

泥页岩应力场约束的叠后地震裂缝预测技术

——以焦石坝区块五峰组-龙马溪组一段为例

王明飞, 苏克露, 肖伟, 陈超, 刘晓晶, 王静波

(中国石化勘探分公司, 四川成都 610000)

摘要:针对泥页岩整体“小尺度,低角度”裂缝地震预测难度较大的特点,以涪陵页岩气田焦石坝区块五峰组-龙马溪组一段页岩气储层为例,探索了应力场约束的叠后地震裂缝预测技术方法。首先,进行叠后地震数据增强裂缝响应效果的针对性处理,以提高断裂及裂缝识别能力,在此基础上开展表征裂缝发育程度的高精度地震体曲率追踪;其次,模拟现今应力场分布特征,分析裂缝发育方向及应变强度;最后,将体曲率及应力场预测成果归一化,建立归一化应力场与体曲率相乘的裂缝预测模型,从而较有效地预测泥页岩裂缝发育的方向及强度。综合预测结果表明,焦石坝箱状背斜主体五峰组-龙马溪组一段发育北东向为主的中-弱程度裂缝,构造翼部及断裂(褶)带局部发育北东及北西向中-强程度规模裂缝,预测结果符合地质规律。井-震标定结果显示,裂缝综合预测成果与钻井工程裂缝性漏失段具有一一对应关系,进一步验证了该方法的有效性和实用性。该方法对页岩气储层综合评价及钻井工程具有一定的指导意义。

关键词:应力场约束;叠后地震;裂缝预测;泥页岩;龙马溪组;焦石坝区块;涪陵页岩气田

中图分类号:P631

文献标识码:A

Post-stack seismic fracture prediction under constraint of shale stress field:

A case from the shale reservoir in Wufeng Fm-1st member of Longmaxi Fm in Jiaoshiba area

Wang Mingfei, Su Kelu, Xiao Wei, Chen Chao, Liu Xiaojing, Wang Jingbo

(Research Institute of Exploration, SINOPEC Exploration Company, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: Abstract: Seismic prediction of fractures with small scale and low dip in shale is difficult. Taking the shale gas reservoir of the Wufeng Fm-1st member of Longmaxi Fm in the Jiaoshiba area of Fuling shale gas field as an example, we explored post-stack seismic fracture prediction method under constraint of stress field. Firstly, the post-stack seismic data were processed to enhance the structure response, so as to improve the ability of identifying faults and fractures, then the high precision seismic curvature volume was tracked to describe the level of fracture development. Secondly, the distribution characteristics of present stress field was simulated to reveal the orientation and strain strength of fractures. Finally, the seismic curvature and stress field attributes were normalized to build a fracture prediction model for accurate identification of orientation and intensity of fracture in the shale reservoirs. The results show that NE-trending fractures with moderate to weak intensity dominate the shale reservoir in the Wufeng Fm-1st member of Longmaxi Fm in the major part of the Jiaoshiba box anticline structure and NE-trending and NW-trending fractures with moderate to strong intensity occur locally on the flanks of structure and fault (fold) belt. The prediction results are in accordance with the geologic understandings. Well-to-seismic calibration reveals that the fracture prediction results correlate well with the fracture leakage zones identified during drilling, further validating the effectiveness and applicability of the method. It can be used to guide the comprehensive evaluation of shale gas reservoirs and drilling engineering.

Key words: stress field constraint, post-stack seismic, fracture prediction, shale, Longmaxi Formation, Jiaoshiba area, Fuling shale gas field

收稿日期:2016-09-29;修订日期:2017-11-28。

第一作者简介:王明飞(1986—),男,硕士、工程师,地球物理勘探。E-mail:mingfei.w@foxmail.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技部基础研究项目(P15074);国家科技重大专项(2017ZX05036005)。

相对于常规油气藏,页岩气的成因类型、富集机理及生产机制^[1-3]等都具有一定的特殊性,页岩气产量高低与泥页岩内部天然微裂缝发育程度相关。在页岩气勘探突破之前,对裂缝的研究主要集中在常规油气储层,在裂缝发育的地质认识基础上,发展形成了基于岩心、成像测井和叠前叠后地震资料的裂缝综合预测技术方法,并在常规储层勘探中取得了良好的应用效果^[4-9]。近年来,在碳酸盐岩裂缝综合预测中,探索了应力场模拟约束下的裂缝综合预测方法,该方法将应力场预测结果作为宏观约束条件,定性约束叠前及叠后裂缝预测成果,分别优选单组及多组裂缝发育区^[10]。在非常规泥页岩裂缝研究方面,泥页岩裂缝识别方法及表征、成因类型及分布规律、基本参数及其物性参数研究、储集性能评价等方面已经取得了重要成果,推动了页岩气储层富集规律、精细评价、工程设计等研究^[11-20]。在泥页岩裂缝平面预测方面,主要应用叠后地震属性、聚类分析等方法开展了泥页岩裂缝预测研究^[21-22],在泥页岩储层裂缝发育方向、强度及平面分布规律上尚未开展较全面深入的研究。

本文以涪陵页岩气田焦石坝区块五峰组-龙马溪组一段为例,在页岩气储层裂缝成因类型认识的基础上,基于焦石坝叠后地震资料,开展研究区地震体曲率及应力场研究,将归一化应力场及体曲率相乘,探索基于应力场约束的泥页岩叠后裂缝预测技术,开展泥页岩裂缝方向及强度的定量-半定量综合预测。

1 焦石坝区块泥页岩裂缝类型

焦石坝区块是石柱复向斜、方斗山复背斜和万县复向斜等多个构造单元的结合部。受印支、燕山和喜马拉雅三期构造运动控制,发育受北东向和南北向两组断裂体系控制的北东向展布的菱形断背斜^[16]。背斜顶部较宽缓,呈似箱装特征。区内主要发育两期断裂,早期呈北东向,晚期呈北西向展布,背斜主体构造稳定,断裂不发育(图1)。构造应力控制了断裂的发育程度及裂缝发育的主要方位。成像测井统计结果表明,区内页岩气储层五峰组-龙马溪组一段内主要发育北西向和北东向裂缝,裂缝发育的主特征方位为北东向。发育构造成因的中-高角度的构造缝、低角度的层面滑移缝,沉积成因的低角度层间页理缝和有机质演化异常压力缝2类4种裂缝^[23-24](图2b—e)。页岩裂缝与常规储层裂缝相比具有明显的差异性。以四川盆地元坝地区须家河组三段常规砂岩储层裂缝发育特征为例,常规储层主要以发育高角度缝为主,延伸

