

刘晓晖, 涂齐催, 姜雨, 等. 双宽地震资料在西湖凹陷 R 气田裂缝预测中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(8): 57-64.

双宽地震资料在西湖凹陷 R 气田裂缝预测中的应用

刘晓晖, 涂齐催, 姜雨, 刘江, 毛云新, 王伟, 李文俊

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘要: 西湖凹陷 R 气田由于埋藏深、地震资料品质差, 常规地震资料处理效果不理想。2016 年, 通过斜缆宽频+多船宽方位的采集方式得到了高质量的双宽地震资料, 分析认为, 双宽地震资料具有高信噪比、高分辨率、高保真度的优势。由于 R 气田 H7 层以下主要受裂缝控制, 裂缝预测的准确性关系到 H7 层以下油气层的开发效果。以往预测裂缝的方法只能通过地震属性和相干体定性预测, 精度往往不高; 通过应用双宽地震资料开展裂缝预测, 可以得到较为精确的各向异性因子, 从而得到裂缝密度的分布, 通过裂缝密度可以表征裂缝的发育程度和方向。从预测结果来看, H7 层以下裂缝较发育, 且裂缝方向与解释大断层方向一致, 其中 H11 层比 H8 层断裂更加发育, 可以很好的解释 H11 砂体比 H8 薄但产能比 H8 高的矛盾; 通过求取的裂缝密度, 也可以预测甜点的有利发育区。

关键词: 双宽资料; 宽方位采集; 各向异性强度; 裂缝密度; 西湖凹陷

中图分类号: TE151

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2019.205

0 引言

近年来, 国内的地震资料采集大部分还处于窄方位采集状态, 只在构造复杂而采集环境允许宽方位采集的地区, 开展了一些宽方位采集的实验。海上地震资料采集已开始从窄方位采集向宽方位、全方位采集方向发展。随着东海西湖凹陷多年勘探的深入, 特别是进入油气田开发阶段后, 对目的层精细构造、储层和裂缝的研究更加迫切^[1]。以往东海西湖凹陷勘探大多采用单船斜缆窄方位的施工方式, 由于勘探目标构造和储层日益复杂, 常规的方式已经不能满足生产需求, 因此, 在东海开展了斜缆宽频、宽方位的地震资料采集。宽方位采集较窄方位采集有其特殊的优势, 主要表现在宽方位采集的资料信噪比更高、分辨率更好。实例表明, 宽方位、全方位观测可以更有效的提高

地震波场的照明能量, 尤其在构造复杂区、裂缝发育区更能发挥作用, 具有较为广阔的应用前景。通过采集宽方位、多方位、全方位的地震资料可以大幅提高地震资料的采集质量, 增加资料的覆盖次数, 提高地震资料的分辨率, 使多次波能够更好的压制^[2]。

理论上讲, 宽方位三维地震勘探较窄方位三维地震勘探具有明显的优势^[3-5], 在岩性和裂隙油气勘探领域具有广阔的应用前景。以往窄方位地震资料提取的地震属性和相干体只能定性的分析裂缝的空间分布。拥有宽方位地震资料后, 可以应用叠前宽方位数据计算的裂缝密度来判断裂缝的发育和方向^[6-7]。

西湖凹陷 R 气田 H7 层以下裂缝较为发育, 以往主要应用地震属性或相干体定性预测裂缝, 由于地震属性或相干体计算是利用地震道之间的振幅、相位和几何特性的差异, 受窄方位地震资料的限制, 精度往往不高。本次研究采用双宽(宽频带、宽方位角)地震资料反演裂缝密度来预测裂缝的方法, 主要利用了不同方位角所观测得到的 V_p/V_s 属性的差异, 可以得到较为准确的裂缝密度的分布, 预测的结果与井的产能基本一致。

收稿日期: 2019-11-12

资助项目: “十三五”国家科技重大专项“东海低渗-致密天然气勘探开发技术”(2016ZX05027-004)

作者简介: 刘晓晖(1981—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震资料处理、解释等方面的研究工作。E-mail: 94254833@qq.com

1 R 气田地质概况

西湖凹陷 R 构造为大型完整的背斜-断背斜圈闭,西陡东缓,H7 层之下断裂较发育,深部为断背斜型构造,构造高点位于 NE 向探井区,局部次高点发育。R 气田受到的挤压应力弱,背斜幅度低,拉张正断层发育但结束较早,且 EW 向断层不发育,油气藏保存较为完整。R 气田储层为浅水三角洲沉积体系,以分流河道,河口坝砂体为主,主力砂岩厚度约 20 m,油气层埋深约为 3 200~4 200 m,上部油气层为常规油气层(孔隙度 > 11%,渗透率 > $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),下部为低渗气藏(孔隙度 < 11%,渗透率 < $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。通过对 R 气田的开发,发现下部的气层也具有很好的开发前景,制约它的主要因素就是裂缝的发育,弄清了底部气藏裂缝的发育规律,对下部低渗气藏的开发有非常重要的意义^[8-9]。

