

# 偶极子声波在疏松砂岩地层井孔中的传播特性研究\*

陈洪海<sup>1</sup> 张秀梅<sup>2†</sup>

(1 中海油田服务股份有限公司油田技术研究院 河北 101149)  
(2 中国科学院声学研究所声场与声信息国家重点实验室 北京 100190)

**摘要** 对偶极子声源在疏松砂岩井孔中的声波传播机制进行研究具有重要的理论和实际应用价值,可以指导实际测井过程中仪器工作参数的选择及提高资料的处理和解释水平。本文针对实际正交偶极子声波测井中遇到的疏松砂岩超软地层横波测量问题进行了理论分析与数值模拟,计算模拟了偶极子声源在一般软地层和疏松砂岩地层井孔中的传播情况,并对比分析了声场波形与井孔中激发的弯曲波和激发谱的特征之间的内在联系,还根据疏松砂岩地层井孔中的声波传播特点,提出了在这类地层条件下应用偶极子声波测井应注意的若干问题,并指出,在超软地层横波测量中,偶极子声源的中心频率应适当降低,但也不是越低越好,否则达不到预期的效果。本文的研究结果无疑对正交偶极子声波测井声源的设计具有指导作用。

**关键词** 偶极声波测井, 疏松砂岩, 弯曲波, 激发谱

**中图分类号:** P631 O429

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-310X(2012)03-0178-06

## Wave propagation for dipole acoustic logging in unconsolidated sandstone formations

CHEN Honghai<sup>1</sup> ZHANG Xiumei<sup>2</sup>

(1 Well-Tech R&D Institutes, COSL, Hebei 101149)  
(2 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** Understanding borehole acoustic wave propagation for dipole acoustic logging in unconsolidated sandstone formations is important from theoretical and practical aspects. It provides guidance for improving data processing and interpretation, as well as for optimizing tool designing. In this paper, we numerically study wave propagation in boreholes for general soft and unconsolidated sandstone formations excited by dipole sources respectively, and analyze the intrinsic relations between received waveforms and the characteristics of flexural modes and excitation spectra. The summarized conclusions give suggestions for the usage of dipole acoustic logging according to the calculation results obtained for unconsolidated formations. We point out that the center frequency of the acoustic sources should be appropriately reduced, but not as low as possible, otherwise we could not achieve desired results. These conclusions provide guidance for the design of acoustic source for cross dipole acoustic logging apparatus.

**Key words** Dipole logging, Unconsolidated sandstone, Flexural modes, Excitation spectra

2012-03-28 收稿; 2012-04-06 定稿

\* 国家科技重大专项, 大型油气田及煤层气开发资助项目(2011ZX05020-005)和国家自然科学基金重点基金资助项目(批准号: 11134011)

作者简介: 陈洪海(1963-), 男, 山东寿光人, 高级工程师, 研究方向: 声波测井。

张秀梅(1980-), 女, 副研究员, 博士。

† 通讯作者: 张秀梅, E-mail: zhangxiumei@mail.ioa.ac.cn

## 1 引言

偶极子声波测井在油田的实际生产中得到了广泛的应用,例如可以获得任意地层的横波速度和识别由井周裂缝及地应力引起的各向异性等,目前它已成为石油生产中一种重要的声波测井方法<sup>[1-3]</sup>。近年来,国内勘探和开发的重点逐渐由陆上转向海上,由常规储层转向非常规储层。新的疏松砂岩油藏的发现和开发成为石油工业重要的经济增长点之一,这类油气藏中的地层具有胶结和压实差的特点<sup>[4]</sup>,其纵横波传播速度较一般的软地层更低,可以获得任意地层中横波速度的正交偶极子声波测井在这类油藏中得到了大量的应用。但是,这种声波传播速度低、衰减大的超软地层对目前声波测井提出了较大的挑战,很多以往在一般地层条件下得到的认识可能不再适用。