范围大,裂缝宽度多在毫米-厘米级(图2a);泥页岩储层裂缝以低角度滑移缝及层理缝发育为主,整体具有“小尺度,低角度”的特征,断层伴生裂缝发育于断褶带局部构造部位。在龙马溪组一段有机碳含量较高的炭质泥页岩中,除大量低角度滑移缝及层理缝发育外,有机质演化异常压力缝普遍发育,通过氩离子抛光扫描电镜,发现这种裂缝的缝面一般不规则,微裂缝宽度一般为 $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$;另外发育少量高角度缝,角度 $70^\circ \sim 90^\circ$,延伸长度一般为 $30 \sim 130 \text{ mm}$,总缝密度为 $0.5 \sim 3 \text{ 条/m}$,缝宽为 $0.1 \sim 2 \text{ mm}$,呈充填-半充填状态。五峰组网状缝发育(JY1井),但多被方解石充填或半充填。龙马溪组局部断褶构造页岩气层发育开启的高角度断层伴生缝(JY5井,乌江断褶带)(图2e)。

2 地震裂缝预测

根据裂缝的规模及当前的测量和预测手段,一般可以将裂缝分为两类。一是大尺度裂缝,延伸距离长,可达几十米到几千米,断距大,地震剖面可以直接解释及识别;二是中-小尺度裂缝,延伸距离小,可达几厘米到几十米,断距小,岩心和成像测井显示为小尺度裂缝。根据裂缝性储层地震响应特征分析可知,当地震同相轴呈现复波、扭曲、杂乱以及不连续等反射特征时,地层中可能发育裂缝^[25]。因此,反映叠后地震同相轴横向变化的地震属性,如体曲率、蚂蚁体和方差体等地震体属性可以开展裂缝定性预测。针对泥页岩裂缝自身特征,借鉴常规油气勘探裂缝预测方法,除了对页岩气储层大尺度裂缝实现有效预测外,如何实现泥页岩储层中小尺度、中-低角度裂缝的有效预测,目前尚未形成较系统的技术方法。本文基于焦石坝区块叠后地震资料,在泥页岩储层地球物理特征认识的基础上^[26-28],从泥页岩裂缝发育的控制因素入手,将构造应力对泥页岩裂缝形成的影响引入泥页岩裂缝预测中,开展了泥页岩裂缝地震预测技术方法的探索。

2.1 叠后裂缝预测技术方法对比

目前,常规叠后地震裂缝预测技术,有相干体、地震方差体、曲率体、蚂蚁追踪等技术^[8,29]。地震相干体裂缝检测技术,以及基于空间某点与相邻点的相似系数或互相关函数,计算该点的相干属性最后得到相干数据体,该方法检测大尺度的断裂效果较好。方差体技术是基于三维地震某点相邻道地震信号(如振幅、相位等)之间的相似性来描述地层、岩性等的横向变化,通过计算样点的方差值,揭示三维地震数据体中的

