

井中偶极声源激励下的反射声场影响因素分析及仪器关键参数优选

魏周拓^{1,2}, 唐晓明^{1,2}, 陈雪莲^{1,2}

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580;

2. 中海油田服务股份有限公司-中国石油大学声学测井联合实验室, 山东青岛 266580)

摘要:根据远探测测井的实际背景,利用三维有限差分数值模拟方法精确考察井中偶极声源条件下声源激发频率、反射界面水平位置、地层界面倾角及偶极声源偏振方向对反射横波幅度的影响。结果表明:偶极横波远探测测井仪的最佳工作频率应选择井孔绕曲波的截止频率以下,可解决来自地层深部的反射信号相对于沿井传播的直达波信号过于微弱的问题。按照现有的仪器范围设置(源距小于4 m),可有效地探测地层倾角为40°~90°的井旁反射体。

关键词:声波测井;反射横波幅度;声源激发频率;测量源距

中图分类号:P 631.814 文献标志码:A

Influencing factors analysis and remote acoustic sensing instrument preferences optimization on reflected shear-wave of fluid-filled borehole dipole excitation

WEI Zhou-tuo^{1,2}, TANG Xiao-ming^{1,2}, CHEN Xue-lian^{1,2}

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. COSL-UPC Allied Borehole Acoustic Laboratory in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: According to practical needs of acoustic remote detection logging, the present paper investigates the influences of source frequency, reflection interface position, interface dip and dipole source orientation on S-wave reflection amplitude by using an accurate 3D finite difference numerical simulation method. Analysis results show that the operating frequency of the dipole S-wave remote detection instrument should be below the cut-off frequency of flexural wave, so as to enhance the amplitude of the reflected signal from formation reflector relative to that of the direct flexural wave along borehole. It is recommended that the data acquisition tool should have a source-to-receivers offset less than 4 m in order to effectively image a formation reflector with a dip angle in 40°–90° range.

Key words: acoustic logging; reflected S-wave amplitude; dipole source frequency; receiver offset

近年来,单井远探测成像测井已经成为声波测井中的一个热门技术^[1-9],尤其是利用偶极声波远探测来获知井旁地质构造的横向延伸范围和发育情况,而现有的偶极横波远探测数据基本都是常规偶极或交叉偶极测井仪器采集得到的,这种仪器的研制大都没有考虑远探测的需要。薛梅^[10]采用实轴积分法研究了源距及声源频率对反射波全波列波形、频谱和能量的影响,该方法简单、直观,但无法给

出反射波幅度和频谱等动力学参数的变化规律。何峰江^[11]采用二维有限差分的方法精确考察了井中单极声源激励下声源频率、接收器源距、反射界面位置及界面倾角等因素对反射纵波(P-P)幅度的影响,但该方法无法用于考察反射声场的方位特性。为了克服以上不足,利用三维有限差分数值模拟方法^[12]对井中偶极声源激发的反射声场影响因素进行了深入研究和探讨,指出了专用的偶极横波远探

测井仪的优选工作频率和源距范围。笔者利用三维有限差分数值模拟方法考察井中偶极声源条件下声源激发频率、反射界面水平位置、地层界面倾角及偶极声源偏振方向对反射横波幅度的影响。

1 偶极声源频率对反射横波幅度的影响

在井孔声场理论中,声源频率对于整个声场具有决定性的作用。频率选择过低,无法达到测井高分辨率和探测深度的折中;频率选择过高,将不能有效压制井中直达波信号,无法改善直达波和反射波分离的效果。因此,必须综合考虑以上两点,既要保证对井旁反射体的高分辨率识别能力,又要达到有效压制井中直达波和增强地层反射信号的目的。

