

引用格式:韩磊,刘俊州,杨睿,等.基于VTI介质的叠前弹性阻抗反演方法应用——以川西坳陷须家河组致密砂岩裂缝性储层为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):313-319.

HAN Lei, LIU Junzhou, YANG Rui, et al. Application of pre-stack elastic impedance inversion method based on VTI medium: A case of tight sandstone fractured reservoir in Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 313-319.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.02.006

# 基于VTI介质的叠前弹性阻抗反演方法应用

## ——以川西坳陷须家河组致密砂岩裂缝性储层为例

韩磊<sup>1</sup>,刘俊州<sup>1</sup>,杨睿<sup>2</sup>,张广智<sup>2</sup>,周游<sup>2</sup>

(1.中国石化石油勘探开发研究院,北京100083;2.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛266580)

**摘要:**四川须家河组致密砂岩裂缝性储层储量丰富,但非均质性较强。重点分析川西坳陷须家河组致密砂岩裂缝性储层的实际情况,针对致密砂岩裂缝性储层呈现非均质的特点,基于岩石物理分析,推导出储层特征参数与各向异性参数之间的映射关系,开展针对致密砂岩储层的各向异性参数弹性阻抗反演流程。基于提出的裂缝参数反演方法,分别进行模型和实际工区数据的反演方法测试。结果表明,该方法具有良好的抗噪性,反演结果与测井值吻合较好,估算的各向异性参数能够较好地反映裂缝储层位置,能够实现致密砂岩储层裂缝特征的有效描述。

**关键词:**致密砂岩;储层裂缝;各向异性;弹性阻抗反演

中图分类号:TE19

文献标识码:A

### Application of pre-stack elastic impedance inversion method based on VTI medium: A case of tight sandstone fractured reservoir in Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression

HAN Lei<sup>1</sup>, LIU Junzhou<sup>1</sup>, YANG Rui<sup>2</sup>, ZHANG Guangzhi<sup>2</sup>, ZHOU You<sup>2</sup>

(1. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. School of Geoscience, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

**Abstract:** The tight sandstone reservoirs in Xujiahe Formation in Sichuan are rich in oil and gas, but highly heterogeneous. The tight sandstone fractured reservoirs of Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression are characterized by heterogeneity. Combining with the actual situation and based on rock physics analysis, the relationship between reservoir characteristic parameters and anisotropy parameters is deduced, and the anisotropic elastic impedance inversion workflow of tight sandstone reservoirs is carried out. Based on the proposed fracture parameter inversion method, the model and the actual work field data are tested, respectively. The results show that the proposed approach has great robustness, the inversion results are in good agreement with the well-log, and the estimated anisotropy parameters can accurately show the location of fractured reservoirs and achieve effective description of the fracture characteristics of tight sandstone reservoirs.

**Keywords:** tight sandstone; reservoir fracture; anisotropy; elastic impedance inversion

当前,随着非常规裂缝性油气藏勘探开发的深入进行,利用地震反演方法预测储层裂缝成为一种

有效的技术手段。对于致密砂岩储层,地下裂缝系统是重要的油气储集空间和流体渗流通道,大大提

收稿日期:2020-08-25。

第一作者简介:韩磊(1984—),男,硕士,高级工程师,从事地震资料储层预测研究。地址:北京市中国石化石油勘探开发研究院,邮政编码:100083。E-mail: hanlei.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“中西部地区碎屑岩领域勘探关键技术”(2016ZX05002-005);国家自然科学基金项目“基于深度学习的深层裂缝储层参数地震反演方法”(42074136)。

高储层有效孔隙度和整体渗透率,对油气开采和油气田产量有着重要影响。因此,分析地震波在致密砂岩储层中传播时的地震响应特征,基于方位叠前地震数据开展弹性阻抗反演方法,准确估算储层弹性参数和表征裂缝发育强度的各向异性参数,进而预测储层位置,为致密砂岩储层的勘探和开发提供可靠的地球物理依据<sup>[1-3]</sup>。

