

# 多波地震勘探及裂缝储层预测研究进展

李向阳<sup>1,2\*</sup>, 王九拴<sup>2,3</sup>

1 中国石油大学(北京)地理物理与信息工程学院, 北京 102249

2 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 涿州 072751

3 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610081

\* 通信作者, xy11962@hotmail.com

收稿日期: 2016-03-28

**摘要** 综述多波多分量地震学的基本概念及其在油气储层描述中的应用, 并结合中国陆上三维三分量(3D3C)地震勘探实例阐述多波地震勘探的方法技术原理及应用效果。在岩性油气藏勘探中, 纵波(P波)和横波(S波)的传播速度和波阻抗的变化可以用来识别岩性圈闭; 而在裂缝型油气藏勘探中, 由于储层中定向排列的裂缝导致储层具有地震各向异性特征, 在多波多分量地震勘探中可以观测到纵波方位各向异性与横波分裂现象。充分利用这些地震波场特征有助于开展对储层中裂缝走向、发育密度及其空间分布情况的定量描述。此外, 从多波多分量地震数据中能够提取基于频率变化的地震属性, 其中包含有与储层中填充的流体类型与流体赋存空间有关的重要信息。目前在国内外多个油气田开展的多波多分量地震应用实例充分证明了该技术在油气藏储层特征描述方面具有毋庸置疑的技术潜力。尽管如此, 多波多分量地震勘探技术的推广应用仍然面临诸多挑战, 如陆上多波多分量地震勘探数据采集质量与效率、转换波(PS波)精确成像及多波资料解释等问题。只有不断改进并完善上述问题的解决方案, 多波多分量地震勘探技术才有望成为油气勘探的主流技术。

**关键词** 转换波勘探; 多分量地震; 横波分裂; 地震裂缝检测

## 0 引言

由于新的油气目标的勘探难度越来越大, 对现有油气田增储上产成为油气公司保障产能稳定增长的必要手段, 因此油气储层非均质性及其空间分布特征精确描述成为油气勘探开发人员急需解决的关键问题。关于此问题目前业界认可的并已得到广泛应用的解决方案是高精度三维纵波地震勘探, 但是, 在许多成熟的油气探区, 尤其是非常规油气探区, 对储层中裂缝发育状况、裂缝分布规律及裂缝中流体运移通道等油气储集与运移的控制因素的认知程度, 通常是该油气田增储上产的关键问题所在。在这种情况下, 与纵波地震勘探相比, 多波多分量地震勘探技术由于能够提供有关储层中裂缝与流体的更多信息, 而成为一种必

要的补充勘探手段。该手段有助于优化油气开采方案、降低风险、增加效益。

从19世纪60年代多波震源刚开始应用起, 多分量地震勘探就一直用于识别地下岩性及隐蔽成岩变化, 并为刻画地层圈闭提供依据。之后, 多波多分量地震勘探普遍应用于地震各向异性的研究, 这是因为该技术不仅能更好地成像与识别储层, 还能对储层内部的非均质性进行清晰描述, 例如确定储层中裂缝走向与裂缝发育密度等。其实, 裂缝型油气藏是多波多分量地震勘探的一个主要应用对象。

近年来, 多波多分量地震勘探也用来直接检测储层中的油气水分布, 这也是所有地球物理勘探技术的主要目的。单纯依靠传统纵波地震数据, 难以区分低饱和度天然气储层和高饱和度天然气储层, 也很难区

引用格式: 李向阳, 王九拴. 多波地震勘探及裂缝储层预测研究进展. 石油科学通报, 2016, 01: 45-60

LI Xiangyan, WANG Jiushuan. Recent advances in multicomponent seismic and fractured reservoir characterization. Petroleum Science Bulletin, 2016, 01: 45-60. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.004

分油层和水层；而多波多分量地震勘探技术为上述难题提供了新的解决方案<sup>[1-3]</sup>。此外，多波多分量时移(4D)地震在油藏动态监测、剩余油分布检测方面具有很大的应用潜力<sup>[4]</sup>。

纵观多波多分量地震勘探的发展历程，根据不同时期的技术特点可以划分为4个阶段。第1阶段始于20世纪60年代的后期，横波震源刚得到应用，地球物理工程师开始在垂直地震剖面(VSP)观测中利用横波震源激发并在井中放置水平分量检波器接收反射横波，并利用VSP观测的反射横波数据辅助完成地震资料解释工作<sup>[5-6]</sup>。第2阶段从20世纪80年代中期开始，为了提高地震勘探的分辨率，在地面地震勘探中以横波震源激发并以水平分量检波器接收，但这种尝试因为反射横波地震信号主频与信噪比均较纵波地震低而野外采集成本高昂而最终放弃。第3阶段从20世纪90年代后期开始，由于海底拖缆(4C)地震勘探技术的成功应用，并且转换波在穿透气烟囱成像方面取得了很好的成像效果，激发了地球物理学家对多波多分量地震勘探技术的研发热情，一直持续到21世纪初期。新千年开始后，由于微电子机械系统(MEMS, micro-electro-mechanic-system)技术的进步提升了三分量数字检波器的研制水平，多波多分量地震勘探技术进入到第4阶段，海底与陆地的多波多分量地震勘探实践越来越多，并取得多个成功应用。

本文将论述和总结多波多分量地震勘探技术的发展与应用前景，集中探讨多波多分量地震勘探在地震各向异性、精确成像、裂缝(储层非均质性)特征检测及储层流体辨识方面的应用潜力，并以中国陆上三维三分量(3D3C)地震勘探实践为例进行说明。

## 1 储层非均质性

对储层的非均质性研究正在飞速发展，目前最为有效的方法是对三维地震资料辅以井约束进行联合反演；然而，地震资料往往缺乏地下精细的地质信息，这些精细的地质信息又是能够反映地下储层非均质特征的重要信息，因此，提高分辨率进行精细的小规模地质构造研究是不可或缺的。

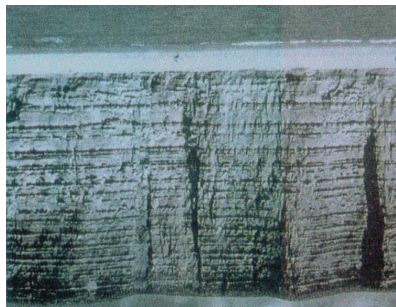
小于波长尺度的非均质体产生的散射波在地震波的传播过程中能够显著影响地震波的宏观特征，同时散射波特征较好地反映了非均质储层的分布信息。地震波的散射特征可以利用等效均匀介质代替非均匀介质进行模拟分析，利用这一特性，通过研究地震波的反射特征就可以表征储层的物理特性。基于此，我们

就可以在保留原始波场信息多样性的同时研究断层、交错层理、河道以及地表等不同因素带来的对储层特征的影响，而在多波地震勘探中，利用纵波和横波数据可以成功地预测裂缝的发育方向和密度信息。

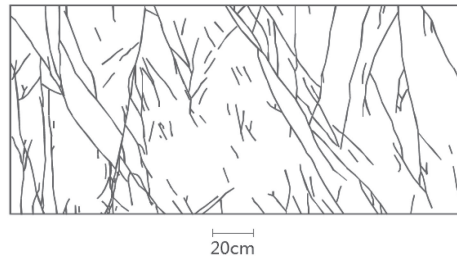
根据观察得到的详细地质特征，储层的非均质性定义可包含许多方面，其中岩石物理成分空间分布的不均匀性对于储层的非均质性有重要影响，主要包括岩石结构、岩性、岩石物理以及流体流动等不同尺度特性带来的影响。储层的非均质性尺度特征可以划分为4个主要方面：(1)反映宏观尺度特征的盆地构造；(2)代表大尺度特征的地层展布情况；(3)代表中尺度特征的交错层理分布；(4)裂缝、颗粒、孔隙等组成的小尺度特征。虽然非均质性主要依赖于所使用的地震数据类型，但是仅仅从岩石地层的层理面、断层分布以及沉积体系进行分析是远远不够的。完整的储层非均质性研究应当是包含不同尺度数据的综合性研究。等效介质理论可以在体现储层非均质性的同时，对储层非均质性特征进行详细描述，并且这一理论考虑到了不同尺度特征带来的影响；因此利用等效介质理论对储层非均质性进行研究，将极大地提高研究效果。

## 2 地震各向异性

地震各向异性是指储层的地震波场响应特征随观测方向变化而变化的地震波传播现象。储层引起地震各向异性的原因有3种。第1种是储层中含有页岩或者泥岩等薄互层沉积序列，由此产生具有垂直对称轴的横向各向同性介质，称作VTI介质(transverse isotropy with a vertical axis of symmetry)，也称为极化各向异性介质。在极化各向异性介质中传播的地震波场，其传播速度与地震波的入射和反射角度有关。第2种是由于储层中分布有垂向裂缝等因素引起的以水平方向为对称轴的横向各向同性介质，称作HTI介质(transverse isotropy with a horizontal axis of symmetry)，也称为方位各向异性介质。地震波在方位各向异性介质中的传播速度与地震观测的方位角有关。图1给出了这2种地震各向异性的地质成因，在图1a中，地震波沿着沉积层面延伸的方向传播速度快于其他方向，而在图1b中，地震波沿着裂缝分布走向的方向传播速度最快。地震波沿着不同传播路径的速度差异导致储层表现出地震各向异性特征。第3种由于地层中存在含有倾斜裂缝的情况，此时可等效地看作具有倾斜对称轴的横向各向同性介质，简称TTI介质(transverse isotropy with a tilted axis of symmetry)。由于TTI介质



(a) 薄互层诱发的各向异性



(b) 裂缝诱发的各向异性

图1 地震各向异性的地质成因

Fig. 1 Two common causes of seismic anisotropy

在现实中广泛存在, 针对TTI介质的地震各向异性研究也越来越多。在地震各向异性研究中, VTI介质多用于等效近似上覆地层的地震各向异性, HTI介质多用于等效近似裂缝储层的地震各向异性。

