

致密砂岩储层多尺度裂缝地震预测技术

——以川西XC地区为例

刘俊州¹, 韩磊¹, 时磊¹, 陈双全², 吕文雅²

[1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京100083; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京102249]

摘要:针对川西XC地区的致密砂岩裂缝预测,研究并形成了一套基于地震叠前与叠后多属性融合的裂缝地震预测方法。将裂缝分成地震可识别的大尺度裂缝与地震难以识别的小尺度裂缝,首先利用信噪比高的叠后地震数据提取与大尺度裂缝相关的几何类地震属性,然后进行多属性融合刻画目的层段大尺度裂缝的分布规律;再结合叠前方位道集数据进行频率依赖各向异性特征预测的目的参数反演,实现对小尺度裂缝的预测;最后,综合大小尺度裂缝预测结果开展目的层裂缝发育规律研究,预测储层裂缝发育有利区。实际数据应用结果表明,利用多尺度裂缝综合预测技术可以很好地实现对裂缝性储层的准确描述,预测结果与实际生产井的油气产出情况吻合率高。

关键词:多尺度裂缝;地震各向异性;裂缝预测;储层描述;致密砂岩

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Seismic prediction of tight sandstone reservoir fractures in XC area,
western Sichuan BasinLiu Junzhou¹, Han Lei¹, Shi Lei¹, Chen Shuangquan², Lyu Wenya²

[1. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: A seismic fracture prediction method is proposed based on the fusion of multiple prestack and poststack seismic attributes for predicting the development of tight sandstone reservoir fractures in XC area in the Sichuan Basin. The fractures in the area include both large-scale fractures that can be identified by seismic responses and small-scale fractures that can not be readily identified by seismic responses. It is the latter that requires special processing. The geometric seismic attributes related to large-scale fractures are firstly extracted by using the poststack seismic data of high signal-to-noise ratio and then combined with the distribution pattern of the fractures in the target layer characterized with multi-attribute fusion to predict the distribution of small fractures through further combination with frequency-dependent anisotropic parameter inversion. At last, the prediction results are summarized to analyze the fracture distribution pattern of the target layer, with a view to accurately depicting potential targets with well-developed fractures. In all, the actual data obtained are consistent with predicted results, showing that fractured reservoirs can be accurately described by using this integrated multi-scale fracture prediction technology.

Key words: multi-scale fracture, seismic anisotropy, fracture prediction, reservoir characterization, tight sandstone

裂缝预测在油气地震勘探中起着十分重要的作用,特别是对于致密性油藏、复杂碳酸盐岩油藏等储层的描述。对于致密砂岩储层,由于其孔隙度特低,储层中发育的裂缝系统是优质储层的主要影响因素,因此,

开展基于地震数据的裂缝预测研究一直是该领域研究的热点及难点。

目前,常用的地震裂缝预测方法是利用地震波在裂缝介质中传播所表现的方位各向异性特征,包括振

收稿日期:2019-09-30;修订日期:2020-04-30。

第一作者简介:刘俊州(1974—),男,高级工程师,油气地球物理勘探。E-mail:stonecsq@126.com。

通讯作者简介:陈双全(1975—),男,教授、博士生导师,油气地球物理勘探。E-mail:chensq@cup.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002-005);国家自然科学基金项目(41574108)。

幅、速度、旅行时和衰减等属性,分析其随方位角变化特征来预测裂缝发育方位和发育强度^[1-2]。近年来,利用地震资料开展裂缝预测的方法研究,在物理模型数据和实际野外地震资料中均取得了很好的应用效果^[3-8]。实际地下介质地层中的裂缝通常表现出大小不等的多尺度特征,因此,其地震各向异性响应特征是介质中不同尺度裂缝的综合反映。根据裂缝长度的不同,MacBeth 和 Li^[9]将裂缝分为大尺度裂缝、中等尺度裂缝和小裂缝或微裂隙。对于具有相同裂缝密度、但裂缝尺度不同的裂缝模型,由于常规的振幅、速度等各向异性属性主要与裂缝密度相关,而裂缝密度是单位体积内裂缝条数与裂缝半径立方的乘积。因而,只利用地震各向异性特征进行裂缝预测,对不同尺度裂缝会得到相同的结果^[12]。

考虑到致密砂岩储层的裂缝发育有不同尺度的裂缝,其中影响油气井生产的主要因素是小尺度裂缝。常规的裂缝预测技术主要是利用方位各向异性特征进行综合裂缝预测,预测得到的裂缝发育强度结果不能很好地区分大尺度裂缝与小尺度裂缝,它是大小尺度裂缝的一个综合反应。因此,本文提出了针对致密砂岩储层多尺度裂缝综合预测预测方法,对大尺度裂缝和小尺度裂缝的不同地震响应特征分别采用叠后属性和叠前属性进行预测,最后再将二者的预测结果进行融合。具体流程如图1所示,主要技术步骤可以概括为:

1) 在叠后地震资料上先利用倾角、曲率、方差、方位角、相干等叠后几何类地震属性对大尺度裂缝发育特征进行刻画;

2) 再根据测井获得的裂缝描述结果对叠后属性进行约束,将多种属性值进行融合得到大尺度裂缝的预测结果;

