

王 华,陶 果,王 兵等.多极子随钻声波测井波场模拟与采集模式分析.地球物理学报,2009,52(9):2402~2409,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.027

Wang H, Tao G, Wang B, et al. Wave field simulation and data acquisition scheme analysis for LWD acoustic tool. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(9):2402~2409, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.027

多极子随钻声波测井波场模拟与采集模式分析

王 华^{1,2},陶 果^{1,2},王 兵^{1,2},李 卫^{1,2},张绪健³

1 油气资源与探测国家重点实验室 中国石油大学,北京 102249

2 北京市地球探测与信息技术重点实验室 中国石油大学,北京 102249

3 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院地球物理研究所,乌鲁木齐 830013

摘 要 应用三维非均匀交错网格有限差分程序模拟了多极子随钻声波测井的波场,考察了硬地层中单极子随钻声波测井响应及软地层中声源频率对多极子随钻声波测井的影响;计算了接收阵列波形的时域相干谱及频散特征,结果表明随钻测井仪器居中时,在硬地层中可以直接利用单极子声系得到地层横波速度,但地层纵波受到钻铤波的极大干扰.而在软地层中可以利用单极子声系直接测得地层纵波速度,但地层横波速度则需要使用工作在较低频率下的四极子随钻声波仪来测得,此时测井频段又会落入钻井噪声频带而受到影响.为此本文提出数值模拟手段结合物理实验的方法得到钻铤波的影响,在实际测井中通过信号处理方法而不是用在仪器本体上刻槽的方式来更完全地消除钻铤的影响.为了避免钻井噪声的影响,本文提出六极子随钻声波仪更适合软地层的横波测量.本文用数值实验结果来说明这些方法的可行性.

关键词 三维非均匀交错网格,钻铤波,有限差分,频散分析,地层横波,六极子

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.027

中图分类号 P631

收稿日期 2009-06-18,2009-08-03 收修定稿

Wave field simulation and data acquisition scheme analysis for LWD acoustic tool

WANG Hua^{1,2}, TAO Guo^{1,2}, WANG Bing^{1,2}, LI Wei^{1,2}, ZHANG Xu-Jian³

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting (China University of Petroleum), Beijing 102249, China

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

3 Institute of Geophysics Research in Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Ürümqi 830013, China

Abstract We have studied propagating wave fields of multipole acoustic LWD tool with a 3D finite difference simulator of non-uniform stagger grid. We examined monopole system response to hard formations and multipole system responses to soft formations and calculated the semblance spectra in time domain and the dispersion characteristics of these signals of array receivers. These analyses have demonstrated that, when the LWD tool is centralized properly, a monopole system can measure formation S wave velocity in hard formations while the formation P wave measurements may severely be interfered by the waves from drill collar. A quadrupole system at lower frequencies may be employed for the measurements of formation S wave velocity

基金项目 国家自然科学基金项目(50674098)和国家重点基础研究发展计划项目(2007CB209601)和国家 863 计划项目(2006AA06Z207)资助.

作者简介 王 华,男,1982 年生,湖北荆州人,博士生.2001~2005 年就读于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业,获学士学位;2005~2008 年就读于中国石油大学(北京)地球探测与信息技术专业,获硕士学位.主要研究方向为声波测井及电缆地层测试器的相关研究. E-mail: wanghuaupc@126.com

in soft formations. However these working frequencies for quadrupole system fall into the frequency band of drilling noise. Based on these numerical simulations, this paper proposes a numerical method for obtaining drill collar waves in conjunction with minor physical lab calibration to completely eliminate the interferences due to drilling collar during the signal processing procedure rather than making insulators of ring slots on the drill collar and on the tool. To avoid interferences of drilling noise on the quadrupole measurements for S wave velocity in soft formations, a hexpole system is proposed to replace the quadrupole system. The numerical experiments are presented to illustrate the feasibility of these proposed schemes for LWD acoustic measurements.

Keywords 3D non-uniform stagger grid, Drill collar wave, Finite difference, Dispersion analysis, Formation shear wave, Hexpole

1 引言

近年来随钻测井的应用越来越广泛,其服务产值在整个测井行业产值中的比重越来越大,有替代电缆测井的趋势^[1]. 随钻声波测井是随钻测井的关键技术之一,但是由于其特殊的测量问题,如旋转的钻铤占据了大部分井眼空间,严重的钻井环境噪声等,使其实现起来要比随钻电阻率测井、随钻中子测井难度大. 国内外很多学者^[2~5]已经对随钻声波测井进行了理论和实验研究. 由于问题的复杂性,他们常采用数值模拟方法研究问题. 目前,对随钻声波测井的数值模拟多采用实轴积分、2D 或 2.5D 有限差分模拟,难以适用于复杂的三维测量问题. 本文采用直角坐标系下三维非均匀交错网格有限差分程序^[6,7]模拟充液井眼中的随钻声波测井响应. 考察了硬地层和软地层中随钻多极子测井的响应,并考察了软地层中声源频率对随钻多极子测井的影响. 通过提取阵列波形的时域相干特征及频散特征,结合波形数据对采集模式进行了分析,对如何消除钻铤影响及避开钻井环境噪声进行了探讨.

