

窄方位角地震数据预测裂缝储层方法

苏世龙*^{①②} 胡丹^② 黄志^③ 贺振华^① 王九拴^② 李虹^②

(^①成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室,四川成都 610059; ^②东方地球物理公司研究院资料处理中心,河北涿州 072750; ^③东方地球物理公司物探技术研究中心,河北涿州 072750)

苏世龙,胡丹,黄志,贺振华,王九拴,李虹. 窄方位角地震数据预测裂缝储层方法. 石油地球物理勘探,2015,50(3):510-515.

摘要 现场试验和理论研究表明,裂缝的各向异性会对地震波传播特征产生影响,因此可以利用现有的窄方位角地震数据进行分方位角处理、解释来预测裂缝性储层。文中结合窄方位角地震数据的分方位角处理、解释与地震属性分析等技术对 M 区的裂缝发育区域进行预测,关键技术如下:①通过采取限炮检距的措施,使分方位角处理数据在不同方位角的分布较均匀;②在进行数据规则化时,采用三维插值技术或 OVT 域处理技术,而不采用面元均化技术或其他缺失方位角和炮检距信息的数据规则化处理技术,有利于进行方位各向异性分析和裂缝预测;③采用全方位角数据解释的叠前时间偏移速度场作为最终的分方位角叠前时间偏移速度场而有别于常规方法;④通过叠前振幅随方位角变化定量识别和表征裂缝的走向、密度及分布范围,通过属性分析定性识别和表征裂缝的走向、密度及分布范围。结果表明:叠后地震属性反映的裂缝发育方向与区域地质和钻井资料揭示的裂缝发育方向一致,以北东东向、北西西向为主要优势方向;叠前地震属性可定量检测裂缝发育程度;预测结果与非零井源距 VSP 测井解释结果相吻合。

关键词 裂缝 各向异性 分方位角 地震属性 窄方位角

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.03.018

1 引言

如今全球石油天然气产量有一半以上产自裂缝性储层。裂缝性储层在各个地质历史时期均有分布,岩石类型包括碳酸盐岩、变质岩、火成岩、致密砂岩和致密泥岩等。裂缝的地质成因复杂,分为构造裂缝、区域裂缝、收缩裂缝、卸载裂缝和风化裂缝等^[1]。由于裂缝发育受多方面的因素控制,分布复杂、规律性差,其预测和识别难度大^[2]。在地球物理领域预测和识别裂缝一般采用以下技术:多分量转换波裂缝检测;纵波方位各向异性检测;叠后地震属性分析。其中多分量转换波裂缝检测技术由于受成本的限制,难以大规模使用,而纵波方位各向异性检测和叠后地震属性分析成为主流技术。利用纵波方位各向异性技术检测裂缝的最佳资料是宽方位角地震数据,但由于受勘探精度和勘探风

险的制约,宽方位角采集还没有大规模实施,因此利用各工区现有的窄方位角地震数据进行分方位角处理、解释已成为预测裂缝性储层的关键技术。本文就利用窄方位角地震数据的分方位角处理、解释和地震属性分析等技术预测裂缝性储层进行了有益尝试和探索。

2 裂缝性储层地震数据处理、解释技术理论基础

介质的各向异性是指介质的弹性性质随着方向而变化。地下裂缝介质一般表现为 HTI 介质,当入射纵波沿裂缝不同方位入射时,在平行和垂直于裂缝走向的方向上,地震波的速度、振幅、衰减和主频等属性参数有较大的变化。在 HTI 介质之上覆盖着均匀各向同性介质的情况下,Rüger^[3]给出了 HTI 介质的 Zoeppritz 方程的近似公式

* 河北省涿州市东方地球物理公司研究院处理中心,072750。Email:87271036@qq.com

本文于2013年10月9日收到,最终修改稿于2015年3月16日收到。

$$R_p(i, \phi) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} - \left(\frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} + \left[\Delta \delta^v + 2 \left(\frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \Delta \gamma \right] \cos^2 \phi \right\} \times \sin^2 i + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} + \Delta \epsilon^v \cos^4 \phi + \Delta \epsilon^v \sin^2 \phi \cos^2 \phi \right\} \times \sin^2 i \tan^2 i \quad (1)$$

