

四川盆地J地区志留系龙马溪组 页岩裂缝地震预测与评价

胡伟光, 刘珠江, 范春华, 周卓铸, 李春燕

(中国石化勘探分公司研究院)

摘要 利用三维地震资料进行相干体分析、应力场分析、P波各向异性分析,对四川盆地J地区龙马溪组优质页岩层段不同规模裂缝的优势发育带进行预测,对比分析表明,对于大型裂缝的预测,相干体分析相对较好;对于中小型裂缝的检测,采用P波各向异性技术的效果相对较好。龙马溪组页岩段底部在构造主体部位上主要发育中小型裂缝,是优质页岩储层的主要分布层段。JY1井区两口水平井的测试结果证实,对龙马溪组优质页岩段开展三维地震裂缝预测是可行的,预测结果可有效地指导该区的页岩气勘探。

关键词 四川盆地; 龙马溪组; 页岩气; 裂缝; 地震预测; 预测方法

中图分类号: TE112.2⁺4; P631.4⁺4

文献标识码: A

21世纪初,随着水平井及分段压裂技术的突破,北美地区页岩气发展迅速^[1],页岩气资源的战略地位逐渐为人们所重视。中国页岩气具有良好的发展前景,资源量约为陆上常规天然气资源的2倍^[2]。2010年,四川盆地威远地区志留系龙马溪组页岩获得商业性气流,实现了中国海相页岩气首次工业性突破^[3],证实了该层系的勘探潜力。

与常规油气储层相比,页岩和其他致密岩类等非常规油气储层的非均质性更强;由于页岩通常呈“层状”沉积,这种沉积模式以及后期构造活动产生的裂缝使得页岩的各向异性特征更加明显;强非均质性和各向异性使得储层地质、测井响应以及地震预测结果多解性更强^[4-9]。页岩一般都具有低孔、低渗透及中小型裂缝发育等特性,这使得有效储层厚度、孔隙度、裂缝、含油性等方面的预测难度更大。针对大型裂缝及断层的探测,已有相当多的地球物理技术手段能够实现,如相干体计算等^[10-12];而对于中小型裂缝的探测技术^[13-15],仍然面临如何提高预测精度以满足实际地质要求的问题。

本次研究区为四川盆地东南缘J地区,构造主体

东西向为似箱状背斜,顶部宽缓,两翼陡倾,上、下构造变形层形态基本一致,南北向为逆冲断层下盘的一个缓坡断鼻构造^[16]。目的层下志留统龙马溪组页岩被上、下两套硬质岩层所夹持(上覆下志留统石牛栏组灰岩,下伏奥陶系灰岩),在区域构造应力的作用下,页岩层段中局部可发育中小型裂缝,主要有构造张裂缝、构造剪裂缝、顺层裂缝等^[17]。根据区内JY1井岩心分析^[16],岩心的页岩基质、有机质中存在大量微型孔洞和中小型裂缝,大型裂缝不发育。这些裂缝对页岩储层的沟通及后期的压裂非常有用,所以,有利的小型裂缝发育区是龙马溪组页岩气的勘探重点。

据JY1井资料,龙马溪组底部优质页岩层段(TOC>2%)厚度约38m,平均TOC含量3.50%,平均脆性矿物含量61.3%^[16]。本次研究以该优质页岩层段为对象进行裂缝空间分布预测。为充分挖掘地震信息,提高预测精度,拟利用三维地震资料,采用包括相干体分析技术、应力场分析技术、P波各向异性分析等手段,通过对目的层中小型裂缝以及大型裂缝和断层等信息的提取,综合各项技术预测结果以确定优质页岩储层的发育区。

收稿日期: 2013-10-22; 改回日期: 2014-03-12

本文受国土资源部油气专项“上扬子及滇黔桂区页岩气资源调查评价与选区”(编号:2009GYXQ15-06)资助

胡伟光: 1972年生,石油物探工程师。1995年毕业于中国地质大学(武汉)水文地质及工程地质专业,现从事页岩气储层与裂缝预测方面研究。通讯地址: 610041 四川省成都市高新区吉泰路 688 号西南油气科研基地; E-mail: wygy888@126.com