3) 采用方位频率梯度属性在叠前资料上进行小尺度裂缝预测,再结合成像测井资料统计的裂缝描述结果对小尺度裂缝预测结果进行有效范围确定,得到小尺度裂缝的预测结果;

4) 将大尺度裂缝预测结果和小尺度裂缝预测结果进行融合,最终得到储层裂缝体系的综合预测成果。

论文研究形成的多尺度裂缝预测方法和技术流程,主要利用叠前衰减各向异性预测小尺度裂缝,再结合叠后地震属性可识别的大尺度裂缝进行综合解释,综合两种尺度条件下储层裂缝预测成果,可以得到多尺度裂缝综合预测结果。将该方法和技术流程应用到川西深层裂缝性储层描述中,分析得到的裂缝预测结

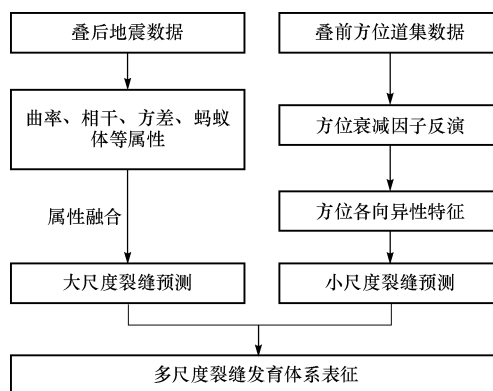


图1 叠前叠后地震数据裂缝综合预测技术流程

Fig. 1 Technology workflow showing the integrated fracture prediction by using prestack and poststack seismic data

果与成像测井解释结果及生产数据稳合度高,表明文中提出的叠前、叠后综合裂缝预测方法是可行的。

1 地质概况及裂缝发育特征

选用川西 XC 地区的致密砂岩目标区地震数据开展了实际应用。该油气勘探区的目的层段埋藏较深,一般在 4 600 ~ 5 200 m,平均约 4 900 m;有利储层的厚度较大,达到 300 ~ 500 m,是砂泥岩互层沉积而形成的致密砂岩储层。以岩屑砂岩、岩屑石英砂岩为主,砂岩中胶结物主要为硅质,以长石岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩为主,部分长石砂岩。储层物性差,孔隙发育程度差,孔隙度小于 4%,渗透率一般在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下,属于特低孔、特低渗致密、超致密储层。基质渗透性极差,当裂缝发育时,渗透性表现出较高特征。储层难以成为有效储层,其中裂缝发育是获得高产的关键,因此搞清裂缝发育规律与分布成为研究目标区储层增储上产所要解决的关键问题之一^[11-12]。

通过岩心观察和成像测井资料,XC 地区致密砂岩储层主要发育构造裂缝(图 2a,b)和成岩裂缝,其中成岩裂缝主要为层理缝(图 2c)。构造剪切裂缝根据倾角可以细分为低角度剪切裂缝($<30^\circ$)(图 2a)、中角度剪切裂缝($30^\circ \sim 60^\circ$)和高角度剪切裂缝($>60^\circ$)(图 2b)^[13]。XC 地区致密砂岩储层主要发育低角度剪切裂缝、层理缝和高角度剪切裂缝。岩心上观察到的裂缝高度以 0 ~ 30 cm 为主,少数裂缝高度高达 50 ~ 70 cm。根据裂缝的尺度划分,岩心和成像测井上主要反映小尺度裂缝^[13]。

通过岩心观察及统计发现,XC 地区高、中角度剪切裂缝主要发育在中-细-粉砂岩中,低角度剪切裂缝主要发育在粗-细砂岩中,层理缝主要分布在粗-

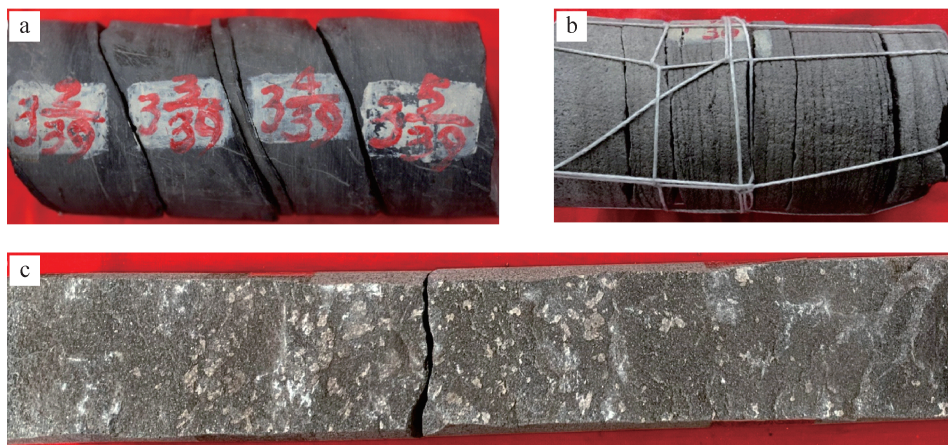


图2 XC地区须家河组岩心裂缝类型

Fig. 2 Core photos showing the fracture types in the Xujiahe Formation in XC area