2 R 气田地震双宽采集及处理情况

R 气田双宽地震资料采集是国内海上第一个商业性的斜缆宽频宽方位三维地震采集项目,采集的宽频宽方位地震资料从根本上改善了该地区地震资料的品质^[10]。本次施工采用了斜缆宽频+多船宽方位的采集作业施工方式,参与作业的船共有 3 条,分别是主船、炮船 A 和炮船 B,地震采集时采用每条航线分别按照 M1 和 M2 的方式行驶 2 次(图 1),第 1 次 M1 行驶主船与炮船 A 和炮船 B 分别相距 1 000 和 2 000 m;第 2 次 M2 行驶主船与炮船 A 和炮船 B 分别相距 3 000 和 4 000 m。为了使面元覆盖更加均匀,第 1 趟 M1 与第 2 趟 M2 在采集过程中炮点在 Inline 方向错开 50 m, Crossline 方向错开 12.5 m。通过这种采集方式,面元中不仅包含偏移距信息,同时也包含方位角信息。以上采集方式最小偏移距 200 m,最大偏移距 6 200 m^[11-12]。

双宽地震资料处理时将 6 000 m 的偏移距划分成 200~1 700 m、1 700~3 200 m、3 200~4 700 m、4 700~6 200 m,将方位角划分为 8 个扇区,分别是 0°~45°,45°~90°,90°~135°,135°~180°,180°~225°,225°~270°,270°~315°,315°~360°。保证了不同方位上覆盖次数的均衡(图 2)。通过对原始宽频资料采用噪音剔除,多次波压制等处理,使地震

资料信噪比提高;通过共偏移距矢量(COV)数据规则化及五维插值,使面元平均为 12.5 m×12.5 m;通过宽方位角的带 Q 补偿的三维克西霍夫正交各向异性的叠前深度偏移,使资料偏移归位。

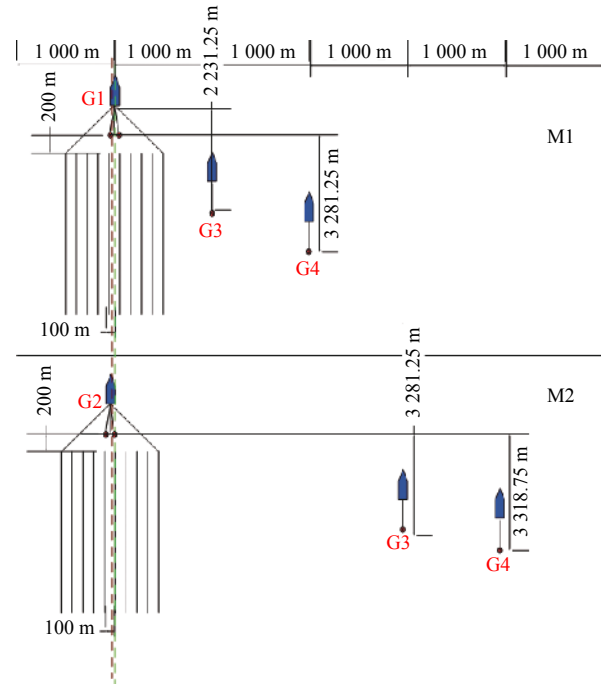


图 1 三船宽方位采集 M1+M2 作业方式示意图
Fig.1 A schematic diagram of M1+ M2 operation method for three ship wide azimuth acquisition

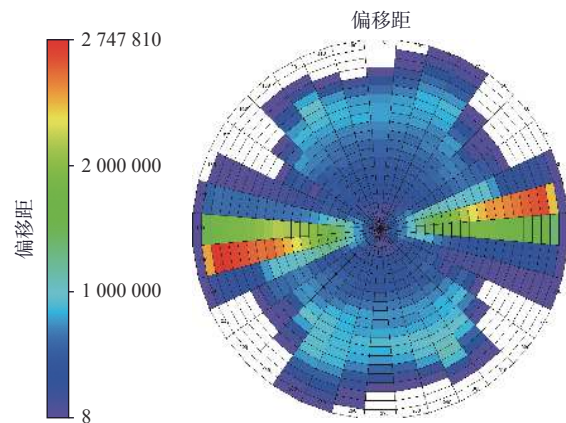


图 2 宽方位地震资料方位角与偏移距分布图
Fig.2 Distribution of azimuth and offset of wide azimuth seismic data

通过以上处理,得到的地震资料品质明显提高,频带的低频段和高频段均得到了拓展,频带宽度由 8~40 Hz 拓宽为 4~55 Hz(图 3),倍频程由 2.3 提高到 3.9,分辨率较老资料明显提高,与窄方位资料相比,空间上反射能量强度分布一致,能够更好的反