近年来,随着疏松砂岩油气藏的不断增多,对于由疏松砂岩层构成的超软地层中的声波传播问题引起了人们的重视,由于偶极子声源在泊松比较大的超软地层井孔中容易激发出泄漏模式的纵波<sup>[5-8]</sup>,因此多数相关的研究围绕应用这种模式波提取纵波速度等参数方面。其中, Tichelaar 等通过对现场的偶极子声波测井资料进行处理,认为在横波速度较低的慢速地层中,自偶极子声源激发产生的纵波部分可提取地层的纵波速度<sup>[6]</sup>;张秀梅等理论分析了偶极子源在慢速地层中激发的纵波部分的形成机制,以及泄漏模式对纵波和声场特征的影响<sup>[7]</sup>;陈雪莲等模拟分析了偶极子声源在特软地层中激

发的泄漏纵波的幅度随地层纵横波速度、井径等参数的变化,验证了从偶极子声源激发的泄漏纵波中,提取地层的纵波速度较单极子声源更有效<sup>[8]</sup>。以上的这些研究多针对现有偶极子声波测井仪器在疏松砂岩层中获取的声波特征,对资料处理和应用具有一定的作用。但是,同时也应注意到,应用偶极子声波测井的主要目的之一,还是获取地层的横波信息,而如何在疏松砂岩地层井孔中获取准确的横波速度,尚需值得进一步研究。

本文针对这一目的,对偶极子声源在一般软地层和疏松砂岩地层井孔中的声波传播机制进行了研究,特别分析了声源的激发特性与声场波形和模式波频散特性之间的关系,最后给出了疏松砂岩地层中应用偶极子声波测井获取地层横波速度的建议。

## 2 基本理论

本节首先给出偶极子声波在井孔中的传播理论。设半径为  $a$  的无限长圆柱井孔中充满密度为  $\rho_f$ 、声波速度为  $v_f$  的流体,井外是无限大且各向同性的地层。地层的密度和纵横波的传播速度分别为  $\rho$ 、 $v_p$  和  $v_s$ 。采用柱坐标系  $r\theta z$ ,其中  $z$  轴与井孔的中心轴重合,偶极子声源由两个振幅相等而相位相反且无限接近的单极子源组成。多年来,偶极子源在井孔中激发的瞬态声场得到了广泛而深入的研究<sup>[1,9-11]</sup>,按照前人的研究结果,井孔中的位移势函数在频率-波数域  $(\omega, k)$  可以表示为<sup>[11-12]</sup>

$$\varphi(r, k, \omega) = \frac{iF_1\alpha_f}{2^2\rho_f\omega^2} [H_1^{(1)}(\alpha_f r) + A(k, \omega)J_1(\alpha_f r)] \cos[(\theta - \theta_0)], \quad (1)$$

其中  $H_n^{(1)}(n=0,1,2,\dots)$  是  $n$  阶第一类汉克尔函数,代表由声源向外扩散的波;  $J_n(n=0,1,2,\dots)$  是  $n$  阶贝塞尔函数,当  $r=0$  时它的值是有限的;  $F_1$  代表声源的幅度;  $\alpha_f = (k_f^2 - k^2)^{1/2}$  为径向波数,其中  $k_f = \omega/v_f$ ;  $A(k, \omega)$  是待定系数,它是关于波数  $k$  和频率  $\omega$  的函数。

分析井外地层中声波满足的波动方程,可以得到地层中的纵横波在频率-波数域的势函数。在井壁

处满足的边界条件为径向位移和正应力连续,切向应力为零,根据位移及应力与势函数之间的关系得到

$$A(k, \omega) = \frac{|M_1(k, \omega)|}{|M(k, \omega)|}, \quad (2)$$

式中分子和分母都是  $4 \times 4$  的行列式,各个单元具体的表达式见文献[7]。公式(2)中  $|M(k, \omega)|$  等于 0 的方程称为频散方程。对于确定的频率  $\omega$ , 可以得

