

李洪奇, 孟照旭, 孙宝佃等. 扩径段厚度对双发双收声系时差响应的影响. 地球物理学报, 2008, 51(3): 933~939

Li H Q, Meng Z X, Sun B D, et al. The effects of borehole enlargement length on the slowness response of a dual transmitter and receiver acoustic logging system. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 933~939

扩径段厚度对双发双收声系时差响应的影响

李洪奇¹, 孟照旭^{1,2}, 孙宝佃³, 王玉敏⁴, 修安鹏¹, 于红岩¹

1 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249

2 新疆油田分公司, 克拉玛依 834000

3 中国石油集团测井有限公司, 西安 710021

4 中国石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061

摘 要 声波时差测井数据的精度直接关系到油气层评价、油气储量计算和合成地震记录等的质量. 本文通过数值模拟首次讨论了扩径段厚度对双发双收声系时差记录的影响程度. 在径向扩径量一定条件下, 当井轴方向的扩径厚度达到某一个特定数值时, 时差测量误差最大; 而大于或者小于该扩径厚度特定值时, 测量误差都会变小. 当井径大于或者等于扩径临界值时, 接收探头记录的首波走时将含有扩径段泥浆波走时的贡献. 首次发现使扩径临界值取得最大值的井轴方向扩径厚度特征值. 远离该厚度特征值, 接收含有扩径段泥浆波走时的首波径向扩径临界值都会变小. 第一次给出有关接收扩径段泥浆波走时的扩径临界值图版.

关键词 扩径厚度, 声波时差, 数值模拟

文章编号 0001-5733(2008)03-0933-07

中图分类号 P631

收稿日期 2005-11-01, 2007-11-07 收修定稿

The effects of borehole enlargement length on the slowness response of a dual transmitter and receiver acoustic logging system

LI Hong-Qi¹, MENG Zhao-Xu^{1,2}, SUN Bao-Dian³, WANG Yu-Min⁴, XIU An-Peng¹, YU Hong-Yan¹

1 School of Resource and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 Xinjiang Oil and Gas Company, Kelamayi 834000, China

3 CNPC Logging, Xi'an 710021, China

4 Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Shandong Dongying 257061, China

Abstract The precision of acoustic logs directly affects the quality of oil and gas formation evaluation, the oil and gas reserve computation and the synthetic seismic records. The characteristics of the responses of a logging system with two transmitters and two receivers at a borehole collapse interval were first simulated by numerical method. It has been found that when the length of hole collapse interval is equal to a specific value, the difference between the recorded values and the true values reaches maximum, while the hole collapse interval is longer or shorter than this value, the differences become smaller, proportionally to the deviation from the value. If the borehole diameter is equal to or large than the critical diameter, mud wave will first arrive to receiver through the hole collapse interval. In a bed with a constant slowness, the critical diameter reaches maximum when the length of borehole collapse interval is equal to the specific value. The critical diameter becomes smaller for any other lengths of the borehole collapse intervals. A chart for determining the critical diameter is developed to identify the borehole

conditions of the mud wave being the first arrival in the received signals.

Keywords Borehole collapse interval, Slowness, Numerical simulation

1 引言

声波时差测井数据是石油勘探开发过程中不可缺少的重要资料. 利用声波时差测井数据可以识别油气水层, 确定井壁稳定性, 计算石油储量、合成地震记录等. 早期的声波时差测井仪有一个发射探头和两个接收探头, 称之为单发双收声波时差测井仪(G. C. Summers and R. A. Broding)^[1]. 后来, 为了克服井壁坍塌对单发双收声系声波时差测井的影响, 设计出双发双收声系声波时差测井仪(F. P. Kokesh 等)^[2], 也被称之为补偿声波时差测井仪. 理论研究和实际应用都已经说明补偿声波时差测井仪对扩径影响的补偿并不彻底^[3]. 井眼坍塌越严重, 对声波时差的影响越大. 例如中国西部油田的陡坡构造带, 由于钻井过程中容易发生井壁岩石崩塌, 井眼直径可以达到 22in, 有时甚至更大. 此时, 应用声波时差确定的地层孔隙度与岩心分析孔隙度相差 10 余个孔隙度单位. 因此, 有必要采用数值模拟方法从理论上定量探讨扩径对声波时差响应的影响.

