

文章编号:0253-9985(2008)05-0683-07

地震三维三分量技术在致密砂岩裂缝预测中的应用

——以川西新场气田为例

杨克明¹, 张 虹²

(1. 中国石油化工股份有限公司 西南油气分公司, 四川 成都 610000;

2. 中国石油化工股份有限公司 西南油气分公司 石油勘探开发研究院 德阳分院, 四川 德阳 618000)

摘要:川西坳陷陆相沉积领域深层须家河组气藏具有“四超二复杂”,即超深、超致密和低孔渗、超晚期构造、超高压及复杂的气水关系、复杂的储层非均质性的特点,常规地震勘探技术预测和识别如此复杂的储层和裂缝系统面临重大挑战,特别是裂缝预测成为川西须家河组地震勘探面临的重大难题。转换波三维三分量地震勘探技术在获得能够反映岩石骨架及流体特性的常规P波资料的基础上,同时获得了反映骨架和各向异性特性的C波资料,在纵、横波联合区分岩性、流体性质以及利用转换波各向异性和横波分裂预测裂缝方面均比单纯的纵波勘探具有明显的优势。在川西新场气田须家河组气藏,通过转换波三维三分量地震资料的综合解释,充分利用三维三分量的纵波信息和转换波信息,开展P波地震属性裂缝预测、方位各向异性裂缝检测、横波分裂裂缝检测等多方面研究工作。在单纯利用P波地震属性预测大尺度断裂和裂缝发育带的基础上,利用速度方位各向异性和横波分裂预测了小尺度裂缝网络系统,提高了裂缝预测的精度,较好解决了新场气田须家河组超致密储层裂缝预测问题。

关键词:各向异性;横波分裂;裂缝检测;裂缝型储层;三维三分量;地震勘探

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

Application of 3D-3C seismic technique to the prediction of fractures in tight sandstone

—an example from Xinchang gas field in the Western Sichuan Depression

Yang Keming¹, Zhang Hong²

(1. Southwest Oil & Gas Field Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610000, China; 2. Deyang Branch of Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gas Field Company, SINOPEC, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: The reservoirs in the Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression are characterized by ultra-deep burial, ultra-tightness, ultra-low porosity, ultra-low permeability, ultra-late structures, ultra-high pressure, complex GWC, and complex anisotropy. Therefore, conventional seismic techniques are faced with great challenges when predicting and identifying such complex reservoirs and fracture systems, especially the fractures in Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression. Both conventional P-wave data, which could reflect the characteristics of matrix and fluid, and C-wave data, which could reflect matrix and anisotropy, could be achieved by using 3D-3C converted wave technique. This technique is of more advantages than simple P-wave technique in respect of identifying lithology and fluid property by using combined P- and S-wave data as well as predicting fractures by using azimuthal anisotropy of converted wave and split S-wave data. In view of the characteristics of the Xujiahe Formation gas reservoirs in Xinchang gas field, P-waves and converted waves 3D-3C data are fully utilized to perform fracture prediction with P-wave attributes, fracture detection with azimuthal anisotropy and fracture detection with split S-wave based on integrated interpretation of converted waves of 3D-3C data. Based on prediction of large-scale faults and fractured zones by only using P-wave attributes, small-scale fracture net-

收稿日期:2008-08-17。

第一作者简介:杨克明(1955—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。

work is predicted by using azimuthal anisotropy and split S-waves. The problem of fracture prediction for the tight reservoirs in the Xujiahe Formation in Xinchang gas field is solved and the prediction accuracy is improved.

