

# P 波方位 AVO 在 LH11-1 油田 裂缝预测中的应用

朱焱辉, 朱 明, 汪瑞良, 刘 军, 赵 超, 薛怀艳

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院, 广州 510240)

**摘 要:** LH11-1 油田是我国近海最大的生物礁滩油田, 受台地多期演化及后期成岩改造作用的影响, 其碳酸盐岩储层物性横向变化大, 非均质性强, 由裂缝引起的各向异性特征明显。为了尽可能获得储层内裂缝的发育程度和分布情况, 以叠前高分辨率三维地震资料为基础, 利用 P 波方位 AVO 技术, 通过正演找出最能反映流花地区碳酸盐岩裂缝发育情况的属性, 预测了其储层裂缝的分布。

**关键词:** P 波; 方位 AVO; 碳酸盐岩; 裂缝预测; 三维地震

中图分类号: P315.31

文献标识码: A

LH11-1 油田位于珠江口盆地东部东沙隆起碳酸岩台地之上(图 1), 其中 LH11-1-1A 井位于油田中部, 为该油田第 1 口探井, LH11-1-3、LH11-1-4、LH11-1-5、LH11-1-6 为该油田评价井。整个 LH11-1 油田沉积环境主要为生物礁、滩相, 后期成岩改造作用形成了大量的裂缝和次生孔隙。该油田已投产 14 年, 投产后含水上升迅速, 产量递减快, 开发效果并不理想。为了提高油田的采收效率, 迫切需要了解整个流花油田裂缝的发育和分布状况。目前已经发展起来的裂缝性油气藏检测技术有横波、P-S 转换波、多分量地震、多方位 VSP、纵波 AVAZ 等, 其中最有效的方法当属横波分裂技术<sup>[1-9]</sup>。横波在方位各向异性介质中传播时, 对不同走向裂缝反应敏感<sup>[10, 11]</sup>。20 世纪 80 年代以来, 通过 HTI 和 VTI 介质以及具有 2 个相互正交或斜交的各向异性介质的物理

模拟试验, 对速度衰减、各向异性、AVO 以及 AVA(Amplitude variation with incident angle) 等规律性有了更进一步的认识<sup>[12-15]</sup>。但横波采集和处理的费用极高, 资料信噪比较低, 油田投资风险大, 因此, 不能成为常用技术。多分量地震、多方位 VSP、P-S 转换波技术有不错的效果, 但要么勘探成本高, 要么是非常规地震采集项目, 现阶段在国内难以广泛应用<sup>[8]</sup>。通过裂缝的物理模型实验发现, 纵波对 HTI 介质的方位各向异性同样有明显的响应<sup>[16, 17]</sup>, 因此, 纵波 AVAZ 发展成为商业化技术。

裂缝性储层是一种典型的各向异性介质, 当地震 P 波在储层中传播时, 由于各向异性的存在, 导致不同方位角接收到的 P 波反射特征不同, 因此, 利用三维地震资料宽方位角的特点, 提取不同方位角的地震 P 波响应特征, 就可以用于检测裂缝发育的相对程度, 该方法对开启的高角度裂缝效果尤其明显。实践表明, 利用 P 波方位属性差异进行储层裂缝预测是完全可行的。首先利用叠前地震资料提取方位地震属性, 如振幅、速度、主频、衰减等, 然后根据井上方位各向异性特征正演结果进行属性优选, 确定最能反映裂缝

收稿日期: 2010-08-18

基金项目: 国家重大科技专项子课题“生物礁灰岩油田开发地震技术应用研究(2008ZX05024-001)”

作者简介: 朱焱辉(1979—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海上石油勘探开发地球物理方面的研究工作。E-mail: zhuyh3@cnoc.com.cn

