

“断缝体”概念、地质模式及其在裂缝预测中的应用

——以四川盆地川西坳陷新场地区须家河组二段致密砂岩气藏为例

刘振峰,刘忠群,郭元岭,季玉新,李王鹏,林恬,陈天胜,金武军

(中国石化石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:裂缝是致密油气藏“甜点”形成的关键要素。由于裂缝尺度和地震资料信息承载尺度之间的巨大差异,以及对规模有效裂缝地质发育模式认识的不足,不同的裂缝预测方法在实践中的应用成效非常有限。在梳理近年来致密油气地质研究领域“断缝体”概念的基础上,对“断缝体”的内涵进行了归纳,建立了四川盆地新场地区须家河组二段致密砂岩气藏“断缝体”地质发育模式,以此模式为指导,分析了“断缝体”组构单元及背景围岩的地球物理响应特征,计算和筛选了基于梯度结构张量的混沌属性和最大似然属性进行“断缝体”的预测,形成了新场地区须二段致密砂岩气藏“断缝体”预测技术方案。在方案实施过程中,利用人工断层解释结果及电成像裂缝解释结果确定了相应的地震属性阈值,用最大似然属性(>0.15)刻画断层滑动面,用混沌属性的不同阈值范围刻画滑动破碎带(0.18~1.00)和诱导裂缝带(0.05~0.18)。通过该方案的实施,获取了新场地区须二段致密砂岩气藏主要目的层段的断层滑动面、滑动破碎带及诱导裂缝带数据体及相应的裂缝预测成果。从预测结果和电成像测井解释结果对照分析来看,由于预测过程考虑了“断缝体”的地质发育模式,预测结果的地质意义较为明晰,与实际情况吻合度较高,表明“断缝体”概念及其地质模式在地震裂缝预测实践中具有重要的应用价值。

关键词:地震预测;致密砂岩;断缝体;须家河组;新场地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Concept and geological model of fault-fracture reservoir and their application in seismic fracture prediction: A case study on the Xu 2 Member tight sandstone gas pool in Xinchang area, Western Sichuan Depression in Sichuan Basin

Liu Zhenfeng, Liu Zhongquan, Guo Yuanling, Ji Yuxin, Li Wangpeng, Lin Tian, Chen Tiansheng, Jin Wujun

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Fractures are one of the factors crucial for the formation of sweet spots in tight oil & gas reservoirs. Due to the great difference between the geological scale of fractures and the resolution of seismic data, and the vague understanding on development patterns of effective fractures of large scale, the effectiveness of seismic prediction methods of fractures is very limited. Based on the concept of fault-fracture reservoir put forward by some geological researchers in recent years, we summarize the connotation of fault-fracture reservoir, and establish a geological model showing their development in the tight sandstone gas pool of the second member of Xujiahe Formation (hereinafter referred to as Xu 2 Member) in Xinchang area. Furthermore, under the guide of the newly established geological model, we discuss the compositional units and geophysical response features of enclosing rocks, calculate and screen the gradient structure tensor (GST)-based chaotic attributes (chaos) and the maximum likelihood attributes for fault-fracture reservoir prediction, and put forward the technical scheme in predicting fault-fracture reservoirs in the Xu 2 Member tight sandstone pool in Xinchang area. In application of the scheme, artificial fault interpretation and electrical imaging logging are used to determine the threshold values of the GST-based chaotic attributes (chaos) and the maximum likelihood attributes. Besides, the threshold values of seismic attributes are calibrated according to the interpretation results of electrical imaging logging and artificial faults, the maximum likelihood attributes (greater than 0.15) are applied to describe the sliding surface of faults, various ranges

收稿日期:2020-10-23;修订日期:2021-07-06。

第一作者简介:刘振峰(1974—),男,研究员,石油物探。E-mail:liuzf.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002-005);中国石化科技部项目(P17020-4, P18089-2, P20056-3)。

of threshold values of chaotic attributes are applied to depict the sliding breaking zone (chaos attribute, 0.18–1.0) and induced fracture zone (chaos attribute, 0.05–0.18), and corresponding prediction results are obtained for major target sequences in the study area as guided by the geological model. The comparison of prediction results and electrical imaging log data shows the prediction is in high consistency with the actual situation, and its geological significance is obvious, indicating the concept of fault-fracture reservoir and its geological model are of application value in the practice of seismic fracture prediction.

Key words: seismic prediction, tight sandstone; fault-fracture reservoir, Xujiahe Formation; Xinchang area, Sichuan Basin

在致密油气藏勘探开发实践中,裂缝发育状况预测非常重要。规模发育的有效裂缝可以显著改善致密储层的孔、渗条件,使其成为油气聚集的有利场所,进而成为具有勘探开发价值的油气藏“甜点”^[1-3]。但是,由于裂缝地质尺度和地震资料信息承载尺度之间的巨大差异,地震裂缝预测长期以来一直是勘探开发实践工作中的难题。除了信息尺度的差异,裂缝预测不能得到有效解决的很大一部分原因在于相应的地质模型或模式不清晰,预测目标不明朗。储层裂缝预测不能局限于寻找单条的裂缝,而应该寻找有效裂缝相对聚集的地质单元。在实践中,一些研究人员逐渐认识到这个问题,提出了“断缝体”概念,将研究的关注点集中到具有勘探开发实践价值的规模有效裂缝体的预测,为地震预测人员指出了努力的方向。笔者以川西坳陷新场地区须家河组二段(须二段)致密砂岩气藏中的裂缝作为研究对象,对“断缝体”的概念、地质模式及其在预测中的实践价值进行了相关研究。