1 页岩裂缝地震预测技术

1.1 相干体分析技术

相干体技术^[18-19]的实质是利用地震波的相干原理,计算和分析相邻地震道之间地震波形的变化,突出不相关的异常现象,包括地震同相轴的不连续点或突变点,它对识别岩层横向非均一性、地层尖灭、断层、大中型裂缝较为有效。

从叠后三维地震数据体出发,选用有效的计算方法实现相干数据体的转换,进而展现出断层特征及裂缝的平面发育带。在相干数据体的转换过程中,通过计算纵向和横向上局部的波形相似性,可以得到三维地震相关性的估计值。被断层面切开的小范围内的地震道通常与相邻道有不同的特征,这导致局部的道与道之间相关性的突变。沿一张时间切片计算每个网格点上的相关值,就能得到沿着断层的低相关值的轮廓,对一系列时间切片重复这一过程,这些轮廓就可反映断面。通过三维相关属性体的提取,就可以把三维反射振幅数据体转换成三维的相关系数数据体。

通过地震资料全三维解释和三维相干数据体处理解释,实现了对研究区内断层系统认识的深化。本次研究采用第二代相干算法得到相干体,运算参数为 3 线×3 道、时窗为 9 ms。图 1 为研究区三维工区龙马溪组优质页岩段沿层相干切片,图中呈黑色线状展布的低相干值所处位置便是断层的响应,大体上呈北东—南西走向,局部有南北走向的小断层;图中断层附近的黑色区域推测为与断层伴生的大型裂缝强发育区域,主要分布在构造两翼;另外有些小型的圈状、弯曲线状(黑色—深灰色区域)推测为中型裂缝密集发育部位,集中分布在构造主体部位上,白色区域则大中型裂缝相对不发育。

1.2 应力场分析技术

构造应力是影响裂缝发育的重要因素,在构造演化过程中,构造变形在地层内部引起应力重新分布,产生各种不同的裂缝组系。按照弹性薄板理论,利用地层的几何信息(构造面)、岩性信息(速度、密度)估算出地层的应力场,包括地层面的曲率张量、变形张量和应力场张量,从而得到主曲率、主应变和主应力。进一步,通过三者与裂缝密度、裂缝方向之

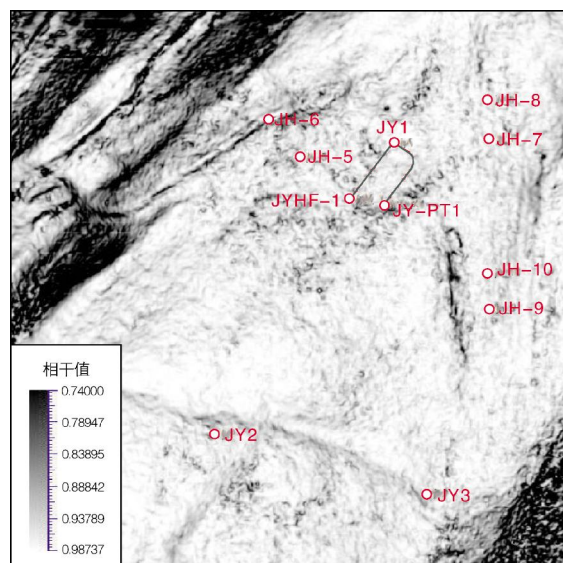


图 1 J 地区龙马溪组优质页岩段沿层相干切片

间的对应关系来预测裂缝的空间展布^[20-22]。研究区主体为箱状背斜,平面上构造高部位的主曲率和主应力正值较高,是张应变条件下的张应力集中释放区,有利于裂缝的形成;其它部位的主曲率和主应力主要表现为负值或较低,属于负向构造部位,是压应变条件下的压应力集中释放区,不利于裂缝的发育。