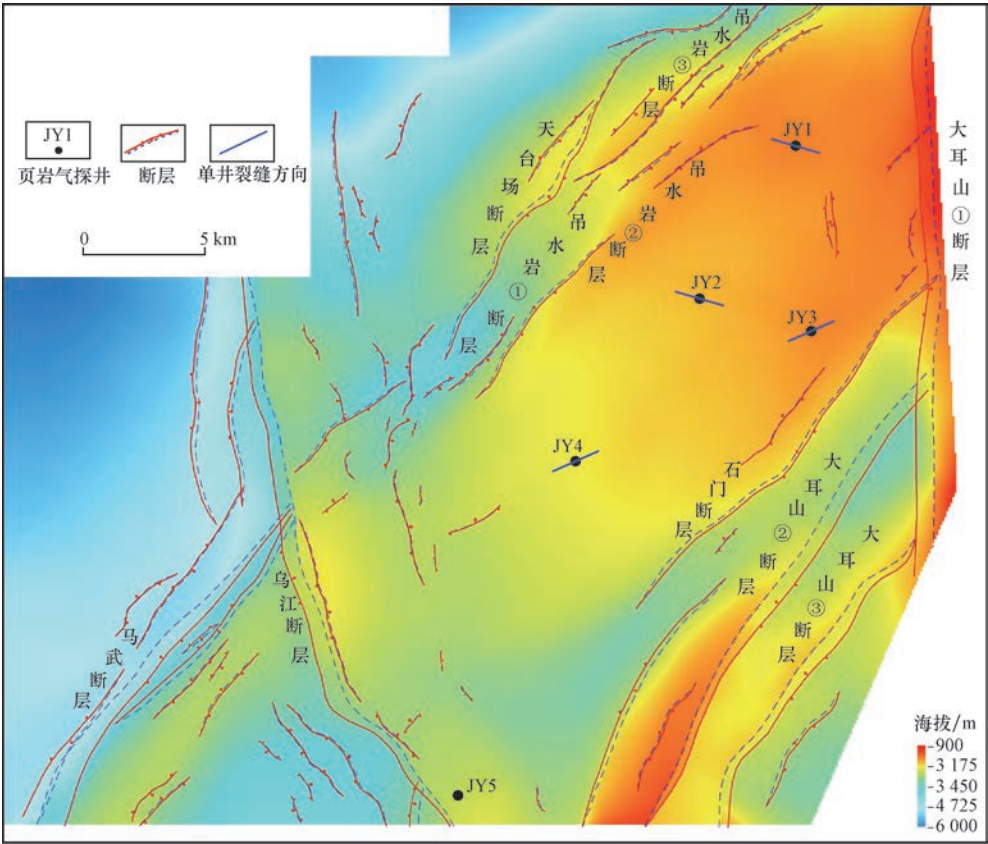


图 1 焦石坝区块五峰组底界构造图

Fig. 1 Bottom structure map of Wufeng Fm in Jiaoshiba area

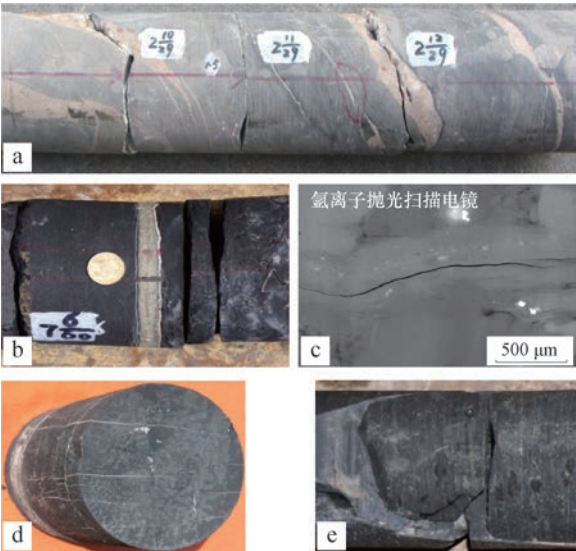


图 2 焦石坝区块五峰组—龙马溪组砂岩与泥页岩岩心裂缝及微观特征

Fig. 2 Cores and thin sections showing differences of fractures between sandstone shale in Wufeng-Longmaxi Fms in Jiaoshiba area

a. YL7 井, T_3x^3 , 埋深 3 605 m, 深灰色钙质细砂岩, 发育多组高角度裂缝, 方解石充填; b. JY3 井, 龙马溪组, 埋深 2 408.21 ~ 408.43 m, 层理缝; c. JY 井, 龙马溪组, 埋深 2 547.60 m, 异常压力缝; d. JY1 井, 五峰组, 埋深 2 410 m 网状缝; e. JY5 井, 龙马溪组, 埋深 3 072 m, 高角度缝

不连续信息, 从而进行断层与裂缝的识别, 该技术识别中等尺度裂缝效果较好。蚂蚁追踪技术是通过追踪蚂蚁觅食的研究, 建立函数关系, 对三维地震数据体中断裂及裂缝建立蚂蚁追踪样本, 通过蚂蚁追踪检测中 - 小尺度裂缝。这些技术方法均为常规油气勘探中较常见的裂缝预测方法。

借鉴常规储层裂缝预测方法, 针对沉积较稳定的泥页岩地层中发育的裂缝, 开展了基于地震方差体技术和蚂蚁体技术的泥页岩裂缝预测研究。沿五峰组 - 龙马溪组底界提取方差体属性 (图 3a) 及蚂蚁体属性 (图 3b)。可以看出, 两者所刻画的裂缝细节都较好, 取得了一定的预测效果, 在构造翼部及大断裂发育区, 断裂及裂缝规模较大, 预测效果较好。但是在构造稳定区, 受地震数据本身噪声以及泥页岩裂缝地震响应弱敏感性的影响, 裂缝预测平面显示的裂缝的主特征方位不突出, 预测平面分布趋势与地质统计规律吻合度较低。因此, 为了得到更佳的泥页岩裂缝预测效果, 在常规裂缝预测方法尝试的基础上, 进一步探索了更加逼近泥页岩裂缝地质发育规律的裂缝预测技术方法。

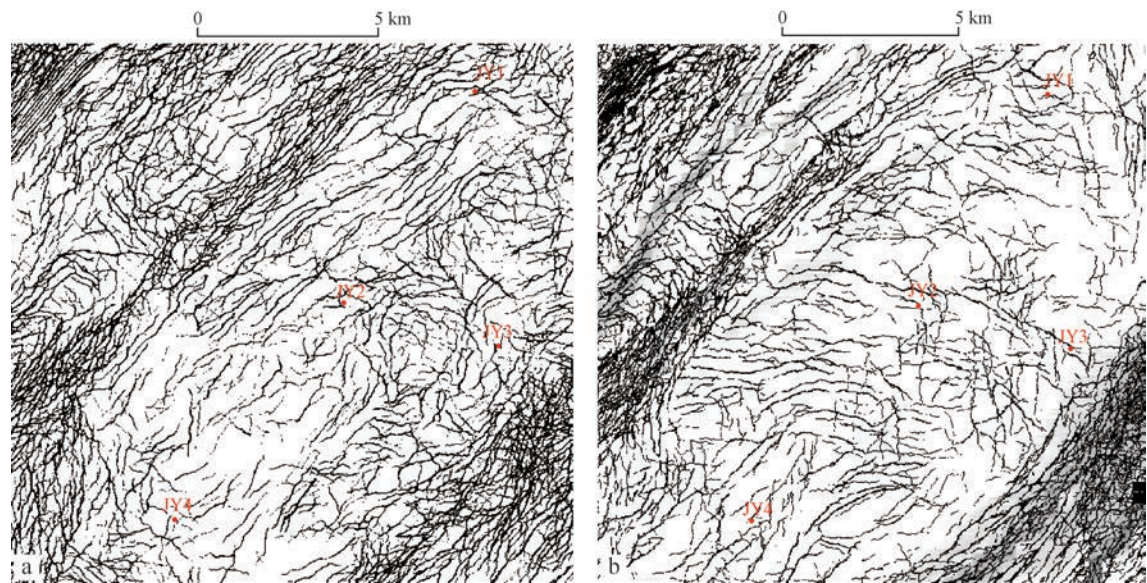


图 3 焦石坝区块常规地震裂缝预测效果对比

Fig. 3 Comparison of conventional seismic fracture prediction methods applied in Jiaoshiba area

a. 五峰组 - 龙马溪组一段方差体属性; b. 五峰组 - 龙马溪组一段蚂蚁体属性

2.2 应力场约束的泥页岩裂缝预测

通过以上常规裂缝预测方法应用到泥页岩裂缝预测分析可知,由于构造稳定区泥页岩储层裂缝发育尺度较小,裂缝发育的地震响应敏感度不及常规储层尺度较大的中 - 高角度裂缝,以及研究区构造翼部及大断裂发育区的规模裂缝。因此,开展了增强裂缝地震响应效果的地震针对性处理技术研究。在通过已钻井成像测井资料确定裂缝主特征发育方位的基础上,应用应力场对裂缝方位及应变强度的有效预测,建立基于应力场约束的有效裂缝模型,实现泥页岩裂缝方位及强度的定量 - 半定量预测。

