

基于线性滑动模型的裂缝性地层声波测井响应数值模拟

欧伟明,王祝文,宁琴琴,徐方慧,于 洋

(吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林长春 130026)

摘要:为了研究水平裂缝对声波波形的影响规律,把裂缝当作线性滑动界面,模拟在含有裂缝的地层中全波列声波测井响应。建立柱坐标系下穿过井孔的水平单条裂缝和多条裂缝计算模型,采用有限差分法模拟声波的传播,记录声波波形。通过分析不同源距、不同宽度裂缝和不同裂缝条数条件下透射波和反射波的波形变化,研究裂缝对纵波、横波和斯通利波波形的影响规律。结果表明:采用线性滑动模型描述的裂缝对纵波的影响很小,只有靠近裂缝的透射纵波幅度会发生改变;裂缝不仅引起横波很强的衰减和反射,而且使横波的相位发生了改变;接收器距离裂缝越远,横波的衰减越大;当裂缝延伸距离很短时,透射横波的幅度和相位随着裂缝延伸距离的改变会发生变化;裂缝也会引起斯通利波的衰减和反射,透射斯通利波对线性滑动裂缝的宽度变化不敏感,而对裂缝条数变化敏感。

关键词:线性滑动模型; 声波测井; 有限差分; 裂缝

中图分类号:P 631 **文献标志码:** A

引用格式:欧伟明,王祝文,宁琴琴,等. 基于线性滑动模型的裂缝性地层声波测井响应数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(3):56-64.

OU Weiming, WANG Zhuwen, NING Qinqin, et al. Numerical simulation of acoustic logging in fractured formation based on linear-slip model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(3): 56-64.

Numerical simulation of acoustic logging in fractured formation based on linear-slip model

OU Weiming, WANG Zhuwen, NING Qinqin, XU Fanghui, YU Yang

(College of Geoporation Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: To study the effects of horizontal fractures on acoustic logging waveforms, the full-wave acoustic logging responses in fractured formations are simulated based on a linear-slip model. Models of single and multiple fractures passing through bore-hole in a cylindrical coordinate system are computed. A finite-difference time domain method is used to simulate the propagation of acoustic logging waves. The waveform variations of transmitted and reflected waves with respect to source distance, aperture size, extended fracture distance and the number of fractures are analyzed. The effects of fractures described by the linear-slip model on the P-wave, S-wave and Stoneley wave waveforms are studied. The results show that the effects of linear-slip fractures on acoustic logging waveforms are as follows: the effect of fracturing on the P-wave is very small, and only the amplitude of transmitted P-wave near the fracture will change; fractures not only have strong attenuation and reflection effects on the S-waves, but also change the phase of shear waves; the greater the distance from fracture, the greater the attenuation of shear waves; when the extended distance of fracture is very small, the amplitude and phase of transmitted shear wave will depend on the variations in the extended distance; linear-slip fractures also have strong attenuation and reflection effects on the Stoneley waves, however, the transmitted Stoneley waves are not sensitive to the fracture aperture, but to the number of fractures.

Keywords: linear-slip model; acoustic logging; finite-difference; fracture

收稿日期:2018-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41874135)

作者简介:欧伟明(1992-),男,博士研究生,研究方向为测井方法。E-mail:18744015103@163.com。

通信作者:王祝文(1961-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为地球物理测井、核地球物理、测井新方法新技术。E-mail: wangzw@jlu.edu.cn。

一般裂缝性储集层具有相当高的渗透率,裂缝对油气藏的开采非常重要^[1-3]。裂缝的存在会使声波测井的波形发生很大的变化,因此掌握裂缝对井中声波传播的影响规律,将对裂缝的检测和评价起到重要作用。国内外关于裂缝对井中声波传播影响方面已经做了大量的研究,一方面根据实际声波测井和相关物理实验的数据进行分析;另一方面把裂缝当作一个流体薄层,采用有限差分法和有限元方法数值模拟。Morris等^[4]利用声波测井资料中纵、横波幅度检测裂缝的位置。Paillet^[5]根据声波测井资料中斯通利波和横波幅度的变化研究在裂缝附近的声波传播。Zlatev等^[6]采用物理实验模拟全波列声波在含有裂缝的井中传播,研究裂缝宽度和倾角对波形的影响。采用数值模拟的方法能避免人为误差、节约实验成本。魏周拓等^[7]对井旁不同角度和不同位置裂缝的全波列进行了数值模拟。龚丹和章成广^[8]应用三维应力-速度有限差分方法模拟含有倾斜裂缝地层中的井孔声场。Matuszyk等^[9]采用频率域有限元法模拟在裂缝性地层中井中声波的波形。阎守国等^[10]运用变网格有限差分法模拟井中声波在含有倾斜薄裂缝的孔隙地层中的传播。闫怡飞等^[11]采用有限元方法模拟存在井旁裂缝情况下的反射波波形特征。由于裂缝的宽度一般小于1 mm,这些流体薄层模型需要用非常小的网格来描述裂缝宽度,这会增加大量的计算时间。在地震波传播方面,裂缝经常被看作是一个位移不连续的线性滑动界面^[12-13]。在线性滑动模型(LSM)中,假定裂缝可以用一个界面来表示,穿过这个界面,由地震波引起的位移是不连续的,而应力保持连续。位移矢量的跳跃与应力矢量之间的线性关系由断裂柔度张量决定。Coates和Schoenberg^[14]在线性滑动模型基础上引入一种等效介质理论来模拟

