

# 基于反射声波测井有限元方法的井旁裂缝分布特征

闫怡飞<sup>1,2</sup>, 赵 云<sup>2,3</sup>, 宋胜利<sup>4</sup>, 暴喜涛<sup>2</sup>, 周晓奇<sup>4</sup>, 赵 奎<sup>1,2</sup>, 闫相祯<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)油气 CAE 技术研究中心, 山东青岛 266580; 3. 合肥京东方显示技术有限公司, 安徽合肥 230012; 4. 中国石油化工集团公司中原油田分公司, 河南濮阳 457001)

**摘要:**基于声波传播理论,利用声波有限元方法研究存在井旁裂缝情况下的反射波波波形特征。以井眼为对称轴,对有声阻抗不连续界面的一侧进行二维轴对称有限元建模,分别建立井旁存在交叉裂缝和弧状裂缝的交叉裂缝反射界面计算模型和弧状裂缝反射界面有限元计算模型。通过对相同源距条件下不同接收点接收的波形数据进行处理,得到反射波波至时间等参数,进而判断出页岩储层井旁裂缝的分布规律。结果表明:反射波的波至时间随声源纵坐标变化而呈现的规律与井旁裂缝的形态表现出了很好的一致性,井旁存在交叉裂缝时,根据波至时间计算得到井旁裂缝倾角为 10.13°和 20.19°,与解析模型对比的误差率分别为 1.31%和 0.95%。井旁存在弧状裂缝时,由反射波波至时间得出反射界面的坐标,并与计算模型结果进行对比,得到裂缝中心位置与反射点坐标相对误差为 1.70%。声波有限元方法可以有效地反演出井旁裂缝的位置和形态特征。

**关键词:**页岩储层; 声波测井; 声波有限元; 裂缝分布; 裂缝反射界面

**中图分类号:**TE 151 **文献标志码:**A

**引用格式:**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.

## Near wellbore fracture distribution characteristics based on acoustic reflection logging finite element method

YAN Yifei<sup>1,2</sup>, ZHAO Yun<sup>2,3</sup>, SONG Shengli<sup>4</sup>, BAO Xitao<sup>2</sup>,  
ZHOU Xiaochi<sup>4</sup>, ZHAO Lei<sup>1,2</sup>, YAN Xiangzhen<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;  
2. Oil and Gas CAE Technology Research Center in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;  
3. Hefei Oriental Display Technology Company Limited, Hefei 230012, China;  
4. Petroleum Engineering Technology Research Institute of Zhongyuan Oilfield, SINOPEC, Puyang 457001, China)

**Abstract:** Based on the theory of acoustic wave propagation, reflected wave characteristics are studied by the finite element method in the presence of well fracture. 2D axial symmetry finite element modeling is applied on one side of discontinuous acoustic impedance. The models to computing cross fracture reflection interface and arc fracture reflection interface are established for the cases where cross fracture and arc fracture exist on the side of well. Waveform data from the same source received by the different receivers are processed and the parameters (e. g., reflection phase arrival time) are obtained. The distribution character of wellbore fracture in shale reservoir is obtained accordingly. The results show that the variations in the arrival time of the reflected wave owing to the changes in the vertical coordinates of sound source is consistent with the shape

收稿日期:2017-12-12

**基金项目:**中国博士后科学基金项目(2017M612375);中央高校基本科研业务费专项(18CX02154A);国家自然科学基金项目(51374228);  
国家科技重大专项(2016ZX05017-003)

**作者简介:**闫怡飞(1984-),男,博士,师资博士后,研究方向为油气安全工程。E-mail:yanyf163@163.com。

of the wellbore fracture. In the presence of a cross shaped fracture near the wellbore, inclination angles of the side fracture obtained using the arrival time of reflected wave are 10.13 degrees and 20.19 degrees, respectively, which are within 1.31% and 0.95% of the analytical model. In the case of an arc shaped fracture near the wellbore, the location and shape feature of the wellbore fracture can be effectively derived by the coordinates of the reflecting interface. The relative error between the central position of fracture and the coordinate of reference point is within 1.70%. It is concluded that the acoustic finite element method can effectively infer the position and morphology of fracture near the wellbore.

