

多极子声波测井的裂缝识别与评价

车小花^{1,2}, 赵 腾^{1,2}, 乔文孝^{1,2}, 吕文雅¹, 樊建明³

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 北京市地球探测与信息技术重点实验室, 北京 102249;

3. 中国石油 长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021]

摘要:多极子声波测井在油田应用广泛,对地层裂缝进行评估和分析是其一个重要应用。简要介绍了多极子声波测井在裂缝识别中的国内外研究现状,并简述了多种现有的利用多极子声波测井资料评价裂缝的新方法。以鄂尔多斯盆地X井区实际的多极子声波测井资料处理为例,利用纵横波时差判断裂缝倾角、井孔模式波声衰减判断裂缝倾角和有效性、斯通利波反射系数确定裂缝位置。利用横波时差各向异性和快慢横波频谱差异估计裂缝发育程度、快横波方位确定裂缝走向。结合实际电成像测井资料进行了进一步的对比和验证,并对上述方法在裂缝评价中的作用与干扰因素进行了归纳总结。综合应用多种方法进行裂缝识别,可以获取更多的裂缝参数,克服单一方法的部分多解性,从而使基于多极子声波资料的裂缝评价更加准确合理。

关键词:声衰减;斯通利波反射系数;纵横波时差比;各向异性;多极子声波测井;裂缝评价

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Fracture identification and evaluation based on multi-pole acoustic logging

Che Xiaohua^{1,2}, Zhao Teng^{1,2}, Qiao Wenxiao^{1,2}, Lyu Wenya¹, Fan Jianming³

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. Beijing Key Laboratory of Earth Prospecting and Information Technology, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Branch Company Ltd., PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710021, China]

Abstract: Multi-pole acoustic logging is widely used in oilfields, especially for stratigraphic fracture assessment and analysis. The study briefly introduces the research status-quo of multi-pole acoustic logging in fracture identification both at home and abroad, and briefs on the currently new methods to evaluate fractures with multi-pole acoustic waveform data. Taking the field multi-pole acoustic waveform data of the drilling sector X in the Ordos Basin as a case study, we determine the fracture dip angle by compressional to shear slowness ratio, and the fracture dip angle and its validity by mode wave attenuation in boreholes. Furthermore, the Stoneley wave reflection coefficient is used to characterize the fracture locations. The intensity of fracture development is estimated by the shear wave slowness anisotropy and difference between the fast and slow shear wave spectrums. The fracture strike is assessed by the fast shear azimuth. In addition, the field electrical imaging log data are applied to compare and verify those fracture measurement methods. The advantages for and interference factors to these methods are also summarized. In all, an integration of multiple methods can certainly facilitate us to obtain more fracture parameters, avoiding some multi-solution problems of a single method, and thus enhancing the accuracy and reliability of fracture assessment based on multi-pole acoustic waveform data.

Key words: acoustic wave attenuation, Stoneley wave reflection coefficient, compressional to shear slowness ratio, anisotropy, multi-pole acoustic logging, fracture assessment

随着世界经济的迅速发展,能源的需求量和重要性与日俱增,对石油天然气的勘探开采提出了更高的

收稿日期:2019-10-20;修订日期:2020-10-07。

第一作者简介:车小花(1976—),女,博士、教授、博士生导师,地球物理测井。E-mail: aclub@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41874210,11734017);中石油战略合作科技专项长庆专项(ZLZX2020-02-02-04)。

要求。裂缝型油气藏是21世纪石油增储上产的重要领域之一。在中国,裂缝型低渗透储层的数量比例非常突出,裂缝型低渗透储层油气产量占整个石油天然气产量的一半以上,占未来准备投产的石油天然气储量的三分之二以上^[1]。裂缝在岩石中作用重大,不仅可以成为孔隙流体通道,同时可以充当储集体。岩石中裂缝的存在与发育使得多类岩石成为储层,包括碳酸盐岩、岩浆岩、变质岩和致密砂泥岩等。即使在低孔低渗的砂岩储层中,裂缝的存在也对储层产生了较大的影响^[2]。因此,开展裂缝型储集层评价方法研究对于中国具有一定的现实意义。

裂缝识别的手段和方法较多,如岩心观察、测井识别、地震识别等^[3]。在测井方法中,成像测井是目前最为可靠的裂缝识别技术,可以作为验证其他裂缝预测方法是否准确的依据^[4]。目前,国内外研究人员针对多极子声波测井资料在裂缝测井识别中的应用已开展了大量的研究。Hornby B E等(1989)用低频率的反射斯通利波来估计渗透裂缝的发育方位^[5]。朱留方(2003)阐述了通过正交偶极子阵列声波测井资料识别裂缝型储层中裂缝发育井段及类型,判断裂缝有效性及裂缝系统区域有效性,进而有效划分储集层的方法^[6]。申辉林等(2007)利用斯通利波反射系数、流体移动指数以及通过提取快慢横波信息得到的地层各向异性大小来进行裂缝识别和评价有效性^[7]。Tang等(2011)结合了井眼超声成像、斯通利波反射、正交偶极各向异性以及横波反射成像技术,对裂缝的渗透率、方位及其在井眼周围的连通性进行总体评估^[8]。魏周拓等(2012)利用横波各向异性研究了裂缝的发育程度、方位和有效性,并对低孔低渗地层的应力场分布状态和方位进行了综合评价^[9]。唐军等(2017)分别从斯通利波、纵横波以及正交偶极子声波等三方面拓展了声波测井在裂缝定量刻画中的应用^[10]。

可以看出,国内外研究人员针对利用多极子声波测井资料进行裂缝评价的研究取得了许多进展。但由于裂缝分布的复杂性,研究难度很大,在进行多极子声波测井资料数据处理时,地层信息和裂缝参数尚没有被充分挖掘和提取。本文通过文献调研,对多极子声波测井裂缝识别新方法进行了介绍、归纳。以鄂尔多斯盆地X井区的实际测井资料为例,利用纵横波时差比、井孔模式波声衰减、斯通利波反射系数和地层各向异性来识别裂缝,对裂缝型地层裂缝的发育程度和产状进行了综合评价,同时结合电成像测井资料进行了进一步的对比和验证。

1 纵横波时差比判断裂缝倾角

裂缝的存在会导致地层产生各向异性,各向异性介质在不同方向上的声波传播速度不同。当地层中有水平裂缝或低角度裂缝发育时,地层近似等同于对称轴沿竖直方向的横向各向同性介质(VTI),在与对称轴平行方向上传播的滑行纵波的时差为一个极大值,且纵波时差一般随传播方向与VTI介质对称轴之间夹角的增大而减小;而横波在沿对称轴方向上传播时,不同偏振方向的横波的时差基本不变化,但随着传播方向与VTI介质对称轴之间夹角的增大而不同偏振方向的横波时差差异变大。所以,VTI介质中的纵横波时差比与波的传播方向有关。当地层中有垂直裂缝或高角度缝发育时,地层近似于对称轴沿水平方向的横向各向同性介质(HTI),此时沿垂向传播的横波的时差将明显增大,但纵波时差受影响较小,所以此时的纵横波时差比相对减小^[11]。