2.2.1 地震数据针对性处理

为了提高断裂及裂缝成像效果,开展了焦石坝区块叠前时间偏移地震资料的针对性处理,联合应用构造平滑、振幅包络与一阶求导等技术方法,提高原始地震数据体对微小断层的响应能力。原始地震相干体属性与针对性处理后相干体属性对比分析表明,处理后的地震数据体有效地提高了断层及裂缝在地震剖面上的辨识能力(图 4),沿泥页岩底界(即五峰组底界)提取针对性处理前后相干地震数据体属性,可以观测到断裂及裂缝的更多细节(图 5)。

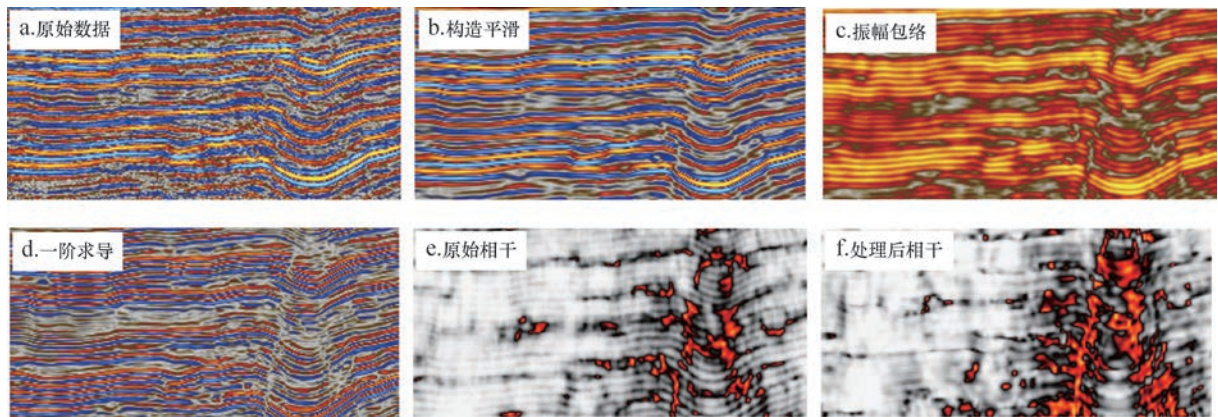


图 4 焦石坝区块叠后地震数据针对性处理

Fig. 4 Post-stack seismic data processing in Jiaoshiba area

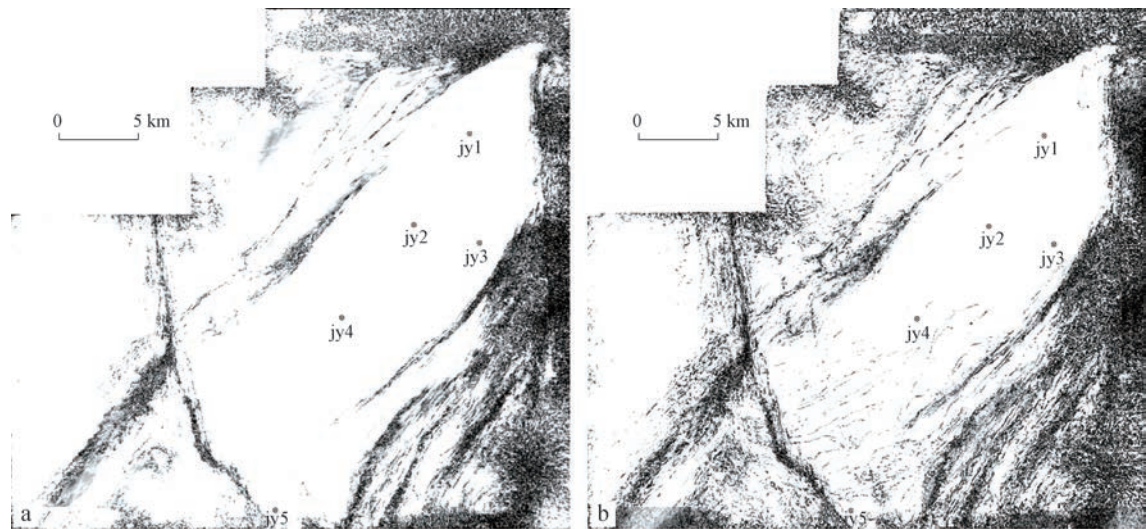


图5 焦石坝区块五峰-龙马溪组一段相干体属性平面图
Fig.5 Coherence attribute of the Wufeng Fm-1st member of Longmaxi Fm in Jiaoshiba area
a. 针对性处理前;b. 针对性处理后

2.2.2 构造应力场分析

地应力作用形成的储层裂缝、断层及构造是油气运移、聚集的通道和场所之一。通过地层应力场分析,可以预测构造成因的裂缝在研究区域的发育和分布规律,从而快速优选有利裂缝发育方位。在焦石坝区块,针对五峰组-龙马溪组一段泥页岩储层,从构造力学出发,利用地层的几何信息(构造面)、岩性信息(速度、密度)、岩石物理弹性信息(杨氏模量、泊松比)等(表1)建立泥页岩层的地质模型、力学模型和数学模型,基于弯曲薄板理论开展五峰组-龙马溪组一段泥页岩地层应力场预测。根据薄板理论,假设 z 为薄板在垂直方向的厚度,则薄板内任意一点 (x,y) 的应力分量为^[30]:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r_x} + \nu \frac{1}{r_y} \right) \\ \sigma_y = \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r_y} + \nu \frac{1}{r_x} \right) \\ \tau_{xy} = \frac{Ez}{2(1+\nu)} \frac{1}{r_{xy}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\frac{1}{r_x}$ 和 $\frac{1}{r_y}$ 分别为受构造挤压区域平面上 x 和 y 方向上的曲率, m^{-1} ; $\frac{1}{r_{xy}}$ 为扭率, m^{-1} ; E 为杨氏模量, GPa; ν 为泊松比,无量纲; σ_x 和 σ_y 分别为 x 和 y 方向上的应力, MPa; τ_{xy} 为剪切应力, MPa。