地震各向异性在油气勘探中主要有2个方面的应用: 一个是用于提高地震成像的品质, 另一个是用于检测储层非均质性的分布和几何特征。在地震成像时储层各向异性会导致成像模糊和错位。对于VTI介质, 储层的地震成像可能产生垂向和横向的位移, 这将严重影响后续的储层建模和油气开发方案设计, 导致储层在垂向和横向都出现错位, 错位的大小取决于地震各向异性的程度和储层倾角的大小。当储层产状为水平时, 储层深度误差可以通过修正垂向速度来校正, 当地震各向异性和地层倾角同时存在时, 问题将变得复杂。依据文献[7], 对于 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的小角度地层倾角, 如果存在5%~10%的地震各向异性, 地震成像上储层的横向位移会增至2~3个地震波长, 而这个位移是无法通过校正垂向速度来修正, 解决问题的唯一办法是各向异性偏移技术。对于HTI介质, 地震成像的主要问题是成像模糊, 这会导致对储层地质解释的错误, 必须通过考虑不同观测方位的偏移成像算法来解决此问题; 然而, 宽方位角的三维地震数据地震成像仍然是一个需要进一步研究的难点。

理论研究与实际观测表明, 横波在各向异性介质中传播时发生横波分裂现象, 即横波在穿过各向异性介质传播时会分裂为2个偏振方向相互垂直的横波。以相对较快速度传播, 称为快横波; 以相对较慢速度传播, 称为慢横波。对于HTI介质而言, 快横波的偏振方向平行于裂隙走向, 而慢横波的偏振方向则垂直于裂隙走向(如图2中所示)。这一现象是利用多分量地震资料定量描述储层中裂缝情况的主要依据。据此, Crampin<sup>[8]</sup>首次前瞻性地提出了利用快横波的偏

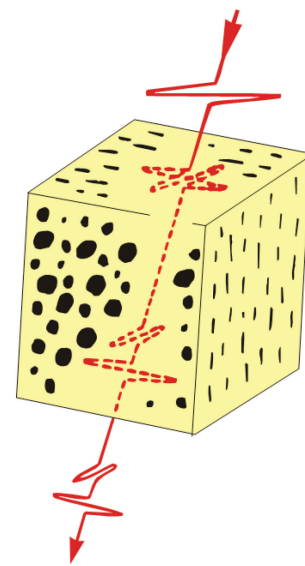


图2 HTI 介质中的横波分裂原理示意图

Fig. 2 Shear-wave splitting in fracture-induced HTI media

振方向确定裂隙方向, 而用快慢横波的时差确定裂隙发育程度, 并在后来的多波多分量地震勘探中得以实现并应用。

### 3 多波多分量地震勘探技术

多波多分量地震勘探是一种被业界寄予厚望的地球物理勘探技术手段, 近年来地球物理学家利用多波地震勘探资料解决了许多纵波难以解决的问题, 取得了显著的经济效益。中国石油勘探界在长庆油田、大庆油田、苏里格气田、四川新场、塔里木盆地等工区采集了多块多波资料, 并在油气田勘探与开发中取得了越来越多的应用成果。

得益于转换波勘探技术的成功应用, 多波多分量地震勘探技术近年来得到迅猛发展。相对于早期横波



勘探, 转换波勘探具有采集费用低、资料信息量大、能够描述储层内部构造细节等优点, 可以解决许多油气生产中急需解决的问题。例如, 小构造小断层的勘探、真假亮点的分辨、储层中油气饱和度的分析等, 尤其对于各种类型的裂缝性油气藏的识别, 多波多分量地震较传统的纵波地震具有更强的优势。

多波多分量地震勘探技术记录并分析地震波场中质点振动的全部空间位移特征, 而地震波场中质点的位移是一个分布于三维空间的矢量, 并可在三维空间中分解为3个相互垂直的分量; 因此, 要精确记录并分析质点的全部空间位移特征, 就必须采用具备多个分量的检波器来记录地震波场中质点的振动, 这就是“多分量”或“多波”这个术语的由来。利用3个相互垂直的检波器(可记为 $x, y, z$ )记录地震波场中质点在三维空间中的位移矢量(3-Components, 简称3C; 或Multiple Components, 简称MC), 如果激发震源采用含有3个相互垂直分量的震源( $X, Y, Z$ ), 理论上可以记录到9分量地震数据, 如图3a所示)。与传统的纵波地震勘探(只记录或分析地震波场中质点在垂向上的运动特征)相比, 在多分量地震数据的采集与处理中, 需要更加注重这些新增分量之间的相互关系以及他们与整个地震波场的关系。为此, 需要一个清楚定义的坐标系统, 如图3b所示。可以采用笛卡儿坐标系( $x, y, z$ )作为观测系统的全局坐标系, 其中 $x$ 是平行于地震勘探线方向,  $y$ 是垂直于地震勘探线方向,  $z$ 是垂直于地面向下的方向。在多分量数据处理过程中, 引入一个以震源为中心的柱坐标系作为观测系统的局部坐标系( $z, r, t$ ), 其中垂向 $z$ 仍然垂直于地平面, 径

向 $r$ 是从源指向检波器方向, 切向 $t$ 是与 $r$ 垂直的方向。同时, 全局坐标系( $z, x, y$ )与局部坐标系( $z, r, t$ )各自形成右手坐标系。综合利用全局坐标系与局部坐标系分析多分量地震数据各个分量之间的耦合关系, 并将多分量记录的地震波场按照地震波的偏振特点相互分离, 是多分量地震数据处理的一个关键步骤。

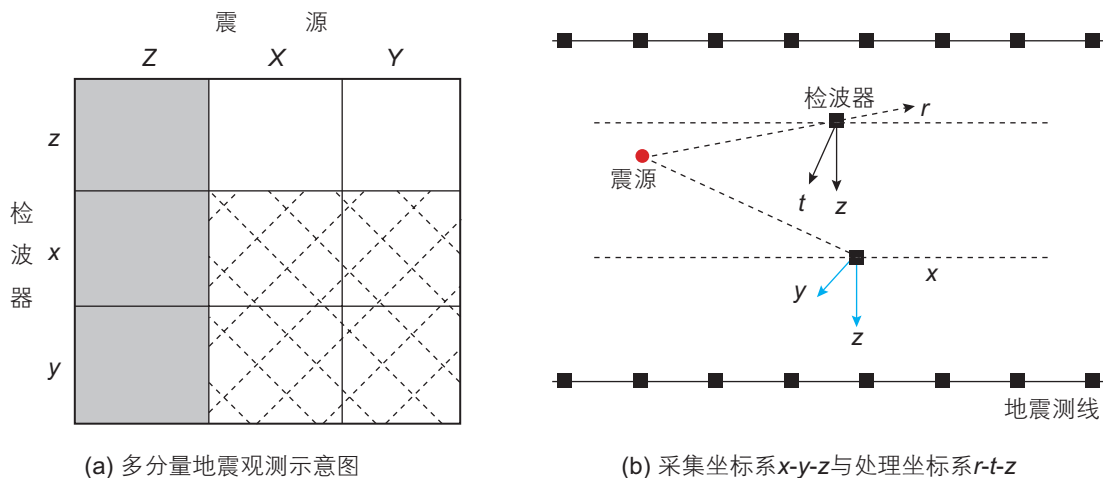
多波多分量地震作为复杂油气藏和非常规油气藏勘探的重要手段, 在岩性预测、流体识别、裂缝检测、气云及岩下成像、降低勘探风险等方面将继续发挥重要作用。结合目前国内外的研究进展及实际应用领域, 可以看出采集、处理、解释一体化将是多波多分量地震勘探的必然趋势。就采集、处理、解释及应用等方面单独来看, 具有如下的发展趋势。

(1) 多波采集方面: 由小规模试验向工业化生产转变; 由井中、海上多分量逐步过渡到井地联合多分量; 宽频、宽方位、高密度陆地和海洋多波采集技术发展迅速。

(2) 多波处理方面: 面向储层的叠前高保真精细处理(矢量信号处理、偏移距向量分选、井控、反演驱动), 由各向同性向各向异性转变(VTI、HTI、TTI), 由时间域向深度域转变, 融合井/VSP、地震属性、地震模拟、地震反演等信息的处理解释一体化。

(3) 多波解释方面: 面向油藏和开发的以岩石物理为基础的叠前联合反演、弹性波全波形反演、多种地球物理数据的联合反演(重、磁、电、震)及综合属性分析等技术将使多波地震在缝洞型、隐蔽型、致密型以及非常规油气预测领域扮演重要角色。

(4) 多波应用领域: 向开发领域延伸, 向非常规能



(a) 多分量地震观测示意图

(b) 采集坐标系 $x-y-z$ 与处理坐标系 $r-t-z$

注: 图(a)中阴影部分表示本文主要讨论的三分量转换波地震观测。

图3 多分量地震观测系统

Fig. 3 Multicomponent data acquisition geometry



源勘探领域延伸。

## 4 多分量地震数据中的信息量

多分量地震数据中包含多种可应用的信息，经常用到的有：(1) 用于各向异性参数估计与成像的纵波与转换波反射旅行时属性；(2) 用于识别岩性的纵波与横波速度比( $V_p/V_s$ )及其波阻抗值；(3) 用于描述储层非均质性及其发育情况的纵波方位属性和横波分裂属性；(4) 用于流体检测的纵波与转换波频率变化相关属性。

### 4.1 用于各向异性成像和参数估计的反射旅行时属性

各向异性成像及其参数估计在地震勘探技术研究中受到越来越多的重视，在地震成像时不考虑各向异性的存在将导致对地下地层与构造的成像模糊，某些情况下甚至更糟，会造成对储层位置的成像误差。在这方面已经有大量的研究成果<sup>[9-12]</sup>。