a. 低角度剪切缝; b. 层理缝; c. 高角度剪切缝

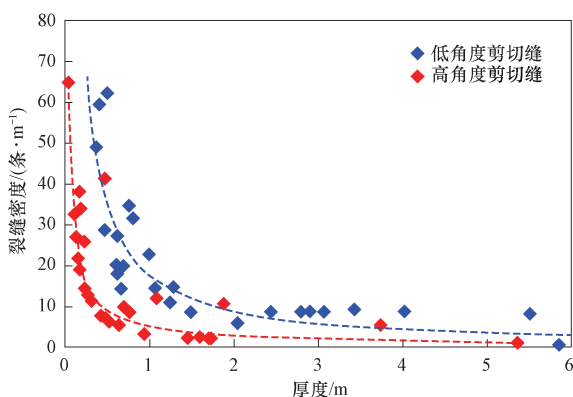


图3 XC地区须家河组岩层厚度与裂缝密度关系

Fig. 3 Relationship between reservoir thickness and fracture density in the Xujiahe Formation in XC area

中砂岩中。天然裂缝的分布受岩石力学层的控制,裂缝密度随着岩石力学层厚的增加而减小(图3)。构造部位对裂缝发育具有控制作用,通过对取心井和成像测井裂缝密度的统计,并结合研究区的构造特征发现,位于背斜末端、断层端部与附近的井裂缝密度较大,裂缝较发育;远离断层带,裂缝密度明显减小。这是由于背斜末端、断层端部及断层附近,容易出现应力集中,构造裂缝数量明显增加。

2 大尺度裂缝描述

地震数据由于受地震子波波长的影响,其具有一定的分辨率,利用叠后地震数据或地震属性只能进行一定尺度大小的裂缝描述^[14]。根据地震数据的分辨率,将能够利用大于1/4波长的地震属性进行预测的裂缝定义成大尺度裂缝,而不能利用该属性进行描述的裂缝定义成小尺度裂缝。利用叠后地震资料进行目

的层的裂缝描述,主要是通过不同的地震属性再进行储层描述或刻画。主要采用了几何类的地震属性进行叠后裂缝预测,选取倾角、方位角、方差、相干、蚂蚁体和最大负曲率6种属性。对于目的层段,利用单一属性表征的裂缝分布规律如图4所示,图中分别展示了6种属性的沿层切片。

由于不同地震属性表征的是裂缝的不同特征,因此需要对不同的地震属性进行融合,以达到对裂缝的准确精细刻画。图5所示是对上述的6种属性进行属性融合后得到的裂缝发育规律及其分布特征,图中分别展示了研究目的层的二维平面图和三维立体刻画图。相比较于单独的叠后地震属性描述的裂缝发育规律,融合后的地震属性更清晰地刻画出了大尺度裂缝分布规律。

3 小尺度裂缝预测

对于储层中发育的尺度小于1/4波长的裂缝,常规的地震各向异性属性难以进行描述。因此,采用方位衰减梯度属性来进行小尺度裂缝的预测。从叠前方位道集数据中计算得到衰减梯度属性,并进一步利用该属性方位拟合得到小尺度裂缝的发育强度和发育方向。由于叠前方位道集数据的信噪比较低,直接影响到后续的属性计算等,因而需要对叠前方位道集数据进行去噪处理,以提高其信噪比。图6展示了部分道集数据在去噪前后的对比,从图中可以看出,去噪处理后的道集数据信噪比得到明显的提高,其中有效信号反射同相轴更加清晰可见。