利用 JY1 井、JY2 井、JY3 井的测井资料进行速度反演,得到速度体,再沿层提取其深度、速度值进行应力场分析。从预测的裂缝指数(图 2)看,区内主要的裂缝发育区呈红—淡绿色(裂缝指数>0.1),其中,大、中型裂缝发育区呈黄色、红色(裂缝指数>0.8),大型裂缝主要沿断层带呈线状分布,中型裂缝主要在构造主体部位上呈交错线状展布;淡绿色及淡黄色区为小型裂缝发育区(裂缝指数 0.1~0.8),呈小型斑块状展布;淡蓝色及白色区则相对致密(裂缝指数<0.1),零星展布。

以 JY1 井区为例,利用 JY1 井平台所钻的 JYHF-1 水平井,水平井段设计为北东—南西向,与主应力的走向垂直(图 3a,水平井段玫瑰花图反映主应力为北西向,与裂缝走向一致),这与 FMI 测井分析的裂缝方向基本一致(图 3b);水平井段处于淡黄色—绿色区,属裂缝指数相对低值区,推测该井段的中型裂缝相对不发育,只局部发育小型裂缝。至于 JY-PT1 水平井,其水平井段基本位于淡黄色—黄色区,对应中型裂缝发育区,裂缝要比 JYHF-1 水平井段发育。

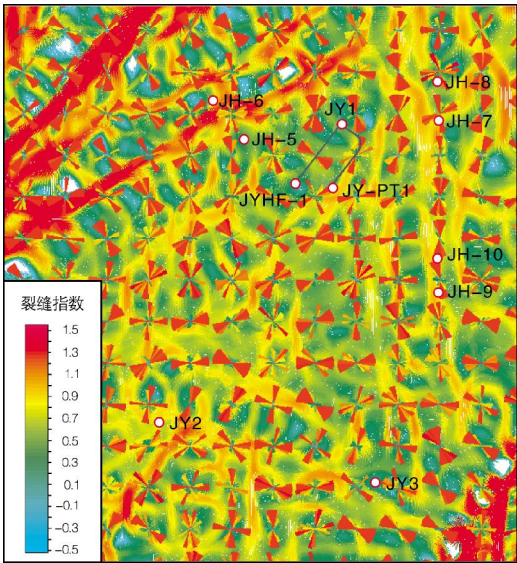
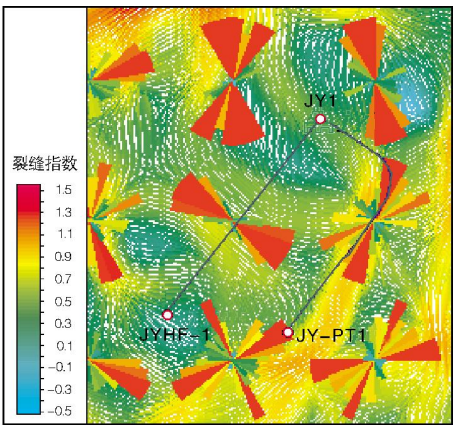
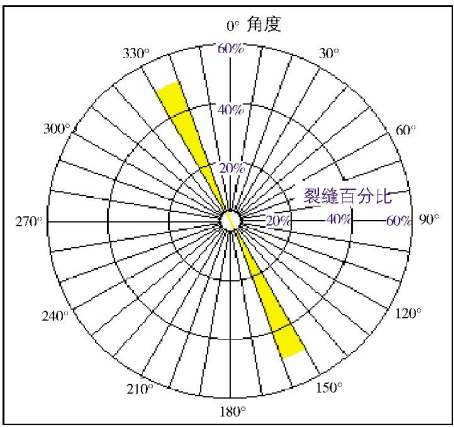


图2 J地区龙马溪组优质页岩段构造应力预测
裂缝指数强度与方向



(a) 构造应力预测的裂缝指数强度与方向



(b) JY1井FMI测井解释的裂缝走向及强度(玫瑰花图)