式中: $R_p(i, \phi)$ 是由入射角 i 、观测方位角 ϕ 决定的纵波反射系数; α, β 分别为纵、横波速度; $\frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z}$ 为纵波波阻抗差与平均波阻抗之比; $G = \rho \beta^2$ 为横波模量; $\Delta(\cdot)$ 表示界面上、下参数值的差(即均匀层和 HTI 介质的参数值之差); ϵ, δ, γ 为 Thomsen 各向异性参数; 上标 v 表示波垂向传播的值(对应 VTI 介质), 字符上的横线表示界面上、下参数值的平均值(即均匀层和 HTI 介质的参数值的平均值)。

当观测方位与裂缝平行时, $\phi = 90^\circ$, 此时式(1)简化为各向同性介质中的 AVO 公式; 当观测方位与裂缝垂直时, $\phi = 0^\circ$, 此时式(1)简化为

$$R_p(i, 0) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} - \left(\frac{2\bar{\beta}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \times \left(\frac{\Delta G}{G} - 2\Delta \gamma \right) + \Delta \epsilon^v \right] \times \sin^2 i + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \alpha}{\bar{\alpha}} + \Delta \epsilon^v \right) \sin^2 i \tan^2 i \quad (2)$$

由于此时波沿定向裂缝的垂直方向传播, 表现为最大的各向异性。在实际情况下, 当入射角较小时, AVO 的梯度项系数可分解为各向同性项和各向异性项之和。设随方位角 ϕ_k 变化的梯度项为 $B(\phi_k)$, 各向同性项系数为 B^{iso} , 各向异性项系数为 B^{ani} , 则

$$B(\phi_k) = B^{\text{iso}} + B^{\text{ani}} \cos^2(\phi_k - \phi_{\text{sym}}) \quad (3)$$

式中 ϕ_{sym} 为沿裂缝带对称轴方向的方位角。式(3)

是振幅随方位变化分析的基本公式。在实际工作中, 通过分析区域构造和断裂特征, 可以预测裂缝发育的有利区带和优势方向。结合采集参数, 将地震数据划分成不同方位的数据体, 利用相应软件进行裂缝分析计算, 并进行椭圆拟合。其中裂缝的方位可由椭圆的长、短轴方位确定, 椭圆的长、短轴长度之差反映了裂缝介质的各向异性强度。在梯度项系数 $B(\phi_k)$ 中, 没有反映各向异性系数 ϵ 的影响(ϵ 只出现在高阶项中, 在实际椭圆拟合时, 对梯度的变化无影响^[4]), 当缺少大入射角(即大炮检)数据时, ϵ 的影响可以忽略。

贺振华等^[5]根据实验结果指出, 地震波的运动学和动力学属性参数均可用于检测裂缝的结构和分布特征, 但不同属性参数对裂缝特征的敏感程度是不一致的, 如横波速度和振幅随偏振方向与裂缝方位的夹角变化的幅度是不同的(速度相对变化约为 5%, 振幅的相对变化可达 200%)。以张开度为例, 裂缝张开度的变化可引起地震波速度增加 4%, 品质因子增加 70%, 振幅增加 1200%, 主频增加 44%。显然, 速度的相对变化是最小的, 振幅的相对变化比速度的相对变化大 3 个数量级, 说明利用地震波的振幅、衰减和主频等属性参数检测裂缝特征较速度参数更可靠。

3 裂缝性储层地震处理技术

3.1 分方位角处理技术

在 M 区采集的地震数据纵横比为 0.44, 属于窄方位角数据, 主方位角为 112° 。图 1 为 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 面元内覆盖次数和方位角关系图, 图 2 为 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 面元内炮检距和方位角关系图, 从图 1、图 2 中可以