新场工区位于四川盆地川西坳陷中段绵竹-盐亭NEE向大型隆起带中部^[4-5],其陆相沉积基底为中三叠统海相灰岩。自晚三叠世后,该地区逐渐转变为陆相沉积,基底之上依次充填了上三叠统须一段海-陆过渡相地层,须二段、须三段、须四段、须五段陆相碎屑沉积及煤系地层,以及侏罗系-白垩系的陆相红层。须一段、须三段和须五段为新场地区须家河组气田的烃源岩层系,而须二段和须四段则为主要产层。须二段埋深为4 500~5 300 m,发育多个厚度较大的砂岩层,纵向上表现为厚层砂岩和薄层泥岩互层的特征。须二段储层孔隙度分布在0.44%~16.38%,平均值仅为3.92%,属于典型的致密砂岩储层。在此致密围岩背景下,裂缝发育与否成为制约优质储层形成的关键因素。根据岩心及电成像资料分析,研究区须二段裂缝类型较多,主要以低角度裂缝为主。但真正对天然气高产富集具有重要意义的是在燕山期和喜马拉雅期的断层活动,尤其是喜马拉雅期南北向逆断层活动中形成的中-高角度裂缝。在前期研究中,围绕裂缝预测开展了大量的工作^[6],但由于前述原因,取得的效果非常有限。近年

来,笔者在“断缝体”地质概念及模式的指导下,进行了相关探索,在实践中取得了较好的应用效果。

1 “断缝体”概念与地质模式

1.1 “断缝体”相关概念

断层是沿断裂面发生明显位移的地质构造现象^[7]。断层发育规模不等,小的不足1 m,大到数百、上千千米。断层破坏了岩层的连续性和完整性,在断层带上往往岩石破碎现象较为严重。裂缝是由构造变形作用或物理成岩作用在岩石中形成的没有明显位移的不连续面^[8]。裂缝的形成取决于岩石所受应力的类型以及岩石的性质,其丰度和分布与应力大小、岩石类型(脆性或韧性)、结构状态、深度(上覆压力)、岩性、岩层厚度、孔隙度、岩相和年代等因素有关^[9-10]。由断层和裂缝的地质概念及成因可以看出,与断层相关的构造裂缝与断层在成因机制及分布规律方面有着密切的共生关系,甚至可以说,断层是构造裂缝的宏观表现。尽管研究人员很早就注意到断层与裂缝之间的这种伴生关系,但二者之间的关系非常复杂,不同断层的伴生裂缝发育程度可能截然不同,即便是同一条断层,不同部位的裂缝发育程度也可能存在很大差异^[11-12]。

在石油工业中,致密砂岩油气储层中的裂缝对于油气勘探开发非常重要。随着相关研究的深入,研究者逐渐意识到,相较于单条裂缝的详细统计分析,裂缝的聚集单元及其与断层的组合配置关系的分析与研究在实践中具有更为重要的价值。一些研究者将与褶皱、断层有关的裂缝和岩石孔隙结合所形成的不规则分布的、具有一定规模的、孔-渗性能较好的地质体或地质单元视为一种新的储集体类型,称之为“断缝体”^[13]。也有研究者将致密围岩背景下巨厚砂岩层内部由后期构造运动改造所形成的局部断层、有效裂缝发育的部位称为“断缝体”,认为致密砂岩油气勘探的首要问题是寻找这些“断缝体”目标^[14]。

尽管目前有关“断缝体”公开发表的文献比较少,但近几年国内致密砂岩油气田现场地质研究工作中对

这一概念的讨论较为普遍,其概念内涵主要集中在3个方面:一是“断缝体”发育的背景为致密岩层;二是在“断缝体”内部,断层及与断层有关的中高角度裂缝(倾角 $>30^{\circ}$)比较发育;三是“断缝体”内部孔-渗性能较好,是致密砂岩储层油气聚集的有利部位。

“断缝体”概念的提出,以及其内涵方面达成的一些共识,将致密砂岩储层裂缝的研究引入一个新的阶段,使得研究人员不再将关注的重点集中在单条裂缝的产状描述上,而是更多地集中在裂缝的聚集程度及其对致密岩层储-渗性能的改善效果。同时,关注重点的改变,使得地震裂缝预测工作更具有可操作性——研究目标尺度规模的放大,使得在频宽有限的地震数据中寻找相应较大尺度的响应异常,并进而采取相应的技术手段对其进行预测成为可能。

1.2 新场地区须二段致密砂岩“断缝体”地质模式

新场地区须二段“断缝体”地质模式研究是在前人有关断裂带内部结构的相关研究成果基础上开展的。在野外露头中,断层多以断裂带的形式出现,其内部结构较为复杂。国外研究者通常将其划分为断层核部和外围破碎带^[7,15-17],而中国的研究者通常将其划分为破碎带和诱导裂缝带^[7,18-20]。陈伟等人将断裂带划分为2个构成单元,即核部的滑动破碎带和核部外侧的诱导裂缝带^[7]。这种划分方式在露头观测和地震预测中比较简单,可操作性强。在新场地区须二段致密砂岩“断缝

