

南海石油天然气地球物理勘探新技术专题

窄方位拖缆地震数据角度域成像处理及各向异性特征研究

刘军^{1,2}, 刘道理^{1,2}, 邹雅铭^{1,2}, 白海军^{1,2}, 张文珠^{1,2}, 王清辉^{1,2}, 王国权^{3,4*}

1 中海石油深海开发有限公司, 深圳 518054

2 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054

3 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

4 中国石油大学(北京)CNPC物探重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, iskyer@foxmail.com

收稿日期: 2023-05-22

国家自然科学基金项目(41574108, 42174130)、物探应用基础实验和前沿理论方法研究(2022DQ0604-03)联合资助

摘要 由于海上油气勘探常用的拖缆地震数据的方位角范围比较窄, 在利用各向异性特征进行裂缝性等复杂储层预测中, 常常会受到限制。如何有效地增加海上拖缆数据的方位信息, 提取到成像道集中的各向异性特征, 通过各向异性反演对裂缝性复杂储层进行表征是关键。本文开展了针对窄方位拖缆地震数据的成像处理方法研究及其处理后道集数据的各向异性特征分析, 建立了一套有效的海上窄方位拖缆数据的成像处理技术流程, 并在此基础上开展了叠前各向异性反演以表征地下裂缝密度。窄方位的拖缆地震数据通过局部角度域全方位成像处理后, 有效增加了地震数据的方位信息, 并有能力输出得到角度域的全方位反射道集数据。论文选取珠江口盆地潜山油气藏勘探区的实际数据进行应用研究, 全方位的偏移成像处理结果显著提升了潜山裂缝发育区的成像效果, 同时利用全方位的角度域反射道集数据能够有效反演得到表征潜山内幕裂缝发育情况的参数。实际数据应用结果表明, 基于窄方位拖缆地震数据的角度域成像处理及各向异性参数反演技术, 可以很好地潜山裂缝储层描述, 确定裂缝发育优质目标区, 可在其他类似的潜山油气藏勘探开发中进行应用。

关键词 拖缆数据; 窄方位; 各向异性; 局部角度域; 方位道集

Angle domain imaging processing and anisotropic characteristics of narrow azimuth streamer seismic data

LIU Jun^{1,2}, LIU Daoli^{1,2}, ZOU Yaming^{1,2}, BAI Haijun^{1,2}, ZHANG Wenzhu^{1,2}, WANG Qinghui^{1,2}, WANG Guoquan^{3,4}

1 CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen 518054, China

2 Shenzhen Branch of CNOOC China Limited, Shenzhen 518054, China

3 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249,

引用格式: 刘军, 刘道理, 邹雅铭, 白海军, 张文珠, 王清辉, 王国权. 窄方位拖缆地震数据角度域成像处理及各向异性特征研究. 石油科学通报, 2023, 06: 738-754

LIU Jun, LIU Daoli, ZOU Yaming, BAI Haijun, ZHANG Wenzhu, WANG Qinghui, WANG Guoquan. Angle domain imaging processing and anisotropic characteristics of narrow azimuth streamer seismic data. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 738-754. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.068

China

4 CNPC Key Laboratory of Geophysical Exploration, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Due to the narrow azimuth range of offshore streamer seismic data, it is often limited in predicting complex reservoirs such as fractures using anisotropic features. Therefore, how to effectively increase the azimuth range of offshore streamer data, extract the anisotropic features of the imaging gather, and characterize fractured reservoirs is crucial. The paper studies the imaging processing methods for narrow azimuth streamer seismic data and analyzes the anisotropic characteristics of processed gathers. We establish a set of effective imaging processing flow of narrow azimuth towing cable data. On this basis, an effective prestack anisotropy inversion is carried out to show the underground fracture density. By using local angle domain imaging processing technology, the azimuth information of narrow azimuth streamer seismic data can be increased, and has the ability to output the omni-directional reflection gather data in the angle domain. In this paper, the seismic data of the buried hill exploration area in the Pearl River Mouth Basin are selected for application research, and the omni-directional migration imaging results significantly improve the imaging effect of the buried hill fracture development area. Moreover, the parameters characterizing the development of fractures in the buried hill can be effectively inverted by using omni-directional angle domain reflection gather data. The actual data application results indicate that the narrow azimuth streamer data imaging processing technology in the angle domain and the anisotropic parameter inversion method proposed in the paper can effectively describe buried hill fracture reservoirs, determine high-quality target areas for fracture development, and can be applied in the exploration and development of other similar buried hill hydrocarbon reservoirs.

Keywords streamer data; narrow azimuth; seismic anisotropy; local angle domain; azimuth gathers

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.068

0 引言

我国南海珠江口盆地经过多年的油气勘探开发,是海上重要的油气资源盆地,所发现的油田及含油构造主要分布于惠州、恩平、陆丰、西江、白云等富烃凹陷及其周边地区^[1]。目前,急需向中深层开拓新的勘探领域,对于古潜山油气藏的勘探,已经成为珠江口盆地油气勘探的重要目标方向。此外,惠州凹陷已经成功钻遇到花岗岩潜山油藏,为下一步在古潜山进行油气勘探提供依据。惠州凹陷的古潜山油气藏储层主要为裂缝性储层,发育有成组缝、网状缝和孤立缝等不同类型的裂缝。但古潜山油藏埋藏深度大,已钻遇井少,钻井、测井等资料相对匮乏,对于潜山内幕油气藏勘探评价相当不利,因此,如何充分利用地震资料开展裂缝发育的优质储层预测以降低勘探风险,成为古潜山油气勘探重要的研究难点^[2]。

古潜山内幕成像最重要的特征是其明显的杂乱复合反射特征,这与古潜山内幕空间分布规律性差、横向变化大有关,是受不同尺度断裂带空间展布特征所控制的。作为一种常见的油气储集空间和运移通道,裂缝引起的最重要的特征即是地震各向异性^[3-6],其强弱可用地震各向异性参数来表征^[7]。针对地震各向异性的研究,早期Crampin等分析研究了方位各向异性的特征^[8-11]。后来,Thomsen^[12],Hudson^[13-15]和Schoenberg等^[16-18]分别建立了能够表征裂缝介质的

岩石物理模型,为研究叠前地震各向异性(Amplitude versus azimuth, AVAz)奠定了基础。因此,通过利用叠前方位各向异性特征进行叠前各向异性反演,可以针对裂缝性储层进行表征。Rüger给出了HTI介质下弱各向异性参数表示的叠前反射系数近似方程^[19-20],该公式广泛应用于裂缝性储层预测中。通过将HTI介质下的Rüger公式进行简化,可以实现对于含噪地震数据中反演得到弹性参数及各向异性梯度项^[21]。但Rüger近似方程存在两点显著的缺陷:一是反演获得的各向异性梯度不能确定其正负号^[21];二是Rüger近似方程求解时会对其高阶项忽略不计,这就导致反演得到的值仅仅是在小角度入射时的一个近似解。为了解决这一问题,一般采用付立叶分析技术对叠前地震反射数据进行方位分解^[22-23],进而得到表示为裂缝方位角和与各向异性强度相关的付立叶系数值。因此,可以利用该方法分析HTI介质的叠前各向异性特征,并确定不同充填流体的裂缝参数与各向异性的响应特征关系^[24-26]。Downton等首先分析了付立叶系数的展开形式以及展开阶数的幅值大小以削弱噪声的影响,并研究了付立叶系数与各向异性的关系^[27]。在利用付立叶系数展开得到各向异性参数的反演方法中,可采用两步法叠前各向异性反演^[25-26],即在获得分角度方位弹性阻抗的基础上,利用付立叶系数公式提取得到付立叶系数以表征地下裂缝密度的发育情况,该方法在实际数据应用中与传统方法相对比,取得了较好的效

果。国内外学者逐步将付立叶系数应用于各向异性参数反演的流程中,使得它能够反演得到一个稳定的描述裂缝属性的结果,为裂缝刻画提供准确的各向异性参数信息。

研究表明,利用叠前各向异性参数反演进行裂缝性储层预测,需要有相对较宽的叠前方位道集数据。但是,海上油气勘探主要采用拖缆地震采集和成像处理^[28],通常成像处理后不输出方位道集数据。同时,由于常规的海上拖缆地震数据属于窄方位(纵横比小于0.5)采集,对于后续进行方位各向异性特征进行反演和储层表征,具有一定的难度^[29-32]。因此,如何利用有限方位采集的地震资料进行各向异性特征研究,为后续的裂缝预测提供可靠的数据成为亟需解决的问题。目前已有一些针对性的方法用于提高裂缝预测技术在窄方位地震数据的应用效果,主要包括了改善窄方位地震数据品质和发展特定的窄方位角裂缝预测技术两种思路。2015年苏世龙等利用限炮检距和五维插值的方法改善了窄方位资料中不同炮检距和方位角分布不均匀的问题^[29]。同年,罗辑等发展了一种只需两组方位角和入射角的弹性阻抗反演方法,一定程度上降低了对方位角的要求,在裂缝型储层中的流体识别取得了一定的应用效果^[30]。熊晓军等提出了一种利用窄方位数据中AVO振幅的差异定量表征裂缝密度的方法,该方法规避了利用窄方位地震数据开展AVAz反演的不稳定性,实现了利用振幅差异的统计特性定量表征地下裂缝分布^[31]。在此基础上,熊晓军等又通过引入网格聚类方法,增强裂缝空间分布的连续性特征^[32]。

为了解决上述问题,本文开展了基于窄方位海上拖缆数据的成像处理技术探索,利用基于成像点局部角度域成像处理增加窄方位拖缆地震数据的方位信息,并输出得到角度域的全方位道集数据。输出的全方位反射角道集的分析结果表明,处理后的地震资料方位角信息更加丰富,完全满足利用叠前各向异性反演开展裂缝预测的要求。同时在基于HTI介质模型的纵波反射系数方位各向异性特征理论分析的基础上,选取珠江口盆地HZ目标区进行应用研究,实现了利用各向异性梯度反演对地下裂缝密度的预测。

1 方法原理

制约海上窄方位地震资料开展裂缝预测的关键,在于特定的炮检组合方式使得方位角集中于拖缆采集的方向。因此,从常规的叠前成像道集数据中很难观

察到AVAz特征。利用数据规则化技术(如五维插值)可以有效地改善因采集条件限制引起的地震数据空间分布能量差异问题。但是,对于利用海上拖缆采集得到的窄方位地震数据,由于地下地质体只能接收到来自单方向的照明,数据规则化方法并不能从根本上解决缺失方位的成像问题。而且,目前获得的分方位叠前地震资料中成像点信息受空间采样率、偏移孔径和偏移速度等因素的影响,可能并非来自地下同一成像点^[33]。