到对应的波数  $k$  满足频散方程, 这些频率和波数的解对应井孔中激发的模式。

将公式(1)中的  $\varphi(r, k, \omega)$  与声源频谱  $S(\omega)$  相乘并作二维傅立叶变换, 得到井孔中  $(r, z)$  处的声压, 即<sup>[11-12]</sup>

$$p_f(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \rho_f \omega^2 \varphi(r, k, \omega) e^{i(kz - \omega t)} dk d\omega. \quad (3)$$

以下针对于不同地层情况, 应用这些基本理论, 模拟计算和分析偶极子声源在井孔中产生的模式波的分布以及声场波形的特征, 并通过对比分析它们之间的关系, 揭示偶极子声源在井孔-地层条件下传播的物理本质, 探讨超软地层偶极子声源中心频率的选择问题。

### 3 计算结果与分析

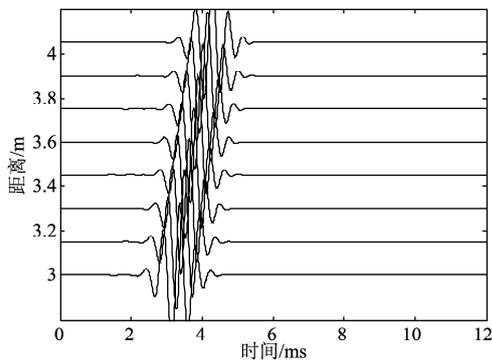
模拟计算中, 地层和井孔中的声学参数如表 1 所示。其中, 地层 1 为一般软地层, 其参数选取可

参照文献[11]; 地层 2 为某疏松砂岩地层的情况, 其横波传播速度的选取可参照文献[6]和[8]; 地层 3 的纵横波传播速度均小于井孔内流体的声速, 对应更为疏松的地层情况。模拟计算中应用的声源在频率域的中心频率为 0.5~4.0 kHz, 间隔为 0.5 kHz, 声源的 3 dB 带宽为中心频率的 0.3 倍。井孔的半径设为 0.1 m。

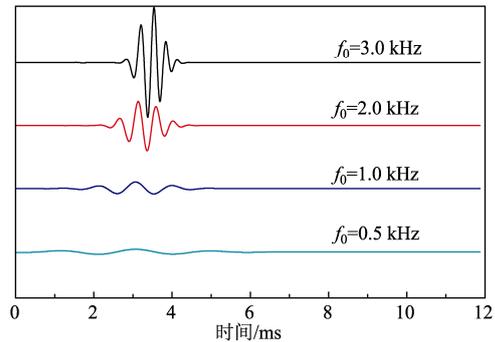
表 1 软地层和井孔流体的参数

	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	泊松比
流体	1500	/	1000	/
地层 1	2177	1170	2100	0.29
地层 2	2177	510	2000	0.47
地层 3	1060	510	1800	0.35

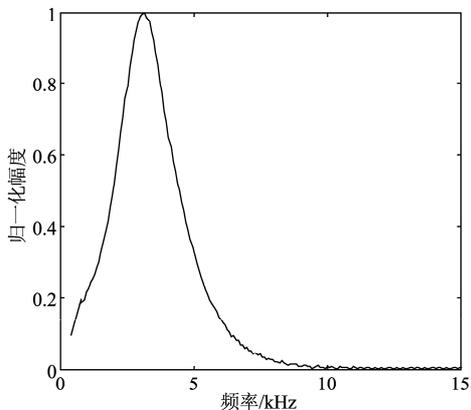
分别对不同地层情况下的偶极子声波传播情况进行模拟计算, 得到如图 1 到 3 所示的结果。图 1 是井外地层 1 的情况。图 1(a)为声源中心频率为 2.0 kHz 时, 井孔中激发产生的声场波形, 源距为 3.0 m, 间距为 0.15 m, 共 8 道时域波形; 图 1(b)为