Key words: anisotropy; split S-wave; fracture detection; fractured reservoir; 3D-3C; seismic exploration

新场气田位于川西凹陷孝泉-丰谷北东东向隆起带的孝泉-新场构造上。综合地质研究表明,新场-孝泉构造位于彭灌生油凹陷的中心部位,油气资源丰富;砂体发育,须二段地层厚约600~700 m,发育9套砂组,累计厚度350~410 m;存在构造-裂缝型复合圈闭;封盖条件良好,具备形成大型气田的基础地质条件^[1-5]。但由于须家河组油气成藏地质条件十分复杂,储层孔隙发育程度和基质渗透性极差,油气产出和高产强烈依赖于裂缝对储层储集条件的改善,裂缝发育带预测成为气藏勘探急需解决的技术难题^[1-6]。为了加快新场气田深层须家河组气藏勘探开发,2005年在新场气田主体部位部署实施三维三分量地震勘探工作,采用12线264道16炮砖墙式观测系统采集,9 504道接收,66次覆盖,在此基础上开展多波属性裂缝预测、方位各向异性裂缝检测、横波分裂裂缝检测等方法技术研究,建立了川西深层致密砂岩领域多波裂缝综合预测技术系列,较好地解决了须家河组超致密储层

裂缝预测问题,取得了较好的勘探效果。

1 须家河组二段储层基本特征

新场气田须二(须家河组二段)气藏埋深4 500~5 000 m,储层沉积环境以三角洲前缘砂坝为主,部分三角洲平原分流河道。纵向上砂体发育,但物性普遍较差,储层总体孔隙度主要分布在1%~4%区间,渗透率普遍低于 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图1),必须依靠裂缝改善储集条件。高角度有效裂缝系统的发育已成为新场须二气藏天然气富集和高产的前提条件。裂缝发育程度与气井产能关系密切,裂缝尤其是高角度裂缝对气藏产出起控制作用。实钻揭示X851和X856产层中次生矿物发育,常规及全波列测井较清晰地反映出了储层的裂缝特征,裂缝段表现为侧向曲线的正幅度差、尖刺状下降,声波指状增高或跳波,全波列曲线纵波衰减明显,成像测井高角度裂缝发育(图2),获得

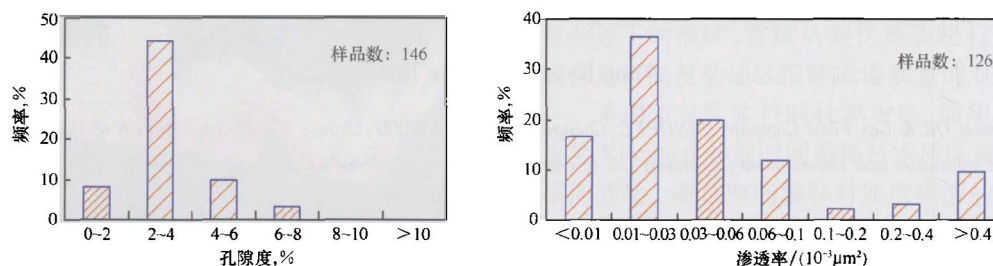


图1 新场气田须二段孔隙度、渗透率分布直方图

Fig. 1 Histogram of porosity and permeability of the second member of Xujiahe Formation in Xinchang gas field

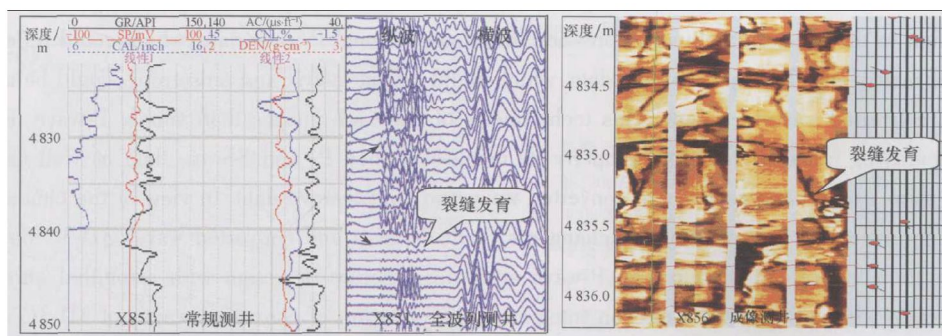


图2 新场气田X851和X856井须二段裂缝发育特征

Fig. 2 Characteristics of fracture development of the second member of Xujiahe Formation in X851 and X856 wells in Xinchang gas field

