

doi:10.6056/dkyqt202203001

频率域多尺度断裂检测技术在长宁页岩气勘探中的应用

陈珂磷¹, 井翠¹, 杨扬¹, 任晓莉¹, 王利田²

(1.四川长宁天然气开发有限责任公司, 四川 成都 610056; 2.北京凯利东方石油科技有限公司, 北京 100190)

摘 要 四川页岩气勘探开发区块大多位于多期多组构造挤压作用叠加与联合的复向斜单元, 构造起伏较大、断层和裂缝非常发育, 常规的断裂预测技术无法兼顾不同级别的断裂系统预测。地震资料的不同频带可以反映不同的地质现象和裂缝信息, 低频体主要描述大断裂的信息, 高频体突出反映受大断裂控制的小断裂的信息, 因此, 文中从频率域出发, 利用频率域多尺度断裂检测技术与叠后常规地震断裂属性, 对工区不同尺度断裂体系综合进行精细描述。频率域多尺度断裂检测技术成功将约束最小二乘法频谱分解和不同频率域多种不连续性属性检测等 2 种技术结合起来, 使不同分辨率的地震记录通过不同尺度的不连续属性对比, 可以在突出大断裂的同时显示小断裂信息, 提高了解释精度, 使不同层次裂缝发育情况都能清晰展示出来。

关键词 频率域; 多尺度断裂; 频谱分解; 页岩气; 长宁地区

中图分类号: TE132.1+4

文献标志码: A

Application of frequency domain multi-scale fault detection technique in shale gas exploration in Changning region

CHEN Kelin¹, JING Cui¹, YANG Yang¹, REN Xiaoli¹, WANG Litian²

(1.Sichuan Changning Natural Gas Development Co., Ltd., Chengdu 610056, China; 2.Beijing Carrie Oriental Petroleum Technology Co., Ltd., Beijing 100190, China)

Abstract: Most of the shale gas exploration and development blocks in Sichuan are laid in the synclinal synclinorium units which are superimposed and united by multi-stage and multi-group tectonic compression, which have the large structural relief and well-developed faults and fractures, so the conventional prediction techniques can not meet the needs of different levels of faults and fractures. Different frequency bands of seismic data can reflect different geological phenomena and fracture information, the low frequency parts mainly describe the information of faults in large scale, while the high frequency parts mainly reflect the information of small faults controlled by large faults. Therefore, based on frequency domain, this paper uses the frequency domain multi-scale fault detection technique and post-stack conventional seismic fault attributes to finely describe the fault development of different scales. The multi-scale fault detection technique in frequency domain combines the constrained least-squares spectral decomposition and discontinuities detection technique in different frequency domains. By comparing the discontinuities of different scales, the seismic signals of different resolution can highlight large scale faults and show the information of small scale faults, which improves the accuracy of interpretation and makes the development of faults and fractures in all levels displayed clearly.

Key words: frequency domain; multi-scale fault; spectral decomposition; shale gas; Changning region

0 引言

四川盆地长宁地区下志留统龙马溪组页岩气资源丰富, 自 2012 年被确定为国家级页岩气示范区以来, 经过探索和实践, 为中国页岩气的勘探和开发积累了丰富的宝贵经验。长宁页岩气某区块位于长宁背斜的南部复杂带区域, 该区块为多期构造挤压作用叠加与

联合的复向斜单元, 构造起伏较大, 断层和裂缝都非常发育^[1-2]。研究区地质构造具有多期构造运动叠加的特征, 呈现出背斜与向斜相间分布、断裂十分发育的特征。长宁背斜轴迹呈北西—南东走向, 西北端向西南发

收稿日期: 2021-11-08; 改回日期: 2022-03-06。

第一作者: 陈珂磷, 男, 1989 年生, 工程师, 现主要从事油气勘探研究工作。E-mail: hxs_800005@petrochina.com.cn。

引用格式: 陈珂磷, 井翠, 杨扬, 等. 频率域多尺度断裂检测技术在长宁页岩气勘探中的应用[J]. 断块油气田, 2022, 29(3): 289-294.

