

doi: 10.11720/wtyht.2022.2447

苏林帅,蔡明,郑占树,等.井眼扩径对水平井声波测井响应影响的数值模拟[J].物探与化探,2022,46(2):467-473.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2447

Su L S, Cai M, Zheng Z S, et al. Numerical simulation of the effects of borehole enlargement on sonic logging response of horizontal wells[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(2): 467-473. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2447

# 井眼扩径对水平井声波测井响应影响的数值模拟

苏林帅<sup>1,2,3</sup>, 蔡明<sup>1,2</sup>, 郑占树<sup>4</sup>, 徐宝宝<sup>2</sup>, 罗居森<sup>2</sup>, 胡燕杰<sup>2</sup>, 张荆宇<sup>2</sup>

(1.长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2.长江大学 地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100; 3.中国石油塔里木油田分公司 安全环保与工程监督中心, 新疆 库尔勒 841000; 4.中国石油集团测井有限公司 辽河分公司, 辽河 盘锦 124011)

**摘要:** 水平钻井得到越来越广泛的应用。作为储层评价最重要手段之一的声波测井在水平井中往往受到井眼状况等因素的影响, 从而导致其应用效果明显变差。为此, 采用三维有限差分法针对径向扩径尺寸变化、轴向扩径尺寸变化和扩径位置变化三大类情况开展了正演模拟研究, 重点研究了井眼扩径对水平井声波测井波形幅度、到时间和波速的影响。结果表明, 当扩径段位于声源与最近的接收器之间时, 扩径属性参数变化对纵横波波速测量结果无影响, 但均会导致波形幅度明显降低; 纵、横波幅度均随扩径圆筒厚度和长度的增大而减小, 但基本不受扩径距的影响; 纵波到时随扩径圆筒厚度和长度的增大而增大, 但随扩径距的增大而轻微减小。本研究厘清了井眼扩径对水平井声波测井响应的影响规律, 可为进一步开展水平井声波测井影响因素校正方法研究提供指导和帮助。

**关键词:** 水平井; 扩径; 声波测井; 幅度; 数值模拟

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2022)02-0467-07

## 0 引言

水平井不但可以降低勘探开发成本, 而且还能大幅度提高油气单井产能和采收率。因此, 自 20 世纪末期以来水平井技术在全球范围内得到越来越广泛的应用, 国内水平井技术近年来也得到了快速的发展<sup>[1]</sup>。声波测井是储层评价最重要的手段之一<sup>[2-5]</sup>, 但在水平井中声波测井仪器响应因地层各向异性、井眼状况、井旁界面、井底岩屑、仪器的偏心状况等因素, 与垂直井相比表现出极大的差异, 进而导致储层声学相关参数评价精度不高, 无法满足油田现场勘探开发需求<sup>[6]</sup>。

为了解决上述声波测井面临的问题, 有必要开展(水平井)声波测井正反演研究。国内外学者已开展了大量相关的工作。Stephen 等<sup>[7]</sup>将有限

差分方法引入井孔声场模拟, 并分析了侵入带、井径变情况下的波场, 但该方法在固—液界面稳定性差。Randall 等<sup>[8]</sup>使用 2.5 维的速度—应力有限差分方法模拟了 TI 介质中斜井的声场。Chen<sup>[9]</sup>用直角坐标系下三维有限差分方法模拟了各向同性介质以及各向异性介质井孔单极源和多级源激发的声场。Mittet 和 Renlie<sup>[10]</sup>使用高阶速度—应力有限差分法分析了多极子源下地层各向异性、吸收作用对波场的影响。陶果等<sup>[11]</sup>采用三维有限差分法对单极和偶极声源激励下的三维声场进行了正演模拟, 并模拟计算了井旁含地层界面井孔模型的声场<sup>[12]</sup>。陈德华等<sup>[13]</sup>采用优化后的高阶差分法分析井旁裂缝模型下声场的分布。何峰江等<sup>[14]</sup>使用局部加密交错网格有限差分法研究了贴井壁声波测井仪在裸眼井中的声场。丛健生等<sup>[15]</sup>模拟计算了水平井孔穿过地层界面时的声速测井响应。陈木银等<sup>[16]</sup>应用

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2021-11-02

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2019D-5007-0303); 国家自然科学基金项目(42104126, 41774116); 湖北省教育厅科技项目(Q20211309)

第一作者: 苏林帅(1997-), 男, 主要从事地球物理测井方面的研究与钻井地质工程项目的监督工作。Email: 675450484@qq.com

通讯作者: 蔡明(1986-), 男, 主要从事声波测井方法与应用、岩石物理实验、信号处理与解释等方面的工作。Email: caiming@yangtzeu.edu.cn