图3 JY1井区裂缝发育特征

1.3 P波各向异性分析技术

1.3.1 基本原理

基于P波各向异性的裂缝检测技术^[23-25],就是利用地震纵波沿裂缝走向和裂缝法向传播时振幅、波阻抗、频率、衰减、走时等属性的方位各向异性,对裂缝方位和密度进行相关计算——把不同方位角的地震振幅或频率等属性进行椭圆拟合,椭圆长短轴的比值大小即为椭圆扁率,代表该采样点各向异性的强度。振幅或频率等属性的各向异性强度与裂缝的密度有关,裂缝密度越大,各向异性的强度就越大。

基于宽方位地震观测数据,对纵波振幅随方位角的周期变化进行分析,可以估算裂缝的方位和密度。

至于频率,平行裂缝走向,地震波的高频能量吸收衰减得较慢;垂直裂缝方向,地震波的高频能量吸收衰减得较快;裂缝密度越大,地震波频率衰减得越快。

P波各向异性裂缝检测技术的流程如下:

- (1)全方位的地震资料采集;
- (2)叠前道集相对保真处理;
- (3)对叠前全方位角道集按炮检距位置关系进行分方位角范围的叠加、偏移及数据重构处理,得出不同中心角的方位角道集数据;
- (4)对方位角道集进行属性分析;
- (5)优选裂缝响应敏感的地震属性对方位角道集进行椭圆拟合计算,得到各向异性方向和强度。

1.3.2 JY1井各向异性正演模拟

基于井中纵、横波速度和岩石密度资料,对JY1井优质页岩段进行各向异性正演模拟(图4)。根据岩石物理模型计算井中含裂缝储层段的岩石弹性张量和各向异性等效的Thomsen指数^[26],从而了解裂缝对各向异性岩石物理参数的影响,进而计算叠前地震反射在各个方位角的响应,并确定各向异性地震反射振幅与裂缝定向关系^[27-28]。

对于龙马溪组优质页岩段的不同裂缝密度,采用归一化的反射振幅随入射角变化的响应来定量描述裂缝引起的方位角振幅的变化特征。当页岩储层中的气饱和和裂缝时,反射振幅总体上会随偏移距的增大而减小,且当裂缝密度增大时,P波各向异性强度值增大——不同颜色的线振幅相对值增大,且呈分散状,线与线(不同中心角)相互之间分离明显(图4)。正演模型揭示,各向异性强度值与裂缝发育强度呈正相关。