2 计算模型、参数及声源加载方式

图 1 给出了模拟模型的 x - y 剖面,地层介质、钻铤、井眼流体位置已标示在图中,各参数值由表 1 给出. 在井眼周围采用加密网格,其余区域采用粗网格,以降低对计算机内存的需求. 为了减少模型的计算时间及对计算机内存的要求,模型一般采用如下参数:模型大小为 x 方向 1.6 m, y 方向 1.6 m, z 方向 4 m. 阵列接收器的最小源距为 1.305 m,最大源距为 1.935 m,间距为 0.09 m. 所有模型均以 z 轴为对

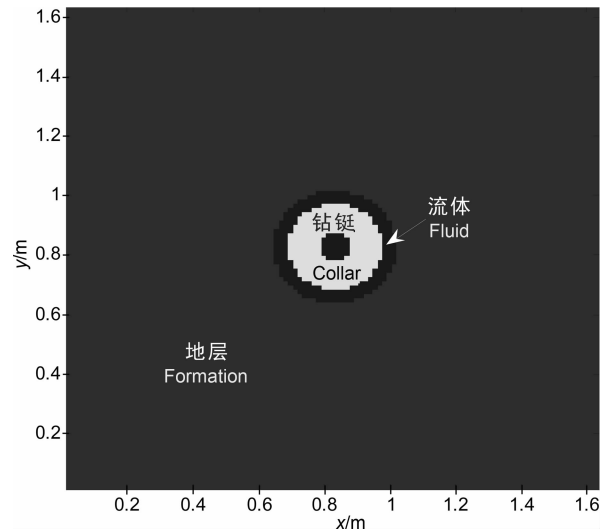


图 1 模型的 x - y 剖面

Fig. 1 The horizon plane of model

表 1 模型参数表

Table 1 Parametric of model

参数	V_P /($m \cdot s^{-1}$)	V_S /($m \cdot s^{-1}$)	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	外半径 /mm
钻铤内流体	1470	—	1.00	27
钻铤	5860	3130	7.85	90
钻铤外流体	1470	—	1.00	117
硬地层	3927	2455	2.32	∞
软地层	2300	1000	2.00	∞

称轴,井眼中心在 $x=0.8$ m, $y=0.8$ m 处,声源放在 $z=0.5$ m 处,最小网格为 9 mm,最小时间步长为 $0.76 \mu s$.

图 2 为声源加载方式及声源的辐射示意图,在紧靠钻铤的应力节点上加载点声源,通过控制点声源的相位来实现单极子、偶极子、四极子和六极子声源.

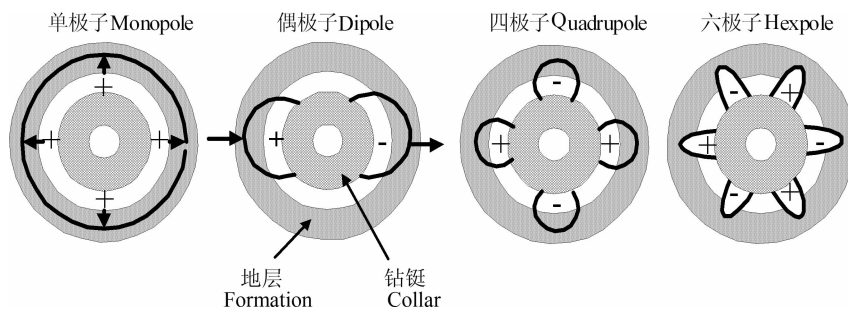


图 2 声源加载方式及辐射示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the loading regime of source and radiation

2 模拟数据及分析

2.1 硬地层单极子测井响应

图 3 给出了中心频率为 10 kHz 的单极子声源在硬地层中的随钻测井响应、时域相干^[8]图及频散特征分析^[9]的结果。图 3a 给出了阵列接收器的接收波形,可以明显地看见三个波至,结合图 3b 的时域相干特征及相应的波速,我们可以判定它们分别为:钻铤波(速度为 $4870 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、横波(速度为 $2450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和斯通利(Stoneley, St)波(速度为 $1389 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),地层纵波为钻铤波所淹没而无法识别。由图 3c 的相速度-频率域的特征分析可见,钻铤波具有较小的频散, Pseudo Rayleigh(pR.)波的相干区域比较发散。分析 pR. 波和 St 波的特征: pR. 波的频散特征与电缆测井时一致^[10], 存在一个较低的截止频率, 从图中看出大约在 6kHz 左右。此外存在一个内 St 波(钻铤内流体环面产生), 落在通常的 St 波(在此及以后称外 St 波)频散曲线与 pR. 频散曲线之间, 由于其幅度较低被地层横波所淹没, 所以在图 3a 的全波波形中看不见内 St 波。由图 3c 可以看出内 St 波的速度比外 St 波(钻铤外流体环面产生)的速度要快, 这是因为内 St 波是流体与钻铤界面的压力波, 而外 St 波是流体与地层界面的压力波。这些结果表明, 在快地层中能够由随钻单极子声波测井得到较稳定可靠的地层横波速度, 而地层纵波基本被钻铤波所淹没, 其速度分析将成问题。

针对地层纵波被钻铤波淹没的情形, 目前国外流行的做法是在钻铤上刻上足够深的凹槽^[11~14]并在声波探头和钻铤之间加隔声体^[11,15]以消除钻铤波的影响。钻铤上刻槽将极大地增加仪器设计和建造的困难^[12]。我们现在用数值方法来研究这个问题。首先在图 1 所示模型的钻铤上“刻”上足够深的凹槽来考察消除钻铤波的效果。图 4a 为“刻槽”之后

