

文章编号:0253-9985(2008)06-0758-06

桩海古潜山裂缝预测的方法研究

——以胜利油田桩海地区为例

鹿洪友^{1,2}, 陈小宏², 张如伟²

(1. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田有限公司, 山东 东营 257015;

2. 中国石油大学 CNPC 物探重点实验室, 北京 102249)

摘要: 裂缝性油气藏的产量占世界石油天然气总产量比重较大, 对裂缝性油气藏的研究已成为当今世界石油界的热点。由于裂缝分布复杂, 其识别工作便成为研究中难题。从胜利油田桩海区块的古潜山裂缝的实际资料出发, 利用小波分频处理和小波多尺度边缘检测等方法, 对地震记录进行处理, 一方面不仅改善了地震资料的品质, 另一方面又压制噪音, 突出了有效波, 有利于进一步研究构造与储层特征, 并达到预测裂缝最优的目的。

关键词: 二维小波变换; 多尺度边缘检测; 小波分频; 裂缝预测; 桩海古潜山

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

**Method study of fracture prediction in the Zhuanghai paleo-buried hill:
an example from the Zhuanghai area of Shengli Oilfield**

Lu Hongyou^{1,2}, Chen Xiaohong², Zhang Ruwei²

(1. SINOPEC Shengli Oilfield Company Ltd., Dongying, Shandong 257015, China;

2. CNPC Key Laboratory for Geophysical Exploration, China University of Petroleum, Beijing 100049, China)

Abstract: Output from fractured reservoirs takes up a big chunk in world's total oil and gas production. Study of fractured reservoirs has become a focus of the industry. However, due to a complicated distribution of fractures, the identification of the fractures has been a headache for researchers. Based upon the real data of fractures in paleo-buried hill of the Zhuanghai area, Shengli oilfield, we processed seismic data by employing wavelet frequency division processing method and multiscale edge detection. As a result, effective waves are highlighted as the quality of seismic data is improved and the noise is eliminated. This is favorable for the further research of reservoirs in structural domain and optimization of fracture prediction.

Key words: two-dimension wavelet transform; multi-scale edge detection; wavelet frequency division; fracture prediction; Zhuanghai paleo-buried hill

裂缝是指由于构造变形作用或物理化学成岩作用, 在岩石中形成的宏观面状不连续, 在应力作用下岩石未发生明显位移的破裂, 是低渗透油气藏的重要储集空间与运移通道。

在利用地震资料进行裂缝预测方法技术方面, 人们作了大量的工作^[1-3]。目前利用地震资料进行裂缝检测主要包括纵波分析检测、转换波

分析检测、横波分析检测、多方位 VSP 检测等方法。由于目前技术的限制, 利用纵波法进行裂缝型储层预测更有现实意义^[4], 而这种裂缝预测的研究主要集中在地震正演模拟、速度分析、属性分析、AVO 分析、分形技术等方面^[5,6]。

小波多尺度边缘检测技术在近几年的不断发展与应用中, 取得了许多成果。本文基于小波多

收稿日期: 2008-10-12。

第一作者简介: 鹿洪友(1965—), 男, 高级工程师, 油气田开发地质。

基金项目: 中国石油天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目(970211)。

尺度边缘检测方法,对胜利油田桩海区块的古潜山裂缝进行了预测,取得了一些认识和重要成果,给油气勘探和开发提供了有用的信息。

1 地震资料特殊处理

针对工区的实际地质条件和地震资料的特点,选择合适的地球物理方法对地震记录进行处理会改善地震资料的品质。几年来的探索和研究发现,采用小波分频处理在提高地震记录分辨率的同时,可以压制噪音、突出有效波,有利于进一步研究构造特征和储层特征。

1.1 小波分频处理方法原理

所谓小波分频是指利用小波变换这一数学分析方法的高分辨功能和优良的“数学放大镜”特性,将地震记录分解为一系列具有中心频率的窄带地震剖面,称其为小波分频剖面,各分频剖面的集合即小波分频。在该域中隐蔽圈闭的横向分辨率较高,纵向分辨率不高,我们提出的“沿层分频处理”、“高分辨率剖面重建”等新方法,纵、横向分辨率均有很大的提高,可以超过 Widess 定义在时空域中的分辨率极限。