实验的方法研究了在水平井与在垂直井中测量的声波时差的关系,并通过射线追踪法研究了快速夹层影响水平井的声波时差响应临界值图版。杨歆<sup>[17]</sup>采用二维有限差分正演模拟了水平井存在高速层或岩屑层及仪器偏心时的声波测井响应特征,还研究了不同角度大斜度井中不同各向异性比的地层声波测井时差校正方法。张鹏云<sup>[18]</sup>对井眼、各向异性等水平井声波测井响应特征的影响因素进行了分析,并提出用岩石物理实验法和统计平移法对水平井声波时差曲线进行校正。Liu等<sup>[19]</sup>通过模拟水平井和斜井穿透各向异性介质的合成阵列声波数据,研究了井眼倾斜角度、各向异性、井外高速层、井内薄岩屑层等因素对声波传播和实测声波慢度的影响。刘黎等<sup>[20]</sup>采用三维变网格有限差分模拟研究了裂缝宽度、倾角对井眼声波的传播影响规律,尤其是对横波和斯通利波的衰减影响规律。

上述分析表明,针对水平井声波测井影响因素的研究较少。本文采用三维有限差分方法全面模拟了扩径对水平井声波测井响应的影响,主要考察了径向扩径尺寸、轴向扩径尺寸、扩径位置等因素对水平井声波测井响应的规律,特别是对声波时差、到时和幅度的影响规律,研究成果有助于进一步开展水平井声波测井影响因素校正模型与方法研究,进而提高水平井声波测井资料处理解释的精度,更好地为现场生产服务。

## 1 数值模拟算法的实现与验证

本文采用有限差分方法进行声场数值模拟。在

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{l_x+\frac{1}{2},l_y,l_z} D_t(v_x)_{l_x+\frac{1}{2},l_y,l_z}^n = D_x(\sigma_{xx})_{l_x+\frac{1}{2},l_y,l_z}^n + D_y(\sigma_{xy})_{l_x+\frac{1}{2},l_y,l_z}^n + D_z(\sigma_{xz})_{l_x+\frac{1}{2},l_y,l_z}^n, \\ \rho_{l_x,l_y+\frac{1}{2},l_z} D_t(v_y)_{l_x,l_y+\frac{1}{2},l_z}^n = D_x(\sigma_{xy})_{l_x,l_y+\frac{1}{2},l_z}^n + D_y(\sigma_{yy})_{l_x,l_y+\frac{1}{2},l_z}^n + D_z(\sigma_{yz})_{l_x,l_y+\frac{1}{2},l_z}^n, \\ \rho_{l_x,l_y,l_z+\frac{1}{2}} D_t(v_z)_{l_x,l_y,l_z+\frac{1}{2}}^n = D_x(\sigma_{xz})_{l_x,l_y,l_z+\frac{1}{2}}^n + D_y(\sigma_{yz})_{l_x,l_y,l_z+\frac{1}{2}}^n + D_z(\sigma_{zz})_{l_x,l_y,l_z+\frac{1}{2}}^n, \\ D_t(\sigma_{xx})_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}} = (\lambda + 2\mu)_{l_x,l_y,l_z} D_x(v_x)_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}} + \lambda_{l_x,l_y,l_z} D_y(v_y)_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}} + \lambda_{l_x,l_y,l_z} D_z(v_z)_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}}, \\ D_t(\sigma_{yy})_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}} = \lambda_{l_x,l_y,l_z} D_x(v_x)_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}} + (\lambda + 2\mu)_{l_x,l_y,l_z} D_y(v_y)_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}} + \lambda_{l_x,l_y,l_z} D_z(v_z)_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}}, \\ D_t(\sigma_{zz})_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}} = \lambda_{l_x,l_y,l_z} D_x(v_x)_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}} + \lambda_{l_x,l_y,l_z} D_y(v_y)_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}} + (\lambda + 2\mu)_{l_x,l_y,l_z} D_z(v_z)_{l_x,l_y,l_z}^{n+\frac{1}{2}}, \\ D_t(\sigma_{xy})_{l_x+\frac{1}{2},l_y+\frac{1}{2},l_z}^{n+\frac{1}{2}} = \mu_{l_x+\frac{1}{2},l_y+\frac{1}{2},l_z} [D_y(v_x)_{l_x+\frac{1}{2},l_y+\frac{1}{2},l_z}^{n+\frac{1}{2}} + D_x(v_y)_{l_x+\frac{1}{2},l_y+\frac{1}{2},l_z}^{n+\frac{1}{2}}], \\ D_t(\sigma_{xz})_{l_x+\frac{1}{2},l_y,l_z+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \mu_{l_x+\frac{1}{2},l_y,l_z+\frac{1}{2}} [D_z(v_x)_{l_x+\frac{1}{2},l_y,l_z+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + D_x(v_z)_{l_x+\frac{1}{2},l_y,l_z+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}], \\ D_t(\sigma_{yz})_{l_x,l_y+\frac{1}{2},l_z+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \mu_{l_x,l_y+\frac{1}{2},l_z+\frac{1}{2}} [D_z(v_y)_{l_x,l_y+\frac{1}{2},l_z+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + D_y(v_z)_{l_x,l_y+\frac{1}{2},l_z+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}]. \end{array} \right. \quad (2)$$