经过去噪等提高信噪比处理后的叠前方位道集数据,可以更好地计算方位各向异性属性,用于裂缝预

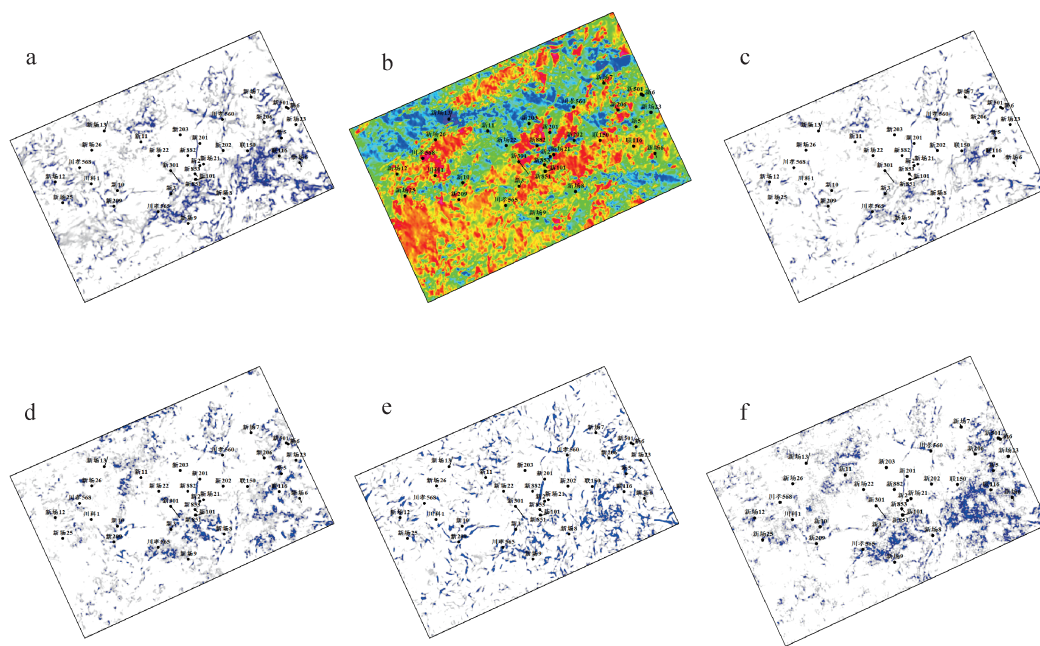


图4 目的层段的叠后地震属性沿层切片

Fig. 4 Horizon slices showing seismic attributes extracted from the poststack seismic data of the target layer
a. 倾角; b. 方位角; c. 方差; d. 相干体; e. 蚂蚁体; f. 最大负曲率

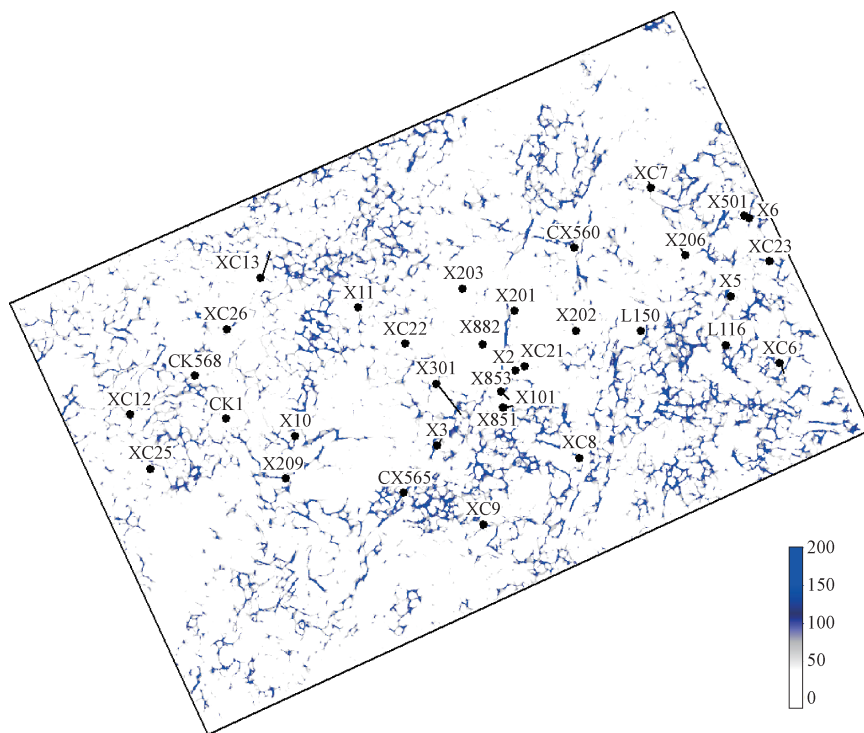


图5 属性融合后得到裂缝发育规律及其分布特征

Fig. 5 Development pattern and distribution features of fractures obtained from multi-attribute fusion

测。目前,基于 HTI 介质模型的常用叠前方位各向异性属性,包括振幅、速度和旅行时间等,研究表明这些属性主要反应的是裂缝的综合响应特征,而衰减相关的方位特征属性主要反映的是小尺度裂缝的响应特征。图7展示了叠前方位道集数据和衰减梯度属性,