CHEN Kelin, JING Cui, YANG Yang, et al. Application of frequency domain multi-scale fault detection technique in shale gas exploration in Changning region[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(3): 289-294.

生弯曲,背斜核部出露寒武系,外围依次出露奥陶系、志留系、二叠系、三叠系和侏罗系等。

该区发育多组系构造应力,形成了丰富的不同级别断层和裂缝,较大断距的断层在地震剖面上很容易识别,但是对于微小断层和裂缝,常规方法难以对其进行准确描述。随着该区页岩气勘探开发的不断深入,复杂的地下构造和断裂系统成为页岩气勘探与开发的主要挑战之一。断裂不仅对页岩层含气性造成影响^[3],而且复杂多变的断裂系统也导致了页岩气水平井在钻完井压裂和开发过程中发生井涌、井漏、压窜、套变等问题^[4-5]。因此,能否对不同尺度的断层和裂缝进行精细描述,是影响该地区页岩气勘探开发效果的重要因素。准确预测断层和裂缝系统可以及时预警钻井过程中可能发生的异常情况,为钻后压裂设计和施工参数的选择提供参考依据,也可以为压裂施工等作业对邻井的影响评估提供可靠的基础支撑数据。前人运用地震-地质-工程-经济一体化的思路进行综合研究^[6-7],提升了解决问题的综合能力。但是目前在精细刻画不同尺度的断层和裂缝方面仍存在挑战,因此,加大对小尺度断裂和裂缝的研究是本区页岩气勘探开发的重要方向。

利用地震资料进行微小断层和裂缝预测一直是世界性难题^[8]。目前应用较广泛的利用叠后地震资料进行断裂识别方法主要有相干体^[9]、曲率^[10]、方差体^[11]、最大似然体^[12]、谱分解技术^[13]、倾角导向技术^[14]、蚂蚁追踪技术^[15]及边缘检测技术等^[16],相干属性及其衍生出的不连续计算属性是最为普遍的断裂识别方法。

北京凯利东方石油科技有限公司姜仁旗院士及著名地球物理和岩石物理学家 John Castagna 教授带领团队研发的频率域多尺度断裂检测技术,另辟新径,从频率域出发,利用约束最小二乘法频谱分解技术^[17-19]和不同频率域多种不连续性检测技术^[20]相结合,通过对高分辨率谱分解基础上得到的不连续属性进行自适应主成分分析,生成复合断层和裂缝检测属性。该技术使用不同分辨率地震记录,通过不同尺度的不连续性属性对比,在突出大断裂的同时显示小断裂信息,提高了断层和裂缝的解释精度,使不同层次裂缝发育情况都能清晰展示出来,在国外大量的实践中取得了较为突出的效果^[17-20]。本文以长宁某区块为例,采用频率域多尺度断裂检测技术,对工区不同尺度断裂发育体系综合进行了精细描述,可以较好地识别大断层、小断层展布和裂缝发育带。

1 常规断裂检测方法

常规叠后断裂检测主要检测相对大级别的断层和

裂缝带,常规地震属性有相干体、相似体、方差体、最大曲率、反射强度、瞬时频率、地层倾角导数等。对于断层、裂缝带、河道和砂体边界等,这些技术具有较好的识别效果。

相干技术是通过计算道与道之间的局部不相似性,突出与构造相关的地震资料横向变化的技术。该技术对于大断裂识别较好,但是也存在几点不足之处:分辨率低,受计算时窗影响,相干识别的断点与剖面上真实断点存在较大误差;由于存在连续高相干特征现象,裂缝显示比较模糊(见图1)。