的接收阵列波形, 结合图 4b 的时域相干特征可以确定图 4a 中的第一个波的速度在 $3937 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 应该为地层纵波, 与所给地层参数基本吻合, 而且此波不受钻铤波的影响。图 4c 为原始波形(图 3a)减去“刻槽”之后的波形(图 4a)得到的结果, 图中 1 ms 后的波形为刻槽带来的散射波, 这部分波与横波和 St 波相混合, 将会对横波和 St 波速度和幅度分析造成较大干扰。因此我们仅选取钻铤波时段的波形进行实验(图 4d), 对其进行时域相干分析, 得到图 4e 的时间-速度域信息, 从此图可以证实选取的波形仅为钻铤波。然后利用原始波形(图 3a)减去钻铤波(图 4d), 得到不受钻铤影响的随钻声波信息(图 4f), 从其时间相干图(图 4g)中可见只有地层信息, 不存在钻铤散射信息。

如果综合考虑实际工程应用的可行性, 可用少量物理试验对数值模拟结果加以标定, 就应该可以用这种数值模拟方法将钻铤波的影响模拟出来, 在实际测井之后的信号处理过程中将钻铤波的影响消除, 而无需在实际随钻测井仪器上做任何对仪器有损害的隔声, 这样可以避免直接在钻铤上刻槽带来的钻铤强度减弱及散射对后续波幅度的影响等众多问题。

2.2 软地层单极子测井响应

对于软地层的随钻声波测井, 我们首先模拟了中心频率为 10 kHz 的单极子声波测井的响应。图 5a 给出了阵列接收波形, 根据到达时间先后依次为钻铤波、纵波、内 St 波及外 St 波。为此求取了时间域的波形相干系数, 如图 5b 所示, 可以看到钻铤波的速度为 $4870 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 纵波(漏模^[16~18])速度为 $2280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 仅能看见外 St 波, 其速度低于井眼流体速度。由图 5c 给出的频散特征可以看出, 纵波在速度-频率域中的特征较为平直, 略有频散。由此可以得出在软地层中使用单极子进行测量时, 无法得到地层横波速度, 但能够容易地得到地层纵波(漏模)速度。

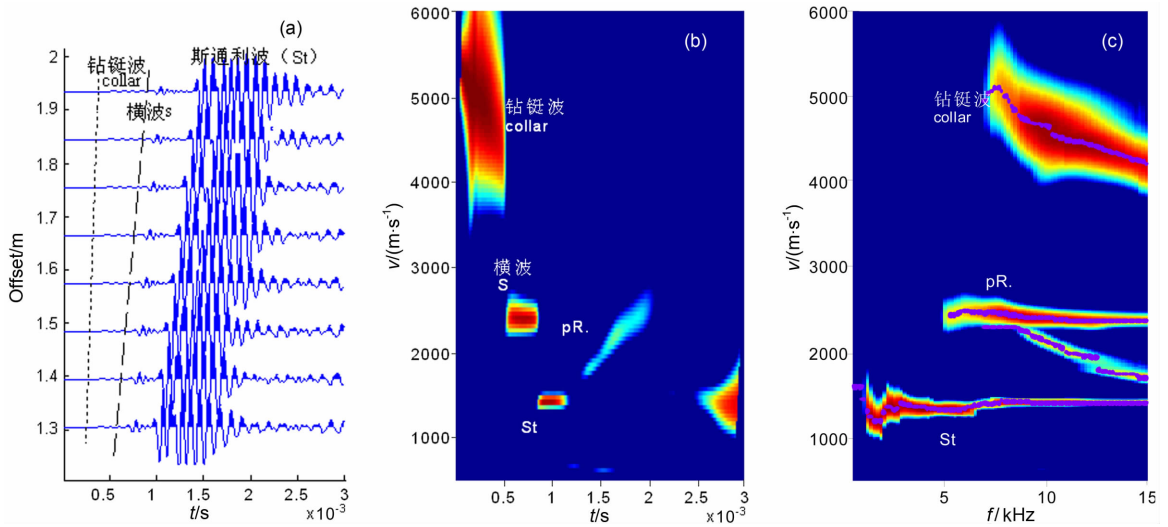


图 3 硬地层单极子(10 kHz 中心频率)随钻声波测井响应
(a)阵列接收波形;(b)时域相干图;(c)频散图。

Fig. 3 The response of monopole (10 kHz centre frequency) in fast formation

(a) Waveform of array receivers; (b) The result of coherent in time domain of array waveform; (c) The dispersion of the array waveform.