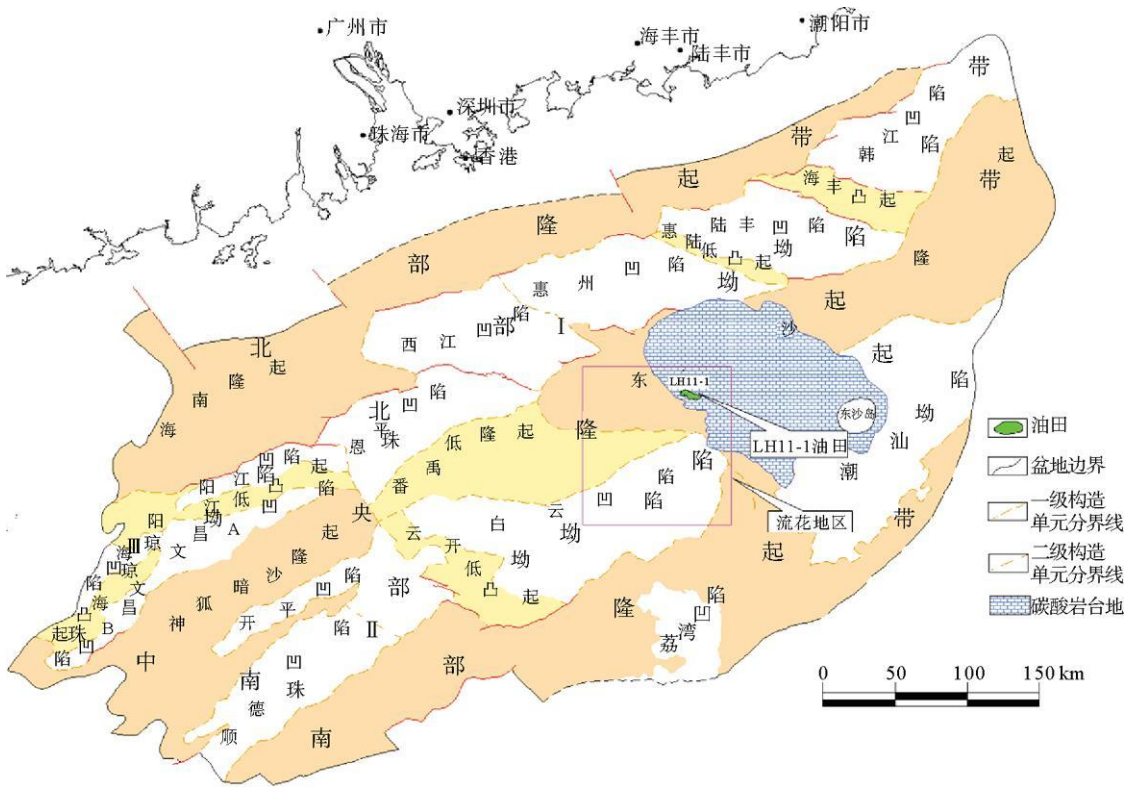


图 1 珠江口盆地构造单元划分

Fig. 1 The structural units of Pearl River mouth basin

发育程度的属性进行裂缝预测, 比基于叠后地震资料的裂缝检测技术有更大的优越性。

LH11-1 油田为碳酸盐岩油藏, 裂缝发育, 由裂缝引起的各向异性特征明显, 因此, 以叠前高分辨率三维地震资料为基础, 利用 P 波方位 AVO 技术, 通过基于岩石物理模型正演找出了最能反映该区裂缝发育情况的属性, 预测了该区灰岩油藏裂缝的分布, 且预测结果与已知钻井情况吻合较好。

### 1 方法原理

在各向异性介质中, P 波的 AVO 梯度在平行于裂缝走向和垂直于裂缝走向上存在较大差异, 这是用 P 波检测裂缝的理论基础<sup>[8]</sup>。AVO 梯度较小的方向是裂缝走向, 梯度最大的方向是裂缝法线方向, 并且差值本身与裂缝的密度成正比。地震频率的衰减和裂缝密度场的空间变化有关, 沿裂缝走向方向随偏移距增大衰减慢, 而垂直裂缝走向方向随偏移距增大衰减快, 裂缝密度越

