

文章编号:0253-9985(2013)01-0137-08

P波各向异性裂缝预测技术在ZY区 碳酸盐岩储层中的应用

孙 炜¹,李玉凤²,何巍巍³,黑继虎⁴,孔凯波⁵

(1. 中国地质大学 地球物理信息技术学院,北京 100083; 2. 中国石化 胜利油田分公司 物探研究院,山东 东营 257022; 3. 中国石油 勘探开发研究院 西北分院,甘肃 兰州 730020; 4. 中国石化 中原油田分公司 采油二厂,河南 濮阳 457532; 5. 中国石化 中原油田 普光分公司 天然气净化厂,四川 宣汉 636150)

摘要:利用地震数据较为准确地预测碳酸盐岩中的裂缝发育区,是碳酸盐岩裂缝型储层预测的关键手段。文中介绍了基于HTI(具有水平对称轴的横向各向同性)介质P波各向异性裂缝预测方法的原理及思路流程,从ZY区成像测井及岩心资料的裂缝发育情况出发,以叠前地震数据为基础,进行研究区碳酸盐岩裂缝分布特征的预测。通过与衰减有关的P波各向异性得到研究区的裂缝发育特征,认为裂缝发育情况与断层展布特征关系密切,区内裂缝方向以北东向为主,北北东为辅。成像测井及岩心资料上的裂缝信息验证了预测结果的可靠性和准确性;在预测裂缝分布特征基础上设计的井位,试油也获得工业油流。以上理论和应用实践表明,P波方位各向异性裂缝预测方法能够准确预测碳酸盐岩储层裂缝的分布特征,有效提升油气预测的成功率。

关键词:HTI介质;P波各向异性;叠前地震数据;裂缝预测;碳酸盐岩

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Using P-wave azimuthal anisotropy to predict fractures in carbonate reservoirs of the ZY block

Sun Wei¹, Li Yufeng², He Weiwei³, Hei Jihu⁴ and Kong Kaibo⁵

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Geophysical Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257022, China;

3. Northwest Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Lanzhou, Gansu 730020, China;

4. No. 2 Oil Production Plant, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457532, China;

5. Natural Gas Purification Plant, Puguang Branch, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Xuanhan, Sichuan 636150, China)

Abstract: One of the key technologies used to predict fractured carbonate reservoirs is to locate fractures with seismic data. The paper introduces an approach of fracture prediction based on P-wave azimuthal anisotropy of HTI medium and its application in the ZY block. Pre-stack seismic data were used to predict fracture distribution in carbonate reservoirs. P-wave azimuthal anisotropy in relation with attenuation reveals that the fracture growth in the study area is closely linked with the distribution of faults and the fracture azimuths are dominated by NE direction, followed by NNE direction. The prediction is confirmed by image logging and core data. Industrial oil flow was successfully tested in wells emplaced according to the prediction results. The practice shows that the approach can be used to accurately predict the distribution of fractures and therefore it is considered an effective way to improve the prediction of fractured reservoirs.

Key words: HTI medium, P-wave azimuthal anisotropy, pre-stack seismic data, fracture prediction, carbonate rock

收稿日期:2012-10-17;修订日期:2012-12-10。

第一作者简介:孙炜(1984—),男,博士研究生,储层预测。

在碳酸盐岩裂缝型油气藏中,裂缝可以沟通溶孔和溶洞、有效提高储层的渗流能力,因此,裂缝发育带往往指示碳酸盐岩储层中的高产区。以方位各向异性理论为基础的纵波方位各向异性裂缝预测技术成为近年来裂缝预测问题的研究热点^[1-2]。

方位各向异性,是指地震波动力学属性随着方位角的改变而发生变化。关于各向异性裂缝预测的相关研究,国外最早开始于20世纪70年代,经过四十余年的不断发展,已成为一套成熟的理论知识体系^[3-12]。国内的方位各向异性裂缝预测起步于20世纪末,随着裂缝型储层的不断发现,国内的石油勘探工作者们越来越多的将其应用于裂缝预测研究工作中^[13-25]。本文以ZY区块碳酸盐岩裂缝型储层为例,进行P波各向异性裂缝预测方法的应用实践,通过测井裂缝及试油资料验证该方法在碳酸盐岩储层裂缝预测研究中的可靠性和有效性。

1 各向异性裂缝预测原理及思路

目前研究的介质,通常是具有对称轴的介质,即横向各向同性介质(transversely isotropy,简称TI)。TI介质,根据其对称轴在空间定向是垂直还是水平又分为VTI(transversely isotropy with a vertical axis of symmetry)介质和HTI(transversely isotropy with a horizontal axis of symmetry)介质^[26]。VTI介质一般认为是由周期性薄互层产生;HTI介质一般由平行排列的垂直裂隙、裂缝产生,本文的相关研究均基于HTI介质展开。