与裂缝相交的有限差分网格的性能。Wu等^[15]采用有限差分法模拟一个开放的充满流体裂缝的地震响应,对比了线性滑动模型和流体薄层模型,并发现这两种模型具有很好的一致性,但计算前者所需要的时间非常少。吴国忱和秦海旭^[16]采用线性滑动模型模拟裂缝性介质的响应。目前还没有线性滑动理论在声波测井响应模拟方面的研究。鉴于采用线性滑动模型模拟计算的高效性,笔者基于线性滑动模型,采用有限差分法来模拟不同裂缝宽度和不同裂缝条数情况下的全波列声波测井响应,研究水平的线性滑动裂缝对声波波形的影响规律。

1 线性滑动模型

为了把线性滑动模型的裂缝合并到有限差分网格中,Coates和Schoenberg^[14]提出等效介质理论。该理论中,所有含有裂缝的有限差分网格单元被模拟裂缝的等效各向异性网格代替,如图1所示。等效介质理论被用于计算有裂缝穿过的有限差分网格的弹性参数。等效介质理论计算需要每个差分网格的参数,包括基岩的拉梅常数 λ 和 μ 、裂缝宽度 h 、每个网格包含的裂缝长度 L 以及法向和切向的裂缝柔度 Z_N 和 Z_T 。

胡克定律通过如下公式把应力和应变联系起来:

$$\tau_{ij} = c_{ijkl} e_{kl}. \quad (1)$$

式中, τ_{ij} 为应力; c_{ijkl} 为弹性张量; e_{kl} 为应变。在等效介质理论中,公式(1)中的弹性张量定义为

$$\begin{cases} c_{11} = (\lambda + 2\mu)(1 - \delta_N), \\ c_{33} = (\lambda + 2\mu)(1 - r^2 \delta_N), \\ c_{13} = \lambda(1 - \delta_N), \\ c_{55} = \mu(1 - \delta_T), \\ c_{15} = c_{35} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

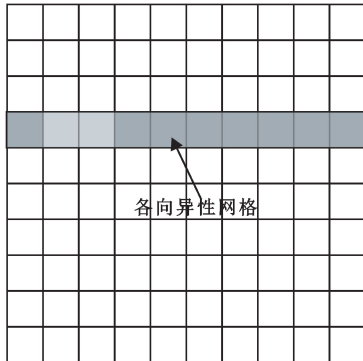
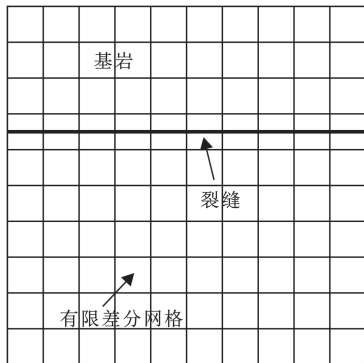


图1 在有限差分模型中代替一条水平裂缝的各向异性的网格

Fig. 1 Anisotropic grids instead of a horizontal fracture in finite-difference model

对于二维模型, $r = \lambda / (\lambda + 2\mu)$, $\delta_N = Z_N (\lambda + 2\mu) / [L + Z_N (\lambda + 2\mu)]$, $\delta_T = Z_T \mu / (L + Z_T \mu)$ 。当 δ_N 和 δ_T 的

值为0时,表示有限差分网格中没有裂缝。对于开口的、充满流体的裂缝, $Z_N = h / K_f$, $Z_T = \infty$ (K_f 为流体

体积模量)。公式(2)描述的等效弹性介质是横向各向同性的。如果裂缝的倾角和网格之间存在角度,需要对方程进行旋转变换,得到每个网格的等效介质参数后,可以采用交错网格有限差分法来模拟各向异性介质。

2 模型和有限差分实现

2.1 计算模型

地层中一些裂缝是单独存在的,影响声波的传

播;还有一些多条裂缝相距较近,它们组成裂缝带,共同作用于声波的传播。本文中要模拟的模型包括单条裂缝模型和多裂缝模型。如图2所示,夹在两个相同的弹性地层中的水平裂缝穿过充满流体的井孔,裂缝的宽度为 h ,裂缝带的宽度为 H ,井孔半径为 a , $a=10\text{ cm}$ 。声源位于井轴上,裂缝或裂缝带的下表面到声源的距离 $d=2\text{ m}$ 。在裂缝带中,裂缝的间距为 5 cm 。

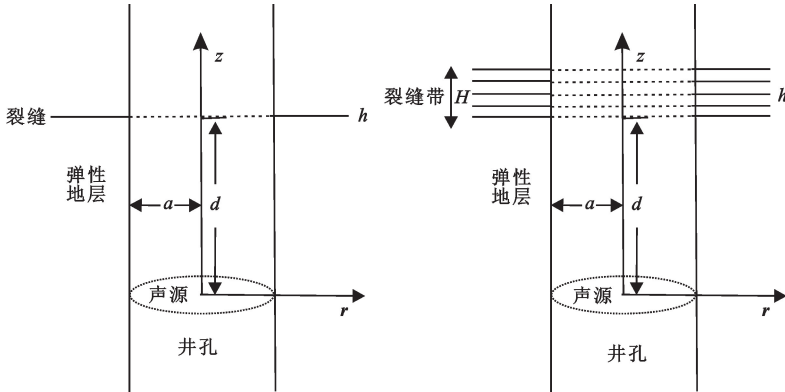


图2 被无限长水平裂缝穿过的井孔模型

Fig. 2 Borehole model inserted by infinite horizontal fractures

2.2 有限差分方法

由于井是圆柱形,使用柱坐标系来描述需要模拟的模型。因为模型具有对称性,可以将模型简化为在 r - z 平面上的二维模型。采用交错网格有限差分法^[17-20]模拟弹性波在本文模型中的传播。介质的物性参数和应力、速度分量在交错网格中的位置,如图3所示。空心圆表示剪切应力,实心圆表示正