$50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上高产工业气流。而裂缝欠发育或不发育的钻井,只能获低产工业气流或干井。

2 纵、横波联合裂缝检测

多波勘探的最大贡献之一是可以利用纵、横波的方位各项异性和横波分裂现象较为可靠地研究和预测裂缝发育带。多波裂缝预测是一个综合的预测过程。为了提高裂缝的预测精度,采用不同的方法技术预测不同尺度的裂缝。采用P波和S波相干、倾角、方位角等地震属性,预测大尺度的断裂和破裂系统;采用P波、S波方位各项异性和横波分裂,预测小尺度裂缝网络系统;最后通过裂缝建模,建立主要目的层的裂缝网络模型,计算裂缝渗透率和裂缝孔隙度。

2.1 地震属性裂缝预测

三维相干数据体是通过在一定时窗内地震波形纵向和横向相似性的判别得到的三维地震相干性的估计值。具有一定规则的相干数据体低相干值的空间展布特征能直观展示断层,特别是常规构造解释容易被忽略或难以发现的小断层在平面上的发育情况。通过对这些小断层细节特征的分析,能预测可能的裂缝发育区。相干体技术发展至今已经进入C4,通常采用C3算法就能取得较好的断层、破裂系统等相对较大尺度断裂系统,而

且具有较高的可靠性。图3是新场地区须二段沿层相干切片图,在相干切片上除了能分辨出主要断裂的分布情况外,一些常规构造解释难以发现的小断层以及断层附近岩层的破裂程度也清晰可见。X851, X856, X3等裂缝发育高产井位于断裂附近的低相干值区域,而裂缝不发育的干井CX560井则位于高相干值区域。利用相干切片进行小断裂精细解释,分析相干低值区的平面分布特征及与大断裂的配置情况,可以定性地推断裂缝发育带的分布状况。该方法技术实用、简单,在勘探初期的井位部署中发挥了很大的作用。但该方法只能定性预测裂缝相对发育程度,不能预测裂缝发育密度和方位。

2.2 P波方位各向异性裂缝检测

P波方位各向异性裂缝预测技术是目前国内外正在发展和不断完善的技术。它是利用地震波在各向异性介质中传播时会发生振幅、速度、传播时间、AVO属性随方位角的变化,检测裂缝(特别是垂直缝或高角度缝)发育的方位和发育密度^[7,8]。其预测结果与裂缝发育带的微观特征有更加密切的关系。

2.2.1 AVAZ裂缝检测

AVAZ裂缝检测方法是根据P波振幅随方位角的周期性变化来估算裂缝的方位和密度。宽方

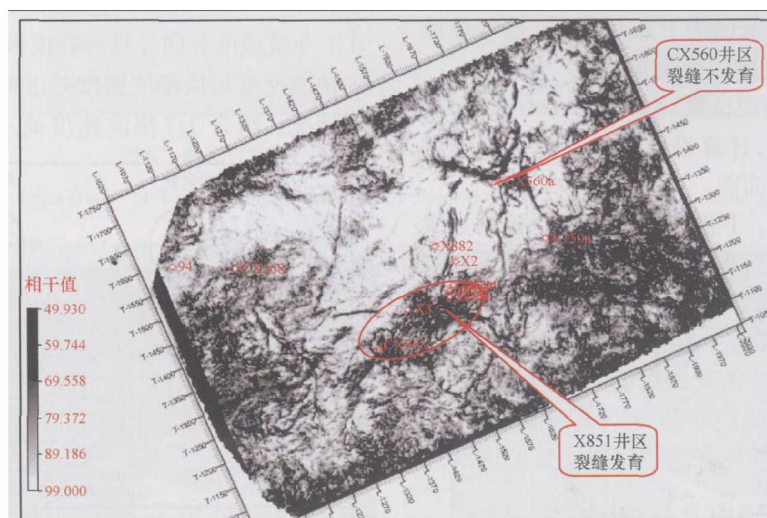


图3 新场气田三维三分量P波 T_5^1 反射层相干切片

Fig.3 Coherence slice of T_5^1 reflector in P-waves of 3D-3C data in Xinchang gas field