地震各向异性理论是叠前地震反演预测裂缝的基础<sup>[4]</sup>。地震各向异性的强弱能够有效表征地下裂缝的发育程度,进而预测储层的位置,最终指导致密砂岩储层的勘探和开发。THOMSEN<sup>[5]</sup>通过研究地震波在各向异性介质中的传播,基于弱各向异性假设构建了表征介质各向异性强弱的3个参数。RÜGER<sup>[6]</sup>推导了多种各向异性介质的反射系数近似公式,为裂缝性储层叠前地震反演奠定了理论基础。针对储集空间复杂且埋藏较深的致密砂岩油气藏,地震资料信噪比很低,限制了叠前AVO反演的精度。CONNOLLY<sup>[7]</sup>首次提出弹性阻抗反演方法,相比以往的叠前AVO反演方法,具有更好的稳定性和鲁棒性;WHITCOMBE等<sup>[8-9]</sup>在其基础上提出了扩展弹性阻抗(EEI)反演,用于储层的岩性检测和流体识别;WANG等<sup>[10]</sup>推导了以拉梅参数表示的弹性阻抗方程,并在实际工区中进行了应用。陈天胜等<sup>[11]</sup>推导了简化的HTI介质弹性阻抗近似公式。陈怀震等<sup>[12]</sup>利用基于方位弹性阻抗反演方法提取了储层弹性参数和各向异性强度参数。

对于低孔低渗的致密砂岩储层,研究致密砂岩中裂缝的发育程度对储层的预测与评估具有重要意义。国内外许多专家学者在描述裂缝性储层中地震响应与裂缝特征的关系上做了许多探索。PEREZ等<sup>[13]</sup>基于方位AVO技术利用P波地震数据实现实际工区的裂缝检测。MALLICK等<sup>[14]</sup>首先利用海洋地震资料的方位纵波AVO技术预测垂直裂缝。GRAY等<sup>[15]</sup>利用方位3D地震数据,开展叠前AVAZ反演方法研究,预测实际工区的裂缝特征(裂缝方位和密度)。印兴耀等<sup>[16]</sup>提出一种无约束的稳定方位AVO梯度反演方法,用来预测储层的裂缝发育情况。宗兆云等<sup>[17]</sup>充分利用叠前地震资料,开展基于贝叶斯理论的弹性阻抗反演方法,实现了碳酸盐岩和碎屑岩的裂缝含气性检测。撒利明等<sup>[18]</sup>详细讨论了缝洞

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。对于页岩储层预测及特征描述的研究,张广智等<sup>[19]</sup>基于叠前纵横波联合反演方法开展了页岩气储层的识别及流体预测的研究。陈怀震<sup>[20]</sup>基于岩石物理模型,针对裂缝性储层实际特点,开展了弹性参数和裂缝特征的地震反演预测方法研究。对于致密砂岩裂缝性储层的预测方法研究,国内罗群、马如辉、黄绪德等做了一些工作<sup>[21-23]</sup>,但基于叠前地震反演方法实现致密砂岩储层裂缝特征描述的相关文献资料较少。

主要针对川西坳陷新场地区须家河组致密砂岩裂缝性储层,针对工区储层特征及预测中存在的问题,从等效VTI介质理论出发,利用RÜGER推导的VTI介质近似公式,开展基于各向异性弹性阻抗反演的裂缝参数提取方法研究。利用工区的实际数据进行反演方法的试算,验证了本方法的可行性。

## 1 储层特征分析

### 1.1 工区概况

须家河组发育三角洲平原—前缘沉积砂体,主要砂岩储层的发育层段为须二段和须四段。储层类型复杂,分为4种类型:裂缝型,裂缝-孔隙型,孔隙-裂缝型,孔隙型。新场须二构造是由5个局部高点组成的NEE向复式背斜,构造南陡北缓。断裂走向复杂,主要为近SN、NE、EW向,规模较大的断层主要为SN向。纵向上划分为3个亚段,其中主产层为上亚段 $T_2x_2$ 和 $T_2x_3$ ,中亚段 $T_2x_4$ 、 $T_2x_5$ 以及下亚段 $T_2x_7$ 。纵向物性变化:新场构造带纵向上 $T_2x_4$ 、 $T_2x_5$ 砂体物性最好,其次为 $T_2x_2$ 、 $T_2x_1$ 砂体,均属低孔低渗致密储层。须家河组致密砂岩裂缝性储层有机质含量丰富,但地质条件复杂、储层物性条件差、非均质性强、流体关系复杂。目前仍存在几个关键问题亟待解决:

1) 缺少表征裂缝发育特点的各向异性参数曲线。致密碎屑岩储层地质特点复杂。裂缝往往与优质储层相关联,裂缝发育导致各向异性特征强烈,需要根据储层特点,建立合适的岩石物理模型,进而估计各向异性参数曲线,确定优质储层位置。