大衰减越快。利用三维地震资料宽方位角的特点, 提取不同方位角的地震 P 波响应特征, 就可以用于检测裂缝发育的相对程度。该方法尤其对开启的高角度裂缝效果明显。

在弱各向异性介质条件下, 反射系数与弹性参数之间的解析关系<sup>[18-20]</sup>:

$$R_{pp}(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \frac{\Delta \gamma}{Z} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} - \left( \frac{2\bar{\beta}}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} + \left[ \Delta \delta^{(V)} + 2 \left( \frac{2\bar{\beta}}{\alpha} \right)^2 \Delta \gamma \right] \cos^2(\varphi - \varphi_{sym}) \right\} \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \Delta \epsilon^{(V)} \cos^4(\varphi - \varphi_{sym}) + \delta^{(V)} \sin^2(\varphi - \varphi_{sym}) \cos^2(\varphi - \varphi_{sym}) \right] \sin^2 \theta \tan^2 \theta$$

当入射角较小时

$$R_{pp}(\theta, \varphi) = P + G(\varphi) \sin^2 \theta = P + [G_{iso} + G_{an} \cos^2(\varphi - \varphi_{sym})] \sin^2 \theta$$

其中:

$$P = \frac{1}{2} \frac{\Delta \gamma}{Z};$$

$$G_{iso} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} - \left( \frac{2\bar{\beta}}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} \right];$$

$$G_{ani} = \frac{1}{2} [\Delta\delta^{(v)} + 2(\frac{2\beta}{\alpha})^2 \Delta\gamma]$$

式中： $R_{pp}(\theta, \varphi)$  为与入射角和方位角有关的纵波反射系数；

$Z$  为波阻抗，且  $Z = \rho\alpha$ ；

$G$  为切向模量，且  $G = \rho\beta^2$ ；

$\Delta$  为上、下介质岩性参数之差；

上标“—”为上、下介质岩性参数的平均值；

$\alpha$  为纵波速度；

$\beta$  为横波速度；

$\gamma, \delta, \epsilon$  为 3 个描述介质各向异性的参数；

$\theta$  为地震波入射的角度；

$\varphi_{sym}$  为裂缝走向的方位角；

$\varphi$  为激发点到接收点的方位角；

$P$  为纵波垂直入射时的反射振幅；

$G_{iso}$  为振幅随偏移距的变化率(各向同性梯度)，指示介质各向同性部分的影响；

$G_{ani}$  为振幅随方位角的变化率(各向异性梯度)，指示介质各向异性部分的影响。

在固定入射角的情况下， $P$  波反射振幅响应可以进一步简化为：

$$R_{pp}(\varphi) = A + B \cos^2(\varphi - \varphi_{sym})$$

利用上式可以方便地反演出  $A, B, \varphi_{sym}$  这 3 个与裂缝有关的参数，且  $\varphi_{sym}$  指出了裂缝的走向方向，而  $B/A$  则可作为裂缝密度的相对度量<sup>[9]</sup>。

## 2 在 LH11-1 油田中的应用

### 2.1 基于岩石物理模型的方位属性差异正演模拟

根据已钻井灰岩段(图 2)和叠前地震数据的扫描分析结果，设置正演参数(表 1)建立正演模型，其中 A、B1、B2、B3、C、D、E 分别为物性不同的含油层段。在固定采集方位条件下，通过变化裂缝走向和裂缝密度，正演计算振幅、能量、频率等各种属性，以此分析在固定采集方位夹角时，介质的各向异性与其地震响应方位角属性差异之间的关系。

井上正演结果如图 3、图 4 所示，通过固定采集方位( $84^\circ \sim 134^\circ$ )，对具有不同密度和方位裂缝的各向异性介质进行正演发现，在检测裂缝发育时存在着检测能力较强和较弱的区域。从 FUL—