首先考虑VTI介质中偏移距从近到远时纵波与转换波的反射时间。在时间域，纵波动校正的2个主要控制参数是近偏移距的NMO (normal moveout) 速度  $V_{p2}$  和各向异性参数  $\eta$ ，而各向异性参数  $\delta$  和纵波的垂向速度与动校正速度的比值有关，控制着纵波深度转换的误差；所以，用3个参数  $V_{p2}$ 、 $\eta$  和  $\delta$  就完全可以描述纵波在VTI介质中的传播速度。同样的，横波动校正速度的2个主要控制参数是近偏移距NMO速度  $V_{s2}$  和各

向异性参数  $\zeta$ ，而另一个各向异性参数  $\sigma$  和横波垂向速度与动校正速度的比值有关，控制着横波深度转换的误差，所以，描述VTI介质中横波传播速度的三个参数是  $V_{s2}$ 、 $\zeta$  和  $\sigma$ 。这些参数之间的关系如下：

$$\begin{aligned} V_{p2}^2 &= V_{p0}^2(1 + 2\delta), & \eta &= \frac{\varepsilon - \delta}{1 + 2\delta} \\ V_{s2}^2 &= V_{s0}^2(1 + 2\sigma), & \zeta &= \frac{\varepsilon - \delta}{1 + 2\sigma}. \end{aligned} \quad (1)$$

VTI介质中转换波反射时距方程有4个关键参数，分别为  $V_{c2}$ 、 $\gamma_0$ 、 $\gamma_{\text{eff}}$ 、 $\chi$ ，其中  $V_{c2}$  为转换波在近偏移距的NMO速度， $\gamma_0$  和  $\gamma_{\text{eff}}$  分别为垂向和有效速度比，而  $\chi$  是转换波各向异性参数，它是  $\eta$  和  $\zeta$  参数的综合体现： $\chi = \gamma_0 \gamma_{\text{eff}}^2 \eta - \zeta$ 。这4个参数 ( $V_{c2}$ 、 $\gamma_0$ 、 $\gamma_{\text{eff}}$  和  $\chi$ ) 可以作为转换波的叠加速度模型，然而对于VTI介质中的转换波时间偏移，采用  $V_{p2}$ 、 $V_{s2}$ 、 $\eta$  和  $\zeta$  这4个参数更加适用，这时候，四参数  $V_{p2}$ 、 $V_{s2}$ 、 $\eta$  和  $\zeta$  可以认为是转换波的时间偏移速度模型，并且转换波的时间偏移速度模型可从转换波叠加速度模型计算得到。

### 4.2 $V_p/V_s$ 波阻抗分析

纵横波速度比和波阻抗是从多波多分量地震数据中提取的两个常用参数。纵横波速度比的变化反映了地下地层岩性的变化<sup>[13]</sup>。一种典型情况是，不同的岩性对应着不同的纵横波速度比值，而含油气地层具有较低的纵横波速度比的特征(如图4所示)。Gaiser<sup>[14]</sup>提出了一种通过对纵波数据和转换波数据做相关分析

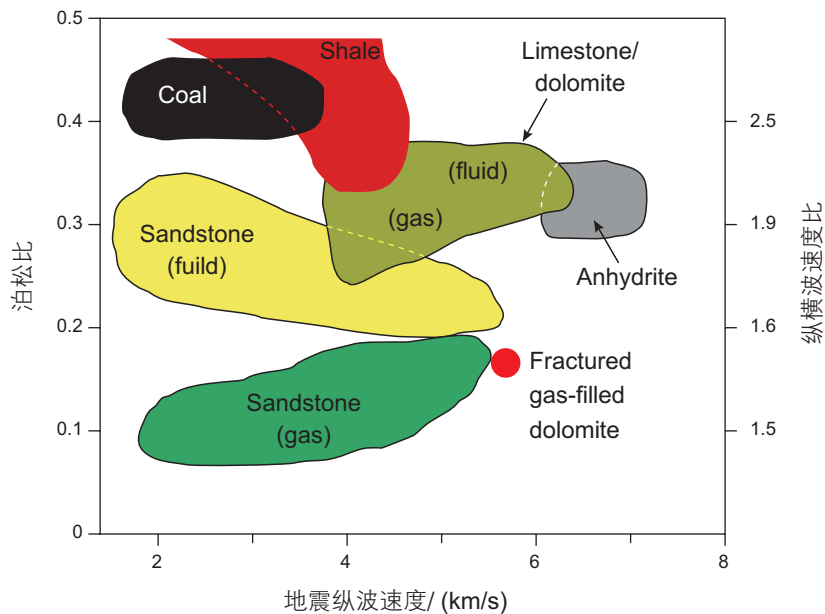


图4 纵横波速度比值 ( $V_p/V_s$ ) 与岩性区分

Fig. 4  $V_p/V_s$  ratio and lithology discrimination

确定长波长纵横波速度比的算法。Formel和Backus<sup>[15]</sup>采用纵波和转换波的偏移数据的自动匹配算法求得纵横波速度比。

相对纵横波速度比,纵波和横波波阻抗属性得到更加广泛的应用。虽然通过对纵波数据的叠前反演就可以获得纵波和横波的波阻抗属性,但是使用多波数据却可以明显增加横波波阻抗反演结果的准确性,这可以在相关文献中找到大量的实例<sup>[16-18]</sup>。

### 4.3 用于裂缝预测的纵波属性

当储层裂缝走向主要集中在某一个方向时,纵波属性(如旅行时、叠加速度、振幅、波阻抗等)将随着观测方位角的变化而变化,这些属性变化规律近似一个椭圆<sup>[19]</sup>。椭圆的长轴指向裂缝的方向,椭圆的长短轴的比值与裂缝发育密度有关;所以,只要获取足够充分的纵波属性随方位变化的信息,就可以从三维纵波数据体中获得裂缝方向和发育密度平面图,通常称之为方位属性分析技术。

在方位属性分析技术的实际应用中,提取裂缝信息的方法主要有2种:一种是全方位角表面拟合,另一种是窄方位角叠加。方法一采用最小平方拟合技术将方位角和偏移距信息拟合成一个椭圆面。方法二先将地震数据分离成一系列的窄方位角数据体。对应这2种方法,用于提取裂缝信息的地震属性主要有4个:速度、旅行时(层间旅行时)、振幅和AVO(Amplitude Versus Offset)梯度。第1种方法主要利用的地震属性是振幅和旅行时,第2种方法利用的属性是速度和AVO梯度。多个工区的处理实验表明,窄方位角叠加技术易受采集脚印的影响,因此在实际数据分析中,应尽量采用第1种方法。

### 4.4 横波分裂

分析各向异性介质中的横波分裂属性是多波多分量地震数据处理的常用手段,通过对穿过储层的横波分裂属性的分析,可以得到大量表征储层内部结构的信息<sup>[20-25]</sup>。在这些属性中,最常用的3个属性是:快横波的极化方向、快慢横波的时差、快慢横波的反射能量的差异。

快横波的极化方向反应了储层中裂缝走向和可能的流体运移方向;快慢横波的时差大小与储层中裂缝及裂隙的发育密度有关;而快慢横波反射能量的差异与储层中填充的流体类型有关。

在对多分量地震数据进行横波分裂属性分析时,当遇到浅层与深层地层各自包含不同走向裂缝的情况

下,快横波和慢横波可能会发生二次横波分裂,形成具有新的极化方向和速度的四个横波分量。这意味着储层的裂缝信息被其他地层的各向异性现象所掩盖,目前研究人员正致力于如何将二次或者多次横波分裂现象完美分离。对于薄互层或者弱各向异性储层,快慢横波之间的时间差异可能并不大,甚至过小的快慢横波时差不能用于描述储层裂缝情况。

### 4.5 频率变化相关属性和谱分解

近年来,地球物理学家根据地震波场的某些属性随频率变化而变化的现象,如对应不同地震主频地震波场散射和衰减规律的变化,提出了预测储层流体类型及其分布情况的新技术。如Chapman<sup>[26]</sup>提出了一套针对多孔岩石频率相关属性的动态多孔弹性介质理论。其理论模型包含2个尺度的储层非均质性:小尺度和中尺度。对于中尺度的充满流体的开放孔隙(孔隙长度介于岩石颗粒尺度与地震波长之间),该理论认为地震各向异性与频率相关,即孔隙大小和孔隙中的流体类型直接和频率相关。尤其是,纵波随方位角衰减和散射,横波分裂依赖于地震波频率。这样,频率相关的属性与储层的孔隙方向和大小以及孔隙流体类型等特性建立了相应的联系。

在单一反射界面情况下,Gassmann理论模型认为流体饱和度的变化会引起波阻抗和反射波振幅的变化。Chapman等<sup>[27]</sup>提出了一套计算频率相关的地震反射和透射响应的研究成果。其中认为,由于气体的存在导致了振幅衰减和散射的显著增加。在含油气地层中,强散射导致了反射界面处的波阻抗差和频率相关,从而使反射系数也依赖于频率。与背景趋势相比,这种特性会显著地将地震反射移向高频端或低频端,其移动方向与AVO类型的移动方向一致。

根据Chapman的理论模型,当地震波在饱和流体介质中传播时,不同类型的流体对地震波速度的影响因素主要有3个:(1)流体的体积模量。不同类型流体的体积模量对饱和流体岩石的体积模量的贡献不同,流体体积模量对地震波速度的影响主要体现在纵波速度上,横波速度受到的影响较小。(2)流体的密度。当孔隙中流体被另外一种流体替代时,这会导致饱和流体介质密度的改变,那么很显然这也会影响到纵横波的传播速度。(3)流体的黏滞度。其对地震波速度的影响一般都会被忽视,一般等效于流体弛豫时间对地震波速度的影响。所以流体粘滞度对地震波速度的影响主要体现在地震波速度的频变特征上。