地震记录的小波分解与重建是地震资料分频处理的基础,而把单张地震剖面分解为不同频段的分频剖面是以单道地震记录的小波分解为基础的。

首先在不同尺度因子上对地震信号进行分频处理^[1~3,7]:

$$S_i(b) = \frac{1}{c_g} \int_{a_{i-1}}^{a_i} \frac{1}{a^2} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) g_R\left(\frac{t-b}{a}\right) dt da \quad (1)$$

式中: a 为尺度因子, b 为时间因子。

其中:

$$g = 2\pi \int \frac{|\bar{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega \quad (2)$$

$$\bar{\psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int \Psi(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

然后对每个尺度作能量标定,确定最佳重构系数:

$$c_{ij} = \frac{\sum_{k=j-NL/2}^{j+NL/2} |X_{S_i}[k]|^2}{\sum_{k=j-NL/2}^{j+NL/2} |X_{w_i}[k]|^2} \quad (4)$$

最后重构地震信号:

$$S(b) = \frac{1}{c_g} \sum_{i=1}^N c_i(b) \int_{a_{i-1}}^{a_i} \frac{1}{a^2} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) g_R\left(\frac{t-b}{a}\right) dt da \quad (5)$$

该方法的关键技术包括:付氏谱分解+小波包分解技术;有效波(与储层有关)与背景信息(与储层无关,如层间子波等)分离技术;付氏谱重构+小波包重构技术。

1.2 实现流程与效果分析

小波正变换将信号分解为很多频率窄带,对这些含不同频率成份的频率窄带进行分析得到分频剖面,通过对分频剖面作类似于谱白化的处理,可获得纵向上有较高分辨率的结果,最后,利用小波反变换对谱白化结果进行精确重建,即可完成小波分频高分辨率处理,具体实现步骤见高分辨处理流程(图1)。

通过小波分频处理前后其频谱对比分析(图2),可以看到处理后的剖面主频略有提高,由 22 Hz 提高到 25 Hz,频带宽度由原来的 26 Hz 提高到 37 Hz,高频成分的能量得到加强,噪音被适当压制,因此地震剖面同相轴的横向变化特征被突出出来,频率提高了,能量增强了,噪音减少了,波组关系和特征更明显,各种干扰波明显减少,整个地震剖面品质尤其是潜山内幕地震品质得到一定程度的改善(图3),为下步的潜山裂缝预测奠定了良好的资料基础。