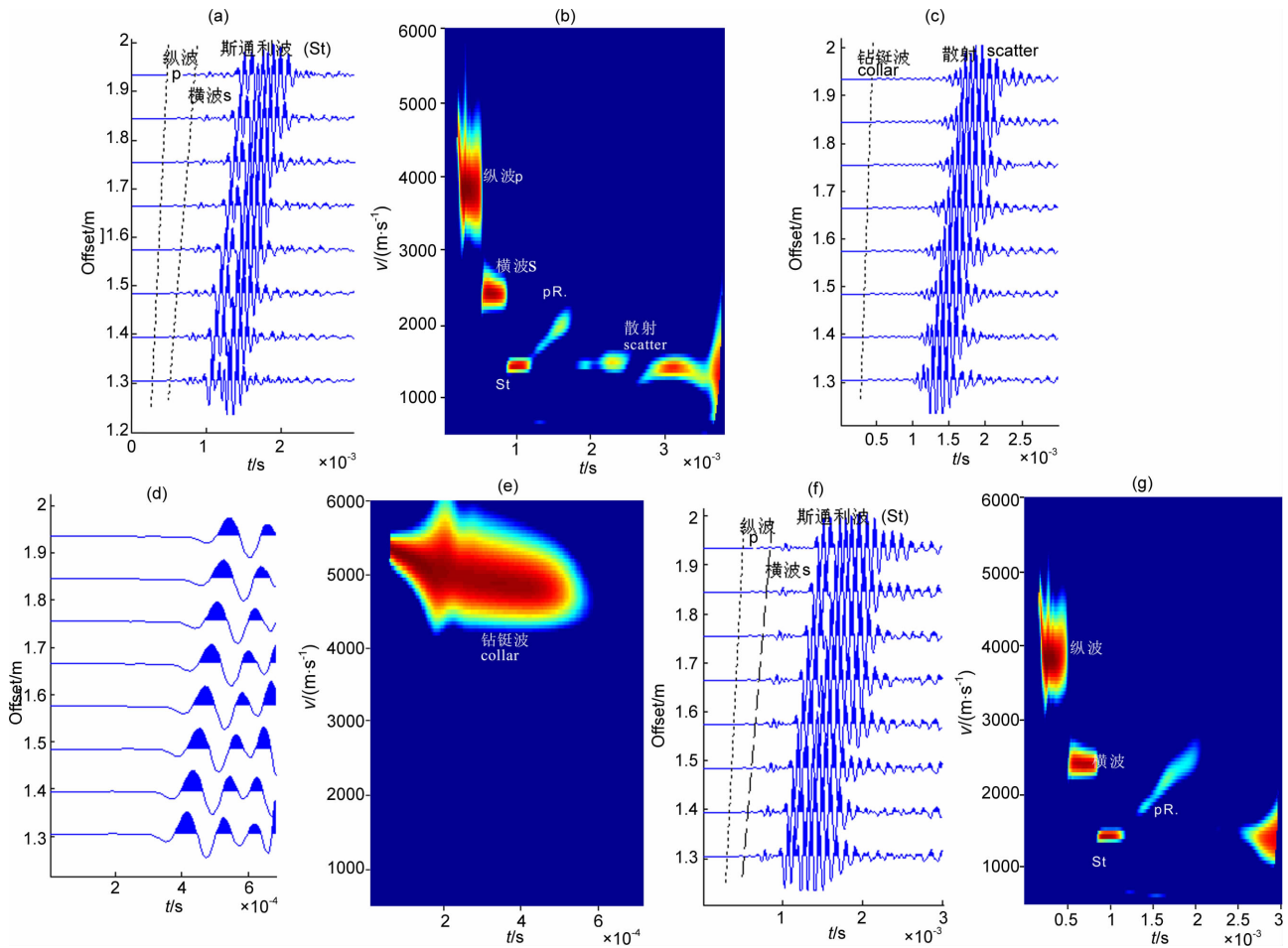


图 4 硬地层单极子(10 kHz 中心频率)随钻声波测井钻铤的影响

(a)刻槽之后的阵列接收波形;(b)接收波形的时域相干图;(c)刻槽消除的波形;(d)钻铤波;
(e)钻铤波时域相干图;(f)无钻铤影响的阵列波形;(g)无钻铤波影响的波形时域相干图。

Fig. 4 The response of monopole (10 kHz centre frequency) in fast formation about collar

(a) Waveform of array receivers with grooved drill collar; (b) The result of time domain coherent of waveform in (a); (c) The waveform about the groove; (d) Collar wave; (e) The result of time domain coherent of waveform in (d); (f) Waveform of array receivers without collar wave; (g) The result of time domain coherent of waveform in (f).

2.3 软地层偶极子测井响应

为了得到软地层横波速度,考虑使用多极子声波测井进行测量.首先计算了软地层中高频(10 kHz)条件下偶极子随钻声波测井响应,然后对该阵列接收波形分时段进行时域相干分析和频散分析.在图 6a 的接收波形中可以看到两个明显的波至,分别对应于钻铤挠曲波和地层挠曲波,且随着源距的增大,两个模式波到时分得越来越开.计算了接收波形的时域相干系数,如图 6b 所示,能够看见两个相干性很好的极值区域,速度高的区域为钻铤挠曲波,其速度大约为 $2300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,速度低的区域为地层挠曲波,其速度低于地层横波速度(由白虚线标出).由计算得到的全时段的频散特征(图 6c)可以看出,钻铤挠曲波的能量比较发散,有较强的频散特性,而地层挠曲波仅有较小的频散.图 5d 给出了地层挠曲波时段的波形频散特征.由图 6c 可以发现钻铤挠曲波与地层挠曲波在低频段有强烈的相互作用,无法区分,虽然在高频段钻铤挠曲波与地层挠曲波分离的较开,但是地层挠曲波以远低于地层横波的速度传播.

为了进一步考察低频段钻铤挠曲波和地层挠曲波的相互关系,接着模拟了低频(2 kHz)段随钻偶极子声系在软地层中的测井响应.图 7a 显示了阵列接收波形,首先到达的是钻铤挠曲波,然后到达的是地层挠曲波;图 7b 为阵列接收波形的频谱信息;图 7c 为时域相干图,可以看见两个相干性很好的区域,时间较早的是钻铤挠曲波,其速度为 $1521 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较晚的是地层挠曲波,其速度比地层横波速度(由白虚线标出)小;图 7d 给出了全时段的频散特征,由于测量频率分布在 5 kHz 以下(见图 7. b),所以频散图中仅有 5 kHz 以下的的数据.可以十分清晰地看出,地层挠曲波与钻铤挠曲波在低频段有较强的相互干扰,且地层挠曲波比钻铤挠曲波能量小得多,无法将二者区分开来,此时也无法利用偶极子声系测量得到软地层横波速度.