储层中的流体类型主要分为3种:水、油和天然

气。储层中流体的存在对地震波速度和地震各向异性特征具有重要影响，表 1 列出了储层中这 3 种流体的典型物性参数。

为了研究储层中填充不同流体类型对多分量地震波场的影响，Chapman 建立了一个简单的三层平面模型进行数值模拟(表 2)：模型顶层为各向同性介质，纵横波速度分别为 2 337 m/s 和 1 253 m/s，密度为 2 265 kg/m<sup>3</sup>；中间层为 HTI 介质，该层主要是在各向同性介质(纵横波速度、密度等参数与顶层相同)中置入定向排列的垂直裂缝，裂缝呈硬币状，纵横比为 0.001，裂缝尺度为 0.1 m，裂缝密度为 0.1，除了裂缝外，中间层还含有球形孔隙，孔隙度为 0.1；底层也为各向同性介质，纵横波速度分别为 2 866 m/s 和 1 648 m/s，密度为 2 265 kg/m<sup>3</sup>。在孔隙中分别饱含水和气两种流体的情况下，基于 Chapman 裂缝多尺度模

型假设，在流体替换时，考虑了各种流体不同的黏滞性，第 2 层中填充流体的具体参数参考表 1 所示。

具体的数值模拟方法应用了 Chapman 理论模型计算含裂隙、孔隙与流体介质的等效弹性刚度系数，基于反射率法在 FFT 变换域中实现数值模型的地震正演模拟，根据储层裂缝的走向，当储层中分别是饱含水和饱含气这 2 种不同类型流体时，沿着平行裂缝走向观测和垂直裂缝走向观测，记录正演的多分量波场数据。正演模拟的震源为 30 Hz 雷克子波，偏移距范围 0~1 500 m，道间距 25 m。

对数值模型的地震正演波场进行分析的结果表明，快横波的传播速度几乎不受频率变化的影响，而慢横波的传播速度受到频率变化的明显影响(如图 5 中所示)，这种频变属性提示我们应考虑如何利用它检测储层中填充的流体类型。

表 1 流体特征参数

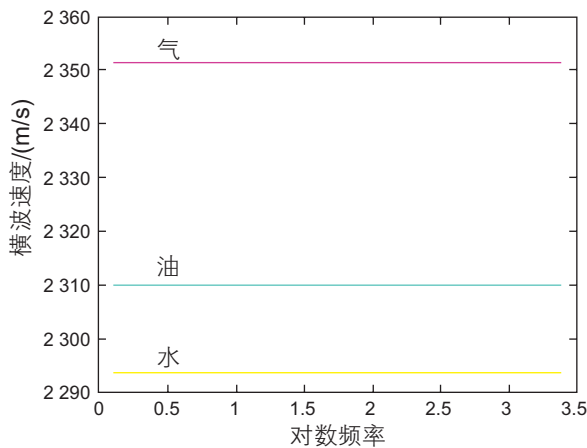
Table 1 Fluid properties

	纵波速度/(m/s)	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	粘滞度/(Pa·s)	弛豫时间/s
水	1 710	1 100	1.0 × 10 <sup>-3</sup>	2.0 × 10 <sup>-5</sup>
油	1 250	800	2.0 × 10 <sup>-2</sup>	4.0 × 10 <sup>-4</sup>
天然气	620	65	2.0 × 10 <sup>-5</sup>	4.0 × 10 <sup>-7</sup>

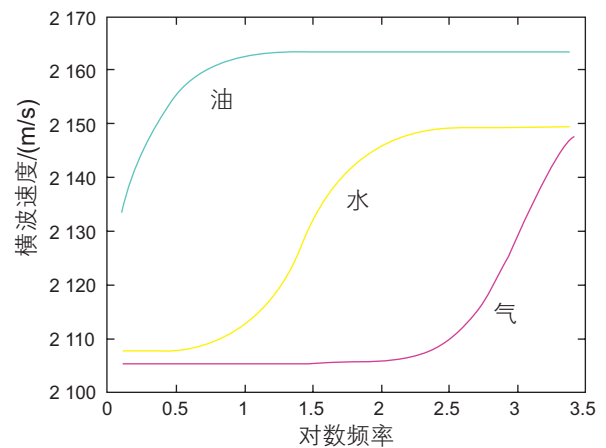
表 2 数值模型的岩石物理参数

Table 2 The physical properties of the numerical model

	纵波速度/(m/s)	横波速度/(m/s)	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	层厚 m
顶层	2 337	1 253	2 265	500
中层	2 559	1 437	2 265	500
底层	2 866	1 648	2 326	500



(a) 不同流体的快横波速度频变曲线



(b) 不同流体的慢横波速度频变曲线

图 5 储层中填充不同类型流体时快慢横波速度与频率的关系

Fig. 5 Frequency-dependent velocity variation of different fluid types



谱分解技术是获取频率相关属性的首要方法。在过去的几年里,大家使用谱分解技术来实现高精度的构造成图。近年来,谱分解技术被作为直接检测烃类的重要指标<sup>[28]</sup>。传统的谱是由傅里叶变换得到,只给出了每一个频率成分的振幅谱,没有任何关于频谱随时间变化的信息。频谱分解技术解决了这一难题并可以对每一个时间采样点进行瞬时频率分析。对于频谱分解现在已经有一些比较成熟的算法,例如盖博变换<sup>[29]</sup>、短时傅里叶变换<sup>[28]</sup>(STFT, short-time Fourier transform)、最大熵谱法<sup>[30]</sup>、连续小波变换<sup>[31]</sup>和匹配追踪分解<sup>[32]</sup>。

## 5 多波多分量地震数据处理解释软件的发展

20世纪90年代中后期,随着多波多分量地震勘探技术在海底拖缆勘探中的商业应用,国内外地球物理服务行业纷纷投入力量开发出配套的多波多分量数据处理与解释软件,如WesternGeco公司推出的Q系列技术(Q-Signal、Q-Time、Q-Depth、Q-Vector、Q-Seabed、Q-Reservoir、Q-Production)中的Q-Vector即包含了12个多波多分量地震数据处理模块,具体包括CCP(Common Conversion Point—共转换点)道集抽取、多分量噪声压制、各向异性处理、横波分裂分析、叠前时间/深度域成像等,能够满足多波多分量地震数据的处理需要。

CGGVeritas公司长期跟踪多波多分量处理技术,在多波处理方面具有很强的技术实力,并研发了多波多分量数据处理模块,其地震数据批处理软件系统中包括CCP道集抽取、极化滤波、转换波静校正、各向异性叠加成像、方位各向异性处理、横波分裂分析、叠前时间及叠前深度域成像技术等功能模块和专门用于多波多分量地震资料解释的交互软件包(VectorVista),VectorVista软件目前能够实现多分量层位对比、速度比扫描、多分量叠前联合反演、方位各向异性分析、横波分裂属性分析与提取等解释功能。

地球物理服务商GXT-ION公司不但提供三分量数字检波器产品和多波多分量地震采集服务,而且自主研发了一套多波多分量地震资料处理与解释软件,能够为客户提供全套的多波多分量地震数据处理与解释服务,但是不对外出售多波多分量地震处理与解释的软件产品。

中国石油集团东方地球物理公司从2012年开始研发多波处理软件,2013年发布了GeoEast-MC V1.0多波处理系统,到2015年形成了能满足工业化生产需

求的GeoEast-MC V2.0多波处理系统。在研发过程中,一直坚持实际3D3C数据的试生产处理,目前能够满足多波多分量地震数据处理需要。

图6展示了GeoEast-MC V2.0多波地震资料处理系统的功能。可以看出,该系统主要包括预处理、静校正、参数估计、动校正及时间域成像、深度域成像、解释性处理等6大类功能。与目前主流多波商业处理软件系统相比,GeoEast-MC V2.0系统具有丰富的成像参数估计分析功能,涵盖了多波地震资料时间域成像处理的所有必须功能,并且包含部分解释性处理功能,如纵波转换波匹配与横波分裂各向异性属性分析功能。图7所示为GeoEast-MC V2.0中的转换波各向异性速度分析交互工具界面,具有友好的操作界面、丰富的速度场操作功能,在多波多分量地震数据处理中可显著提升处理人员的工作效率。图8中所示为GeoEast-MC V2.0转换波叠前时间偏移效果与国外某商业软件的成像效果的对比,可以看出,成像效果与之相当。

此外,国内外还有若干小规模的多波多分量数据处理解释软件,针对多波多分量处理与解释的部分需求而研发,如Transform、ProMC、Hampson-Russell等软件中实现了多波处理与解释的部分功能,国内的中国石化西南分公司也自主研发了小型的多波处理解释系统MCI(Multicomponent Interpretation)与MCP(Multicomponent Processing)软件。

## 6 多波多分量地震勘探应用实例

### 6.1 赛汉三维三分量(3D3C)数据处理

赛汉三维三分量地震工区位于赛汉塔拉凹陷赛中洼槽赛66井—赛68井区,满覆盖观测面积为30.0 km<sup>2</sup>,覆盖次数为13×6次,面元大小为20 m×20 m。图9是在迭代处理过程中不同轮次处理阶段目标线的叠前时间偏移结果对比。从左到右随着数据前期转换波静校正、叠前去噪等迭代处理结果的优化,叠前时间偏移结果也相应地逐步改善,成像品质逐步提高。

图11是利用层位方法计算得到的五砂组层段的平均 $V_p/V_s$ 属性平面图。速度比值能够反映目的层段的沉积和含油气性特征。一般情况下,低比值对应于砂岩,高比值对应于泥岩,当砂岩中含油气时,比值会变得更低。通过速度比平面图判断,三砂组、四砂组和五砂组工区的东南部赛79、赛80及赛66井所在的陡坡扇速度比值低,到赛68井所在的湖盆中心泥岩发