映地下波场信息, 宽频宽方位资料连续性好, 资料信噪比高, 上下界面的接触关系更加清楚(图 4)。地质

信息保留更加完整, 空间保幅性也较好。给后续气田构造、储层和裂缝预测提供了坚实的资料基础。

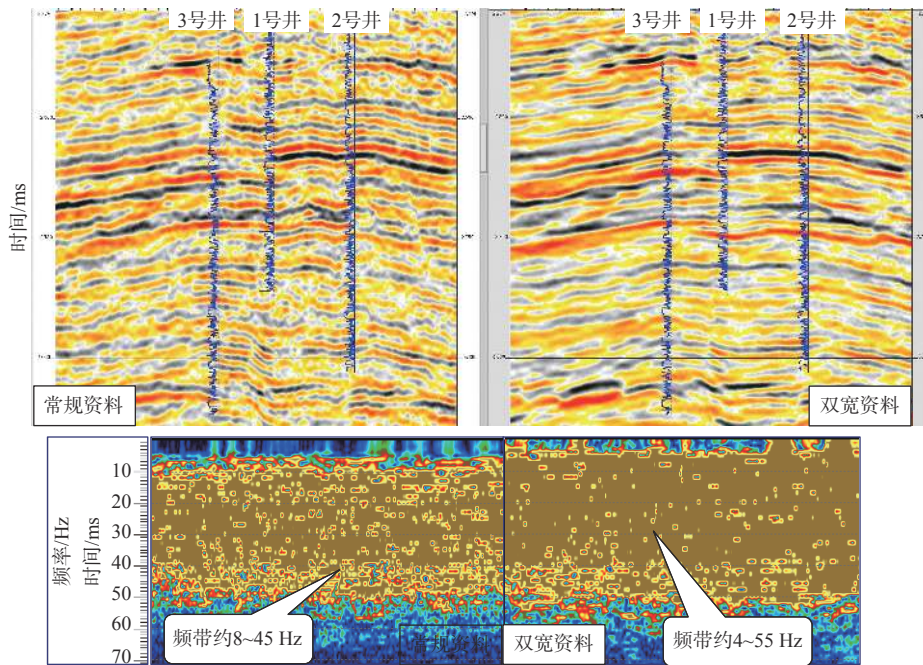


图 3 常规地震资料 (左) 与双宽地震资料 (右) 对比分析

Fig.3 Comparative analysis of conventional seismic data(left)and double-width seismic data(right)

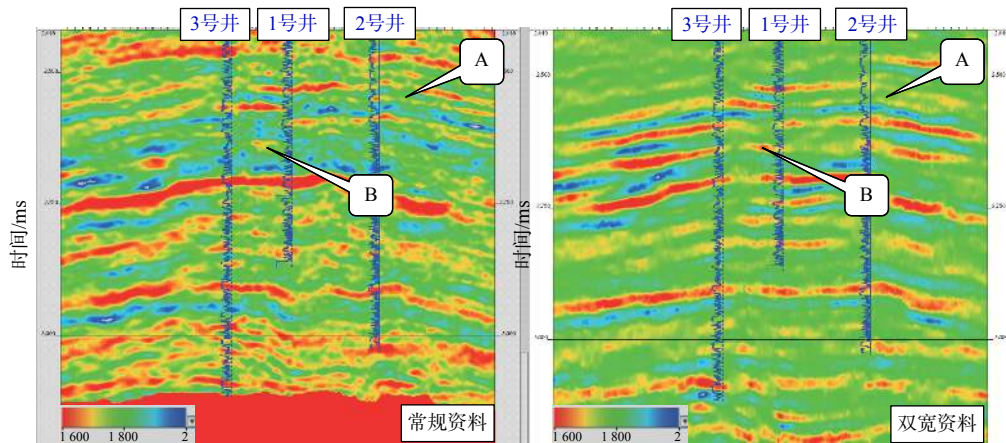


图 4 常规资料 (左) 与双宽资料 (右) V_p/V_s 剖面对比

Fig.4 Comparison of V_p/V_s profile between conventional data(left)and double-width data(right)

从宽频宽方位地震反演成果剖面来看, 宽频的优势也得到了很好的体现。双宽资料的 V_p/V_s 剖面(图 4)和砂岩概率剖面(图 5)结果明显优于常规资料。基于常规资料的 V_p/V_s 反演资料无法分辨主要目的层 A 层和 B 层, 但基于双宽资料的 V_p/V_s 反演资料能够清晰的分辨 A 层和 B 层; 基于常规资料的砂岩概率剖面在 2 号井不能清晰刻画 A、B 两层砂体, 而基于双宽资料的砂岩概率剖面可以将 A、B

两层砂体清晰刻画出来。经过后来钻井证实, A、B 两砂体确实存在。

3 基于双宽资料的裂缝预测

地下裂缝成因机理非常复杂, 空间非均质性强, 预测难度大。由于裂缝尺度小, 横向分布不均, 与地震资料分辨率不匹配, 所以预测的产状及空间展

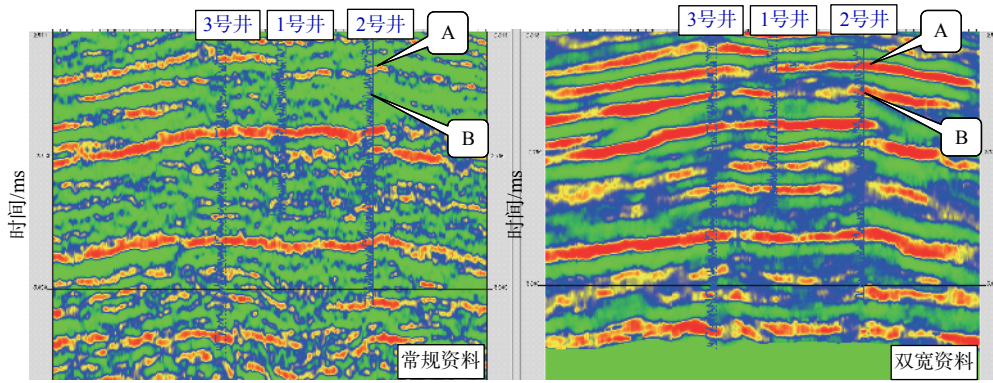


图5 常规资料(左)与双宽资料(右)砂岩概率剖面对比

Fig.5 Comparison between conventional data(left)and double-width data(right) sandstone probability profiles