2 古潜山面的层位标定

碳酸盐岩的裂缝检测是在三维地震数据沿层切片上进行的,因此,在形成切片数据前进行层位标定准确与否直接影响到裂缝检测的效果。

采用合成地震记录进行各反射层对应的地质层位标定。合成地震记录是借助声波测井资料、密度资料和地震子波等褶积获得的。在计算参数

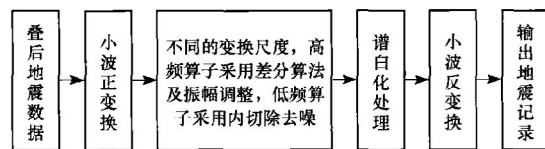


图1 小波分频高分辨处理流程图

Fig. 1 Flow chart of high-resolution frequency-division processing of wavelet

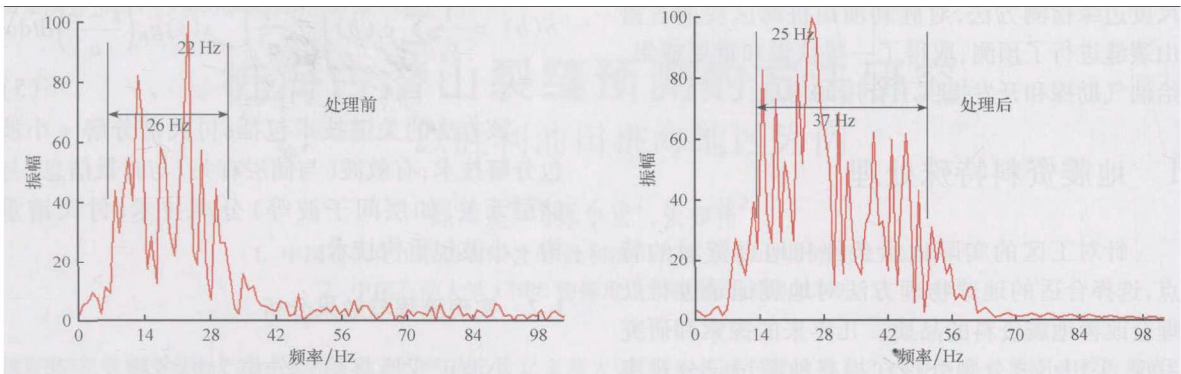


图 2 小波分频处理前后频谱对比

Fig. 2 Graphs showing the differences of spectrums before and after frequency-division processing of wavelet

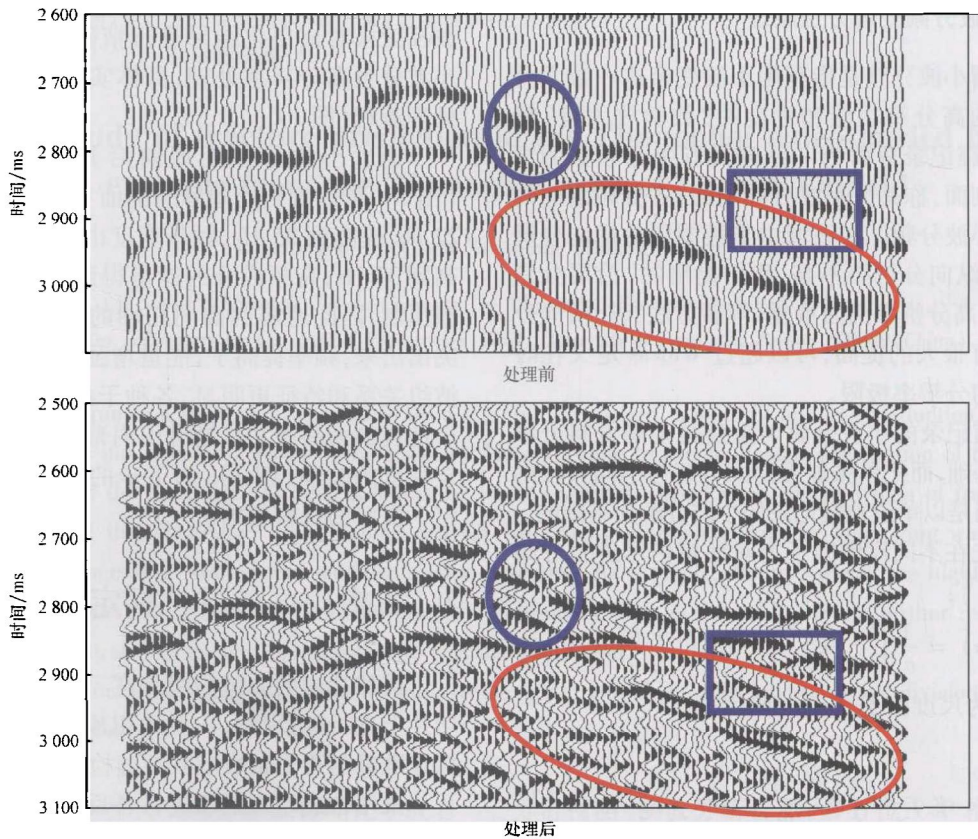


图 3 T468 道处理前后地震特征对比

Fig. 3 Graphs showing the differences of reflectance signatures of T468 gather before and after processing