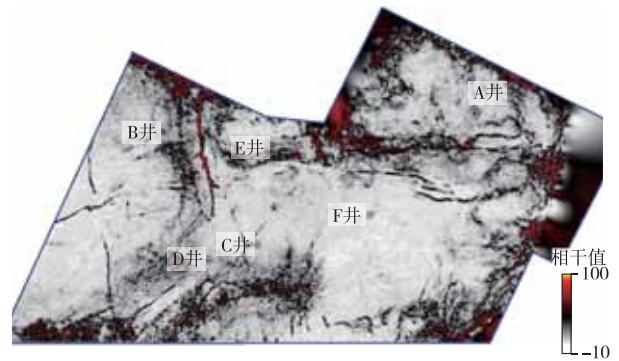


图1 沿五峰组底相干体切片

方差体技术是在误差分析理论上发展起来的,主要是通过计算平均地震道与道集内地震道之间的方差值来获取方差体,其结果突出了由异常地质体或断层所造成的地震异常反射。通过沿五峰组底方差体切片可以看出(见图2),断裂识别效果与相干体类似,相对大级别断层识别准确,但是对于微小断层和裂缝还是无法识别,无法满足随钻跟踪精细研究需要。

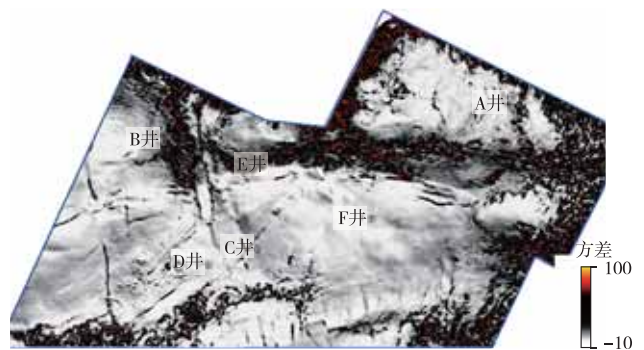


图2 沿五峰组底方差体切片

曲率是能够反映地层挠曲程度的一种地震属性,对较细微的岩层挠曲比较敏感,识别断裂比较清晰。虽然曲率切片在分辨率上较相干切片有所提升(见图3),但是信噪比相对较低,容易受噪声的污染,且对大尺度断裂刻画效果一般。

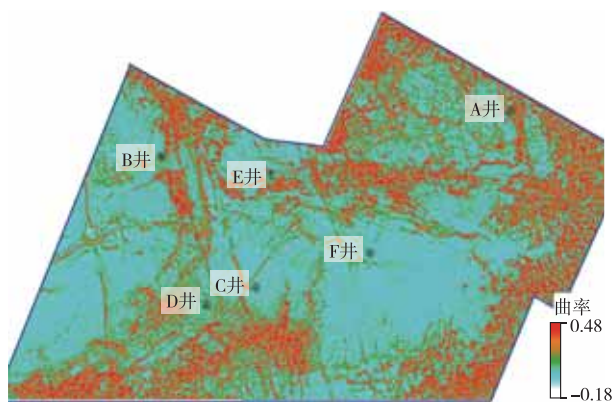


图 3 沿五峰组底曲率切片

2 频率域多尺度断裂检测技术

频率域多尺度断裂检测技术是一个包括约束最小二乘法频谱分解技术^[17-19]、频率域多种不连续性检测技术^[20]、断裂自动追踪技术等几个完整流程的技术系列。该技术系列实现了对弱地震异常响应的断裂识别,能更精确和更精细地提供断裂信息,是一种基于地震道高分辨频谱分解技术及多种不连续属性对比分析技术的断层识别与检测技术。

2.1 技术原理

在过去的十几年,频谱分解在精细地质解释中得到了广泛应用,这是由于频率变化的敏感性,许多细微的地层特征和含油气性在不同的频率段里得到更为精细的反映和识别。以往的频谱分解方法存在一定的局限性,John Castagna 教授通过修正傅里叶算法中窗口效应等的限制,研发出一种更为优越的算法——约束最小二乘频谱分析法(CLSSA)。该方法采用迭代加权的最小二乘正则化反演,结合复数域的约束来提高精度和结果稳定性。传统算法中对正演的表达式为

$$\mathbf{F}\mathbf{m}=\mathbf{d} \quad (1)$$

式中: \mathbf{F} 为核矩阵; \mathbf{m} 为模型参数向量; \mathbf{d} 为加窗口分析的地震数据。

为了降低反演结果的多解性,对式(1)中的模型和数据分别引入对角矩阵 \mathbf{W}_m 和 \mathbf{W}_d 来进行加权,逐步迭代 \mathbf{W}_m 。则式(1)可变为

$$\mathbf{W}_d\mathbf{F}\mathbf{W}_m(\mathbf{W}_m)^{-1}\mathbf{m}=\mathbf{W}_d\mathbf{d} \quad (2)$$