声场数值模拟研究一直十分活跃, 主要研究工作大都集中在声场响应特征和算法等方面. 例如张海澜等计算了整个井眼声场的演化过程, 分析了纵横波及模式波的传播特点^[4]. 董良国等人给出了一阶弹性波方程交错网格高阶差分解法及其稳定性问题的讨论^[5,6]. 沈建国等完成了井内偏心声源激发的三维声场的数值研究^[7]. Chen 等用三维有限差分研究了均匀和非均匀介质井眼中波传播问题^[8]. Cheng 等在充满流体的井眼中开展了弹性波传播等问题的研究^[9]. Leung Tasng 等给出了充满流体井孔中点声源的波形数值模拟^[10]. Paillet、Kurjian、马俊、董和风等用数值模拟方法研究了井中声场分布问题^[11~14]. J Labo 等人给出了单发双收声系在扩径段的声波时差响应分析^[3]. 已有研究工作缺乏不同扩径程度对声波时差影响的定量分析, 特别是扩径厚度变化对声波时差影响的规律性认识.

本文应用射线理论, 定量讨论了不同扩径条件对双发双收声系声波时差响应的影响程度, 揭示了扩径厚度对声波时差影响的规律性. 文中讨论的源距 1.0 m 间距 0.5 m 双发双收声系和源距 2.4 m 间距 0.6 m 双发双收声系分别是石油行业常用的

补偿声波时差测井仪和长源距声波时差测井仪采用的声系.

2 双发双收声系井眼声场数值模拟

记井轴某一深度点为原点 O , 沿井轴向下方方向为 Y 轴, 垂直井轴方向为 X 轴. 对 XOY 平面介质进行规则矩形网格剖分. 选择沿 X 轴和 Y 轴的剖分步长均为 0.025 m, 由井内泥浆和井外地层岩石构成的二维介质被划分为 $0.025\text{ m} \times 0.025\text{ m}$ 的若干个小单元. 网络节点设置在矩形单元的四个角点上, 整个介质的速度或时差用这些角点上的离散采样值表示. 每个节点都可以与相邻的节点相连, 相邻节点之间的走时为它们之间的欧氏距离与声波沿其连线传播时差的乘积. 声波传播路径是由相互连接的节点组成, 沿着该路径的走时等于该路径上相邻节点走时之和. 发射探头($T1$ 或 $T2$)和接收探头($R1$ 或 $R2$)均在网络的节点上. 根据补偿声波时差测井的射线理论^[15]和 Fermat 最小走时原理, 可以求出声波首波从任意发射探头到任意接收探头的最小走时和与其相应的最短路径. 而双发双收声系($T1R1R2T2$)记录点的时差等于两个单发双收声系($T1R1R2$ 和 $T2R2R1$)记录点时差的平均值^[16].

3 扩径段补偿声波时差测井响应特征

图 1a 为扩径地层模型. 井壁为单一岩性地层, 井眼局部扩径, 井眼内充满泥浆. 图 1b 为补偿声波测井时差叠加原理图. 图 1b 中标有数字 1 和数字 2 的两条曲线为两个单发双收声系记录的时差曲线; 而标有数字 3 的曲线为前两条时差曲线的算术平均值曲线, 即双发双收声系记录的时差曲线. 从图中可以看出, 两个单发双收声系记录的时差曲线受扩径影响严重, 而双发双收声系记录的时差曲线受井眼扩径影响较小. 双发双收声系与单发双收声系相比, 对井眼扩径影响确实有一定的补偿作用. 但是, 这种补偿作用并不能完全消除扩径的影响.