图1给出了井旁倾角为 80° 的反射界面充液井孔计算模型,图中仅显示了 xoz 截面。计算中采用

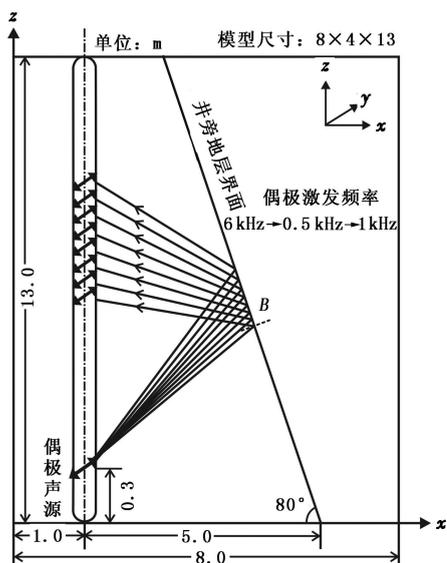


图1 不同偶极声源激发频率下的井旁地层界面计算模型
Fig.1 Near-borehole interface model with fluid-filled borehole in different excitation frequency

的模型参数如表1所示,地层界面垂直于 xoz 平面,偶极声源位于 $x=1.0\text{ m}$ 、 $y=1.0\text{ m}$ 和 $z=0.3\text{ m}$ 处,其偏振方向始终平行于井旁地层界面走向。需要指出的是,对于实际的偶极横波远探测测井过程,由于采用了四分量的偶极声源发射和数据采集技术,在任意偶极声源偏振方向下,都可以通过对4个接收分量进行组合,得到所需要的对井旁反射体探测最有利的SH反射横波^[9]。因此,本文仅考察了偶极声源偏振方向与井旁地层界面走向平行的情况。计算中偶极声源中心频率从 6 kHz ,以 0.5 kHz 的等频

率间隔依次减小到 1 kHz ,总计11个声源频率,在每种工作频率下,用数值模拟方法得到井孔声场。

表1 地层和井孔流体弹性参数

Table 1 Formation and borehole fluid elastic parameters

| 模型参数 | 纵波速度 $v_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 横波速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 直径 d / m |
|------|--|--|---|----------------------|
| 井眼流体 | 1500 | — | 1000 | 0.2 |
| 靠近井轴 | 3000 | 1800 | 2000 | ∞ |
| 远离井轴 | 4500 | 2650 | 2400 | ∞ |

当偶极声源偏振方向平行于反射体走向时,在地层界面法线面内产生纯的SH反射横波^[7,9,12];当偶极声源偏振方向垂直于反射体走向时,则会产生P-SV反射波。两者相比而言,SH反射横波更有利于偶极横波远探测。为了定量考察SH反射横波幅度的变化规律,定义了如下的计算公式:

$$RA_{\text{ref}} = 20 \log \frac{A_{\text{flex}}}{A_{\text{ref}}}; A_{\text{ref}\&\text{flex}} = \| S(t)_2 \| / \sqrt{N}. \quad (1)$$

式中, RA_{ref} 为井孔绕曲波幅度和反射波幅度之间的相对大小; A_{flex} 为井孔绕曲波幅度; A_{ref} 为反射波幅度; $S(t)$ 为弯曲波信号或反射波信号; N 代表信号的长度。

从式(1)可以看出, RA_{ref} 反映了井孔绕曲波幅度和反射波幅度之间的相对大小关系,而不是反射波幅度的绝对数值,这样声波信号在井中进行数字化采样时,就可以考察如何避免“艾里相”波包的巨大振幅对数据量化产生的“饱和”效应,将反射波明确地记录下来。在对模拟数据进行处理时,只须选择合适的源距,即可在时域中将井孔绕曲波和反射波进行分离。对于实测数据来说,由于反射信号相对于沿井传播的井孔绕曲波是一个十分微弱的信号,其振幅只有井中传播声波的几十到几百分之一,甚至几千分之一,往往被井中直达波所淹没,通常直接可以将测量波形信号近似为井孔绕曲波,求取绕曲波幅值。

对不同声源激发频率下数值模拟得到的井孔全波列进行波场分离^[13],提取出SH反射横波,按照式(1)开窗计算源距范围在 $1.0 \sim 8.0\text{ m}$ 的反射横波绝对幅度。将计算得到的反射横波幅度显示在由源距和频率所构成的坐标系下。图2给出了反射横波幅度与源距和声源频率的三维关系以及对应的等值线图。从图2(a)中可以看出,某一源距下,随着偶极声源激发频率的增加,反射横波的绝对幅值在 $2.2 \sim 3.2\text{ kHz}$ 内存在一个极值区域。从对应的等值线图2(b)中的框形区域可以看出,该频段恰好位于四分量偶极测井仪的工作频率范围,而这样的