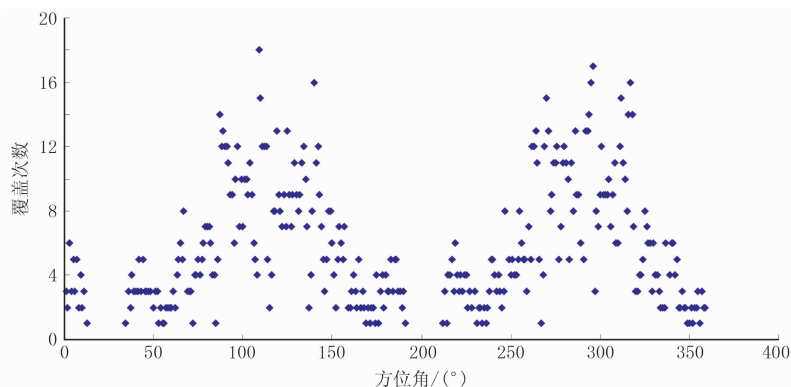


图 1 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 面元内覆盖次数和方位角关系图

看出,在主方位角 112° 和 302° 方位角覆盖次数最高、炮检距最大,而与其相垂直的两个方位角(22° 和 212°)的覆盖次数最低、炮检距最小,若这样进行分方位角处理,由于覆盖次数和炮检距不均对方位各向异性的影响很难消除。为此,文中采用下面的处理措施:在 $0\sim 2000\text{m}$ 炮检距范围内进行分方位角

处理,以保证在不同方位角范围内具有基本相同的覆盖次数和炮检距分组。图 3 为在 $0\sim 2000\text{m}$ 炮检距范围内覆盖次数与方位角关系图,从图中可以看出,在不同方位角内覆盖次数和炮检距分组较均匀,能满足纵波各向异性分方位角裂缝预测和识别的要求。

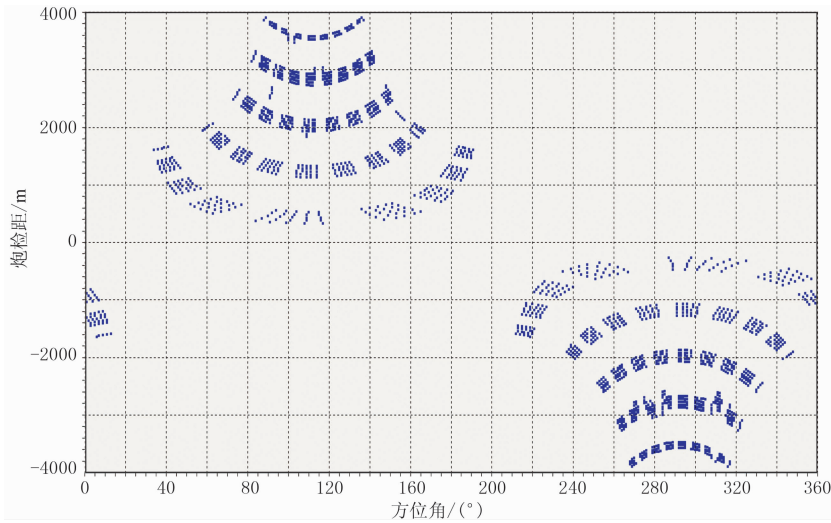


图 2 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 面元内炮检距和方位角关系图

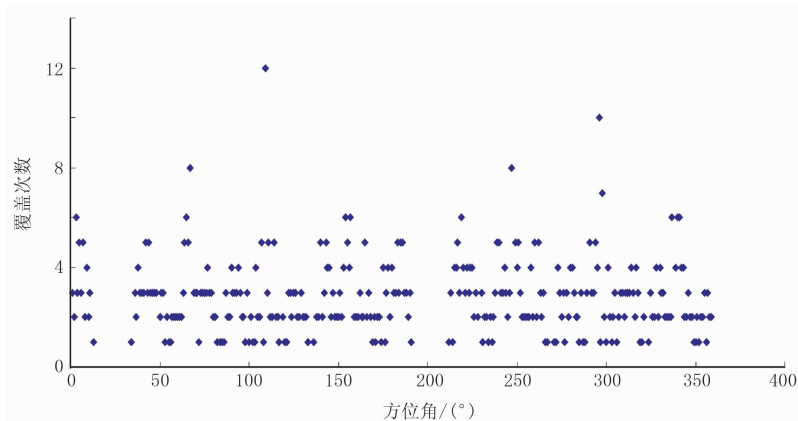


图 3 在炮检距 2000m 范围内覆盖次数与方位角关系图

根据区域构造和断裂特征分析,该区裂缝发育的优势方位为北东东向,接近于 72° ,因此本次分方位角处理分四个角度,分别为 112° 、 72° 、 152° 、 22° ,其对应的数据范围见表 1。

表 1 分方位角角度及数据范围

| 方位角 | 数据范围 |
|-------------|--|
| 112° | $92^\circ\sim 132^\circ$, $272^\circ\sim 312^\circ$ |
| 72° | $52^\circ\sim 92^\circ$, $232^\circ\sim 272^\circ$ |
| 152° | $132^\circ\sim 172^\circ$, $312^\circ\sim 352^\circ$ |
| 22° | $352^\circ\sim 0^\circ\sim 52^\circ$, $172^\circ\sim 232^\circ$ |

