriminating gas and water using multi-angle extended elastic impedance inversion in carbonate reservoirs. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(3): 881-885.

Qu S L, Zhu S W, Zhao Q, et al. 2012. Analysis of seismic reflection characters for carbonate Karst reservoir. *Chinese J.*

- Geophys. (in Chinese), 55(6): 2053-2061.
- Ruger A. 1996. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media[Ph. D. thesis]. Colorado: Colorado School of Mines.
- Schoenberg M. 1980. Elastic wave behavior across linear slip interface. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 68: 1516-1521.
- Schoenberg M, Sayers C M. 1995. Seismic anisotropy of fractured rock. *Geophysics*, 60(1): 204-211.
- Shaw R K, Sen M K. 2006. Use of AVOA data to estimate fluid indicator in a vertically fractured medium. *Geophysics*, 71(3): C15-C24.
- Xu S Y, Keys B. 1999. Study of the coupled effect of pressure, frequency and fluid content on P- and S-wave velocities. 69th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 1-5.
- Xu S Y, Payne M A. 2009. Modeling elastic properties in carbonate rocks. *The Leading Edge*, 28(1): 66-74.
- Yin Z H, Li X Y, Wei J X, et al. 2012. A physical modeling study on the 3D P-wave azimuthal anisotropy in HTI media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(11): 3805-3812.
- Zhang C H, Qiao D W, Li S Z, et al. 2011. Integration of oil and gas geophysical exploration technologies for geologically complex areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(2): 374-387.
- Zhang G Z, Chen H Z, Yin X Y, et al. 2012. Method of fracture elastic parameter inversion based on anisotropic AVO. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(3): 845-851, 871.

### 附中文参考文献

- 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.
- 李凡异, 狄帮让, 魏建新等. 2012. 碳酸盐岩缝洞体宽度估算方法. *地球物理学报*, 55(2): 631-636.
- 彭真明, 李亚林, 巫盛洪等. 2008. 碳酸盐岩储层多角度弹性阻抗流体识别方法. *地球物理学报*, 51(3): 881-885.
- 曲寿利, 朱生旺, 赵群等. 2012. 碳酸盐岩孔洞型储集体地震反射特征分析. *地球物理学报*, 55(6): 2053-2061.
- 尹志恒, 李向阳, 魏建新等. 2012. 利用物理模型三维纵波数据分析 HTI 介质的方位各向异性. *地球物理学报*, 55(11): 3805-3812.
- 张春贺, 乔德武, 李世臻等. 2011. 复杂地区油气地球物理勘探技术集成. *地球物理学报*, 54(2): 374-387.
- 张广智, 陈怀震, 印兴耀等. 2012. 基于各向异性 AVO 的裂缝弹性参数叠前反演方法. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(3): 845-851, 871.

(本文编辑 胡素芳)