体”地质模式分析中,采用了这一简便的术语体系。

借鉴断裂带内部结构方面的已有成果,通过研究所建立的新场地区须二段致密砂岩“断缝体”地质模式如图1所示。“断缝体”包含3个组构单元,即断层滑动面、滑动破碎带和诱导裂缝带。川西坳陷新场地区须二段应力环境复杂,岩层中的断裂由一条甚至多条逆断层滑动面组合而成。滑动破碎带紧邻断层滑动面,是断裂带的中心,也是断裂系统的主要错动和破裂部位。在断裂具有多条断层滑动面的情况下,滑动破碎带往往为相邻的两条断层滑动面所挟持,是断裂系统形成过程中的应力聚集部位。诱导裂缝带在滑动破碎带外侧,宽度变化较大,为几米至几百米不等。根据新场地区须二段已钻井统计结果,滑动破碎带和诱导裂缝带所组成的裂缝发育条带在断层滑动面两侧约400 m范围内。其中200 m范围之内,特别是逆断层的上盘,中高角度裂缝尤为发育,也是目前高产井的主要分布部位。当两个倾向相反的、以逆断层为特征的断裂带相距较近时,其上盘所形成的地垒是中高角度裂缝集中发育的部位(图1)。诱导裂缝带内的岩石没有完全破碎,在发生一些局部破裂的同时,往往伴有多期次裂缝发育,并保留了岩石破碎之前的基本特征。裂缝发育带内,与断裂相关的裂缝相互切割,而且其分布受到地下应力变化及岩石自身力学性质非均质性的影响,相互共轭裂缝之间的较小夹角的平分线多与主断面平行或近于平行。

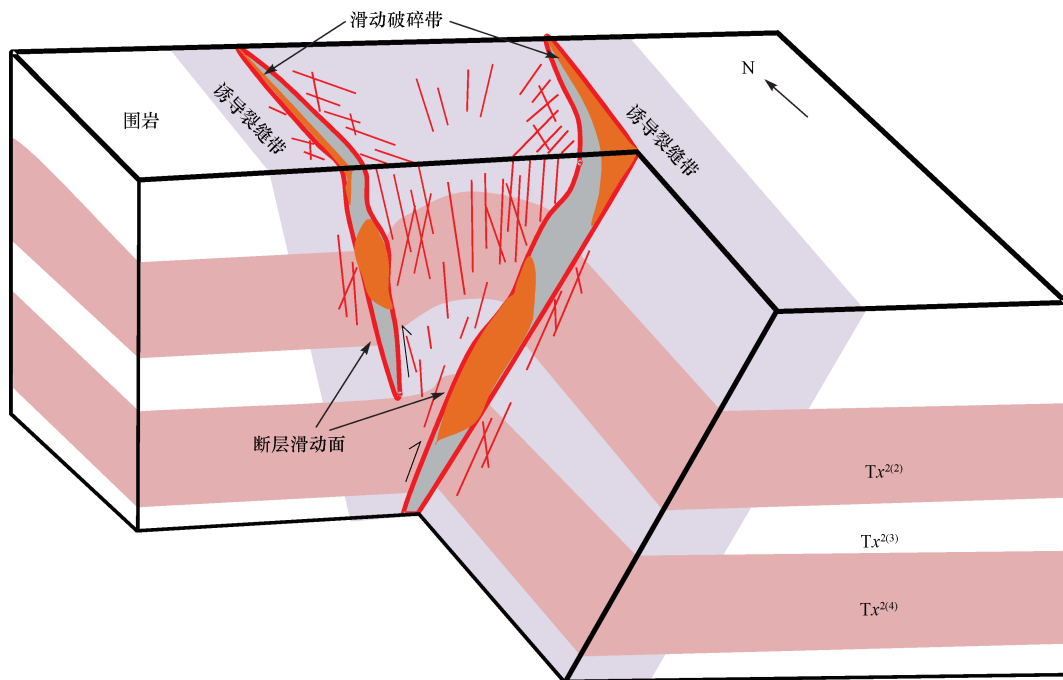


图1 新场地区须二段“断缝体”地质发育模式

Fig.1 Geological model of the fault-fracture reservoir in the Xu 2 Member in Xinchang area

2 “断缝体”的地球物理响应特征

2.1 裂缝的测井响应特征

电成像测井通过阵列纽扣电极对井壁进行扫描以获取电导率图像信息,是识别裂缝最直观和最有效的一种技术手段。当地层中发育裂缝时,泥浆滤液沿裂缝渗透到地层中,使得裂缝发育部位的电阻率明显降低,电成像呈现光滑的暗色条纹。“断缝体”中的滑动破碎带电成像响应特征主要表现为不同倾角的裂缝呈暗色正弦条纹相互交叉,共同切割基质亮色区域,局部裂缝密度增大导致电成像图像呈现暗黑色(图2a中的深度4 735 m处,裂缝密度可达10条/m以上)。诱导裂缝带相比滑动破碎带而言,离断层距离相对较远,通常表现为高角度缝或直立缝的发育特征,裂缝密度通常在1~10条/m,在电成像上往往表现为近乎平行的光滑暗色条纹分布特征,由于裂缝倾角较大,正弦形态相对较陡(图2b)。基岩中裂缝不发育,以基质孔隙发育为主,电成像上呈现块状分布特征,由于岩性及物性差异,电成像图像亮度会有相应差异,但无暗色细条纹及正弦暗条纹的裂缝发育特征(图2c)。在常规测井响应上,滑动破碎带表现为中-低伽马,声波时差显著增大,电阻率呈锯齿状且明显降低,双侧向电阻率呈正差异;诱导裂缝带通常发育在中等伽马的中-粗砂岩中,声波时差有一定的增大趋势,电阻率有一定幅度的降低,由于高角度缝存在,双侧向电阻率曲线呈现正差异;基岩段在常规测井曲线上表现为声波变化小,电阻率曲线形态变化平缓,无锯齿状变化等特征。