引入加权变量 \mathbf{F}_w 和加权变量 \mathbf{m}_w :

$$\mathbf{F}_w=\mathbf{W}_d\mathbf{F}\mathbf{W}_m \quad (3)$$

$$\mathbf{m}_w=\mathbf{W}_m^{-1}\mathbf{m} \quad (4)$$

则式(2)可变为

$$\mathbf{F}_w\mathbf{m}_w=\mathbf{W}_d\mathbf{d} \quad (5)$$

式(5)为模型和数据都加权的非正定反问题。该问题的求解可以变成式(6)的正定问题:

$$\|\mathbf{F}_w\mathbf{m}_w-\mathbf{W}_d\mathbf{d}\|^2+\alpha\|\mathbf{m}_w\|^2=\min \quad (6)$$

式中: α 为正则化参数。

$$\alpha=\alpha_f\left(\max\left|\text{diag}\left(\mathbf{F}_w\mathbf{F}_w^*\right)\right|\right) \quad (7)$$

式中: α_f 为分数乘运算; diag 为矩阵的对角元素。

α 随着迭代逐渐变化。根据上面的过程,可以求得模型参数的加权变量为

$$\mathbf{m}_w=\mathbf{F}_w^*\left(\mathbf{F}_w\mathbf{F}_w^*+\alpha\mathbf{I}\right)^{-1}\mathbf{W}_d\mathbf{d} \quad (8)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵。

最终反演结果,即模型参数:

$$\mathbf{m}=\mathbf{W}_m\mathbf{m}_w \quad (9)$$

这种算法处理的结果不受计算时窗或者分析子波的时间分辨率限制,在拥有较高时间分辨率的同时,还保持了较高的频率分辨率。该项技术使多种以前无法实现的一些应用构想成为可能,包括更精细的地层与构造成像、裂缝和断层的检测与量化、地震资料频带宽度的拓展及更为准确的烃类直接检测。

与其他不连续性检测属性一样,本文算法所提出的频率域断裂检测属性高度依赖于信噪比,因此,重要的是压制噪声处理。首先,在进行构造保持边缘滤波提高信噪比的基础上,采用约束最小二乘法频谱分解技术的分频算法,通过对数据体分频并重构,生成能反映不同尺度断裂的多个特征频率数据体;其次,对各个数据体分别进行多种不连续属性计算,利用对断层敏感性较强的几种属性,如曲率体、相干体、倾角方位角和混沌体等生成各种高分辨率属性体(一般可以得到近百个不连续性属性体),得到反映不同断裂尺度的断裂检测属性体;再次,利用自适应主成分分析(APCA)技术对这些不连续属性体进行降维处理,生成能够反映不同断裂尺度的综合断裂检测数据体;最后,进行滤波、光滑等后处理,去除随机噪声,使得结果信噪比更高。在此基础上可以进行断裂自动追踪和识别描述。

利用自适应主成分分析技术来计算不连续性综合数据体的过程主要包括:1)基于所有不连续性属性的协方差矩阵,通过欧氏距离计算各个成分的相似性,并基于每个成分选出与其相似性较高的成分,构成多个成分子空间;2)计算时通过核密度估算各个成分的变异概率,选择出变异概率最高的成分作为特征成分;3)挑选出与特征成分对应的成分子空间,并构造出综合不连续性属性数据体。

在实际工作中,频率域多尺度断裂检测技术步骤

为:1)对原始地震资料进行检查分析、保幅保真优化处理来压制噪声,提高断层和断点显示的清晰度,增强断裂检测处理的抗干扰能力;2)对叠后三维地震数据体进行高分辨率的频谱分解,生成一系列的单频数据体,得到相应多个频率的振幅体和相位体;3)对不同频率的振幅体和相位体进行边缘增强,通过识别不同频率上波形、振幅和相位等多种优选的不连续性属性,得到反映不同尺度的断裂检测属性体;4)使用自适应主成分分析法,得到最终的综合断裂检测数据体(见图4)。