选择恰当的情况下,合成记录与野外地震记录极为相似,这时,就可反过来找出地震反射和地质层位间的对应关系,准确标定地震地质层位。

在利用合成地震记录准确标定层位的基础上,对目的层碳酸盐岩顶面反射进行精细解释,获得所需的地质层位数据,最后形成碳酸盐岩顶面

沿层切片数据,为下步的裂缝检测做好准备。

本区潜山顶面为下古生界海相碳酸盐岩地层与上覆中生代陆相碎屑岩地层呈角度不整合接触,无论从地震反射特征还是地层产状及其接触关系上,大部分地区都可较容易地识别二者之间的界面—潜山顶面(图 4)。

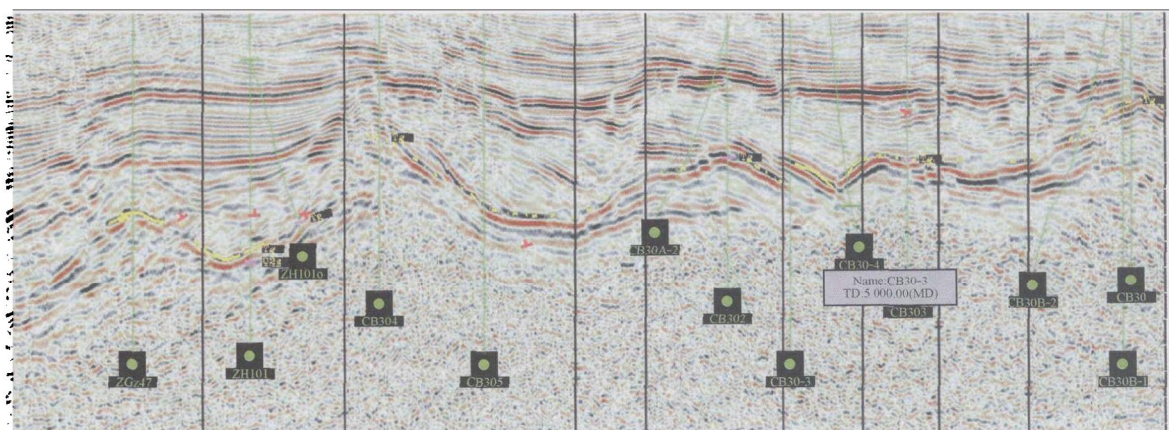


图4 古潜山顶层位标定解释过井地震剖面

Fig. 4 Calibration of top buried hill on well-tie seismic section

3 小波多尺度边缘检测方法预测裂缝

3.1 不同裂缝的地震响应

地震波场对裂缝的多尺度效应指的是不同振幅、频率和波长的地震波场对不同尺度裂缝的响应不同^[8-13],它是地震资料预测岩石裂缝的首要考虑因素。1998年贺振华教授等通过理论测试研究发现,裂缝的张开度变化对纵波特征影响明显。随裂缝张开度的减小,纵波速度、振幅、主频和品质因子及其变化率增加(表1)。如用裂缝尺度的大小来表述裂缝的张开度变化,裂缝尺度愈小(强度小),纵波的主频、振幅、速度及品质因子就愈大^[9,14]。

3.2 多尺度边缘检测原理

由Canny边缘检测定义,对三维地震数据的层切片 $f(x, y)$ 进行多尺度边缘检测,等价于寻找小波变换模的局部极值,利用这些模局部最大值

点就可以确定 $f(x, y)$ 的剧烈变化点或边缘点,对边缘的检测和范围的确定可分3步来进行^[4-6]:

3.2.1 $f(x, y)$ 进行二维小波变换

设 $\theta(x, y)$ 是平滑函数, $\theta'_x(x, y)$ 和 $\theta'_y(x, y)$ 为锐化函数:

$$\Psi^1(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} \quad (6)$$

$$\Psi^2(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \quad (7)$$

则函数 $\Psi^1(x, y)$ 与 $\Psi^2(x, y)$ 是二维小波。引入记号:

$$\Psi_s^1(x, y) = \frac{1}{s^2} \Psi^1\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (8)$$

$$\Psi_s^2(x, y) = \frac{1}{s^2} \Psi^2\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (9)$$