2.4 软地层四极子测井响应

既然随钻偶极子测井很难得到软地层的横波速度,因此我们考虑是否能利用四极子测量以得到软地层横波速度.首先计算了软地层高频(中心频率为 10 kHz)四极子声系的随钻测井响应.图 8a 为其阵列接收波形,可以看出两个明显的波至,最早到达的是钻铤四极子波,其次是地层四极子波,地层横波的到时在两者之间.图 8b 显示了时域相干图,能够看到两个相干性好的极值区域,到时较早、速度较大的区域为钻铤四极子波,其速度为 $2700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,

到时稍晚、速度低的为地层四极子波,速度低于地层横波速度,两个模式波均存在频散.图 8c 的频散特征分析可以看出,在频域中钻铤四极子波和地层四极子波分离较远,且在全频段没有重叠,由图看出钻铤四极子波的截止频率在 10 kHz 左右,低于此频率时将不存在钻铤波,地层四极子波在低频时速度接近地层横波速度,因此可以考虑使用低频进行测量,以消除钻铤四极子波的影响,从而得到准确的地层横波速度.

接下来模拟了低频(2 kHz)四极子声系在软地层中的随钻测井响应.图 9a 给出了阵列接收波形,只能看见一个明显的地层四极子波,而看不见钻铤四极子波,且地层四极子波的到时接近于地层横波到时;图 9b 为时域相干图,只能看见地层四极子波的特征,其速度与地层横波速度(由白虚线标出)几乎一致;图 9c 的频散特征上只能看见地层四极子波的频散特征,因为测量频率处于钻铤四极子波的截止频率之下.因此我们认为用低频四极子随钻测井测量时几乎不需要进行频散校正就能得到地层横波速度.

2.5 软地层六极子测井响应

由上节分析得出用四极子声系只有在低频段(1~3 kHz)才能得到慢地层横波速度.但是研究表明,典型的钻井噪声分布在 $0 \sim 3.5 \text{ kHz}$ ^[3,11~15],若采用四极子声系测量慢地层横波速度,其测量频率正好处于噪声频率范围,不可避免地要受到噪声的影响.于是我们接下来考虑是否能使用六极子声系在高于钻井噪声频段的范围(中心频率为 4 kHz)内进行测量.图 10 给出我们用三维有限差分程序模拟的六极子随钻声波测井在软地层中的响应.图 10a 为其阵列接收波形,图 10b 为相应的时域相干图.从图中可以看出地层六极子波是以地层横波的速度传播,由其到时可证实这一点.对接收波形进行频散分析(图 10c)可以看出阵列接收信号的频率分布在 $0 \sim 9 \text{ kHz}$ 范围,且地层六极子波存在一个在 3.5 kHz 以上的截止频率,低于此频率不存在地层六极子波.在 $4 \sim 9 \text{ kHz}$ 的范围内,地层六极子波以地层横波的速度传播,而该频段很少受钻井噪声的影响.由以上分析可见,如果从消除钻铤波并且避免钻井噪声的影响来看,随钻六极子声系更适合软地层横波的测量.

3 结论及建议

本文利用三维非均匀交错网格有限差分程序模

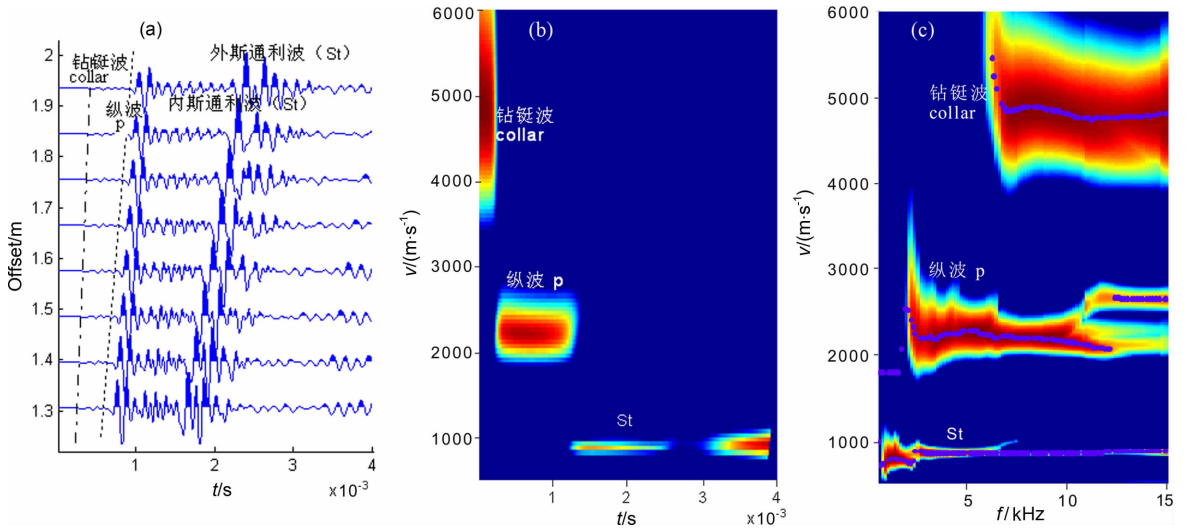


图 5 软地层单极子(10 kHz 中心频率)随钻声波测井响应
(a)阵列接收波形;(b)时域相干图;(c)全时段频散图。

Fig. 5 The response of monopole (10 kHz centre frequency) in slow formation

(a) Waveform of array receivers; (b) The result of coherent in time domain of array waveform; (c) The dispersion of array waveform.