纵横波时差比的计算公式为:

$$\text{纵横波时差比} = DTC/DTS \quad (1)$$

式中: DTC 为滑行纵波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; DTS 为滑行横波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

图1为BXX井纵横波时差比裂缝识别成果图。从图中可以看出,1421~1424 m深度段纵横波时差比明显减小,判断可能发育裂缝,结合电成像资料得知,该段发育多条裂缝,裂缝倾角为 $70^\circ \sim 80^\circ$;1426 m深度处纵横波时差比也明显减小,电成像显示该处没有裂缝发育,但是方位井径曲线显示该处严重扩径。通过这个例子可以说明,高角度裂缝和井眼扩径均可以引起纵横波时差比减小。另外,岩性变化和储层含气性也会造成纵横波时差比发生变化^[12],因此在评价裂缝时需要结合多种信息来消除这种多解性。

2 井孔模式波声衰减判断裂缝倾角和有效性

当井眼与地层垂直时,地层层理及低角度裂缝使仪器测量的滑行纵波能量衰减明显增大。这是由于纵波是一种典型的纵向偏振的体波,按压缩模式传播。在测量过程中滑行纵波的传播方向及质点位移方向与井轴平行,而层理和低角度裂缝能引起地层纵向上波阻抗的变化,从而导致滑行纵波能量幅度的衰减,其衰减程度随着层理和低角度裂缝发育程度的增加而增大。高角度裂缝能够引起滑行横波能量幅度的衰减,

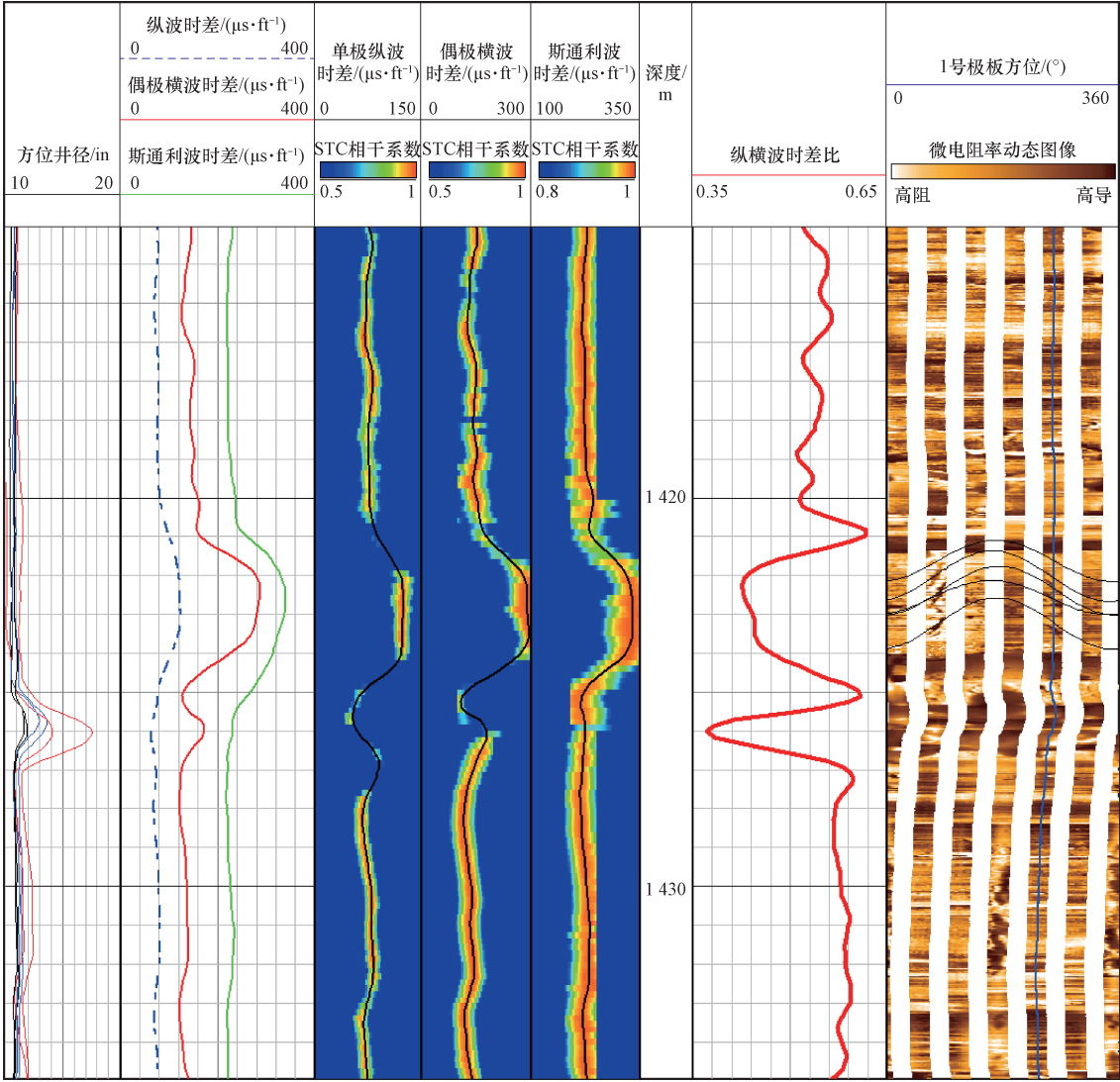


图 1 BXX 井纵横波时差比裂缝识别成果图

Fig. 1 The results of fracture identification using compressional to shear slowness ratio in Well BXX

衰减程度随着裂缝发育程度的增加而增大。这是由于横波是一种典型的剪切波,按剪切模式传播。在滑行横波测量过程中质点的位移方向与井轴垂直,而高角度裂缝能引起地层横向上波阻抗的变化,从而导致滑行横波能量幅度的衰减,其衰减程度也随着裂缝发育程度的增加而增大^[6]。

有效裂缝发育时,地层渗透性变好,由此将导致斯通利波能量严重衰减。这是因为在全波列中,斯通利波相对于其他组分波频率最低,探测深度最大,而且斯通利波在多孔介质中的传播特性与地层渗透性密切相关^[13]。同时,可根据全波列波形和变密度显示图上模式波能量衰减的“V”字形反射条纹定性解释裂缝发育层段^[14]。