1.1 局部角度域(LAD)成像处理方法

考虑到方位各向异性是针对地下同一成像点的特征,利用局部角度域(Local Angle Domain, LAD)对地下真实反射点进行全方位成像,能在窄方位采集数据中挖掘出更丰富的方位信息。基于LAD的全方位成像技术是在利用全方位网格层析成像等方法获得高精度速度模型的基础上,通过射线追踪技术将地面的炮检关系映射到地下LAD域内并实现全方位的成像。局部角度域的概念来自于局部坐标系,由于地下介质的复杂性,炮点-检波器的相对位置(即传统的全局域)并不能代表地下波场入射时的真实方位角,因此,描述成像点附近小范围内射线的入射和散射情况才能更有效地提升地震成像精度。在LAD域内,入射射线和反射射线组成了射线对,射线对法线的倾角和方位角以及射线对夹角的开角和方位角都被唯一地记录下来。

图1为地表震源和检波器的相对位置关系映射到地下LAD域的示意图,LAD域内每个成像点可以根据由入射射线和反射射线组成的射线对所对应的法线倾角、方位角、开角以及射线对所在平面的方位角唯一地确定。因此,基于LAD的全方位成像叠前道集中某一时刻 t 的地震数据,可以表示成4个极坐标分量,其与炮检相对位置关系的映射系数表示为:

$$\mathbf{B}(S, R, t) \rightarrow \mathbf{D}(M, \sigma_1, \sigma_2, \phi_1, \phi_2) \quad (1)$$

其中, \mathbf{B} 为地表炮检相对位置关系划分的地震数据, S 和 R 表示地表震源和检波器的位置, \mathbf{D} 为LAD域内的成像结果, M 为LAD域内的成像点, σ_1 、 σ_2 、 ϕ_1 和 ϕ_2 分别表示射线对的法线倾角、法线方位角、开角及射线对夹角的开方位角。

将全局坐标映射到局部角度域的过程称为LAD正变换,Koren和Ravve给出了详细的讨论^[34]。LAD正变换是将之前由慢度方向定义的射线对转换为LAD域的4个角度信息,变换过程中除了射线对的夹角(即开角)在两种坐标系中保持不变外,其余3个角度的表

达均与坐标变换后的结果有关。LAD域内射线对夹角的法线向量 n_{loc}^{rays} 可以表示为：

$$n_{loc}^{rays} = \frac{A^T p_{glob}^{in}}{\beta^{in}} + \frac{A^T p_{glob}^{re}}{\beta^{re}} \quad (2)$$

其中， A 为转换矩阵， p_{glob}^{in} 和 p_{glob}^{re} 分别表示全局坐标域内入射射线和反射射线的慢度方向， β^{in} 和 β^{re} 表示对应射线相速度和轴向纵波速度的比值。根据公式(2)可以确定射线对夹角法线的倾角和方位角，而射线对的开角不变，射线对夹角的开方位角余弦 $\cos \gamma_2$ 可以表示为零方位角和开角偏移投影的内积：

$$\cos \gamma_2 = [N^{loc} - n^{rays} (N^{loc} \cdot n^{rays})] \cdot [\Delta p - n^{rays} (\Delta p \cdot n^{rays})] \quad (3)$$

其中， N^{loc} 为经坐标变换后LAD域中的正北向量， n^{rays} 为射线对法线， Δp 为开角偏移量。

目前的偏移类算法主要包括全波偏移和渐进近似偏移，前者主要围绕波动方程展开，如逆时偏移等；后者则以射线理论为基础，如克希霍夫偏移等^[33]。基于LAD域的全方位偏移成像方法仍是射线驱动的，同克希霍夫偏移间的差别并不如全波偏移和渐进近似偏移之间的差异显著。基于LAD域的全方位偏移成像在

由全局坐标映射到LAD域的过程同样依赖于射线追踪。传统的克希霍夫偏移方法是在确定地表炮点和检波点的位置后，通过射线追踪技术对未偏移的道集数据计算每个设定的散射点成像时间，并输出最终的成像结果。该方法主要是沿着绕射波轨迹对振幅求和，将同一个偏移距域内的道集数据叠加生成偏移剖面。这种做法导致的一个明显的问题是，在将CMP道集分选成共偏移距域后，虽然不同偏移距数据间相互是独立的，但在同一个偏移距域的道集数据，其射线路径也是有显著区别的。在大多数情况下，克希霍夫偏移依据最大能量标准选择一条射线作为炮检间能量传播的路径，这种做法明显忽略了地震波传播的多路径特性。因此，利用传统偏移方法获得的OVT道集，其方位角的定义并非根据地下成像点所对应的入射射线的方位，而是根据地表的炮检相对关系直接定义的，来自地表的方位信息也并不能真实地反映地下成像点所对应方位角的变化特征。

如图2所示，围绕地下同一成像点的两对炮检组合 $S_1 - R_1$ 和 $S_2 - R_2$ 具有相同的偏移距，且代表方位角的相对位置关系也完全相同，在传统的OVT道集定义中

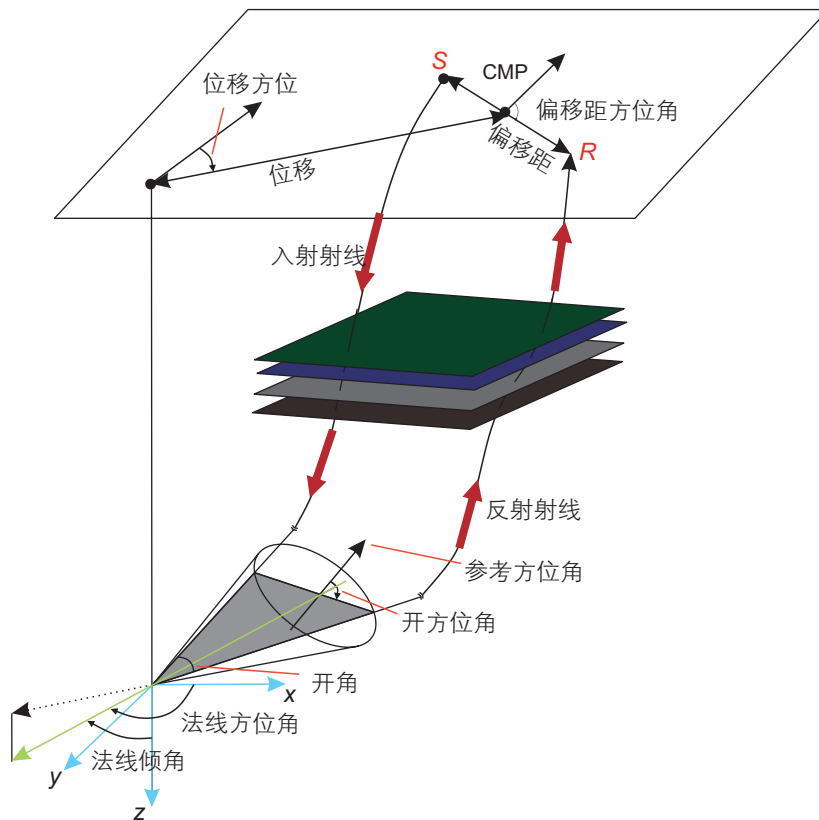


图1 成像点局部角度域与地表炮检相对位置关系映射示意图

Fig. 1 Mapping diagram of the relation between the local Angle domain of the imaging point and the relative location of surface detection

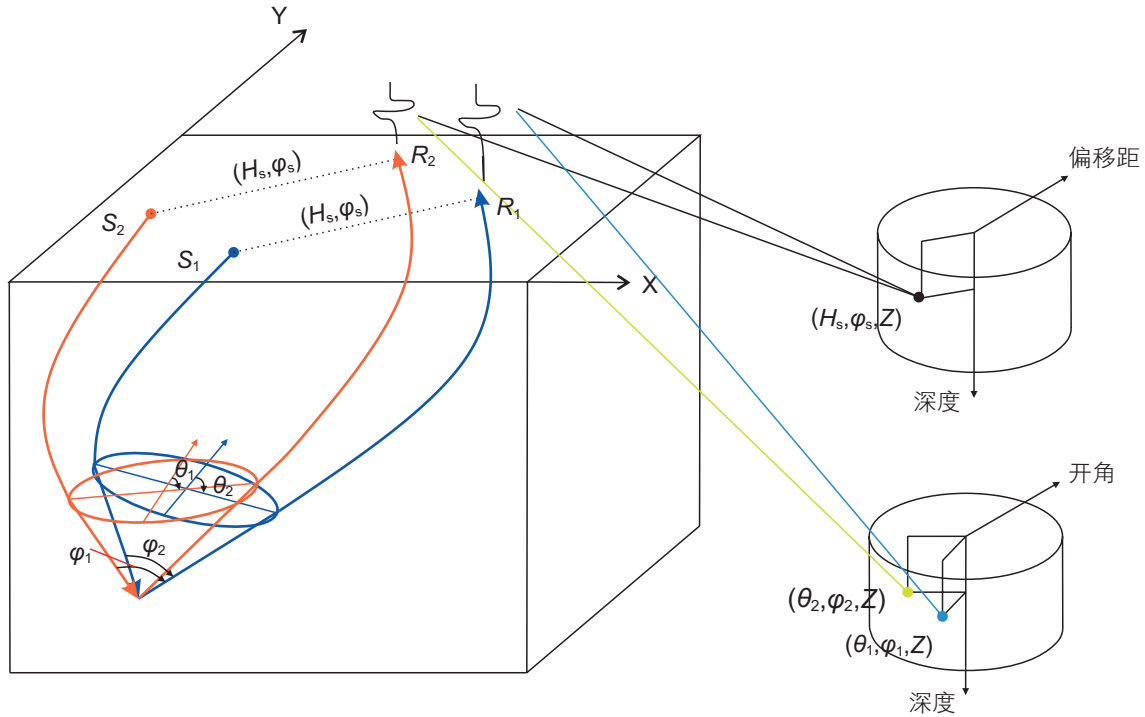


图2 反射点角度和地表炮检关系对方位的定义差别

Fig. 2 Reflection point Angle and surface detection are related to the difference in the definition of each other's location

会被分入同一扇区内。但是，从图2中可以看出，在成像点附近两对炮检组合在LAD域内其方位角存在着较大的差异，存在 $\phi_1 > \phi_2$ 的关系。假设在成像点附近 $S_2 - R_2$ 对应的射线对所在的平面平行于x方向，即LAD域中的方位角 ϕ_2 与根据地表相对位置关系定义的方位角相同，那么利用全方位偏移成像后的数据中完全有能力提取更大方位角的地震数据。

由于地下的每一个成像点，都在射线追踪后存储了关于该深度位置的全局坐标和LAD域内的4个角度信息共七个变量，对于海量的地震数据而言，这会耗费大量的计算机资源。为了降低地震成像的运算要求，一般会通过积分运算减少参数，通过对不同角度的积分可以选择偏移成像输出共反射角道集或共倾角道集的结果，其原理如下：

$$\begin{cases} D_{\sigma}(M, \sigma_1, \sigma_2) = \int W_{\sigma}(M, \sigma_1, \sigma_2, \phi_1, \phi_2) \\ \quad L(M, \sigma_1, \sigma_2, \phi_1, \phi_2) H^2 \sin \phi_1 d\phi_1 d\phi_2 \\ D_{\phi}(M, \phi_1, \phi_2) = \int W_{\phi}(M, \sigma_1, \sigma_2, \phi_1, \phi_2) \\ \quad L(M, \sigma_1, \sigma_2, \phi_1, \phi_2) H^2 \sin \sigma_1 d\sigma_1 d\sigma_2 \end{cases} \quad (4)$$