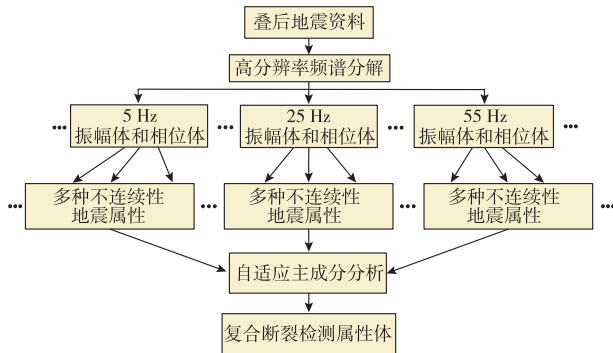


图4 频率域多尺度断裂检测技术流程

为了更加直观地表现频谱分解技术对不连续性分析的贡献,现利用最小二乘法频谱分解技术将原始地震进行频谱分解,选取其中3个分别代表高、中、低频谱的10,25,40 Hz单频体进行不连续性检测。

对比分析可知,低频体和中频体对规模大一些的断层识别效果非常好,而对规模相对小一些的断层及裂缝体系识别效果就不是很明显,甚至无法识别(见图5、图6)。

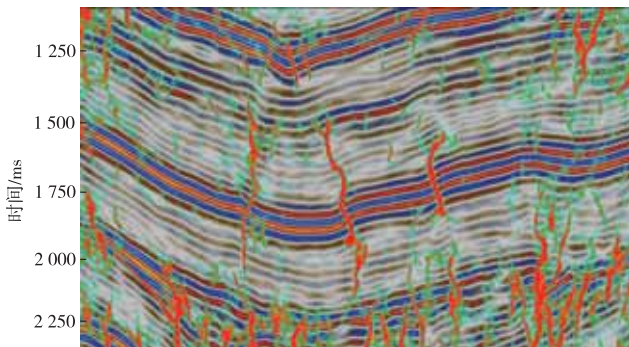


图5 频谱分解10 Hz单频体与不连续性检测

高频数据体对规模相对小一些的断层及裂缝体系识别效果要比低频数据体好,能识别更多的微小断裂(见图7)。

利用高分辨率频谱分解得到的高、中、低等不同频率的单频体进行断裂增强和检测,同时,通过RGB融

合技术将不同单频体的断裂检测体综合显示在一张平面图上,可以对多级别的断裂特征及规模进行描述,极大提高了对微小断裂的精细刻画能力(见图8)。

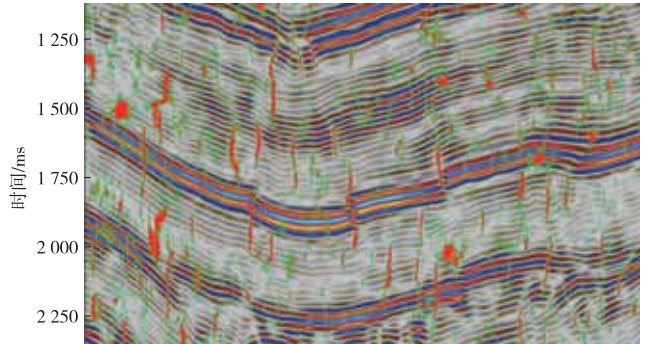


图6 频谱分解25 Hz单频体与不连续性检测

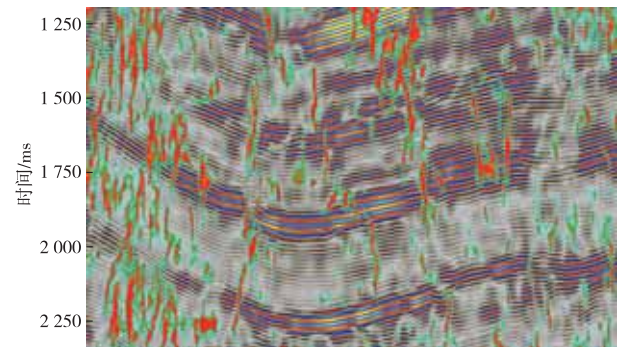


图7 频谱分解40 Hz单频体与不连续性检测

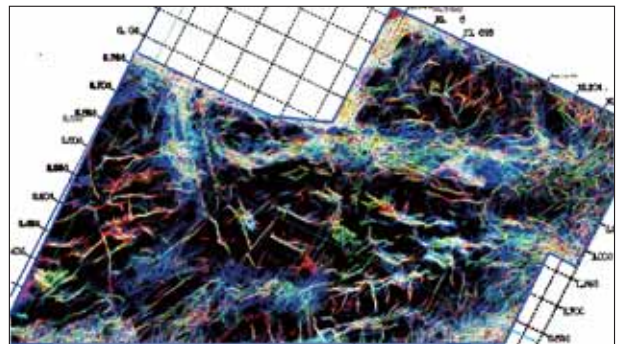


图8 断裂检测体RGB融合对多尺度断裂精细成像