三维直角坐标系下,根据弹性力学的基本假设,假设外力为零,可推导出弹性各向同性介质的速度—应力弹性波动方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}, \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right), \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}, \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right), \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}, \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} + \lambda \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right). \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: $x, y, z$ 表示空间坐标变量; $t$ 表示时间变量; $\rho$ 表示密度; $\lambda, \mu$ 表示拉梅常数; $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{xz} = \sigma_{zx}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy}$ ,表示应力分量; $v_x, v_y, v_z$ 表示速度分量。

为保证计算精度,上述波动方程离散化时一般采用交错网格<sup>[21-22]</sup>。计算模型按交错网格方式剖分,应力、速度分量分布示意图如图1。与正应力有关的弹性参数的采样位置和采样时间与正应力一致,与剪切应力有关的弹性参数的采样位置和采样时间与对应的剪切应力分量一致,与速度有关的密度参数的采样位置和采样时间与速度分量一致。

利用二阶差分算子对式(1)的波动方程进行离散化,得到差分方程:

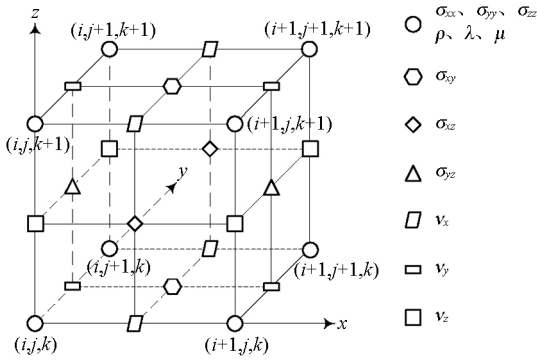


图 1 交错网格剖分示意

Fig.1 Schematic diagram of staggered grid division

式(2)中,  $D_t$  表示对时间的差分算子;  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  表示对空间的差分算子;下标表示空间坐标,上标表示时间节点。

对参数  $\rho$ 、 $\mu$  做如下处理:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{l_x+\frac{1}{2}, l_y, l_z} &= \frac{\rho_{l_x, l_y, l_z} + \rho_{l_x+1, l_y, l_z}}{2}, \\ \rho_{l_x, l_y+\frac{1}{2}, l_z} &= \frac{\rho_{l_x, l_y, l_z} + \rho_{l_x, l_y+1, l_z}}{2}, \\ \rho_{l_x, l_y, l_z+\frac{1}{2}} &= \frac{\rho_{l_x, l_y, l_z} + \rho_{l_x, l_y, l_z+1}}{2}, \\ \mu_{l_x+\frac{1}{2}, l_y+\frac{1}{2}, l_z} &= \frac{1}{4} \left( \frac{1}{\mu_{l_x, l_y, l_z}} + \frac{1}{\mu_{l_x+1, l_y, l_z}} + \frac{1}{\mu_{l_x, l_y+1, l_z}} + \frac{1}{\mu_{l_x+1, l_y+1, l_z}} \right), \\ \mu_{l_x+\frac{1}{2}, l_y, l_z+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{4} \left( \frac{1}{\mu_{l_x, l_y, l_z}} + \frac{1}{\mu_{l_x+1, l_y, l_z}} + \frac{1}{\mu_{l_x, l_y, l_z+1}} + \frac{1}{\mu_{l_x+1, l_y, l_z+1}} \right), \\ \mu_{l_x, l_y+\frac{1}{2}, l_z+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{4} \left( \frac{1}{\mu_{l_x, l_y, l_z}} + \frac{1}{\mu_{l_x, l_y+1, l_z}} + \frac{1}{\mu_{l_x, l_y, l_z+1}} + \frac{1}{\mu_{l_x, l_y+1, l_z+1}} \right). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

可以达到自动处理固—液边界的效果,保证了固—液界面上切应力为零。

交错网格有限差分方程属于显式差分时间递推格式的数值算法,即可以按时间节点对速度、应力分量进行迭代计算;在初始时刻( $t=0$ ),速度、应力分量均为零。在三维各向同性介质中,波在各个方向上的稳定性条件是一样的,具体如下:

$$\frac{\Delta t v_{\max}}{\Delta x} \leq \left( \sqrt{3} \sum_{m=0}^{N-1} |a_m| \right)^{-1}, \quad (4)$$

其中,  $v_{\max}$  是介质中波的最大传播速度;  $\Delta x$  为空间步长;  $\Delta t$  为时间步长;  $2N$  为空间阶数;  $a_m$  为系数;  $m$  为系数编号。表 1 给出了常用空间阶数下交错网格差分的系数。

根据上述算法开发了相应的三维有限差分声场模拟软件并对图 2 所示的水平井模型进行了声波测井模拟计算。模型尺寸为  $2.7 \text{ m} \times 2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ , 井径