一个局部极值区域单纯从反射横波强度来说对于远探测是有利的,但实际情况并非如此。对该频率段的弯曲波开窗求取峰值,结果显示这个极值区域所对应的弯曲波幅度在整个频率范围内也达到了最大值,对应波列正是“艾里相”产生的波包。这种情况对远探测测井时记录井外的反射声场是极为不利的,这是因为测井仪器在测井数据数字化采样过程中,须将记录信号通过增益调节后,再送入模数转换器进行量化。量化时的最大信号振幅由记录信号中的最大振幅所决定,显然就是井中直达弯曲波的最

大振幅;从井中辐射出去并反射回来的声波信号,经过传播距离上的几何扩散和地层的非弹性吸收衰减后,将变得很小(实际地层下的反射波信号将更小)。显然,与井中的直达波振幅相比,反射波信号在量化采样时,只能在幅度很小的低位数上被数字化。这样,在量化后的数字化波形数据中,反射波信号的振幅将非常之低,甚至会低于波形数据中的噪声干扰的水平,导致常规偶极测井的数据中很难观测到远处地层来的反射信号,也无法在时域中将二者分开,这是目前偶极远探测测井的一个局限性。

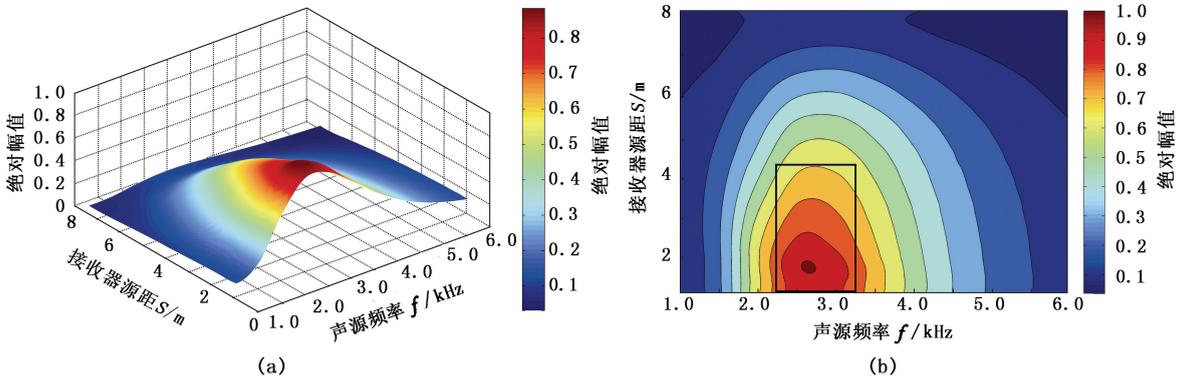


图 2 SH 反射横波幅度与源距和声源频率的三维变化关系及对应的等值线图

Fig. 2 Relationship among amplitude of SH reflection wave and spacing & source frequency and corresponding contour map