3.1 扩径厚度特征值

表 1 和表 2 是源距为 1.2 m, 间距为 0.6 m 双发双收声系分别在时差为 $260\ \mu\text{s}/\text{m}$ 砂岩地层和时差为 $556\ \mu\text{s}/\text{m}$ 泥岩地层的时差计算结果. 从表 1 可

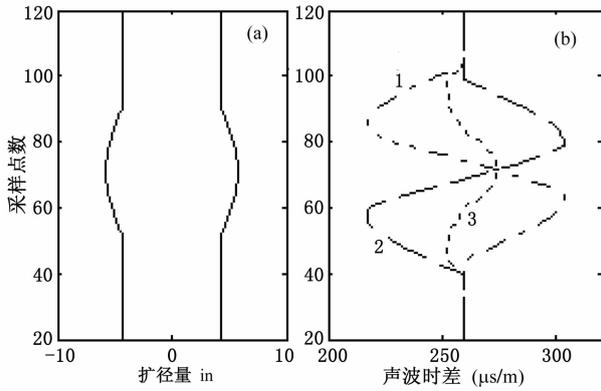


图 1 双发双收声系声波时差叠加原理示意图
(a) 井径曲线;(b)时差曲线,其中:1—单发双收声系上发射器工作时差曲线;2—单发双收声系下发射器工作时差曲线;3—双发双收声系时差曲线。

Fig. 1 Principle of two transmitters and two receivers acoustic system

(a)Profile of borehole; (b)Slowness curves, where 1—slowness curve of one transmitter(up) and two receivers; 2—slowness curve of one transmitter(down);3—slowness curve of two transmitters and two receivers acoustic system.

知,当井轴方向扩径厚度为 0.75 m 时,双发双收声系记录的时差与地层理想时差之间的误差最大,在此,将声波时差记录误差取得最大值所对应的井轴方向扩径厚度称之为扩径影响厚度特征值,简称扩径厚度特征值.表 2 中泥岩地层的扩径厚度特征值为 1.0 m.在径向扩径量一定的前提下,扩径厚度与扩径厚度特征值之间的差别越大,双发双收声系记录的时差与地层理想时差之间的误差越小.

表 3 和表 4 是源距为 2.4 m,间距为 0.6 m 双发双收声系分别在时差为 260 $\mu\text{s}/\text{m}$ 砂岩地层和时差为 556 $\mu\text{s}/\text{m}$ 泥岩地层的时差计算结果.分别对比表 1 和表 3,表 2 和表 4,以及源距为 1.0 m,间距为 0.5 m 双发双收声系扩径影响特征^[15]可知,无论是砂岩地层还是泥岩地层,尺寸不同的三种声系的扩径影响特征基本相同,都存在扩径厚度特征值,只是特征值的具体数值略有差异而已.

3.2 接收含有扩径段泥浆波走时首波的扩径临界值图版

在扩径段使接收探头记录的首波走时中含有首波在扩径段泥浆中传播的走时的最小井径称之为扩径临界值.如果扩径段的井径值小于该扩径段的扩径临界值,接收探头记录的首波走时是首波沿井壁地层传播的走时;否则,如果扩径段的井径值大于或者等于该扩径段的扩径临界值,那么接收探头记录的首波走时将含有首波在扩径段泥浆中传播的走

时.图 2 是源距 1.0 m 间距 0.5 m 声系在不同声速的扩径厚度为 1.5 m,由于 p 点的井径已经大于其扩径临界值,因此接收探头记录的首波走时中有首波在扩径段泥浆中传播的走时.地层、井轴方向不同扩径厚度和径向不同扩径量条件下的扩径临界值图版.图 2 的纵坐标是地层声波传播速度,横坐标是扩

表 1 不同扩径程度砂岩地层双发双收声系数值
模拟时差数据表(砂岩时差:260 $\mu\text{s}/\text{m}$)

Table 1 Slowness of different collapse intervals at sandstone recorded by the system with double transmitters and double receivers (slowness is 260 microsecond/meter)