则对于二维信号 $f(x, y)$ 上某一个点 (x, y) ,其在水平与垂直方向关于 $\Psi^1(x, y)$ 和 $\Psi^2(x, y)$ 的规范小波变换具有两个分量:

$$w_s^1 f(x, y) = f(x, y) * \Psi_s^1(x, y) \quad (10)$$

$$w_s^2 f(x, y) = f(x, y) * \Psi_s^2(x, y) \quad (11)$$

表1 纵波垂直穿过裂缝时裂缝张开度对纵波特征影响的实测结果

Table 1 Measured effect of fracture aperture upon compressional wave characters when the wave crossing vertically through the fractures

压力/ kN	张开度减 少量/ μm	纵波速 度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	纵波速度 变化率, %	纵波器 质因子	纵波品质因 子变化率, %	纵波振 幅/m	纵波振幅 变化率, %	纵波主 频/kHz	纵波主频 变化率, %
1.0	0	3 247	0	10.06	0	0.034 0	0	625.5	0
3.0	1.964	3 283	1.904	10.37	3.02	0.129 4	280.5	715.7	14.48
5.0	2.722	3 310	1.938	11.15	10.85	0.201 1	491.2	793.4	26.90
8.3	3.720	3 330	2.538	12.22	21.47	0.277 9	717.0	823.1	31.65
10.0	4.720	3 342	2.909	12.57	24.97	0.325 1	857.7	817.4	30.74
15.0	5.923	3 365	3.619	15.29	51.93	0.407 1	1 096.8	885.2	41.59
20.0	6.958	3 376	3.986	16.22	61.22	0.467 5	1 274.4	899.2	43.81

式中 * 为褶积符号。

由此可证

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} w_s^1 f(x, y) \\ w_s^2 f(x, y) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} [f(x, y) \theta_s(x, y)] \\ \frac{\partial}{\partial y} [f(x, y) \theta_s(x, y)] \end{bmatrix} \\ &= S \nabla [f(x, y) \theta_s(x, y)] \quad (12) \end{aligned}$$

$$\theta_s(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}c} e^{-\frac{x^2+y^2}{2c^2}} \quad (13)$$

上式为二维 Gauss 函数,其伸缩后为小波函数 $\theta_s(x, y)$, c 为常数, S 为尺度。

3.2.2 确定小波变换模值及边缘方向

在对 $f(x, y)$ 进行小波变换后,检测的边缘点是其小波变换模值在梯度方向上的局部极大值点,也就是曲面 $[f(x, y) \theta_s(x, y)]$ 的一些拐点。在尺度 S 上,梯度矢量模为:

$$Mf(x, y) = \sqrt{|w_s^1 f(x, y)|^2 + |w_s^2 f(x, y)|^2} \quad (14)$$

矢量与水平方向夹角为:

$$\beta = A_s f(x, y) = \arctg \frac{|w_s^2 f(x, y)|}{|w_s^1 f(x, y)|} \quad (15)$$

所以在水平方向夹角为 β 的方向上,其一阶方向导数为:

$$D'_s(x, y, \beta) = w_s^1(x, y) \cos \beta + w_s^2(x, y) \sin \beta \quad (16)$$

此时我们只需检测到在某一方向的方向导数出现零交叉,则可断定此点为 $f(x, y)$ 边缘。

3.2.3 确定边缘范围

根据小波在任意尺度上具有连续性的特点,在图像 $f(x, y)$ 平面中梯度矢量所指的方向上,一

个模极小必然介于两个模极大之间。这样,模极大可以看成是相邻模极小的“分界”,所以我们可以选定这两个模极大之间的区域为 $f(x, y)$ 边缘所覆盖的范围。在实际应用时,对三维地震记录可在相应尺度范围内分别检测出模极大值点和极小值点,同时记录下极值点的线、道号位置以及模值 $M_s f(x, y)$ 和角度 β 的大小。为了在三维切片上直观地展示出裂缝发育区和不发育区的变化范围,可以对检测出的极值设定阈值加以限制,如对极小值点的最大灰度限制和极大值点的最小灰度限制等,这些阈值是根据钻井、测井资料得到的裂缝分级和该区裂缝分布的总体特点而定的。