**Keywords:** shale reservoir; acoustic logging; acoustic finite element; fracture distribution; fracture reflection interface

伴随着常规能源诸如煤、石油等资源的大量消耗,以页岩气藏为代表的非常规油气藏在世界范围内引起了很高的重视,而页岩储层裂缝是直接提供页岩气资源的流动通道,不管是依靠水力压裂的诱导裂缝,或者是天然存在的裂缝,这些裂缝都会很大程度上提高页岩储层的油气产量,对储层裂缝形态位置的研究对于提高页岩气产量有着十分重要的意义<sup>[1-6]</sup>。国内外对声波测井已经进行大量的研究,一方面是针对声波在介质中的传播特性研究,研究方法包括了有限元法、有限差分法以及相关物理模拟,另一方面是针对测井资料的处理上。乔文孝等<sup>[7]</sup>利用物理模拟的方式制作了铝制和混凝土模型井,可以观察出模型井井壁和井旁裂缝传至的折射波和反射波。车小花等<sup>[8,9]</sup>分别用实验和数值模拟的方式进行井旁裂缝几何特征的评价,根据信号处理结果有效地判断裂缝的倾角与位置。魏周拓等<sup>[10]</sup>一方面对井旁不同位置及角度的裂缝进行了数值模拟,另一方面重点提出了一种反射波的提取方法,更加有效地增强了反射波的信号强度。笔者基于声波传播理论,利用有限元方法研究井旁存在不同形态位置裂缝情况下的反射波接收波形特征,并对接接收的反射波信号进行数据提取,进而判断出页岩储层井旁裂缝的分布规律。

## 1 反射声波测井有限元模拟

### 1.1 反射声波传播路径计算

存在井内介质时,反射声波测井的反射波传播路径如图1所示<sup>[11]</sup>,井内和地层介质的声波传播速度分别为  $v_1$  和  $v_p$ , 声波发射器与声波接收器之间的距离为  $L$ , 根据声波传播定律:

$$\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_p}{\sin \theta_2}, \quad (1)$$

$$\frac{v_1}{\sin \theta_5} = \frac{v_p}{\sin \theta_4}. \quad (2)$$

当井旁裂缝形态与井眼相平行时,井眼半径为  $a$ , 设井眼中心线与裂缝距离为  $X$ , 由几何关系得反射波旅行时间  $t_{pp}$  为

$$t_{pp} = \frac{a}{v_1 \cos \theta_5} + \frac{a}{v_1 \cos \theta_1} + \frac{\sqrt{L'^2 + 4(X-a)^2}}{v_p}, \quad (3)$$

$$L' = L - a \tan \theta_1 - a \tan \theta_5. \quad (4)$$

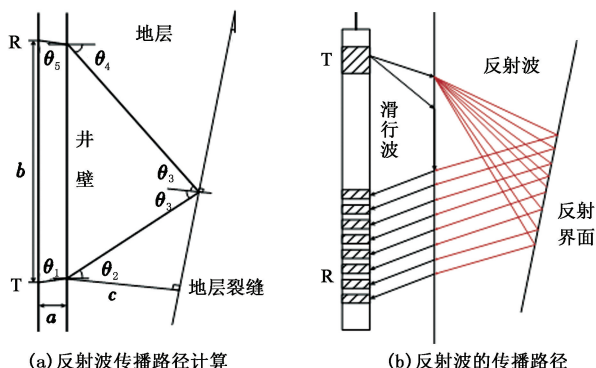
当反射界面不与井眼方向平行时,设其倾角为  $\theta$ , 反射界面延长线与井眼中心线交点与声波信号发射器的距离为  $b$ , 根据模型可得:  $\theta_2 = \theta_3 - \theta$ ,  $\theta_4 = \theta_3 + \theta$ ,  $\cot \theta_3 = \frac{L' + 2b'}{L} \tan \theta$ 。根据三角形的边角关系推得考虑井内介质时反射波的波至时间为

$$t_{pp} = \frac{a}{v_1 \cos \theta_5} + \frac{a}{v_1 \cos \theta_1} + \frac{\sqrt{(L' + b')^2 + b'^2 - 2b'(b' + L') \cos 2\theta}}{v_p}. \quad (5)$$

$$b' = b - a \cot \theta + a \tan \theta_1. \quad (6)$$

整理得

$$t_{pp} = \frac{a}{v_1} \left[ \frac{1}{\cos \theta_5} + \frac{1}{\cos \theta_1} \right] + \frac{\sqrt{L'^2 + 4b'(L' + b') \sin^2 \theta}}{v_p}. \quad (7)$$



(a) 反射波传播路径计算 (b) 反射波的传播路径

图1 反射波传播路径计算和传播路径示意图

Fig. 1 Calculation of reflected wave propagation path and propagation path of reflected wave

当反射倾角  $\theta$  方向相反时,此时反射界面延长线与井轴的交点在声源的上方,此时反射纵波旅行时间为

$$b' = b - a \cot \theta - a \tan \theta_1, \quad (8)$$

$$t_{pp} = \frac{a}{v_1} \left[ \frac{1}{\cos \theta_5} + \frac{1}{\cos \theta_1} \right] + \frac{\sqrt{L'^2 + 4b'(b' - L') \sin^2 \theta}}{v_p}. \quad (9)$$