1.1 方位各向异性裂缝预测原理

Ruger^[10-11]基于弱各向异性的概念,并结合Thomsen的各向异性系数,得到各向异性介质中反射系数随方位角和入射角变化的公式:

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

式中: θ 和 φ 分别为入射角和方位角,($^\circ$); $R_p(\theta,$

$\varphi)$ 为与入射角 θ 和方位角 φ 相关的纵波反射系数; $Z = \rho\alpha$ 为纵波波阻抗, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为介质密度, g/cm^3 ; α 为纵波速度, m/s ; $\frac{\Delta Z}{Z}$ 为波阻抗之差与平均波阻抗的比值; $G = \rho\beta^2$ 为横波切向模量(β 为横波速度); $\gamma, \delta, \varepsilon$ 为Thomsen各向异性系数; $\Delta[\cdot]$ 表示上、下界面物理量之差; $\overline{[\cdot]}$ 表示上、下界面物理量之均值。

在小入射角的前提下,Ruger对(1)式进一步简化,并引入方位角变化的梯度项 $B(\phi_k)$,使反射系数与方位角变化的梯度项 $B(\phi_k)$ 建立关系, $B(\phi_k)$ 由各向同性项系数 B^{iso} 以及各向异性项系数 B^{ani} 组成,它们的表达式分别为:

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

$$B^{\text{iso}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \alpha}{\alpha} - \left(\frac{2\bar{\beta}}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} \right] \quad (3)$$

$$B^{\text{ani}} = \frac{1}{2} \left[\Delta \delta + 2 \left(\frac{2\bar{\beta}}{\alpha} \right)^2 \Delta \gamma \right] \quad (4)$$

式中: ϕ_k 为第 k 次的观测方位角,($^\circ$); ϕ_{sym} 为沿裂缝带对称轴方向的方位角,($^\circ$),在没有横波数据的情况下一般为未知的。

在进行宽方位地震采集时,可以得到多个 ϕ_k ,对3个未知数 B^{iso} , B^{ani} 和 ϕ_{sym} 进行非线性方程组的求解,并根据各向同性时(无裂缝)的 B^{iso} 和各向异性时(裂缝发育)的 $B^{\text{iso}} + B^{\text{ani}}$,来拟合方位各向异性椭圆,用椭圆长短轴来指示裂缝方向,用椭圆长短轴之比来确定表征裂缝发育情况的各向异性强度。Mallick和Craft^[9]等人研究认为,裂缝强度越大,由各向异性拟合出的方位椭圆的扁率越扁,其长轴或短轴方向代表裂缝走向,从而实现对裂缝强度和方向的预测。这样,在单界面反射波的假设前提下,具有3个方位或3个方位以上的地震反射振幅数据就能够进行地层中某位置裂缝发育程度和方向的求取。

根据贺振华的研究成果^[27],对于裂缝,尤其是高角度裂缝,地震波动力学特征(频率、振幅、衰减和相对波阻抗等)比运动学特征更为敏感。研究表明,在这些动力学属性中,衰减属性与裂缝的关系更为密切^[12]。因此,研究中选用表征衰减属性的85%能量比对应频率值来进行各向异性裂缝预测,该属性计算公式:

$$E_{85\%} = E_{\text{total}} \times 85\% \quad (5)$$

$$f_{85\%} = F(E_{85\%}) \quad (6)$$

式中: E_{total} 为有效频带内总能量; $E_{85\%}$ 为有效频带内总能量的 85%; F 算子代表在频率能量坐标系中, 求取某能量值对应的频率值; $f_{85\%}$ 即为所求 85% 能量比对应频率值。

1.2 技术流程

首先, 讨论 P 波方位各向异性裂缝预测方法使用的地震数据。纯波和成果数据由于经过了全方位角叠加处理, 提高地震数据信噪比的同时丢失了方位角的信息, 因此纯波和成果数据均不适合该方法的应用; 与之类似, 经过叠前时间偏移的 CRP 道集数据, 由于丢失了方位角的信息, 同样不能用于方位各向异性的研究。在实际应用中, 选择未做过叠前偏移, 仅做了预处理、静校正和动校正的叠前 NMO 道集数据来进行该方法的裂缝预测研究。

其次, 为了验证该方法的准确性, 需要有可靠的测井裂缝先验信息。在所有测井资料中, 取心资料和 FMI (微电阻率扫描成像测井) 资料提供的裂缝信息最为可靠。因此, 参考研究区的岩心资料以及 FMI 测井资料, 分析裂缝的井上分布特征。