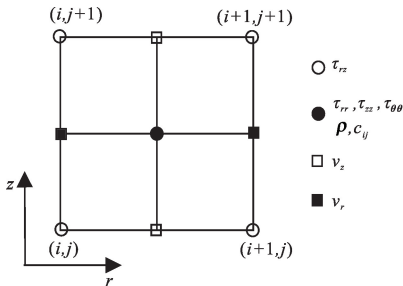


图3 介质参数和应力、速度分量在交错网格中的位置

Fig. 3 Position of medium parameters and stress and velocity components in staggered grids

应力,空心方形表示 z 方向上的速度分量 v_z ,实心方形表示 r 方向上的速度分量 v_r 。括号中的参数 i 和 j 分别表示 r 、 z 方向上的网格点数。在 r 、 z 方向上网格步长分别为 Δr 和 Δz , $\Delta r=\Delta z$ 。二维柱坐标系下,时间上二阶、空间上二阶、声波在模型中传播的速度-应力方程为

$$\left\{ \begin{aligned} & \rho \left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) \left(v_r^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) - v_r^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) \right) / \Delta t = L_r \tau_{rz}^n \left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) + \\ & L_z \tau_{rz}^n (i, j) + \sigma_i \left(\tau_{rr}^n \left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - \tau_{\theta\theta}^n \left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) \right) / r_i, \\ & \rho \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2} \right) \left(v_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) - v_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \right) / \Delta t = \\ & L_z \tau_{zz}^n \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2} \right) + L_r \tau_{rz}^n (i, j) + \sigma_i \tau_{rz}^n (i, j) / r_i, \\ & \frac{\tau_{rr}^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - \tau_{rr}^n \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right)}{\Delta t} = c_{11} L_r v_r^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) + \\ & c_{13} \left(L_z v_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) + \sigma_i v_r^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) / r_{i+\frac{1}{2}} \right), \\ & \frac{\tau_{zz}^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - \tau_{zz}^n \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right)}{\Delta t} = c_{33} L_z v_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) + \\ & c_{13} \left(L_r v_r^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) + \sigma_i v_r^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) / r_{i+\frac{1}{2}} \right), \\ & \frac{\tau_{\theta\theta}^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - \tau_{\theta\theta}^n \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right)}{\Delta t} = c_{11} \sigma_i v_r^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) / r_{i+\frac{1}{2}} + \\ & c_{13} \left(L_r v_r^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) + L_z v_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \right), \\ & \frac{\tau_{rz}^{n+1} (i, j) - \tau_{rz}^n (i, j)}{\Delta t} = \mu \left(L_r v_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i - \frac{1}{2}, j \right) + L_z v_r^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j - \frac{1}{2} \right) \right). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中, τ_{rr} 、 $\tau_{\theta\theta}$ 和 τ_{zz} 分别为 r 、 θ 和 z 方向上的正应力; τ_{rz} 为剪切应力;上标 n 为时间层数; Δt 为时间步长; L_r 和 L_z 分别为 r 、 z 方向上的有限差分算子; σ_i 为正

向的算术平均算子,定义为 $\sigma f_i = (f_i + f_{i-1})/2$; 参数 ρ 和 μ 分别为介质的密度和剪切模量。在介质的分界面上,分别对 ρ 和 μ 取算术平均值和调和平均值; 在固-液分界面上, μ 的值为 0。

为了减小在计算期间的数值频散,空间网格的步长需要满足不等式:

$$\Delta r \leq v_{\min}/10f_{\max}.$$

式中, $v_{\min}$ 为模型中最小的纵波速度; $f_{\max}$ 为声源的最高频率。对于二维的二阶交错网格有限差分法需要满足如下稳定性条件:

$$v_{\max} \Delta t \left[\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right]^{\frac{1}{2}} < 1. \quad (4)$$

式中, $v_{\max}$ 为模型中最大的纵波速度。本文中选取中心频率为 10 kHz 的声源,声源函数 $s(t)$ 的表达式为

$$s(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 + \cos \frac{2\pi}{T_c} \left(t - \frac{T_c}{2} \right) \right] \cos 2\pi f_0 \left(t - \frac{T_c}{2} \right), & 0 \leq t \leq T_c; \\ 0, & t > T_c. \end{cases} \quad (5)$$

式中, f_0 为声源的中心频率; T_c 为声源脉冲宽度,本文中 $T_c = 2/f_0$ 。

3 数值模拟结果

3.1 单条无限长裂缝

根据公式的有限差分方程编写程序,模拟声波在被单条水平裂缝穿过的井中传播。模型的尺寸为 6.4 m×2.56 m; 根据有限差分的稳定性条件,选取

差分网格的步长 Δr 为 1 cm,时间步长 Δt 为 1 μ m。弹性地层的纵波速度和横波速度分别为 3 570 m/s 和 2 170 m/s,地层密度 ρ 为 2 350 kg/m³。井中流体的密度和纵波速度分别为 1 000 kg/m³ 和 1 500 m/s。在模型中加入非分裂完全匹配层吸收边界^[21],消除模型边界产生的虚假反射波。