将构造曲率和井震结合的杨氏模量、泊松比叠前反演结果代入上式可以对构造应力场进行预测。

表1 焦石坝区块 JY1-JY4 井弹性参数

Table 1 Elastic parameters of JY1-JY4 wells in Jiaoshiba area

井名	纵波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	横波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	泊松比
JY1	3 919	2 341.4	2.52	3.41	0.221
JY2	3 727.2	2 431.6	2.51	3.50	0.169
JY3	4 178.7	2 436.7	2.55	3.81	0.240
JY4	3 828.2	2 388.7	2.53	3.44	0.178

预测结果显示,研究区主要发育早期北西向构造应力及晚期北东向构造应力,整体以北西向为主,构造应变强度较大(图6)。经两期构造应力改造,是研究区五峰组-龙马溪组一段页岩气储层发育北东向及北西向裂缝的内因,符合该区地质特征。

2.2.3 应力场约束的有效裂缝预测

通过针对性处理的地震数据体的空间特征扫描,得到能够对裂缝空间分布特征进行精细刻画的地震曲率体。高精度曲率体呈现出的是地下地层的几何属性,缺乏对裂缝发育方向及强度的有效描述。构造应力场是控制储层裂缝形成、分布以及发育程度的重要因素,裂缝的发育特征也在一定程度上反映出构造应力的状态,二者具有较好的对应关系。

因此,在高精度曲率体预测裂缝的基础上,将应力场特征对裂缝发育的影响引入到裂缝预测中,探索建立了应力场约束的裂缝预测模型:

$$\vec{F}(x,y) = C_0(x,y) \vec{\sigma}_0(x,y) \quad (2)$$

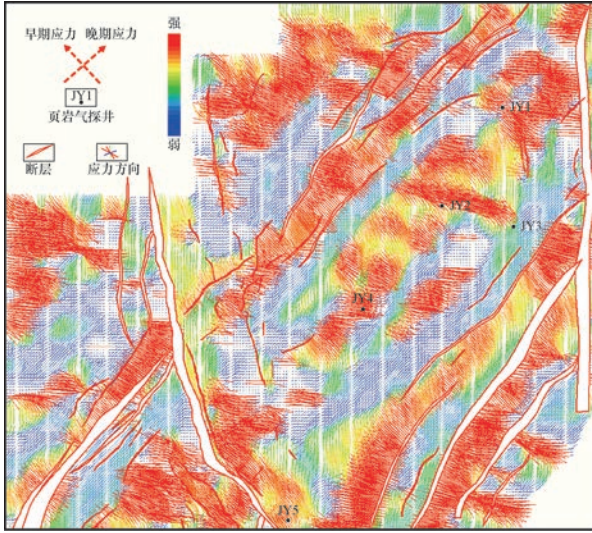


图6 焦石坝区块五峰组-龙马溪组一段应力场

Fig. 6 Stress field map of the Wufeng Fm-1st member of Longmaxi Fm in Jiaoshiba area

式中: (x, y) 为空间位置点的坐标; $\vec{F}(x, y)$ 为应力场约束后的裂缝预测属性; $C_0(x, y)$ 为空间某点处曲率体值归一化的结果; $\vec{\sigma}_0(x, y)$ 为归一化后的应力场。

在本文的研究中采用离差标准化方法对曲率属性和应力场进行归一化处理, $C_0(x, y)$ 和 $\vec{\sigma}_0(x, y)$ 的表达式如公式(3)与公式(4)所示:

$$C_0(x, y) = \frac{C(x, y) - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (3)$$

$$\vec{\sigma}_0(x, y) = \frac{|\vec{\sigma}(x, y)| - |\vec{\sigma}|_{\min}}{|\vec{\sigma}|_{\max} - |\vec{\sigma}|_{\min}} \frac{\vec{\sigma}(x, y)}{|\vec{\sigma}(x, y)|} \quad (4)$$

公式(3)中, $C(x, y)$ 为空间某点处的曲率值, 是一个标量; $C_{\min}$ 为目的层段内曲率属性体中的最小值; $C_{\max}$ 为目的层段内曲率属性体中的最大值。公式(4)中, $\vec{\sigma}(x, y)$ 为空间某点处的应力场, 是一个矢量; $|\cdot|$ 表示矢量的模, 为应力场的强度; $|\vec{\sigma}|_{\min}$ 为空间应力场模的最小值; $|\vec{\sigma}|_{\max}$ 为空间应力场模的最大值; $\frac{|\vec{\sigma}(x, y)| - |\vec{\sigma}|_{\min}}{|\vec{\sigma}|_{\max} - |\vec{\sigma}|_{\min}}$ 表示对空间应力场的强度进行了归一化; $\frac{\vec{\sigma}(x, y)}{|\vec{\sigma}(x, y)|}$ 表示空位置间点 (x, y) 处的应力场方向。

地震体曲率值与裂缝发育程度呈正相关关系, 曲率值越大, 裂缝发育程度越高, 反之越低。应力场的强度越大表明裂缝发育越强、越集中; 反之, 则裂缝发育程度较弱。本文将表征裂缝发育特征的体曲率与裂缝发育方向及强度的应力场进行归一化, 建立两者相乘

表2 曲率体、应力场强度与 $\vec{F}(x, y)$ 裂缝发育程度的关系
Table 2 Correlation among seismic curvature, stress field and $\vec{F}(x, y)$ fracture intensity

地震体曲率值	应力场强度	裂缝发育程度
高	强	增强
低	弱	减弱
高	弱	平衡
低	强	平衡

的应力场约束的裂缝预测模型[公式(2)], 实现有效裂缝的预测, 逐步减小裂缝预测结果的多解性和增强裂缝预测成果的可靠性。地震体曲率值、应力场强度与裂缝发育程度预测的关系如表2所示。若空间某点的曲率值高、应力场强度大, 则该点处的裂缝发育程度得到增强; 若空间某点的曲率值低、应力场强度弱, 则裂缝的发育程度得到了减弱; 若曲率值高、应力场强度弱或者曲率值低、应力场强度强, 则应力场对裂缝发育程度的预测起到了平衡作用, 从而该裂缝预测模型有效地定量-半定量反映裂缝的发育程度。此外, 本文建立的应力场约束的裂缝预测模型[公式(2)]还能对裂缝发育方向进行预测, 应力场约束的裂缝预测结果 $\vec{F}(x, y)$ 的方向与应力场方向一致。