根据以上分析,按照公式(1)开窗计算了 SH 反射横波相对于井中挠曲波的相对大小。图 3 给出了

不同声源工作频率和源距下,SH 反射横波相对强度的变化情况,图 3(b)是图 3(a)对应的等值线图。

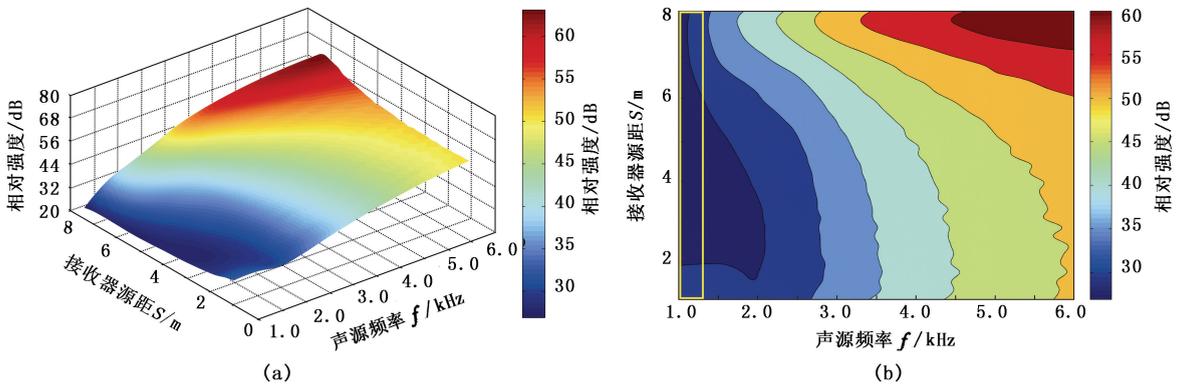


图 3 SH 反射横波相对强度与源距和声源频率的三维变化关系及对应的等值线图

Fig. 3 Relationship among amplitude ratio of flexural and SH reflection wave and spacing & source frequency and corresponding contour map

从图 3 中可以看出,与图 2 相比,二者变化规律完全不同。在测井源距范围内,随着声源激发频率降低,反射横波相对大小单调递减,即反射横波幅值相对于弯曲波幅值在不断地增加,这个极值区域的频率范围也不再是常规偶极测井频率范围(2.2 ~ 3.2 kHz),当频率在 1.5 kHz 以下时基本不变。事

实上,这个分界位置就是本文计算模型的井中挠曲波截止频率,如图 3(b)矩形区域所示。在固定声源频率时,随着源距的增加,反射横波相对幅值逐渐减小,这和一般的认识是一致的,即随着源距增加,反射波衰减越大,这就表明进行远探测测井并不需要长源距的声波测井仪,常规源距即可满足需求。

通过以上分析,从声波测井信号量化采样角度考虑,偶极横波远探测测井仪的声源工作频率应选择截止低频以下,进行激发,可优选为 1.0 kHz。在常规声波测井仪源距范围内即可接收到较大幅值的反射横波。这样的优选原则可以极大地弥补目前偶极远探测测井测量的局限性,对于专门的偶极横波远探测测井仪器研发设计具有重要意义。

2 反射界面水平距离对反射横波幅度的影响

反射界面与 x 轴的交点(A 点)与井轴的水平距离对固定源距接收器上的反射信号有一定的影响。图 4 给出了井旁不同水平位置的反射界面并孔计算模型,井旁地质界面垂直于 xoz 界面,井旁地层界面倾角为 70° ,偶极声源加载于 $x=1.0\text{ m}$ 、 $y=1.0\text{ m}$ 和 $z=0.3\text{ m}$ 处,其偏振方向始终平行于井旁地层界面走向,偶极声源中心频率为 3 kHz。计算中将反射界面从 $x=3.0\text{ m}$ (A 点)向 x 轴正方向以 0.5 m 的等间隔移动至 $x=8.0\text{ m}$ 处,共 11 个位置,每个界面位置时,计算得到并孔声场。

偶极横波远探测测井关键之一在于井中挠曲波与井外反射波之间的相对差别,而非井外反射波的

绝对幅值大小。大量的数值模拟表明,除了声源频率之外,其他 3 个影响因素所引起的反射横波绝对幅值和相对强度变化规律基本类似,因此仅就 SH 反射横波相对强度变化关系展开讨论。图 5 显示了 SH 反射横波相对强度变化关系及对应的等值线图。

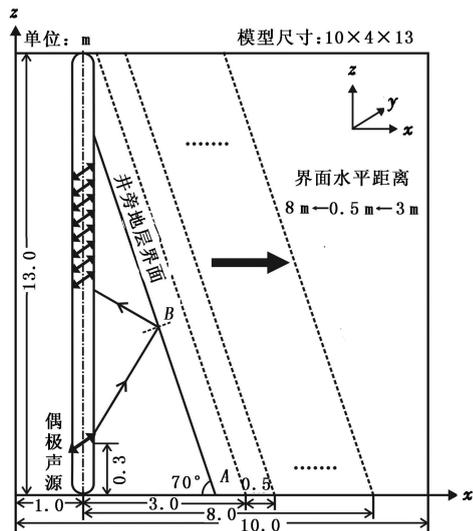


图 4 不同水平位置的井旁反射界面对应的充液并孔计算模型

Fig. 4 Near-borehole interface model with fluid-filled borehole in different interface positions