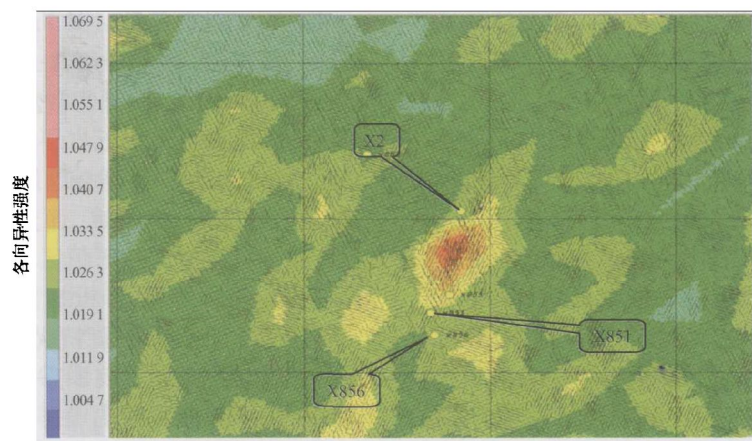


图 4 新场气田须二段 Tx_2^4 P 波 AVAZ 裂缝检测平面图

Fig. 4 Ichnography of AVAZ fracture detection by P-wave of Tx_2^4 reservoir in Xinchang gas field

方位角采集原始资料是基础,分方位地表一致性保幅叠前时间偏移处理是关键。AVAZ 裂缝检测主要包括:

1) 宏面元组合,为确保方位角道集选排后,每个方位角道集具有一定的叠加次数,必须进行宏面元组合;

2) 方位角定义,对宏面元道集内的地震道进行方位角定义;

3) 方位角道集选排,对超道集进行方位角定义,并按一定角度进行方位角划分,形成方位角道集;

4) 方位角道集叠加处理,对方位角道集内较大偏移距范围的地震道(理想情况是对目的层具有 $15^\circ \sim 30^\circ$ 入射角范围的 P 波反射道)进行叠前时间偏移处理,形成方位角道集;

5) 储层标定和层位拾取;

6) AVAZ 计算,计算沿层裂缝方位和裂缝强(密)度及其叠合平面图。

图 4 是新场 Tx_2^4 P 波方位各向异性检测裂缝方位和强度平面叠合图。图中,颜色代表预测裂缝强度,线段方向代表预测裂缝方位;高产井 X851, X856, X2 井等均在裂缝发育密度较高区域,但未落在预测的裂缝密度最高值区。这可能是由于这 3 口井均在目的层段发育网状裂缝,而在理论上单纯振幅各向异性方法较难真实反映网状裂缝发育情况的缘故。

2.2.2 VVAZ 裂缝检测

VVAZ 裂缝检测方法是根据 P 波传播速度的

方位各向异性来估算裂缝的方位和密度。虽然 VVAZ 不如 AVAZ 的纵向分辨率高,但由于 VVAZ 可计算得到三参数(裂缝方位、裂缝密度、快 P 波速度),较之 AVAZ 两参数(裂缝方位、裂缝密度)在网状裂缝的预测方面有其优势,故也是 P 波方位各向异性裂缝预测的重要方法。VVAZ 首先对不同的方位道集扫描其均方根速度,根据拟合出的正弦函数计算均方根快波速度、快波方位和快慢波速度差;再用 Dix 公式和解释的层位计算目的层段快 P 波速度、裂缝方位和裂缝密度 3 个参数。由于网状裂缝中传播的快 P 波速度总是低于单组裂缝或无裂缝时的快 P 波传播速度,因而可以利用 VVAZ 判别网状裂缝的存在。图 5 为依据 HTI 介质速度各向异性解释模板,可以根据对不同的快波速度与快慢波速度差进行组合预测裂缝发育情况。组合①“快波速度高 + 快、慢波速度差