2) 缺少针对性的各向异性参数反演方法。须家河组气层纵横向分布非均质性极强,主要是受复杂

的地质条件影响,导致了常规地震反演储层识别难度很大,需要针对储层发育特征,选择合适的各向异性反演方法,提高各向异性叠前地震反演的稳定性。

### 1.2 针对性技术手段

针对川西新场工区地震道集的特点,形成了一套工区地震资料的处理流程,处理后信噪比与分辨率明显提升,为开展储层裂缝预测提供了数据基础。

综合考虑工区岩石矿物、裂缝特征,根据等效介质理论构建了低角度裂缝发育的VTI介质等效模型,实现了裂缝参数的定量表征,为后期开展储层各向异性反演提供井中先验信息。

常规波阻抗反演对致密砂岩储层中流体和特殊岩性的预测不够敏感,并且角道集资料的信噪比又是制约其广泛应用的重要因素。基于叠前地震资料的弹性阻抗反演是部分角度叠加数据反演的结果,通常远角度弹性阻抗比近角度阻抗对流体含量以及裂缝储层更加敏感,可以更好地适应生产;针对每个角道集数据提取子波,消除通常出现在远炮检距道集中的低频转移现象,从而更加稳定地反演储层参数以及裂缝参数。

须家河组气层纵横向分布非均质性极强的特点,导致常规地震反演储层识别难度加大。针对这一问题,根据储层发育特征,研究形成了一套合适的各向异性反演方法流程,提高了各向异性叠前地震反演的稳定性。同时,完成了川西新场工区地震资料各向异性参数反演,裂缝预测效果与钻井产能结果较为吻合,为开展裂缝分布规律研究提供了地球物理支持。

## 2 方法原理

### 2.1 等效VTI介质模型

沉积地层中最常见的各向异性模型就是横向各向同性介质(TI)。须家河组致密砂岩储层低角度缝、平缝普遍发育,岩心照片如图1所示。根据等效介质理论可以将其等效为具有垂直裂缝的横向各向同性(VTI)介质。VTI介质主要用于描述形成泥页岩过程中各种构造运动及外界作用下形成的成层状和片状的岩石特征,图2为VTI介质模型的示意图。

### 2.2 VTI介质中的弹性阻抗方程

根据RUGER推导的反射透射近似公式,利用THOMSEN各向异性参数来确定各向异性强弱,用以衡量地震波的反射透射系数的变化规律,并以各向同性介质为背景,推导出了基于各向异性介质反射透射系数的线性化近似表达<sup>[6]</sup>:

$$R_{pp}^{VTI}(\theta) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_{p0}}{\bar{V}_{p0}} - \left( \frac{2\bar{V}_{s0}}{\bar{V}_{p0}} \right) \frac{\Delta G}{G} + \Delta\delta \right] \sin^2\theta + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_{p0}}{\bar{V}_{p0}} + \Delta\varepsilon \right) \sin^2\theta \tan^2\theta \quad (1)$$

RÜGER将上述关系式分解为各向同性部分和各向异性扰动部分:

$$R_{pp}(\theta) \approx R_{pp-iso}(\theta) + \Delta R_{pp-ani}^{VTI}(\theta) \quad (2)$$

其中,

$$R_{pp-iso}(\theta) \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_p}{\bar{V}_p} + \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} \right) + \left( \frac{\Delta V_p}{2\bar{V}_p} - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta V_s}{\bar{V}_s} - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} \right) \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{\bar{V}_p} \sin^2\theta \tan^2\theta \quad (3)$$

$$\Delta R_{pp-ani}^{VTI}(\theta) \approx \frac{\Delta\delta}{2} \sin^2\theta + \frac{\Delta\varepsilon}{2} \sin^2\theta \tan^2\theta \quad (4)$$



图1 岩心照片  
Fig. 1 Core sample

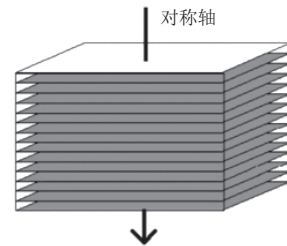


图2 VTI介质模型  
Fig. 2 VTI medium model

选取能够适用于纵波阻抗和横波阻抗参数反演的裂缝性储层反射系数各向同性部分( $R_{pp}^{iso}$ ) Fatti近似公式<sup>[32]</sup>:

$$R_{pp}(\theta) = \frac{1}{2} a(\theta) \frac{\Delta I_p}{I_p} + \frac{1}{2} b(\theta) \frac{\Delta I_s}{I_s} + \frac{1}{2} c(\theta) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{1}{2} d(\theta) \Delta \delta + \frac{1}{2} e(\theta) \Delta \varepsilon \quad (5)$$