表 1 常用空间阶数下交错网格差分的系数

Table 1 Staggered grid difference coefficient for common spatial order

空间阶数 $2N$	$m$	$a_m$
2	0	1
	1	-1/24
4	0	9/8
	1	-1/24
6	0	75/64
	1	-25/384
	2	3/640

为  $0.205 \text{ m}$ , 介质参数如表 2 所示, 空间步长为  $0.005 \text{ m}$ , 时间步长为  $0.36 \mu\text{s}$ , 计算时长为  $4 \text{ ms}$ 。在模型的边界采用不分裂的卷积完全匹配层吸收波场<sup>[23-24]</sup>, 吸收层厚度为 20 层空间网格。声源与接收器位于井轴上。单极声源激励信号为主频  $10 \text{ kHz}$  的 Rick 子波; 接收器的最小源距为  $\text{TR1} = 1.6 \text{ m}$ , 间距为  $0.1 \text{ m}$ , 共 8 个接收器。



图 2 水平井模型

Fig.2 Horizontal well model

表 2 地层及井内流体的参数

Table 2 Paraments of formation and borehole fluid

参数	纵波速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	横波速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
地层	4000	2300	2500
井内流体	1500	—	1000

图 3 为源距  $2.3 \text{ m}$  时有限差分法(3D-FD)与实轴积分法(RAI)计算得到的全波波型对比, 两者吻合良好, 且模式波类型及特征与理论一致; 利用 STC 提取的纵、横波波速分别为  $3942.08 \text{ m/s}$ 、 $2267.83 \text{ m/s}$ , 与模型设置的速度吻合较好, 证实了有限差分算法和软件的正确性与可行性。

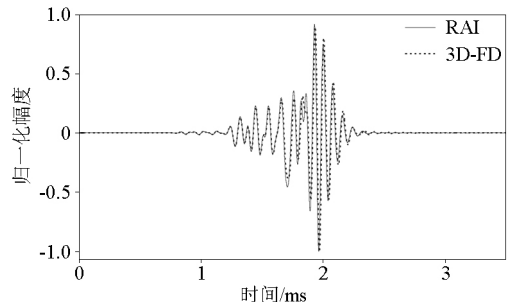


图 3 有限差分(3D-FD)与实轴积分(RAI)波形对比

Fig.3 The comparison result of 3D-FD and RAI waveforms

## 2 井眼扩径对水平井声波测井响应影响的模拟与分析

在地下一定深度的岩层处于受压状态而存在着原地应力,当井眼形成时,井周岩石必然承受原井眼位置岩石承担的部分载荷,结果在井壁周围岩石中产生应力集中现象,若井筒液压支撑不足或岩石强度不够,井壁将破裂形成扩径<sup>[25]</sup>,进而影响声场传播。本文针对在声源与接收器之间出现不同扩径情况的扩径模型进行了水平井声波测井数值模拟计算。图4为水平井扩径模型示意,井眼是半径为0.1 m的圆柱,扩径部分为以井眼半径为内径的圆筒,均填充井内流体。

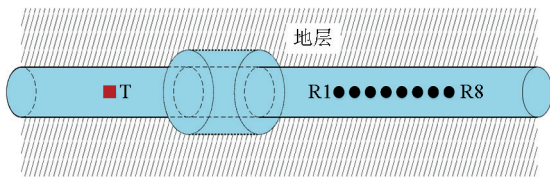


图4 水平井扩径模型示意

Fig.4 Horizontal well model with borehole expansion

### 2.1 径向扩径尺寸的影响分析

针对轴向扩径距(扩径圆筒长度)为0.2 m,扩径圆筒厚度(扩径圆筒外内径之差,也称径向扩径尺寸)分别为0.02、0.04、0.06、…、0.6、0.8、1.0 m,扩径圆筒居于声源与最近的接收器(R1)之间的水平井扩径模型进行了声波测井数值模拟计算,得到如图5所示的不同模型中2.3 m源距处的接收波形。对各模型中纵、横波幅度及其波速和到时信息进行处理分析,并将纵、横波幅度以无扩径的理想水平井模型的纵、横波幅度为基准做归一化处理,得到归一化幅度、波速和到时随径向扩径尺寸变化关系,分别如图6、图7和图8所示。由图6可以看出,归一化纵、横波幅度均随扩径圆筒厚度的增大而减小,且当扩径圆筒厚度达到或超过0.6 m时归一化幅度受扩径圆筒厚度的影响较小甚至无影响。由图7可以看出,纵、横波的波速始终都接近于地层的波速,扩径圆筒厚度的变化没有对其产生影响,这与理论是相符的(利用阵列波形提取的波速为接收器阵列对应深度段地层的波速)。由图8可以看出,纵波到时随扩径圆筒厚度的增大而增大,且当扩径圆筒厚度达到或超过0.6 m时纵波到时受扩径圆筒厚度的影响较小甚至无影响,说明该模型条件下滑行纵波的径向探测深度约为0.6 m。