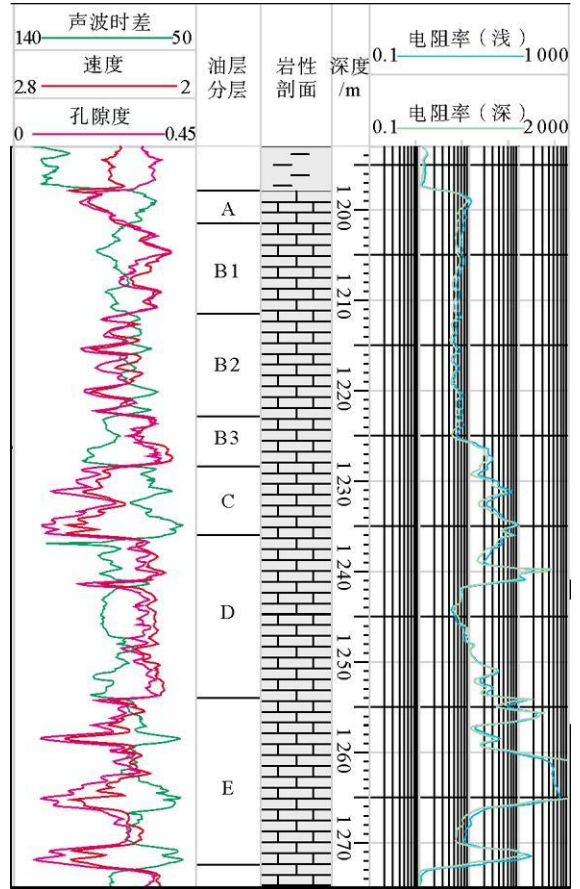


图 2 已钻井综合柱状图

Fig. 2 Integrated columnar section of drilled well

表 1 方位属性差异正演设计参数

Table 1 Modeling parameters for azimuthal property differences

|         |                           |
|---------|---------------------------|
| 裂缝填充段   | 1 201.1 ~ 1 228.3 m       |
| 填充流体    | 油                         |
| 裂缝密度    | 0%, 1%, 2%, 3%            |
| 采集方位    | $84^\circ \sim 134^\circ$ |
| 裂缝方位角范围 | 全方位                       |
| 入射角范围   | $0^\circ \sim 30^\circ$   |

FRQ 方位属性差异与裂缝走向关系图上(图 3)可以看出，当以置信度 0.5% 为标准，裂缝密度大于 3% 时，可以很容易地检测到走向在  $34^\circ \sim 184^\circ$  范围内的裂缝，而对走向在  $4^\circ \sim 34^\circ$  范围内的裂缝检测能力较弱。从振幅方位属性差异与裂缝走向关系图(图 4)分析，当裂缝密度大于 1%、置信度为 20% 时，对走向在  $30^\circ \sim 100^\circ$  和  $120^\circ \sim 190^\circ$  范围内裂缝的检测能力较强，而对于走向在  $10^\circ \sim 30^\circ$

和  $100^{\circ} \sim 120^{\circ}$  范围内的裂缝, 检测能力则较弱。

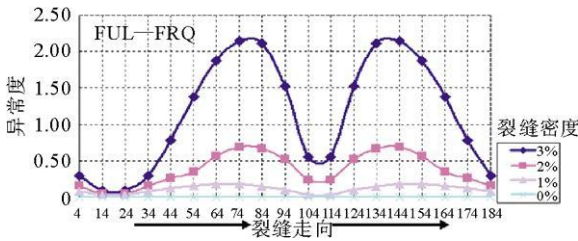


图 3 FUL—FRQ 方位属性差异与裂缝走向关系

Fig. 3 The relationship between azimuthal property differences of FUL—FRQ and fractural trend

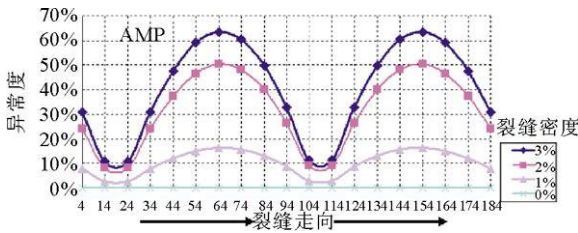


图 4 振幅方位属性差异与裂缝走向关系

Fig. 4 The relationship between azimuthal property differences of amplitude and fractural trend

此外通过井旁地震道属性计算发现, 目的层段 FUL—FRQ 方位属性存在着较大差异(图 5)。FUL—FRQ 属性为 85% 能量对应的频率值, 不同物性的含油层段(A、B1、B2、B3、C、D、E)对 FUL—FRQ 方位属性敏感程度不同。从图中可以看出, B2 层 FUL—FRQ 方位属性差异最大, 其