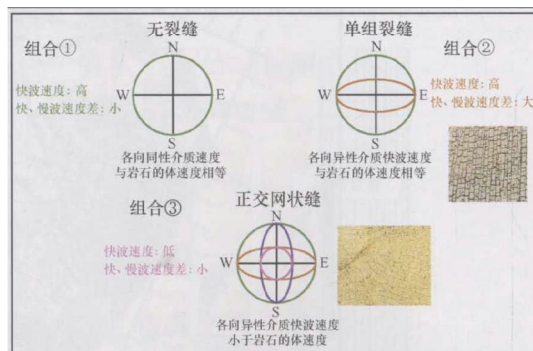


图 5 依据 HTI 介质速度各向异性解释模板

Fig. 5 Chart board for interpretation of velocity anisotropy of HTI medium

小”代表裂缝不发育;组合②“快波速度高+快、慢波速度差大”代表单组裂缝发育,快波方位代表裂缝走向;组合③“快波速度低+快、慢波速度差小”代表网状裂缝发育。

根据此解释模板,图6为新场地区须二段主产层P波VVAZ裂缝检测平面图。图中,线段的方位代表裂缝走向方位,长度代表快波速度,颜色代表快慢波速度差。从图中可以看出,红色长线段代表单组裂缝发育区,蓝色长线段代表裂缝不发育区,蓝色短线段代表网状裂缝发育区。预测结果与实钻的X856和X851井网状缝发育十分吻合。

2.3 横波分裂裂缝检测

横波分裂裂缝检测是纵、横波联合勘探的重要内容。由于横波在通过各向异性介质(裂缝)时会发生分裂,质点振动沿裂缝走向时传播速度快,而质点振动垂直裂缝走向时传播速度慢,因

此在通过裂缝系统后就会出现快横波和慢横波,也就是横波分裂。只要找出快横波的方向,就能准确预测裂缝发育的走向;而快、慢横波的层间时差,就代表裂缝发育的强度。

理论和实践都已证明,在单层模型情况下横波分裂参数(快波偏振和快、慢波时差)与裂缝发育方向和裂缝发育强度有一一对应的关系^[9]。横波在含裂缝地层中传播会产生分裂,利用这一特征对经叠前时间偏移的R分量(径向分量)、T分量(横向分量)进行旋转,可求取地层裂缝的发育方向和裂缝的发育密度。另外,横波裂缝预测技术利用的是近偏移距垂直传播时单一射线路径上的横波波场特征,而纵波裂缝预测技术用的是远偏移距大入射角传播时众多射线路径上的纵波波场特征,因此从理论上来说利用横波分裂预测裂缝是最直接和最可靠的。