布特征非常困难^[13]。

在各向同性岩层中,裂缝及裂隙的分布具有方向性,具有某种优势方向裂隙地层,导致了波速沿不同方向的变化,呈线状分部的微裂隙是产生地震各向异性的主要原因。现有的叠前裂缝预测技术主要有分量转换波裂缝预测技术和纵波方位各向异性检测技术,前者技术较复杂,施工成本高,后者施工成本较为简单,纵波产生的各向异性也被业界广泛认可^[14-15]。裂缝性储层的方位各向异性与HTI各向异性介质的波传播理论密切相关,前人对相关理论也做了深入的研究,THOMSEN提出了定向排列的裂缝介质的地震相速度公式^[16],HALL等人利用方位各向异性预测了油田裂缝储层各向异性强度及裂缝走向^[17-18]。

3.1 纵波方位各向异性裂缝预测的原理

当地震波从不同方向通过整齐排列的垂直或斜交地面的裂缝时,会产生各向异性,主要表现为纵波的振幅、速度旅行时差会随着裂缝走向的不同而发生变化,其反射系数与地震波入射角有关,同时也与传播方位有关,通过前人的研究HTI水平各向异性介质的反射系数与方位角和入射角有关^[19]。具体关系可以描述为

$$R_{pp}(i, \varphi) = A + (B + D \cos 2\varphi) \sin^2 i + (C + E \cos 2\varphi + F \cos 4\varphi) \sin^2 i \tan^2 i \quad (1)$$

其中: $A = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z}$;

$$B = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \alpha}{\alpha} - \left(\frac{\Delta \beta}{\alpha} \right)^2 \right] \frac{\Delta G}{G} + \frac{1}{4} \left[\delta^{(v)} + 2 \left(\frac{2\beta}{\alpha} \right)^2 \Delta \gamma \right];$$

$$C = \frac{1}{2} \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{3}{16} \Delta \varepsilon^{(v)} + \frac{1}{16} \Delta \delta^{(v)};$$

$$D = \frac{1}{4} \left[\Delta \delta^{(v)} + 2 \left(\frac{2\beta}{\alpha} \right)^2 \Delta \gamma \right];$$

$$E = \frac{1}{4} \Delta \varepsilon^{(v)};$$

$$F = \frac{1}{16} \left[\Delta \varepsilon^{(v)} - \Delta \delta^{(v)} \right].$$

式中: i 为入射角;

φ 为测线方位与裂缝走向夹角;

Z 为纵波阻抗, $(\text{kg}/\text{m}^3) \cdot (\text{m}/\text{s})$;

G 为剪切模量;

α 为纵波速度, m/s ;

β 为横波速度, m/s ;

Δ 为界面上、下参数之差;

$\delta^{(v)}$ 、 $\varepsilon^{(v)}$ 、 γ 为 HTI 介质坐标系统的 Thomsen 参数; 字母上面加“—”表示平均值。

当入射角较小时,公式(1)可以简化为

$$R_{pp}(i, \varphi) = X(i) + Y(i) \cos 2\varphi \quad (2)$$

$X(i)$ 、 $Y(i)$ 表示入射角 i 的函数,与方位角无关。

在式(2)中,入射角 i 较小时,反射系数可以拟合成一个椭圆。 $\varphi=0$ 时,表示地震波平行裂缝传播,此时的反射系数最大,纵波能量最强,椭圆的长轴为 $X(i)+Y(i)$;当 $\varphi=90^\circ$ 时,表示地震波垂直裂缝传播,纵波能量衰减最大,振幅较弱,此时对应椭圆的短轴 $X(i)-Y(i)$ 。即椭圆的长轴方向平行于裂缝走向,椭圆的短轴方向垂直与裂缝走向。长轴短轴之比 $[X(i)+Y(i)]/[X(i)-Y(i)]$ 越大,代表各向异性越强,裂缝密度就越大。

求解(1)式可以近似得出

$$\text{Log} \frac{\alpha}{\beta} = b_0 + b_1 \cos[2(i-\varphi)] + b_2 \cos[4(i-\varphi)] \quad (3)$$

式中:

$$b_0 = \ln \frac{\alpha}{\beta} + \frac{1}{2} \gamma + \left(\frac{4K+3}{64K} \right) \delta + \left(\frac{12K-3}{64K} \right) \varepsilon;$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \gamma + \frac{1}{16K} \delta + \left(\frac{4K-1}{16K} \right) \varepsilon;$$

$$b_2 = - \left(\frac{4K-1}{64K} \right) \delta + \left(\frac{4K-1}{64K} \right) \varepsilon。$$