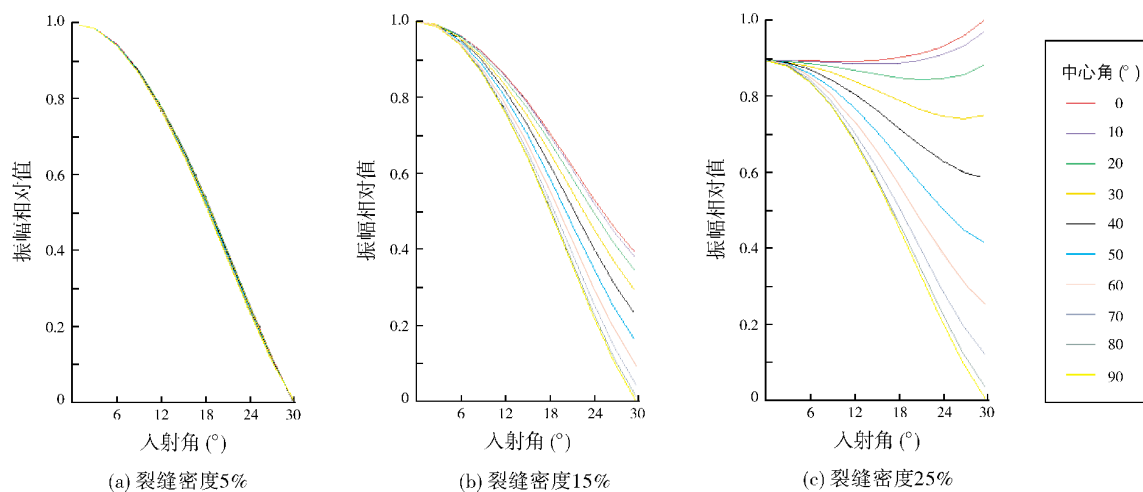


图4 JY1井不同岩石裂缝密度时P波各向异性正演示意图

1.3.3 叠前各向异性裂缝预测

通过分析研究区叠前三维地震道集数据方位角和偏移距信息,认为基本满足了P波各向异性对裂缝预测的需要。在地震资料处理过程中,相对保幅、保真处理的叠前道集在控制偏移距为20~3 600 m的前提下,基于对称原理及按方位角 0° ~ 180° 均分,对以 15° 、 45° 、 75° 、 105° 、 135° 、 165° 为中心角的方位角范围内的道集数据进行叠加、偏移及数据重构处理,得到具有六个中心角的方位角道集数据体;然后分析振幅随中心角的变化,并进行椭圆拟合得到各向异性强度值(图5)。

对目的层裂缝发育带进行振幅各向异性强度(图5)检测分析可知,中小型裂缝发育带主要分布在构造主体部位;大型裂缝则主要发育在断层及其附近区域——构造两翼部位(图5中的西北及东南部),基本上是由断层所引起的,呈现出与断层走向一致的条带状展布形态,并且各向异性强度值呈高值状态(>1.3),该区域被认为不利于页岩气保存。由图5可见,研究区构造主体部位的红色、黄色区各向异性强度值较高(>1.24),是中小型裂缝发育密集部位;淡绿色—淡蓝色区各向异性强度值中等偏下($1.02\sim 1.24$),中小型裂缝发育强度稍弱;白色区各向异性强度值较低(<1.02),裂缝发育最弱。所以,远离断层及其伴生的大型裂缝发育区的淡蓝色—红色、黄色区应是页岩气勘探的有利区。

JY1井区处在裂缝较发育区,其中,JY-PT1水平井段周围的中小型裂缝分布面积要比JYHF-1井的

大。从过井各向异性强度剖面(图6)可见,龙马溪组优质页岩段 JYHF-1 井的水平段位于红色区,反映中小型裂缝相对密集发育;并且总体上裂缝发育段相对集中,没有向上扩张,这有利于页岩气的保存。

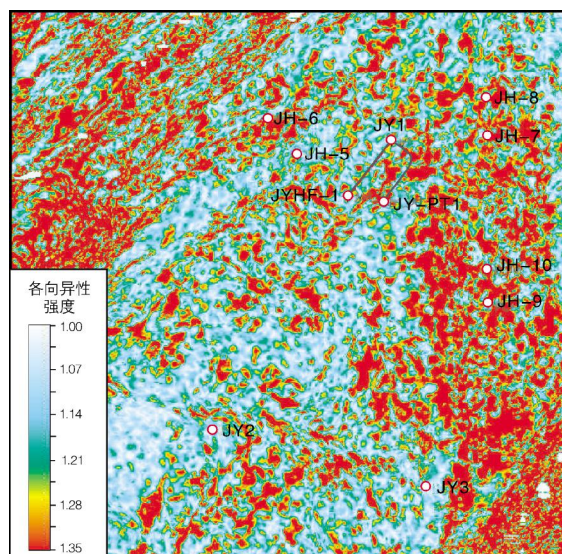


图5 J地区龙马溪组优质页岩段裂缝各向异性强度图

2 页岩裂缝综合评价

勘探开发实践证实,当页岩中存在断层或与断层伴生的裂缝时,页岩储层受到严重破坏,被保存的页岩气的规模要小得多,且不利于压裂;而对于不与断层伴生的裂缝,在大型压裂作用下,这些裂缝容易张开,形成一定的裂缝体系,储集在页岩中