在确定了关键技术及使用数据后, 制定了如下的技术思路 (图 1): ①首先进行测井资料的

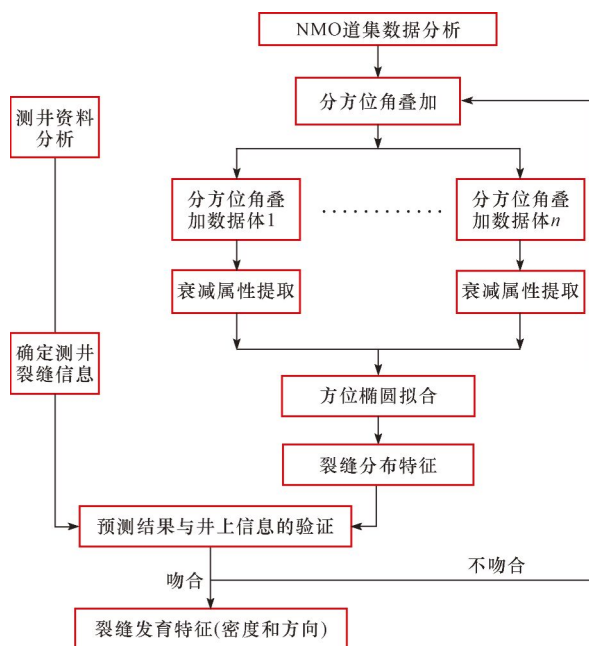


图1 基于 HTI 介质各向异性正演的裂缝预测方法的技术思路

Fig. 1 Technical process of fracture prediction based on anisotropy forwarding modeling of HTI media

析, 确定井上裂缝的分布特征; ②对 NMO 地震道集数据进行分方位角叠加, 得到几个含有方位角信息的分方位角叠加数据体, 然后分别计算各分方位角叠加数据体的衰减属性, 并进行方位各向异性椭圆的拟合, 预测研究区裂缝的分布特征; ③利用岩心和 FMI 测井资料从剖面和平面对检测裂缝预测的准确性, 根据验证情况确定最终的裂缝分布特征。

2 实例应用

2.1 地质背景

研究区构造上位于 T 油田 ZY 区块 F 盆地古隆起的斜坡中央区, 目的层为石炭系 M 组碳酸盐岩储层, 地层厚度约 280 m。研究区目的层储层以孔缝洞复合型为主, 且裂缝以高角度裂缝为主, 裂缝的沟通作用对储层的贡献很大。在单井上表现为高产井孔隙度值并不突出, 而渗透率较高; 且孔隙度高, 渗透率偏低的井试油结果普遍不理想。

准确的井上裂缝先验信息是进行裂缝预测研究的基础。区内有五口有 FMI 测井资料的井, 分别为 A1, A2, A3, A4, A5, 并对 A1 井进行了取心观察。根据岩心资料和 FMI 测井资料的分析, 研究区碳酸盐岩储层裂缝以构造缝为主, 在不同层段也见溶蚀缝发育。

2.2 方位各向异性裂缝预测

首先对叠前地震道集数据进行偏移距与方位角的分析, 按照满覆盖和宽方位角的要求, 选取合适的偏移距和方位角范围, 依据能量均衡 (由不同方位角范围叠加得到的若干叠加数据体在相同侧线或联络线剖面上无明显的能量差异) 的原则合理进行方位角的划分, 通过分方位角叠加得到含有方位角信息的 5 个方位角叠加数据体 (图 2), 并对各方位角叠加数据体进行频谱分析 (图 3)。根据频谱分析结果, 在有效频带内计算各分方位角叠加数据体的衰减属性, 通过各方位角的衰减属性拟合, 得到研究区裂缝的分布特征。结合 FMI 成像测井及岩心的裂缝先验信息, 从剖面和平面对该方法的准确性。