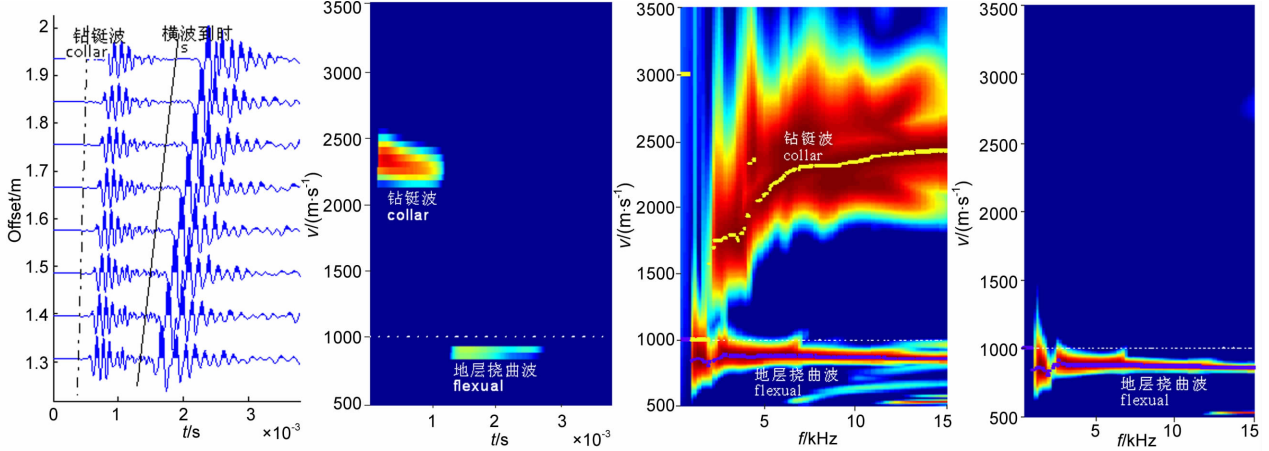


图 6 软地层偶极子(10 kHz 中心频率)随钻声波测井响应
(a)阵列接收波形;(b)时域相干图;(c)全时段频散特征;(d) 1~2 ms 时段频散图。

Fig. 6 The response of dipole (10 kHz centre frequency) in slow formation

(a) Waveform of array receivers; (b) The result of coherent in time domain of array waveform; (c) The dispersion of array waveform; (d) The dispersion of array waveform between 1ms and 2 ms.

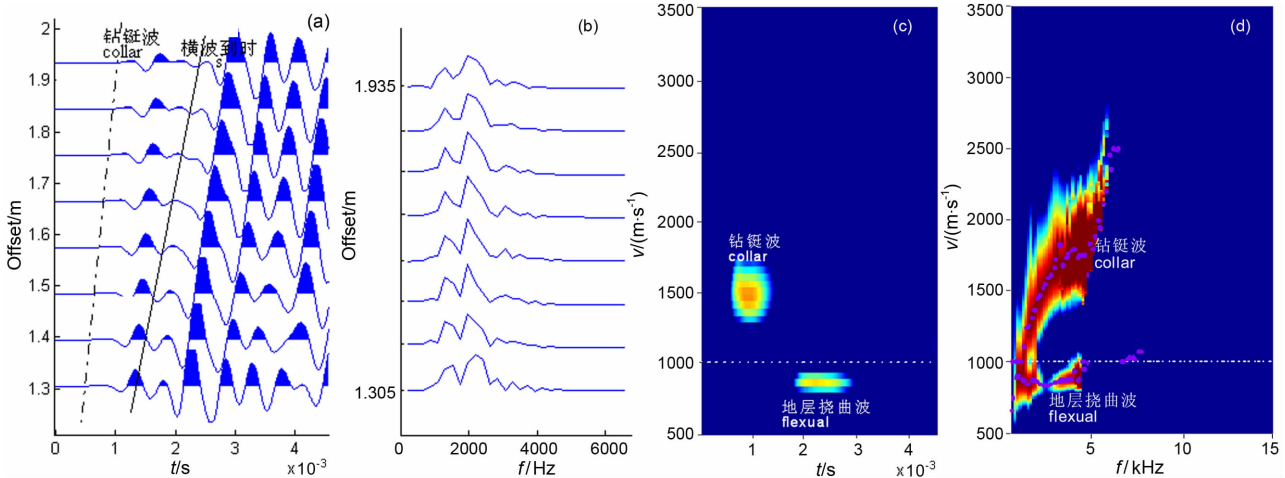


图 7 软地层偶极子(2 kHz 中心频率)随钻声波测井响应

(a) 阵列接收波形;(b)阵列接收波形的频谱特征;(c)时域相干图;(d)频散特征。

Fig. 7 The response of dipole (2 kHz centre frequency) in slow formation

(a) Waveform of array receivers; (b) The frequency spectrum of array waveform; (c) The result of coherent in time domain of array waveform; (d) The dispersion of array waveform.