图7是新场三维三分量资料的R分量和对应

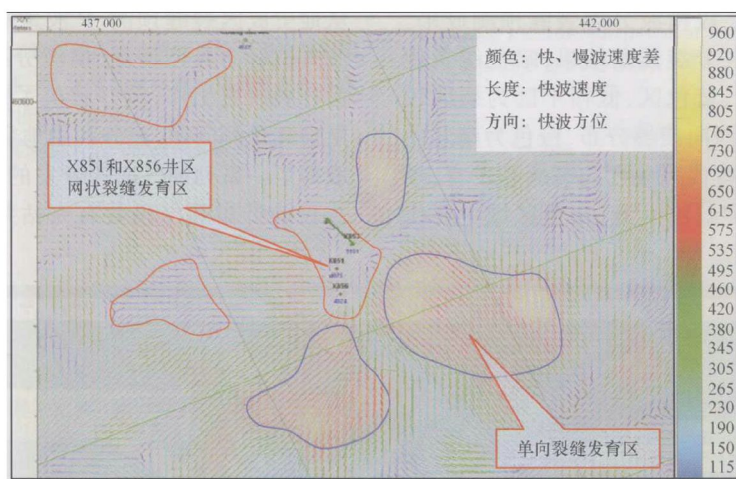


图6 新场气田须二段 Tx_2^4 P波VVAZ裂缝检测平面图

Fig. 6 Ichnography of VVAZ fracture detection by P-wave of Tx_2^4 reservoir in Xinchang gas field

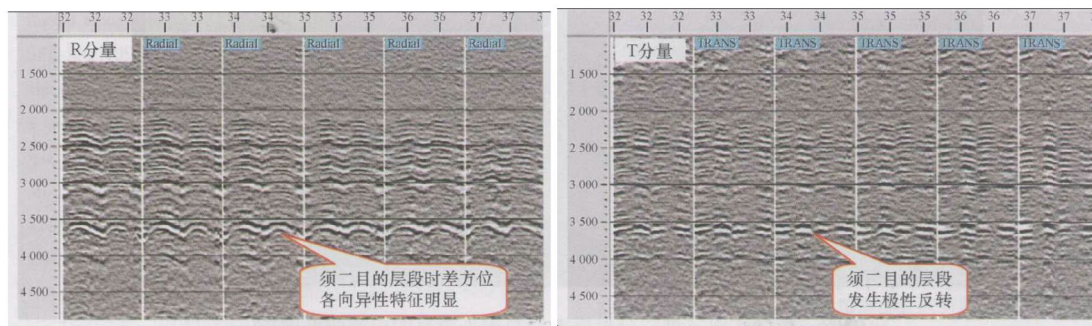


图7 新场气田三维三分量R分量(左)、T分量(右)分方位叠加道集

Fig. 7 Azimuth gather of R component (left) and T component (right) of 3D-3C seismic data in Xinchang gas field

的T分量分方位后重排的方位道集。从图中可以看出,R分量记录在储层段传播时间和振幅随方位有明显的变化。传播时间最小的道对应的方位就是裂缝发育的方位。T分量分方位叠加的方位道集可见T分量在目的层部位有较强的能量,且每隔 90° 有明显的极性反转,极性反转点指示裂缝的大致方向。这表明新场地区地层中各向异性严重,裂缝十分发育。理论上,如果无裂缝发育,T分量的能量应为零或很弱。因此,只要T分量有较强能量,表明裂缝一定存在。

在对R分量和T分量记录分方位进行PSTM处理后,根据层剥离法、Alford旋转法或线性变换旋转法等^[10],可以计算出裂缝发育的方向和快、慢横波时差(裂缝发育强度)。新场地区横波分裂裂缝检测采用较为成熟的层剥离法,对于有多层各向异性介质的影响,进行严格的层剥离技术,即从最上面的各向异性层开始逐个往下剥直至目的层。图8为新场须二段横波分裂裂缝预测成果。图中颜色部分为横波分裂预测结果,暗色线条代表相干属性,橙色区、蓝色区、低相干区为裂缝较发育区,蓝色代表东西向裂缝分布,橙色为南北向裂缝分布区,颜色越蓝代表东西向裂缝越发育,颜色越红代表南北向裂缝越发育,灰色区域主要代