3.2 裂缝密度的求取过程及应用结果

求取裂缝密度的思路如图 6 所示: 将宽方位数据按方位角进行超道集划分, 对分方位角超道集数据分别进行叠前反演, 得到不同方位角的 V_p/V_s , 将 V_p/V_s 进行椭圆拟合, 得到裂缝密度。具体过程为: 首先, 将宽方位数据按每 60 度方位角分区, 得到分角度叠加道集(图 7); 然后对各叠加道集应用各向同性的方法得到 V_p/V_s (图 8); 再应用 Jason 软件的 EVE 模块将 V_p/V_s 进行椭圆拟合, 得到反应各向异性的参数(图 9)。其中各向异性强度 b_1 就代表裂缝密度的分布。

由于 R 气田位于西湖凹陷中部, 勘探开发主要目的层为 H3 层和 H5 层, H6 层以下断裂较发育。H6 层以上以河道砂体及岩性目标为主, H7 层以下为低渗甜点目标为主, 同时要对裂缝进行预测。

由于研究区 H7 层及以下裂缝较为发育, 从图 10、11 中裂缝方向和裂缝密度平面图中可以看出, H8 层和 H11 层反演结果的裂缝方向和解释大断裂的方向一致, 与相干体切片相比, 裂缝的方向和密度

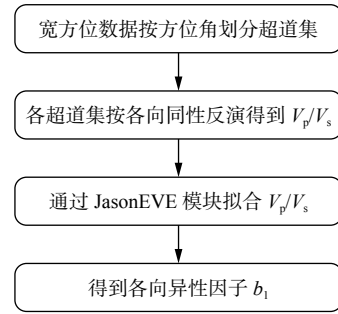


图 6 宽方位资料各向异性强度求取流程

Fig.6 Flow chart for calculating anisotropic strength of wide azimuth data

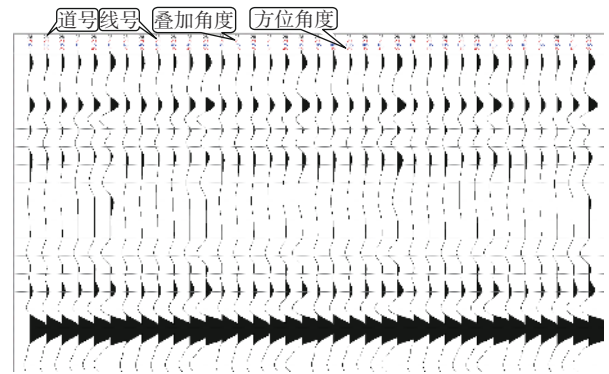


图 7 宽方位资料分角度叠加道集

Fig.7 Angle superimposed gather of wide azimuth data

更加准确。从图 12 中的 H8 及 H11 层断裂密度对比图中可以看出: H11 层在 1 号井上砂岩不发育, 而 H8 层在 1 号井上砂体发育。但在 1 号井附近 H11 层比 H8 层断裂更加发育, 这样更能解释 H11 层砂体比 H8 层薄, 但 H11 产能却比 H8 层高的现象, 这与 H11 层裂缝较多有很大关系。