对比图中道集数据展示出衰减梯度属性更清晰地反映出裂缝发育的各向异性特征。

图8为利用叠前方位道集数据计算得到的衰减梯度属性,展示的是裂缝发育强度与发育方向的预测结果,预测结果主要反映了小尺度裂缝的发育规律。裂

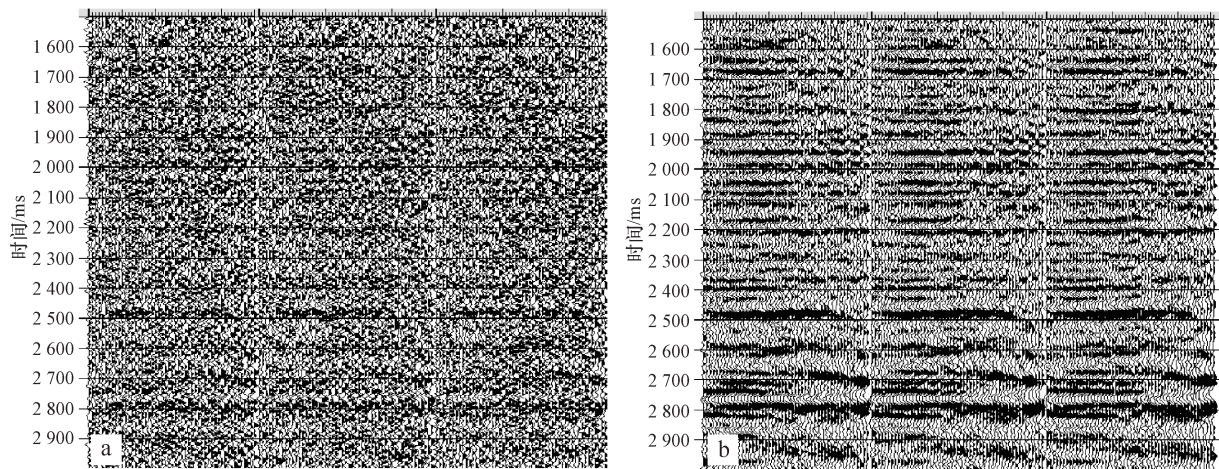


图 6 叠前 CMP 道集数据去噪前后对比

Fig. 6 Comparison of the prestack CMP gathers before and after noise supression

a. 去噪处理前道集; b. 去噪处理后道集

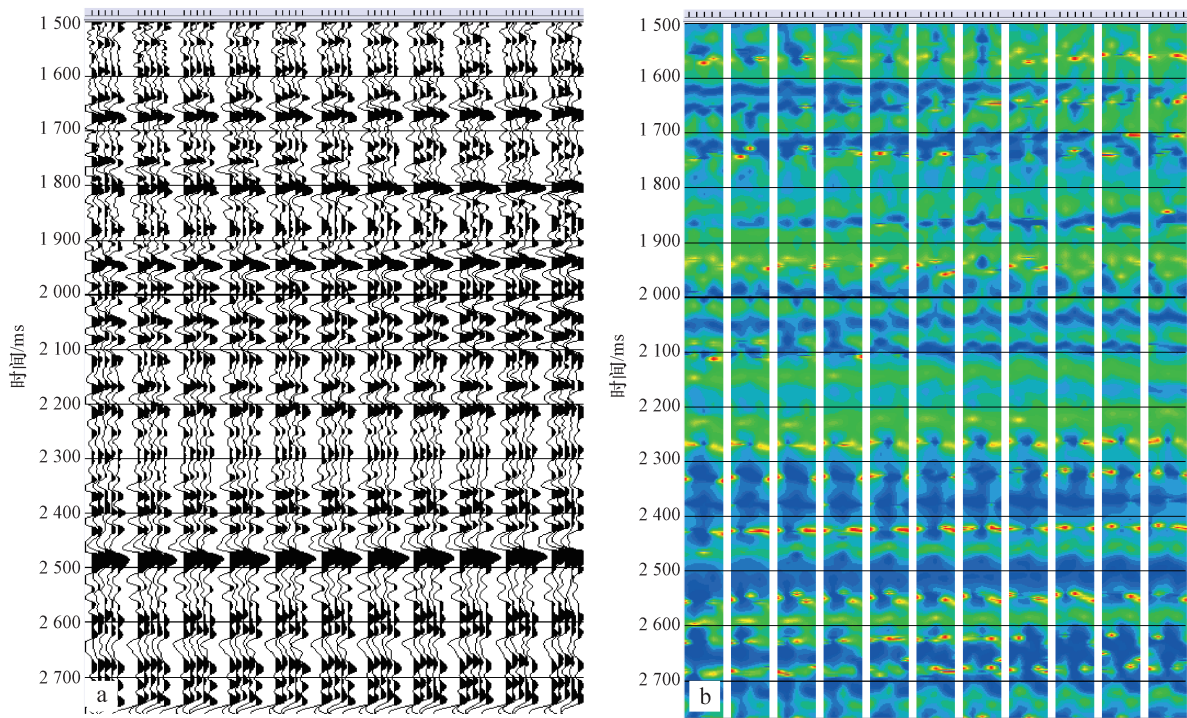


图 7 叠前方位道集与衰减梯度属性对比

Fig. 7 Comparison of prestack azimuthal seismic gathers and azimuthal attenuation gradient attributes

a. 方位道集; b. 衰减梯度

缝发育走向以近东西向和北东-南西向为主,局部发育北西-南东向裂缝。同时,结合研究目标区的成像测井资料解释得到的裂缝发育方向(图 9)。图 9 中左列裂缝发育方向的玫瑰图为统计的研究区成像资料解释结果,右列为利用地震数据预测得到的裂缝发育方向结果。其中图 9a 对比了整个研究区范围的裂缝发育情况,而图 9b 和图 9c 分别是对应研究区两口成像测井(X856 和 X10)的裂缝发育方向对比。地震预测得到的裂缝发育方向与成像测井解释得到

的裂缝发育方向具有很好的一致性,验证了裂缝预测结果的准确性。

4 裂缝发育规律

结合叠后大尺度裂缝预测结果与叠前小尺度裂缝预测结果进行目的层的综合描述。图 10 对比了研究目标区的叠后裂缝预测结果与过井地震剖面结果,以及叠前裂缝预测结果。图 11 为大小尺度裂缝预测的