首先观察裂缝强度过井剖面。研究区的测井数据中, 只有 A1 井同时具有 FMI 测井及岩心资

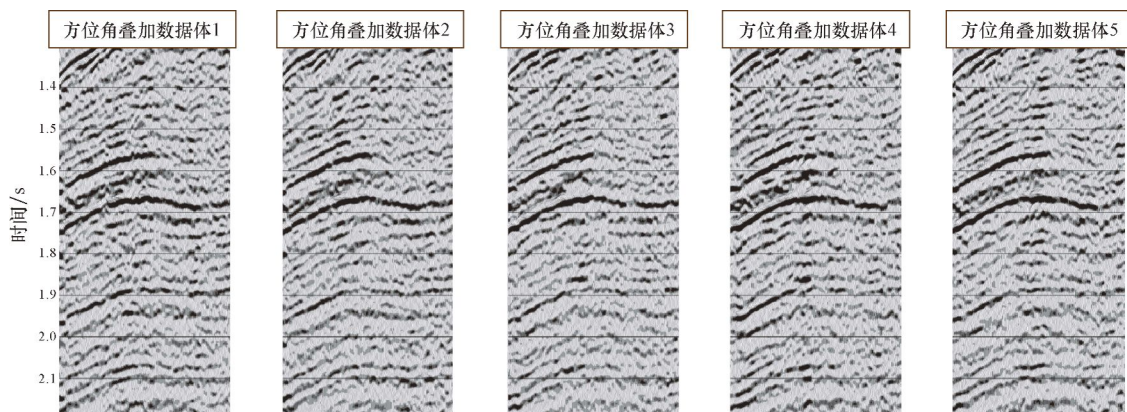


图2 分方位角叠加数据剖面

Fig. 2 Section of five azimuthal-stack data volume

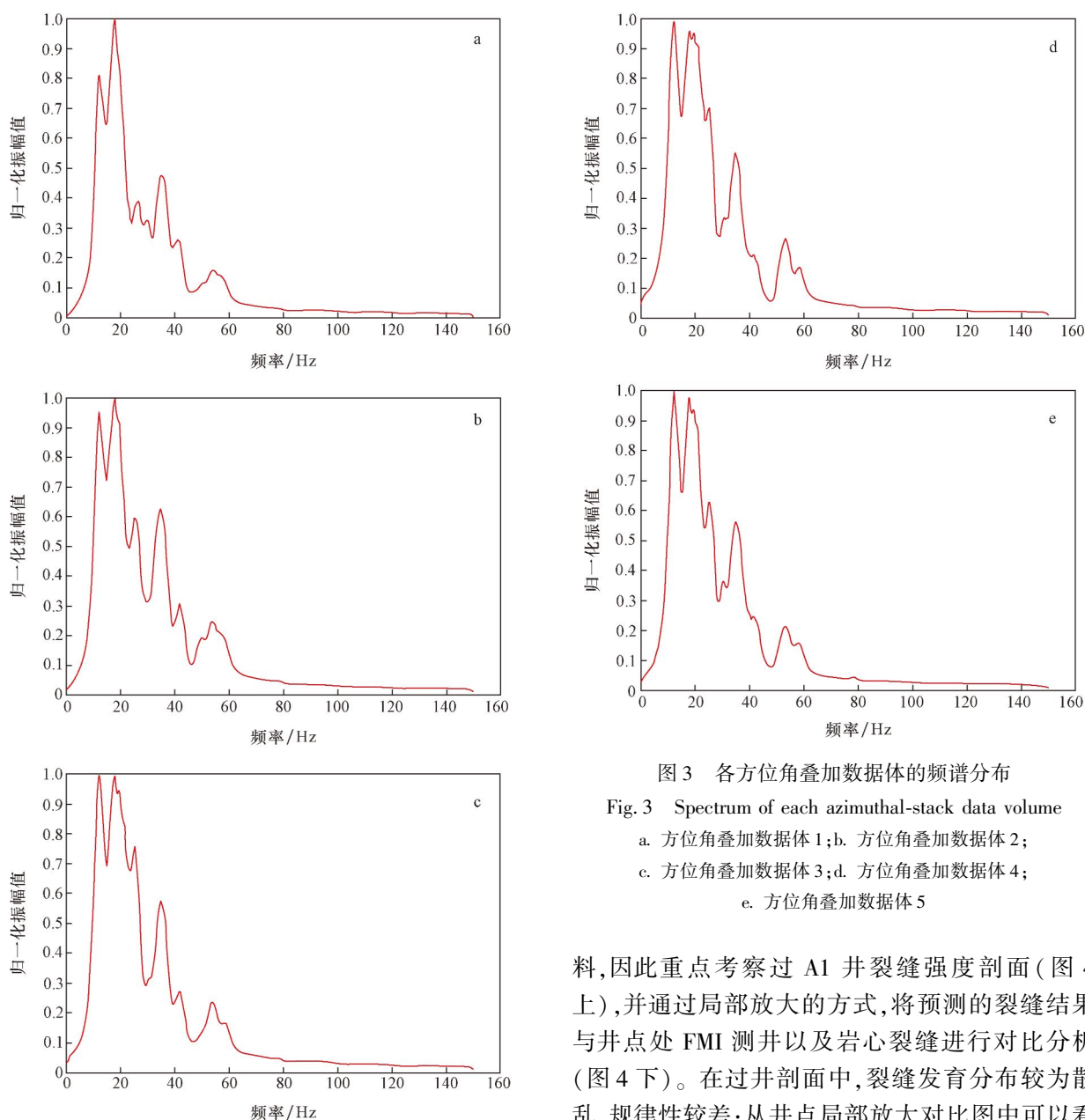


图3 各方位角叠加数据体的频谱分布

Fig. 3 Spectrum of each azimuthal-stack data volume

- a. 方位角叠加数据体1; b. 方位角叠加数据体2;
c. 方位角叠加数据体3; d. 方位角叠加数据体4;
e. 方位角叠加数据体5

料,因此重点考察过 A1 井裂缝强度剖面(图4上),并通过局部放大的方式,将预测的裂缝结果与井点处 FMI 测井以及岩心裂缝进行对比分析(图4下)。在过井剖面中,裂缝发育分布较为散乱,规律性较差;从井点局部放大对比图中可以看