4 实际预测效果分析

通过统计裂缝预测结果与井吻合情况来说明本方法对裂缝预测的精度和可靠性。ZH10 井等 7 口井 8 个产油气层段裂缝与预测结果的统计分析,吻合的占 7 个,基本吻合为 1 个,表明多尺度边缘检测方法具有较好的实用性和可靠性。

ZH10 井位于本区块中东部,钻探潜山低部位,4 275 m 开始进(潜)山,4 278.16 ~ 4 328.08 m 用 10 mm 油嘴试油 8 h,经折算日产油 252 t,气 67 840 m³,未见水。从井资料可知,该井打在裂缝发育区,从裂缝预测剖面看(图 5),ZH10 井一进潜山后便为一大套的边缘异常(大致到 4 370 m),从裂缝检测切片上看,进潜山 8 ms(约进潜山 30 m)后至 20 ms(进山 80 m),ZH10 井均落在裂缝发育区,且这些裂缝的连接性(平面)较好,连通面积大,这也是 ZH10 井获得高产的重要原因(图 6)。

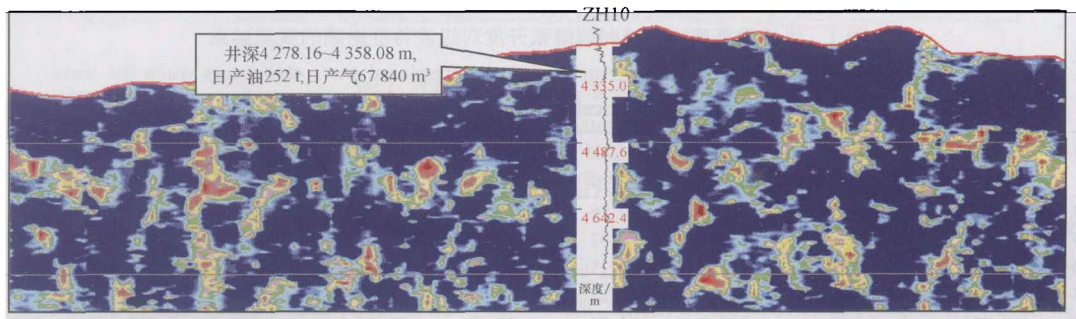


图5 过 ZH10 井裂缝预测剖面

Fig. 5 Fracture prediction profile tied to Well ZH-10

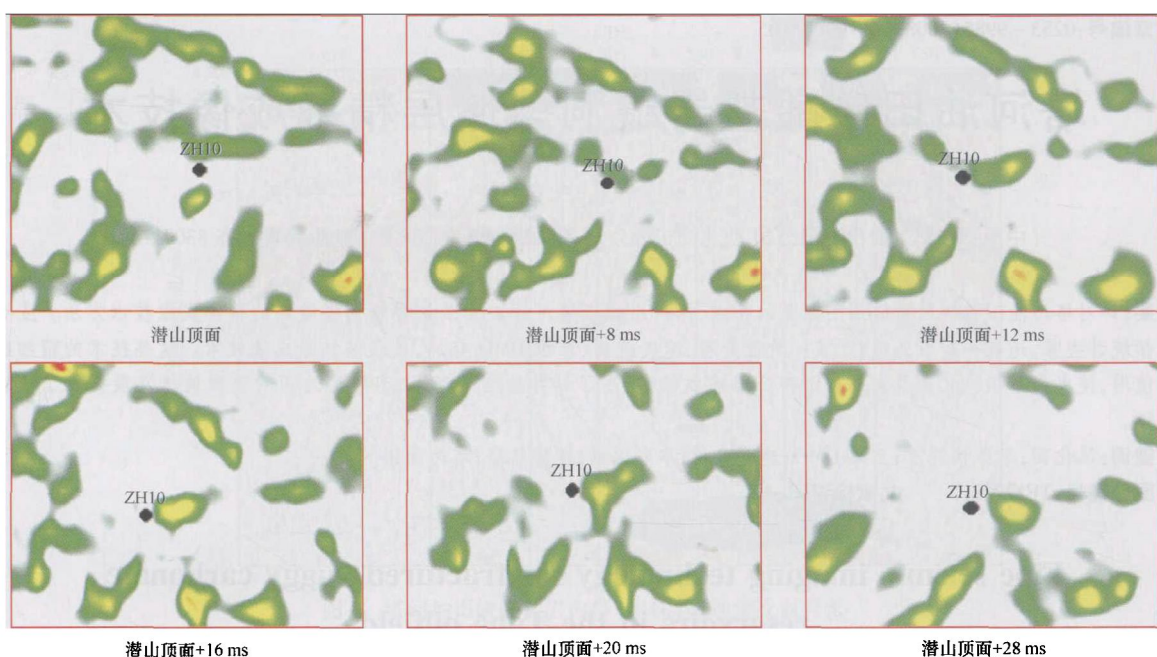


图6 ZH10井不同深度地震裂缝预测

Fig. 6 Seismic fracture prediction in different depths of Well ZH-10

5 结论

1) 研究区裂缝沿断裂分布,分布面积与密度与断裂规模、产状和活动性有关;大断裂交叉、会合地带为裂缝发育区;地层产状较陡的处裂缝发育;地层弯曲强烈的地带、地层产状发生变化的转折带往往裂缝发育。

2) 小波分频处理技术使地震资料主频得到提高,频带明显拓宽,由 26HZ 拓宽到 37HZ,噪声得到有效压制,使潜山面及潜山内幕地震资料品质得到一定程度的改善。

3) 小波多尺度边缘检测经胜利油田桩海工区三维地震资料处理证明,该方法能够在地层中提取较丰富的裂缝分布细节,而且地震预测与钻井、测井裂缝解释结果吻合率较高。

参考文献