阵列声波测井仪中任意两个接收器间的某种井孔模式波声衰减 $ATTU_{nm}$ 计算公式^[15] 为:

$$ATTU_{nm} = \frac{20\lg(A_n/A_m)}{(m-n)ds} \tag{2}$$

式中: $ATTU_{nm}$ 为第 n 和 m 个接收器之间的某种井孔模式波的声衰减, dB/m; A_n 和 A_m 分别为第 n 和 m 个接收器所接收波形中某种井孔模式波的幅度, V; ds 为接收器间距, m。

图 2 为 BXX 井井孔模式波声衰减裂缝识别成果图。从图中可以看出, 1 421 ~ 1 424 m 深度段滑行横波衰减显著增大, 滑行纵波和斯通利波衰减增大, 远单极波形变密度图上有“V”字形条纹, 判断可能发育渗透性高角度裂缝。结合电成像资料得知, 该段发育多条裂缝, 裂缝倾角为 70° ~ 80°, 说明高角度裂缝对滑行横波衰减影响较大; 1 426 m 深度处滑行纵波、滑行横波、斯通利波衰减均明显增大, 远单极波形变密度图上有“V”字形条纹, 电成像显示该处没有裂缝发育, 但是

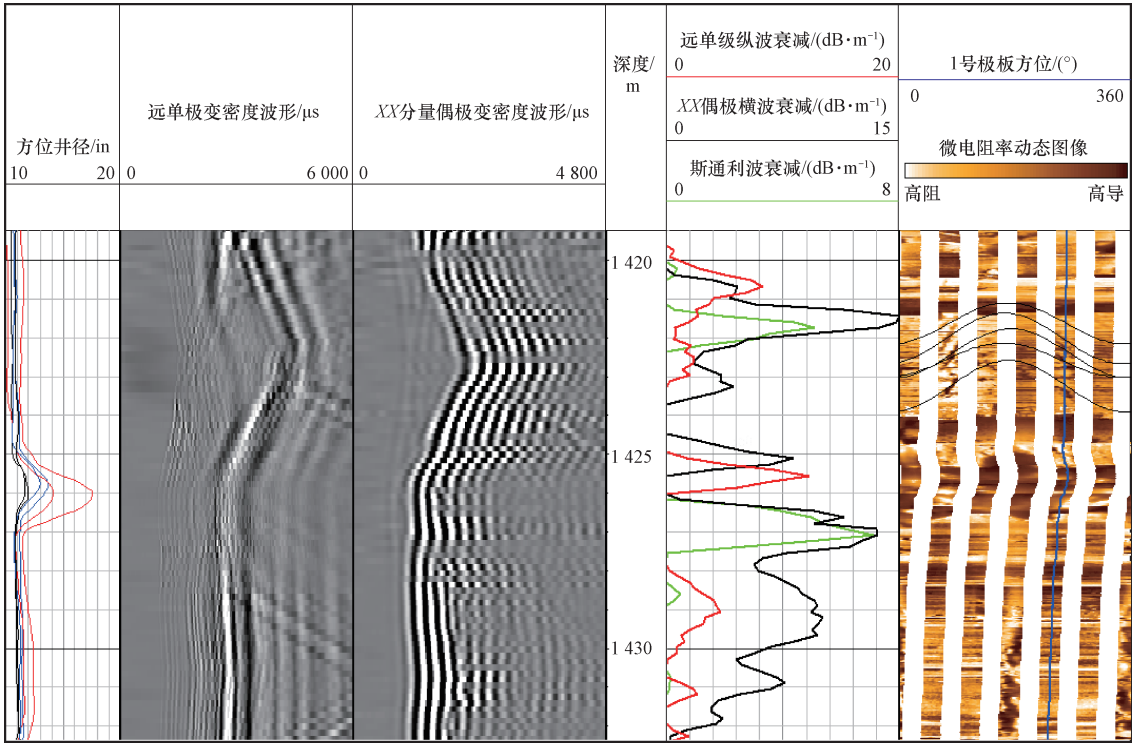


图 2 BXX 井井孔模式波声衰减裂缝识别成果图

Fig. 2 The results of fracture identification using borehole mode wave attenuation in Well BXX

方位井径曲线显示该处严重扩径,说明井眼扩径会引起井孔模式波声衰减增大。另外,岩性、储层含气性等也会造成声衰减增大^[12],因此在评价裂缝时需要结合多种信息来消除这种多解性。

3 斯通利波反射系数确定裂缝位置

斯通利波是一种低频散的导波,其传播速度略低于井内流体体波波速,并且不存在几何衰减,在全波列各种组分波中频率最低,能量较高,到达时间较晚^[16]。斯通利波主要在井壁的表面传播,其能量从井壁开始向两侧呈指数衰减。当地层中存在与井眼相交的裂缝时,由于井内泥浆与地层中的流体的相互流动造成了斯通利波能量的损失,并在裂缝所在的深度位置形成反射斯通利波(图 3)。

通过低通滤波、中值滤波、二维频率滤波等对声波全波列进行波场分离,可分别得到直达斯通利波、上行和下行的反射斯通利波,并计算出斯通利波的反射系数^[17]。

斯通利波反射系数频谱 $r(\omega)$ 的计算公式^[5]为:

$$r(\omega) = \frac{R(\omega)D^*(\omega)}{\max[D(\omega)D^*(\omega), 0.01E]} \quad (3)$$

式中: $r(\omega)$ 为斯通利波反射系数频谱,无量纲; $D(\omega)$ 为直达斯通利波的频谱,无量纲; $R(\omega)$ 为反射斯通利

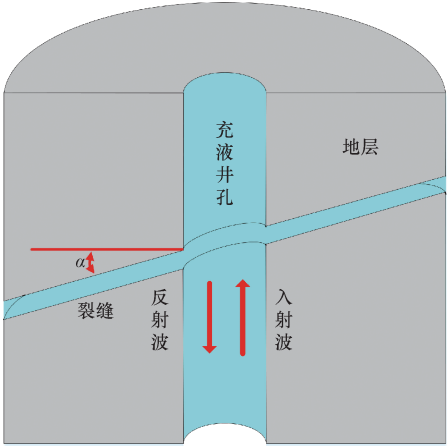


图 3 渗透性裂缝引起的反射斯通利波示意图

Fig. 3 The schematic diagram showing Stoneley wave reflection caused by permeable fractures

波的频谱,无量纲; $D^*(\omega)$ 为 $D(\omega)$ 的共轭频谱,无量纲; E 为 $D(\omega)D^*(\omega)$ 的峰值,无量纲。