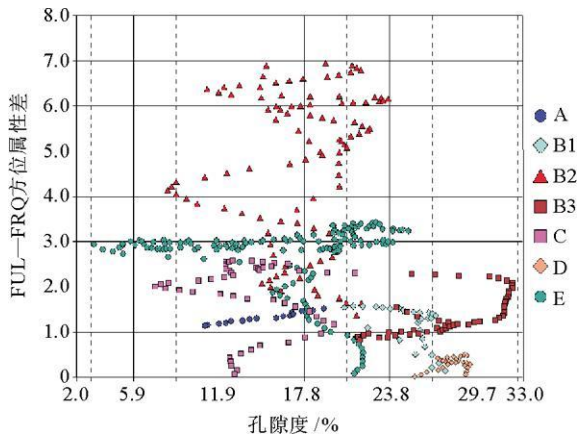


图 5 FUL—FRQ 方位属性差异与孔隙度交汇图

Fig. 5 The relationship between azimuthal property differences of FUL—FRQ and porosity

变化范围从 1~7, 这与实钻井 B2 层段测井解释为裂缝发育段相吻合; C 层和 E 层方位属性差异次之, 其变化范围分别为 0~3 和 0~3.5; 其余层段 FUL—FRQ 方位属性差异较小。因此, 利用 FUL—FRQ 方位属性差异来预测, B2 层段灰岩裂缝发育程度效果较好, 其次为 C 层和 E 层。

综合分析上述方位属性差异裂缝正演结果, 利用 FUL—FRQ 方位属性差异对 LH11-1 油田灰岩裂缝发育程度进行预测效果较好。

## 2.2 地震资料分析

LH11-1 油田主体采集的是高精度三维地震资料, 方位角范围为  $274^{\circ} \sim 303.7^{\circ}$ , 将其折算到  $180^{\circ}$  方位角范围内, 则研究区方位角大概为  $84^{\circ} \sim 134^{\circ}$ , 入射角  $31^{\circ}$  左右。由于海上采集具多因素制约, 覆盖次数不均匀, 为了获得较为均匀的覆盖次数和较高的信噪比, 本次研究采用  $80 \times 80$  的超面元, 去掉小偏移距和较大偏移距的道集后, 各个方位角的覆盖次数基本一致, 为 30 次左右, 信噪比也得到了提高(图 6—8)。根据方位各向异性裂缝预测原理和基于岩石物理模型方位角属性差裂缝预测正演, 将方位角划分为  $84^{\circ} \sim 109^{\circ}$ 、 $110^{\circ} \sim 134^{\circ}$  两个范围。将 2 个方位角道集进行 AVO 叠加, 形成方位角数据体(图 9、10)。

对比同一条主测线不同方位角道集叠加剖面(图 9、10), 剖面位置相同的地方同相轴存在着明显的差异, 不同位置处差异的强度也不同。这种差异揭示了研究区地下介质存在着较强的局部各向异性, 这种各向异性主要由流花地区不同位置灰岩裂缝发育程度存在差异引起的。

## 2.3 方位属性差裂缝预测效果分析

根据方位属性差异裂缝预测原理, 利用方位频率属性差异对南海 LH11-1 油田礁灰岩段进行了裂缝预测。B2 层裂缝平面分布如图 11 所示, 红色和黄色代表裂缝相对发育带, 蓝色和绿色为裂缝欠发育带。研究区 B2 层南西方向裂缝发育程度较高, 北东方向裂缝欠发育。构造高部位和油田主开发区主要位于南西方向, 因此对油田开发影响较大。位于南东方向的 LH11-1-3 井区裂缝发育程度低, 在开发过程中可以起到隔挡层的作用, 这与实际钻井资料相吻合; C 层裂缝发育