其中， D_{σ} 和 D_{ϕ} 分别代表映射结果分解后的全方位倾角道集和全方位反射角道集， W 为对应的积分权重， L 为经过预处理后的输入数据， H 为倾斜因子。公式(4)即

为LAD域中全方位偏移成像的过程，这与克希霍夫偏移中的叠加原理相似^[34]。

输出的全方位倾角道集，是对开角和开方位角积分得到的，是关于射线对法线倾角和方位角的函数。在倾角道集中，每个同相轴对应的射线都具有相同的视反射面和不同的开角，因此同时包含了镜像能量和散射能量，其中镜像能量主要突出地层的连续性特征，而散射能量主要突出地下绕射点的能量。因此，通过调整两种能量的加权方式，即可突出这两种能量在地震成像中的作用，分别加强连续性地层和断层、断裂等地质结构的成像特征。利用从叠后偏移数据中提取的倾角、方位角等构造属性，即可实现对共倾角道集中反射和散射能量的分离。镜像加权和散射加权成像的结果可以表示为：

$$\begin{cases} I_{\text{spec}} = \sum_{\sigma_1, \sigma_2} D_{\sigma}(M, \sigma_1, \sigma_2) f(M, \sigma_1, \sigma_2) \\ I_{\text{diff}} = \sum_{\sigma_1, \sigma_2} D_{\sigma}(M, \sigma_1, \sigma_2) [1 - f(M, \sigma_1, \sigma_2)] \end{cases} \quad (5)$$

其中， $f(M, \sigma_1, \sigma_2)$ 为权重因子。

而利用全方位偏移成像输出的共反射角道集，有着更加丰富的方位角和反射角信息，是真正意义上的三维道集，可以实现各向异性叠前反演及裂缝预测，解决窄方位拖缆数据中传统方位角定义对宽方位振幅

分析的限制。此外，在全方位反射角道集中提取的剩余时差信息还可以作为网格层析的输入数据以开展高精度的深度域速度建模，此处不再赘述。

1.2 HTI 介质各向异性特征

Rüger 系统地阐述了 HTI 介质反射系数公式，通过上、下层介质纵横波速度、密度、各向异性参数以及入射角、方位角等信息来直观展现反射系数受储层参数的影响^[20]，其公式如下：

$$R_{PP}^{HTI}(\theta, \phi) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{\bar{Z}} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} - \left(\frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \frac{\Delta G}{\bar{G}} + \left[\Delta \delta + 2 \left(\frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \Delta \gamma \right] \cos^2 \phi \right\} \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} + \Delta \varepsilon \cos^4 \phi + \Delta \delta \sin^2 \phi \cos^2 \phi \right\} \times \sin^2 \theta \tan^2 \theta \quad (6)$$

式中， θ 和 ϕ 分别代表入射角和方位角；定义 $Z = \rho V_{P0}$ ，因此 $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ ， $\bar{Z} = (Z_1 + Z_2) / 2$ ，上述公式中 ΔX 、 \bar{X} (X 为 α 、 β 、 G 等参数)具有相同的运算法则。式中， α 、 β 和 G 是与纵横波直接关联的参数项，有如下表达式：

$$\begin{cases} \alpha = V_{P0} \sqrt{1 + 2\varepsilon} \\ \beta = V_{S0} \sqrt{1 + 2\gamma} \\ G = \rho \beta^2 \end{cases} \quad (7)$$

Downton 等人将纵波反射系数近似公式可以整理成的付立叶级数的形式^[21]：

$$R_{PP}^{HTI}(\theta, \phi) = a_0 + a_2 \cos 2\phi + a_4 \cos 4\phi \quad (8)$$

同时，结合 Rüger 近似方程在小角度入射的情况下，可以舍弃高阶项，整理为两项 Rüger 公式，其具体形式如下：

$$R_{PP}^{HTI}(\theta, \phi) = R_{PP}^{iso}(\theta) + B_{ani} \cos^2 \phi \sin^2 \theta \quad (9)$$

$$R_{PP}^{iso}(\theta) = A_{iso} + B_{iso} \sin^2 \theta + C_{iso} \sin^2 \theta \tan^2 \theta \quad (10)$$

$$B_{ani} = g(\Delta \delta_{T1} - r \Delta \delta_{N1}) \quad (11)$$

$$\begin{cases} A_{iso} = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{\bar{Z}} \\ B_{iso} = \frac{1}{2} \frac{\Delta \alpha}{2\bar{\alpha}} - 4 \frac{\bar{\beta}^2}{\bar{\alpha}^2} \left(\frac{\Delta \beta}{\bar{\beta}} + \frac{\Delta \rho}{2\bar{\rho}} \right) \\ C_{iso} = \frac{1}{2} \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} \end{cases} \quad (12)$$

其中， $g = \mu_b / (\lambda_b + 2\mu_b)$ ， $r = 1 - 2g$ 。对于反射系数的付立叶级数形式的可行性，已有多位学者进行分析，本文在此不做赘述。下面仅考虑裂缝型储层的各向异性参数、裂缝密度与入射角、方位角之间的关系，具体的参数信息可以参见表 1。

根据不同的各向异性参数模型组合建立单界面模型，通过模拟得到了方位角分别为 0°、45°、90°和 135°的 PP 波反射系数的变化规律，如图 3 所示。图 3 中的模拟结果表明，当方位角不发生改变时，纵波反射系数随入射角的变化而改变，其总体的变化趋势受到各向异性参数组合所决定。同时，在不同的方位角下，随着偏移距的增加，纵波反射系数之间的差异也会逐渐增大，可观察到大角度入射的情况下各向异性特征较为明显。且入射的方位角与 90°方位呈现轴对称现象，即 45°和 135°的纵波反射系数相重合。

为了分析纵波反射系数随方位角的变化规律，同样采用上文表中的单界面模型进行模拟，通过固定入射角分别为 0°、10°、20°、30°，得到如图 4 所示的结果。从图 4 中可以看出，当入射角为定值时，纵波反射系数在方位角为 0°、90°和 180°处出现极值。这一特征能够有效地寻求储层裂缝的空间展布，从而实现对裂缝型储层的进一步描述。

为模拟 HTI 介质 AVAz 响应，采用表 1 中的纵横波速度、密度参数，设定各向异性参数均为 0.1，其响应特征随入射角、方位角的变化趋势如图 5 所示。由模拟结果可知，当任选一个方位角入射时，纵波反射系数随着入射角增加受到 HTI 介质的影响越大；当入射角为一定值时，纵波反射系数在方位角 0°-360°呈

表 1 模型参数
Table 1 Model parameters

| 模型参数 | $V_{P0}/(\text{km/s})$ | $V_{S0}/(\text{km/s})$ | $\rho/(\text{g/cm}^3)$ | ε | γ | δ |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------|----------|----------|
| 上层介质 | 2.2 | 1.35 | 2.4 | 0 | 0 | 0 |
| 下层介质 a | 2.5 | 1.5 | 2.58 | 0 | 0 | 0.1 |
| 下层介质 b | 2.5 | 1.5 | 2.58 | -0.1 | 0 | 0 |
| 下层介质 c | 2.5 | 1.5 | 2.58 | 0 | -0.1 | 0 |
| 下层介质 d | 2.5 | 1.5 | 2.58 | -0.1 | -0.1 | 0.1 |

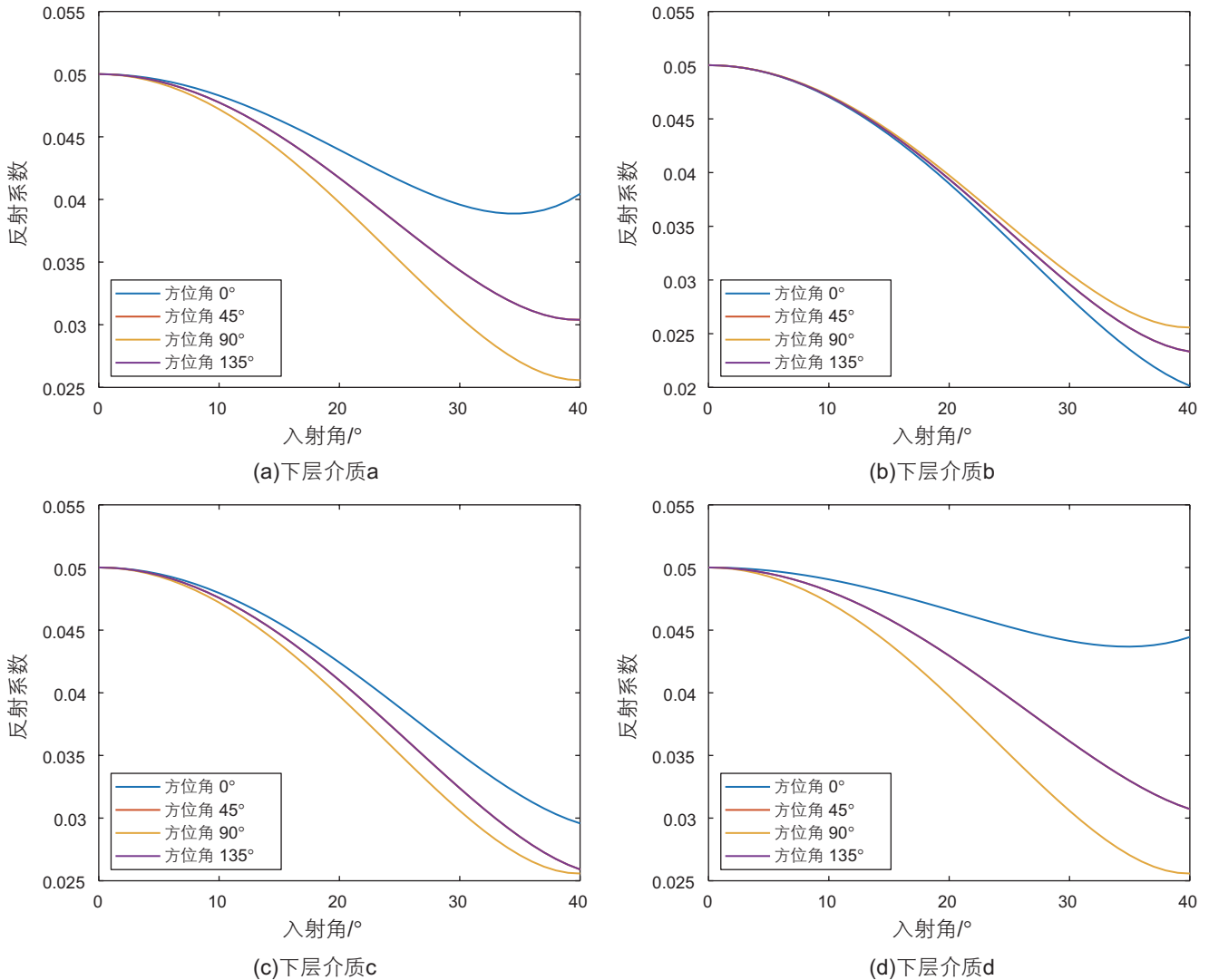


图3 P波反射系数随入射角变化图

Fig. 3 P-wave reflection coefficient versus incident angle

现周期性的变化特征。以一个周期内的变化为例,方位角在 0° 至 90° 时,纵波反射系数的强度是逐渐减弱的,方位角在 90° 至 180° 时,纵波反射系数的强度是逐渐增强的。因此,地震数据采集过程中,由于不同的方位角和不同的入射角对HTI介质储层的响应有所不同,因而通过对多方位地震数据分析并提取不同入射角、方位角下的响应特征,有助于后续对岩石弹性特征、裂缝走向、裂缝密度及流体性质等诸多目标储层特征加以预测分析。