基于上述裂缝预测模型[公式(2)]对焦石坝区块五峰组-龙马溪组一段页岩气储层进行了应力场约束的裂缝预测(图7)。与方差体、蚂蚁体(图3)裂缝预测效果相比, 应力场约束的裂缝预测优势明显, 该方法既能实现对有效裂缝及方位的较为准确的预测, 又能实现有效裂缝发育强度的平面预测。同时, 通过对有效裂缝发育方位预测结果分析可知(颜色代表不同的方位), 焦石坝区块主要发育北东向及北西向有效裂缝, 以北东向为主, 符合地质统计规律。从有效裂缝发育强度预测分析可知, 在焦石坝似箱状背斜构造主体区, 构造相对稳定, 应力强度中等, 裂缝程度相对较低, 强度中-弱为主(裂缝强度: 0 ~ 0.125), 适中的微裂缝发育, 有利于页岩气的富集及保存, 是该区页岩气井富集高产的因素之一(JY1井测试产量 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。而在构造翼部或大型断裂(褶)发育区, 构造应变强度较大, 断裂发育, 中高强度、中高角度断裂(褶)伴生裂缝集中发育(裂缝强度: 0.125 ~ 0.75), 大型断裂带与局部规模裂缝叠加, 造成页岩气藏局部泄压, 页岩气井产量相对下降。JY5井距离乌江断层1200m, 位于乌江断褶带, 断裂及裂缝叠加, 测试产量与其它勘探开发井相比较低, 为 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

勘探实践表明, 靠近裂缝发育带的钻井产量相对较低, 钻井过程中易发生裂缝性漏失。以实钻井为例, JY3HF井及JY17-3HF井分别位于有效裂缝弱发育

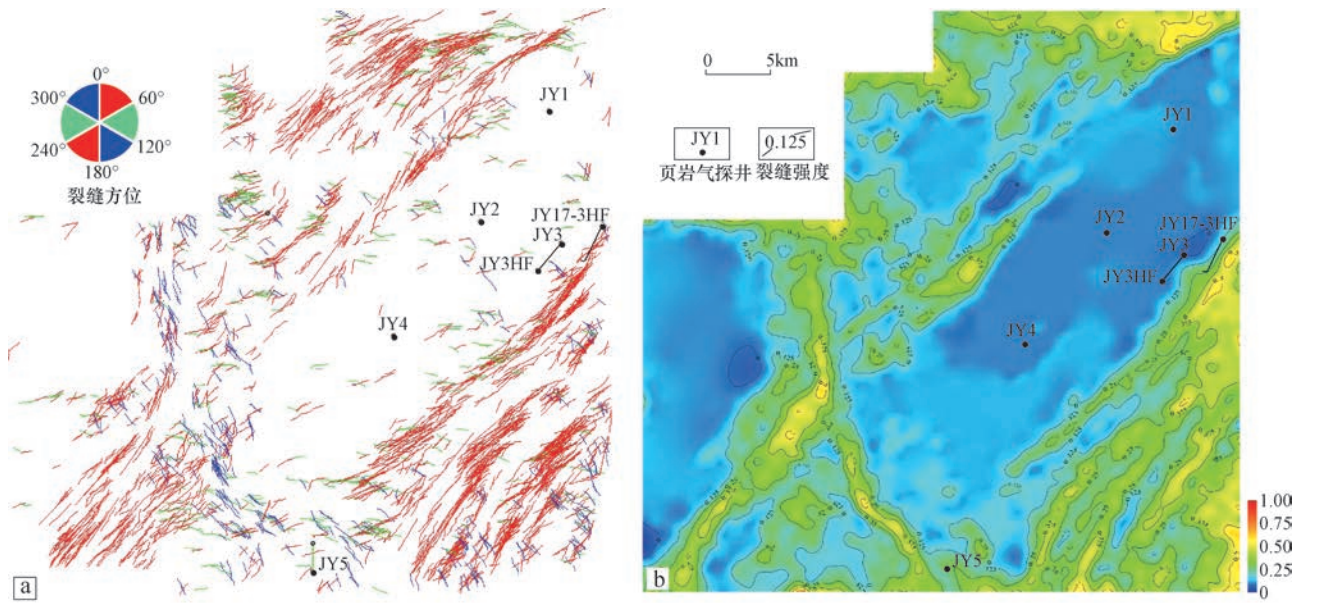


图 7 焦石坝区块五峰组 - 龙马溪组一段基于应力场约束的裂缝综合预测

Fig. 7 Comprehensive prediction of fractures in the Wufeng Fm-1st member of Longmaxi Fm in Jiaoshiba area under the constraint of stress field

a. 五峰组 - 龙马溪组一段有效裂缝及方位预测;b. 五峰组 - 龙马溪组一段有效裂缝发育强度预测

表 3 焦石坝区块 JY17 - 3HF 井漏失数据

Table 3 Leakage data of JY17-3HF well in Jiaoshiba area

井深/m	层位	漏失井段/m	厚度/m	漏失层位	漏失量/m ³	平均漏速/(m ³ ·h ⁻¹)	漏失段主要岩性
2 600.00	龙马溪组	2 600.00 ~ 2 655.37	55	龙马溪组	25.64	2.0 ~ 3.0	灰黑色炭质页岩
2 865.14	龙马溪组	2 865.14 ~ 2 880.00	15	龙马溪组	17.60	3.0 ~ 4.0	灰黑色炭质页岩
2 948.10	龙马溪组	2 948.10 ~ 2 958.42	10	龙马溪组	61.00	1.6 ~ 48.0	灰黑色炭质页岩
3 268.00	龙马溪组	3 268.00 ~ 3 355.00	87	龙马溪组	18.60	1.6	灰黑色炭质页岩
3 538.00	龙马溪组	3 538.00 ~ 3 618.00	80	龙马溪组	15.46	1.3	灰黑色炭质页岩
3 708.00	龙马溪组	3 708.00 ~ 3 727.00	19	龙马溪组	13.80	1.2	灰黑色炭质页岩
4 288.00	龙马溪组	4 280.00		龙马溪组	16.34	2.5	灰黑色炭质页岩