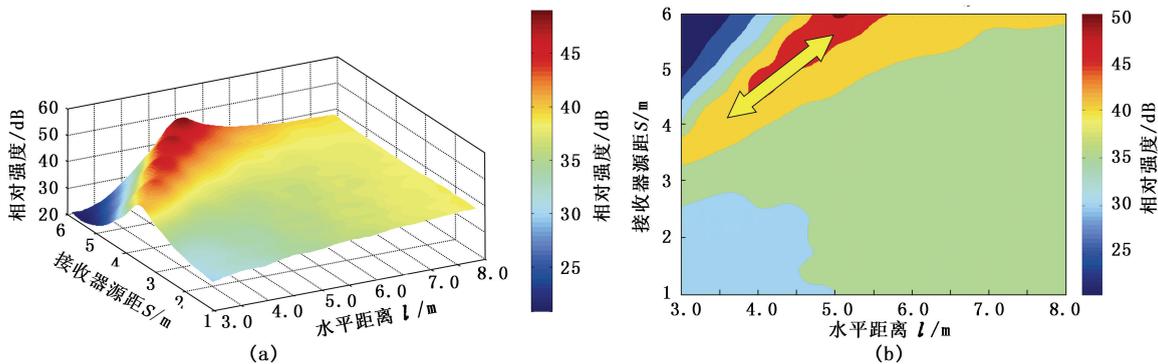


图 5 SH 反射横波相对强度与源距和反射界面水平距离的三维变化关系及对应的等值线图

Fig. 5 Relationship among amplitude ratio of flexural and SH reflection wave and spacing & interface horizontal distance and corresponding contour map

由图 5 可以看出,随着反射界面水平距离增加,井孔挠曲波幅度和反射波幅度之间的相对强度先增加,达到局部极大值之后(“脊峰”),相对强度又开始缓慢减小,而且这个“脊峰”(图 5(b)双向箭头所示)会随着反射界面水平距离的增加,需要的源距会不断增加。源距并非决定因素,常规源距即可满足远探测需求。从声波反射的物理现象来说,当井旁存在声阻抗不连续面时,反射信号总会存在,实际工作中往往由于数据量化精度的限制,使得反射信号不能完全地

被记录下来。加长源距会存在 3 个方面的不足:①需要对声波测井仪进行重新改造设计,以适应横波远探测仪器的需求;②源距的增加使得反射波传播路径加长,反射波信号衰减变大;③由于临界折射角的存在,反射波在井眼附近的探测盲区范围会增大,将无法和其他常规测井结果进行匹配。

从图 5(b)可以看出,源距大于 5.0 m 时,反射横波的相对幅度最大,此时能够探测到的水平反射界面位置仅为 4.0 m。那么,要保证探测到井旁更远处的

测井仪器将很难采集到有效数据。

4 偶极声源偏振方向对反射横波幅度的影响

和井中单极声源辐射声场不同,偶极声源具有指向性发声的属性,可以利用它的这种属性进行井旁反射体方位的识别^[9]。理论上当偶极声源偏振方向和井旁反射体走向平行时,会在法线面内产生纯的 SH 反射横波;当偶极声源偏振方向和反射体走向垂直时,法线面内会产生 SV 反射横波;当偶极声源偏振方向与反射体为任意夹角时,井孔中接收到的是 SH 和 SV 反射横波的叠加,这从 SH 波和 SV 波的接收模式和远场辐射模式可以看出。为此,建立了图 8 所示的计算模型。由于计算内存限制,井旁地层界面距离井轴的水平距离设为 4.5 m,地层界面倾角始终为 70°,将偶极声源偏振方向从指向 A 以 10°的等间距间隔变化到指向 B 位置,声源主频和空间位置同上。