2.2 地震响应特征及地震属性异常

在地震反射剖面上,“断缝体”中的断裂现象会引

起地震反射同相轴表现出明显的不连续,不连续部位也会出现弱相干、较高的混沌属性、较高的最大似然属性,以及倾角和曲率等属性的异常现象。这些属性异常为“断缝体”的预测提供了可能性。下面对本次研究中使用较多的混沌属性和最大似然属性做以简单介绍。

研究中的混沌属性(熵)计算采用的是基于梯度结构张量(GST, gradient structure tensor)的计算方法^[21-24]。梯度结构张量 M_ρ 定义为

$$M_\rho(\nabla U_\sigma) = G_\rho^* \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial U_\sigma}{\partial x}\right)^2 & \frac{\partial U_\sigma}{\partial x} \frac{\partial U_\sigma}{\partial y} & \frac{\partial U_\sigma}{\partial x} \frac{\partial U_\sigma}{\partial z} \\ \frac{\partial U_\sigma}{\partial x} \frac{\partial U_\sigma}{\partial y} & \left(\frac{\partial U_\sigma}{\partial y}\right)^2 & \frac{\partial U_\sigma}{\partial y} \frac{\partial U_\sigma}{\partial z} \\ \frac{\partial U_\sigma}{\partial x} \frac{\partial U_\sigma}{\partial z} & \frac{\partial U_\sigma}{\partial y} \frac{\partial U_\sigma}{\partial z} & \left(\frac{\partial U_\sigma}{\partial z}\right)^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} G_\rho(u) = \frac{1}{(2\pi\rho^2)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{u^2}{2\rho^2}\right) \\ U_\sigma = G_\rho U \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为高斯核 G_ρ 的标准差,无量纲; U 为地震数据,无量纲; U_σ 为平滑后的地震数据,无量纲; σ 为平滑尺度参数,无量纲,视噪音情况及研究对象的尺度而调整。标准差 ρ 的选择取决于研究目标的尺度。对梯度结构张量 M_ρ 进行矩阵特征分解:

$$M_\rho(\nabla U_\sigma) = (v_1 \ v_2 \ v_3) \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$ 为 M_ρ 的3个特征值(无量纲); v_1, v_2, v_3 为对应的特征向量(无量纲), v_1 为局部邻域内对比度最大的方向(梯度方向), v_2 和 v_3 构成一个垂

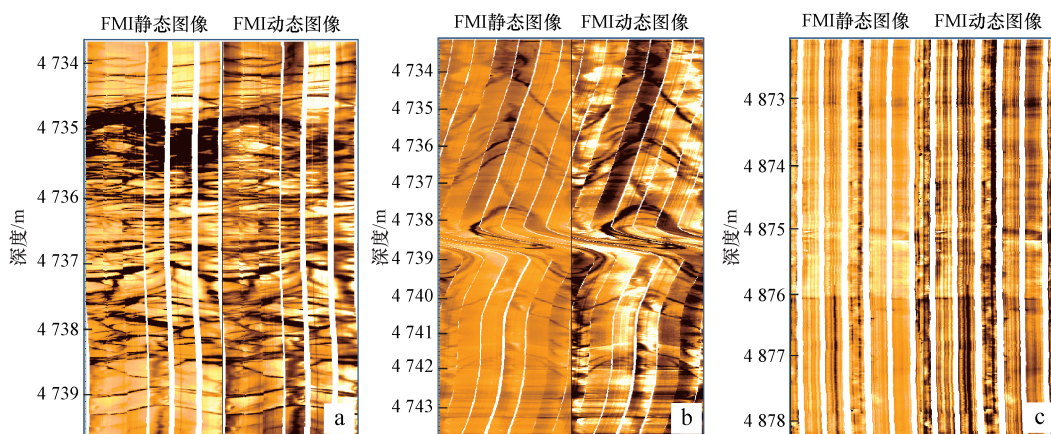


图2 新场地区须二段滑动破碎带(a)、诱导裂缝带(b)和基岩(c)电成像测井

Fig. 2 Electrical imaging log data of sliding breaking zone (a), induced fracture zone (b) and bedrock (c) of the Xu 2 Member in Xinchang area

直于 v_1 的局部平面。据此计算的混沌属性(熵, *Chaos*, 无量纲)如下:

$$Chaos = \frac{2\lambda_2 - (\lambda_1 + \lambda_3)}{\lambda_1 + \lambda_3} \quad (4)$$