斯通利波反射系数 R 为所有频率处的反射系数 $r(\omega)$ 之和:

$$R = \sum_{\omega} r(\omega) \quad (4)$$

式中: R 为某一深度处的斯通利波反射系数,无量纲。

图 4 为 WXX 井斯通利波反射系数裂缝识别成果图。第 1 道为远单极波形变密度图;第 2 道为经过低通滤波后得到的斯通利波波形变密度图;第 3、第 4 和

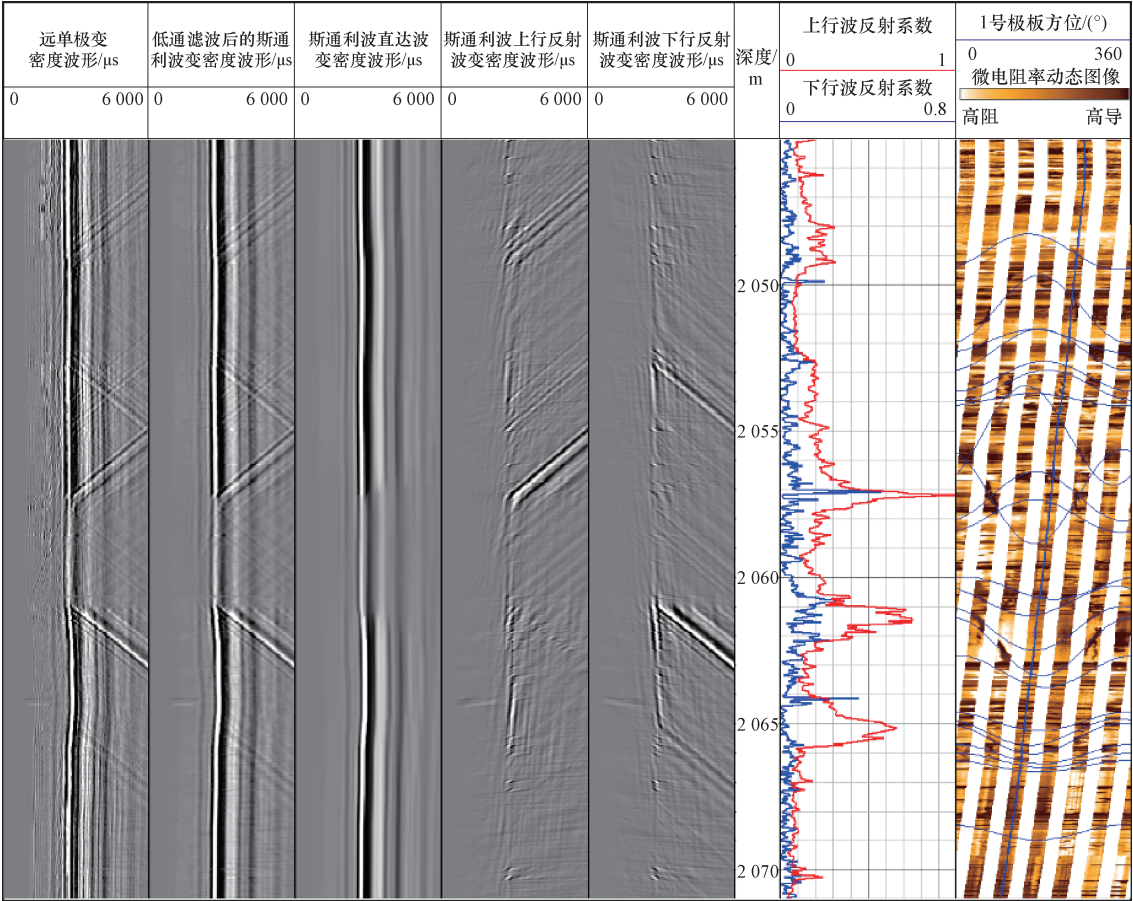


图 4 WXX 井斯通利波反射系数裂缝识别成果图

Fig. 4 The results of fracture identification using Stoneley wave reflection coefficient in Well WXX

第 5 道分别为经过波场分离之后得到的斯通利波直达波、上行反射波和下行反射波,从图中可以看出波场分离效果较好;最后 3 道分别为深度、上行波和下行波反射系数、微电阻率扫描动态图像。从图中可以看出,在 2 049,2 053,2 057,2 061 和 2 065 m 这几个深度处上行波反射系数明显增大,出现尖峰。结合电成像资料得知,这几个深度处均发育数条裂缝,说明利用斯通利波反射系数可以确定裂缝位置。

另外,井眼突变及声阻抗差异明显的地层界面、交错层理等地质现象也会引起斯通利波反射^[8,12]。一般情况下,渗透性裂缝引起的斯通利波反射系数对频率变化敏感,随着频率增大,斯通利波反射系数逐渐减小;而地层界面等情况引起的斯通利波反射系数对频率不敏感,几乎不随频率变化发生改变。因此,可以利用斯通利波反射系数的频率依赖特性来区分渗透性裂缝与其他地质现象^[8]。

4 地层各向异性评价裂缝发育程度和走向

从正交偶极测井资料中可以获得地层各向异性参

数,判断地层最大水平地应力方向、识别裂缝、设计水力压裂和定向射孔方案,了解钻井过程的稳定性、井眼如何对应力产生反应以及地层的地质力学性质^[9]。利用地层各向异性可以对实际状态下的地层裂缝进行评估和分析。我们根据各向异性地层所导致的横波分裂现象,分别研究了横波时差各向异性、快横波方位和快、慢横波频谱差异与地层裂缝之间的关系,对裂缝型地层裂缝的发育程度和走向进行了综合评价,并结合电成像测井资料进行了进一步的对比和验证。

4.1 横波时差各向异性估计裂缝发育程度,快横波面方位确定裂缝走向

图 5 为裂缝型地层中四分量正交偶极子测井示意图。在垂直裂缝型地层 (HTI 介质) 中,在与裂缝面平行的方向上偏振的横波对应的地层弹性模量较高,因而传播较快;而在裂缝开裂方向 (即裂缝面的法线方向) 上偏振的横波对应的弹性模量较低,因而传播速度较慢,这就导致了不同偏振方向的横波在传播过程中的波速差异^[18]。

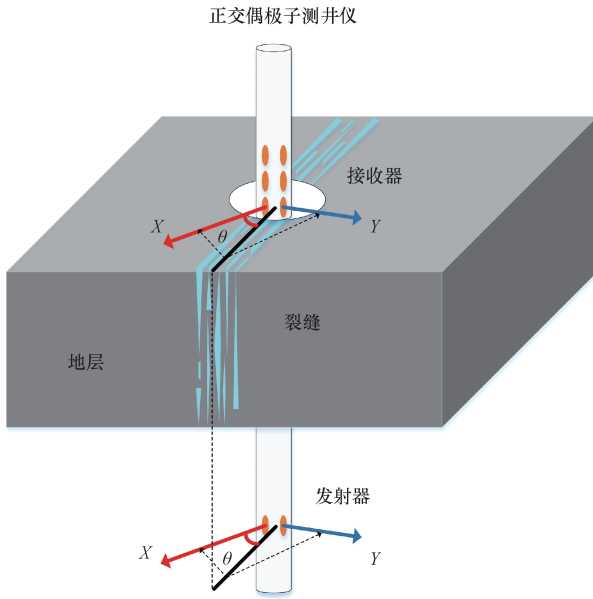


图5 裂缝型地层中四分量正交偶极子测井示意图

Fig. 5 The schematic diagram showing the four-component orthogonal dipole logging in fractured formation