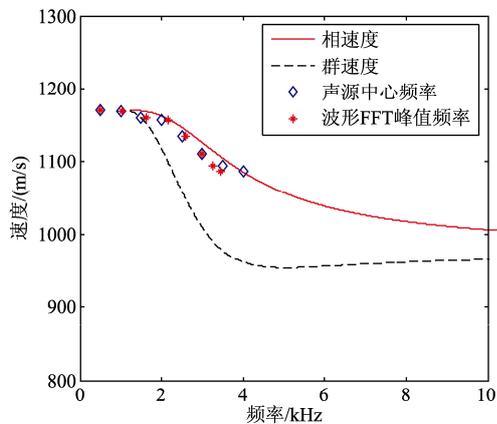
(a) 声源中心频率为 2.0 kHz 时的声场波形



(b) 3.0 m 源距处不同中心频率的声源激励下得到的波形对比



(c) 源距 3.0 m 处时的激发谱幅度随频率的变化



(d) 弯曲波模式的频散曲线及其与 STC 法处理得到首波传播速度的关系

图 1 井孔外为地层 1 时的模拟结果

声源中心频率为 0.5kHz、1.0kHz、2.0kHz 和 3.0kHz 时, 相同源距处得到的波形的对比结果, 图中可以看到, 声源频率较低时, 波形的幅度较小, 随着声源频率的增大, 波形的幅度不断增加; 图 1(c)为源距为 3.0 m 处井孔中激发谱的幅度随频率的变化关系, 代表井孔中激发的波形能量随频率的变化关系, 结果表明, 激发谱的幅度在 3.0kHz 处出现峰值, 峰值两侧的激发幅度逐渐减小, 这一结果与图 1 (b) 中的结果一致, 即声源中心频率低于峰值频率时, 随着声源频率的增加声场波形的幅度增加; 图 1(d) 中给出了井孔中激发的弯曲波模式的相速度和群速度的数值计算结果, 并将其与相似相关对比法 (STC) 处理得到不同声源频率激发的声场波形的首波传播速度进行了对比, 其中蓝色的菱形点表示声源中心频率处对应的处理结果, 红色的星号代表将波形进行傅里叶变换 (FFT) 得到的频谱对应的峰值频率。图中结果表明, 处理得到的首波的传播速度随频率的变化与相速度的频散变化特征基本相同, 且波形的实际传播频率向激发谱

的峰值频率靠拢。

图 2 对应地层 2 的模拟和计算结果, 各图代表的物理意义与图 1 对应的相同。图 2(b)中的对比结果表明, 随着声源频率的增加, 首波的到时越来越大, 波形的幅度随着声源频率的变化关系可结合图 2(c)的结果进行对比; 另外, 图 2(c)中的结果表明, 在这种地层情况下, 激发谱在 7.5 kHz 左右出现一个峰, 以往的研究表明, 这主要是泄漏模式的贡献<sup>[7]</sup>; 当声源的中心频率增大时, 井孔中很容易接收到这种近似以地层纵波速度传播的波。同样, 对不同频率的声源激发产生的声场波形进行处理, 可以得到首波的传播速度, 将这些结果与弯曲波模式的频散曲线进行对比得到图 2(d)所示的结果。

图 3 对应第三种地层, 其纵横波传播速度均小于井孔流体中的声波传播速度, 为便于对比, 其横波速度与地层 2 的横波速度相同, 该地层的泊松比约为 0.35, 小于第二种地层 0.47 的情况。图 3 中模式波和波形的特征与图 2 基本相同, 不同之处主