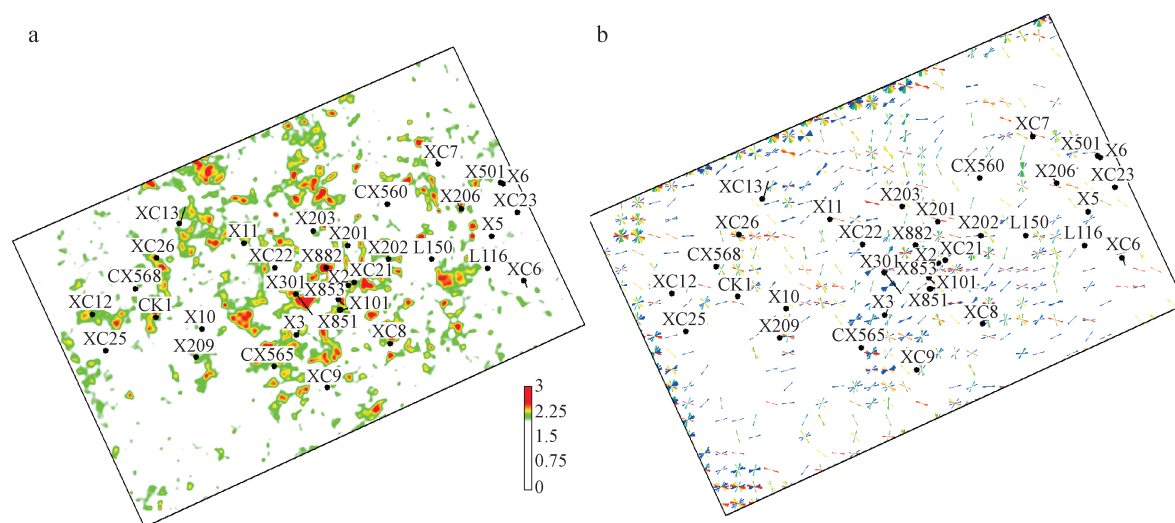


图8 小尺度裂缝预测的裂缝发育强度及发育方向

Fig.8 Fracture intensity and direction obtained from small-scale fracture prediction

a. 裂缝发育强度;b. 裂缝发育方向

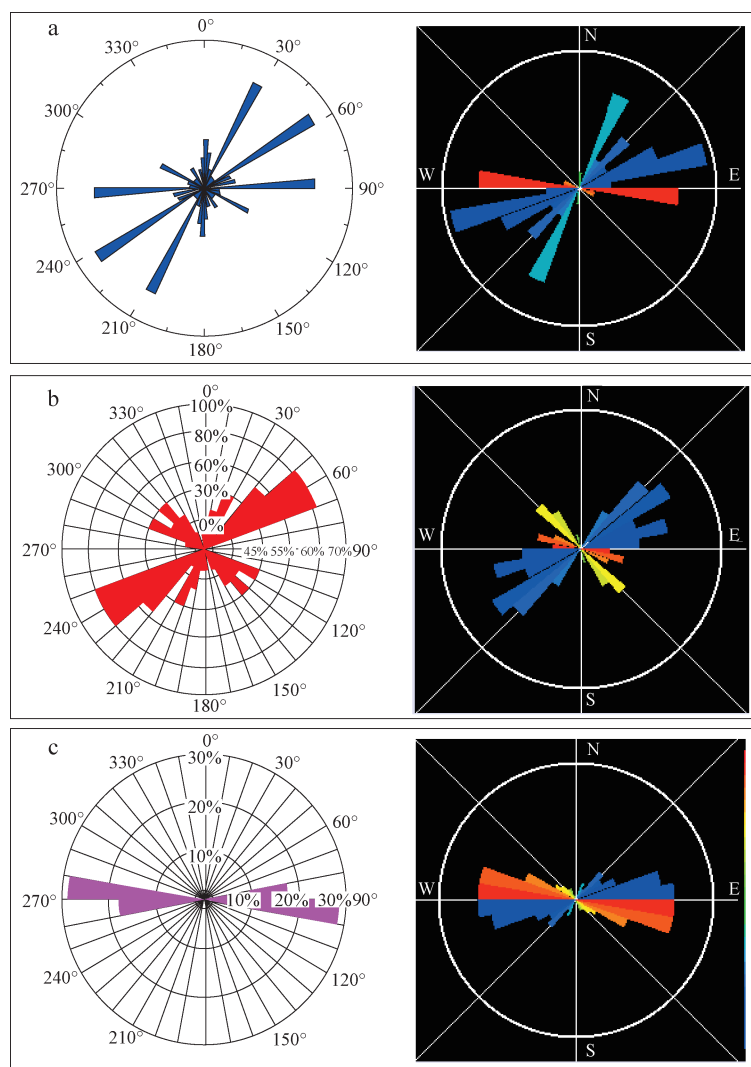


图9 成像测井解释裂缝发育方向与地震预测得到的裂缝发育方向对比

Fig.9 Fracture development direction comparison of the imaging logging interpretation and seismic prediction