垂直裂缝引起的横波时差各向异性可以用 Schoenberg 和 Sayers (1995) 的理论建模^[19]。偏振方向平行和垂直于裂缝平面的横波速度 V_s 分别为:

$$V_s = \begin{cases} \sqrt{\mu/\rho} & \text{平行于裂缝平面} \\ \sqrt{\mu(1-\sigma)/\rho} & \text{垂直于裂缝平面} \end{cases} \quad (5)$$

式中: V_s 为横波速度, m/s; ρ 为地层密度, kg/m³; μ 是岩石基体(即未破裂的岩石)的剪切模量, Pa; σ 为速度减小参数, 无量纲。

速度减小参数 σ 由裂缝的软化作用引起, 计算公式如下:

$$\sigma = \mu Z_F / (1 + \mu Z_F) \quad (6)$$

式中: Z_F 为裂缝的刚度, N/m。 Z_F 描述了在剪切应力作用下裂缝变形的难易程度, 与裂缝密度、宽度和充填材料性质有关。

可以理解 σ 是剪切模量为 μ 的岩石基体破裂程度的量度, 很明显, 横波时差各向异性的大小由断裂程度或断裂强度控制^[8]。

可见, 横波时差各向异性的强弱程度正比于裂隙的发育度(即裂隙的多少及开裂程度), 快横波的偏振方向在裂隙的平面上。这是利用正交偶极子测井评价裂缝的理论基础。因此可以通过从正交偶极子测井中确定的时差各向异性的大小来评价裂缝的发育度, 从快横波偏振方向求取裂缝走向。

利用快横波的偏振方向求得的裂缝走向, 结合该深度处地层最大水平主应力方向, 可以判别该裂缝系统的有效性。当裂缝系统走向与现今最大水平主应力

方向一致或角度相差较小时(小于 30°), 裂缝能最大程度地发挥其渗流通道的作用, 此时认为裂缝系统的区域有效性最强; 反之, 当二者斜交角度较大(大于 30°)或垂直时, 裂缝的渗流作用大大降低, 裂缝的区域有效性就变弱, 且相差角度越大, 裂缝系统有效性就越差^[20]。

横波时差各向异性 ANI 计算公式如下:

$$ANI = \frac{2(s_2 - s_1)}{s_2 + s_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中: ANI 为横波时差各向异性, %; s_1 和 s_2 分别为快、慢横波的时差, $\mu\text{s/m}$ 。

在实际测井过程中, 偶极发射探头的偏振方向(X方向)一般不与裂缝面重合, 设X方向与裂缝面有一夹角 θ , 如图5所示。基于四分量测井数据、采用 Alford 旋转法^[21]或波形反演分析方法^[22], 确定该方位角 θ 。然后, 结合X发射探头偏振方向与正北方向的夹角, 计算得到最终的裂缝走向。

图6为WXX井横波时差各向异性与快横波面方位的裂缝识别成果图。从图中可以看出, 2 047 ~ 2 064 m 深度段各向异性较强, 为8%左右, 结合电成像资料得知, 该段地层发育大量高角度天然裂缝。2 064 ~ 2 067 m 深度段各向异性较弱, 为2%左右, 结合电成像资料得知, 该段地层发育少量径向延伸较短的钻井诱导裂缝, 说明横波时差各向异性大小与裂缝发育程度具有很好的相关性。统计2 047 ~ 2 067 m 深度段快横波面的方位角, 发现该段快横波面方位角呈现出较好的一致性, 为20°~30°, 结合电成像资料得知, 裂缝走向大约为30°, 说明利用快横波面方位角可以较准确地确定地层裂缝走向。

需要注意的是, 利用各向异性评价地层裂缝时, 要特别注意正交裂缝的存在。这是因为, 当裂缝面相互垂直, 并且发育强度相当时, 地层各向异性将大大降低^[9,23]。同时, 泥质充填或方解石充填的高角度裂缝也只有微弱的各向异性^[20]。另外, 不平衡的地层应力、与井眼相交的沉积层理均可产生各向异性^[8,24]。因此, 结合其他测井信息才能解决多解性问题, 找到各向异性产生的原因。

4.2 快、慢横波频谱差异估计裂缝发育程度

裂缝型地层中, 在与裂缝面平行的方向上偏振的横波对应的地层弹性模量较高, 在裂缝开裂方向(即垂直裂缝表面的方向)上偏振的横波对应的弹性模量较低^[18]。而且, 在两个偏振方向上的横波传播的声衰减性质不同, 这会导致快、慢横波的衰减、能量和频谱等出现差异。

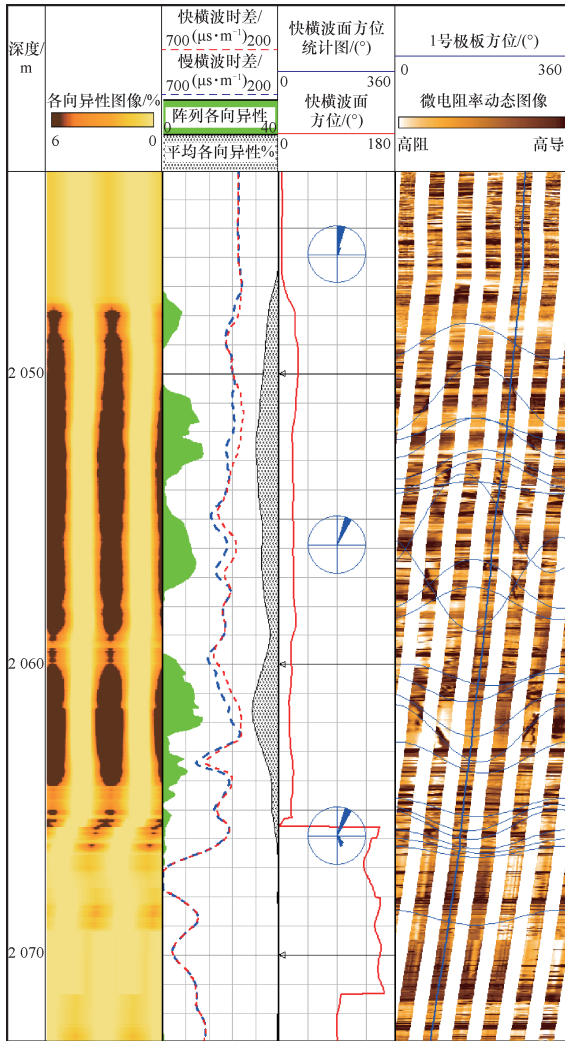


图6 WXX井横波时差各向异性与快横波面方位的裂缝识别成果图

Fig. 6 The results of fracture identification using shear wave slowness anisotropy and fast shear azimuth in Well WXX