图 4 展示了在不同时刻 t 井中声波在含有水平裂缝的地层中传播的波场快照。虚线代表着井壁,声源位于 $z=500$ cm 和 $r=0$ cm 处,宽度为 2 mm 的水平裂缝位于 $z=300$ cm 处。声波沿着地层传播到模型边界后,声波被充分吸收了,地层中没有产生反射波,说明程序中加入的吸收边界是有效的。在 1 ms 时刻,井中纵波传播的距离最远,但它的能量非常小;之后是横波首波,它的能量比纵波大一些;传播距离最近的是斯通利波,它的能量最高。在 1.5 ms 时刻,井中横波首波和一部分斯通利波穿过裂缝,波的能量明显减小了很多。在 2 ms 时刻,井中可以看见明显的反射斯通利波和反射横波首波。

图 5 为模拟井中声波在单条水平裂缝模型中传播得到的波形。接收器的最小源距为 1 m,接收器的间隔为 0.2 m,水平裂缝位于源距上方 2 m 处。在裂缝上方的接收器记录的波列中,横波和斯通利波的幅度明显减小了。穿过裂缝后,横波幅度的骤降,说明了线性滑动裂缝对横波具有很强的衰减作用。由于裂缝引起波的强反射,在裂缝下面的波列中出现了反射横波首波和反射斯通利波。

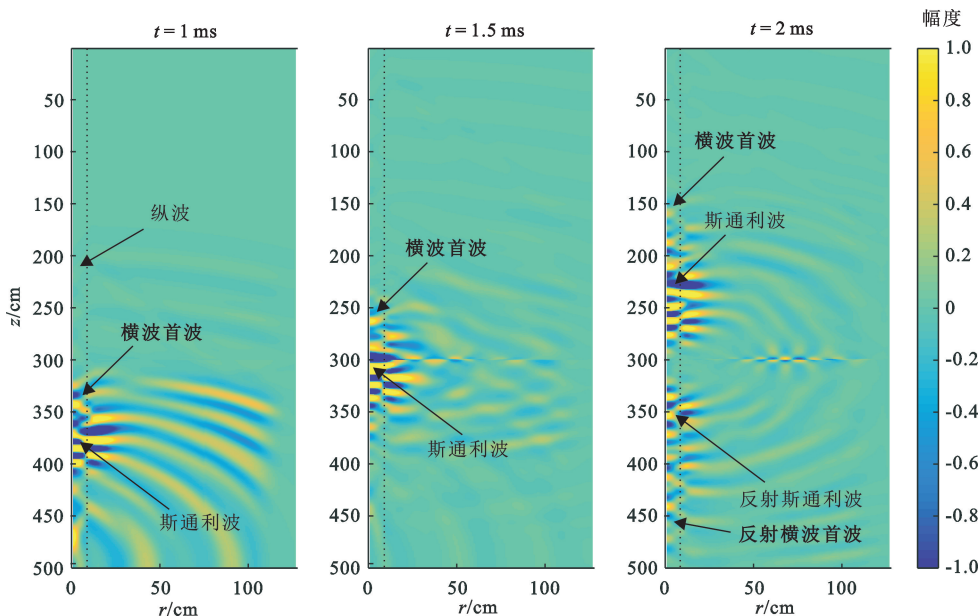


图 4 在 1、1.5 和 2 ms 时刻的波场快照

Fig. 4 Acoustic wave field snapshots at 1, 1.5 and 2 ms respectively

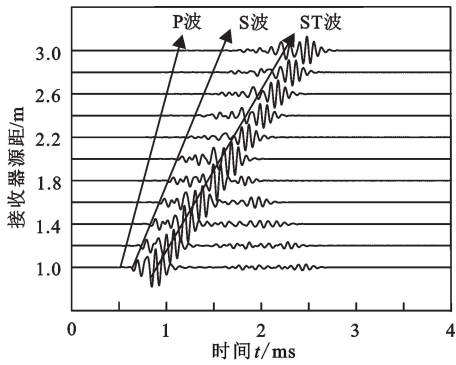


图5 井中声波在单条水平裂缝模型中传播的波形

Fig.5 Waveforms of borehole acoustic waves propagating in a single horizontal fracture model

图6展示了在裂缝上面不同源距的接收器所记录的透射波波形。在有裂缝和无裂缝情况下,纵波的波形几乎没有发生变化,可见裂缝对纵波的影响

很小。即使宽度很小的裂缝,也使横波的幅度衰减了很多,这说明裂缝对横波的衰减作用很强。对于流体薄层模型,物理实验和基于有限元法的数值模拟也展现了裂缝会明显降低横波的幅度^[6,9]。裂缝的存在使斯通利波的幅度也发生了明显的衰减,随着裂缝宽度的增加在同一源距斯通利波幅度的衰减程度增大。不同宽度裂缝对应的透射斯通利波的幅度非常接近,该现象说明在线性滑动模型中斯通利波幅度对裂缝宽度的变化不是很敏感。基于流体薄层模型的数值模拟表明随着裂缝宽度的改变,透射斯通利波的幅度发生了明显变化^[8-9]。对于流体薄层模型,因为井中流体流入裂缝和裂缝散射,斯通利波发生衰减^[22]。线性滑动模型忽略了流体流入裂缝的影响,因此它不能反映裂缝宽度与斯通利波衰减之间的关系。