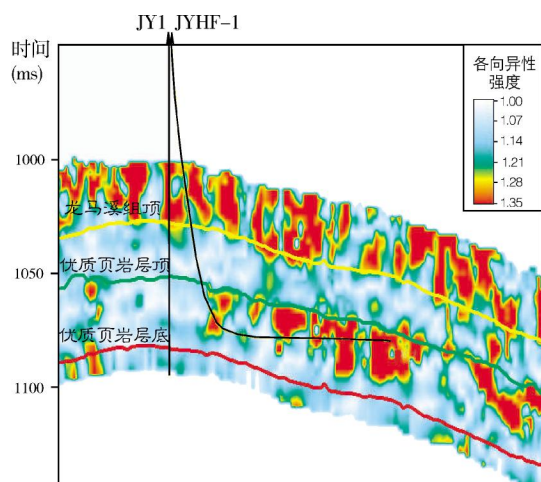


图6 J地区龙马溪组页岩段JY1、JYHF-1井各向异性强度剖面图

的游离气极易释放。因此,与断层沟通的裂缝一般情况下不利于页岩气的保存,如JY3井区向东南部打的一系列开发水平井,由于钻遇与断层伴生的大型裂缝系统,页岩气保存条件差而不得不临时封孔;其实真正对页岩储层起改善作用的是中小型裂缝,当中小型裂缝发育时,它们是页岩气聚集和运移的主要空间。

对比前述三种裂缝预测方法对应的结果(图1,图2,图5),裂缝发育部位基本吻合,具有较好的可比性;同时,不同方法各有优势,并且也可相互验证和进行综合分析。对于大型裂缝检测,相干体分析具有优势;对于中小型裂缝检测,以P波各向异性检测裂缝效果最佳,其次为应力场分析,相干体分析略弱。

综合分析可知:龙马溪组优质页岩段在构造主体部位的中小型裂缝相对发育且呈大面积小斑块状展布,有利于对页岩储层进行压裂及页岩气释放;断层及其伴生的大型裂缝主要集中发育于构造两翼,该区域裂缝强烈发育且与断层带沟通,对页岩储层起破坏作用,不利于页岩气保存及压裂。由于构造主体部位上中小型裂缝呈斑块状密集分布,以及断层不发育,这是区内一系列水平井在压裂的情况下获高产、稳产的重要原因。JYHF-1与JY-PT1这两口水平井,水平井段的中小型裂缝局部相对发育,且后者略优于前者。经压裂,JYHF-1井获 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流,JY-PT1井则获 $31 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流,这证实了裂缝预测结果的合理性。

3 结论

(1)针对四川盆地东南缘J地区下志留统龙马溪组优质页岩层段,采用相干体分析、应力场分析、P波各向异性分析等三项技术进行裂缝预测,对比分析表明:对于大型裂缝的预测,相干体分析相对较好;对于中小型裂缝的检测,采用P波各向异性技术相对较好。

(2)龙马溪组页岩段底部在构造主体部位上主要发育中小型裂缝,是优质页岩储层的分布区域。

(3)JY1井区两口水平井的测试结果证实,对龙马溪组优质页岩段开展三维地震裂缝预测是可行的,预测结果可有效地指导该区的页岩气勘探。

参考文献

- [1] 黄玉珍,黄金亮,葛春梅,等.技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键[J].天然气工业,2009,29(5):7-10.
- [2] 闫存章,黄玉珍,葛春梅,等.页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J].天然气工业,2009,29(5):1-6.
- [3] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
- [4] 孙伟家,符力耘,管西竹,等.页岩气地震勘探中页岩各向异性的地震模拟研究[J].地球物理学报,2013,56(3):961-970.
- [5] 赵万金,李海亮,杨午阳.国内非常规油气地球物理勘探技术现状及进展[J].中国石油勘探,2012,17(4):36-40.
- [6] 薛承瑾.国内页岩气有效开采值得关注的几个问题[J].石油勘探技术,2012,40(4):1-6.
- [7] 林建东,任森林,薛明喜,等.页岩气地震识别与预测技术[J].中国煤炭地质,2012,24(8):56-60.
- [8] 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.
- [9] 丁文龙,许长春,久凯,等.泥页岩裂缝研究进展[J].地球科学进展,2011,26(2):135-144.
- [10] 余得平,曹辉,王咸彬.相干数据体及其在三维地震解释中的应用[J].石油物探,1998,37(4):75-79.
- [11] 胡伟光.相干体技术在川东北油气勘探中的应用[J].物探化探计算技术,2010,32(3):260-264.
- [12] 王志君,黄军斌.利用相干技术和三维可视化技术识别微小断层和砂体[J].石油地球物理勘探,2001,36(3):378-381.
- [13] 曹均,贺振华,黄德济,等.裂缝储层地震波特征响应的物理模型实验研究[J].勘探地球物理进展,2003,26(2):88-92.
- [14] 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):350-357.