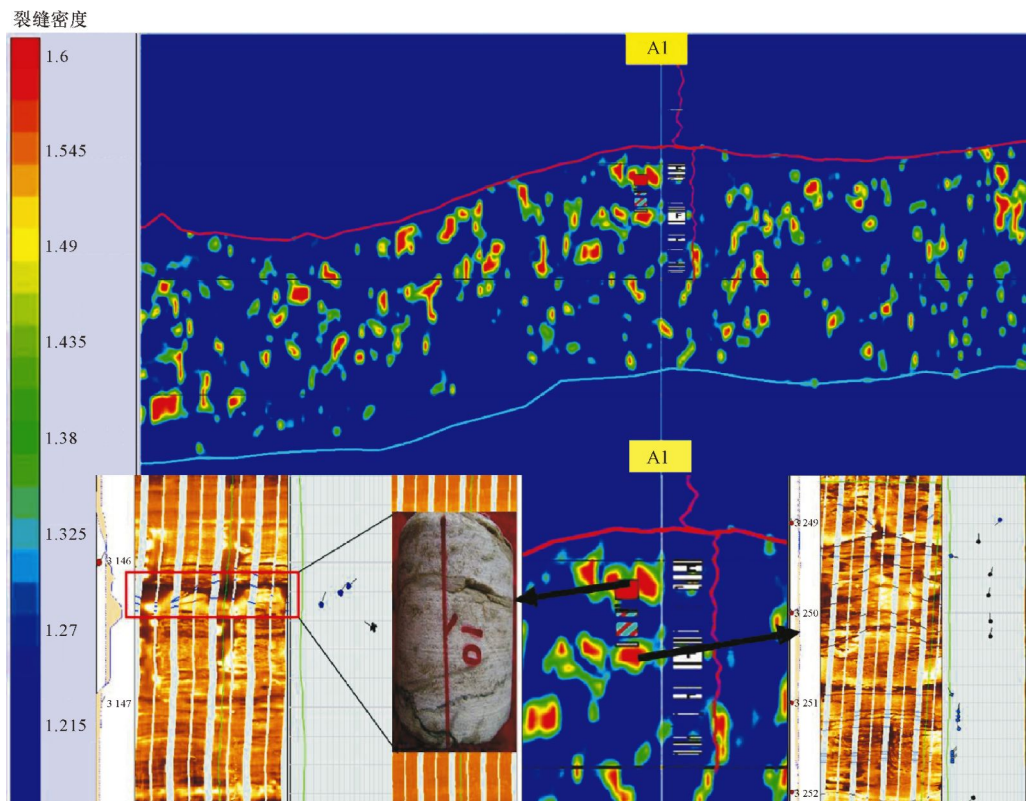


图4 过 A1 井衰减各向异性预测裂缝密度剖面(上)及预测结果与测井裂缝对比(下)

Fig. 4 Attenuation anisotropy-based fracture density section crossing Well A1 (shown above) and comparison between the prediction results and log-based fracture detection (bottom)

到,预测裂缝强度大的位置对应 FMI 测井及岩心上的裂缝发育区(局部放大图中的 FMI 和岩心长度不到 1 m,是由于钻井单块岩心样品一般不超过 1 m,放大图中的选取厚度包含在裂缝强度剖面红色区域的 15 ms 中),预测的裂缝强度与 FMI 测井及岩心裂缝信息吻合较好,产油井段与裂缝发育段的位置基本对应。

然后,分析研究区的裂缝平面分布特征。对裂缝强度数据体进行平面成图,得到裂缝的平面分布规律(图 5)。图中左侧色标表示裂缝发育情况,代表各向异性强度,即裂缝密度,无量纲,暖色代表裂缝较为发育;预测的裂缝方向通过玫瑰图来指示(玫瑰图中色标代表百分比,即某一方向的裂缝占该位置目的层段所有裂缝方向的百分比,玫瑰图中的红色指示预测出的裂缝优势方向)。

研究区内发育断层若干条,裂缝的发育区与断层的展布特征关系密切,且在主要断层之间(图 5 中黑线范围内),裂缝尤为发育。同时根据 FMI 测井资料的裂缝显示,A2 井全井段无裂缝;A3 井在不同深度发育裂缝两条,裂缝不发育;A1,A4 和

A5 井裂缝均较为发育,从图中可以看出预测的裂缝平面分布规律与 FMI 成像测井的裂缝发育情况吻合较好。研究区裂缝的方向以北东向为主,北北东为辅,裂缝方向受断层走向控制。

为了进一步验证预测裂缝方向的准确性,对预测的裂缝方向进行井点处的裂缝方向成图,与 FMI 测井资料上的裂缝方向进行对比,(图 6,其中 a,b,c 和 d 为预测裂缝方向,e,f,g 和 h 为 FMI 测井资料的裂缝方向)。裂缝较为发育的 4 口井 A1,A3,A4 和 A5 井的预测裂缝方向与 FMI 成像测井上的裂缝方向较为匹配。