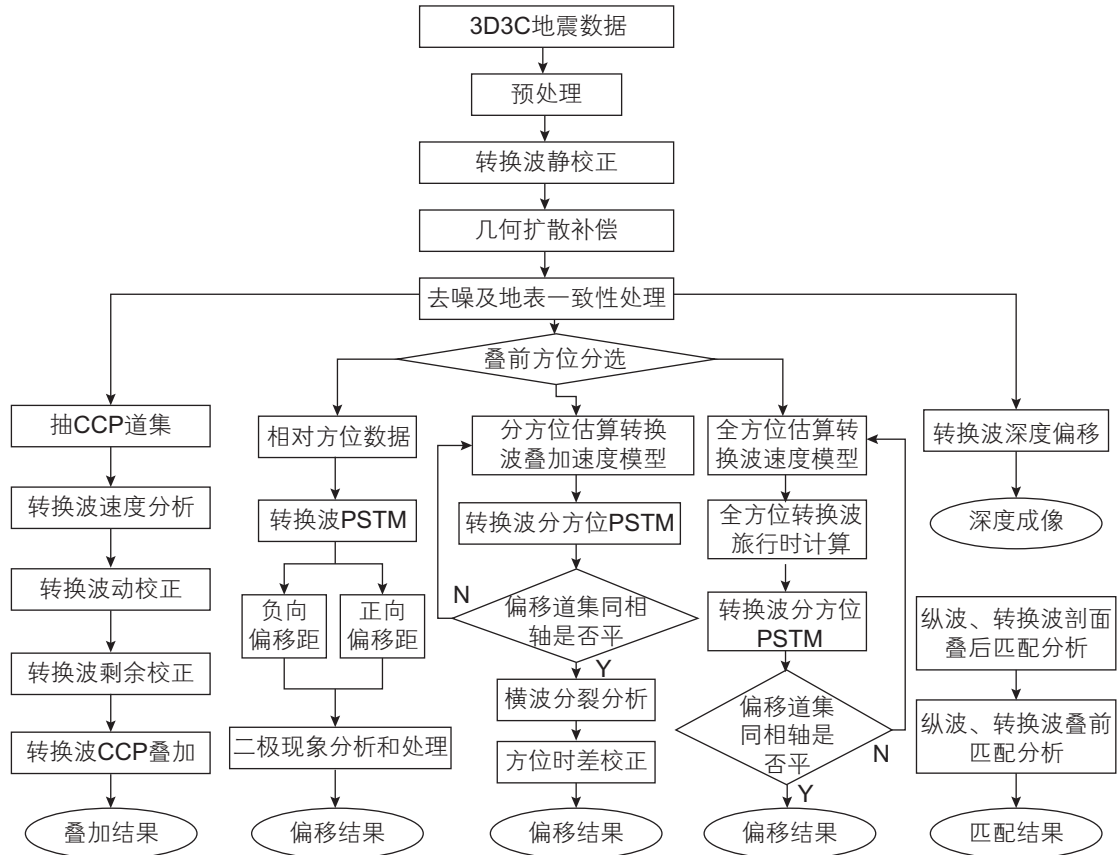


图 6 GeoEast-MC V2.0 多波多分量数据处理流程

Fig. 6 Multicomponent seismic data processing work flow of GeoEast-MC V2.0

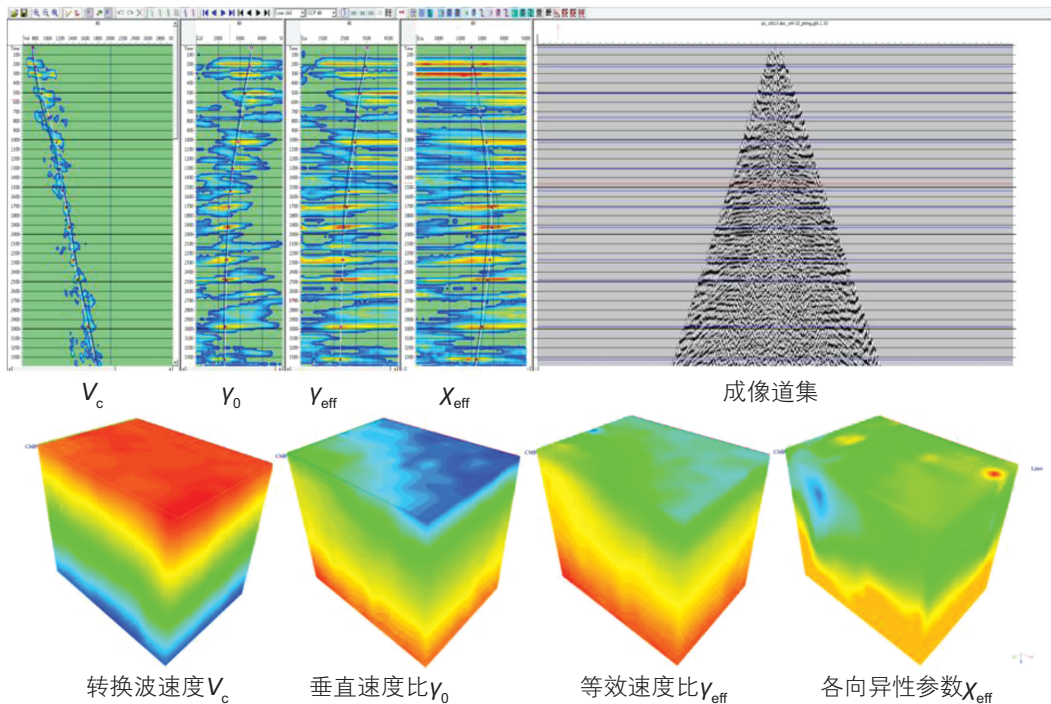
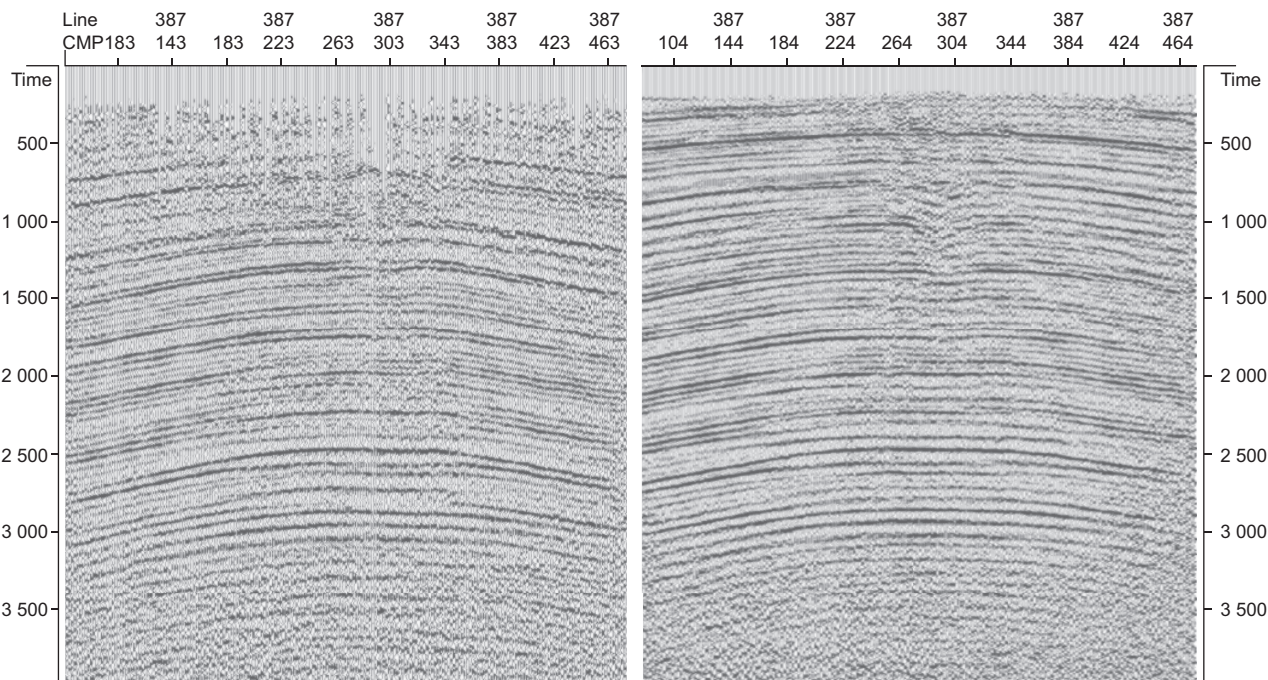


图 7 GeoEast-MC V2.0 转换波速度分析交互界面

Fig. 7 Converted-wave velocity analysis from GeoEast-MC V2.0



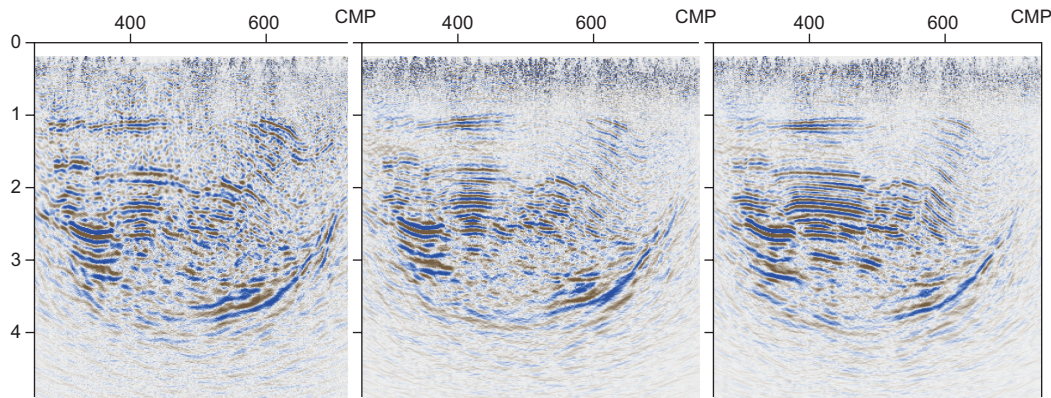


(a) GeoEast-MCV2.0 成像效果

(b) 某国际商业软件成像效果

图 8 转换波叠前时间偏移成像效果对比

Fig. 8 Comparison of pre-stack time migration imaging of converted-wave data



(a) 转换波静校正之后

(b) 第一次叠前去噪之后

(c) 第二次叠前去噪之后

图 9 赛汉 3D3C 数据叠前处理过程中叠前时间偏移结果对比

Fig. 9 Comparison of converted-wave pre-stack time migration results

育, 速度比值变大, 到北部开始有从大断层而来的物源, 为缓坡扇沉积, 速度比值又变低。

鉴于该区构造倾角较大且断层发育, 只进行了PP波和PS波叠后反演。图 12 是反演得到的纵波阻抗和横波阻抗剖面, 其中井点处插入的是GR曲线。从反演剖面看, 四砂组底部及五砂组的砂岩在南部的陡带发育较厚。从赛 84-赛 85-赛 68-赛 66-赛 80-赛 79 连井线来看四砂组和五砂组内的砂岩由赛 79-赛 80-