Hudson理论与线性滑动模型是目前描述裂缝介质最常见的两种岩石物理模型。Hudson理论通过引入包裹体定义了裂缝密度这一概念,但很难直接与各向异性参数产生联系,因此,一般借助Schoenberg模型来建立这一关系。Schoenberg模型通过引入法向弱度 ΔN 和切向弱度 ΔT 的概念来描述平行和垂直于裂缝面的弹

性差值。根据Shaw和Sen的理论,在裂缝为干裂缝或完全含气的状态下,Schoenberg模型的裂缝参数同裂缝密度间的关系可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta N = \frac{4e}{3g(1-g)} \\ \Delta T = \frac{16e}{3(3-2g)} \end{cases} \quad (13)$$

其中, e 为裂缝密度, g 为横纵波速度比的平方。在含油或水的状态下,

$$\begin{cases} \Delta N = \frac{4e}{3g(1-g)} \\ \Delta T = \frac{16e}{3(3-2g)} \end{cases} \quad (14)$$

根据Thomsen弱各向异性理论和Schoenberg模型的弹性矩阵表达,可以进一步获得各向异性参数与法

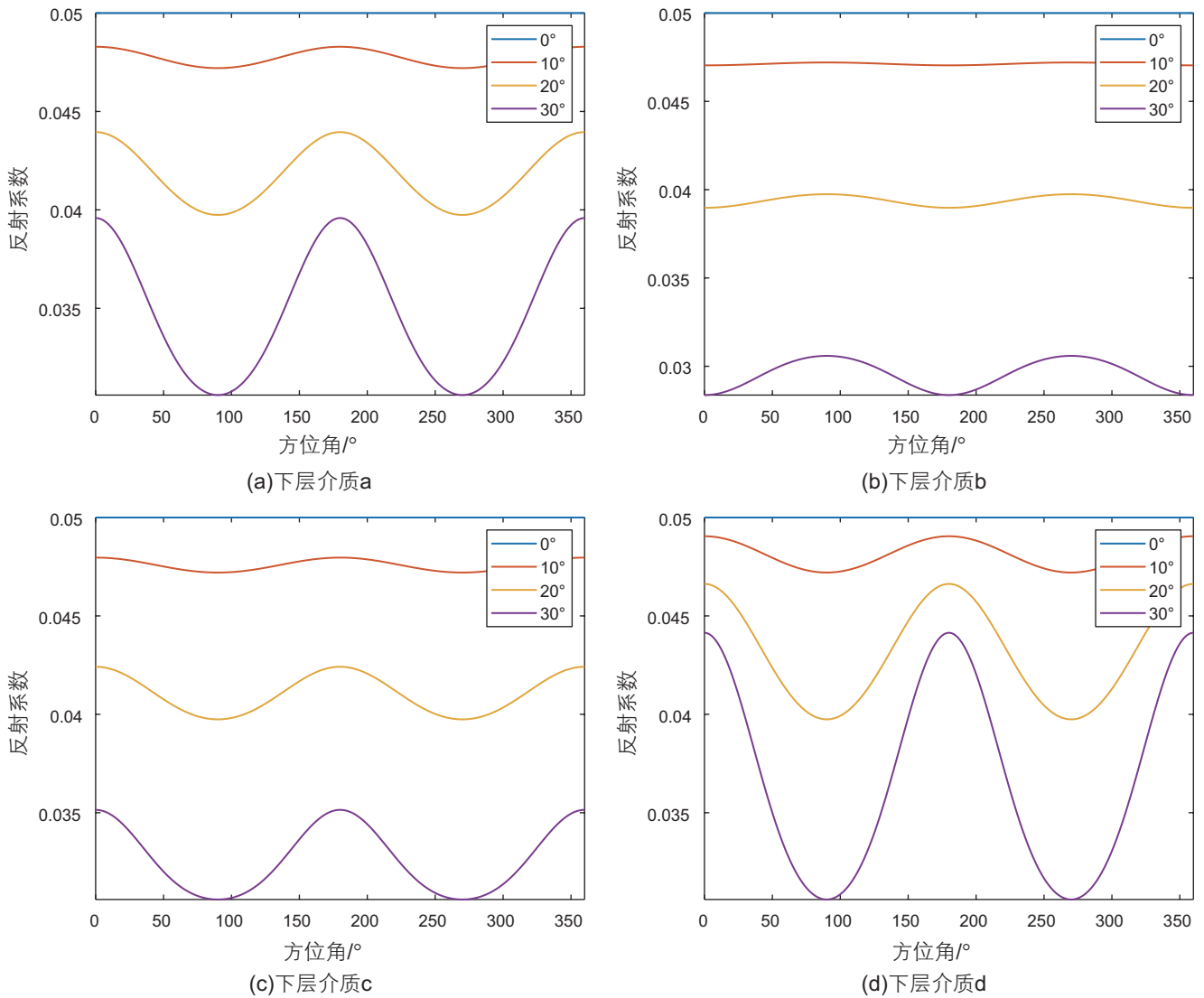


图 4 P波反射系数随方位角变化图
Fig. 4 P-wave reflection coefficient versus azimuth

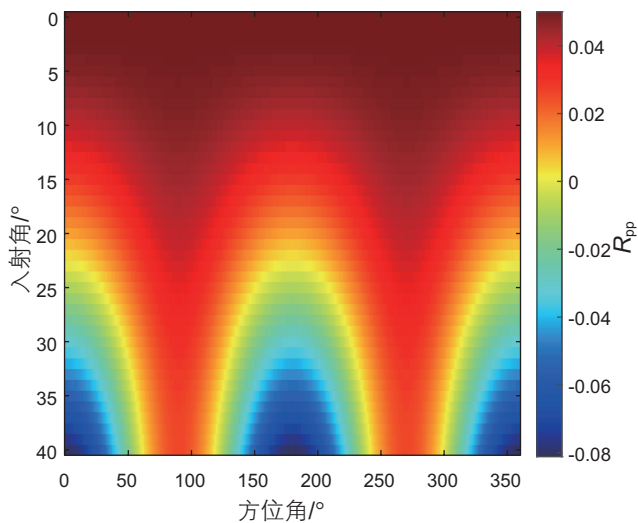


图 5 HTI 介质地震 AVAz 响应
Fig. 5 The response of AVAz with HTI medium

向弱度和切向弱度的关系:

$$\begin{cases} \varepsilon^{(v)} = -2g(1-g)\Delta N \\ \delta^{(v)} = -2g[(1-2g)\Delta N + \Delta T] \\ \gamma^{(v)} = -\frac{\Delta T}{2} \end{cases} \quad (15)$$

据此，可以大致得到各向异性参数同裂缝密度间的线性关系。

结合Hudson薄硬币状裂隙模型和Schoenberg线性滑动模型，图6展示了不同裂缝密度对HTI介质地震AVAz响应的影响。图6中a~d分别代表了裂缝密度为0.005, 0.05, 0.1和0.15时的纵波反射系数AVAz响应特征情况。由图所示，储层各向异性特征随着裂缝密度增加而增大，小角度入射时纵波反射系数受到各向异性参数影响较小，基本不随方位角产生

周期性变化规律；大角度入射时纵波反射系数受到各向异性参数影响更为明显，展现出随方位角变化的周期性规律。

目标储层裂缝通常被认为是流体的运移通道，有效提高了储层的渗透率。因此考虑对裂缝型储层进行勘探时，详细分析裂缝的空间展布显得尤为重要，这与裂缝型储层的产量有直接联系。早期借用地震勘探手段来探寻裂缝的多是定性的预测，主要以裂缝的不连续性为基础，采用叠前地震绕射波成像方法或叠后几何地震属性的方式。随着勘探精度的不断深入，根据地震方位各向异性来预测中尺度裂缝逐渐成为裂缝型储层的必经之路，包括利用椭圆拟合获得裂缝密度和方向，进一步探究方位各向异性属性，以及利用方位叠前地震资料定量反演裂缝参数等。近年来，结合 Schoenberg 线性滑动模型理论开展的一系列各向异性反演在储层的裂缝预测中取得了良好的应用效果。

2 实际数据应用

下面以实际工区数据为例，说明本文方法的有效性。研究区位于南海北部珠江口盆地，现有的地质认识表明该区域成藏条件优越，在上构造层珠江珠海组已经发现多个油气田，同时研究区潜山圈闭发育，毗邻生烃超压带，成藏条件优越，因此具有很大的勘探潜力^[35]。该工区的叠加地震数据剖面如图7所示，剖面中潜山上覆层响应较为连续，成层状结构明显，但中深层潜山内幕响应复杂，常表现为连接潜山内部与潜山顶的不规则的折线，且在横向上区域性特征明显，既有大面积的、较强的地震杂乱反射响应区，也有无明显构造响应的弱反射带分布其中。通过图7可以看出，潜山顶与上覆岩层之间的界面间存在明显的强反射，且表现出一个“复波”特征；同时潜山内部地震反射特征在横向上看连续性较低，表现为“杂乱”的