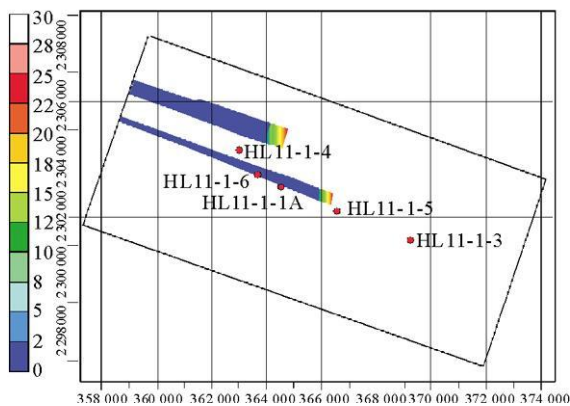


图6 覆盖次数分布

Fig. 6 The map of 3D seismic fold number

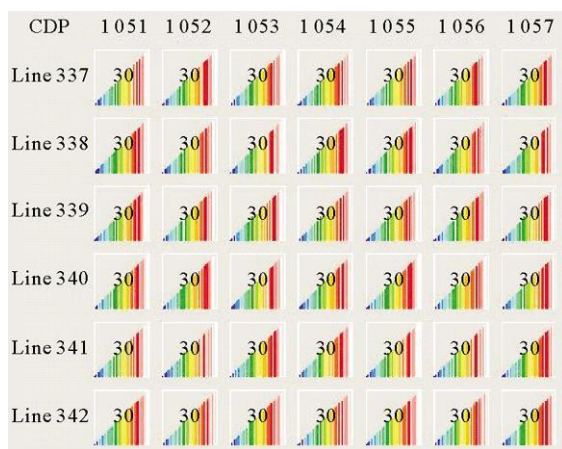


图7 偏移距面元分布

Fig. 7 The distribution map of offset

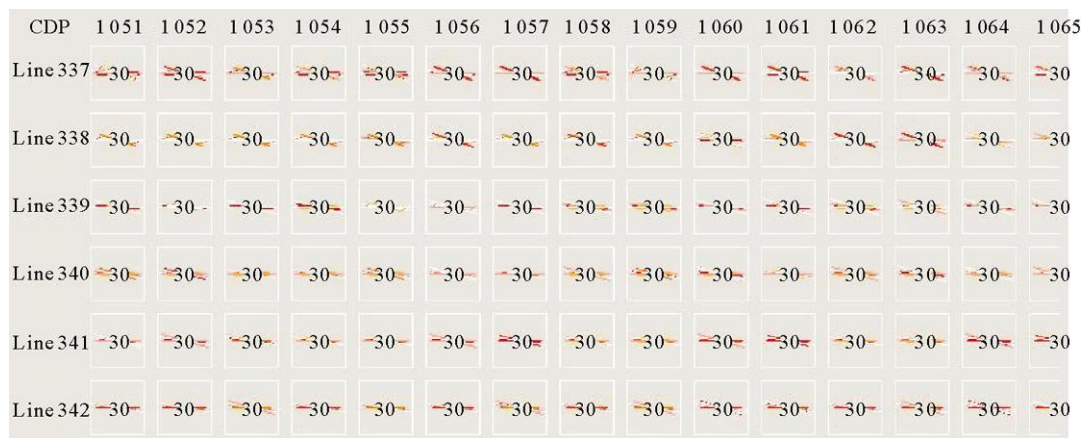


图8 方位角面元分布

Fig. 8 The distribution map of azimuth

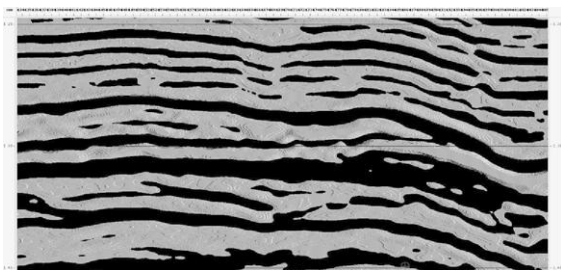


图9 84°~109°方位角道集 AVO 叠加剖面

Fig. 9 The AVO stack of azimuthal angle gathers from 84 degrees to 109 degrees

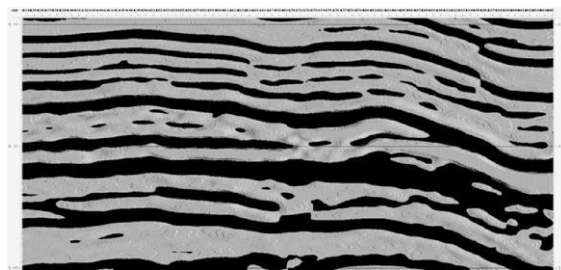


图10 110°~134°方位角道集 AVO 叠加剖面

Fig. 10 The AVO stack of azimuthal angle gathers from 110 degrees to 134 degrees

带主要集中在北东构造高部位以及礁主体两翼断层发育区(图12),在油田开发过程中起到横向沟通作用;E层裂缝发育带主要位于构造两侧及西

北方向断层较为发育的地区(图13),在构造主体部位和油田主开发区裂缝不发育,在开发过程中E层主要起到阻挡下覆地层水上涌的作用。