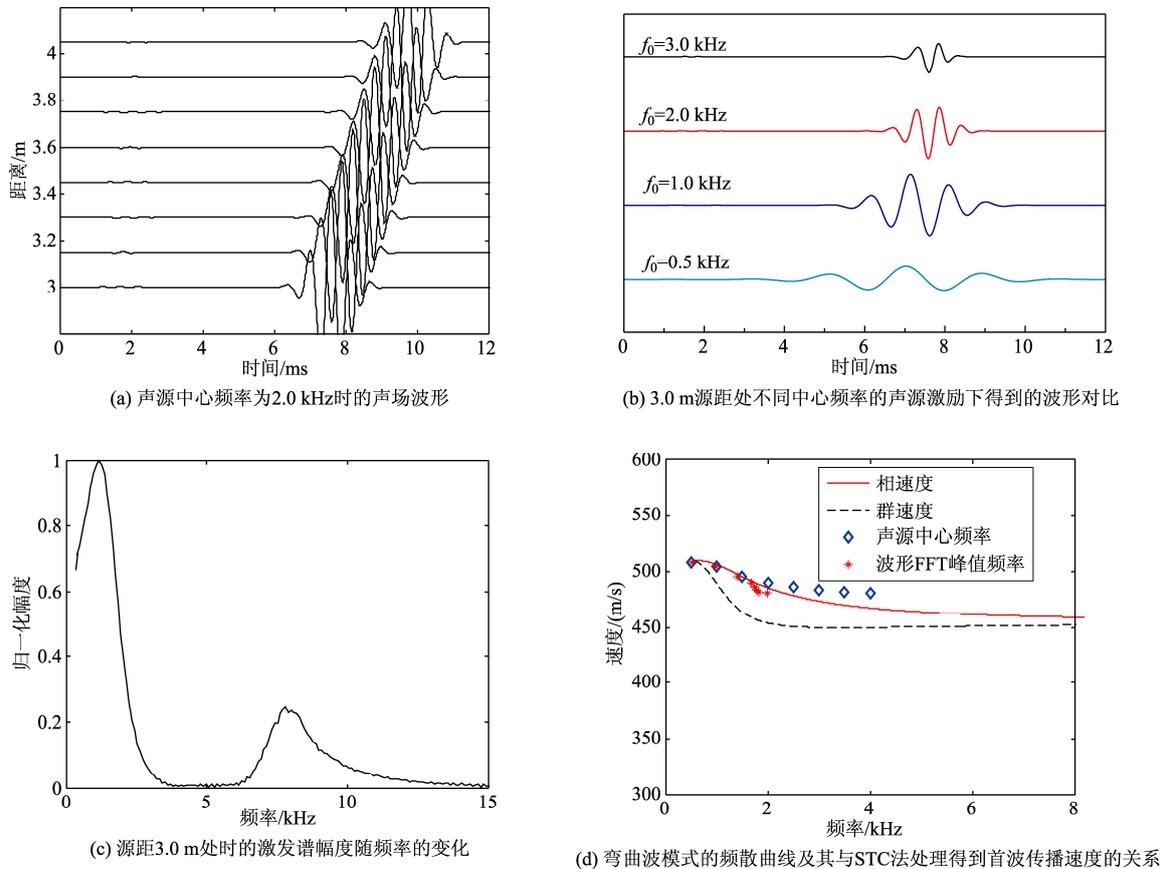


图 2 井孔外为地层 2 时的模拟结果

要在于图 3(c)中, 图中表明地层 3 中的激发谱在低频时的形态基本相同, 但高频时无明显的激发峰, 这体现了偶极子声源在泊松比大的地层中容易激发泄漏模式的声波, 与我们之前的研究<sup>[7,12]</sup>和陈雪莲等人<sup>[8]</sup>的研究结果相同。

将不同地层井孔中计算得到的激发谱的峰值频率( $f_p$ ), 声源中心频率( $f_0$ ), 实际波形的傅里叶变换峰值频率( $f_r$ ), 以及用 STC 法处理不同声场波形得到的首波传播速度  $v$  及其与实际地层的相对误差的值列出并对比, 得到表 2 所示的结果。