为了得到更多的地层各向异性参数,借鉴谱分析技术,对快、慢横波的频谱(幅度谱)差异进行分析^[10],研究其与裂缝发育强度之间的关系。我们分别计算了快、慢横波频谱(幅度谱)差谱、能量差、谱相关系数和频率偏移量等参数。

差谱 $\Delta X(\omega)$:

$$\Delta X(\omega) = \text{abs}[X_F(\omega) - X_S(\omega)] \quad (8)$$

能量差 ΔE :

$$\Delta E = \sum_{\omega} \{ \text{abs}[X_F^2(\omega) - X_S^2(\omega)] \} \quad (9)$$

谱相关系数 C_p :

$$C_p = \frac{N \sum_{\omega} X_F(\omega) X_S(\omega) - \sum_{\omega} X_F(\omega) \sum_{\omega} X_S(\omega)}{\sqrt{N \sum_{\omega} X_F^2(\omega) - \left[\sum_{\omega} X_F(\omega) \right]^2} \sqrt{N \sum_{\omega} X_S^2(\omega) - \left[\sum_{\omega} X_S(\omega) \right]^2}} \quad (10)$$

频率偏移量 Freq_Offset 计算方法为:首先计算快、慢横波频谱互相关系数 $R(\Delta\omega)$,然后求得使 $R(\Delta\omega)$ 最大的 $\Delta\omega$ 即为频率偏移量 Freq_Offset 。其中,快、慢横波频谱互相关系数 $R(\Delta\omega)$ 公式为:

$$R(\Delta\omega) = \sum_{\omega} X_F(\omega) X_S^*(\omega + \Delta\omega) \quad (11)$$

式中: $\Delta X(\omega)$ 为差谱,无量纲; ΔE 为能量差,无量纲; C_p 为谱相关系数,无量纲; Freq_Offset 为频率偏移量,Hz; $R(\Delta\omega)$ 为快、慢横波频谱互相关系数,无量纲; $X_F(\omega)$ 和 $X_S(\omega)$ 分别为快横波、慢横波的频谱(幅度谱),无量纲; N 为频率采样点总数,无量纲。

图7为WXX井快慢横波谱分析裂缝识别成果图。第1道为快、慢横波时域波形和计算窗口起始、结束时间(仅仅对时窗内选取的波形进行快、慢横波谱分析,窗长一般选取波形的2~3个周期);第2道为快、慢横波时差和平均时差各向异性、阵列时差各向异性(刻度范围为0~40%);第3道为深度;第4道为差谱二维成像图(刻度范围为0~8 kHz);第5道为能量差和谱相关系数;第6道为频率偏移量;第7道为0°~360°的微电阻率扫描动态图像。可以看出,1996 m深度处差谱信号较强,谱峰数目增多,频率偏移量较大,结合电成像资料得知,该处发育一条高角度裂缝。2000~2004 m深度段差谱信号很强,谱峰数目增多,频率偏移量很大,结合电成像资料得知,该处发育多条高角度裂缝;说明差谱信号强弱,谱峰数目和频率偏移量大小与裂缝发育强度具有很好的相关性。频率偏移量越大,差谱信号越强,谱峰数目越多,则说明裂缝发育程度越高。

5 多种裂缝评价方法的综合应用与分析

利用多极子声波测井资料提取纵横波时差比、井孔模式波声衰减、斯通利波反射系数和地层各向异性等信息是目前进行裂缝识别与评价的有效方法。表1是本文总结的不同裂缝评价方法作用与干扰因素。从表中可以看出,每一种方法可以估计一部分裂缝参数,但在评价地层裂缝时均存在一定的干扰因素,如岩性、井径、地层界面等;而综合这几种裂缝评价方法可以获取裂缝发育程度、裂缝倾角、走向和有效性等参数,同时剔除如储层含气性、正交共轭型裂缝等一部分多解性。

图8为BXX井综合多种方法的裂缝识别成果图。可以看出,在1421~1424 m深度段,井径无明显变化,纵横波时差比明显减小,横波衰减明显增大,纵波和斯通利波衰减增大,斯通利波反射系数明显增大,频