将反射横波相对强度绘制在由源距和偶极声源偏振方向所构成的坐标系下,如图 9 所示。从图 9 中可以看出,在固定源距下,随着偶极声源偏振方向从 0°变化到 90°,其相对强度单调递增,在声源激发频率不变时,反射横波的绝对幅值单调增加。在 B 点处(声源偏振角为 90°)偶极声源偏振方向与反射体走向平行,在地层界面处会发生全反射,产生纯的 SH 反射横波,其幅值最大。在 A 点处(声源偏振角为 0°)偶极声源偏振方向与反射体走向垂直,在地

层界面处一部分能量反射回井孔,另外一部分能量则以 P-SV 波的形式透射进入界面以外的地层,模拟结果与理论分析结果完全一致。从图 9(b)可以看出,整个源距范围内存在相对幅值较大的反射横波(方框区域所示),以 40 dB 为测井仪器检测上限,方框区域对应的源距范围都可以接收到有效的反射横波,但考虑到其他制约因素,4.0 m 源距以内为宜。以上分析表明,偶极声源激励下的井孔反射声场具有较高的方位灵敏度,可以反演井旁反射体的空间位置及走向。

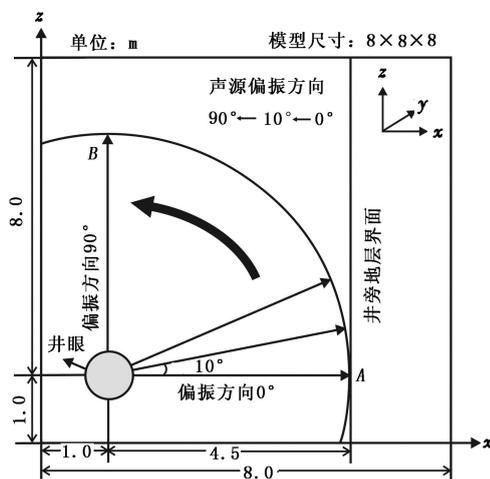


图 8 不同偶极声源偏振方向对应的充液井孔计算模型

Fig. 8 Near-borehole interface model with fluid-filled borehole in different dipole source orientation

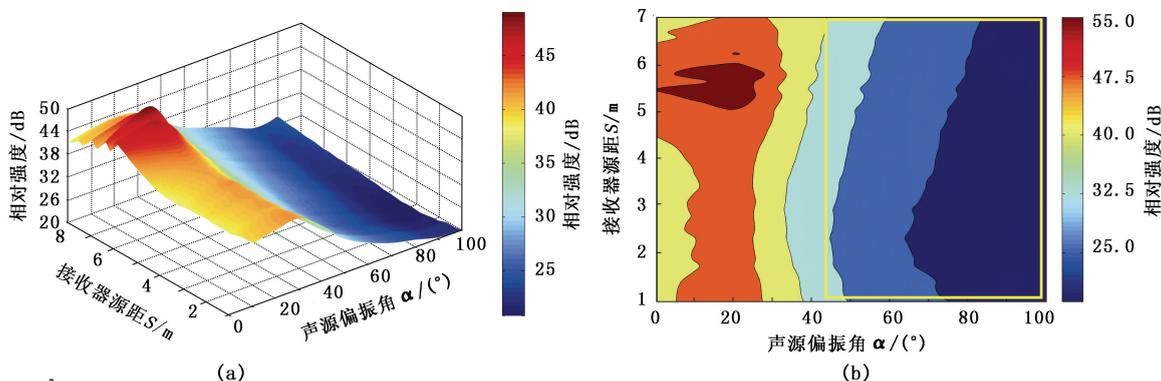


图 9 SH 反射横波相对强度与源距和声源偏振角的三维变化关系及对应的等值线

Fig. 9 Relationship among amplitude ratio of flexural and SH reflection wave and spacing & source orientation and corresponding contour map