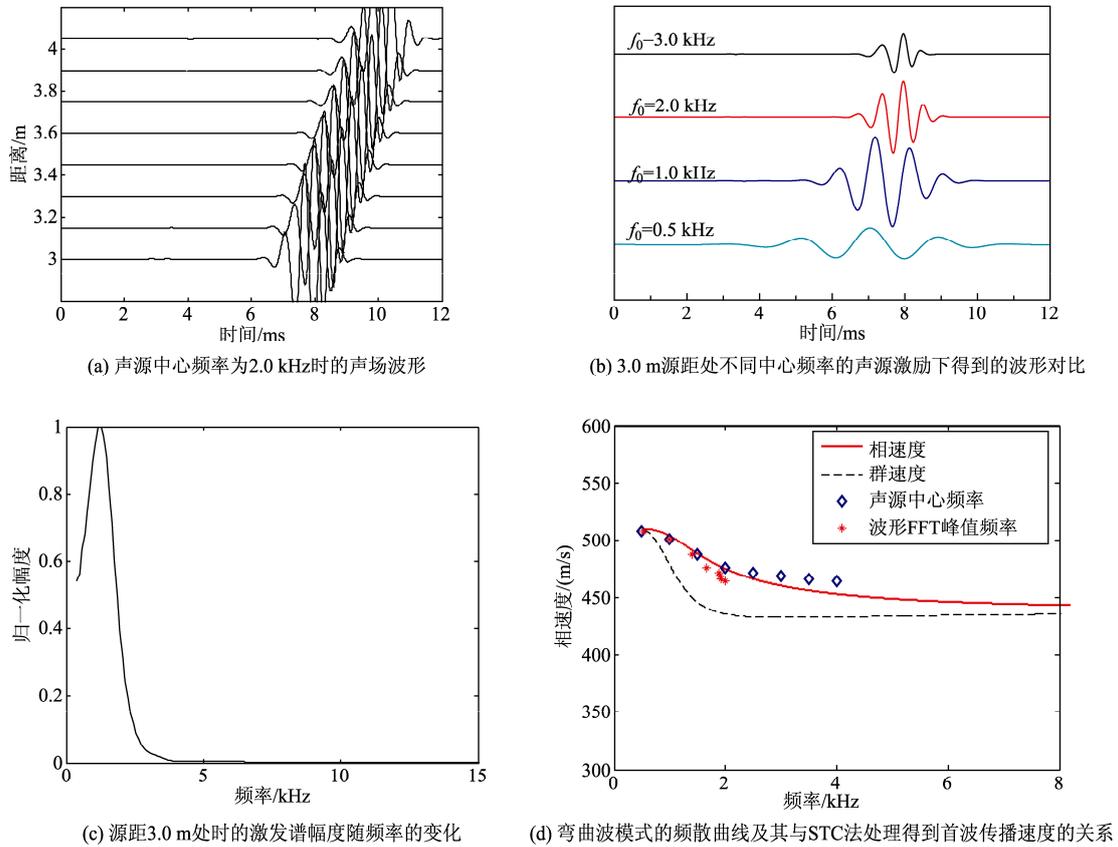


图 3 井孔外为地层 3 时的模拟结果

表 2 模拟计算和分析结果

	$f_p$ (kHz)	$f_0$ (kHz)	$f_r$ (kHz)	$v$ (m/s)	误差(%)
地层 1	3.0	0.5	0.49	1170	0
		1.0	1.04	1168	0.2
		2.0	2.15	1156	1.2
		3.0	2.98	1110	5.1
		4.0	3.45	1087	7.1
地层 2	1.3	0.5	0.52	508	0.4
		1.0	1.08	504	1.2
		2.0	1.70	490	3.9
		3.0	1.73	482	5.5
		4.0	1.85	480	5.9
地层 3	1.3	0.5	0.53	508	0.4
		1.0	1.03	501	1.8
		2.0	1.65	476	6.7
		3.0	1.68	469	8.0
		4.0	1.79	464	9.0