综合来看,研究区裂缝以构造缝为主,与井上的认识相符合。根据预测的裂缝平面分布特征,在裂缝发育区的边界位置设定了新的井位 SJ1 井(图 5),钻井完成后,在目的层段试油获日产 43 t 工业油流,从而进一步验证了预测方法的有效性。

3 结论

1) 在利用该方法进行裂缝预测时,方位角的

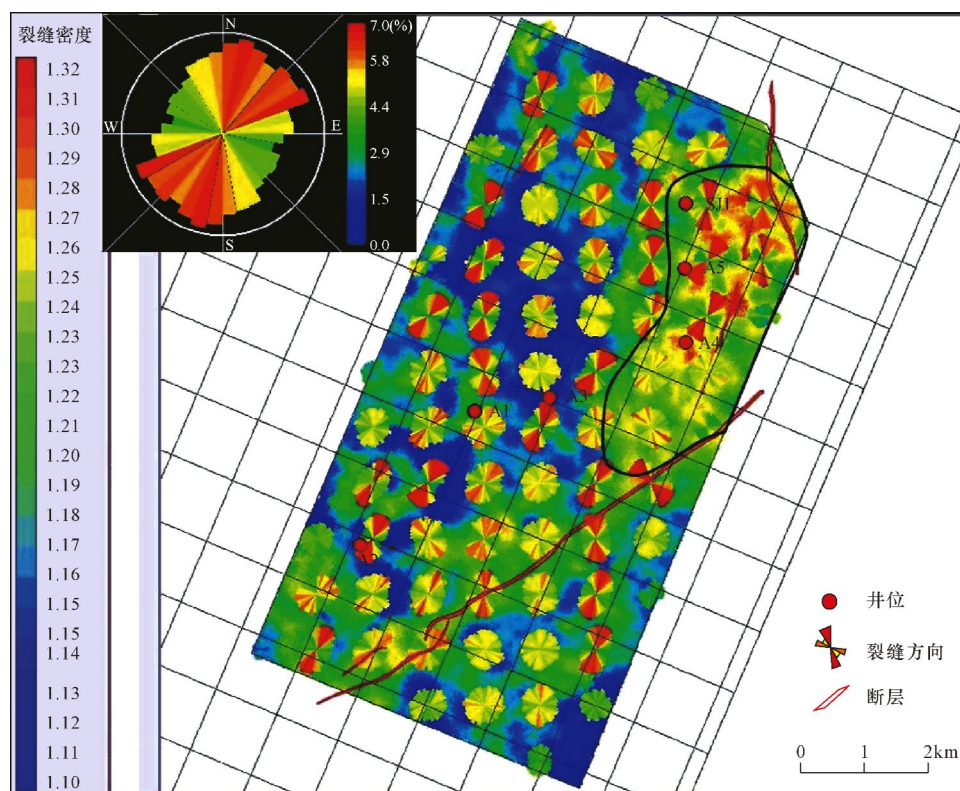


图5 衰减各向异性预测研究区裂缝方向平面分布特征

Fig.5 Plane view of azimuth distribution of fractures predicted based on attenuation anisotropy in the study area