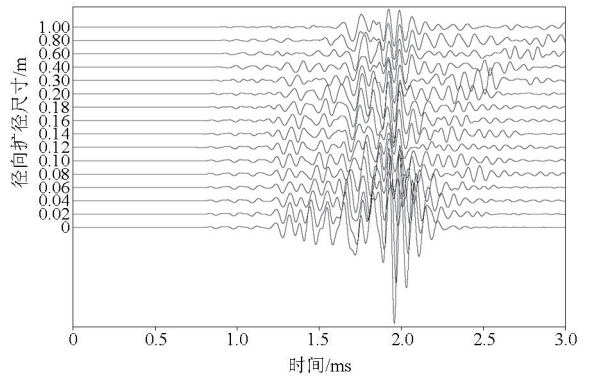


图5 不同径向扩径尺寸条件下的全波波形

Fig.5 Acoustic logging waveforms for different borehole radial expansion sizes

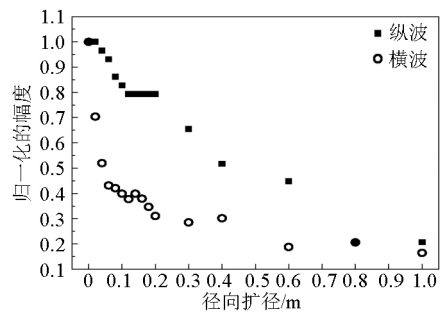


图6 纵横波幅度随径向扩径尺寸变化关系

Fig.6 The relationship between compressional and shear wave amplitudes with borehole radial expansion size

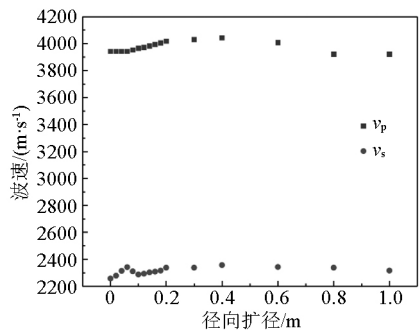


图7 纵横波速度随径向扩径尺寸变化关系

Fig.7 The relationship between compressional and shear wave velocities with borehole radial expansion size

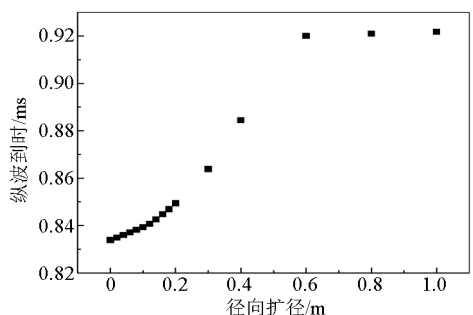


图8 纵波到时随径向扩径尺寸变化关系

Fig.8 The relationship between compressional wave arrival with borehole radial expansion size



### 2.2 轴向扩径尺寸的影响分析

针对扩径圆筒厚度为 0.2 m, 轴向扩径距(也即扩径圆筒长度)分别为 0.1、0.2、0.3、...、1.0m, 扩径圆筒居于声源与最近的接收器(R1)之间的水平井扩径模型进行了声波测井数值模拟计算, 得到如图 9 所示的不同模型中 2.3 m 源距处的接收波形。对各模型中纵波的幅度和到时信息进行处理分析, 并将纵波幅度以理想水平井模型的纵波幅度为基准做归一化处理, 得到归一化幅度和到时随轴向扩径尺寸变化关系分别如图 10 和图 11 所示。由图 10 可以看出, 归一化纵波幅度随扩径圆筒长度的增大而减小, 且在 0.4 m 附近变化较为平缓, 当扩径圆筒长度大于或等于 0.9 m 时, 纵波幅度基本不再随之变化, 说明此时滑行纵波基本已在径向上穿透了整个扩径结构。由图 11 可以看出, 纵波到时随扩径圆筒长度的增大而增大, 但变化幅度较小。

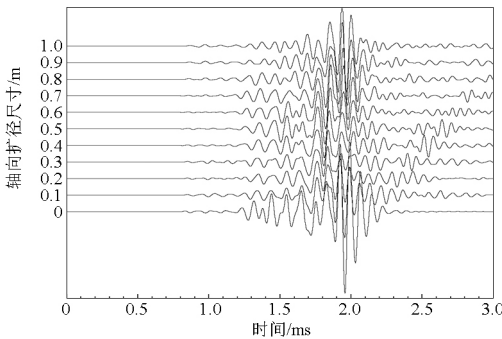


图 9 不同轴向扩径尺寸条件下的全波波形  
Fig.9 Acoustic logging waveforms for different borehole axial expansion sizes