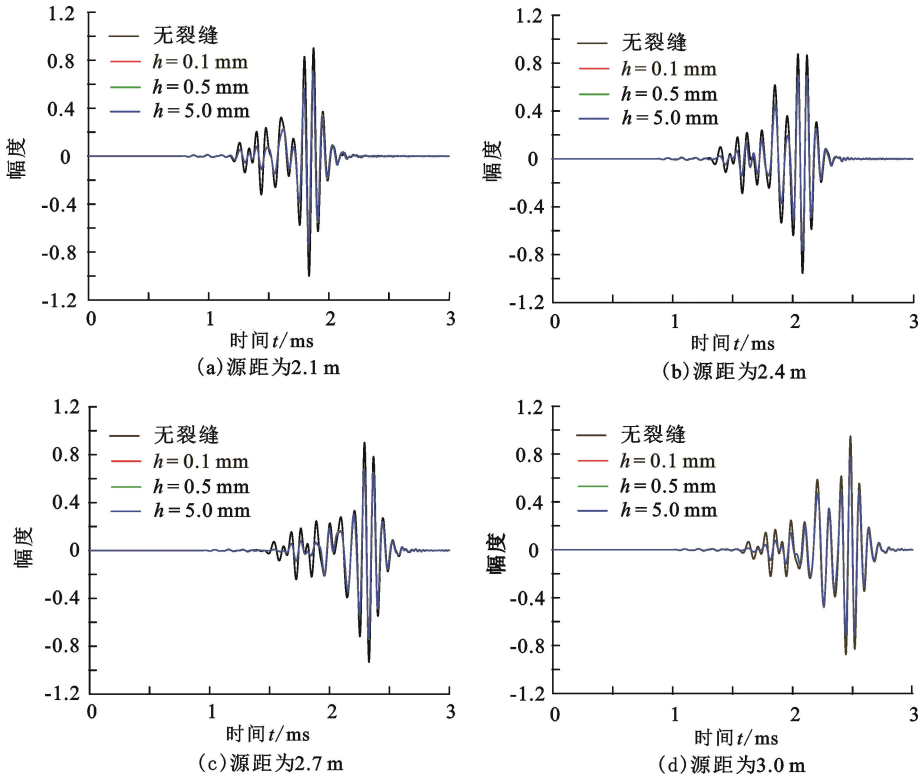


图6 不同源距的透射波波形

Fig.6 Transmitted waveforms with different source distances

为了更清晰展示在不同宽度裂缝情况下,透射纵波和透射横波幅度的变化,用时间窗截取图6中的纵波首波和横波首波。图7和图8分别为不同源距的透射纵波和透射横波首波波形。在同一接收器下,将有裂缝与没有裂缝情况下纵波首波幅度作对比:图7(a)中前者稍微小一些;图7(b)中前者稍微大一些;而图7(c)和(d)中两者几乎一致。从这些现象可以看出:当接收器距离裂缝很近时,接收器记录的波列

除了滑行波以外,还有由狭窄的裂缝口引起的散射波;由于这两种波重叠在一起,并且由于不同源距它们相位的差异不同,记录到纵波首波的幅度可能会增加也可能会减小。图7(a)中随着增加模型的裂缝宽度,纵波首波的幅度衰减程度增加,说明了宽度较大的裂缝产生的散射波对透射纵波幅度的影响也更大。由图8可以看出:随着源距的增加,即随着接收器到裂缝的距离增加,横波首波幅度的衰减程度增大;同