其中,  $a(\theta)=1+\tan^2\theta$ ,  $b(\theta)=-8g\sin^2\theta$ ,  $c(\theta)=4g\sin^2\theta-\tan^2\theta$ ,  $d(\theta)=\sin^2\theta$ ,  $e(\theta)=\sin^2\theta\tan^2\theta$ 。

式(1)一式(5)中: $\theta$ 为入射角,°; $V_p$ 为纵波速度,km/s; $V_s$ 为横波速度,km/s; $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>; $I_p$ 为纵波阻抗,kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; $I_s$ 为横波阻抗,kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; $\delta$ 、 $\varepsilon$ 为无量纲的Thomsen各向异性参数。

$$EI(\theta) = V_p^{(1+\tan^2\theta)} V_s^{(-8K\sin^2\theta)} \rho^{(1-4K\sin^2\theta)} \quad (6)$$

式中: $EI$ 为弹性阻抗,其随入射角的变化而变化; $K$ 为与纵横波速度比的平方相关的常量。

对上述 $R_{pp}$ 反射公式两边同时积分再取对数可以得到VTI介质中的弹性阻抗表达式:

$$EI(\theta) = I_{p0} \left( \frac{I_p}{I_p} \right)^{a(\theta)} \left( \frac{I_s}{I_s} \right)^{b(\theta)} \left( \frac{\rho}{\rho} \right)^{c(\theta)} \exp(d(\theta)\delta + e(\theta)\varepsilon) \quad (7)$$

方程(7)是开展VTI介质弹性阻抗反演的基础,这里通过反演的不同入射角(小、中、大)对应的弹性阻抗,进一步提取储层弹性参数和THOMSEN各向异性参数,进而有效指导目标区域的成层状地质特征预测。

### 2.3 基于各向异性弹性阻抗的裂缝参数提取流程

根据褶积公式,结合已知的井数据资料,合成不同入射角、不同的地震记录。

$$S(\theta) = W(\theta) * R_{pp}(\theta) \quad (8)$$

式中: $S(\theta)$ 为不同的地震记录; $W(\theta)$ 为不同的地震子波(此处采用雷克子波)。

当确定弹性阻抗后,提取裂缝性储层弹性参数( $I_p$ 、 $I_s$ )和各向异性参数( $\Delta\delta$ 、 $\Delta\varepsilon$ )的方法如下:

从前面推导出的各向异性弹性阻抗公式可知,弹性参数( $I_p$ 、 $I_s$ )和各向异性参数( $\delta$ 、 $\varepsilon$ )与弹性阻抗之间是非线性指数关系,直接求解比较复杂。因此,需对各向异性弹性阻抗公式两侧同时取对数,将其线性化:

$$\ln \left[ \frac{EI(\theta)}{EI_0} \right] = (1 + \tan^2\theta) \ln \left( \frac{I_p}{I_{p0}} \right) - 8g \sin^2\theta \ln \left( \frac{I_s}{I_{s0}} \right) + \sin^2\theta \Delta\delta + \sin^2\theta \tan^2\theta \Delta\varepsilon \quad (9)$$

从以上公式可以发现,将具有 $n$ 个入射角的地震道集代入求解,则不同入射角的弹性阻抗的对数方程组为:

$$\begin{cases} \ln \left[ \frac{EI(\theta_1)}{EI_0} \right] = (1 + \tan^2\theta_1) \ln \left( \frac{I_p}{I_{p0}} \right) - 8g \sin^2\theta_1 \ln \left( \frac{I_s}{I_{s0}} \right) + \sin^2\theta_1 \Delta\delta + \sin^2\theta_1 \tan^2\theta_1 \Delta\varepsilon \\ \ln \left[ \frac{EI(\theta_2)}{EI_0} \right] = (1 + \tan^2\theta_2) \ln \left( \frac{I_p}{I_{p0}} \right) - 8g \sin^2\theta_2 \ln \left( \frac{I_s}{I_{s0}} \right) + \sin^2\theta_2 \Delta\delta + \sin^2\theta_2 \tan^2\theta_2 \Delta\varepsilon \\ \vdots \\ \ln \left[ \frac{EI(\theta_n)}{EI_0} \right] = (1 + \tan^2\theta_n) \ln \left( \frac{I_p}{I_{p0}} \right) - 8g \sin^2\theta_n \ln \left( \frac{I_s}{I_{s0}} \right) + \sin^2\theta_n \Delta\delta + \sin^2\theta_n \tan^2\theta_n \Delta\varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