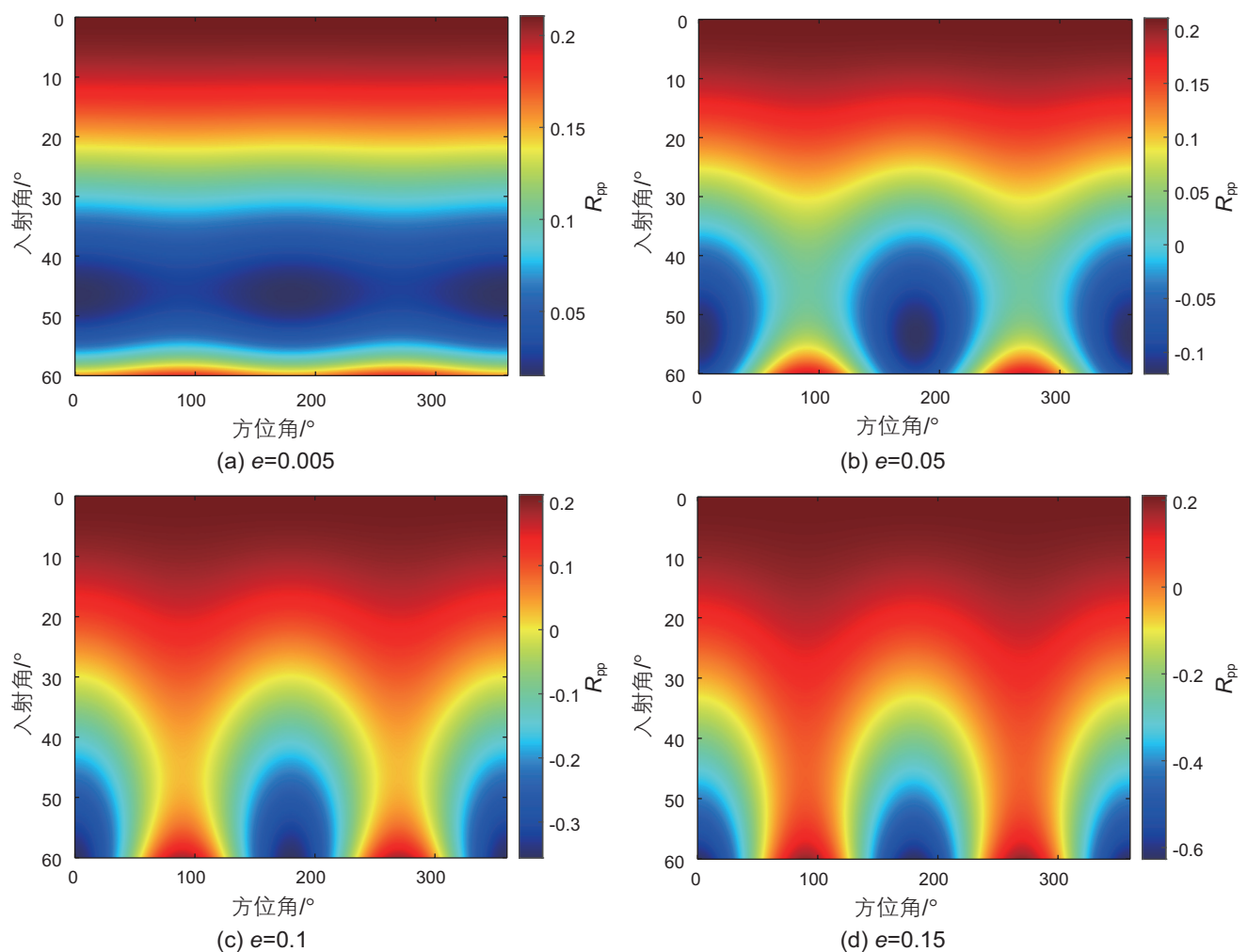


图6 HTI介质不同裂缝密度的地震AVAz响应

Fig. 6 The response of AVAz under different fracture densities in HTI medium

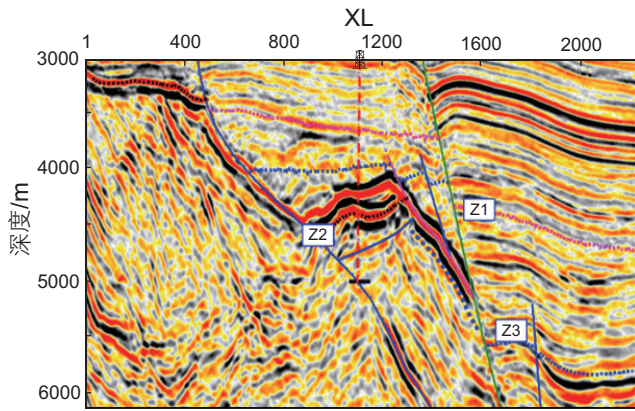


图7 潜山顶部地震反射特征
Fig. 7 Seismic reflection characteristics at the top of buried hill

地震同相轴特征。

由测井数据获得的X1井综合柱状图如图8a所

示。目标潜山处的岩性主要以花岗岩、闪长岩、浅变质岩和片麻岩等几类岩性为主。结合图8a、b可以看出，Z2层位处的潜山顶界面附近主要为风化裂缝带，以低频、强振幅、较为连续的反射呈现，Z2层位下的潜山内幕裂缝带，主要以低频、中强振幅、杂乱反射为主；基底多为中酸性侵入岩花岗岩类，对应Z2层位下的透明地震相，也存在倾角较陡的连续层状地震相^[36]。图8(b)为潜山内幕裂缝带的成像测井资料，通过分析对比能够了解到，连续缝主要为构造成因，不连续缝主要为成岩成因，一般由侵入岩体中的流体混入后冷凝收缩导致的。从成像资料中不难判断，潜山内幕储层裂缝较为发育，浅中层以流体侵入导致的不连续缝为主，深层以构造运动导致的连续缝为主要类型。

为了更好的理解目标区古潜山的地震数据响应特征，需结合测井数据对其进行有效的划分。在测井资

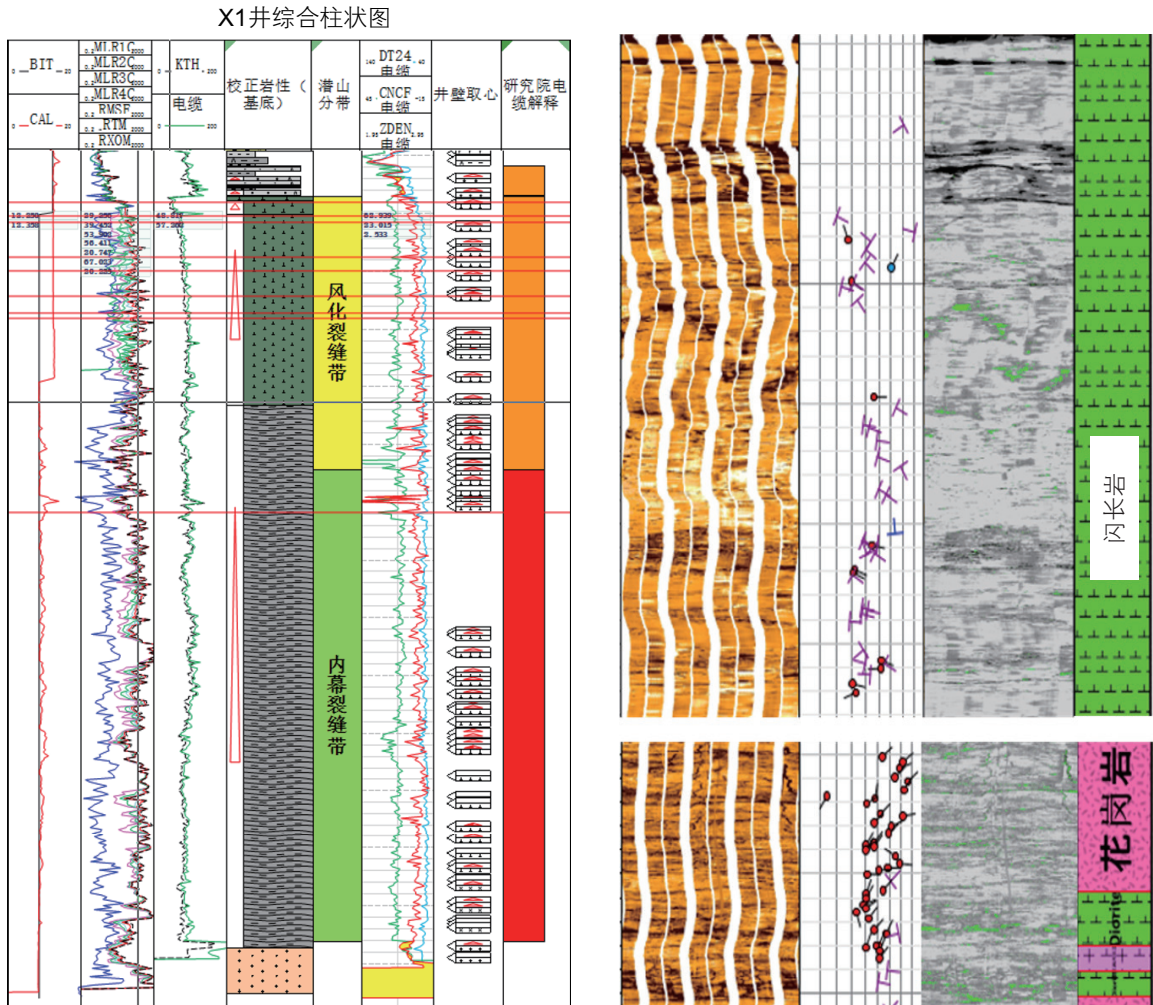


图8 X1井测井数据 (a) X1井综合柱状图; (b) 潜山内幕成像测井资料
Fig. 8 Well X1 logging data (a) composite columnar section; (b) imaging logging data

料中,古潜山界面下不同相带的纵波速度及密度仍表现出了明显的差异,但地震资料中潜山内地震反射特征表现为横向连续性差,没有明显的分界面。根据井上趋势分析并结合地质构造认识,可以将趋势异常段划分为5部分,其中IV定义为潜山顶, V定义为潜山内幕,潜山内幕中绿色框内的P波阻抗异常可以视为风化带与内幕裂缝带的分界面。这是由于风化淋滤带对原地层的剥蚀明显,容易发生扩径,井径曲线表现为异常增大,而在新鲜基岩带内,由于花岗岩成分的稳定,测井曲线的形态均较为平直。具体划分结果如图9所示,其中的黑线为井上数据随深度变化的一般趋势,红线为X1井中P波阻抗随深度的变化趋势。井震联合分析结果表明X1井的波阻抗数据随深度变化趋势并不是简单的线性增加,在某些深度范围内存在明显的异常,这对于潜山内幕储层特征的整体认识很有帮助。

由于常规的海上拖缆地震数据属于窄方位采集,其特定的炮检组合方式使得方位角集中于拖缆采集的方向,海上数据资料的特殊性限制了开展裂缝预测的实际效果。对于后续利用方位各向异性特征进行反演和储层表征时,同样存在一定的难度。因此,在传统的处理流程中,从常规的叠前成像道集数据中很难观察到明显的AVAz特征。为了对后续裂缝预测提供可靠的数据,本文针对目标区地震数据资料,利用有限方位采集的地震资料进行各向异性特征研究。利用基

于成像点局部角度域成像处理增加窄方位拖缆地震数据的方位信息,以此为基础输出得到角度域全方位道集数据。利用全方位偏移成像输出的共反射角道集,有着更加丰富的方位角和反射角信息,是真正意义上的三维道集,可以实现各向异性叠前反演及裂缝预测。具体的技术流程如图10所示。