| | | 径向扩径量(in) | | | | | |
|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | 0.3 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.5 | 2.5 |
| 砂岩井轴方向扩径厚度(m) | 0.20 | 259.93 | 260.17 | 260.45 | 260.77 | 261.68 | 264.60 |
| | 0.50 | 260.01 | 260.33 | 260.67 | 261.01 | 262.07 | 265.36 |
| | 0.60 | 261.71 | 263.53 | 264.95 | 266.09 | 268.58 | 273.68 |
| | 0.70 | 262.85 | 266.03 | 268.38 | 270.72 | 275.44 | 286.33 |
| | 0.75 | 262.98 | 266.56 | 268.69 | 271.02 | 277.41 | 290.47 |
| | 0.80 | 262.84 | 265.41 | 267.74 | 269.78 | 275.55 | 288.58 |
| | 0.85 | 262.49 | 265.38 | 267.58 | 269.57 | 275.01 | 287.74 |
| | 0.90 | 262.26 | 264.86 | 266.51 | 268.95 | 273.38 | 284.84 |
| | 1.00 | 261.99 | 264.18 | 265.80 | 266.99 | 271.77 | 282.00 |
| | 1.50 | 260.93 | 261.80 | 262.66 | 263.55 | 265.88 | 271.69 |
| 2.50 | 260.32 | 260.41 | 261.05 | 261.28 | 262.01 | 264.52 | |
| 3.00 | 260.00 | 260.21 | 260.68 | 260.90 | 261.33 | 262.85 | |

表 2 不同扩径程度泥岩地层双发双收声系数值
模拟时差数据表(泥岩时差 556 $\mu\text{s}/\text{m}$)

Table 2 Slowness of different collapse intervals at shale recorded by the system with double transmitters and double receivers (slowness is 556 microsecond/meter)

| | | 径向扩径量(in) | | | | | |
|---------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | 0.3 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.5 | 2.5 |
| 泥岩井轴方向扩径厚度(m) | 0.2 | 556.19 | 557.49 | 558.57 | 559.85 | 563.27 | 564.85 |
| | 0.5 | 558.91 | 562.56 | 565.13 | 567.60 | 573.74 | 578.46 |
| | 0.6 | 558.97 | 562.80 | 565.44 | 568.05 | 574.75 | 582.66 |
| | 0.7 | 559.04 | 562.99 | 565.62 | 568.29 | 574.88 | 585.43 |
| | 0.8 | 559.25 | 563.12 | 565.76 | 568.39 | 574.88 | 587.16 |
| | 0.9 | 559.25 | 563.17 | 565.86 | 568.39 | 574.88 | 587.82 |
| | 1.0 | 559.25 | 563.17 | 565.87 | 568.43 | 574.88 | 587.98 |
| | 1.5 | 557.56 | 559.86 | 561.40 | 563.08 | 567.52 | 557.96 |
| | 2.5 | 556.17 | 557.16 | 557.78 | 558.46 | 560.48 | 565.05 |
| | 3.0 | 556.00 | 556.59 | 557.19 | 557.70 | 558.94 | 562.35 |

表 3 不同扩径程度砂岩地层双发双收声系数值
模拟时差数据表(砂岩时差:260 μs/m)

Table 3 Slowness of different collapse intervals at sandstone recorded by the system with double transmitters and double receivers (slowness is 260 microsecond/meter)

| | | 径向扩径量(in) | | | | | |
|--------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.5 | 2.5 | 3.0 |
| 岩井轴方向扩径厚度(m) | 0.2 | 261.81 | 262.72 | 263.75 | 266.43 | 273.96 | 289.55 |
| | 0.5 | 263.09 | 264.08 | 266.44 | 269.15 | 281.57 | 289.55 |
| | 0.6 | 265.31 | 267.85 | 271.31 | 276.35 | 294.04 | 296.03 |
| | 0.7 | 268.12 | 270.04 | 274.11 | 279.24 | 296.42 | 309.51 |
| | 0.8 | 269.69 | 271.47 | 275.22 | 282.29 | 301.41 | 314.18 |
| | 0.9 | 264.62 | 268.08 | 269.34 | 274.81 | 288.14 | 306.58 |
| | 1.0 | 263.88 | 264.03 | 264.21 | 266.15 | 273.81 | 299.28 |
| | 1.5 | 260.00 | 260.00 | 260.00 | 261.16 | 265.81 | 280.81 |
| | 3.0 | 260.00 | 260.21 | 260.68 | 260.90 | 261.33 | 266.71 |

表 4 不同扩径程度泥岩地层双发双收声系数值模拟时差数据表(泥岩时差 556 μs/m)