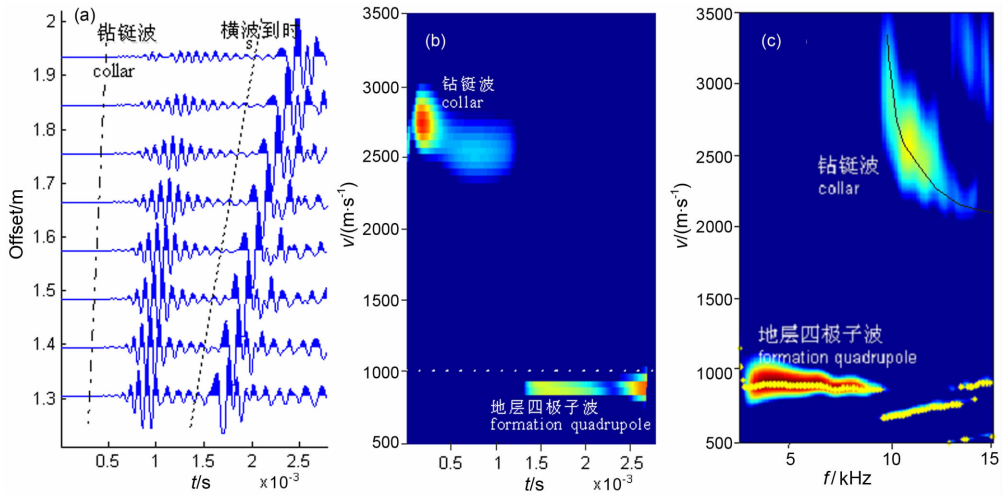


图 8 软地层四极子(10 kHz 中心频率)随钻声波测井响应

(a) 阵列接收波形; (b) 时域相干图; (c) 频散特征.

Fig. 8 The response of quadrupole (10 kHz centre frequency) in slow formation

(a) Waveform of array receivers; (b) The result of coherent in time domain of array waveform; (c) The dispersion of array waveform.

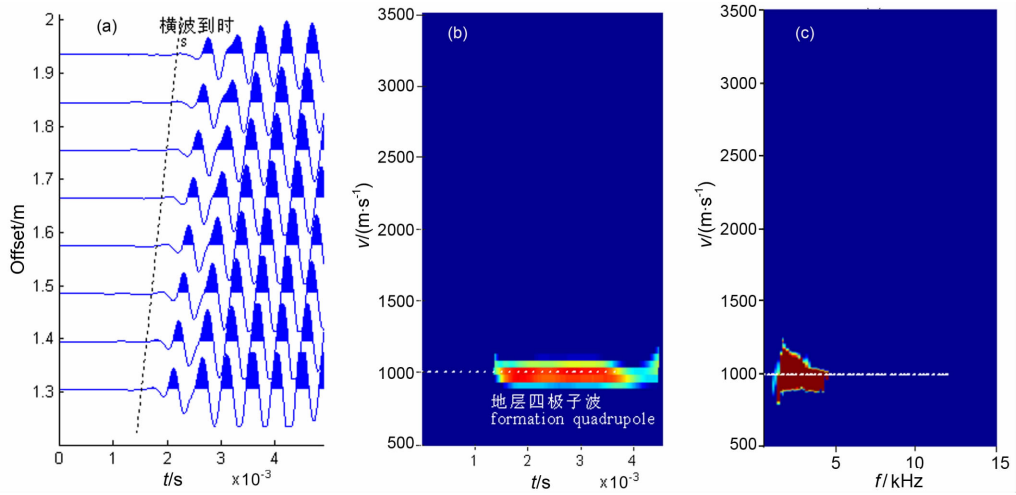


图 9 软地层四极子(2 kHz 中心频率)随钻声波测井响应

(a) 阵列接收波形; (b) 时域相干图; (c) 频散特征.

Fig. 9 The response of quadrupole (2 kHz centre frequency) in slow formation

(a) Waveform of array receivers; (b) The result of coherent in time domain of array waveform; (c) The dispersion of array waveform.

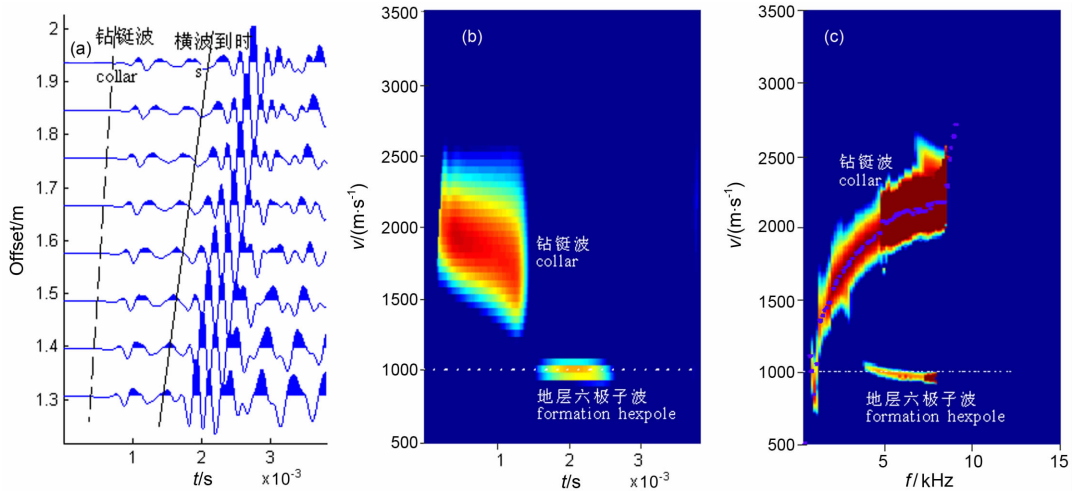


图 10 软地层六极子(4 kHz 中心频率)随钻声波测井响应

(a) 阵列接收波形; (b) 时域相干图; (c) 频散特征.