使用求解混定问题所使用的马奎特反演方法(又称阻尼最小二乘法)求解式(10)中的纵横波阻抗以及裂缝各向异性参数。

综合上述讨论分析,提出了利用各向异性弹性阻抗进而提取弹性参数和各向异性参数的流程,具体流程如下:

- 1) 对已经确定的叠前地震道集做角度叠加,得到不同角度的道集数据;
- 2) 提取相应的不同角度的地震子波;
- 3) 将岩石物理模型和测井数据作为初始模型约束;
- 4) 对不同角度、不同方位的地震数据进行稀疏脉冲反演得到弹性阻抗数据体,并取对数;
- 5) 基于获取的弹性阻抗数据体和初始模型约束提取弹性参数和各向异性参数。

## 3 模型试算

选取某裂缝性储层工区的C井建模,如图3所示,利用该模型制作合成地震记录并添加不同信噪比的高斯噪声,采用上面提出的方法流程进行基于方位弹性阻抗反演的致密砂岩储层弹性参数和各向异性参数提取方法试算,如图4、图5所示。反演结果表明,在无噪声情况下,该方法能够获取与真实值基本吻合的纵横波阻抗及裂缝各向异性参数,验证

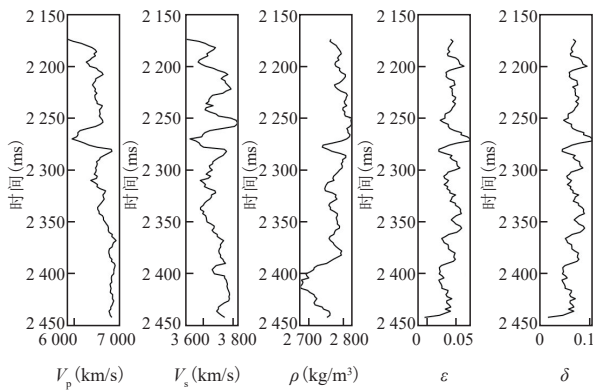


图3 三层VTI介质模型

Fig. 3 Three-layer VTI medium model

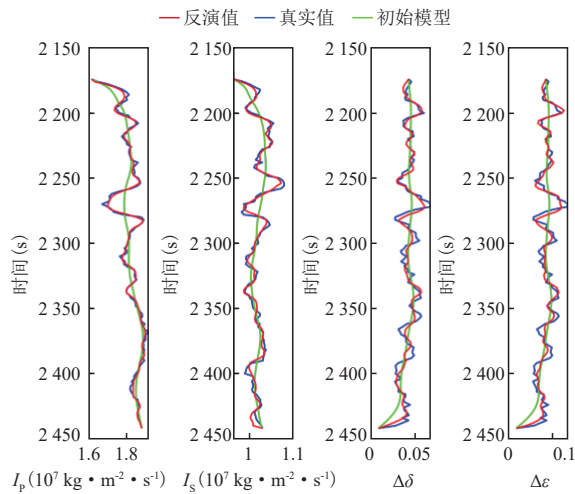


图4 信噪比为5时测井数据模型参数反演结果与真实值对比

Fig. 4 Comparison between estimated results and real data when S/N is 5

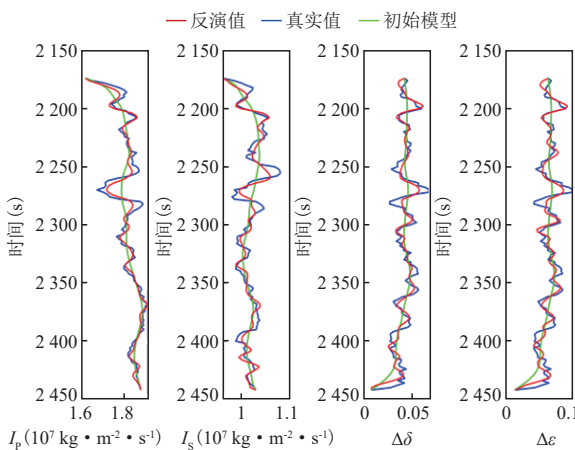


图5 信噪比为1时测井数据模型参数反演结果与真实值对比

Fig. 5 Comparison between estimated results and real data when S/N is 1