3.2 数据规则化处理技术

数据规则化技术是保幅偏移成像技术的关键环节。野外地震数据采集受到地表条件变化的影响,使得炮、检点布置不均匀,从而引起三维面元属性的变化。在三维数据体上,这种由于受到不规则的采集观测系统引起的振幅异常变化(如采集脚印),将影响后续振幅属性解释结果的可靠性。通过采取限炮检距的措施,使本次分方位角处理数据在不同方位角的分布较均匀,但仍然还不能解决由于观测系统设计造成的三维面元内覆盖次数和炮检距分布不

均匀的问题。文中在进行数据规则化时,采用五维插值技术或 OVT 域处理技术,而不采用面元均化技术^[6]或其他缺失方位角和炮检距信息的数据规则化处理技术,能保持炮检距和方位角信息,有利于方位各向异性分析和裂缝预测。

3.3 三维叠前时间偏移处理技术

地震数据处理实践和实验室测试结果表明:①在实际地震数据处理中,分方位角处理使地震数据的覆盖次数和信噪比降低,偏移速度的拾取将有更大的不确定性;②在地震数据叠前时间偏移处理中采用均方根速度替代叠前偏移速度,当速度相差 4% 时,对偏移结果的影响很微小^[7];③裂缝引起的地震波振幅的增加比率较速度变化引起的振幅的增加比率大两个数量级^[5]。基于上述结果,文中采用

全方位角数据解释的叠前时间偏移速度场作为最终的分方位角叠前时间偏移速度场而有别于常规方法,即四个分方位角叠前时间偏移速度场均采用全方位角数据解释的速度场。最终分方位角叠前时间偏移成果(图 4)表明:①在 112° 方位角偏移剖面的椭圆区域 A 内(图 4c),能清楚地看到两条阶梯状正断层组合形态,在其他方位角偏移剖面的椭圆区域 A 内这两条阶梯状正断层组合形态较模糊,不易识别,其中 72° 方位角偏移剖面(图 4b)最清楚,152° 方位角偏移剖面(图 4d)次之,22° 方位角偏移剖面(图 4a)最不清楚;②在不同方位角偏移剖面的椭圆区域 B 内,其中 112° 方位角偏移剖面中正断层的形态最清楚(图 4c),152° 方位角偏移剖面(图 4d)次之,在 22° (图 4a)、72° 方位角偏移剖面(图 4b)中最不清楚。