基于 GST 的混沌属性(熵)可以较为有效地反映局部数据结构的规则性^[24]。

研究中运用较多的另一个属性是最大似然属性^[25]。在计算最大似然属性之前首先计算相似性属性(*Semblance*, 无量纲):

$$Semblance = \frac{[(g)_s]_f}{[(g^2)_s]_f} \quad (5)$$

式中: g 为地震数据, 无量纲; $(\cdot)_s$ 表示对括号内的地震数据进行构造导向滤波; $[\cdot]_f$ 表示参考断裂产状再一次滤波。在相似性计算基础上, 最大似然属性(*Likelihood*, 无量纲)计算如下:

$$Likelihood = 1 - Semblance^8 \quad (6)$$

最大似然属性对相邻数据点的相似程度有一个放大效应, 能显著突出断层特征。依据该数学表达, 最大似然属性度量的是计算样点处断裂发育的可能性^[27]。

图3中的 X601 井毗邻断裂, 为2个逆断层所挟持, 其中的 $Tx^{2(2)}$ 和 $Tx^{2(3)}$ 砂组的中高角度裂缝较为发育, 在属性异常剖面上, 出现弱相干异常、较高的混沌属性(熵)异常和较高的最大似然属性异常等特征。在图3a地震剖面上可以明显地观察到 X601 井 $Tx^{2(2)}$ 和 $Tx^{2(3)}$ 砂组的中高角度裂缝发育部位对应的2个地震反射特征: 一是毗邻左侧的断层滑动面; 二是由于裂缝发育, 裂缝发育段同下伏地层之间阻抗差异增大, 导致 X601 井的 $Tx^{2(2)}$ 和 $Tx^{2(3)}$ 砂组底部出现弱反射背景

下较强反射的特征。在图3b相干属性剖面上, X601 井的 $Tx^{2(2)}$ 和 $Tx^{2(3)}$ 砂组处于左侧断层滑动面及滑动破碎带所造成的弱相干异常带上。在图3c熵属性剖面上, X601 井的 $Tx^{2(2)}$ 和 $Tx^{2(3)}$ 砂组处于左侧断层滑动面、滑动破碎带及诱导裂缝带所造成的较高的熵属性异常带上, $Tx^{2(3)}$ 砂组底界以下的熵属性异常较弱, 与之上的较高的熵属性异常区域反差非常明显。图3d为最大似然属性异常剖面, 最大似然属性对可能的断层滑动面较为敏感, 从图上可以看到, X601 井两侧的逆断层滑动面具有较为明显的响应异常。尽管相应的属性异常能够进一步放大和凸显研究区目的层段逆断层及其造成的断层滑动面、滑动破碎带, 以及诱导裂缝带的一些响应异常, 为“断缝体”的刻画与描述提供研究基础, 但是也可以看到, 相应的剖面所体现的部分异常缺少地质规律, 很难进行相应的解释, 需要结合钻、测井信息进行刻度, 通过确定相应阈值去伪存真, 保留并进一步凸显与“断缝体”有关的异常。

3 “断缝体”预测技术方案及应用效果

3.1 “断缝体”预测技术方案

“断缝体”地质发育模式中的结构单元包括断层滑动面、滑动破碎带以及诱导裂缝带。如前所述, 在电成像测井图像上, “断缝体”内部不同结构单元的响应特征呈现出一定的差异。依据电成像所揭示的裂缝测井响应特征及裂缝解释成果, 以及地震反射剖面上“断缝体”可能的地震反射特征和遴选的地震属性异常, 可

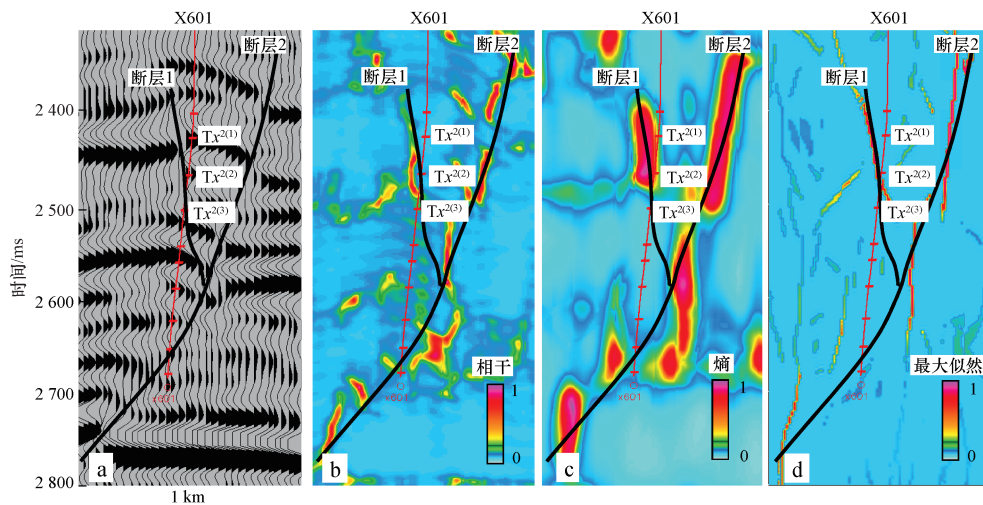


图3 新场地区须二段“断缝体”发育部位的地震反射特征及地震属性异常

Fig.3 Seismic reflection characteristics and seismic attribute anomalies of fault-fracture reservoirs developed in the Xu 2 Member in Xinchang area

a. 地震剖面, b. 相干属性, c. 熵属性, d. 最大似然属性

以进一步利用断层人工解释样本以及电成像测井裂缝解释结果去刻度相应的地震属性异常,确定“断缝体”中断层滑动面、滑动破碎带以及诱导裂缝带的敏感属性及相应阈值,进而获取相应的断层滑动面数据体、裂缝发育带数据体及相应的平面成果图件。研究中所形成的“断缝体”预测技术方案如图4所示。