赛 66-赛 68 井逐渐变薄, 相带由冲积扇扇根、扇中到浊积扇再到半深湖过渡, 赛 79、赛 80 为扇中部分, 赛 66 为浊积扇, 赛 68 渐进湖心区, 明显泥岩变厚, 砂岩减薄。到赛 84、赛 85 井附近砂岩则来自于缓坡断层上盘, 为小扇体。从连井P波阻抗、S波阻抗分析, 泥岩为低阻抗, 砂岩为高阻抗, 砾岩为更高阻抗, 特别是陡坡断层下盘, 主要发育砾岩体。

通过对赛汉三分量三维转换波数据的静校正、叠



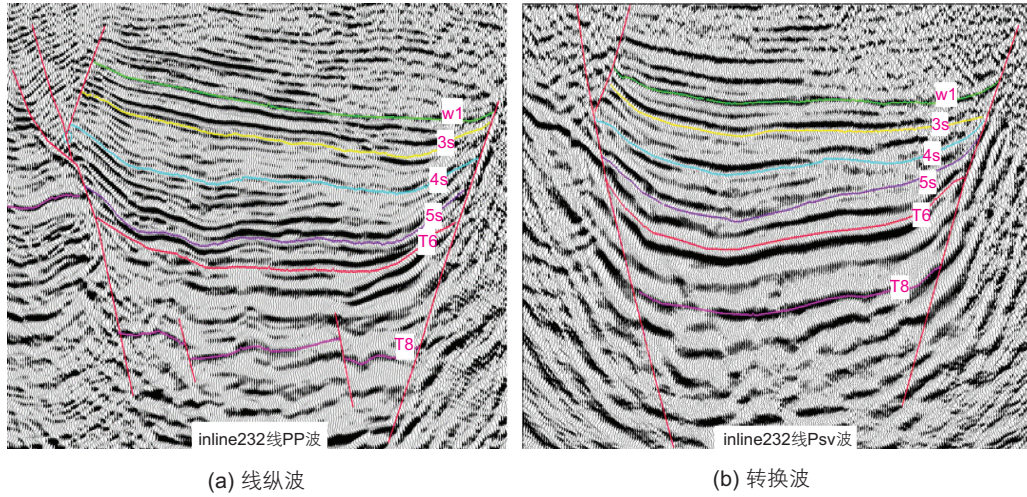


图 10 赛汉 3D3C Inline232 线纵波和转换波叠前偏移剖面地质解释

Fig. 10 Interpreted results of P-wave and converted-wave pre-stack migration profile from Inline 232 of the Saihan 3D3C data

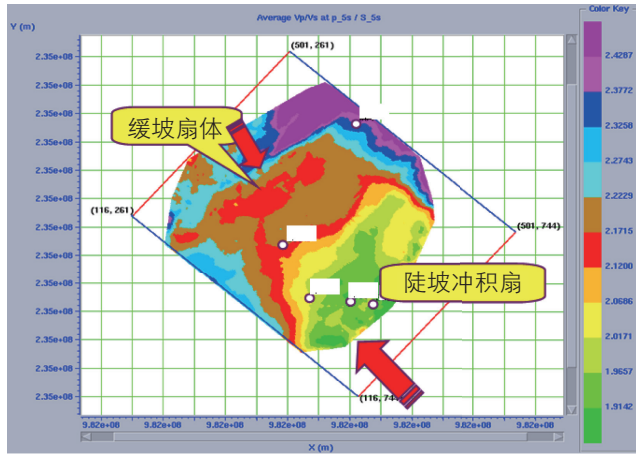


图 11 五砂组 (五砂组顶 -T6 顶) 平均  $V_p/V_s$  属性平面图

Fig. 11 Average  $V_p/V_s$  ratio of the Wusha group (top of T6)

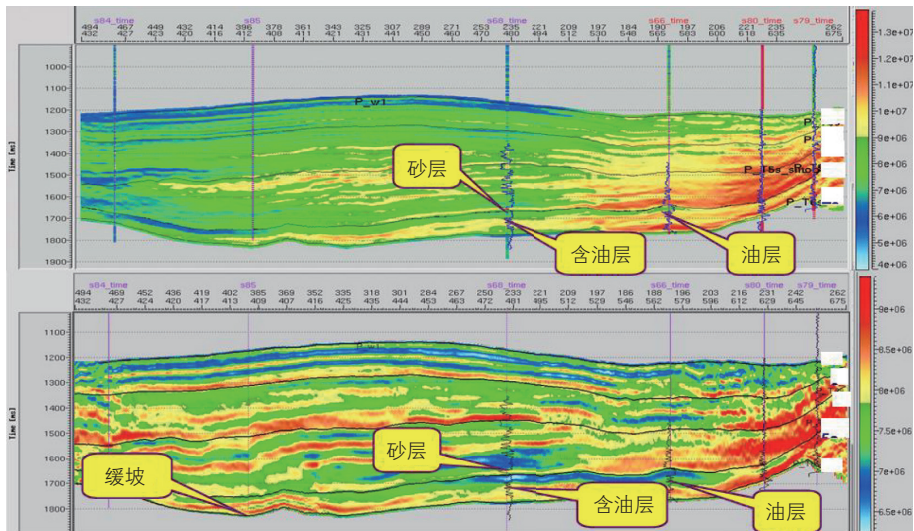


图 12 赛 84-赛 85-赛 68-赛 66-赛 80-赛 79 井纵波阻抗 (上) 与横波阻抗剖面 (下)

Fig. 12 Comparison of P- (top) and S-wave (bottom) impedance across wells S-84, S-85, S-68, S-66, S-80 and S-79

前去噪等前期迭代处理,以及在此基础上的叠前时间偏移速度场的建立、优化和叠前时间偏移处理得到的成果剖面如图10所示。与P波相比,PS转换波剖面上某些层段的反射成像品质更高,断面更清楚,为后续综合应用纵横波数据进行油气评价提供了良好的基础数据。

## 6.2 多波地震勘探在轮古油田的应用

工区位于轮古油田南部(参考图13所示),包括桑塔木断垒带和桑南西斜坡区。轮古油田位于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起中部,塔北隆起奥陶系灰岩顶面从轮南到英买力地区为一大型背斜,轮南、哈拉哈塘北部发育潜山,为一大型油气富集带。塔北隆起奥陶系灰岩顶面以轮古西走滑断裂为界整体分为2部分,以东整体呈现大型东西倾的斜坡,以东西向逆冲走滑断裂为界,可划分为中部斜坡带、轮南断垒带、桑塔木断垒带及南部斜坡带4部分。

奥陶系是轮古地区主要产油层系之一,与上覆地层不整合接触,与下伏寒武系整合接触,奥陶系主要产油层位为一间房和鹰山组,岩性以泥晶灰岩和粒屑灰岩为主。轮古油田奥陶系油藏是一种特殊类型的岩溶缝洞型碳酸盐岩油气藏,溶蚀孔、洞是油气的主要

储集空间,裂缝是主要的渗流通道。溶蚀孔、洞的形态不规则、发育不均一、空间分布随机性大。储层主要发育以下3种类型,一种是裂缝型储层,一种是裂缝孔洞型储层,一种是洞穴型储层。

裂缝型储层普遍发育,裂缝既是储集空间,又是渗滤通道,地震剖面中表现为杂乱反射特征,裂缝构成与发育的溶蚀孔、洞储集空间相互沟通,可称为好的有效储层。裂缝孔洞型储层不但发育溶蚀孔洞,而且发育裂缝,同时伴有裂缝溶蚀扩大,在地震剖面中表现为串珠、片状强反射特征。洞穴型储层在油井投产后产量高且能稳产,在地震剖面中表现为串珠状反射特征,在钻井过程中主要发生钻具放空和泥浆漏失等现象。

图14为纵波和转换波地震成像剖面对比图,溶蚀孔洞在纵波剖面主要呈现为串珠状和片状强反射特征,在转换波剖面以片状强反射特征为主。转换波地震频带略高于纵波地震频带且地层成像效果优于纵波。纵波对不整合面和缝洞成像略好于转换波,如图15所示。

针对鹰山组孔洞串珠状强反射特征,提取了纵波和转换波的能量梯度属性预测孔洞发育对比图(见图16所示),可以看出二者预测的区域基本吻合(见图17所示),但纵波预测的孔洞位置更精细,转换波预测的