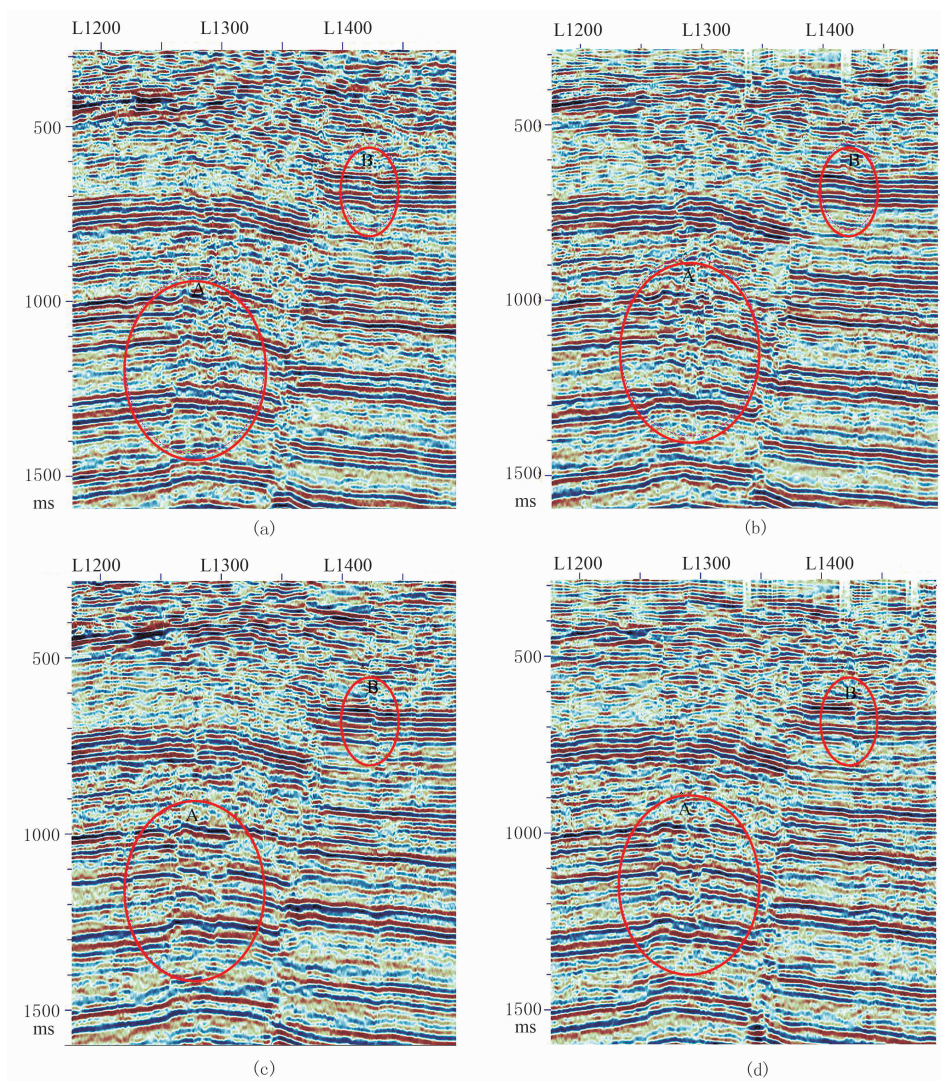


图 4 分方位角叠前时间偏移剖面

(a)22°; (b)72°; (c)112°; (d)152°

4 应用效果

根据得到的分方位角叠前时间偏移成果和叠前分方位角道集,利用叠后三维地震属性分析技术和地震振幅各向异性预测技术对该区裂缝发育区域、方位和密度进行定性、定量预测,预测结果与非零井源距 VSP 测井解释结果吻合,证明文中的分方位角

处理技术可行。

综合分析区域构造和断裂分布特征及地质露头、钻井资料后认为,该区的断层、裂缝以北东东向、北西西向为主要优势方向。图 5 为目的层的地震属性图,由图中可见:叠后地震属性反映的裂缝发育方向与区域地质和钻井资料揭示的裂缝发育方向一致(图 5a~图 5d),以北东东向、北西西向为主要优势方向;叠前地震属性可定量检测裂缝发育程度