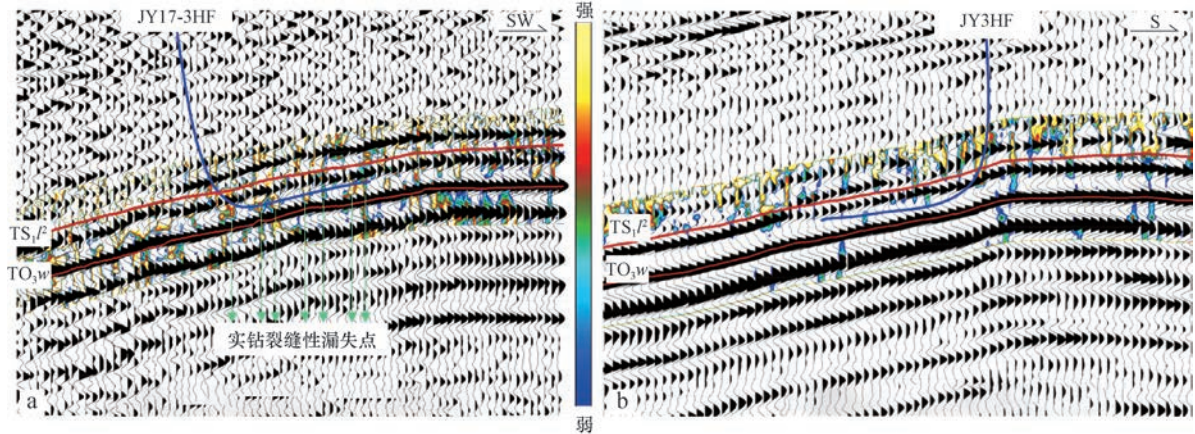


图 8 焦石坝区块 JY17 - 3HF 井与 JY3HF 井裂缝预测成果剖面对比

Fig. 8 Comparison of fracture prediction profiles between JY3HF and JY17-3HF wells in Jiaoshiba area

a. 过 JY17 - 3HF 井裂缝预测 + 地震叠合剖面;b. 过 JY3HF 井裂缝预测 + 地震叠合剖面

区及有效裂缝中强发育区,在钻井过程中 JY3HF 水平井段并未发生钻井液漏失现象,但是 JY17 - 3HF 井水平井段在五峰组 - 龙马溪组一段泥页岩层段内发生多段

裂缝性漏失(表 3)。通过与本次有效裂缝预测结果剖面标定来看,JY17 - 3HF 井漏失点位置与有效裂缝预测地震剖面中裂缝发育点具有一一对应关系(图 8),进

一步说明应用该方法开展泥页岩裂缝预测的可靠性,对页岩气储层评价及工程施工具有一定的指导意义。

3 结论

1) 应用常规裂缝预测方法难以对地震响应较弱的“中小尺度,低角度”的泥页岩裂缝实现有效预测,通过对叠后地震资料开展针对性处理,可以增强裂缝地震响应特征,改善预测效果。

2) 通过基于针对性处理叠后地震数据的高精度地震体曲率属性研究以及基于弯曲波板理论的应力场模拟,获得了体现裂缝发育程度的体曲率属性及裂缝发育方向与强度的应力场属性。将体曲率属性与应力场属性进行归一化处理,依据裂缝发育程度与地震体曲率属性及应力场属性之间的相互关系,建立了归一化体曲率与应力场相乘的裂缝预测模型。通过该模型可以实现页岩气储层裂缝发育方向及强度的定量-半定量有效预测,预测结果符合区块内地质裂缝发育规律。

3) 应力场约束的裂缝预测结果表明,在焦石坝地区箱状背斜构造主体,五峰组-龙马溪组一段地层较稳定,构造形变较弱,发育东北为主的中-弱程度的裂缝,是该局部区域富集高产的重要因素之一;而在大型断裂(褶)发育区,构造应变强度较大,中强程度裂缝集中发育,规模断裂与规模裂缝叠加是页岩气局部富集保存及钻井工程的相对不利因素。

4) 不同裂缝强度发育区井震标定成果表明,实钻井钻井工程裂缝性漏失点与应力场约束的裂缝预测成果具有一一对应关系,进一步验证了该方法的有效性和实用性,对页岩气储层评价及工程施工具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 王祥,刘玉华,张敏,等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学,2010,21(2):350-356.
Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, et al. Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. Natural Gas Geoscience,2010,21(2):350-356.
- [2] 张金川,薛会,张德明,等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质,2003,17(4):466.
Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming, et al. Shale gas and its accumulation mechanism[J]. Geoscience,2003,17(4):466.
- [3] 张金川,金之钧,袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业,2004,24(7):15-18.
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry,2004,24(7):15-18.
- [4] 苏培东,秦启荣,黄润秋. 储层裂缝预测研究现状与展望[J]. 西南石油学院学报,2005,(5):14-17.
Su Peidong, Qin Qirong, Huang Runqiu. Prospects and status for the study on reservoir fractures[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute,2005,(5):14-17.
- [5] 童亨茂. 成像测井资料在构造裂缝预测和评价中的应用[J]. 天然气工业,2006,(9):58-61.
Tong Hengmao. Application of imaging well logging data in prediction of structural fracture[J]. Natural Gas Industry,2006,(9):58-61.
- [6] 孙松领,李琦,李娟,等. 低渗透砂岩储层构造裂缝预测及开启性分析[J]. 特种油气藏,2007,(1):30-33.
Sun Songling, Li Qi, Li Juan, et al. Structural fracture prediction and aperture analysis for low permeability sandstone reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs,2007,(1):30-33.
- [7] 时华星,王秀玲,季玉新,等. 构造正反演裂缝预测方法及应用实例[J]. 石油物探,2004,(4):337-340.
Shi Hoaxing, Wang Xiuling, Ji Yuxin, et al. Structurally forward and inverse fracture prediction and its application[J]. Geophysical Prospection for Petroleum,2004,43(4):337-340.
- [8] 刘振峰,曲寿利,孙建国,等. 地震裂缝预测技术研究进展[J]. 石油物探,2012,(2):191-198.
Liu Zhenfeng, Qu Shouli, Sun Jianguo, et al. Progress of seismic fracture characterization technology[J]. Geophysical Prospection for Petroleum,2012,(2):191-198.
- [9] 蔡希源,唐建明,陈本池. 三维多分量地震技术在川西新场地区深层致密砂岩裂缝检测中的应用[J]. 石油学报,2010,(5):737-743.
Cai Xiyuan, Tang Jianming, Chen Benchu. A 3D multi-component seismic exploration technique applied to the detection of deep-seated tight sandstone fractures in the Xinchang area of the western Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2010,(5):737-743.
- [10] 狄贵东,孙赞东,庞雄奇,等. 应力场模拟约束下的碳酸盐岩裂缝综合预测[J]. 石油物探,2016,55(1):150-156.
Di Guidong, Sun Zandong, Pang Xiongqi, et al. Comprehensive fracture prediction technology constrained by stress field simulation: a case study from ZG8 area of central Tarim basin[J]. Geophysical Prospection for Petroleum,2016,55(1):150-156.
- [11] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin,2002,86(11):1921-1938.
- [12] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippi-an Barnett shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin,2005,89(2):155-175.
- [13] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin,2007,91(4):523-533.
- [14] Zeng W, Zhang J, Ding W, et al. Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area (South China). Part one: Fracture characteristics and comparative analysis of main controlling factors[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2013,75(8):251-266.
- [15] Zeng W, Ding W, Zhang J, et al. Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area (South China). Part two: Numerical simulation of tectonic stress field and prediction of fractures distribution