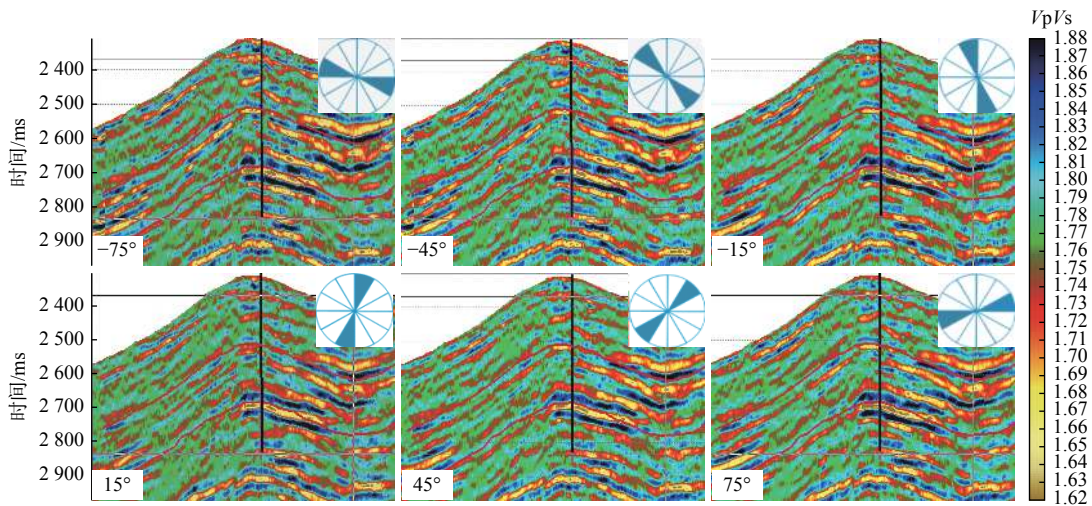


图 8 不同方位角叠前反演 V_p/V_s 剖面

Fig.8 Pre-stack inversion of V_p/V_s profile with different azimuth angles

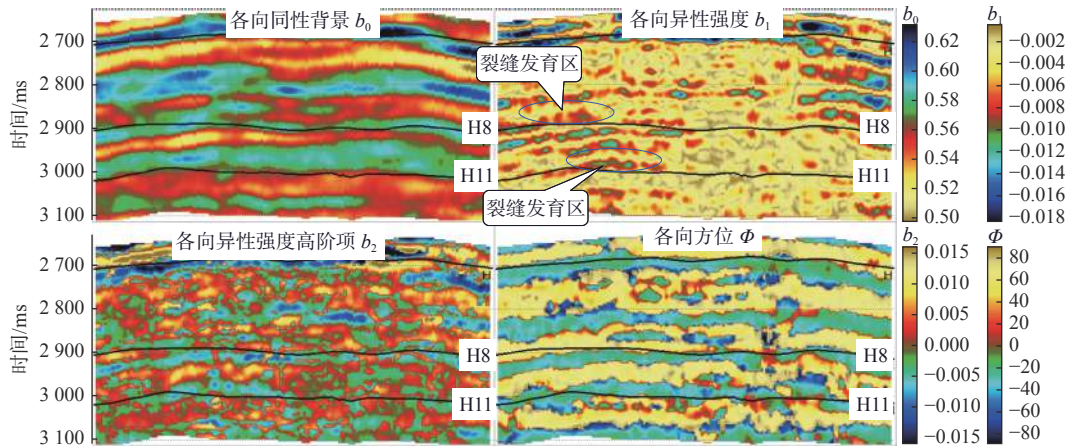


图9 拟合各向异性参数

Fig.9 Fitting anisotropic parameter

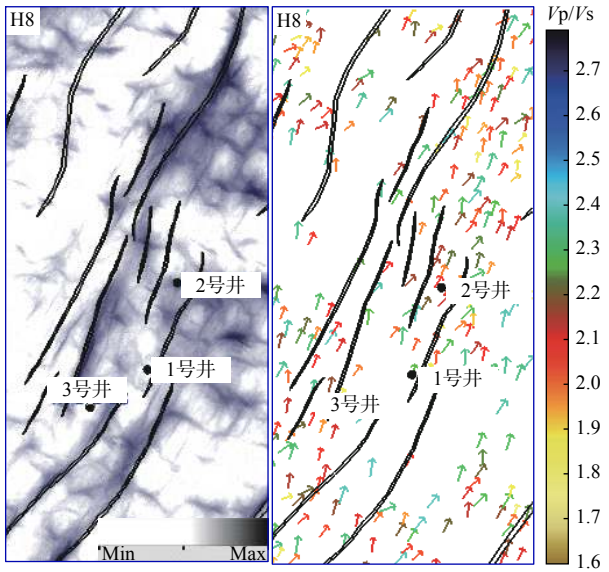


图10 H8层相干体切片+解释断层与预测裂缝密度+方位对比图

Fig.10 H8 layer coherent body slice+ interpretation fault and prediction crack density+ azimuth contrast map

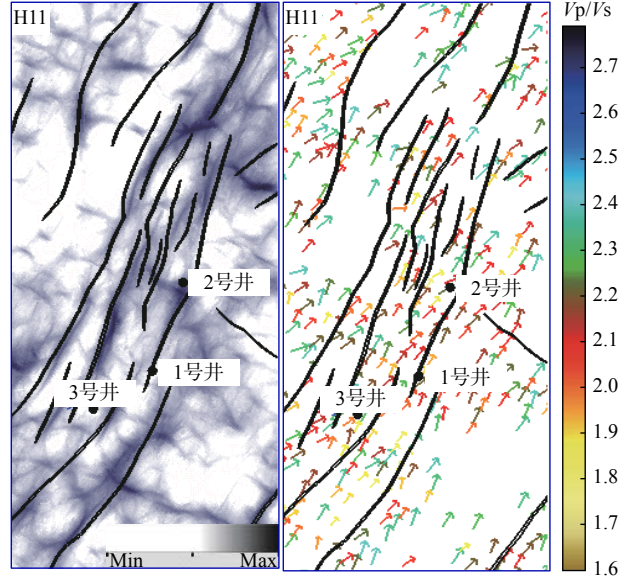


图11 H11层相干体切片+解释断层与预测裂缝密度+方位对比图

Fig.11 H11 layer coherent body slice+ interpretation fault and prediction crack density+ azimuth contrast map

通过应用双宽地震资料和裂缝预测的成果,对原有储层有了新的认识:由于3号井位于南北两组断层的转换带,裂缝相对不发育,南北两翼裂缝较发育,具备形成甜点的条件。H8层河道砂体横向稳定,厚度大,构造主体被断层切割,构造背景好,具有良好的圈闭基础,通过叠前裂缝预测指示裂缝整体较发育,应用储层和裂缝叠合可以确定甜点的分布(图13)。H11层河道砂体规模较小,横向变化快,可以在构造主体区内寻找裂缝发育区,可能与储层的匹配更好。

4 结论

(1)应用斜缆宽频采集可以得到高质量的宽频地震资料,它比常规地震资料低频和低频信息更加丰富,频带更宽。应用双宽资料的椭圆拟合方法可以得到裂缝密度的分布,使得裂缝的预测精度大大提高;