Table 4 Slowness of different hole collapse intervals at shale recorded by the system with double transmitters and double receivers (slowness is 556 microsecond/meter)

| | | 径向扩径量(in) | | | | | | | |
|---------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.5 | 2.5 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
| 泥岩井轴方向扩径厚度(m) | 0.2 | 561.1 | 563.3 | 565.9 | 571.4 | 577.2 | 577.2 | 577.2 | 577.2 |
| | 0.5 | 563.7 | 566.9 | 570.4 | 578.7 | 597.1 | 598.2 | 600.5 | 602.8 |
| | 0.6 | 563.7 | 566.9 | 570.4 | 578.7 | 600.4 | 603.9 | 606.2 | 608.5 |
| | 0.7 | 563.7 | 566.9 | 570.4 | 578.7 | 600.4 | 603.9 | 611.9 | 614.2 |
| | 0.8 | 563.7 | 566.9 | 570.4 | 578.7 | 600.4 | 603.9 | 617.6 | 619.9 |
| | 0.9 | 563.7 | 566.9 | 570.4 | 578.7 | 600.4 | 603.9 | 622.2 | 625.0 |
| | 1.0 | 563.7 | 566.9 | 570.4 | 578.7 | 600.4 | 608.9 | 625.0 | 625.0 |
| | 1.5 | 560.9 | 564.1 | 564.4 | 569.3 | 580.3 | 580.3 | 600.0 | 623.8 |
| | 2.5 | 557.7 | 558.4 | 558.5 | 561.6 | 564.9 | 564.9 | 572.2 | 580.5 |
| 3.0 | 556.1 | 556.4 | 558.5 | 558.9 | 563.1 | 563.1 | 566.3 | 572.9 | |

泥浆波走时首波的扩径临界值图版. 在图 3 和图 4 中的两张图版与图 2 中的图版意义完全相同, 只是声系尺寸不同.

表 5 是图 2 的局部曲线数据. 从表中可以看出, 对于时差一定的地层, 在井轴方向都存在一个扩径厚度特征值. 当井轴方向的扩径厚度等于扩径厚度特征值时, 接收含有扩径段泥浆波首波的扩径临界值取得最大值. 例如时差为 556 μs/m 地层的扩径临界值特征厚度为 0.3 m, 时差为 357 μs/m 地层的扩径临界值特征厚度为 0.8 m 等, 详见表 5.

图 2、图 3 和图 4 中各条曲线的排列顺序是有

径量(=(井眼直径-钻头直径)/2). 图 2 中曲线上方数字是沿井轴方向的地层扩径厚度, 单位是 m. 该图中的每一条曲线都代表在该扩径厚度条件下, 不同时差地层的扩径临界值. 如果由扩径段地层时差和径向扩径量以及井轴方向扩径厚度构成的坐标点落在相应扩径厚度的扩径临界值曲线的上方, 接收探头接收的是完全在地层中传播的首波; 如果坐标点落在曲线上或者曲线的下方, 接收探头接收的首波在扩径段是在泥浆中传播的. 例如, 假设图 2 中点 *p* 代表井轴方向扩径厚度为 0.3 m, 地层声波传播速度为 6000 m/s, 径向扩径量为 20 in 时的扩径段地层. 由于 *p* 点落在扩径厚度为 0.3m 的扩径临界值曲线上方, 说明在该扩径段声波首波没有在扩径段泥浆中传播; 如果该扩径段图 3 和图 4 分别是源距为 1.2 m 间距为 0.6 m 双发双收声系和源距为 2.4 m 间距为 0.6 m 双发双收声系接收含有扩径段

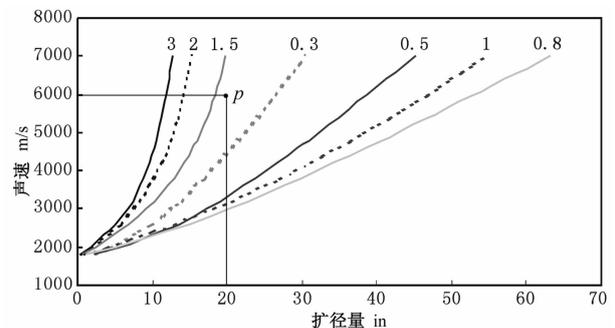


图 2 源距 1.0 m 间距 0.5 m 声系扩径临界值图版
Fig. 2 Critical diameter value plate of source distance 1.0 m and space 0.5 m acoustic system