依据此技术流程,可以实现对“断缝体”中断层滑动面、滑动破碎带和诱导裂缝带的自动解释,在构造较为复杂的区域,可有效地减少断层人工解释带来的巨大工作量,提升工作效率,同时较为客观地刻画与断裂相关的“断缝体”的空间展布情况。相较于常用的相干分析等纯粹的地震几何属性分析方法,该技术流程由于参照了“断缝体”地质发育模式,同时经过了电成像测井解释结果的刻度,地质意义较为明晰,能够减少常规地震几何属性分析等无井约束方法的不确定性。

3.2 新场地区须二段应用效果

在新场地区须二段“断缝体”地质发育模型指导下,致密砂岩“断缝体”预测使用了前述技术流程。研究中依据区内人工断层解释结果和15口具有电成像资料的钻井对相关地震属性进行了刻度。断层滑动面使用的是最大似然属性(值域范围在0~1),通过对最大似然属性数据体沿层切片异常与人工断层解释成果的对比分析,将反映断层滑动面的最大似然属性阈值确定为0.15,即大于0.15的最大似然属性异常可以反映断层滑动面的分布。滑动破碎带使用的是混沌属性(熵,值域范围在0~1),在混沌属性剖面上,沿断层滑动面两侧会出现强弱不一的与滑动破碎带有关的混沌异常条带,通过横切断层的104条不同级次的混沌属性剖面统计分析,最终确定0.18~1的混沌属性异常值反映滑动破碎带。诱导裂缝带利用的是另一个阈值区间的混沌属性(熵),通过电成像测井中-高角度裂缝解释结果与混沌属性异常值的统计分析,值域范围在0.05~0.18的异常能够较好地反映中高角度裂缝的发育状况。图5为相关属性叠合显示的“断缝体”预测剖面,图中的井曲线为电成像解释的裂缝倾角曲线。从图上可以看到,最大似然属性(黑线)、混沌属性(0.18~1,红-紫色异常)、混沌属性(0.05~0.18,蓝-绿色异常)分别较为清晰地显示了断层滑动面、滑动破碎带,以及外侧诱导裂缝带的分布状况。在“断缝体”的几个组构单元中,滑动破碎带、诱导裂缝带中的中高角度裂缝比较发育,与电成像解释结果较为一致。

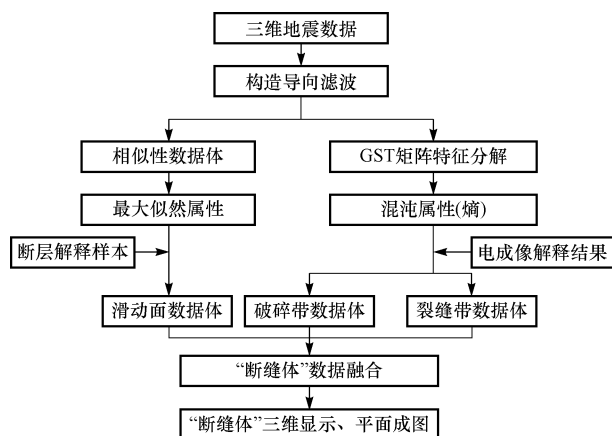


图4 新场地区须二段致密砂岩“断缝体”预测技术方案
Fig.4 Technical scheme in seismic prediction of fault-fracture reservoirs in the Xu 2 Member in Xinchang area

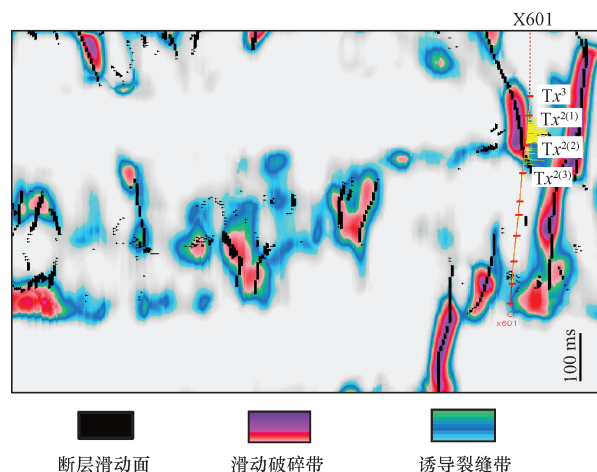


图5 新场地区须二段致密砂岩“断缝体”不同结构单元预测剖面

Fig.5 Seismic prediction section of corresponding components of fault-fracture reservoirs in the Xu 2 Member in Xinchang area

依据得到的三维“断缝体”预测结果,可以提取所关注层段的断层滑动面、滑动破碎带及诱导裂缝带的平面分布图件。图6为新场工区须二段主产层 $Tx^{2(2)}$ 的断层滑动面和裂缝发育带(滑动破碎带和诱导裂缝带)的平面展布情况,图中颜色由浅到深代表裂缝的发育程度,黑线为断层。区内有电成像资料的井共计15口, $Tx^{2(2)}$ 砂组中-高角度裂缝(裂缝倾角大于 30°)比较发育的井有L150(17条)、X601(95条)、X201(14条)、X501(8条)、X3(10条)和XC8(13条)等6口井,中-高角度裂缝欠发育及不发育的井有X856(1条)、X202(3条)、X209(1条)、X5(1条)、X10(2条)、X11(4条)、X101(3条)、X203(无中-高角度裂缝)和XC6(无中-高角度裂缝)等9口井。由图6可见,15口井中,中-高角度裂缝与异常不吻合的井有L150,X501和XC8等3口井,与预测情况吻合的钻井占比80%。