(2)研究区H8层以下裂缝较发育,应用宽频资料得出的裂缝方向和裂缝密度与解释大断层一致,裂缝预测的结果在井上能很好的解决H11层与

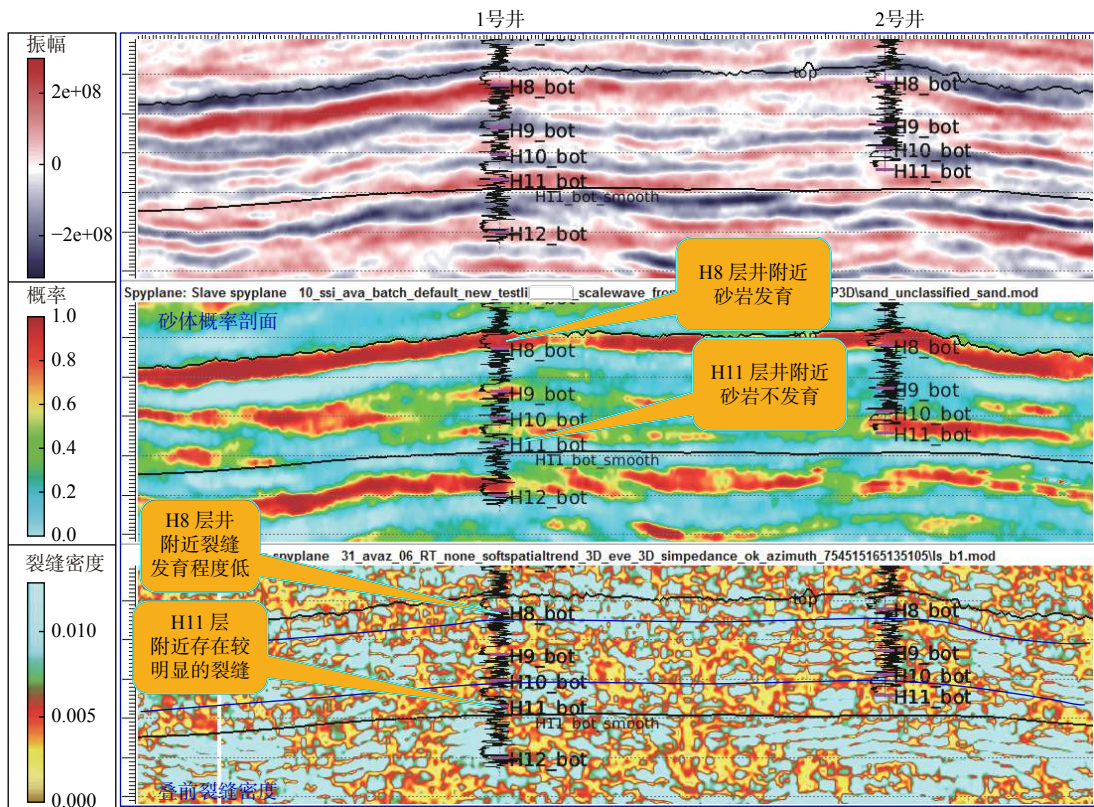


图 12 宽方位资料砂岩概率与裂缝密度剖面对比

Fig.12 Comparison of sandstone probability and crack density profile with wide azimuth data

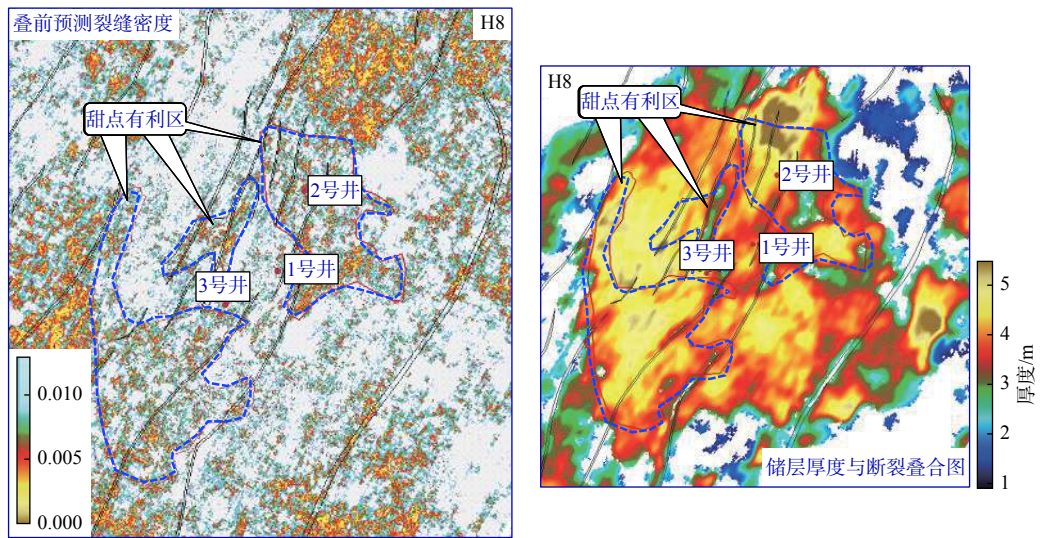


图 13 应用裂缝密度和储层预测甜点有利发育区

Fig.13 Application of crack density and reservoir to prediction sweet area

H8 层产能与砂岩厚度之间的矛盾。

(3) 通过应用双宽地震资料, 宽频的优势也能得到很好的体现, 双宽资料的反演结果能够清晰的刻画 A、B 两套砂体的存在。通过裂缝预测, 结合储层的分布, 可以确定甜点的可能分布区域。