频率域多尺度断裂检测技术的最大技术优势,就是基于约束最小二乘法频谱分解技术对不同频率域的多种不连续属性进行计算,使得地震反射中的不同级别的不连续性得到更为清楚和准确的反映和描述。具体来说,主要有以下特点:1)从频率域入手,能够实现弱地震响应对不连续性的识别,更精确地提供断裂信息,极大提高了断裂网格系统的可解释性。2)识别结果具有极高的垂向分辨率,对断裂位置和断距可以进行

精确的三维刻画。3)对断距微小、肉眼难以识别的走滑断层具有较好的识别效果。

2.2 多尺度断裂检测效果分析

通过对地震进行全频率扫描,在一系列单频体上进行不连续检测,从而得到能够反映不同尺度的综合断裂检测体。基于该断裂检测体沿层提取的龙马溪组底—五峰组平面裂缝预测成果显示(见图 9),该区为一多方受力的三角带,具压扭性特征。研究区存在裂缝相对集中的发育带,其中主要的裂缝发育带和区域大断裂走向基本一致,裂缝走向和分布与较大级别的断层方向基本吻合。

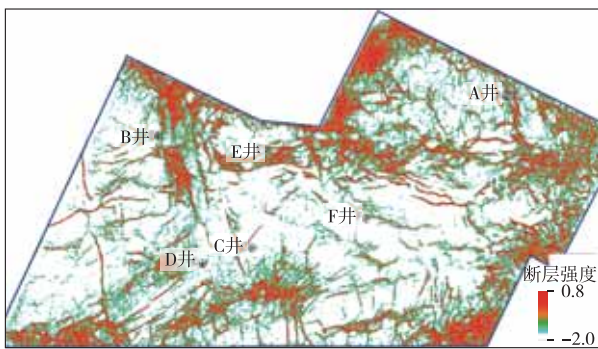


图 9 沿五峰组底频率域多尺度断裂检测切片

在垂向上,通过 Xline782 测线地震与多尺度断裂检测剖面叠合可以看出,频率域断裂检测能够对龙马溪组的小断层及裂缝(包括疑似断层、挠曲等形态)进行精细解释和刻画,凸显了地震在不同频率上对不同级别断层和裂缝的综合识别效果(见图 10)。

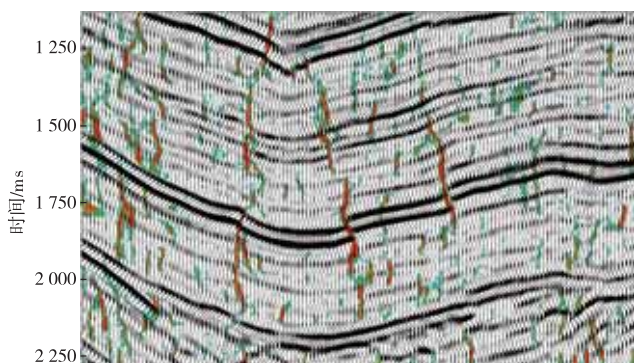


图 10 Xline782 测线地震与频率域断裂检测叠合剖面

断裂检测综合预测结果也经过了实钻井检验,获得了较好的预测效果(见图 11)。H1 水平井在钻井过程中钻遇小断裂,通过井震标定,将过井叠前时间偏移剖面与断裂检测结果叠合在相应的位置可以看出,在钻遇小断裂位置地震同相轴显示微幅挠曲,振幅能量发生变化,被识别为断层。与水平井实钻地质模型对比