了方法的可行性。在适当噪声的情况下,纵横波阻抗及裂缝各向异性参数的反演结果与真实值仍有较高的吻合度。

## 4 实际工区应用

选取的实际工区位于四川盆地新场工区须家河组,本区目标储层是典型的致密砂岩气藏。工区主要发育高、低角度裂缝,储集类型为孔隙-裂缝型,以裂缝性储层为主。首先对地震资料进行品质分析,工区的部分CMP道集及其频谱分析如图6、图7所示,可以看出,叠前CMP道集信噪比较低,随机高频噪音严重,能量分布不均匀。需要做进一步处理,提高地震资料品质。经过处理后的叠前CMP道集如图8所示。利用处理后的叠前CMP道集进行该实际工区反演试算,共有11口井参与模型约束,提取储层

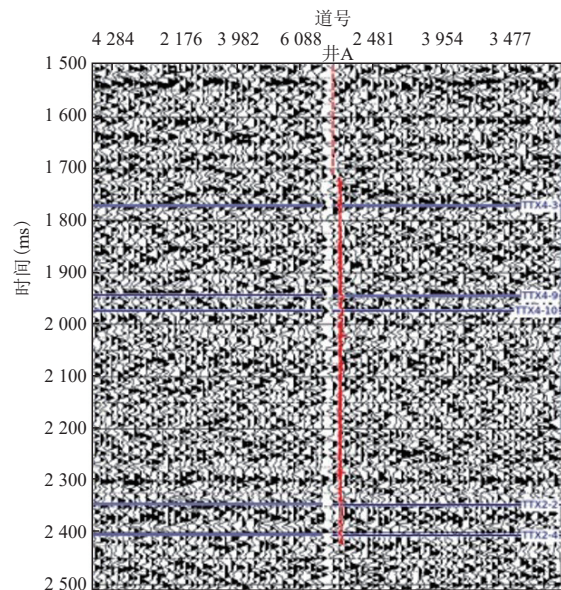


图6 原始叠前CMP道集

Fig. 6 Original pre-stack CMP seismic profiles

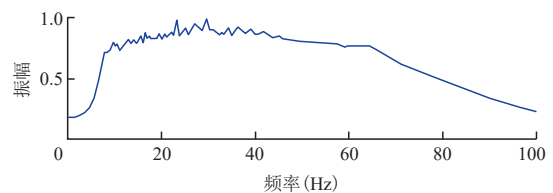


图7 叠前CMP道集频谱

Fig. 7 Spectrum of pre-stack CMP seismic profiles

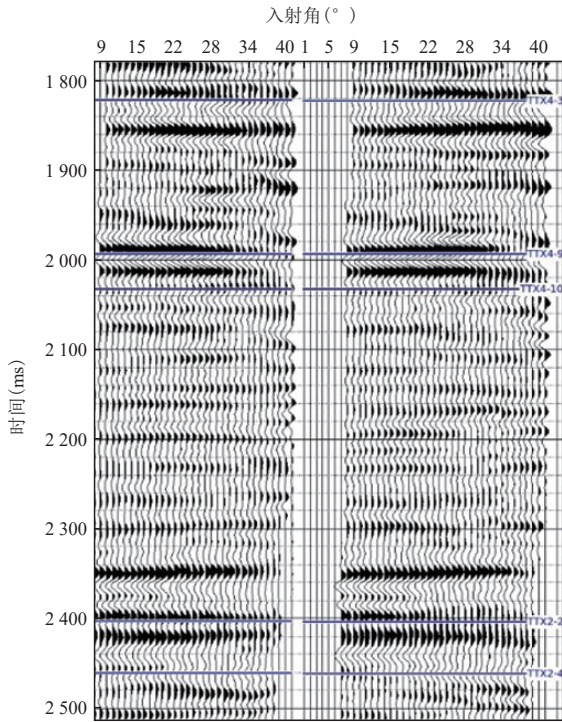


图8 处理后叠前CMP道集  
Fig. 8 Processed pre-stack CMP seismic profiles

弹性参数以及各向异性参数,如图9、图10所示。实际工区反演结果表明,通过地震数据反演得到的岩石弹性参数 $I_p$ 、 $I_s$ 与井上信息匹配效果良好,井符合率在80%以上,能够很好地指示砂体位置。反演估算得到的裂缝各向异性参数 $\Delta\delta$ 、 $\Delta\varepsilon$ 呈现出明显的高值特征,能够很好地指示砂体裂缝发育区域,与测井岩心照片匹配一致。