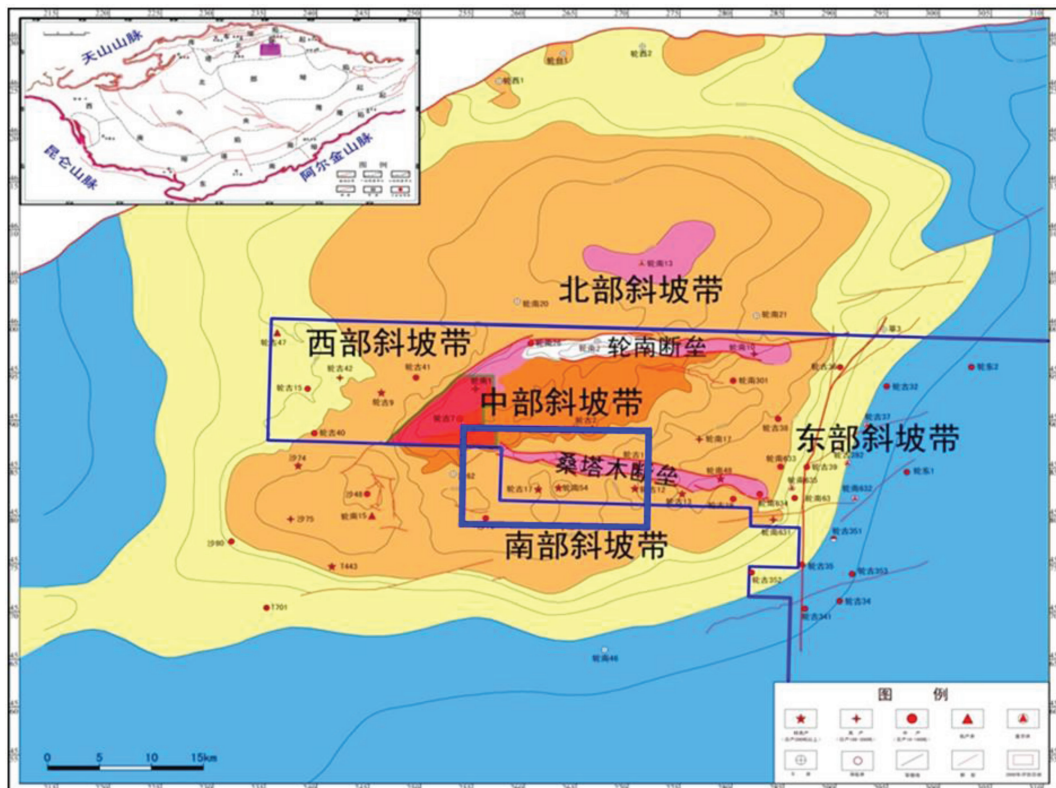


图13 研究区工区位置图

Fig. 13 Location of the study area



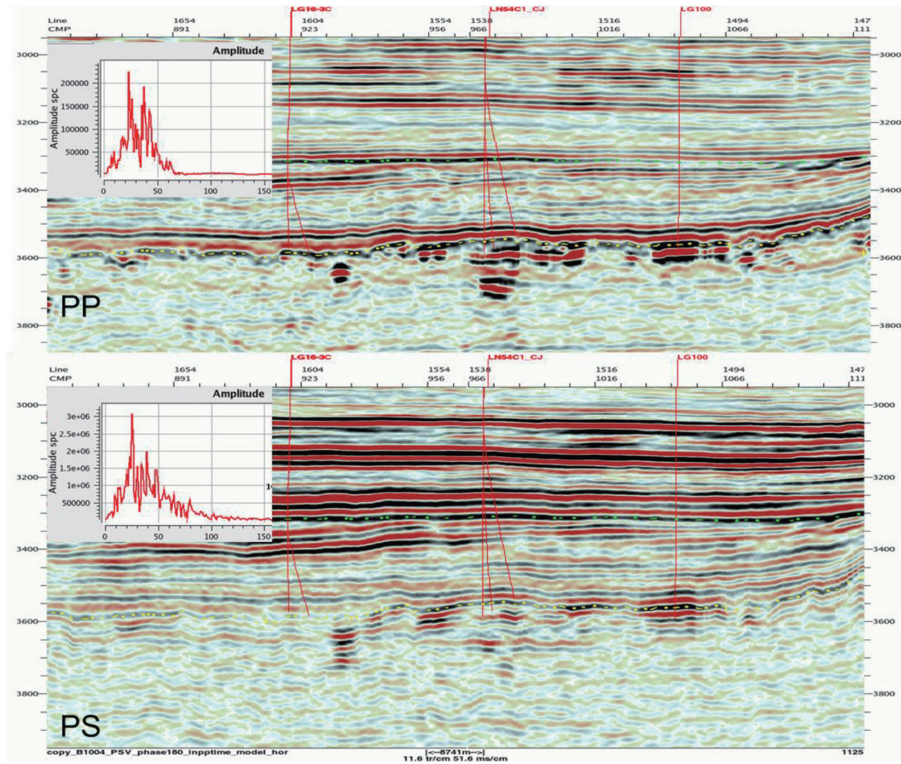


图 14 纵波 (上) 和转换波 (下) 地震成像对比图  
Fig. 14 Comparison of migration results of P- (top) and converted-wave (bottom)

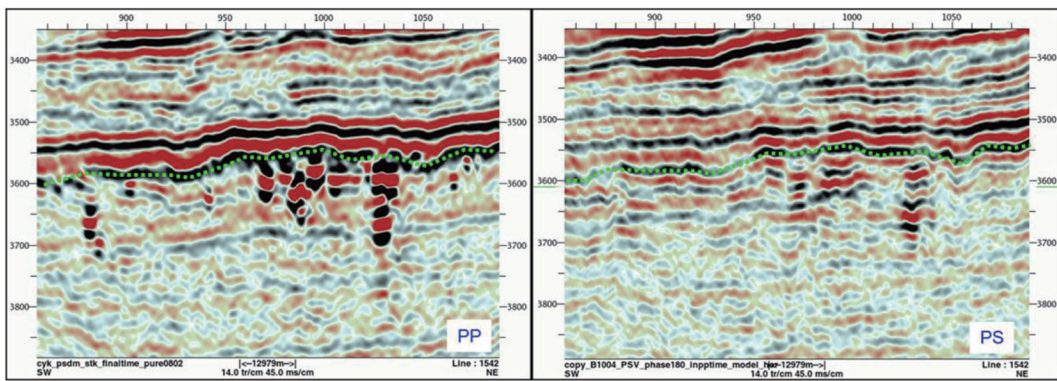


图 15 纵波 (左) 和转换波 (右) 空洞地震成像对比图  
Fig. 15 Comparison of cave characteristics for P- (left) and converted-wave (right)

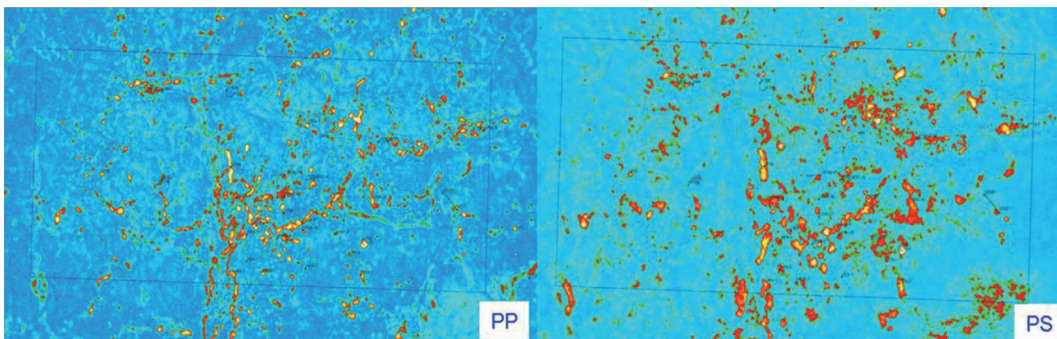


图 16 纵波 (左) 和转换波 (右) 鹰山组空洞预测对比图  
Fig. 16 Time slices of P- (left) and converted-wave (right) for imaging caves of the Yingshan Group



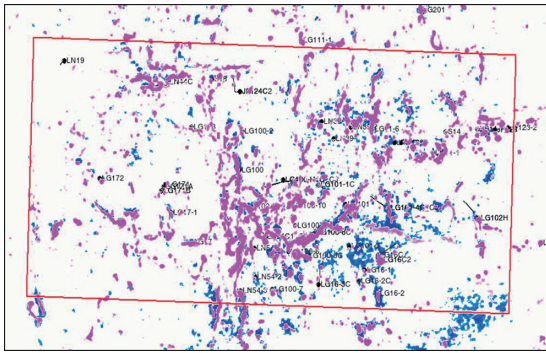


图 17 纵波 (粉色) 和转换波 (蓝色) 鹰山组孔洞预测叠合图  
Fig. 17 Superimposed time slices of P- (pink) and converted -wave (blue) for imaging caves of the Yingshan Group

孔洞呈片状出现。

结合成像测井资料, 利用三维地质体雕刻技术, 对一间房组和鹰山组溶蚀孔洞及裂缝进行三维雕刻, 最终预测溶蚀孔洞体 596 个 (见图 18 所示)。

## 7 讨论与总结

本文论述了多分量地震勘探原理及其数据处理技术, 并介绍了可以从多分量地震数据中提取的信息种类。在讨论多分量数据可获取信息的同时, 指出地震各向异性在储层描述中的重要作用。利用多分量地震数据中提取的地震各向异性信息, 可以更好地实现对储层的精确成像和对储层内部的结构描述。现代社会与日俱增的油气需求, 推动着地震储层描述技术发展, 而多波地震勘探技术作为一种有广泛应用前景的储层描述手段, 也将不断进步与完善, 终将成为油气勘探开发中不可或缺的技术方法手段。

当油气储层中含有定向排列的裂缝时, 储层具有地震各向异性, 此时多波地震数据中将包含横波分裂信息。从多波地震数据中提取横波分裂信息, 将明显提升研究人员对储层内部结构与油气运移规律的认识程度。而随着开采程度的加深, 储层中流体的分布情况越来越复杂, 此时从多波地震数据中提取与频率变化相关的信息可以提供储层中剩余油气分布的预测。