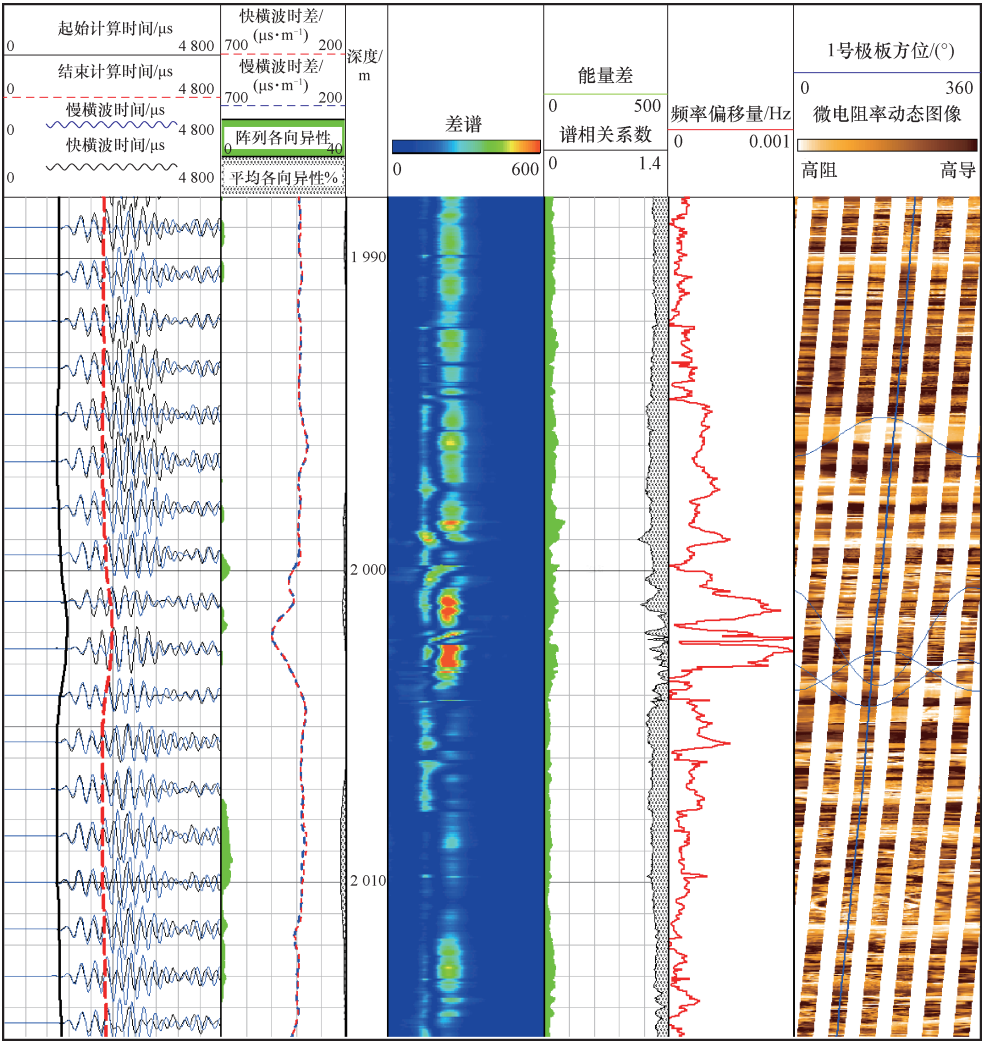


图 7 WXX 井快慢横波谱分析裂缝识别成果

Fig. 7 The results of fracture identification using fast and slow shear wave spectrum analysis in Well WXX

表 1 不同裂缝评价方法作用与干扰因素

Table 1 The role of and interference factors to various fracture assessment methods

裂缝评价方法	纵横波时差比	井孔模式波声衰减	斯通利波反射系数	地层各向异性	
				横波时差各向异性和快横波面方位	快慢横波频谱差异
裂缝发育程度(裂缝数量和开裂程度)	✓	✓	✓	✓	✓
裂缝倾角	✓	✓	×	×	×
裂缝走向	×	×	×	✓	×
裂缝有效性(裂缝渗透性)	×	✓	✓	✓	×
干扰因素	岩性、井径、储层含气性等	岩性、井径、储层含气性等	井眼突变及声阻抗差异明显的地层界面、交错层理等地质现象	不均衡的地层应力、与井眼相交的沉积层理、正交共轭型裂缝、充填型裂缝、井径等	不均衡的地层应力、与井眼相交的沉积层理、正交共轭型裂缝、充填型裂缝、井径等

率偏移量明显增大,差谱信号增强、谱峰数目增多,各向异性较强、为 8%左右,快横波面方位角为 80°左右,远单极波形变密度图上有“V”字形条纹,说明该深度

段发育高角度裂缝,走向为 80°左右,裂缝发育强度较大,有效性较好。结合电成像资料得知,该段发育多条裂缝,裂缝倾角为 70°~80°,走向大约为 78°,说明综

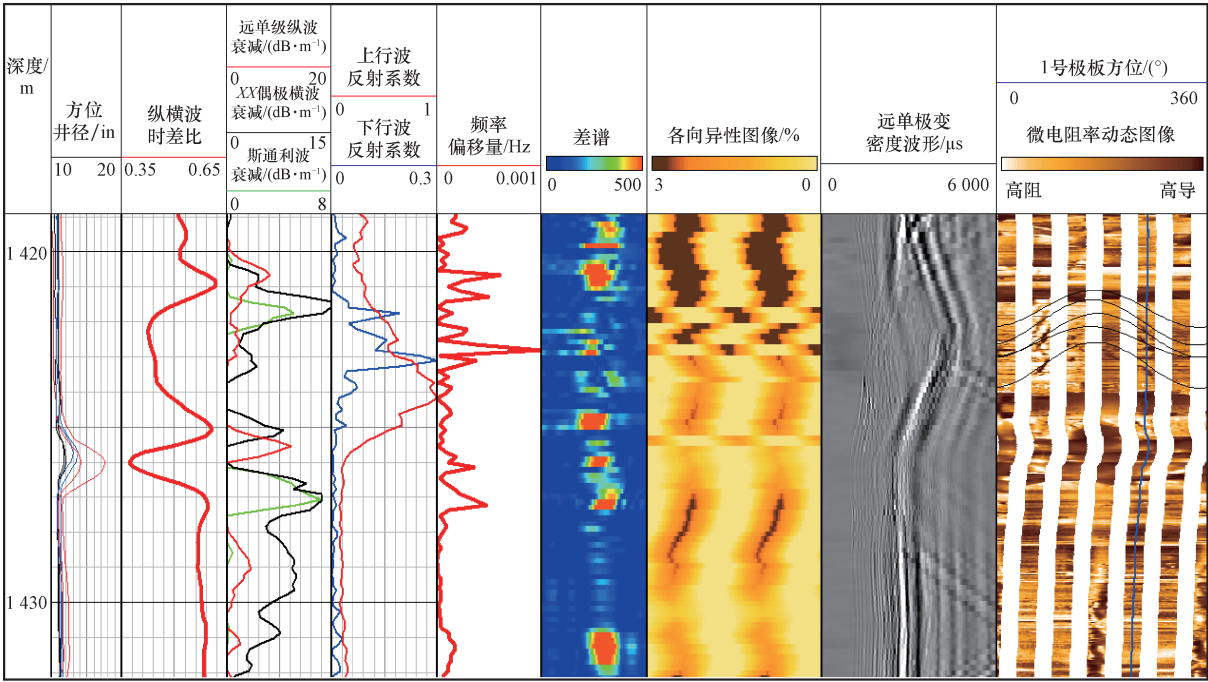


图 8 BXX 井综合多种方法的裂缝识别成果图

Fig.8 The results of fracture identification with multiple methods integrated in Well BXX

合多种裂缝评价方法可以较准确地识别地层裂缝,判断裂缝倾角,确定裂缝走向和评价裂缝有效性。1 426 m 深度处,井径明显增大,后面多种方法的处理曲线也出现了 1 421 ~ 1 424 m 深度段中的现象,但是电成像显示该处没有裂缝发育,说明扩径是各种方法评价裂缝时的干扰因素,结合井径曲线可以排除井眼突变的影响。

6 结论

多极子声波测井资料在裂缝评价中作用较大,应用相关数据处理技术得到的纵横波时差比、井孔模式波声衰减、斯通利波反射系数和地层各向异性等信息可以识别裂缝或估计裂缝发育程度,定性或半定量地评价地层裂缝。通过对现场测量的多口井的多极子声波测井数据的处理可知,纵横波时差比可以用于判断裂缝倾角;井孔模式波声衰减可以用于判断裂缝倾角和有效性;斯通利波反射系数可以用于确定裂缝位置,判断裂缝有效性;快横波面方位可以用于确定垂直裂缝走向,结合该深度处井壁成像资料,可以判别该裂缝系统的有效性。

单一方法只能确定部分裂缝参数,且存在较多干扰因素,用于识别裂缝时存在一定程度的多解性。利用纵横波时差比和井孔模式波声衰减评价地层裂缝时,要考虑岩性、井径、储层含气性等因素的影响。利