a. 全部成像测井结果对比;b. X856井; c. X10井

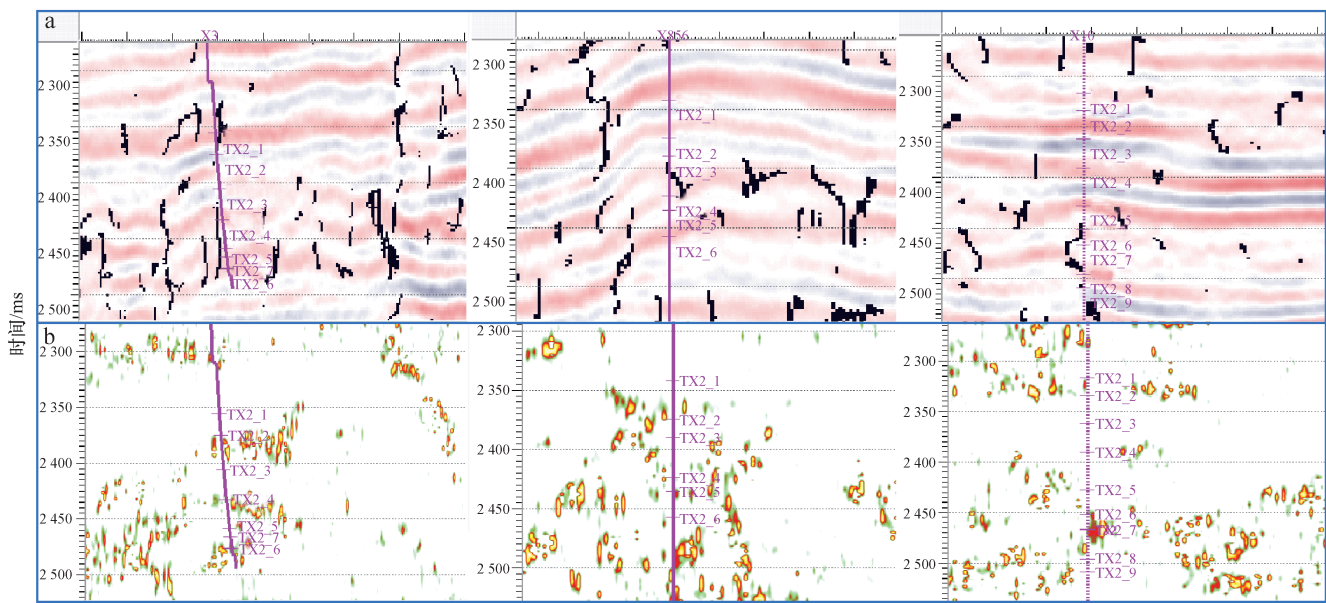


图 10 叠前裂缝预测结果与叠后裂缝预测结果过井剖面对比

Fig. 10 Cross-well section comparison of pre-stack and post-stack fracture prediction results

a. 目标区叠后裂缝预测结果过井剖面; b. 目标区叠前裂缝预测结果过井剖面

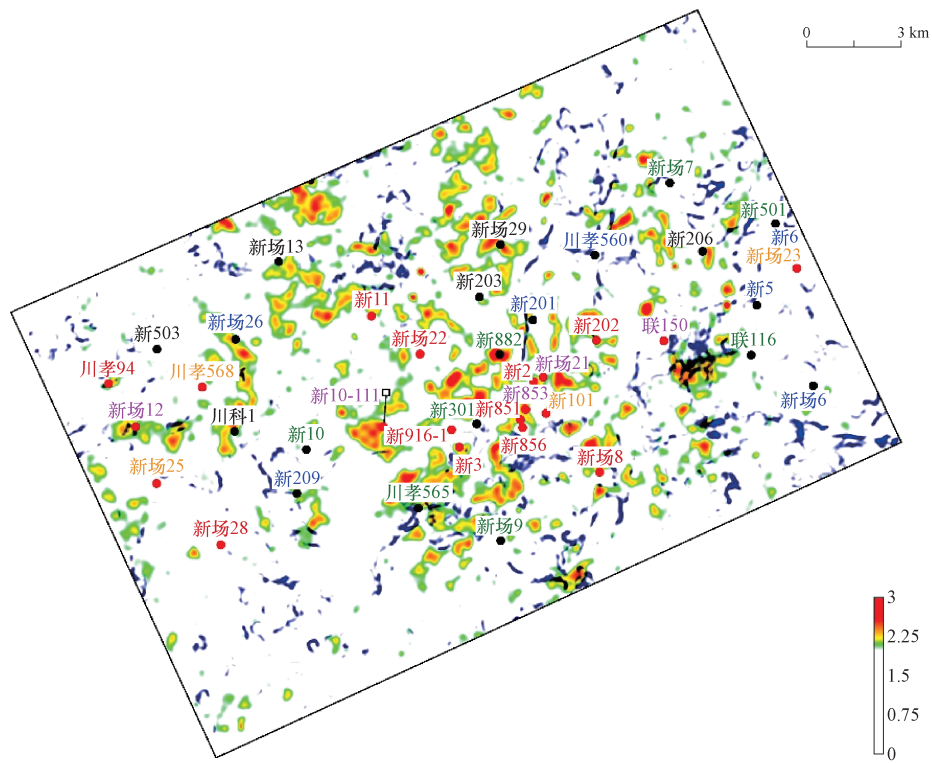


图 11 大尺度与小尺度裂缝预测结果叠合显示与井生产情况对比

Fig. 11 Superimposed display of large-scale and small-scale fracture prediction results and correlation with well performance