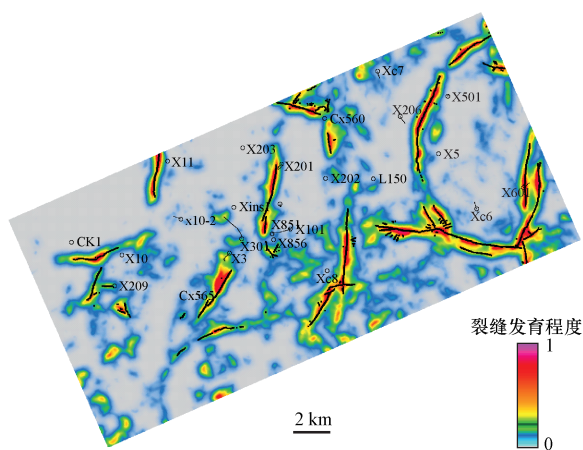


图6 新场地区 $Tx^{2(2)}$ 砂组断层和裂缝发育带(含滑动破碎带和诱导裂缝带)平面展布情况

Fig. 6 Distribution of well-developed faults and fracture zones (including sliding breaking zones and induced fracture zones) in $Tx^{2(2)}$ sand group in Xinchang area

4 结论

1) “断缝体”是指致密岩层中的断层及裂缝较为发育、孔-渗性能较好、有望成为致密油气藏甜点的地质单元。“断缝体”是裂缝较为发育的岩石集合体,相较于单条裂缝,其研究尺度的放大,有利于在频宽有限的地震数据中寻找相应的地震属性异常,对致密油气藏勘探开发实践中所关心的规模有效裂缝的预测具有重要意义。

2) 新场地区须二段致密砂岩“断缝体”地质发育模式具有3个组构单元:断层滑动面、滑动破碎带和滑动破碎带外侧的诱导裂缝带。滑动破碎带和诱导裂缝带是中高角度构造裂缝(倾角 $> 30^\circ$) 较为发育部位。由滑动破碎带和诱导裂缝带组成的裂缝发育带分布在断层滑动面两侧约400 m范围内,其中200 m范围之内,特别是逆断层的上盘是目前高产井的主要分布部位。

3) 基于GST的混沌属性(熵)和最大似然属性可以作为“断缝体”预测的敏感地震属性。混沌属性可以较为有效地反映局部数据结构的非规则性,最大似然属性对相邻数据点的相似程度有一个放大效应,能显著突出断层特征。在局部手工断层解释结果及电成像测井裂缝解释成果的刻度下,可以用最大似然属性刻画断层滑动面,用混沌属性的不同阈值范围刻画滑动破碎带和诱导裂缝带。

4) 新场须二段“断缝体”预测技术方案应用实践表明,依据人工断层解释样本及电成像裂缝解释成果

刻度遴选的敏感地震属性,可以获取相应的断层滑动面、滑动破碎带及诱导裂缝带数据体和平面预测结果。由于预测过程考虑了“断缝体”的地质发育模式,预测结果的地质意义较为明晰,与实际情况吻合度较高,表明“断缝体”概念及其地质模式在裂缝预测实践中具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] 毛哲,曾联波,刘国平,等. 准噶尔盆地南缘侏罗系深层致密砂岩储层裂缝及其有效性[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1212-1221.
Mao Zhe, Zeng Lianbo, Liu Guoping, et al. Characterization and effectiveness of natural fractures in deep tight sandstones at the south margin of the Junggar Basin, northwestern China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1212-1221.
- [2] 李蒙,商晓飞,赵华伟,等. 基于likelihood地震属性的致密气藏断裂预测——以四川盆地川西坳陷新场地区须二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1299-1309.
Li Meng, Shang Xiaofei, Zhao Huawei, et al. Prediction of fractures in tight gas reservoirs based on likelihood attribute—A case study of the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1299-1309.
- [3] 蔡勋育,邱桂强,孙冬胜,等. 中国中西部大型盆地致密砂岩油气“甜点”类型与特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 684-695.
Cai Xunyu, Qiu Guiqiang, Sun Dongsheng, et al. Types and characteristics of tight sandstone sweet spots in large basins of central-western China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 684-695.
- [4] 赵艳,吴胜和,徐樟有,等. 川西新场气田上三叠统须家河组二段致密砂岩优质储层控制因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010, 34(4): 1-6.
Zhao Yan, Wu Shenghe, Xu Zhangyou, et al. Control factors of compacted high-quality sand stone Reservoirs of member 2 of Xujiahe formation, upper Triassic in Xinchang gas field of western Sichuan depression [J]. Journal of China University of Petroleum : Edition of Natural Sciences, 2010, 34(4): 1-6.
- [5] 刘四兵,沈忠民,吕正祥,等. 川西新场气田上三叠统须二、须四段相对优质储层成因差异性分析[J]. 吉林大学学报:自然科学版, 2015, 45(4): 993-1001.
Liu Sibing, Shen Zhongmin, Lv Zhengxiang, et al. Contributing factor divergence analysis of relative high quality reservoir of upper Triassic in the 2nd and 4th member of Xujiahe gas field in West Sichuan[J]. Journal of Jilin University : Earth Science Edition, 2015, 45(4): 993-1001.
- [6] 吴朝容. 致密砂岩气藏裂缝性储层预测方法——以川西坳陷新场气田须二段为例[D]. 成都:成都理工大学, 2004.
Wu Chaorong. The prediction of fractured gas reservoirs of tight clastic rock-take the 2nd mbr of Xujiahe Formation of Xinchang gas field as case[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004.
- [7] 陈伟,吴智平,侯峰,等. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关