5 结束语

考察了偶极声源激发频率、反射界面水平距离、反射界面倾角以及偶极声源偏振方向对反射横波幅

度的影响,为专用的偶极横波远探测测井仪器设计提供了声源频率和源距的优选依据。由于常规偶极测井仪工作频率通常处在“艾里相”附近,虽然反射横波幅度达到局部极值,但此时弯曲波的激发强度

最大,考虑到声波测井信号量化采样的限制,远探测横波测井仪的偶极声源工作频率应选择在截止频率以下激发,这样可以极大地弥补目前远探测测井测量的局限性。常规声波测井仪器源距即可满足远探测需求,有效探测地层倾角为 $40^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的井旁反射体,建议远探测测井仪测量源距控制在现有的四分量偶极仪器范围即可。偶极声源指向性的本质属性决定了其对井旁反射体具有较高的方位灵敏度,为利用偶极四分量数据确定井旁反射体方位提供了理论依据。

参考文献:

- [1] HORNBY B E. Imaging of near-borehole structure using full-waveform sonic data [J]. *Geophysics*, 1989, 54(6): 747-757.
- [2] YAMAMOTO H, WATANABE S, MIKADA H, et al. Fracture imaging using borehole acoustic reflection survey [C]. *Proceedings of the 4th SEGJ International Symposium*, Tokyo, 1998: 375-382.
- [3] CHABOT L, HENLEY D C, BROWN R J, et al. Single-well imaging using the full waveform of an acoustic sonic [C]. 71st Ann Internat Mtg Soc Expl, Geophys, 2001: 420-423.
- [4] TANG X M, GLASSMAN H, PATTERSON D, et al. Single-well acoustic imaging in anisotropic formations [C]. *SEG/San Antonio Annual Meeting*, 2007: 109-113.
- [5] TANG X M. Imaging near-borehole structure using directional acoustic-wave measurement [J]. *Geophysics*, 2004, 69(6):1378-1386.
- [6] PATTERSON D, TANG X M, RATIGAN J. High-resolution borehole acoustic imaging through a salt dome [R]. *SEG*, 2008: 319-323.
- [7] TANG X M, PATTERSON D. Single-well S-wave imaging using multi-component dipole acoustic log data [J]. *Geophysics*, 2009, 74(6), 211-223.
- [8] 唐晓明,魏周拓. 声波测井技术的重要进展——偶极横波远探测测井[J]. *应用声学*, 2012, 31(1):10-17. TANG Xiao-ming, WEI Zhou-tuo. Significant progress of acoustic logging technology: single-well acoustic reflection imaging of a dipole acoustic system [J]. *Applied Acoustics*, 2012, 31(1):10-17.
- [9] 唐晓明,魏周拓. 利用井中偶极声源远场辐射特性的远探测测井[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(8):2798-2807. TANG Xiao-ming, WEI Zhou-tuo. Single-well acoustic reflection imaging using far-field radiation characteristics of a borehole dipole source [J]. *Chinese J Geophy*, 2012, 55(8):2798-2807.
- [10] 薛梅. 远探测声波反射波测井方法研究和声系设计[D]. 北京:石油大学资源与信息学院, 2002. XUE Mei. Study on remote exploration acoustic reflection well logging & its acoustic sonde design [D]. Beijing: Faculty of Natural Resource & Information Technology in the University of Petroleum, China, 2002.
- [11] 何峰江. 声反射成像测井仪器仿真及波形处理技术研究[D]. 北京:中国石油大学资源与信息学院, 2005. HE Feng-jiang. The study on the simulation of the borehole acoustic reflection imaging logging tool and its waveform processing method [D]. Beijing: Faculty of Natural Resource & Information Technology in China University of Petroleum, 2005.
- [12] 魏周拓. 反射声波测井数值与物理模拟研究[D]. 青岛:中国石油大学地球科学与技术学院, 2011. WEI Zhou-tuo. Research on single-well acoustic imaging logging by using numerical modeling and experimental measurement [D]. Qingdao: School of Geosciences in China University of Petroleum, 2011.
- [13] 唐晓明,郑传汉. 定量测井声学[M]. 北京:石油工业出版社, 2004: 29-30.

(编辑 沈玉英)