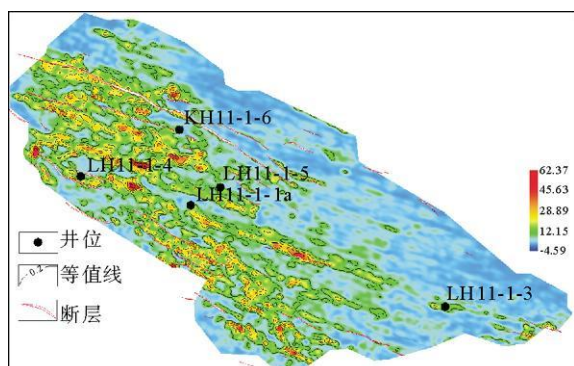


图 11 B2 层裂缝预测平面分布

Fig. 11 Fracture prediction map of B2 layer

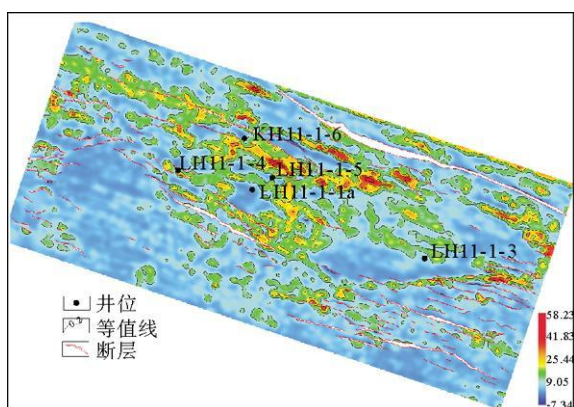


图 12 C 层裂缝预测平面分布

Fig. 12 Fracture prediction map of C layer

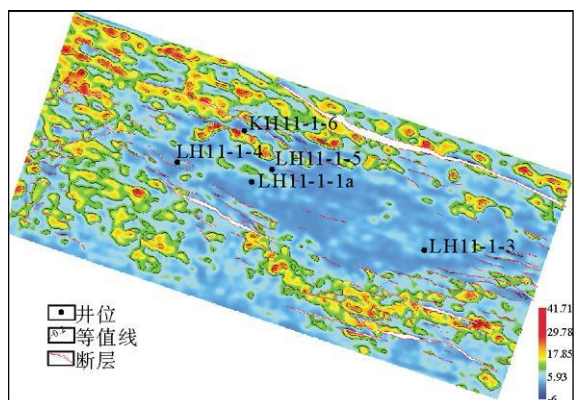


图 13 E 层裂缝预测平面分布

Fig. 13 Fracture prediction map of E layer

### 3 结论

正确识别和预测地下裂缝的发育分布情况有助于油田的高效安全生产, 不同方位角分布的裂

缝会引起地震波在传播过程中出现随方位变化的各向异性特征, 利用这个现象, 可以对碳酸盐岩油藏裂缝分布和发育状况进行有效的预测。

通过 P 波方位 AVO 技术在 LH11-1 油田储层裂缝预测中的成功应用, 证实了该技术对碳酸盐岩储层裂缝预测的有效性。此外, 为了尽可能发挥该技术的优势, 要求野外数据采集应该尽可能做到宽方位、高覆盖、炮检距和方位角分布尽量均匀; 在数据处理过程中要坚持保幅处理的原则, 尽量消除非地质因素引起的振幅异常; 在进行方位角数据叠加时, 应适当扩大面元以提高信噪比和稳定性。综上所述, P 波方位 AVO 分析技术在 LH11-1 油田裂缝预测中的应用达到了预期的效果, 应当继续研究发展。