- 康志江,李江龙,张冬丽,等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏渗流特征[J]. 石油与天然气地质,2005,26(5):634~640,673
- 魏福军,高志前,樊太亮,等. 塔里木盆地塔中地区输导体系及成藏效应[J]. 石油与天然气地质,2007,28(2):266~273
- 曾大乾,张世民,卢立泽. 低渗透致密砂岩气藏裂缝类型及特征[J]. 石油学报,2003,24(4):36~39
- 黄捍东,胡光岷,贺振华,等. 利用多尺度边缘检测研究碳酸盐岩裂缝分布[J]. 物探化探计算技术,2000,22(1):2~25
- 贺振华,黄捍东,胡光岷,等. 地下介质横向变化的地震多尺度边缘检测技术[J]. 物探化探计算技术,1999,21(4):289~294
- 苟量,彭真明. 小波多尺度边缘检测及其在裂缝预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2005,40(3):309~313
- 王西文,刘全新,高静怀,等. 地震资料在小波域的分频处理与重构[J]. 石油地球物理勘探,2001,36(1):78~85
- 胡光岷,贺振华,黄德济,等. 利用纵波资料反演裂缝发育密度和方向[J]. 成都理工学院学报,2000,27(2):145~150
- 贺振华,黄德济. 复杂油气藏地震波场特征方法理论及应用[M]. 成都:四川科学技术出版社,1999
- 胡宗全,廖红伟,刘人和. 分砂层地质曲率分析在裂缝预测中的应用[J]. 石油实验地质,2002,24(5):450~454
- 韩革华,漆立新,李宗杰,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):860~870
- 李书恒. 靖安油田长6层裂缝研究[J]. 低渗透油气田,2001,6(6):98~102
- 魏春光,雷茂盛,万天丰,等. 古龙-徐家围子地区营城组古构造应力场数值模拟——构造裂缝发育区带预测及对比研究[J]. 石油与天然气地质,2006,27(1):78~84,105
- 钟森. 反射地震记录的多尺度边缘检测[J]. 石油地球物理勘探,1998,33(1):61~65

(编辑 董立)