—源距不同宽度裂缝对应的横波幅度变化很小;裂缝的存在使横波的相位发生了变化。

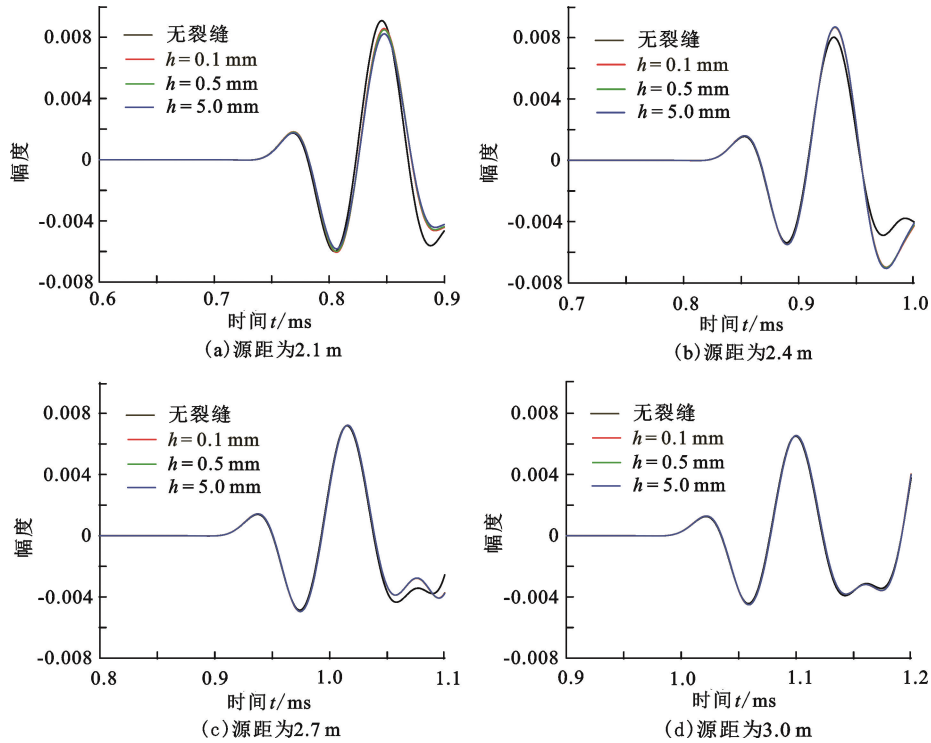


图 7 不同源距的透射纵波首波波形

Fig. 7 Waveforms of transmitted compressional head wave with different source distances

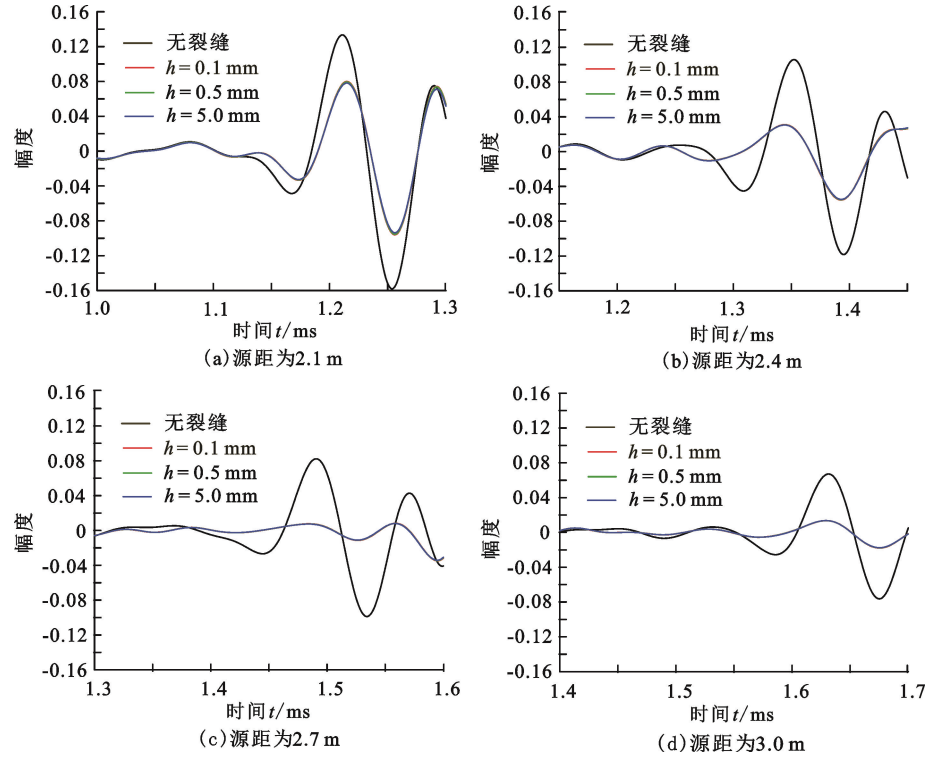


图 8 不同源距的透射横波首波波形

Fig. 8 Waveforms of transmitted shear head waves with different source distances

图 9 为源距为 1 m 的接收器记录的不同宽度裂缝情况下的反射波形。裂缝的宽度分别为 0.1、0.5 和 5 mm。如图 9 所示,这 3 种不同宽度的裂

缝对应的反射波曲线几乎重叠在一起,可见反射波的幅度对线性滑动模型的裂缝宽度的变化不敏感。

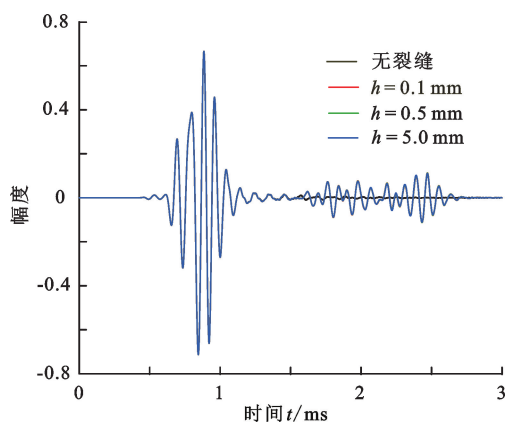


图9 不同宽度裂缝的反射波形

Fig.9 Reflected waveforms of fractures with different widths

3.2 有限延伸距离的裂缝

地层中的自然裂缝从井眼轴向径向延伸了有限距离,一些水力裂缝的延伸距离很短^[23]。假设水平裂缝从井轴向径向方向延伸有限的距离 l ,模拟井中声波在有限长裂缝模型中传播,研究裂缝长度对声波波形的影响。图10和图11分别展示了不同裂缝延伸距离情况下的透射全波、透射横波首波波形,接收器的源距为3 m。模型中裂缝的宽度均为1 mm,