### 5 结论

针对非常规致密砂岩储层,分析裂缝诱导的储层各向异性特征,推导相应的反射系数近似公式,进一步推导各向异性弹性阻抗公式,建立基于各向异性弹性阻抗的致密砂岩储层各向异性反演方法流程,并最终实现一维井数据和实际工区的储层弹性参数以及各向异性参数的提取。一维模型测试结果表明,该方法具有较好的抗噪性和可靠性;实际工区的反演结果表明,相比于常规波阻抗反演方法对流体和裂缝性储层预测并不敏感的问题,该方法可较为准确地估算裂缝各向异性参数,进而指导储层中

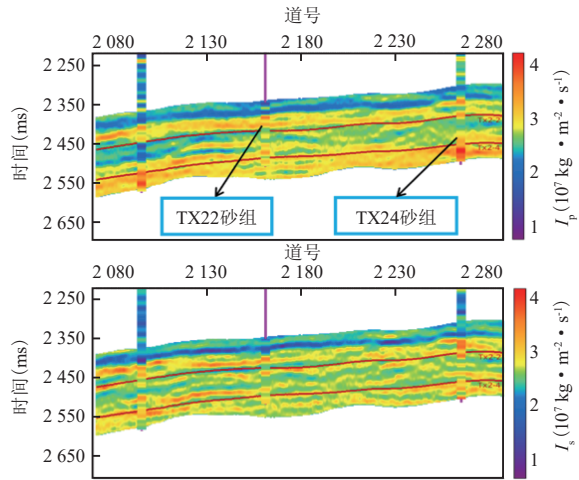


图9 实际工区弹性参数 $I_p$ 、 $I_s$ 反演结果  
Fig. 9 Estimated inversion results of elastic parameters  $I_p$  and  $I_s$  in real workflow

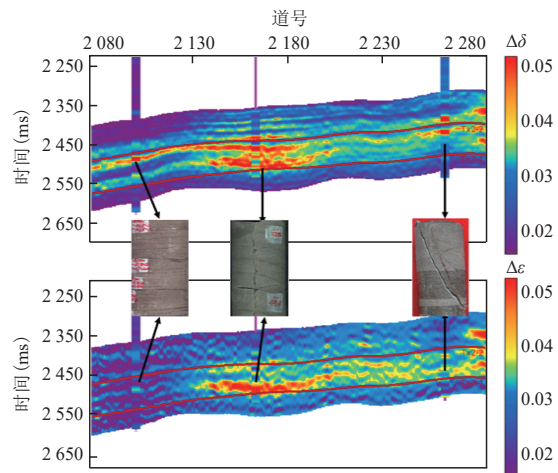


图10 实际工区裂缝岩石物理参数 $\Delta\delta$ 、 $\Delta\varepsilon$ 反演结果  
Fig. 10 Estimated inversion results of fracture petrophysical parameters  $\Delta\delta$  and  $\Delta\varepsilon$  in real workflow

的砂体位置以及裂缝发育区域,对裂缝性储层的勘探和开发具有较好的指导作用。

#### 参考文献

[1] 穆龙新,赵国良,田中元,等.储层裂缝预测研究[M].北京:石油工业出版社,2009.  
MU Longxin, ZHAO Guoliang, TIAN Zhongyuan, et al. Research on reservoir fracture prediction[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.

[2] 刘成斋.泥岩裂缝预测理论与实践[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2003.  
LIU Chengzhai. Theory and practice of mudstone fracture