#### 参考文献:

- [1] 张国君, 冯 晖, 王 典, 等. 裂隙性油气藏发展现状 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(增刊): 43-47.
- [2] 唐晓雪, 唐建候. 用 P-SV 转换波资料研究储层各向异性 [J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(1): 27-33.
- [3] 朱培民, 王家映, 於文辉, 等. 用纵波 AVO 数据反演储层裂隙密度参数 [J]. 石油物探, 2001, 40(2): 1-12.
- [4] Carcuz J R. A combined AVO analysis of P-P and P-S reflection data [C]// Expanded Abstract of the 71st Annual International SEG Meeting [s. l.]: [s. n.], 2001. 323-325.
- [5] 曲寿利, 李玉新, 王 鑫, 等. 全方位 P 波属性裂缝检测方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(4): 390-397.
- [6] 杜启振, 杨慧珠. 方位各向异性介质的裂缝预测方法研究 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 32-36.
- [7] 李绪宣. 多波地震地层各向异性的初步研究和探讨 [J]. 天然气工业, 2001, 21(5): 41-44.
- [8] 罗省贤, 李录明. 基于横波分裂的地层裂缝预测方法与应用 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(1): 52-59.
- [9] 彭晓波, 彭苏萍, 詹 阁, 等. P 波方位 AVO 在煤层裂缝探测中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 960-2 965.
- [10] 孙武亮, 李正文. 纵波 AVOA 垂直裂缝参数反演与运用 [J]. 物探化探计算技术, 2007, 27(4): 295-300.
- [11] 郝守玲, 赵 群. 裂缝介质对 P 波方位各向异性特征的影响——物理模型研究 [J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(3): 189-194.
- [12] A ssad J M. A physical model study of microcrack-induced anisotropy [J]. Geophysics, 1992, 57(12): 1 562-1 570.
- [13] 彭成斌, 陈 颢. 利用物理模型横波分裂现象研究裂隙分布 [J]. 地球物理学报, 1989, 32(增): 163-173.
- [14] A ssad J M. The effect of orthorhombic anisotropy and its implication for oil recovery and reservoir exploitation [J].

Geophysical Prospecting, 2005, 53(1): 121-129.

- [15] 魏建新. 岩石横波分裂和各向异性的试验观测[J]. 石油物探, 1993, 32(1): 60-67.
- [16] 齐宇, 魏建新, 狄帮让, 等. 横向各向同性介质纵波方位各向异性物理模型研究[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 671-674.
- [17] Lynn H B, Bates C R, Simon K M, et al. The effect of azimuthal anisotropy in P-wave 3D seismic[C]//Expanded Abstracts of 65th SEG Annual Meeting[s. l.]: [s. n.], 1995: 727-730.
- [18] Rüger A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media [J]. Geophysics, 1998, 63(3): 935-947.
- [19] Thomsen L. Weak elastic anisotropy [J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1 954-1 966.
- [20] Rüger A. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry [J]. Geophysics, 1997, 62(3): 713-721.

## P-WAVE AZIMUTHAL AVO ANALYSIS AND ITS APPLICATIONS TO LH11-1 OIL FIELD FOR FRACTURE DETECTION

ZHU Yanhui, ZHU Ming, WANG Ruiliang, LIU Jun, ZHAO Chao, XUE Huaiyan  
(Research Inst. CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangzhou 510240 China)

**Abstract:** The LH11-1 oil field is the biggest offshore bioherm (biobank) oil field of China. The carbonate platform has suffered multi-phase evolution and diagenesis. The physical properties of the carbonate reservoirs change drastically in lateral direction, showing a strong heterogeneity, which is obviously controlled by fracture systems. In order to acquire more information about the development of fractures and their distribution pattern as detail as possible, the method of P-wave azimuthal AVO based on high resolution 3D seismic data are applied in the carbonate reservoirs of Liu Hua oil field to finding out the most sensitive seismic properties for fracture detection, and distribution pattern prediction.

**Key words:** P-wave; azimuthal AVO; carbonate; fractural detection; 3D seismic