叠后显示及研究区的生产井综合解释结果,图中展示的大尺度裂缝为蓝色,小尺度裂缝为红黄绿彩色显示。图中红色井号:高产井,大于10万方;粉色井号:中产井,3~10万方;棕色井号:低产井,1~3万方;黑色井

号:不出气井,小于1万方;绿色井号:气水同出井,产水30~100方/天;蓝色井号:高产水井号,产水大于100方/天。通过对目标区的不同产量的生产井的产量结果与裂缝预测结果的统计对比分析,发现裂缝预

测结果与高产井的吻合率达90%,中低产井的吻合率达90%,裂缝预测结果与测井生产结果吻合较好。

5 结论

1) 将储层中的裂缝划分为大尺度裂缝和小尺度裂缝,采用叠后地震属性进行大尺度裂缝预测及雕刻,利用叠前衰减各向异性属性进行小尺度裂缝描述,形成了基于叠前及叠后地震属性的综合裂缝发育体系预测技术。

2) 实际工区应用结果表明,利用叠后几何类地震属性可很好地刻画大尺度裂缝的分布规律,而利用叠前衰减属性可以很好地精细描述小尺度裂缝。裂缝预测结果与实际生产井数据吻合较好,同时与成像测井统计的裂缝发育方向相比较,预测得到的裂缝发育方向与成像测井描述的结果吻合,结果可靠。文中提出的多尺度裂缝预测方法及技术流程,可以为相应的非常规裂缝性储层预测和地球物理甜点预测提供很好的借鉴。

参 考 文 献

- [1] Rüger A and Tsvankin I. Using AVO for fracture detection: Analytic basis and practical solutions[J]. The Leading Edge, 1997, 16(10): 1429–1434.
- [2] Shen F, Sierra J, Burns D R, et al. Azimuthal offset-dependent attributes applied to fracture detection in a carbonate reservoir[J]. Geophysics, 2002, 67(2): 355–364.
- [3] Chichinina T, Sabinin V and Ronquillo-Jarillo G. QVOA analysis: P-wave attenuation anisotropy for fracture characterization[J]. Geophysics, 2006, 71(3): C37–48.
- [4] Tod S, Taylor B, Johnston R et al. Fracture prediction from wide-azimuth land seismic data in SE Algeria[J]. The Leading Edge, 2007, 26(9): 1154–1160.
- [5] Clark R A, Benson P M, Carter A J, et al. Anisotropic P-wave attenuation measured from a multi-azimuth surface seismic reflection survey[J]. Geophysical Prospecting, 2009, 57(4): 835–845.
- [6] Liu E, Zelewski G, Lu C, et al. Mitigation of overburden effects in fracture prediction using azimuthal AVO analysis: An example from a Middle East carbonate field[J]. The Leading Edge, 2011, 30(7): 750–756.
- [7] Behura J, Tsvankin I, Jenner E, et al. Estimation of interval velocity and attenuation anisotropy from reflection data at Coronation Field[J]. The Leading Edge, 2012, 31(5): 580–587.
- [8] 尹志恒, 李向阳, 魏建新, 等. 利用物理模型三维纵波数据分析HTI介质的方位各向异性[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3805–3812.
- [9] Yin Z, Li X, Wei J, et al. A physical modeling study on the 3D P-wave azimuthal anisotropy in HTI media[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3805–3812.
- [10] MacBeth C and Li X. AVD: an emerging new marine technology for reservoir characterization: acquisition and application[J]. Geophysics, 1999, 64(4): 1153–1159.
- [11] Chen S Q, Zeng L B, Huang P, et al. The application study on the multi-scales integrated prediction method to fractured reservoir description[J]. Applied Geophysics, 2016, 13(1): 80–92.
- [12] 张虹, 沈忠民. 超致密裂缝性储层地震预测方法研究——以川西新场气田须二气藏勘探为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版) 2008, 35(2): 149–157.
- [13] Zhang H, Shen Z. Study on seismic prediction methods for super tight fractured reservoirs——An example from the exploration of Member 2 of Xujiahe Formation reservoir in Xinchang gas field, Sichuan Basin[J]. China Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(2): 149–157.
- [14] 甘其刚, 许多. 川西深层致密碎屑岩气藏储层预测方法[J]. 石油物探, 2008, 47(6): 593–597+19.
- [15] Gan Q, Xu D. Prediction of gas reservoir in deeply buried tight elastic rock in west Sichuan[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(6): 593–597+19.
- [16] 吕文雅, 曾联波, 张俊辉, 等. 川中地区中下侏罗统致密油储层裂缝发育特征[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(2): 226–234.
- [17] Lv W, Zeng L, Zhang J, et al. Development characteristics of fractures in the middle-lower Jurassic tight oil reservoirs in central Sichuan Basin[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2016, 38(2): 226–234.
- [18] 孔选林, 唐建明, 徐天吉. 曲率属性在川西新场地区裂缝检测中的应用[J]. 石油物探, 2011, 50(05): 517–520+7.
- [19] Kong X, Tang J, Xu T. Application of seismic curvature attribute to fracture prediction in Xinchang area, western Sichuan depression[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(05): 517–520+7.

(编辑 董立)