综合图 1~3 以及表 2 的结果, 可以看到井孔中的激发谱反映了激励声波的强度随声源频率的变化关系, 其形态随地层性质的变化呈现不同的规律, 当声源的中心频率在峰值频率处时, 得到的声场波形的幅度最大, 低于或者高于这一频率值, 声场波形的幅度都减小, 且幅度随声源频率远离峰值频率而减小; 声波的传播速度方面, 声源频率越低, 处理得到的波形的传播速度越接近于地层的横波速度, 随着声源频率的增加, 声场波形处理得到的传播速度与实际地层的横波传播速度之间的差别越来越大。因此, 在疏松砂岩地层井孔中进行偶极子声波测井时若考虑仪器接收波形的幅度及传播速度两方面的因素, 换能器最佳的工作频率应该低于但靠近激发谱上主要来自弯曲波模式贡献的峰值频率。

#### 4 结论和讨论

本文数值模拟并分析了偶极子声源在软地层井孔中的传播情况, 重点是不同地层条件下模式波的频散、激发谱特征及不同主频声源下声场的时频特征(波形幅度、峰值频率及由 STC 处理得到的相速度), 从而揭示了偶极子声源在软地层井孔中的声波传播机制。得到的主要认识和结论如下:

(1) 不同地层条件下偶极声源的激发谱的形态及峰值频率有较大的差异;

(2) 在不考虑地层衰减及接收器的频响特征下, 声源的中心频率在激发谱的中心频率附近, 接收到的声场幅度越大;

(3) 理想情况下, 应用相似相关对比法对不同中心频率下的阵列信号进行处理, 获得的波形传播速度与对应频率处弯曲波模式的相速度频散曲线

上的速度值基本吻合, 且声源频率越低, 处理得到的传播速度越接近于地层的横波速度。

理论模拟结果表明, 对疏松砂岩地层, 当声源中心频率低于 2 kHz 时, 用相关对比法得到的速度与模型的横波速度的差异小于 5%, 即利用偶极横波测井可以较好地获取地层横波速度。但以上研究没有考虑疏松地层衰减及接收换能器的频响特征, 同时假定在不同中心频率的声源幅度是一致的, 考虑这些因素后实际测量的误差可能要比这个大的多。同时本文研究结果也表明, 发展低频偶极换能器对提高疏松地层的测量精度是至关重要的。

#### 参 考 文 献

- [1] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [2] 曹正良, 王克协, 李刚, 等. 井孔压力与地层应力集中诱导的偶极弯曲波的分裂[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 712-718.
- [3] SINHA B K, NORRIS A N, CHANG S K. Borehole flexural modes in anisotropic formations[J]. Geophysics, 1994, 59(7): 1037-1052.
- [4] 宋丽莉, 葛洪魁, 王宝善. 疏松砂岩弹性波波速模型的研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(6): 38-40.
- [5] 董月昌, 鲍文刚, 张维冈, 等. 超软地层的声波特征研究[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 24: 96-99.
- [6] TICHELAAAR B W, KLAAS W van L. Sonic logging of compressional-wave velocities in a very slow formation[J]. Geophysics, 1995, 60(6): 1627-1633.
- [7] 张秀梅, 张海澜, 王秀明. 泄漏模式及其对偶极源井孔声场中纵波头波的影响[J]. 中国科学 G 辑: 2009, 39(4): 571-579.
- [8] 陈雪莲, 范宜仁, 许孝凯. 特软地层井孔中各模式波的传播特征[J]. 物探计算技术, 2009, 31(5): 460-465.
- [9] KURKJIAN A L, CHANG S K. Acoustic multipole sources in fluid-filled boreholes[J]. Geophysics, 1986, 51(1): 148-163.
- [10] 王秀明, 李占诚, 杨建绥, 等. 裸眼井中软地层多极子源激发的弹性波的传播[J]. 地球物理学报, 1992, 35(4): 510-520.
- [11] 张海澜, 王秀明, 张碧星. 井孔的声场和波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [12] 张秀梅, 张海澜, 王秀明. 偶极源井孔声场中纵横波的计算及分析[J]. 测井技术, 2008, 10(5): 406-411.