表无裂缝区域。

根据测井裂缝评价,新场地区须二段有效裂缝绝大部分为东西向裂缝,几口工业气井也主要位于东西向裂缝发育的蓝色区域,即图中蓝色区域是有效裂缝主要发育区域;从裂缝发育程度上看,裂缝发育获得工业产能的X851,X856,X2井位于与产层对应的高裂缝发育密度区。此外,从平面裂缝发育程度上看,预测研究区东部裂缝较西部发育,这与东部断裂相对发育的宏观背景亦是一致的。从预测与实钻比较来看,所预测的裂缝密度及方位与实钻吻合较好。

3 结束语

在对新场须家河组气藏须二段储层基本地质特征和天然气富集主控因素综合分析的基础上,充分利用三维三分量的纵波信息和转换波信息,从地史成因裂缝预测、P波地震属性裂缝预测、P波方位各向异性检测、横波分裂裂缝检测等多方面开展研究工作,较好解决了须家河组超致密储层裂缝预测问题,充分利用地震三分量资料信息,取得了一系列油气勘探开发的重大进展。新场构造目前针对须二段共有完钻井8口,其中有6口

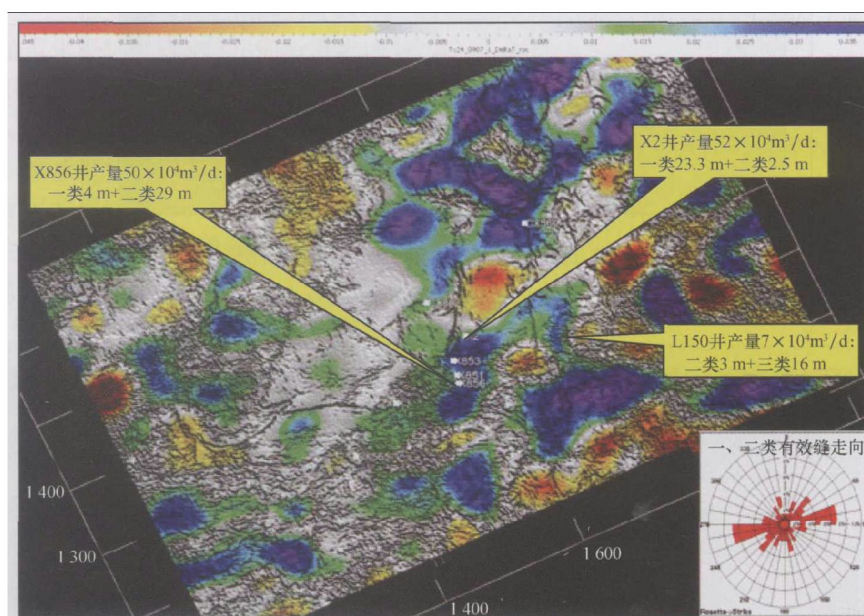


图8 新场气田三维三分量横波分裂须二段目的层预测平面图

Fig. 8 Plane view of fracture prediction with split S-waves of 3D-3C seismic data for the targets in the second member of the Xujiahe Formation in Xinchang gas field

并在须二段测试获得工业气流,有3口高产井(X851, X856, X2井)平均日产气稳定在 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上。

与国内外致密砂岩气藏相比,川西上三叠统须家河组储层致密化程度更高,气藏的非均质性更强,对有效储层预测和裂缝检测的精度要求更高。三维三分量地震勘探为川西深层裂缝性气藏预测提供了丰富的信息,特别在各向异性 and 横波分裂预测裂缝方面取得了比常规纵波勘探更丰富的成果。在单纯利用地震属性预测大尺度断裂和裂缝发育带的基础上,利用速度方位各向异性和横波分裂预测了小尺度裂缝网络系统,提高了裂缝预测的精度。但在速度方位各向异性裂缝预测纵向分辨率提高以及横波分裂目的层以上地层各向异性层剥离精度方面仍然有很多研究工作值得深入开展,亟待更好地解决。