(4) 应用双宽资料可以更加有利于复杂构造的成像, 有利于复杂储层的定量研究, 也更有利于致密储层的裂缝研究。

参考文献:

[1] 叶云飞, 刘春成, 刘志斌, 等. 海上宽频地震反演方法及其在南

- 海深水区的应用[J]. 中国海上油气, 2018, 30(2): 65-70.
- [2] 张建军, 刘红星, 孙 强, 等. “两宽一高”地震采集技术在鄂东缘致密砂岩气藏勘探中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(2): 1-7.
- [3] 刘依谋, 印兴耀, 张三元, 等. 宽方位地震勘探技术新进展[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(3): 596-610.
- [4] 张保庆, 周 辉, 左黄金, 等. 宽方位地震资料处理技术及应用效果[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 396-406.
- [5] 凌云研究小组. 宽方位角地震勘探应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(4): 350-358.
- [6] 张振波, 李东方. 斜缆宽频地震勘探技术在珠江口盆地的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(3): 451-456.
- [7] 肖 曦, 张益明, 王志华, 等. 宽频数据在致密砂岩储层预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 1-10.
- [8] 秦德文, 高红艳, 钟 韬, 等. 东海低渗气藏储层改造区“甜点”预测技术研究与应用[J]. 海洋石油, 2017, 37(2): 45-50.
- [9] 连小翠. 东海西湖凹陷深层低渗-致密砂岩气成藏的地质条件与模式[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(2): 23-30.
- [10] 姜 雨, 陈 华, 姚 刚, 等. 海上变深电缆宽频宽方位地震采集现场作业难点及解决方案[J]. 海洋石油, 2016, 36(4): 8-13.
- [11] 余本善. 海上宽频地震采集技术新进展[J]. 石油科技论坛, 2015(1): 41-45.
- [12] 谢玉洪, 李 列, 袁全社. 海上宽频地震勘探技术在琼东南盆地深水区的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 430-436.
- [13] 潘仁芳, 金吉能. 断层和裂缝尺度识别的地球物理方法探讨[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(3): 16-18.
- [14] 熊金红, 陈 岑, 曹占元, 等. 基于叠前地震全方位各向异性预测裂缝发育——以普光气田须家河组为例[J]. 地质力学学报, 2017, 23(2): 280-287.
- [15] 凌 云, 高 军, 孙德胜, 等. 裂缝储层的地震预测技术与应用实例[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1): 91-102.
- [16] Thomsen L. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock[J]. *Geophysics Prospecting*, 1995, 43(6): 805-829.
- [17] Hall S A. Fractured reservoir characterization using P-wave AVOA analysis of 3D OBC data[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(8): 777-781.
- [18] Hall S A. Fractured characterization at Valhall: application of P-wave amplitude variation with offset and azimuth(AVOV) analysis to a 3D ocean-bottom dataset[J]. *Geophysics*, 2003, 68(4): 1150-1160.
- [19] 夏亚良, 魏小东, 王中凡, 等. OVT域方位各向异性技术在中非花岗岩裂缝预测中的应用研究[J]. 石油物探, 2018, 57(1): 140-147.

APPLICATION OF DOUBLE-WIDTH SEISMIC DATA TO FRACTURE PREDICTION IN R GASFIELD OF XIHU SAG

LIU Xiaohui, TU Qicui, JIANG Yu, LIU Jiang, MAO Yunxin, WANG Wei, LI Wenjun

(Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: Seismic data acquired from the R Gasfield of the Xihu Sag is poor in quality due to its deep buried depth and the conventional seismic data processing is not efficient enough to meet the requirement of exploration. In 2016, high-quality double-width seismic data were acquired with the method of variable-depth atreamer broadband and multi-vessel wide-azimuth acquisition. Because the oil reservoir below the Layer H7 in the R Gasfield is controlled by fractures, the accuracy of fracture prediction is of significance to the production of oil and gas from the reservoirs below the Layer H7. In the past, the fracture prediction could only be performed with seismic attributes and seismic coherent bodies, and the accuracy was often not so high. By using double-width seismic data to predict fracture now, we can get more accurate anisotropy factor and the distribution of fracture density, which can be used to indicate the development status and direction of fractures. The prediction results prove that the fractures are well developed below the Layer H7, and the extending direction of the fractures is consistent with that of the large fault. Fractures in the Layer H11 are more developed than those in the Layer H8, which can well explain why the productivity of H11 is higher than the H8 but the sand body is thinner. By calculating the density of the fracture, we can also make better prediction of more sweet areas.

Key words: double-width data; wide-azimuth acquisition; anisotropic strength; fracture density; Xihu Sag