图11展示的为全方位网格层析成像剩余谱效果对比^[37],图11a为层析成像前剩余谱,图11b为层析成像后剩余谱。图12为偏移参数测试及全方位速度场更新后的结果。利用图12得到的结果进行全方位道集处理,处理后的结果如图13所示。图13b中按30°的间隔划分为12个不同方位的扇区,其中每个扇区的地震道又按反射角从小到大排列,显示范围为0°~60°。观察所有12个扇区的分方位地震数据,不难发现其成像结果基本对称,符合各向异性的反射振幅特征变化。图13c~d分别为全方位偏移成像输出的全方位反射角道集和分反射角显示的结果,反射角每5°划分为一个扇区,扇区内道集按方位角排列。观察图13d可知,全方位偏移处理后深层的反射角不超过30°,且随着反射角增大,方位角信息缺失也愈加严重,这是因为窄方位采集导致原始地震数据的照明范围集中在拖缆方向,根据全方位偏移成像的原理,在小倾角尚能保持完整的方位信息,但随着照明深度增加,倾角变大,垂直于拖缆方向的方位角范围内射线传播难免受限。图14为基于局部角度域的全方位偏移成像处理后工区

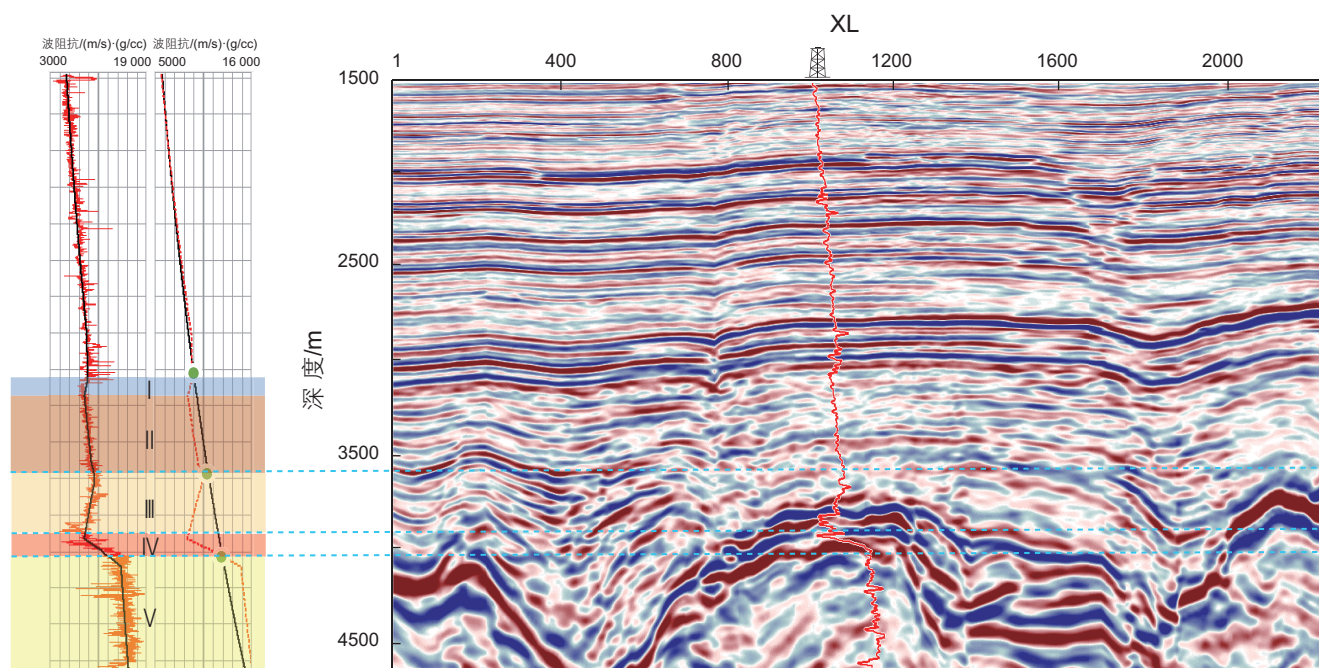


图9 潜山构造划分

Fig. 9 Structural division of buried hill

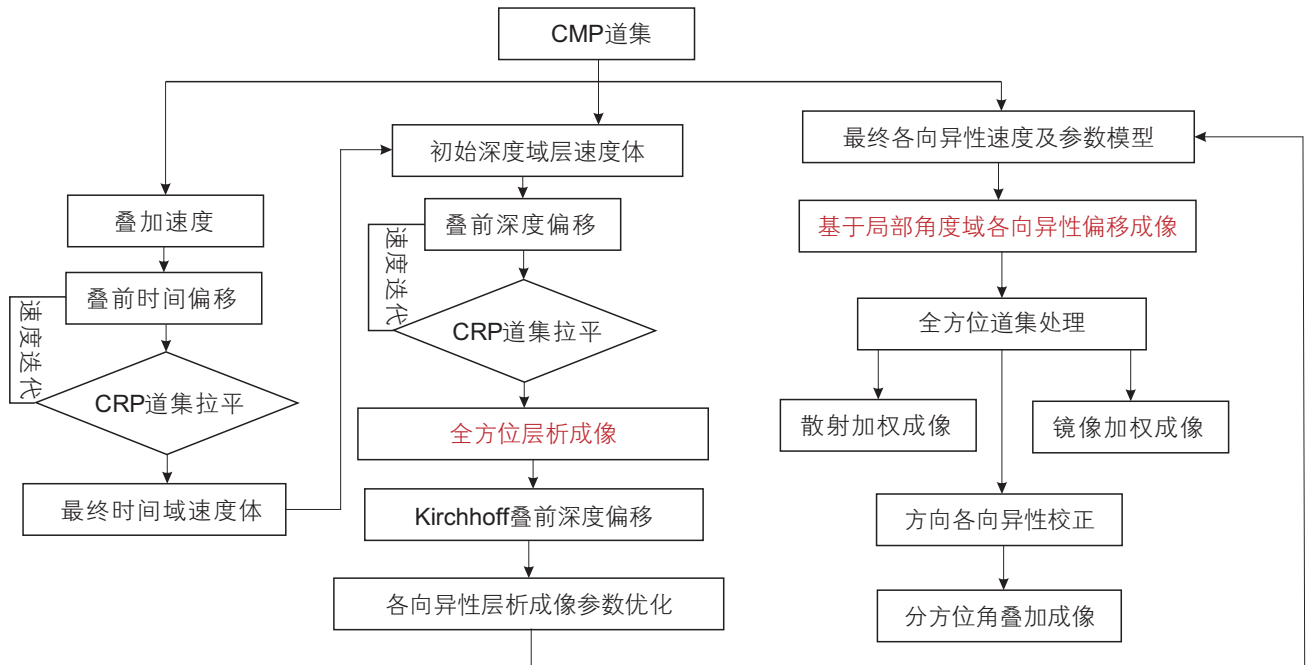


图 10 处理技术思路及流程图

Fig. 10 Processing technical and flow charts

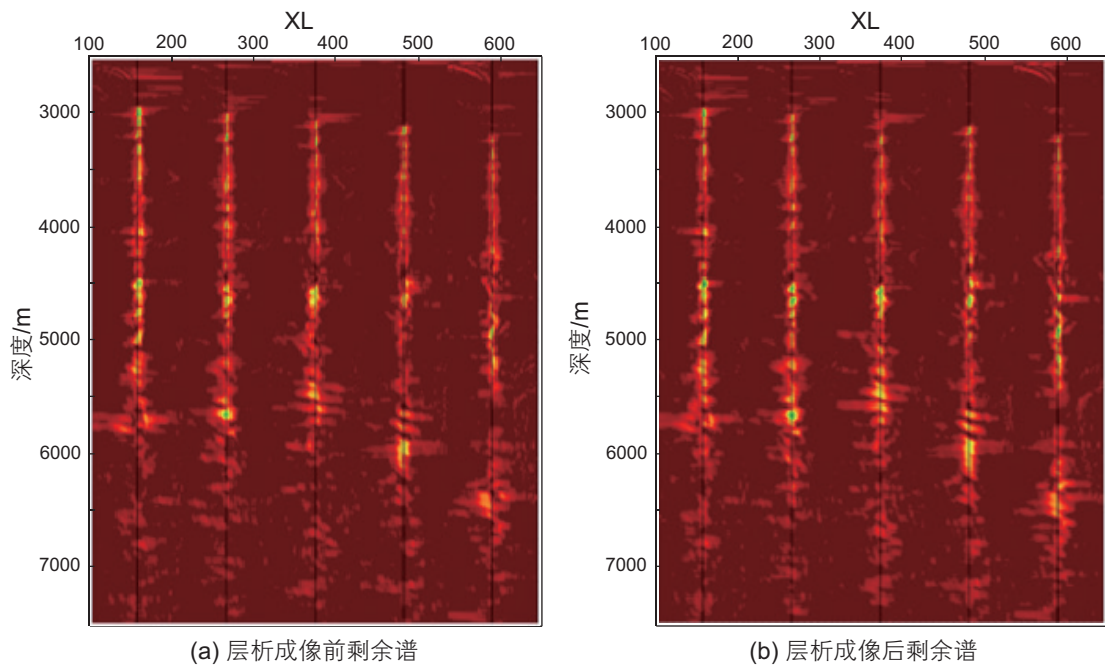


图 11 全方位层析成像效果对比

Fig. 11 Comparison of the effect about azimuth tomography

内地震数据方位信息的变化，其中图 14a 为原始地震数据的玫瑰图，方位角和偏移距分别为第一和第二关键字，可以明显观察到原始地震数据的方位角集中在拖缆方向；图 14b 为处理后地震数据的图，需注意的

是，由于全方位偏移成像是在倾角域处理的，因此方位角和倾角分别是第一和第二关键字，处理后方位角明显拓宽，各向异性特征明显，成像道集已经具备分析 VVAz 和 AVAz 的能力。

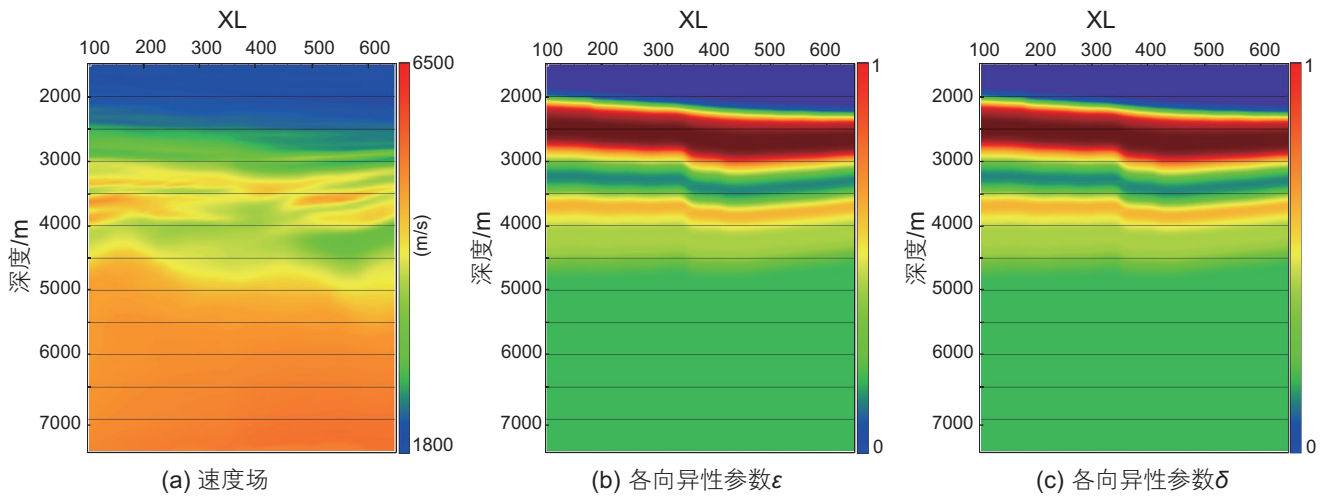


图 12 偏移参数测试及全方位速度场更新
 Fig. 12 Test offset parameter and update the azimuth velocity field