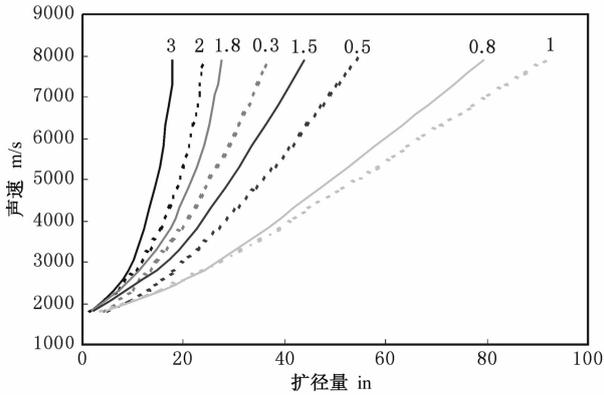


图3 源距 1.2 m 间距 0.6 m 声系扩径临界值图版

Fig. 3 Critical diameter value plate of source distance 1.2 m and space 0.6 m acoustic system

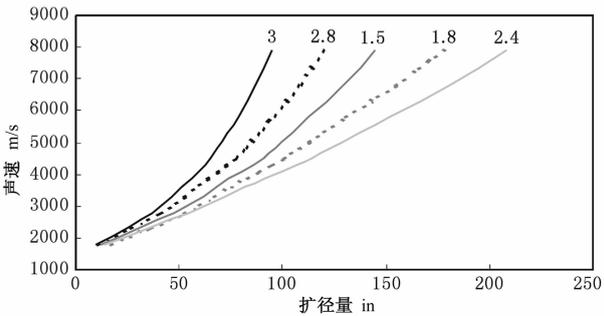


图4 源距 2.4 m 间距 0.6 m 声系扩径临界值图版

Fig. 4 Critical diameter value plate of source distance 2.4 m and space 0.6 m acoustic system

规律的.按照沿井轴方向扩径段的地层厚度与接收含有扩径段泥浆波首波的扩径临界值特征厚度的距离,自右向左,从小到大排列.例如,从图2所示的图版以及表5中可知,虽然从时差为556 μs/m地层到时差为313 μs/m地层,扩径临界值的特征厚度从0.3 m逐渐变到0.8 m,但是各个扩径厚度的扩径临界值曲线的排列顺序仍然遵循如上所述的规律.对于地层时差小于等于375 μs/m以后的地层,其扩径临界值特征厚度均为0.8 m,而且其他各个扩径厚度的扩径临界值曲线的排列顺序不再发生变化.

3.3 扩径对声波时差测井资料的影响

新疆准噶尔盆地山前高陡构造地层在钻井过程中井壁崩落现象严重,井眼极其不规则.经常会出现扩径量大于5 in的扩径层段.表6是该盆地4口井的最大井径数据表,4口井的钻头直径均为12 in.从表6中可以看到,4口井的扩径量均大于5 in.

表7和表8是扩径厚度为0.8 m,径向扩径量为2.5 in,时差分别为260 μs/m砂岩地层和时差为556 μs/m泥岩地层三种不同尺寸声系数值模拟时

表5 源距 1.0 m 间距 0.5 m 双发双收声系接收含有扩径段泥浆波走时首波的扩径临界值数据表

Table 5 Hole collapse critical values of including slowness of mud at collapse intervals of source distance 1.0 m and space 0.5 m acoustic system

| 扩径厚度(m) | 0.30 | 0.50 | 0.80 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 3.00 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 时差 556 μs/m | | | | | | | |
| 地层扩径临界值(in) | 2.38 | 2.30 | 1.10 | 0.79 | 0.61 | 0.56 | 0.33 |
| 时差 500 μs/m | | | | | | | |
| 地层扩径临界值(in) | 4.62 | 5.58 | 4.94 | 3.90 | 2.33 | 2.013 | 1.68 |
| 时差 455 μs/m | | | | | | | |
| 地层扩径临界值(in) | 6.66 | 8.59 | 8.56 | 6.99 | 3.95 | 3.36 | 2.95 |
| 时差 417 μs/m | | | | | | | |
| 地层扩径临界值(in) | 8.42 | 11.21 | 11.86 | 10.03 | 5.43 | 4.57 | 4.09 |
| 时差 385 μs/m | | | | | | | |
| 地层扩径临界值(in) | 9.97 | 13.50 | 14.88 | 12.94 | 6.78 | 5.64 | 5.09 |
| 时差 357 μs/m | | | | | | | |
| 地层扩径临界值(in) | 11.35 | 15.55 | 17.69 | 15.68 | 8.03 | 6.59 | 5.96 |
| 时差 333 μs/m | | | | | | | |
| 地层扩径临界值(in) | 12.61 | 17.40 | 20.33 | 18.23 | 9.18 | 7.45 | 6.71 |
| 时差 313 μs/m | | | | | | | |
| 地层扩径临界值(in) | 13.76 | 19.12 | 22.83 | 20.63 | 10.23 | 8.22 | 7.35 |