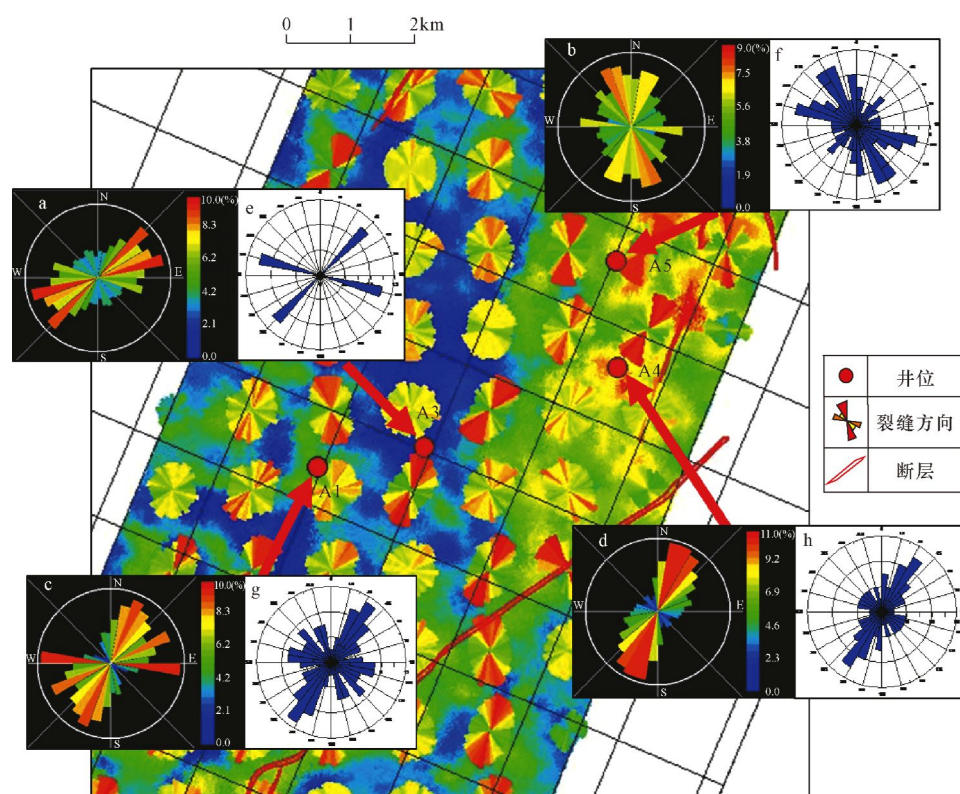


图6 衰减各向异性预测研究区裂缝方向与 FMI 井上裂缝方向对比

Fig.6 Comparison of fracture azimuth obtained from FMI with those from attenuation anisotropy prediction

划分非常关键。对叠前纵波地震道集进行方位角的划分时,要注意以下两点:①至少要划分出3个方位,以保证各向异性椭圆的拟合;②进行划分时要保证各分方位角叠加数据体的能量较为均衡,覆盖次数大致相同,减少由地震数据方位覆盖不均匀而带来的各向异性差异,导致预测结果不准。

2) 利用衰减各向异性来预测裂缝,要考虑到AVO现象对裂缝预测的影响。如果随着方位角的增加能量增大或减小,而同时,随着入射角的增加能量变化情况恰恰相反,即减小或增大,这时的裂缝预测问题将变得更为复杂。

3) 在利用纵波方位各向异性进行裂缝预测时,由于Ruger的公式(1)描述的是单界面HTI介质下的反射系数变化情况,因此,在进行裂缝预测研究时,该方法主要适用于高角度裂缝的分布规律预测。

致谢:感谢中国地质大学(北京)王彦春教授、中国科学院地质与地球物理研究所白志明副研究员、史小东博士对文章提出的宝贵意见和建议。

参 考 文 献

- [1] 刘振峰,曲寿利,孙建国.地震裂缝预测技术研究进展[J].石油物探,2012,51(2):191-198.
Liu Zhenfeng, Qu Shouli, Sun Jianguo. Progress of seismic fracture characterization technology [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(2): 191-198.
- [2] 尹志恒,狄帮让,李向阳,等.国外应用纵波各向异性技术检测裂缝的研究进展[J].科技导报,2011,29(30):73-78.
Yin Zhiheng, Di Bangrang, Li Xiangyang, et al. Progress in P-wave anisotropy technology for fracture detection [J]. Science and Technology Review, 2011, 29(30): 73-78.
- [3] Crampin S. A review of the effects of anisotropic layering on the propagation of seismic waves [J]. Geophysics, 1977, 49: 9-27.
- [4] Crampin S. Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids [J]. Geophysics, 1984, 76: 135-145.
- [5] Hudson J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks [J]. Geophysics, 1981, 64: 133-150.
- [6] Hudson J A. A higher-order approximation to the wave propagation constants for a cracked solid [J]. Geophysics, 1986, 87: 265-274.
- [7] Thomsen L. Weak elastic anisotropy [J]. Geophysics, 1986, 51: 1954-1966.
- [8] Thomsen L. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock [J]. Geophys Prosp, 1995, 43: 805-829.
- [9] Mallick S, Craft K, Meister L, et al. Determination of the principle direction of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data [J]. Geophysics, 1998, (63): 692-706.
- [10] Rüger A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media [J]. Geophysics, 1998, 63(3): 935-947.
- [11] Rüger A. Using AVO for fracture detection: analytic basis and practical solutions [J]. The Leading Edge, 1997, 16(10): 1429-1430, 1432-1434.
- [12] Shen F, Zhu X and Toksoz N. Anisotropy of aligned fractures and P-wave azimuthal AVO response [J]. SEG, 1997: 2001-2004.
- [13] 曲寿利,季玉新,王鑫,等.全方位P波属性裂缝检测方法研究[J].石油地球物理勘探,2001,36(4):390-397.
Qu Shouli, Ji Yuxin, Wang Xin, et al. Seismic method for using full-azimuth P-wave attributes to detect fracture [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(4): 390-397.
- [14] 范国章,牟永光,金之钧.裂缝介质中地震波方位AVO特征分析[J].石油学报,2002,23(4):42-45.
Fan Guozhang, Mou Yongguang, Jin Zhijun. Amplitude versus offset characteristics of azimuth of seismic wave in fractured reservoir [J]. Acta petrolei sinica, 2002, 23(4): 42-45.
- [15] 乐绍东. AVA裂缝检测技术在川西JM构造的应用[J].天然气工业,2004,24(4):22-24
Yue Shaocong. Application of AVA fracture detection technique in JM structure in west Sichuan [J]. Natural gas industry, 2004, 24(4): 22-24.
- [16] 高云峰,李绪宣,陈桂华,等.裂缝储层地震预测技术在锦州25-1南潜山的应用研究[J].中国海上油气,2008,20(1):22-26.
Gao Yunfeng, Li Xuxuan, Chen Guihua, et al. An application of seismic techniques to predict fractured reservoirs in JZ25-1S buried hill [J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(1): 22-26.
- [17] 喻岳钰,杨长春,王彦飞,等.瞬时频域衰减属性及其在碳酸盐岩裂缝检测中的应用[J].地球物理学进展,2009,24(5):1717-1722.
Yu Yueyu, Yang Changchun, Wang Yanfei, et al. P-wave azimuthal attenuation attributes in wavelet-scale domain and its application to fracture detection in carbonate [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(5): 1717-1722.
- [18] 黄伟传,杨长春,王彦飞.利用叠前地震数据预测裂缝储层的应用研究[J].地球物理学报,2007,22(5):1602-1606.
Huang Weichuan, Yang Changchun, Wang Yanfei. The application of pre-stack seismic data in predicting the fractured reservoir [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1602-1606.
- [19] 孙炜,王彦春,李梅,等.利用叠前地震数据预测火山岩储层裂缝[J].物探与化探,2010,34(2):229-232.
Sun Wei, Wang Yanchun, Li Mei, et al. The detection of fractures in volcanic reservoir with pre-stack seismic data [J].

- Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(2): 229 – 232.
- [20] 姜传金, 鞠林波, 张广颖, 等. 利用地震叠前数据预测火山岩裂缝的方法和效果分析——以松辽盆地北部徐家围子断陷营城组火山岩为例[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 515 – 523.
- Jiang Chuanjin, Ju Linbo, Zhang Guangying, et al. The method and effect analysis of volcanic fracture prediction with prestack seismic data——An example from the volcanic rocks of Yingcheng formation in Xujiaweizi fault depression, north of Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 515 – 523.
- [21] 白斌, 邹才能, 朱如凯, 等. 四川盆地九龙山构造须二段致密砂岩储层裂缝特征、形成时期与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 526 – 535.
- Bai Bin, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Characteristics, timing and controlling factors of structural fractures in tight sandstones of the 2nd member of Xujiaweizi Formation in Jiulong Mountain structure, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 526 – 535.
- [22] 陈冬, 陈力群, 魏修成, 等. 火成岩裂缝性储层测井评价——以准噶尔盆地石炭系火成岩油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 83 – 90.
- Chen Dong, Chen Liqun, Wei Xiucheng, et al. Log evaluation of fractured igneous reservoirs; a case study of the Carboniferous igneous reservoirs in the Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 83 – 90.
- [23] 黄保纲, 汪利兵, 赵春明, 等. JZS 油田潜山裂缝储层形成机制及分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 710 – 717.
- Huang Baogang, Wang Libing, Zhao Chunming, et al. Formation mechanism and distribution of fractured buried hill reservoir in JZS oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 710 – 717.
- [24] 涂彬, 丁祖鹏, 刘月田. 火烧山油田 H3 层裂缝发育特征与剩余油分布关系[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 229 – 235.
- Tu Bin, Ding Zupeng and Liu Yuetian. Correlation of remaining oil distribution and fracture development in H – 3 reservoir of Huoshaoshan oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 229 – 235.
- [25] 葛瑞·马沃可(美). 岩石物理手册: 孔隙介质中地震分析工具[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008, 113 – 118.
- Gary Mavko. The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008, 113 – 118.
- [26] 吴国忱. 各向异性介质地震波传播与成像[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006, 24 ~ 25.
- Wu Guochen. Propagation and imaging of seismic wave in anisotropy media [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006, 24 – 25.
- [27] 贺振华, 黄德济, 文晓涛. 裂缝油气藏地球物理预测[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2007.
- He Zhenhua, Huang Deji, Wen Xiaotao. Geophysical predictive theory and technique on fractured reservoir [M]. Chengdou: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 2007.

(编辑 董立)

《石油与天然气地质》核心影响因子创历史新高

据 2012 年 12 月 7 日在北京国际会议中心举行的“中国科技论文统计结果发布会”公布的中国科技期刊的相关统计分析数据,《石油与天然气地质》期刊再传捷报,2011 年期刊核心影响因子创历史新高,达 2.086,在 1998 种中国科技核心期刊中名列第 6 位,在能源科技类期刊中名列第 2 位;核心被引频次也创历史新高,达 2250 次,在 1998 种中国科技核心期刊中名列第 191 位,在能源科技类期刊中名列第 4 位;综合评价总分从 2010 年的 62.7 分上升为 72.9 分,在 1998 种中国科技核心期刊中排名从 2010 年的第 169 位上升为第 83 位,首次冲入前百名,在能源科技类期刊中排名保持在第 3 位。

(李军 供稿)