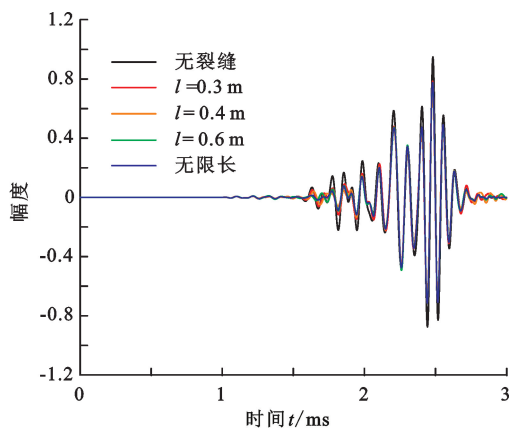


图10 不同裂缝延伸距离情况下的透射波波形

Fig.10 Waveforms of transmitted waves with different extended distances of fractures

弹性地层的参数和图6中的相同。在图10中裂缝的延伸距离分别为0.3、0.4、0.6 m和无限长,在图11中裂缝的延伸距离分别为0.3、0.4、0.5、0.6 m和无限长。发现透射纵波和透射斯通利波的波形受裂缝的延伸距离影响不明显,而透射横波的幅度和相位随着裂缝延伸距离的改变而发生了明显变化。当裂缝的延伸距离为0.3 m时,横波的衰减也很小,透射横波的幅度较大。随着裂缝延伸距离增加,透射横波首波的幅度减小、波峰右移。当裂缝的延伸

距离为0.6 m时,透射横波首波的波峰突然左移到无限长裂缝情况下的波峰附近,并且透射横波首波的幅度也与无限长裂缝情况下的幅度相近。

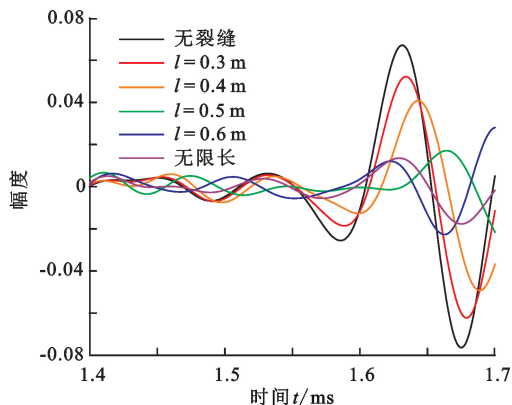


图11 不同裂缝延伸距离情况下透射横波首波的波形

Fig.11 Waveforms of transmitted shear head waves with different extended distances of fractures

3.3 多条裂缝模型

模拟井中声波在多条裂缝模型中传播,研究不同裂缝条数对声波波形的影响。图12为不同裂缝条数情况下的透射声波波形,接收器的源距为3 m。模型中裂缝的条数分别为2、4和6,每条裂缝的宽度为1 mm。如图12所示,随着裂缝条数的增加,透射纵波的波形变化不大,透射横波和透射斯通利波的幅度减小,其中斯通利波幅度的衰减非常明显。观察横波首波可以发现,由于裂缝带的宽度随着裂缝条数的增加而增加,多条裂缝模型使透射横波的相位发生了很大变化;不同裂缝条数对应的相位不同。

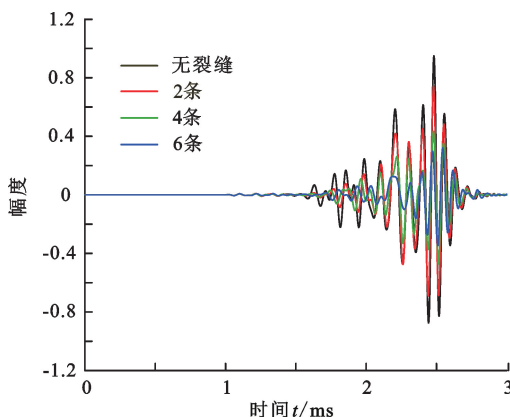


图12 不同裂缝条数情况下的透射声波波形

Fig.12 Waveforms of transmitted acoustic wave with different fracture numbers

4 结论

(1) 裂缝对纵波的影响很小,距离裂缝较远的

纵波波形几乎没有改变;由于狭窄的裂缝对声波的散射作用,靠近裂缝的透射纵波受到散射波的干扰,波的幅度发生了改变;裂缝的宽度越大,散射波对透射纵波幅度影响越大。

(2)横波对裂缝非常敏感,裂缝不仅对横波有很强的衰减和反射作用,而且使横波的相位发生了改变;距离裂缝越远,横波的衰减程度越高;不同宽度裂缝对应的横波幅度变化很小;当裂缝的延伸距离很短时,随着裂缝延伸距离增加,透射横波首波的幅度减小,波峰右移;对于多条裂缝,随着裂缝条数的增加,透射横波的幅度减小,横波的相位也发生了很大变化。

(3)裂缝也会引起斯通利波很强的衰减和反射;斯通利波对线性滑动理论所描述的裂缝宽度的变化不是很敏感,随着裂缝宽度的增加,斯通利波幅度的衰减增加不明显,因此在线性滑动模型中,不适合用斯通利波定量评价裂缝宽度;对于多条裂缝,随着裂缝条数的增加,透射斯通利波的幅度明显减小。

参考文献:

- [1] 冯陈东,戴俊生,王霞田,等.不同坐标系中裂缝渗透率的定量计算[J].石油学报,2011,32(1):135-139.
FENG Zhendong, DAI Junsheng, WANG Xiatian, et al. Quantitative calculation of the tectonic fracture permeability in different coordinate systems[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(1):135-139.
- [2] 金强,程付启,田飞.岩溶型碳酸盐岩储层中缝洞复合体及其油气地质意义[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(3):49-55.
JIN Qiang, CHENG Fuqi, TIAN Fei. Identification of fracture-vug complex from karsted carbonates and its significance in petroleum geology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(3):49-55.
- [3] 赵建林,姚军,张磊,等.微裂缝对致密多孔介质中气体渗流的影响机制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(1):90-98.
ZHAO Jianlin, YAO Jun, ZHANG Lei, et al. Effects of micro-fractures on gas flow in tight porous media [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(1):90-98.
- [4] MORRIS R L, GRINE D R, ARKFELD T E. Using compressional and shear acoustic amplitudes for the location of fractures[J]. Journal of Petroleum Technology, 1964, 16(6):623-632.
- [5] PAILLET F L. Acoustic propagation in the vicinity of fractures which intersect a fluid-filled borehole [C]//SPWLA 21st Annual Logging Symposium, Lafayette, Louisiana, July 8-11, 1980: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts [2018-10-04]. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-1980-R>.
- [6] ZLATEV P, POETER E, HIGGINS J. Physical modeling of the full acoustic waveform in a fractured, fluid-filled borehole[J]. Geophysics, 1988, 53(9):1219-1224.
- [7] 魏周拓,陈雪莲,范宜仁,等.井旁裂缝的声场模拟及反射波提取方法[J].石油地球物理勘探,2010,45(5):748-756.
WEI Zhoutuo, CHEN Xuelian, FAN Yiren, et al. Sonic field simulation for borehole-side fracture and reflection wave extraction method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010,45(5):748-756.
- [8] 龚丹,章成广.裂缝性致密砂岩储层声波测井数值模拟响应特性研究[J].石油天然气学报,2013,35(7):82-86.
GONG Dan, ZHANG Chengguang. Research on numerical simulation response characteristics of acoustic logging for fractured tight sandstone reservoirs[J]. Journal of Oil & Gas Technology, 2013, 35(7):82-86.
- [9] MATUSZYK P J, TORRES-VERDÍN C, PARDO D. Frequency-domain finite-element simulations of 2D sonic wireline borehole measurements acquired in fractured and thinly bedded formations[J]. Geophysics, 2013,78(4):D193-D207.
- [10] 阎守国,谢馥励,龚丹,等.含有倾斜薄裂缝孔隙地层中的井孔声场[J].地球物理学报,2015,58(1):307-317.
YAN Shouguo, XIE Fuli, GONG Dan, et al. Borehole acoustic fields in porous formation with tilted thin fracture[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015,58(1):307-317.
- [11] 闫怡飞,赵云,宋胜利,等.基于反射声波测井有限元方法的井旁裂缝分布特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(3):57-63.
YAN Yifei, ZHAO Yun, SONG Shengli, et al. Near wellbore fracture distribution characteristics based on acoustic reflection logging finite element method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(3):57-63.
- [12] SCHOENBERG M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980,68(5):1516-1521.
- [13] PYRAK-NOLTE L J, COOK N G W. Elastic interface waves along a fracture[J]. Geophysical Research Letters, 1987,14(11):1107-1110.

- [14] COATES R T, SCHOENBERG M. Finite-difference modeling of faults and fractures[J]. *Geophysics*, 1995, 60(5): 1514-1526.
- [15] WU C, HARRIS J M, NIHEI K T, et al. Two-dimensional finite-difference seismic modeling of an open fluid-filled fracture: comparison of thin-layer and linear-slip models[J]. *Geophysics*, 2005, 70(4): T57-T62.
- [16] 吴国忱, 秦海旭. 裂缝介质旋转交错网格正演模拟[J]. *地震学报*, 2014, 36(6): 1075-1088.
WU Guochen, QIN Haixu. Rotated staggering grid forward modeling in fractured medium[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2014, 36(6): 1075-1088.
- [17] VIRIEUX J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method[J]. *Geophysics*, 1986, 51(4): 889-901.
- [18] 董良国, 马在田, 曹景忠. 一阶弹性波方程交错网格高阶差分分解法稳定性研究[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(6): 856-864.
DONG Lianguo, MA Zaitian, CAO Jingzhong. Stability of the staggered-grid high-order difference method for first-order elastic wave equation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(6): 856-864.
- [19] 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 Xiuming, ZHANG Hailan, WANG Dong. Modelling seismic wave propagation in heterogeneous poro-elastic media using a high-order staggered finite-difference method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(6): 842-849.
- [20] 雍鹏, 黄建平, 李振春, 等. 优化的时空域等效交错网格有限差分正演模拟[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(6): 71-79.
YONG Peng, HUANG Jianping, LI Zhenchun, et al. Forward modeling by optimized equivalent staggered-grid finite-difference method for time-space domain[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(6): 71-79.
- [21] WANG T, TANG X. Finite-difference modeling of elastic wave propagation: a nonsplitting perfectly matched layer approach[J]. *Geophysics*, 2003, 68(5): 1749-1755.
- [22] TANG X M, CHENG C H. A dynamic model for fluid flow in open borehole fractures[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B6): 7567-7576.
- [23] 曲占庆, 李小龙, 李建雄, 等. 基于扩展有限元法的多径向井压裂裂缝形态[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(1): 73-81.
QU Zhanqing, LI Xiaolong, LI Jianxiong, et al. Crack morphology of multiple radial well fracturing based on extended finite element method[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(1): 73-81.

(编辑 修荣荣)