- [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 75(8): 267–279.
- [16] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28–36.
- Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 28–36.
- [17] 郭旭升. 南海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 石油勘探与开发, 2014, 88(7): 209–1218.
- Guo Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China—understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 88(7): 209–1218.
- [18] 曾维特, 张金川, 丁文龙, 等. 延长组页岩储层纳米级孔隙特征及影响因素——以鄂尔多斯盆地柳坪171井为例[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1118–1126.
- Zeng Weite, Zhang Jinchuan, Ding Wenlong, et al. Characteristics and influence factors of nanopores in Yanchang shale reservoir: A case study of Liuping-171 Well in Erdos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1118–1126.
- [19] 丁文龙, 曾维特, 王濡岳, 等. 页岩储层构造应力场模拟与裂缝分布预测方法及应用[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 63–74.
- Ding Wenlong, Zeng Weite, Wang Ruyue, et al. Methods and application of tectonic stress field numerical simulation and fractures distribution prediction for shale reservoir[J]. Earth Science Frontier, 2016, 23(2): 63–74.
- [20] 曾维特, 丁文龙, 张金川, 等. 渝东南—黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝有效性研究[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 96–106.
- Zeng Weite, Ding Wenlong, Zhang Jinchuan, et al. Research on the fracture effectiveness of Lower Cambrian Niutitang Shale in Southeast of Chongqing and North of Guizhou area (South China)[J]. Earth Science Frontier, 2016, 23(1): 96–106.
- [21] 唐诚. 储层裂缝表征及预测研究进展[J]. 科技导报, 2013, 31(21): 74–79.
- Tang Cheng. Progress in fracture characterization and prediction[J]. Science and Technology Review, 2013, 31(21): 74–79.
- [22] 陆明华, 骆璞, 姜传芳, 等. 地震属性技术在页岩裂缝预测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(8): 62–64.
- Lu Minghua, Luo Pu, Jiang Chuanfang, et al. Application of seismic attribute technology in shale fracture prediction[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(8): 62–64.
- [23] 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素——以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 893–901.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wen Zhidong, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba area[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 893–901.
- [24] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9–16.
- Guo Xusheng, Li Yuping, Liu Ruobing, et al. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 9–16.
- [25] 仇鹏, 牟中海, 蒋裕强, 等. 裂缝性储层的地震响应特征——以川中地区致密砂岩储层为例[J]. 油气田开发, 2011, 29(3): 49–53.
- Qiu Peng, Mu Zhonghai, Jiang Yuqiang, et al. Seismic response of fractured reservoirs—taking the tight sandstone reservoirs in the central region of Sichuan for example[J]. Oil and Gas Field Development, 2011, 29(3): 49–53.
- [26] 陈祖庆. 海相页岩 TOC 地震定量预测技术及其应用——以四川盆地焦石坝地区为例[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 24–29.
- Chen Zuqin. Quantitative seismic prediction technique of marine shale TOC and its application: A case from the Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 24–29.
- [27] 李金磊, 尹正武. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层地震定量预测方法[J]. 石油物探, 2015, 54(3): 324–330.
- Li Jinlei, Yin Zhengwu. Seismic quantitative prediction method of shale gas reservoirs in the Jiaoshiba Area, Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospection for Petroleum, 2015, 54(3): 324–330.
- [28] 王明飞, 陈超, 屈大鹏, 等. 涪陵页岩气田焦石坝区块五峰组—龙马溪组一段页岩气储层地球物理特征分析[J]. 石油物探, 2015, 54(5): 613–620.
- Wang Mingfei, Chen Chao, Qu Dapeng et al. The geophysical characteristics of shale gas reservoir from Wufeng member to Longmaxi member in Jiaoshiba block of Fulin shale gasfield[J]. Geophysical Prospection for Petroleum, 2015, 54(5): 613–620.
- [29] 刘雷颂, 高军, 代双河, 等. “蚂蚁追踪”裂缝预测技术在中东 AD 油田开发中的应用[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(8): 57–61.
- Liu Leisong, Gao Jun, Dai Shuanghe, et al. Application of “ant tracking” fracture prediction technique in development of AD oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(8): 57–61.
- [30] 余夫, 金衍, 陈勉, 等. 基于薄板理论的碳酸盐岩地层压力检测方法探讨[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 57–61.
- Yu Fu, Jin Yan, Chen Mian, et al. Discussion on a formation pore pressure detection method for carbonate rocks based on the thin plate theory[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 57–61.

(编辑 董立)