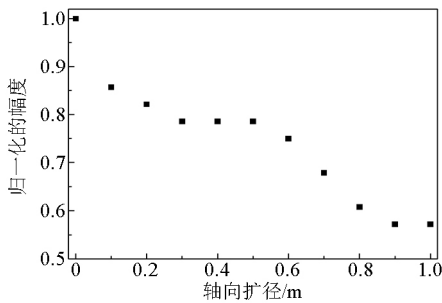


图 10 纵波幅度随轴向扩径尺寸变化关系  
Fig.10 The relationship between compressional wave amplitude with borehole axial expansion size

### 2.3 扩径位置的影响分析

针对扩径圆筒长度为 0.2 m, 扩径圆筒厚度为 0.2m, 扩径距(声源与扩径圆筒左端之间的距离)分别为 0.3、0.4、0.5、...、1.1 m 的水平井扩径模型进行了声波测井数值模拟计算, 得到如图 12 所示的不同模型中 2.3 m 源距处的接收波形。对各模型中纵、横波的幅度和到时信息进行处理分析, 并将纵、横波

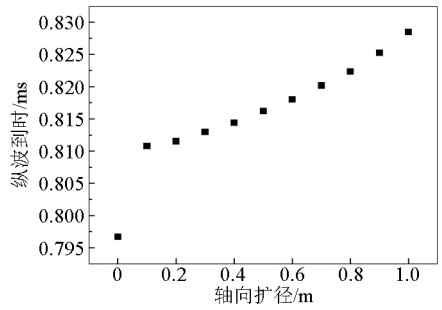


图 11 纵波到时随轴向扩径尺寸变化关系

Fig.11 The relationship between compressional wave arrival with borehole axial expansion size

幅度以理想水平井模型的纵、横波幅度为基准做归一化处理, 得到归一化幅度和到时随扩径距变化关系分别如图 13 和图 14 所示。由图 13 可以看出, 扩径存在会使纵横波幅度明显降低, 但纵、横波幅度基本不受扩径距的影响。由图 14 可以看出, 纵波到时随扩径距的增大而减小, 但变化幅度较小, 且到 0.9 m 基本趋于稳定, 说明滑行纵波沿轴向传播的同时沿地层径向穿透深度也逐渐增大, 且当纵波沿轴向传播约 0.9 m 时其径向穿透深度约等于或超过该模型径向扩径尺寸, 故纵波到时受扩径影响微弱或基本不受影响。

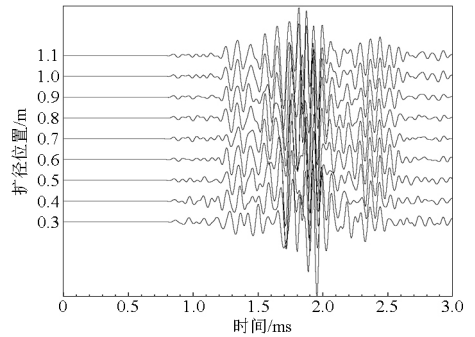


图 12 不同扩径距条件下的全波波形  
Fig.12 Acoustic logging waveforms for different borehole expansion position

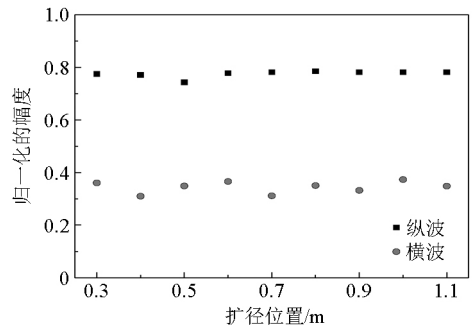


图 13 纵横波幅度随扩径距变化关系  
Fig.13 The relationship between compressional and shear wave amplitudes with borehole expansion position

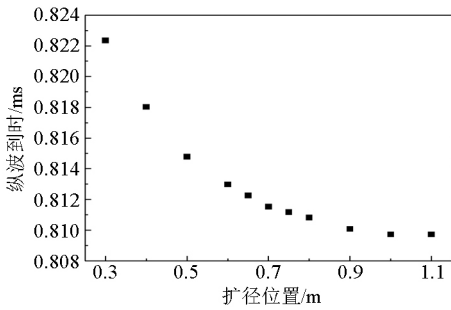


图 14 纵波到时随扩径距变化关系

Fig.14 The relationship between compressional wave arrival with borehole expansion position

### 3 结论与展望

针对井眼扩径对水平井声波测井响应影响的问题,本文采用有限差分法开展了正演模拟研究,主要针对径向扩径尺寸变化、轴向扩径尺寸变化和扩径位置变化三大类情况开展了正演模拟计算,并对模拟波形数据进行了处理分析,重点研究了井眼扩径对水平井声波测井波形幅度、到时和波速的影响,取得如下几点认识:

1) 当扩径段位于声源与最近的接收器之间时,扩径属性参数变化对纵、横波波速测量结果无影响,但均会导致波形幅度明显降低。

2) 径向扩径尺寸变化时,纵、横波幅度均随扩径圆筒厚度的增大而减小,且当扩径圆筒厚度达到或超过 0.6 m 时幅度受扩径圆筒厚度的影响较小甚至无影响;另外,纵波到时随扩径圆筒厚度的增大而增大,且当扩径圆筒厚度达到或超过 0.6 m 时纵波到时受扩径圆筒厚度的影响较小甚至无影响。

3) 轴向扩径尺寸变化时,纵波幅度随扩径圆筒长度的增大而减小,且在 0.4 m 附近变化较为平缓;另外,纵波到时随扩径圆筒长度的增大而增大,但变化幅度较小。

4) 扩径位置变化时,纵横波幅度基本不受扩径距的影响,纵波到时随扩径距的增大而减小,但变化幅度较小,且到 0.9 m 基本趋于稳定。

本研究厘清了井眼扩径对水平井声波测井响应的规律,可为进一步开展水平井声波测井影响因素校正方法研究提供指导和帮助。本研究未考虑井底岩屑、井顶填充气体等因素的影响,后期可进一步开展相关研究工作。

### 参考文献 (References):

[1] 吴月先,钟水清,徐永高,等.中国水平井技术实力现状及发展

趋势[J].石油矿场机械,2008,37(3):33-36.

Wu Y X,Zhong S Q,Xu Y G, et al.Present condition of horizontal well technique strength and its development trend in China [J].Oil Field Equipment,2008,37(3):33-36.

[2] 章成广,江万哲,潘和平.声波测井原理与应用[M].北京:石油工业出版社,2009.

Zhang C G,Jiang W Z,Pan H P.Principle and application of acoustic logging [M].Beijing:Petroleum Industry Press,2009.

[3] 蔡明,章成广,韩闯,等.微裂缝对横波衰减影响的实验研究及其在致密砂岩裂缝评价中的应用[J].中国石油大学学报:自然科学版,2020,44(1):45-52.

Cai M,Zhang C G,Han C, et al.Experimental research of effect of microfracture on shear wave attenuation and its application on fracture evaluation in tight sand formation [J].Journal of China University of Petroleum:Natural Science Edition,2020,44(1):45-52.

[4] 蔡明,章成广,唐军,等.参数估计法声波远探测反射波提取效果影响因素研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2020,35(1):42-48.

Cai M,Zhang C G,Tang J, et al.Study on factors of influencing extraction effect of reflection wave in acoustic remote detection using parameter estimation method [J].Journal of Xi'an Shiyou University:Natural Science Edition,2020,35(1):42-48.

[5] Cai M,Qiao W,Ju X, et al.Lossless compression method for acoustic waveform data based on wavelet transform and bit-recombination mark coding [J].Geophysics,2013,78(5):V219-V228.

[6] 周灿灿,王昌学.水平井测井解释技术综述[J].地球物理学进展,2006,21(1):152-160.

Zhou C C,Wang C X.Technology review on the log interpretation of horizontal well [J].Progress in Geophysics,2006,21(1):152-160.

[7] Stephen R A,Cardo-Casas F,Cheng C H.Finite-difference synthetic acoustic logs [J].Geophysics,1985,50(10):1588-1609.

[8] Randall C J,Scheibner D J,Wu P T.Multipole borehole acoustic waveforms: Synthetic logs with beds and borehole washouts [J].Geophysics,1991,56(11):1757-1769.

[9] Chen N Y.Borehole wave propagation in isotropic and anisotropic media: Three-dimensional finite difference approach [D].Cambridge:Massachusetts Institute of Technology,1994.

[10] Mittet R,Renlie L.High-order, finite-difference modeling of multipole logging in formations with anisotropic attenuation and elasticity [J].Geophysics,1996,61(1):21-33.

[11] 陶果,张友生,张洪娥,等.用于声波测井的大型三维有限差分模拟程序[J].测井技术,2001,25(4):273-277.

Tao G,Zhang Y S,Zhang H E, et al.3D Finite difference simulating program for acoustic logging [J].Well Logging Technology,2001,25(4):273-277.

[12] 陶果,何峰江,王兵,等.声反射成像测井在地层中的三维波场模拟方法研究[J].中国科学D辑:地球科学,2008,38(S1):166-173.

Tao G,He F J,Wang B, et al.Study on 3D wave field simulation of acoustic reflection imaging logging in formation [J].Science of China Series D:Earth Science,2008,38(S1):166-173.

[13] 陈德华,丛健生,徐德龙,等.裂缝性地层中的井孔声场模拟[J].大庆石油学院学报,2004,28(3):4-6.