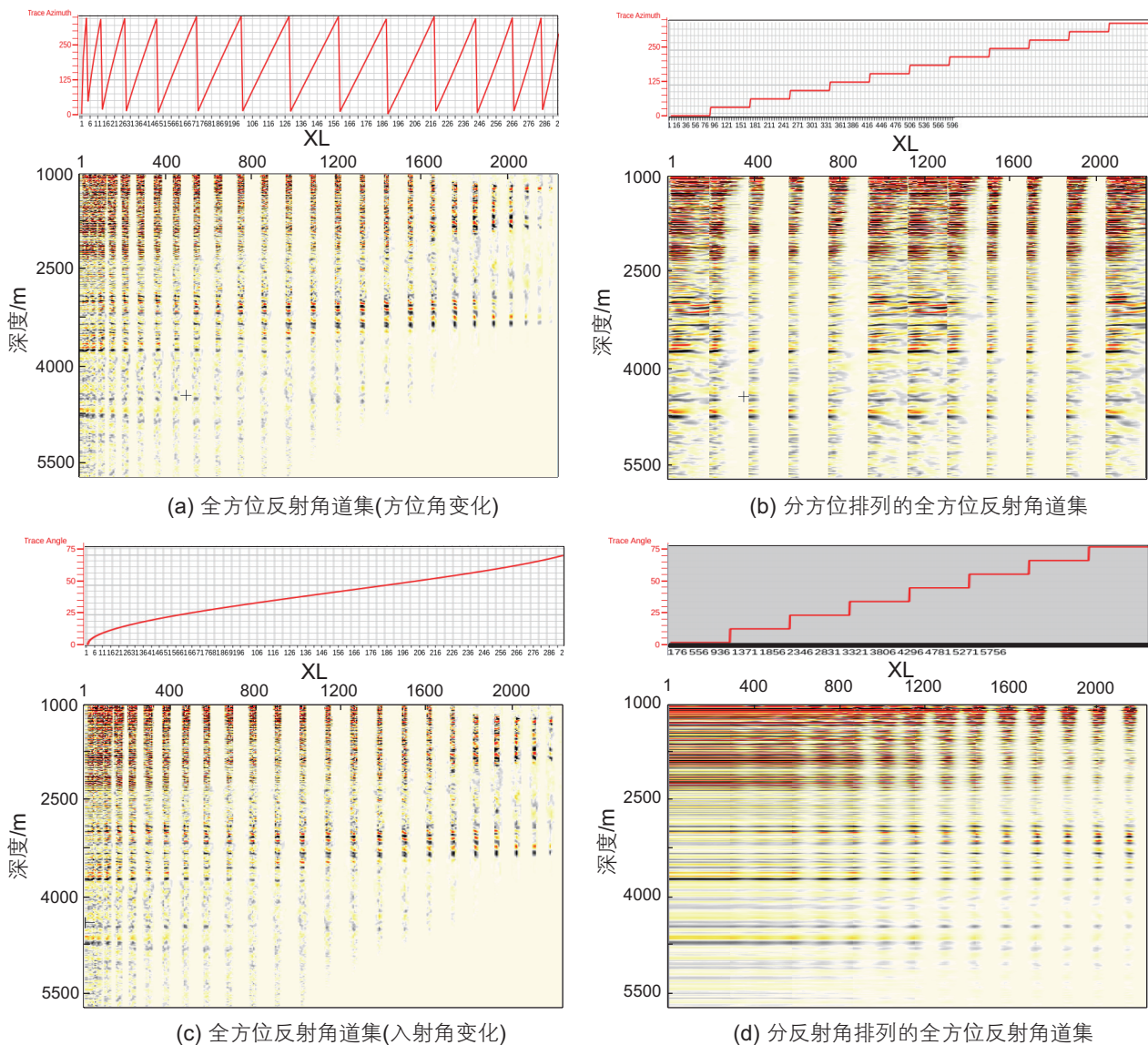


图 13 全方位道集处理结果
 Fig. 13 Azimuth angle traces processing results

为了更好的验证本文方法的有效性，将处理后的全方位倾角道集数据输出叠加地震剖面，同传统的克希霍夫偏移结果对比如图 15 所示。重处理前后地层深部构造成像并未发生大的变化，但可以明显观察到处理后的地震剖面上断点更为清晰，断距更加明显，假断裂成像基本消除，潜山内幕成像特征更清晰。

图 13~图 15 的分析已经验证了基于LAD域的全

方位偏移成像处理可以有效拓宽窄方位地震数据的方位角方位，并且有效提升成像效果。利用宽方位的地震反射道集数据，开展各向异性反演对潜山内幕的裂缝发育进行评估，以降低后续勘探风险。图 16a 为全方位道集数据叠加地震剖面，图 16b 为反演获得的裂缝密度结果。基于 AVAz 的裂缝预测结果与前期井震联合分析的结果较为一致，即潜山内幕裂缝发育多集

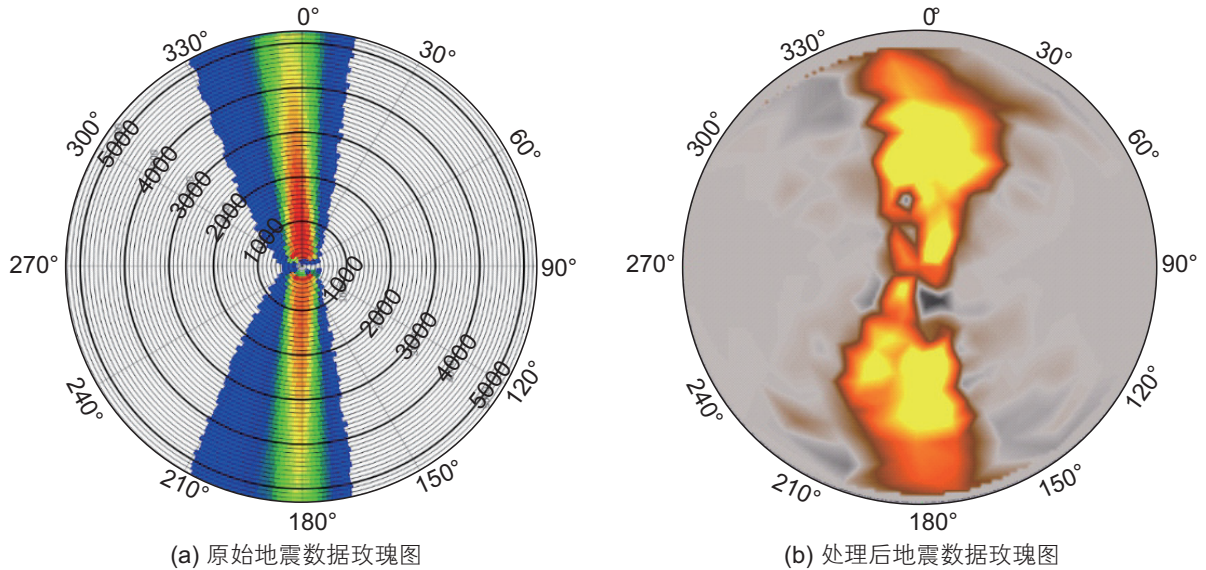


图 14 基于LAD域的成像处理前后地震数据方位信息的变化
 Fig. 14 Changes of azimuth before and after processing based on LAD domain

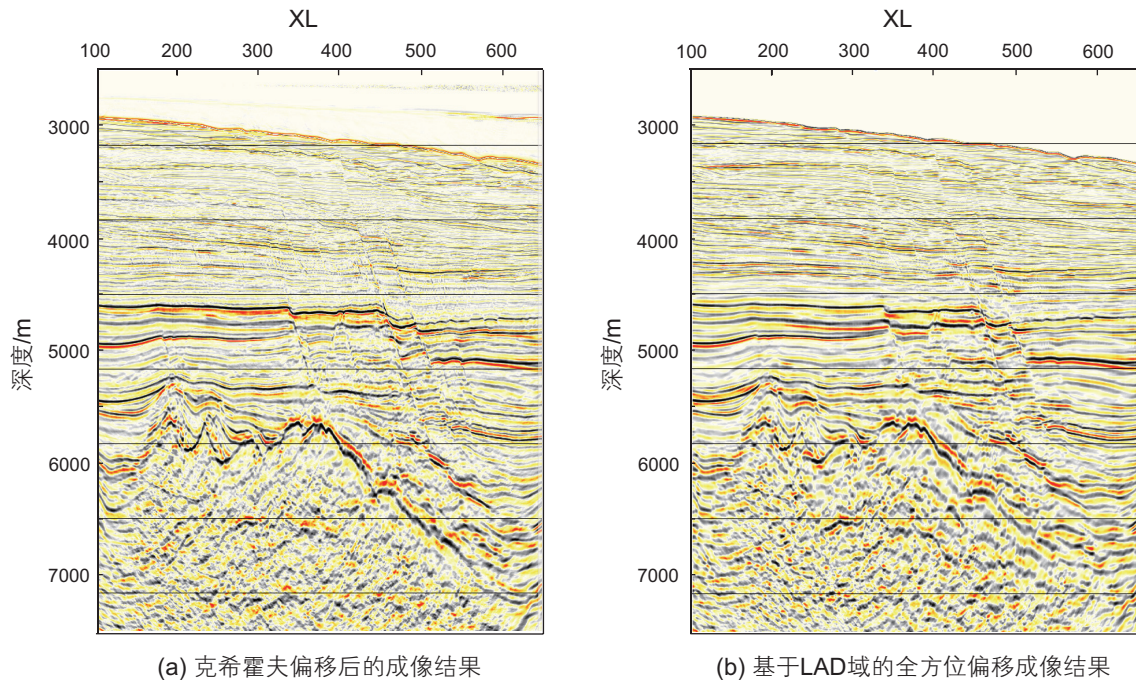


图 15 不同方法的成像结果对比
 Fig. 15 Comparison of imaging results of different methods

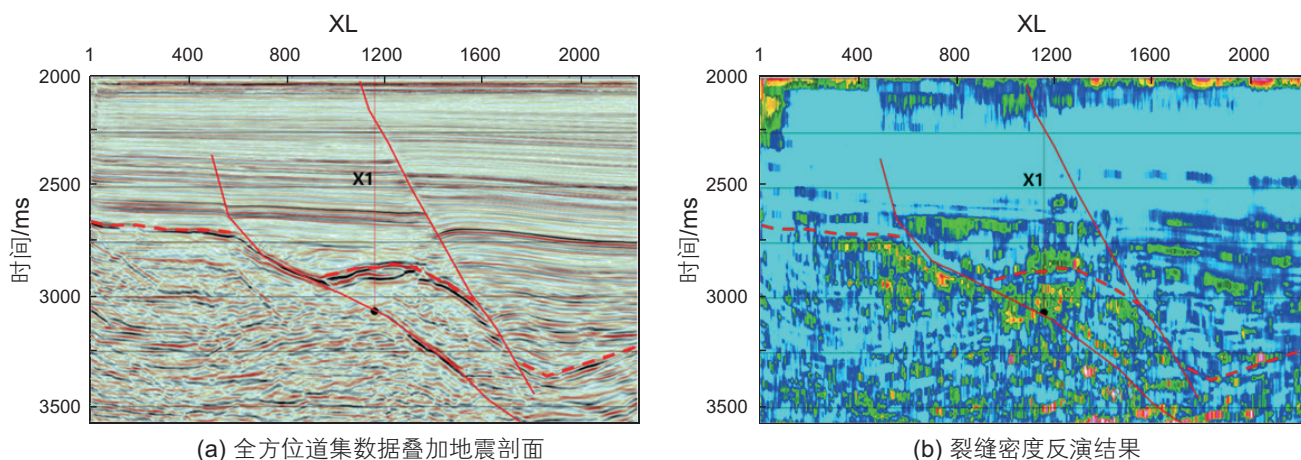


图 16 全方位道集数据叠加剖面 and 裂缝密度反演剖面

Fig. 16 Azimuth angle traces stack profile and the inversion result of fracture density