分析表明,地震预测断层位置与实钻模型断层位置吻合非常好,说明多尺度断裂识别结果具有较高的可靠性和准确性。

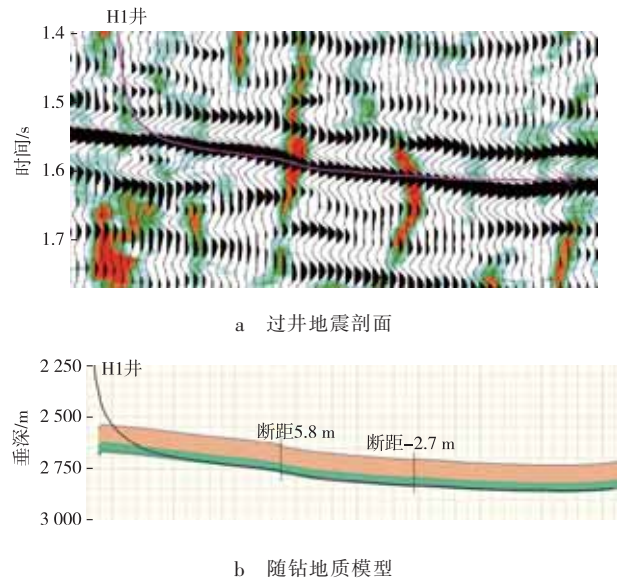


图 11 叠合剖面及随钻地质模型对比

此外,根据不同尺度的断裂分布特征,也可以精细研究断裂活动对页岩气的保存与破坏作用^[21-22],分析龙马溪组页岩气目的层微构造及变化机制^[22],为精细裂缝建模^[23]、测井评价和储层特征研究^[24-28]提供资料基础,为页岩气精细勘探开发提供依据。

3 结论

1)频率域多尺度断裂检测技术的最大优势就是增加了频率域的多种不连续属性信息,使得地震反射中不同级别的不连续性得到更为准确、清楚的反映和描述。该技术能同时得到平面和剖面上多尺度断裂系统的精细展布,比相干、曲率等传统的断层识别方法具有更高的分辨率和可靠性。

2)与其他断层检测方法相比,频率域多尺度断裂检测技术检测断层断点准确度更高,对剪切断层、高角度断层和微小断层具有更强的识别能力。

3)频率域多尺度断裂检测技术具有较高的创新性和实用性。该技术对不同频率的不连续性细微变化较为敏感,因此最终的识别结果受限于地震资料品质和成像的准确度及精度。

参 考 文 献

[1] 谢军,鲜成钢,吴建发.长宁国家级页岩气示范区地质工程一体化最优化关键要素实践与认识[J].中国石油勘探,2019,24(2):174-185.