- 系[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 774–780.
- Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 774–780.
- [8] 穆龙新, 赵国良, 田中元, 等. 储层裂缝预测研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 1–2.
- Mu Longxin, Zhao Guoliang, Tian Zhongyuan, et al. The research of reservoir fracture [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 1–2.
- [9] 吴胜和, 熊琦华. 油气储层地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 129–154.
- Wu Shenghe, Xiong Qihua. *Petroleum reservoir geology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 129–154.
- [10] 刘振峰, 曲寿利, 孙建国, 等. 地震裂缝预测技术研究[J]. 石油物探, 2012, 51(2): 191–198.
- Liu Zhenfeng, Qu Shouli, Sun Jianguo, et al. Progress of seismic fracture characterization technology [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2012, 51(2): 191–198.
- [11] 李小刚, 徐国强, 戚志林, 等. 断层相关裂缝定性识别: 原理及应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(6): 1779–1788.
- Li Xiaogang, Xu Guoqiang, Qi Zhilin, et al. Qualitative identification of fault-related fracture: Principle and its application[J]. *Journal of Jilin University (earth science edition)*, 2013, 43(6): 1779–1788.
- [12] 李小刚, 徐国强, 韩剑发, 等. 断层裂缝定量描述技术在塔中X井区良里塔格组裂缝研究中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(2): 344–352.
- Li Xiaogang, Xu Guoqiang, Han Jianfa, et al. Application of a new method for quantitative calculation of fault-related fracture: A case study from Lianglitage formation in Tazhong X well area, Tarim Basin, China [J]. *Journal of Jilin University (earth science edition)*, 2012, 42(2): 344–352.
- [13] 王威, 凡睿. 四川盆地北部须家河组“断缝体”气藏特征及勘探意义[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2019, 46(5): 541–548.
- Wang Wei, Fan Rui. Characteristics of Xujiahe Formation fault-fracture reservoirs in the northern Sichuan Basin and its exploration significance[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2019, 46(5): 541–548.
- [14] 刘忠群, 徐士林, 刘君龙, 等. 四川盆地川西坳陷深层致密砂岩气藏富集规律[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 31–40.
- Liu Zhongqun, Xu Shilin, Liu Junlong, et al. Enrichment laws of deep tight sandstone gas reservoirs in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 31–40.
- [15] Micarelli L, Benedicto A, Wibberley C A J. Structural evaluation and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks [J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(7): 1214–1227.
- [16] Brogi A. Fault zone architecture and permeability features in siliceous sedimentary rocks: Insights from the Rapolano geothermal area (Northern Apennines, Italy) [J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30(2): 237–256.
- [17] Evans J P, Forster C B, Goddard J V. Permeability of fault-related rocks, and implication for hydraulic structure of fault zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19(11): 1393–1404.
- [18] 付晓飞, 方德庆, 吕延防, 等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2005, 30(3): 328–336.
- Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lv Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(3): 328–336.
- [19] 高君, 吕延防, 田庆丰. 断裂带内部结构与油气运移及封闭[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(2): 4–7.
- Gao Jun, Lv Yanfang, Tian Qingfeng. Analysis of hydrocarbon migration through the fault based on interior structure of fault zone[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2007, 31(2): 4–7.
- [20] 张西娟, 曾庆利, 马寅生. 断裂带中的流体活动及其作用[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3): 274–279.
- Zhang Xijuan, Zeng Qingli, Ma Yinsheng. Fluid involvement inactive fault zone [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2006, 28(3): 274–279.
- [21] Randen T, Monsen E, Signer C, et al. Three-dimensional texture attributes for seismic data analysis [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2000: 668–671.
- [22] Luo Yi, Wang Yuchun Eugene, Nasher M, et al. Computation of dips and azimuths with weighted structural tensor approach [J]. *Geophysics*, 2006, 71(5): 119–121.
- [23] Wang Yuchun Eugene, Luo Yi, Alfaraj M. Inverse-vector approach for smoothing dips and azimuths [J]. *Geophysics*, 2008, 73(6): 9–14.
- [24] 王清振, 张金淼, 姜秀娣, 等. 利用梯度结构张量检测盐丘与断层[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(4): 826–831.
- Wang Qingzhen, Zhang Jinmiao, Jiang Xiudi, et al. Salt dome and fault detection based on the gradient-structure tensor [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(4): 826–831.
- [25] Hale D. Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images [J]. *Geophysics*, 2013, 78(2): 33–43.
- [26] 马德波, 赵一民, 张银涛, 等. 最大似然属性在断裂识别中的应用——以塔里木盆地哈拉哈塘地区热瓦普区块奥陶系走滑断裂的识别为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 817–825.
- Ma Debo, Zhao Yimin, Zhang Yintao, et al. Application of maximum likelihood attribute to fault identification: A case study of Rewapu block in Halahatang area, Tarim Basin, NW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(6): 817–825.
- [27] Dong Shaoqun, Zeng Lianbo, Lyu Wenya, et al. Fracture identification and evaluation using conventional logs in tight sandstones: A case study in the Ordos Basin, China [J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(3–4): 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.06.003>.

(编辑 张玉银)