- prediction[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003.
- [3] 张宁洁,张敏,曹翔宇,等.致密砂岩气储层裂缝评价方法与表征[J].地学前缘,2015,22(4):173-187.  
ZHANG Ningjie, ZHANG Min, CAO Xiangyu, et al. Assessment method and characterization of tight sandstone gas reservoir fractures[J]. *Cience Frontiers*, 2015, 22(4): 173-187.
- [4] 王家映.地球物理反演理论[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.  
WANG Jiaying. *Geophysical inversion theory*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.
- [5] THOMSEN L. Weak elastic anisotropy[J]. *Geophysics*, 1986, 51: 1954-1966.
- [6] RÜGER A. Reflection coefficient and azimuthal AVO analysis in anisotropic media[D]. Gotham City: Colorado School of Mines, 1996.
- [7] CONNOLLY P. Elastic impedance[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(4): 438-452.
- [8] WHITCOMBE D N. Elastic impedance normalization[J]. *Geophysics*, 2002, 67(1): 60-62.
- [9] WHITCOMBE D N, CONNOLLY P, REAGAN R. Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction[J]. *Geophysics*, 2002, 67(1): 63-67.
- [10] WANG B L, YIN X Y, ZHANG F C. Lamé parameters inversion based on elastic impedance and its application[J]. *Applied Geophysics*, 2006, 3(3): 174-178.
- [11] 陈天胜,魏修成,刘洋.一种新的各向异性弹性阻抗近似公式[J].石油物探,2006,45(6):563-569.  
CHEN Tiansheng, WEI Xiucheng, LIU Yang. A new approximate formula for anisotropic elastic impedance[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006, 45(6): 563-569.
- [12] 陈怀震,印兴耀,张金强,等.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[J].地球物理学报,2014,57(10):3431-3441.  
CHEN Huaizhen, YIN Xingyao, ZHANG Jinqiang, et al. Seismic inversion for fracture rock physics parameters using azimuthally anisotropic elastic impedance[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10): 3431-3441.
- [13] PEREZ M A, GIBSON R I, TOKSOZ M N. Detection of fracture orientation using azimuthal variation of P wave AVO responses [J]. *Geophysics*, 1999, 64(4): 1253-1265.
- [14] MALLICK S, FRAZER L N. Reflection/transmission coefficients and azimuthal anisotropy in marine seismic studies[J]. *Geophysics*, 1991, 56(1): 241-252.
- [15] GRAY D, HEAD K. Fracture detection in Manderson field: A 3-D AVAZ case history[J]. *The Leading Edge*, 2000, 19(11): 1214-1221.
- [16] 印兴耀,刘志国,李春鹏,等.裂缝型储层预测的稳定方位 AVO 梯度无约束反演方法研究[J].石油物探,2014,53(6): 683-691.  
YIN Xingyao, LIU Zhiguo, Li Chunpeng, et al. Fracture formation prediction with a steady azimuth AVO gradient unconstrained inversion method[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2014, 53(6): 683-691.
- [17] 宗兆云,印兴耀,吴国忱.拉梅参数直接反演技术在碳酸盐岩缝洞型储层流体检测中的应用[J].石油物探,2011,50(3): 241-246.  
ZONG Zhaoyun, YIN Xinyao, WU Guochen. Application of direct parameter inversion technique in fluid detection of carbonate fracture-cavern type reservoirs[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2011, 50(3): 241-246.
- [18] 撒利明,姚逢昌,狄帮让,等.缝洞型储层地震识别理论与方法[M].北京:石油工业出版社,2010.  
SA Liming, YAO Fengchang, DI Bangrang, et al. *Theory and method of seismic identification of fracture-cavity reservoir*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [19] 张广智,杜炳毅,李海山,等.页岩气储层纵横波叠前联合反演方法[J].地球物理学报,2014,57(12):4141-4149.  
ZHANG Guangzhi, DU Bingyi, LI Haishan, et al. The method of joint pre-stack inversion of PP and P-SV waves in shale gas reservoirs[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(12): 4141-4149.
- [20] 陈怀震.基于岩石物理的裂缝型储层叠前地震反演方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.  
CHEN Huaizhen. *Study on methodology of pre-stack seismic inversion for fractured reservoirs based on rock physics*[D]. Qingdao: China university of petroleum, 2015.
- [21] 罗群.致密砂岩裂缝型油藏的岩心观察描述——以文明寨致密砂岩为例[J].新疆石油地质,2010,31(3):229-231.  
LUO Qun. Core observation and description of tight sandstone fractured reservoir: an example from Wen-mingzhai tight sandstone[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(3): 229-231.
- [22] 马如辉.致密砂岩储层的裂缝预测[J].天然气工业,2005,25(10):36-37.  
MA Ruhui. Fracture prediction of tight sandstone reservoir[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(10): 36-37.
- [23] 黄绪德,郭正吾.致密砂岩裂缝气藏的地震预测[J].石油物探,2000,39(2):1-14.  
HUANG Xude, GUO Zhengwu. Seismic prediction of tight-sandstone gas reservoirs[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2000, 39(2): 1-14.
- [24] FATTI J L, VAIL P, SMITH G C, et al. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique[J]. *Geophysics*, 1994, 59(9): 1362-1376.
- [25] 印兴耀,刘志国,李春鹏,等.裂缝型储层预测的稳定方位 AVO 梯度无约束反演方法研究.石油物探,2014,53(6): 683-691.  
YIN Xingyao, LIU Zhiguo, Li Chunpeng, et al. Fracture