- Chen D H, Cong J S, Xu D L, et al. Borehole acoustic field simulation in fractured formation [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2004, 28(3): 4-6.
- [14] 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 [J]. *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 [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2006, 49(3): 923-928.
- [15] 丛健生, 乔文孝. 水平井地层界面声波测井响应模拟分析 [J]. *测井技术*, 2008, 32(1): 29-32.
- Cong J S, Qiao W X. Simulated response of acoustic log in horizontal borehole placing on interface of two formations [J]. *Well Logging Technology*, 2008, 32(1): 29-32.
- [16] 陈木银, 何西攀, 金小慧. 水平井声波时差测井响应特征研究 [J]. *国外测井技术*, 2013(4): 38-41.
- Chen M Y, He X P, Jin X H. Study on the characteristics of acoustic slowness difference logging response in horizontal wells [J]. *World Well Logging Technology*, 2013(4): 38-41.
- [17] 杨歆. 水平井及大斜度井声波测井时差校正方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- Yang X. Research on correction method of sonic logging slowness in horizontal wells and high angle deviated wells [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [18] 张鹏云. 基于声电组合的水平井地层评价方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- Zhang P Y. Research on horizontal well formation evaluation method based on acoustic and resistivity logging [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [19] Liu H, Wang B, Tao G, et al. Study on the simulation of acoustic logging measurements in horizontal and deviated wells [J]. *Applied Geophysics*, 2017, 14(3): 337-350.
- [20] 刘黎, 章成广, 蔡明, 等. 裂缝对井眼声波的传播影响规律研究 [J]. *物探与化探*, 2019, 43(6): 1333-1340.
- Liu L, Zhang C G, Cai M, et al. Studies on the effect of crack on the propagation of acoustic waves in wellbore [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(6): 1333-1340.
- [21] 王秀明, 张海澜, 王东. 利用高阶交错网格有限差分法模拟地震波在非均匀孔隙介质中的传播 [J]. *地球物理学报*, 2003, 46(6): 842-849.
- Wang X M, Zhang H L, Wang D. Modelling of seismic wave propagation in heterogeneous poroelastic media using a high-order staggered finite-difference method [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2003, 46(6): 842-849.
- [22] 严红勇, 刘洋. Kelvin-Voigt 黏弹性介质地震波场数值模拟与衰减特征 [J]. *物探与化探*, 2012, 36(5): 806-812.
- Yan H Y, Liu Y. Numerical modeling and attenuation characteristics of seismic wavefield in Kelvin-Voigt viscoelastic media [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(5): 806-812.
- [23] Komatitsch D, Martin R. An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation [J]. *Geophysics*, 2007, 72(5): SM155-SM167.
- [24] Martin R, Komatitsch D, Ezziani A. An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for seismic wave propagation in poroelastic media [J]. *Geophysics*, 2008, 73(4): T51-T61.
- [25] 廖扬强, 余庆. 大斜度井水平井井壁力学稳定性技术现状 [J]. *钻采工艺*, 2003, 26(3): 13-16.
- Liao Y Q, Yu Q. Technical status of wellbore mechanical stability of horizontal well with large inclination [J]. *Drilling Process*, 2003, 26(3): 13-16.

## Numerical simulation of the effects of borehole enlargement on sonic logging response of horizontal wells

SU Lin-Shuai<sup>1,2,3</sup>, CAI Ming<sup>1,2</sup>, ZHENG Zhan-Shu<sup>4</sup>, XU Bao-Bao<sup>2</sup>, LUO Ju-Sen<sup>2</sup>, HU Yan-Jie<sup>2</sup>, ZHANG Jing-Yu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3. Safety, Environmental Protection and Engineering Supervision Center of Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China; 4. Liaohe Branch, China Petroleum Logging Co. Ltd., Panjin 124011, China)

**Abstract:** Horizontal well drilling is increasingly being widely applied. However, sonic logging-one of the most important reservoir assessment methods-tends to be affected by the borehole conditions in the application of horizontal wells, leading to notably reduced application effects. In view of this fact, this paper conducts the forward simulation of the radial and axial size changes induced by borehole enlargement and the changes in enlargement positions using the three-dimensional finite difference method, with the focus on the effects of borehole enlargement on the waveform amplitude, arrival times, and velocities of waves in the sonic logging of horizontal wells. The results are as follows. In the case that the borehole enlargement occurred between the sonic transmitter and the nearest receiver, the changes in borehole enlargement parameters had no effect on the measured results of the compressional and shear wave velocities but led to the notable decrease in waveform amplitude. The amplitude of compressional and shear waves decreased with an increase in the thickness and length of the enlargement cylinder but was almost not affected by the distance between the sonic transmitter and the expansion section. The compressional wave arrival time increased with an increase in the thickness and length of the enlargement cylinder but slightly decreased with an increase in the distance between the sonic transmitter and the expansion section. This study clarifies the laws of the effects of borehole enlargement on the sonic logging response of horizontal wells, and it will provide guidance and assistance for further research on the methods for influencing factor correction in the sonic logging of horizontal wells.

**Key words:** horizontal well; borehole enlargement; sonic logging; amplitude; numerical simulation

(本文编辑:叶佩)