Fig. 10 The response of hexpole (4 kHz centre frequency) in slow formation

(a) Waveform of array receivers; (b) The result of coherent in time domain of array waveform; (c) The dispersion of array waveform.

拟了硬地层中单极子随钻声波测井响应及软地层中随钻多极子声波测井响应,考察了频率对软地层中随钻多极子声波测井的影响,分析了阵列接收波形的时域特征及频散特性.从这些分析中得出以下认识和结论:

(1)在硬地层中可以直接利用单极子声系得到地层横波速度,而在软地层中可以利用单极子声系直接测得地层纵波速度.

(2)在硬地层中,地层纵波测量受到钻铤波的极大干扰;而在软地层中,虽然地层横波速度可以使用工作在较低频率下的四极子随钻声波仪来测得,但此时测井频段又会落入钻井噪声频带而受到影响.

(3)用数值模拟手段结合物理实验可得到钻铤波的影响,从而在实际测井中通过信号处理方法而不是用在仪器本体上刻槽的方式来更完全地消除钻铤的影响.为了避免钻井噪声的影响,用六极子随钻声波仪更适合软地层的横波测量.本文的数值实验结果表明了这些方法的可行性.

参考文献(References)

- [1] 时鹏程. 随钻测井技术在我国石油勘探开发中的应用. 测井技术, 2002, **26**(6):441~445
Shi P C. M/LWD technology plays an important role in China oilfield development. *WLT* (in Chinese), 2002, **26**(6):441~445
- [2] Tang X M, Wang T, Patterson D. Multipole acoustic logging while drilling. *SEG 72nd. Expanded Abstracts*, 2002. 364~368
- [3] Tang X M, Dubinsky V, Wang T, et al. Shear-velocity measurement in the logging while drilling environment; modeling and field evaluations. *SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*, Oiso, Japan, 2002, **6**:2~5, paper RR
- [4] 崔志文. 多孔介质声学模型与多极源声电效应测井和多极随钻声测井的理论及数值研究[博士学位论文]. 长春:吉林大学, 2004. 112~148
Cui Z W. Theoretical and numerical study of modified Biot's models, acoustoelectric well logging and acoustic logging while drilling excited by multipole acoustic sources [Ph. D. Thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University, 2004. 112~148
- [5] Huang X J. Effects of tool position on borehole acoustic measurements; a stretched grid finite difference approach [Ph. D. thesis]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2003
- [6] Tao Guo, He Feng-Jiang, Wang Bing, Wang Hua. Study on 3D simulation of wave fields in acoustic reflection image logging. *Sci China D-Earth*, **51**(SII):186~194
- [7] 何峰江,陶 果,王锡莉. 贴井壁声波测井仪的有限差分模拟研究. *地球物理学报*, 2006, **49**(3):923~928
He F J, Tao G, Wang X L. Finite difference modeling of the acoustic field by sidewall logging devices. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(3):923~928
- [8] 陶 果,邹 辉. 现代阵列声波测井数据处理和解释方法研究. *石油勘探与开发*, 2000, **27**(2):76~78
Tao G, Zou H. A study on methods for processing and interpretation of modern array sonic logging data. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2000, **27**(2):76~78
- [9] Rao R, Toksöz M N. Dispersive wave analysis-Method and applications. Consortium reports of Earth Resources Laboratory Department in Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA USA, 2005
- [10] 唐晓明,郑传汉. 定量测井声学. 北京:石油工业出版社, 2004. 31
Tang X M, Zheng C H. *Quantitative Borehole Acoustic Methods* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2004. 31
- [11] Aron J, Chang S K, Dworak R, et al. Sonic compressional measurements while drilling. *SPWLA 35th Annual Logging Symposium*, Tulsa, Oklahoma, United States, 1994, **6**:19~22, paper SS
- [12] Minear J W, Birchak R, Robbins C, et al. Compressional wave slowness measurement while drilling. *SPWLA 36th Annual Logging Symposium*, Paris, France, 1995, **6**:26~29, paper VV
- [13] Joyce B, Patterson D, Leggett J V, Dubinsky V. Introduction of a new omni-directional acoustic system for improved real-time LWD sonic logging-Tool design and field test results. *SPWLA 42nd Annual Logging Symposium*, Houston, Texas, United States, 2001, **6**:17~20, paper SS
- [14] Leggett J V, Dubinsky V, Patterson D, Bolshakov A. Field test results demonstrating improved real-time data quality in an advanced LWD acoustic system. *Soc. of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, Louisiana, United States, 30 September-3 October 2001, 71732:1~12
- [15] Varsamis G L, Wisniewski L T, Arian A. A new MWD full wave dual mode sonic tool design and case histories. *SPWLA 40th*, 1999, Oslo, Norway, 30 May-3 June, paper F
- [16] Tang X M, Zheng Y, Vladimir Dubinsky. Logging while drilling acoustic measurement in unconsolidated slow formations. *SPWLA 46th Annual Logging Symposium*, 2005, New Orleans, Louisiana, United States, **6**:26~29, paper R
- [17] Paillet F, Cheng C H. A numerical investigation of head waves and leaky modes in fluid-filled boreholes. *Geophysics*, 1986, **51**:1438~1449
- [18] Hornby B E, Pasternak E S. Analysis of full-waveform sonic data acquired in unconsolidated gas sands. *Petrophysics*, 2000, **41**:363~374