表6 准噶尔盆地4口井最大井径数据表

Table 6 Maximum diameters of four wells in Junggar basin

| 井名 | A | B | C | D |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 井眼直径(in) | 22.36 | 22.42 | 22.07 | 22.18 |
| 扩径量(in) | 5.18 | 5.21 | 5.04 | 5.09 |

表7 砂岩地层不同声系时差误差数据表

Table 7 Slowness and errors of different acoustic systems at collapse interval at 260 μs/m sandstone

| 声系 | 1.0 m 源距 | 1.2 m 源距 | 2.4 m 源距 |
|------------|----------|----------|----------|
| | 0.5 m 间距 | 0.6 m 间距 | 0.6 m 间距 |
| 计算时差(μs/m) | 294.07 | 288.58 | 301.41 |
| 误差(μs/m) | 34.07 | 28.58 | 41.41 |

表8 泥岩地层不同声系时差误差数据表

Table 8 Slowness and errors of different acoustic systems at collapse interval at 556 μs/m shale

| 声系 | 1.0 m 源距 | 1.2 m 源距 | 2.4 m 源距 |
|------------|----------|----------|----------|
| | 0.5 m 间距 | 0.6 m 间距 | 0.6 m 间距 |
| 计算时差(μs/m) | 587.68 | 587.82 | 578.70 |
| 误差(μs/m) | 31.68 | 31.82 | 22.70 |

差和误差数据表.

从表7和表8中可以看到,三种声系数值模拟时差误差均大于30 μs/m.如果扩径量大于5 in,记录的时差误差将会更大.除此之外,从图2、图3和图4,以及表5中还可以看到,在低速地层的扩径段

容易接收含有扩径段泥浆波的首波. 例如对于时差为 $556 \mu\text{s}/\text{m}$ 的泥岩地层, 当扩径厚度为 0.8 m , 扩径量大于等于 1.1 in 时, 接收到的声波首波走时将包含有扩径段泥浆波走时的贡献.

4 结 论

射线理论可以用于描述声波时差测井的首波传播路径和传播时间问题^[15]. 在沿井轴方向扩径段厚度一定的前提下, 垂直于井轴方向的扩径量越大, 双发双收声系的补偿效果越差; 对于均质地层, 当垂直于井轴方向的扩径量一定时, 沿井轴方向的扩径段厚度存在一个(或多个)特征值. 当沿井轴方向的扩径段厚度等于扩径厚度特征值时, 补偿效果最差; 而大于或者小于扩径厚度特征值时, 补偿效果都会变好. 声系尺寸不同, 对扩径的补偿作用也不同. 扩径厚度特征值随地层岩性或者岩性组合的不同而变化. 对于薄互层, 沿井轴方向的扩径厚度仍然存在扩径厚度特征值, 但是扩径厚度与扩径厚度特征值的对应关系与均质地层有所不同, 地层越薄邻层影响越大^[15].

接收含有扩径段泥浆波首波的扩径临界值随地层声速和井轴方向扩径厚度的不同而成规律性变化. 声系不同, 接收含有扩径段泥浆波首波的扩径临界值图版规律不变, 但是图版数值有所不同. 在低速地层扩径段容易接收含有扩径段泥浆波走时的首波.

国内外油田已经获取了大量的双发双收声系声波时差测井资料. 在双发双收声系声波时差测井资料的应用过程中注意井眼的影响, 并对严重扩径层段的时差数据进行一定的扩径影响校正将会提高声波时差资料的解释精度. 可喜的是针对双发双收声系的缺欠, 已经设计投产了双发四收等对扩径影响有更好补偿作用的声波时差测井仪.