参 考 文 献

- 郭正吾. 四川盆地西部致密碎屑岩含气领域勘探理论与实践[A]. 见:杨克明,徐进,编. 天然气成藏理论与勘探开发方法技术[C]. 北京:地质出版社,2004. 17~21
- 杨克明. 川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):786~793
- 叶军. 川西坳陷天然气富集规律[A]. 见:杨克明,徐进,编. 天然气成藏理论与勘探开发方法技术[C]. 北京:地质出版社,2004. 85~90
- 叶军,陈昭国. 川西新场大型气田地质特征与预测关键技术[J]. 石油与天然气地质,2006,27(3):384~391
- 张守仁,万天丰,陈建平. 川西坳陷孝泉-新场地区须家河组二段-四段构造应力场模拟及裂缝发育带预测[J]. 石油与天然气地质,2004,25(1):70~74
- 甘其刚,高志平. 宽方位AVA裂缝检测技术应用研究[J]. 天然气工业,2005,25(5):42~43
- Corrigan D, Withers R, Darnall J, et al. Fracture mapping from azimuthal velocity analysis using 3D surface seismic data[Z]. 66th Internat A & G, Soc Explor Geophys(Expanded Abstracts), 1996. 1 834-1 837
- Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media[J]. Wave Motion, 1981, 3:343~391
- Crampin S, Lovell J H. A decade of shear-wave splitting in the Earth's crust; what does it mean? What use can we make of it? And what should we do next? [J]. Geophys J Internat, 1991, 107:387~407
- Gaiser J E. 3-D converted shear wave rotation with layer stripping [P]. US:5 610 875, 1997
- 江凡,杨锴,程玖兵. 复杂地表有限差分波动方程向上基准面校正[J]. 石油物探,2006,45(1):15~20
- Rajasekaran S, McMechan G A. Prestack processing of land data with complex topography[J]. Geophysics, 1995, 60(6):1 875~1 886
- Geiger H D, Bancroft J C. Equivalent offset prestack migration for rugged topography[Z]. Expanded Abstracts 66th Annual Internat SEG Mtg, 1996. 447~450
- Margrave G, Yao Z. Downward extrapolation from topography with a laterally variable depth step[Z]. Expanded Abstracts of 70th Annual Internat SEG Mtg, 2000. 481~484
- Mi Y, Margrave G. Prestack depth imaging from topography with a Fourier method[Z]. Expanded Abstracts of 71th Annual Internat SEG Mtg, 2001. 1 045~1 048
- Gurevich B, Keydar S, Landa E. Multifocusing imaging over an irregular topography[J]. Geophysics, 2002, 67(2):639~643
- Jaeger C, Hertweck T, Spinner M. True-amplitude Kirchhoff migration from topography[Z]. Expanded Abstracts of 73th Annual Internat SEG Mtg, 2003. 909~912
- Ristow D, Ruhl T. Fourier finite-difference migration[J]. Geophysics, 1994, 59(12):1 882~1 893
- Liu Jiangping, Xia Jianghai, Chen Chao. Combining elevation and NMO corrections to shallow seismic reflection data on rugged topography[Z]. SEG Expanded Abstracts, 2003. 1 259~1 262
- 方伍宝,孙建国. 复杂条件下的深度成像技术[J]. 石油与天然气地质,2005,26(6):816~822
- 孙成龙,方伍宝,孔祥宁,等. 深度-射线域偏移速度分析[J]. 石油物探,2005,44(5):461~464
- 李振春,姚云霞,马在田,等. 波动方程法共成像点道集偏移速度建模[J]. 地球物理学报,2003,46(1):86~93
- 闫相宾,管路平,王世星. 塔里木盆地碳酸盐岩缝洞系统的地震响应特征及预测[J]. 石油与天然气地质,2007,28(6):828~835
- 黄绪宝,顾汉明. 塔河油田南部缝洞储层的正演模拟及地震波场特征[J]. 石油与天然气地质,2007,28(6):836~840

(编辑 李 军)

(编辑 高 岩)

(上接第682页)