- [2] 万远飞,秦启荣,范宇,等.长宁背斜龙马溪组页岩裂缝发育特征及期次解析[J].特种油气藏,2021,28(1):59-66.
- [3] 赵文韬,荆铁亚,吴斌,等.断裂对页岩气保存条件的影响机制:以渝东南地区五峰组—龙马溪组为例[J].天然气地球科学,2018,29(9):1333-1344.
- [4] 陈朝伟,石林,项德贵.长宁—威远页岩气示范区套管变形机理及对策[J].天然气工业,2016,36(11):70-75.
- [5] 任勇,钱斌,张剑,等.长宁地区龙马溪组页岩气工厂化压裂实践与认识[J].石油钻采工艺,2015,37(4):96-99.
- [6] 雍锐,常程,张德良,等.地质-工程-经济一体化页岩气水平井井距优化:以国家级页岩气开发示范区宁209井区为例[J].天然气工业,2020,40(7):42-48.
- [7] 谢军,张浩森,余朝毅,等.地质工程一体化在长宁国家级页岩气示范区中的实践[J].中国石油勘探,2017,22(1):21-28.
- [8] 何嘉,陈小强,韩翀,等.页岩气裂缝精细预测技术研究及应用:以长宁国家级页岩气示范区为例[J].天然气技术与经济,2019,13(6):20-27.
- [9] 韩磊,张宏,王劲松.分频相干技术在复杂断裂解释中的应用[J].复杂油气藏,2016,9(4):16-21.
- [10] 印兴耀,高京华,宗兆云.基于离心窗倾角扫描的曲率属性提取[J].地球物理学报,2014,57(10):3411-3412.
- [11] 汪杰,汪锐.基于方差相干体的断层识别方法[J].工程地球物理学报,2016,13(1):46-51.
- [12] 甄宗玉,郑江峰,孙佳林,等.基于最大似然属性的断层识别方法及应用[J].地球物理学进展,2020,35(1):374-378.
- [13] 杨艳,卢黎霞,龚志祥,等.谱分解技术在断层识别上的应用[J].复杂油气藏,2009,2(1):26-31.
- [14] 段友祥,曹婧,孙岐峰.自适应倾角导向技术在断层识别中的应用[J].岩性油气藏,2017,29(4):101-107.
- [15] 郭帅飞,杨飞.蚂蚁体断层识别技术在川东北的应用[J].石化技术,2021(4):120-121.
- [16] 马承杰.多尺度边缘检测技术在断层识别及裂缝发育带预测中的应用:以车排子地区排691井区为例[J].油气地质与采收率,2021,28(2):85-90.
- [17] PURYEAR C I, PORTNIAGUINE O N, COBOS C M, et al. Constrained least-squares spectral analysis: application to seismic data [J]. Geophysics, 2012, 77(5): 143-167.
- [18] SINHA A, ROUTH P S, ANNO P D, et al. Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform [J]. Geophysics, 2005, 70(6): 19-25.
- [19] CASTAGNA J P, SUN S J. Comparison of spectral decomposition methods [J]. First Break, 2006, 24(3): 75-79.
- [20] BARBATO U, CASTAGNA J, PORTNIAGUINE O, et al. Composite attribute from spectral decomposition for fault detection [M]. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2014: 2542-2546.
- [21] 郭卫星,唐建明,欧阳嘉穗,等.四川盆地南部构造变形特征及其与页岩气保存条件的关系[J].天然气工业,2021,41(5):11-19.
- [22] 张经国,陈伟,孟立丰,等.长宁页岩气田建武向斜构造解析及成因机制[J].油气勘探,2021,47(3):193-194.
- [23] 商晓飞,龙胜祥,段太忠.页岩气藏裂缝表征与建模技术应用现状及发展趋势[J].天然气地球科学,2021,32(2):215-232.
- [24] 李新发,李婷,刘博峰,等.基于压裂监测的致密储层甜点识别[J].断块油气田,2020,27(5):603-607.
- [25] 卢欢,牛成民,李慧勇,等.变质岩潜山油气藏储层特征及评价[J].断块油气田,2020,27(1):28-33.
- [26] 李春梅,彭才,韦柳阳,等.小尺度缝洞型碳酸盐岩储集体地震预测技术:以四川盆地台内GS18井区灯影组四段储层为例[J].断块油气田,2022,29(2):189-193.
- [27] 王志伟,张凯,张本华,等.胜利海上油田下古生界潜山油藏储层描述与开发调整[J].断块油气田,2022,29(2):178-182.
- [28] 丛平,闫建平,井翠,等.页岩气储层可压裂性级别测井评价及展布特征:以川南X地区五峰组—龙马溪组为例[J].岩性油气藏,2021,33(3):177-188.

(编辑 杨会朋)



网址:www.dkyqt.com

电话:0393-4820093;0393-4783601