用斯通利波反射系数评价裂缝时,要排除井眼突变及声阻抗差异明显的地层界面、交错层理等地质现象。利用地层各向异性评价裂缝时,要注意不均衡的地层应力、与井眼相交的沉积层理、正交共轭裂缝、充填型裂缝、井径等干扰因素。结合多种裂缝识别方法和其它测井信息,可以在一定程度上排除一些干扰因素,获取更多的裂缝参数。因此,在较复杂地质条件下进行裂缝识别与评价时,要综合多种方法,相互验证,以充分挖掘、提取裂缝信息,并解决单一方法引起的多解性问题。同时,尽可能地结合其他测井资料,从而实现对地层裂缝较准确的评价。

参 考 文 献

[1] 彭仕宓,黄述旺. 油藏开发地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 1998.
Peng Shimi, Huang Shuwang. Reservoir development geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
[2] 曹飞. 裂缝性岩石声波参数实验研究及裂缝性储层测井评价 [D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
Cao Fei. The acoustic parameters experimental research of fractured rocks and the log evaluation of fractured reservoirs [D]. Jilin: Jilin University, 2015.
[3] 张筠. 川西坳陷裂缝性储层的裂缝测井评价技术 [J]. 天然气工业, 2003, 23 (z1): 43 - 45.
Zhang Yun. Fracture log evaluation techniques of the fractured reservoirs in West Sichuan Depression [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23 (z1): 43 - 45.

- [4] 孙伟,李玉凤,付建伟,等. 测井及地震裂缝识别研究进展[J]. 地球物理学进展,2014,29(3):1231-1242.
Sun Wei, Li Yufeng, Fu Jianwei, et al. Review of fracture identification with well logs and seismic data[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2014, 29(3):1231-1242.
- [5] Hornby B E. Fracture evaluation using reflected Stoneley-wave arrivals[J]. Geophysics, 1989, 54(10):1274-1288.
- [6] 朱留方. 交叉偶极子阵列声波测井资料在裂缝性储层评价中的应用[J]. 测井技术, 2003, 27(3):225-227.
Zhu Liufang. Application of Novel Cross-dipole Acoustic Logging Data in Fractured Reservoir Evaluation[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(3):225-227.
- [7] 申辉林,高松洋. 交叉偶极声波资料在裂缝评价中的应用[J]. 新疆石油天然气, 2007, 3(1):11-13.
Shen Huilin, Gao Songyang. Application of Cross Dipole Acoustic Data in Crack Evaluation[J]. Xinjiang Oil Gas, 2007, 3(1):11-13.
- [8] Tang X, Bolshakov A, Patterson D. Integrated acoustic evaluation of reservoir fractures: from borehole out into the formation[J]. Petrophysics, 2011, 52(03):199-206.
- [9] 魏周拓,范宜仁,陈雪莲. 横波各向异性在裂缝和应力分析中的应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1):217-224.
Wei Zhoutuo, Fan Yiren, Chen Xuelian. Application of shear wave anisotropy in fractures and in-situ stress analysis[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2012, 27(1):217-224.
- [10] 唐军,章成广,信毅. 油基钻井液条件下裂缝声波测井评价方法——以塔里木盆地库车坳陷克深地区致密砂岩储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3):389-397, 406.
Tang Jun, Zhang Chengguang, Xin Yi. A fracture evaluation by acoustic logging technology in oil-based mud: A case from tight sandstone reservoirs in Keshen area of Kuqa depression, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3):389-397, 406.
- [11] 赖锦,王贵文,孙思勉,等. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4):1712-1724.
Lai Jin, Wang Guiwen, Sun Simian, et al. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4):1712-1724.
- [12] 吴晓光,季凤玲,李德才. 偶极声波测井技术应用现状及研究进展[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(1):380-389.
Wu Xiaoguang, Ji Fengling, Li Decai. Application status and research progress of dipole acoustic well logging[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(1):380-389.
- [13] 许赛男,别旭伟. 交叉偶极声波测井在渤海锦州南潜山裂缝性储层中的应用[J]. 国外测井技术, 2010(1):30-33.
Xu Sainan, Bie Xuwei. Application of cross dipole acoustic logging in fractured reservoir of Nanzhong Mountain, Jinzhou, Bohai Sea[J]. World Well Logging Technology, 2010(1):30-33.
- [14] 陈莹,谭茂金. 利用测井技术识别和探测裂缝[J]. 测井技术, 2003, 27(S):11-14.
Chen Ying, Tan Maojin. Fracture detection and identification using logging techniques[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(S):11-14.
- [15] 乔文孝,陈雪莲,杜光升,等. 隔声体性能评价的方法研究[J]. 测井技术, 2002, 26(2):104-106.
Qiao Wenxiao, Chen Xuelian, Du Guangsheng, et al. On performance evaluation of a sound isolator[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(2):104-106.
- [16] 余春昊,李长文. 利用斯通利波信息进行裂缝评价[J]. 测井技术, 1998, 22(4):273-277.
Yu Chunhao, Li Changwen. Application of stoneley waves to fracture evaluation[J]. Well Logging Technology, 1998, 22(4):273-277.
- [17] 何涛,史譔. 斯通利波在测井应用中的研究进展和现状[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002(04):510-516.
He Tao, Shi Ge. Advance and the status quo of the research on applications of stoneley wave in well logging[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2002, 38(04):510-516.
- [18] 苏远大,乔文孝,孙建孟,等. 正交偶极声波测井资料在评价地层各向异性中的应用[J]. 石油物探, 2005, 44(4):409-412.
Su Yuanda, Qiao Wenxiao, Sun Jianmeng, et al. Evaluating formation shear-wave anisotropy by using cross-dipole acoustic logging data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(4):409-412.
- [19] Schoenberg M, Sayers C M. Seismic anisotropy of fractured rock[J]. Geophysics, 1995, 60(1):204-211.
- [20] 申辉林,杨金花,高松洋. 横波各向异性在安棚地区裂缝评价中的应用[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(3):373-375.
Shen Huilin, Yang Jinhua, Gao Songyang. Application of shear wave anisotropy to fracture evaluation in Anpeng Area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(3):373-375.
- [21] Alford R M. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy: Dilemma, Texas[M]//Society of Exploration Geophysicists. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1986. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1986:476-479.
- [22] 唐晓明,郑传汉. 定量测井声学[M]. 北京:石油工业出版社, 2004:108-144.
Tang Xiaoming, Cheng Chuanhan. Quantitative borehole acoustic methods[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2004:108-144.
- [23] Xu S, Tang X, Torres-Verdin C, et al. Seismic shear wave anisotropy in cracked rocks and an application to hydraulic fracturing[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(11):5390-5397.
- [24] Zhuang C, Xu S, Li H, et al. Azimuthal shear-wave anisotropy measurement in a borehole: Physical modeling and dipole acoustic verification[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 146(2):EL129-EL134.

(编辑 张亚雄)