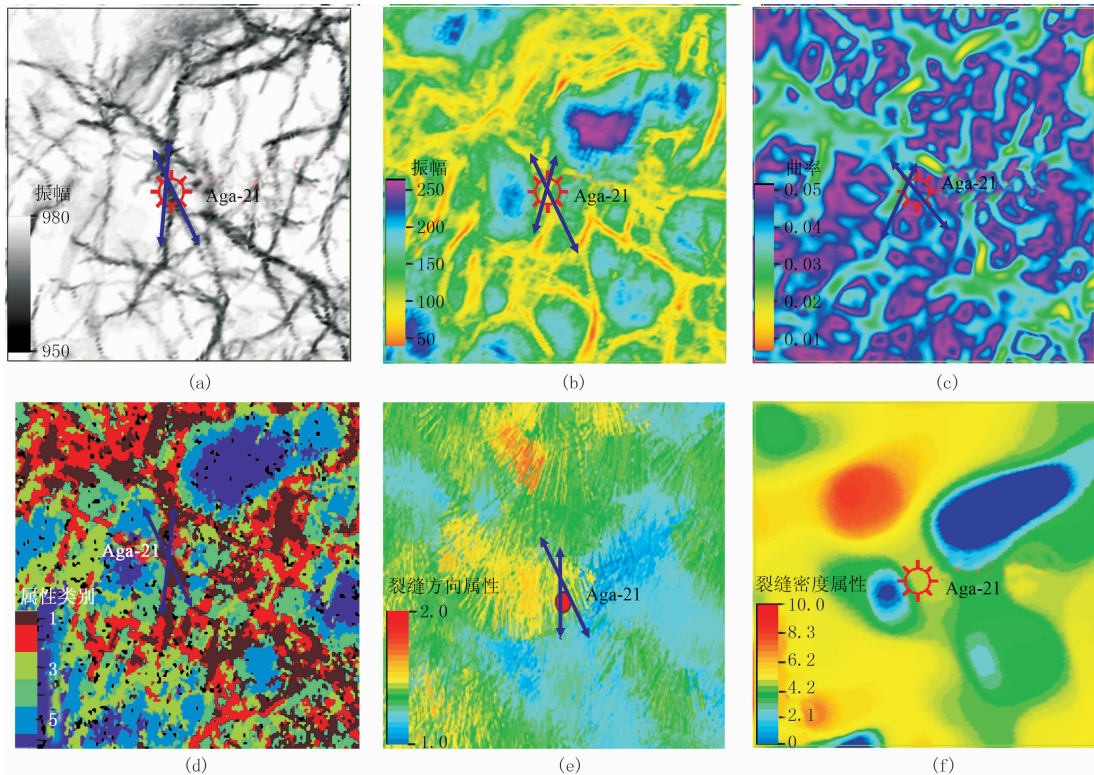


图 5 目的层(1.4s)的地震属性图

(a)蚂蚁追踪平面图; (b)相干线性加强平面图; (c)构造曲率平面图; (d)多属性融合平面图; (e)FRS 裂缝方向平面图; (f)FRS 裂缝密度平面图

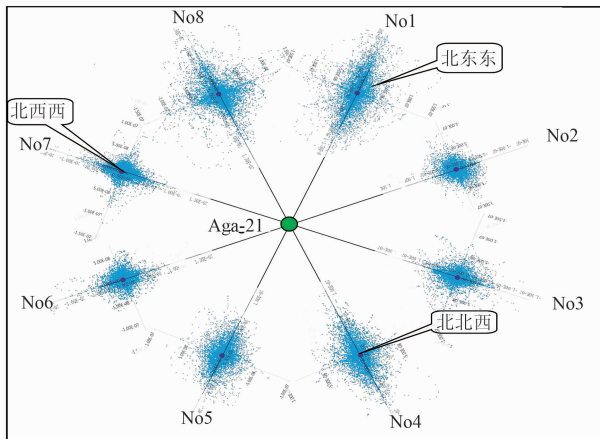


图 6 非零井源距 VSP 多方位角上行反射横波水平分量能量分布图

(图 5e、图 5f)。图 6 为 M 区非零井源距 VSP 多方位角上行反射横波水平分量能量分布图,由图中可见,裂缝发育的优势方向和通过分方位角处理、解释揭示的裂缝发育优势方向是一致的(图 4),这进一步证实了利用叠前分方位角处理、解释在该区预测裂缝是可行的。

5 结束语

文中结合窄方位角地震数据的分方位角处理、解释与地震属性分析等技术对 M 区的裂缝发育区域进行预测,结果表明:叠后地震属性反映的裂缝发育方向与区域地质和钻井资料揭示的裂缝发育方向

一致,以北东东向、北西西向为主要优势方向;叠前地震属性可定量检测裂缝发育程度;预测结果与非零 VSP 测井解释结果吻合。因此文中的分方位角处理技术是可行的。

参考文献

- [1] 刘振峰,曲寿利,孙建国等.地震裂缝预测技术研究进展.石油物探,2012,51(2):191-198.
Liu Zhenfeng, Qu Shouli, Sun Jianguo et al. Progress of seismic fracture characterization technology. GPP, 2012, 51(2):191-198.
- [2] 田立新,周东红,明君等.窄方位角地震资料在裂缝储层预测中的应用.成都理工大学学报,2010,37(5):550-553.
Tian Lixin, Zhou Donghong, Ming Jun et al. Application of narrow-azimuth seismic data to fractured reservoir prediction. Journal of Chengdu University of Technology, 2010, 37(5):550-553.
- [3] Rüger A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media. Geophysics, 1998, 63(3):935-947.
- [4] 贺振华,黄德济,文晓涛.裂缝油气藏地球物理预测.四川成都:四川科学技术出版社,2007.
- [5] 贺振华,黄德济.缝洞储层的地震检测和预测.勘探地球物理进展,2003,26(2):79-83.
- [27] 于建国,韩文功,刘力辉.分频反演方法及应用.石油地球物理勘探,2006,41(2):193-197.
Yu Jianguo, Han Wengong, Liu Lihui. Frequency-divided inversion and application. OGP, 2006, 41(2):193-197.
- [28] 王山山,李灿平.快速模拟退火地震反演.地球物理学报,1995,38(增刊1):123-134.
Wang Shanshan, Li Canping. The seismic inversion using the fast simulated annealing algorithm. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(S1):123-134.
- [29] 路鹏飞,杨长春.改进的模拟退火算法及其在叠前储层参数反演中的应用.地球物理学进展,2008,23(1):104-109.
Lu Pengfei, Yang Changchun. Modified simulated annealing algorithm and its application in pre-stack inversion of reservoir parameters. Progress in Geophysics, 2008, 23(1):104-109.
- [30] 牛聪,詹毅,李辉峰.对比地震记录信噪比的几种估算方法.物探化探计算技术,2006,28(1):5-9.
Niu Cong, Zhan Yi, Li Hui Feng. The contrast of several methods for the signal/noise ratio estimation of seismic. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 28(1):5-9.
- [31] 陈传仁,周熙襄.小波谱白化提高地震资料的分辨率.石油地球物理勘探,2000,35(6):703-709.
Chen Chuanren, Zhou Xixiang. Improving resolution