- [15] 曲寿利,季玉新,王鑫,等. 全方位P波属性裂缝检测方法[J]. 石油地球物理勘探,2001,36(4):390-397.
- [16] 郭彤楼,刘若冰. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘JY1井为例[J]. 天然气地球科学,2013,24(4):643-650.
- [17] 梁超,姜在兴,杨懿婷,等. 四川盆地五峰—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. 石油勘探与开发,2012,39(6):691-698.
- [18] 杨占龙,郭精义,陈启林,等. 地震信息多参数综合分析 with 岩性油气藏勘探[J]. 天然气地球科学,2004,15(6):628-632.
- [19] 孙夕平,杨国权. 三维地震相干体技术在目标沉积相研究中的应用[J]. 石油物探,2004,43(6):591-594.
- [20] 唐湘蓉,李晶. 构造应力场有限元数值模拟在裂缝预测中的应用[J]. 特种油气藏,2005,12(2):25-27.
- [21] 刘云武,齐振勤,唐振国,等. 海拉尔盆地乌东地区三维地震裂缝预测方法及应用[J]. 中国石油勘探,2012,17(1):37-41.
- [22] 胡伟光,蒲勇,肖伟,等. 裂缝预测技术在清溪场地区的应用[J]. 中国石油勘探,2010,15(6):52-58.
- [23] ZHA C Y, ZHANG Z R, ZHONG D Y, et al. Application of fractured reservoir modeling technology to sandstone reservoirs in Songliao Basin, China[C]// Expanded Abstracts of 66th EAGE Annual Conference & Exhibition, 2004.
- [24] LI X Y. Fracture detection using P-P and P-S waves in multi-component sea-floor data[C]// Expanded Abstracts of 68th Annual International SEG Meeting, 1998: 2056-2059.
- [25] 杨勤勇,赵群,王世星,等. 纵波方位各向异性及其在裂缝检测中的应用[J]. 石油物探,2006,45(2):177-181.
- [26] THOMSEN L. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock[J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(6): 805-829.
- [27] SHEN F, SIERRA J, TOKSOZ N. Offset-dependent attributes (AVO and FVO) applied to fracture detection[C]// Expanded Abstracts of 69th Annual International SEG Meeting, 1999: 776-779.
- [28] 胡伟光,赵卓男,劳牡丹,等. 川东北毛坝场构造飞仙关组三段裂缝预测[J]. 勘探地球物理进展,2010,33(5):348-354.

编辑:董庸

Seismic Prediction and Evaluation of Fractures in Silurian Longmaxi Shale at J Area in Sichuan Basin

Hu Weiguang, Liu Zhujiang, Fan Chunhua, Zhou Zhuozhu, Li Chunyan

Abstract: Three analysis technologies involving coherence body, stress field and P-wave anisotropy have been applied to the Silurian Longmaxi shale at J area in Sichuan basin to predict the zone of well-developing fractures. The result of comparative analysis shows that the coherence body analysis is fit to the prediction of large fractures while the P wave anisotropy analysis is better to the prediction of middle and/or small fractures. The lower part of Longmaxi shale in which middle and/or small fractures develop commonly is good quality reservoir. Depending on the test result of two horizontal wells at the area of Well JY-1, it is confirmed that the method of 3-D fracture prediction is available to good quality reservoir of Longmaxi shale, which is significant for shale gas prospecting in this area.

Key words: Silurian; Longmaxi Formation; Shale gas; Fracture; Seismic prediction; Prediction method; Sichuan Basin
Hu Weiguang; male, Petroleum Geophysics Engineer. Add: Research Institute of SINOPEC Exploration Branch Company, 688 Jitai Rd., Chengdu, Sichuan, 610041, China