参考文献(References)

- [1] Summers G C, Roding R A. Continuous velocity logging. *Geophysics*, 1952, **27**(01):598~606
- [2] Kokesh F P, Schwartz R J, Morris R L. A new approach to sonic logging and other acoustic measurements. *J. Petr. Tech.*, *SPE*-199. 1965, **17**:282~286
- [3] Labo J, Mentemeier S H, Cleoney C A. Practical introduction to borehole geophysics: an overview of wireline well logging principles for geophysicists. *Tulsa, Okla.*: *Society of Exploration Geophysicists*, 1987, 1986:315~316
- [4] 张海澜. 弹性介质中充液井孔的漏模和井孔中声场的分波计算. *中国科学(A辑)*, 1995, **25**(7):742~752
Zhang H L. The calculation by partial wave method and leaky mode in a fluid-filled borehole of acoustic field. *Science in China (Series A)* (in Chinese), 1995, **25**(07):742~752
- [5] 董良国, 马在田, 曹景忠等. 一阶弹性波动方程交错网格高阶差分分解法. *地球物理学报*, 2000, **43**(6):856~964
Dong L G, Ma Z T, Cao J Z, et al. A staggered-grid high-order difference method of one-order elastic wave equation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(6):856~964
- [6] 董良国, 马在田, 曹景忠等. 一阶弹性波动方程交错网格高阶差分分解法稳定性研究. *地球物理学报*, 2000, **43**(6):411~419
Dong Z L, Ma Z T, Cao J Z, et al. A study on stability of the staggered-grid high-order difference method of first-order elastic wave equation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(6):411~419
- [7] 沈建国, 张海澜. 井内偏心声源激发的三维声场的数值研究. *地球物理学报*, 2000, **43**(2):279~286
Shen J G, Zhang H L. Numerical study on 3D acoustic field generated by eccentric sources in borehole. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(2):279~286
- [8] Chen N Y. Borehole wave propagation in isotropic and anisotropic media: three-dimensional finite difference approach [Ph. D. Thesis]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. 1994
- [9] Cheng C H, Toksoz M N. Elastic wave propagation in a fluid-filled borehole and synthetic acoustic logs. *Geophysics*, 1981, **46**(7):1042~1053
- [10] Leung T, Dennis R. Numerical evaluation of transient acoustic waveform duo to a point source in a fluid-filled borehole. *Geophysics*, 1979, **44**(10):1706~1720
- [11] Paillet F L, Cheng C H. A numerical investigation of head wave and leaky modes in fluid-filled borehole. *Geophysics*, 1986, **51**(7):1438~1449
- [12] Kurjian A L. Numerical computation of individual fan field arrivals excited by an acoustic source in a borehole. *Geophysics*, 1985, **50**(5):1438~1449
- [13] 董和风, 王克协, 李荣华. 声测井中的声压-速度有限差分方法. *计算物理*, 1998, **15**(1):77~82
Dong H F, Wang K X, Li R H. Pressure velocity finite difference method in acoustic logging. *Chinese Journal of Computational Physics* (in Chinese), 1998, **15**(1):77~82
- [14] 马俊, 董和风, 王克协. 改进的 PV-FD 方法与沿井孔传播声波通过层的精细描述. *计算物理*, 1999, **16**(6):651~655
Ma J, Dong H F, Wang K X. Improved PV FD method and the fine description of the acoustic wave along borehole going through horizontal layer. *Chinese Journal of Computational Physics* (in Chinese), 1999, **16**(6):651~655
- [15] 李洪奇, 孙宝佃, 王玉敏等. 双发双收声系扩径段测井响应特征分析. *测井技术*, 2005, **29**(2):105~108
Li H Q, Sun B D, Wang Y M, et al. Log responses to two transmitters and two receivers acoustic sonde at intervals of hole collapse. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2005, **29**(2):105~108
- [16] 楚泽函. 声波测井原理. 北京:石油工业出版社, 1987. 75~100
Chu Z H. Sonic Logging Principle. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987. 75~100