of seismic data using wavelet spectrum whitening. OGP, 2000, 35(6):703-709.

- [6] 苏世龙,王永明,黄志.两种数据正则化地震处理技术应用探讨.勘探地球物理进展,2010,33(3):200-206.
Su Shilong, Wang Yongming, Huang Zhi. Application of two data regularization in seismic data processing. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33(3):200-206.
- [7] 贺锡雷,吴永国,贺振华.速度误差对时间偏移和深度偏移的影响分析.物探化探计算技术,2010,32(5):460-463.
He Xilei, Wu Yongguo, He Zhenhua. Error estimation in time and depth migrations with error velocity. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 32(5):460-463.

(本文编辑:刘勇)

作者简介



苏世龙 高级工程师,1975年生;2003年毕业于石油大学(华东)勘探系油气藏形成与分布专业,获硕士学位;毕业后长期从事地震数据处理和解释工作。

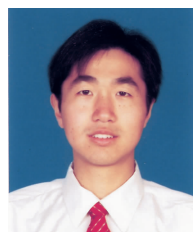
(上接第501页)

of seismic data using wavelet spectrum whitening. OGP, 2000, 35(6):703-709.

- [32] 赵淑红,朱光明.用小波变换谱均衡法提高地震资料的分辨率.西安科技大学学报,2007,27(2):255-259.
Zhao Shuhong, Zhu Guangming. Using combined method of wavelet transform and spectrum equalization to improve seismic data resolution. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(2):255-259.
- [33] 王永刚.地震资料综合解释方法.山东东营:中国石油大学出版社,2007,132-203.
- [34] 李振春.地震数据处理方法.山东东营:中国石油大学出版社,2004,56-109.
- [27] 于建国,韩文功,刘力辉.分频反演方法及应用.石油地球物理勘探,2006,41(2):193-197.
Yu Jianguo, Han Wengong, Liu Lihui. Frequency-divided inversion and application. OGP, 2006, 41(2):193-197.
- [28] 王山山,李灿平.快速模拟退火地震反演.地球物理学报,1995,38(增刊1):123-134.
Wang Shanshan, Li Canping. The seismic inversion using the fast simulated annealing algorithm. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(S1):123-134.
- [29] 路鹏飞,杨长春.改进的模拟退火算法及其在叠前储层参数反演中的应用.地球物理学进展,2008,23(1):104-109.
Lu Pengfei, Yang Changchun. Modified simulated annealing algorithm and its application in pre-stack inversion of reservoir parameters. Progress in Geophysics, 2008, 23(1):104-109.
- [30] 牛聪,詹毅,李辉峰.对比地震记录信噪比的几种估算方法.物探化探计算技术,2006,28(1):5-9.
Niu Cong, Zhan Yi, Li Hui Feng. The contrast of several methods for the signal/noise ratio estimation of seismic. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 28(1):5-9.
- [31] 陈传仁,周熙襄.小波谱白化提高地震资料的分辨率.石油地球物理勘探,2000,35(6):703-709.
Chen Chuanren, Zhou Xixiang. Improving resolution

(本文编辑:刘勇)

作者简介



朱卫星 地质导向工程师,1982年生;2005年毕业于中国石油大学(华东)物探系,获工学学士学位;2008年毕业于中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业,获硕士学位。长期从事开发地震、地质建模、储层预测等方面的研究;目前在中海油田服务股份有限公司从事开发地震方面的研究工作。