尽管多波地震勘探技术在科学研究与技术应用方面均取得了众多实质性进展, 但仍面临许多挑战, 如转换波精确成像与联合解释等。现将多波地震勘探在采集、处理、解释、应用几个环节存在的典型问题归纳如下, 请业界同道共同思考并解决。

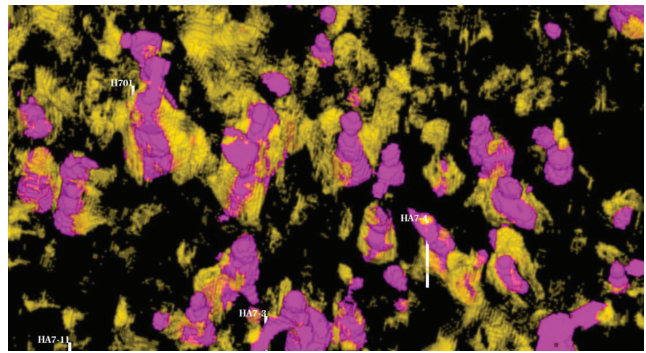


图 18 纵波 (粉色) 和转换波 (黄色) 鹰山组缝洞预测三维显示图  
Fig. 18 A schematic diagram of caves of the Yingshan Group imaged by P- (pink) and converted-wave (yellow)

(1) 近地表对多波地震勘探的影响。近地表的横波速度变化剧烈, 这将严重影响多波地震勘探数据的采集质量; 因此需要对工区的近地表横波速度分布情况做全面而深入的调查, 或者将三分量检波器埋入土中, 但这 2 种方法都会明显增加采集成本。

(2) 转换波不对称的波场传播机理造成成像困难。由于上覆地层的横波速度变化以及转换波成像所用的速度场存在误差等因素, 当地震观测覆盖次数不足时, 正、负偏移距的转换波成像道集不能同相叠加而导致转换波成像较差; 因此, 对于一个观测方位有限的工区, 要求观测系统设计要保证转换波能够在正、负偏移距都有足够的覆盖次数。

(3) 转换波地震资料的地质解释还处于探索阶段。虽然业界开发了几个多波地震资料解释软件, 但是多个时间尺度不同的数据体并存给解释人员带来了困难, 尤其当缺少标定时间尺度所需的 VSP 数据时。

(4) 多波地震数据的处理与解释周期较长。这是导致多波地震勘探资料没能在勘探开发井位确定时发挥作用的主要原因, 因此也导致油气田的经营者质疑多波地震勘探的应用效果。

## 致谢

感谢中国石油天然气股份有限公司授权发表本次处理成果以及处理单位提供的地震数据; 感谢戴恒昌、Mark Chapman、蔡志光、钱忠平、孙鹏元等人的前期处理工作和有益的讨论。这项工作得到中国石油集团公司科技发展部和英国地质调查局爱丁堡各向异性项目组的支持, 经所有合作伙伴和英国地质调查局执行董事批准后发布。

## 参考文献

- [1] ZHU F, GIBSON J, WATKINS J S, YUH S H. Distinguishing fizz gas from commercial gas reservoirs using multicomponent seismic data[J]. *The Leading Edge*, 2000, 19(12): 1238-1245.
- [2] DAVIS T L. Let's get cracking[J]. *The Leading Edge*, 2007, 26(2): 160-161.
- [3] QIAN Z, LI X Y, CHAPMAN M, ZHANG Y, WANG Y. Effects of oil-water saturation on shear-wave splitting in multicomponent seismic data[J]. 77th SEG Meeting Expanded Abstracts, 2007, 26(1): 1019-1022.
- [4] ANGERER E, CRAMPIN S, LI X Y, DAVID T L. Processing, modelling and predicting time-lapse effects of overpressured fluid-injection in a fractured reservoir[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 149(2): 267-280.
- [5] CHERRY J T, WATERS K H. Shear-wave recording using continuous signal methods (Part I)[J]. *Geophysics*, 1968, 33(2): 229-239.
- [6] ERICKSON E L, MILLER D E, WATERS K H. Shear-wave recording using continuous signal methods (Part II)[J]. *Geophysics*, 1968, 33(2): 240-254.
- [7] ALKHALIFAH T, LARNER K. Migration error in transversely isotropic media[J]. *Geophysics*, 1994, 59(9): 1405-1418.
- [8] CRAMPIN S. Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting[J]. *Geophysics*, 1985, 50(2): 142-152.
- [9] TSVANKIN I. P-wave signatures and notation for transversely isotropic media: An overview[J]. *Geophysics*, 1996, 61(2): 467-483.
- [10] THOMSEN L. Converted-wave reflection seismology over inhomogeneous, anisotropic media[J]. *Geophysics*, 1999, 64(3): 678-690.
- [11] GAISER J E, MOLDOVEANU N, MACBETH C, MICHELENA R, SPITZ S. Multicomponent technology: the players, problems, applications and trends[J]. *The Leading Edge*, 2001, 20(9): 974-977.
- [12] LI X Y, YUAN J. Converted-wave moveout and conversion-point equations in layered VTI media: Theory and application[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 54(2): 297-318.
- [13] TATHAM R H.  $V_p/V_s$  and lithology[J]. *Geophysics*, 1982, 47(3): 336-344.
- [14] GAISER J E. Multicomponent  $V_p/V_s$  correlation analysis[J]. *Geophysics*, 1996, 61(10): 1137-1149.
- [15] FOMEL S, BACKUS M. Multicomponent seismic data registration by least squares[J]. 73rd Ann. Int. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 2003, 22(1): 781-784.
- [16] BLOTT J E, DAVIS T L, BENSON R D. Morrow sandstone reservoir characterization: A 3-D multicomponent seismic success[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(3): 394-397.
- [17] GAROTTA R, GRANGER P V, DARIU H. Combined interpretation of PP and PS data provides direct access to elastic rock properties[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(5): 532-535.
- [18] IKWUAKOR K C. The  $V_p/V_s$  ratio after 40 years: uses and abuses[J]. 76th SEG Meeting, New Orleans, Expanded Abstracts, 2006, 1(2): 1183-1186.
- [19] MACBETH C, LI X Y. AVD-An emerging new marine technology for reservoir characterization: Acquisition and application[J]. *Geophysics*, 1999, 64(10): 1153-1159.
- [20] MARTIN A M, DAVIS T L. Shear wave birefringence: A new tool for evaluating fractured reservoirs[J]. *The Leading Edge*, 1987, 6(1): 22-28.
- [21] GAROTTA R, GRANGER P Y. Acquisition and processing of 3C x 3-D data using converted waves[J]. SEG Expanded Abstract, 1988, 2(1): 995-997.
- [22] LYNN H B, THOMSEN L. Reflection shear wave data collected near the principal axes of azimuthal anisotropy[J]. *Geophysics*, 1990, 55(1): 147-156.
- [23] LYNN H B, SIMON K M, LAYMAN M, SCHNEIDER R, BATES C R, JONES M. Use of anisotropy in P-wave and S-wave data for fracture characterization in a naturally fractured gas reservoir[J]. *The Leading Edge*, 1995, 14(8): 887-893.
- [24] LI X Y. Fractural reservoir delineating using multicomponent seismic data[J]. *Geophysical Prospecting*, 1997, 54(1): 39-64.
- [25] GAISER J E. Applications for vector coordinate systems of 3-D converted-wave data[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(12): 1290-1300.
- [26] CHAPMAN M. Frequency dependent anisotropy due to meso-scale fractures in the presence of equant porosity[J]. *Geophysical Prospecting*, 2003, 51(3): 369-379.
- [27] CHAPMAN M, LIU E, LI X Y. The influence of fluid-sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 167(1): 89-105.
- [28] PARTYKA G, GRIDLEY J, LOPEZ J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(3): 353-360.
- [29] MARGRAVE G F, LAMOUREUX M P. Gabor deconvolution of seismic data for source waveform and Q correction[J]. *Geophysics*, 1998, 72(1): 2190-2193.

- [30] PENLAND C, GHIL M, WEICKMANN K. Adaptive filtering and maximum entropy spectra with application to changes in atmospheric angular momentum[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96 (8): 22659-22671.
- [31] SINHA S, ROUTH P S, ANNO P D, CASTAGNA J P. Spectral decomposition of seismic data with continuous wavelet transform[J]. *Geophysics*, 2005, 70(2): 19-25.
- [32] CASTAGNA J P, SUN S, SIEGFRIED R W. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons [J]. *The Leading Edge*, 2003, 22(2): 120-127.

---

## Recent advances in multicomponent seismic and fractured reservoir characterization

LI Xiangyang<sup>1,2</sup>, WANG Jiushuan<sup>2,3</sup>

*1 College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249*

*2 BGP Inc., China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072751*

*3 State Key Laboratory for Oil and Gas Geological and Production Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610081*

**Abstract** This paper reviews the basic concepts of multicomponent seismology and how it can be applied to characterize hydrocarbon reservoirs, which is illustrated using 3D3C real data examples from onshore China. Hydrocarbon reservoirs formed from subtle lithological changes, such as stratigraphic traps, may be delineated from changes in P- and S-wave velocities and impedances. Hydrocarbon reservoirs containing aligned fractures are anisotropic. Examination of the resultant azimuthal variations of P-wave attributes and split shear-waves can give us better definition of their internal structures including fracture orientation, fracture density as well as their spatial distribution. Furthermore, frequency-dependent variations in seismic attributes derived from multicomponent data can provide us with vital information about fluid type and distribution. Current practice and various examples have demonstrated the undoubted potential of multicomponent seismic technology in reservoir characterization. Despite all this, there are still substantial challenges ahead. In particular, the data quality and efficiency of onshore multicomponent seismic acquisition, the improvement of converted-wave imaging and interpretation are major hurdles. All of these need to be overcome before multicomponent seismic exploration becomes a main stream technology.

**Keywords** converted waves; multicomponent seismic; shear-wave splitting; seismic fracture detection

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.004

(编辑 郝洁 马桂霞)