中在风化淋滤带, 属于优势储层发育带, 这对于拓展珠江口盆地勘探空间具有极为重要的意义。

3 结论与认识

海洋拖缆地震数据受限于其采集方式, 往往不能得到良好的宽方位地震数据信息。本文选取珠江口盆地潜山油气藏勘探区的实际数据进行应用研究, 针对拖缆采集的固有缺陷, 开展了地下成像点局部角度域的成像处理技术探索。利用基于成像点局部角度域成像处理技术, 有效增加了窄方位拖缆地震数据的方位

信息, 全方位反射角度道集上由各向异性引起的剩余时差明显, 能够有效应用于后续的裂缝型储层表征。研究表明, 处理后的全方位道集数据极大地提升了现有窄方位地震数据对目标裂缝型潜山储层的勘探能力, 有效规避了前期的勘探风险。同时, 地下成像点局部角度域成像处理结果对潜山裂缝发育区具有清晰的成像效果, 利用角度域全方位道集数据能够反演得到有效表征裂缝发育情况的参数, 进而确定裂缝发育的优质目标区。但该方法相较于传统的克希霍夫偏移, 计算成本较高, 而玫瑰图的分析结果也表明, 深层的方位角拓宽仍受限于实际的射线传播路径。

参考文献

- [1] 米立军, 周守为, 谢玉洪, 等. 南海北部深水油气勘探进展与未来展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(03): 58-65. [MI L J, ZHOU S W, XIE Y H, et al. Deep-water oil and gas exploration in northern South China Sea: Progress and outlook[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(03): 58-65.]
- [2] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003. [CHEN C M, SHI H S, XU S C, et al. Formation conditions of Tertiary oil and gas reservoirs in the eastern Pearl River Mouth Basin[M]. Beijing: Science Press, 2003.]
- [3] 张昕, 郑晓东. 裂缝发育带地震识别预测技术研究进展[J]. 石油地球物理勘探, 2005(06): 724-731. [ZHANG X, ZHENG X D. Progress in studying seismic recognition and prediction technology in fracture-developed zone[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005(06): 724-731.]
- [4] 李向阳, 王九拴. 多波地震勘探及裂缝储层预测研究进展[J]. 石油科学通报, 2016, 1(01): 45-60. [LI X Y, WANG J S. Recent advances in multicomponent seismic and fractured reservoir characterization[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(01): 45-60.]
- [5] 印兴耀, 张洪学, 宗兆云. OVT数据域五维地震资料解释技术研究现状与进展[J]. 石油物探, 2018, 57(02), 155-178. [YIN X Y, ZHANG H X, ZONG Z Y. Research status and progress of 5D seismic data interpretation in OVT domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(02): 155-178.]
- [6] 印兴耀, 马正乾, 向伟, 等. 地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展——裂缝储层岩石物理理论[J]. 石油物探, 2022, 61(02): 183-204. [YIN X Y, MA Z Q, XIANG W, et al. Review of fracture prediction driven by the seismic rock physics theory(I): Effective anisotropic seismic rock physics theory[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(02): 183-204.]

- [7] THOMSEN L A. Weak elastic anisotropy[J]. *Geophysics*, 1986, 51(10): 1954–1966.
- [8] CRAMPIN S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media[J]. *Wave Motion*, 1981, 3(4): 343–391.
- [9] CRAMPIN S. Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids[J]. *Geophysical Journal International*, 1984, 76(1): 135–145.
- [10] CRAMPIN S. Evaluation of anisotropy by shear wave splitting[J]. *Geophysics*, 1985, 50(1): 142–152.
- [11] CRAMPIN S. Anisotropy and transverse isotropy[J]. *Geophysical Prospecting*, 1986, 34(1): 94–99.
- [12] THOMSEN L A. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock[J]. *Geophysical Prospecting*, 1995, 43(6): 805–829.
- [13] HUDSON J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks[J]. *Geophysical Journal International*, 1981, 64(1): 133–150.
- [14] HUDSON J A. A higher order approximation to the wave propagation constants for a cracked solid[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1986, 87(1): 265–274.
- [15] HUDSON J A, LIU E R, CRAMPIN S. The mean transmission properties of a fault with imperfect facial contact[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 129(3): 720–726.
- [16] SCHOENBERG M. Reflection of elastic waves from periodically stratified media with interfacial slip[J]. *Geophysical Prospecting*, 1983, 31(2): 265–292.
- [17] SCHOENBERG M, DOUMA J. Elastic wave propagation in media with parallel and aligned cracks[J]. *Geophysical Prospecting*, 1988, 36(6): 571–590.
- [18] SCHOENBERG M, SAYERS C M. Seismic anisotropy of fractured rock[J]. *Geophysics*, 1995, 60(1): 204–211.
- [19] RUGER A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media[J]. *Geophysics*, 1998, 63(3): 935–947.
- [20] RUGER A. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media[M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2002.
- [21] DOWNTON J. Azimuthal Fourier coefficients: a simple method to estimate fracture parameters[J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011*, 269–273.
- [22] 王康宁, 孙赞东, 侯昕晔. 基于傅里叶级数展开的纵波方位各向异性裂缝预测[J]. *石油物探*, 2015, 54(6): 755–761. [WANG K N, SUN Z D, HOU X Y. Fracture prediction by P-wave azimuthal anisotropy based on Fourier series decomposition[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(6): 755–761.]
- [23] 汤云威. 基于方位傅里叶级数的各向异性梯度预测[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018. [TANG Y W. Anisotropic gradient prediction based on azimuth Fourier series[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), Shandong, 2018.]
- [24] ANTHONY B, MRINAL K S. A new Fourier azimuthal amplitude variation fracture characterization method: Case study in the Haynesville Shale[J]. *Geophysics*, 2018, 83(1): WA101–WA120.
- [25] ZHANG G Z, LI L, PAN X P, et al. Azimuthal Fourier coefficient inversion for horizontal and vertical fracture characterization in weakly orthorhombic media[J]. *Geophysics*, 2020, 85(6): C199–C214.
- [26] LI L, ZHANG J J, PAN X P, et al. Azimuthal elastic impedance-based Fourier coefficient variation with angle inversion for fracture weakness[J]. *Petroleum Science*, 2020, 17(1): 86–104.
- [27] DOWNTON J, ROURE B. Interpreting azimuthal Fourier coefficients for anisotropic and fracture parameters[J]. *Interpretation*, 2015, 3(3): ST9–ST27.
- [28] 杜向东. 中国海上地震勘探技术新进展[J]. *石油物探*, 2018, 57(3): 321–331. [DU X D. Progress of seismic exploration technology in offshore China[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(3): 321–331.]
- [29] 苏世龙, 胡丹, 黄志, 等. 窄方位角地震数据预测裂缝储层方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(03): 510–515. [SU S L, HU D, HUANG Z, et al. Fractured reservoir prediction on narrow azimuth seismic data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(03): 510–515.]
- [30] 罗辑, 吴国忱, 宗兆云, 等. 基于方位弹性阻抗反演的裂缝型储层流体检测方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(06): 1154–1165. [LUO J, WU G C, ZONG Z Y, et al. Fluid identification in fractured reservoirs based on azimuthal elastic impedance inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(06): 1154–1165.]
- [31] 熊晓军, 李翔, 刘阳, 等. 基于孔隙分类理论的自相容模型横波速度预测方法[J]. *石油物探*, 2017, 56(02): 179–184. [XIONG X J, LI X, LIU Y, et al. Shear wave velocity estimation method by the porosity classification based on the self-consistent model[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(02): 179–184.]
- [32] 熊晓军, 张鑫, 张本健, 等. 裂缝融合分析的窄方位叠前裂缝预测技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(05): 1150–1156. [XIONG X J, ZHANG X, ZHANG B J, et al. Fracture prediction technology on prestack narrow azimuth data with fracture fusion analysis[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(05): 1150–1156.]
- [33] 李振春. 地震偏移成像技术研究现状与发展趋势[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(01): 1–21. [LI Z C. Research status and development trends for seismic migration technology[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(01): 1–21.]

- [34] KOREN Z, RAVVE I. Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging Part I: Directional and reflection image gathers[J]. *Geophysics*, 2011, 76(1): S1–S13.
- [35] 高翔, 刘培, 宋朋霖, 等. 珠江口盆地惠州凹陷西江 30 洼陡坡型源汇体系特征及扇-辫转换机制[J]. *石油科学通报*, 2023, 8(02): 141–151. [GAO X, LIU P, SONG P, et al. Characteristics of a steep slope source-to-sink system and a fan-braid transition mechanism in the Xijiang30 sub-sag, Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin. *Petroleum Science Bulletin*, 2023, 02: 141–151.]
- [36] 姜传金, 戴世立, 张广颖, 等. 松辽盆地北部中央古隆起带基底储层 AVO 特征模拟及时频特征分析研究[J]. *石油科学通报*, 2022, 7(04): 505–514. [JIANG C J, DAI S L, ZHANG G Y, et al. Simulation of AVO features and analysis of the time-frequency characteristics of the basement reservoir of the ancient central uplift zone in the northern Songliao Basin[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 7(04): 505–514.]
- [37] 吕振宇, 魏鹏. 小尺度网格层析速度建模方法在低幅构造区时深转换中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(01): 339–344. [LV Z Y, WEI P. Application of small scale grid tomography velocity modeling method in time-depth conversion of low-amplitude structural region [J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(1): 0339–0344.]

(编辑 付娟娟)