1.2 声波有限元模型的建立

在声波测井实际工程应用中,井内是钻井液和测井仪器,相控阵声源发射声波信号,经过井内和地层的反射折射之后,再由井眼内的接收阵列接收。在反射声波测井过程中,可以通过接收器接收到包括井内传达的直达波和反射波、井壁传达的滑行波、声阻抗界面返回的反射波在内的各种直达波及模式转换波<sup>[12-13]</sup>。

本文中主要是利用有限元软件进行反射声波测井的模拟计算,以井眼为界,对有声阻抗不连续界面的一侧进行二维轴对称有限元模拟,分别建立井旁存在交叉裂缝和弧状裂缝的有限元模型如图 2、3 所示,各个坐标点的具体位置如表 1 所示,其中  $\theta_1$  与  $\theta_2$  分别为  $10^\circ$  和  $20^\circ$ ,沿井眼中心设置了数个声波换能器发射器和接收器,右侧的自由边界用来模拟反射界面,图中  $y$  方向虚线代表井眼中心线,设置井深为 20 m,井眼中心线与井壁的距离为 0.1 m,沿井壁两侧分别是模拟井内钻井液和页岩地层的平面单元,地层和井眼内的密度分别为 2 500 和 2 000 kg/m<sup>3</sup>。声波在地层和井眼内的传播速度分别为 3 700 和 2 900 m/s。

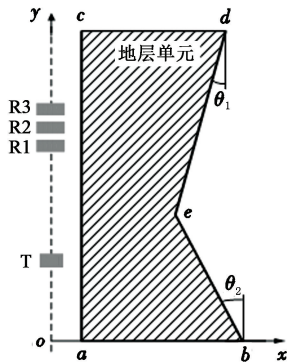


图 2 交叉裂缝反射界面计算模型

Fig. 2 Finite element model of cross shaped crack

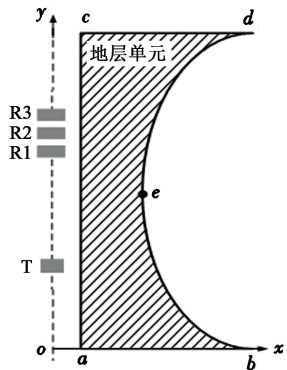


图 3 弧状裂缝反射界面计算模型

Fig. 3 Finite element model of arc shaped crack

表 1 交叉裂缝模型和弧状裂缝模型各关键点坐标  
Table 1 Key points coordinates of cross shaped crack and arc shaped crack

| 模型     | 坐标       | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 交叉裂缝模型 | <i>x</i> | 0.1      | 6.38     | 0.1      | 5.04     | 3.1      |
|        | <i>y</i> | 0        | 0        | 20       | 20       | 9        |
| 弧状裂缝模型 | <i>x</i> | 0.1      | 8        | 0.1      | 8        | 4        |
|        | <i>y</i> | 0        | 0        | 20       | 20       | 9        |

1.3 声源激励的选择

在激励声源的选择方面,声源信号采用中心频率为 10 kHz 的高斯调制正弦波<sup>[14]</sup>,声源信号的表达式为

$$S(t)=A\exp(-k(t-t_0)^2)\cos(2\pi f_0(t-t_0)), \tag{10}$$

$$k=\frac{5\pi^2b^2f_0^2}{q\ln 10}. \tag{11}$$

式中, $A$  为幅度,取 1; $b$  为归一化带宽,取 0.8; $q$  为衰减,取 6 dB; $f_0$  为声源的中心频率,取 10 kHz; $t_0$  为延迟时间,取 150 μs。声源信号的波形曲线如图 4 所示。

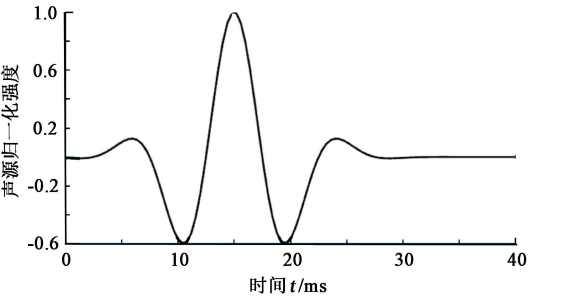


图 4 计算所采用信号源时域波形

Fig. 4 Time domain waveform of signal source

2 交叉裂缝反射界面模拟

井旁存在交叉裂缝时,建立轴对称有限元模型如图 2 所示,以井眼中心线为界,对有声阻抗不连续界面的一侧进行二维有限元模拟<sup>[15-16]</sup>,各个坐标点的具体位置如表 1 所示,其中  $\theta_1$  与  $\theta_2$  分别为  $10^\circ$  和  $20^\circ$ ,沿井眼中心设置了声波换能器发射探头和数个接收器,右侧的边界为自由边界,用来模拟反射界面。图 2 中的  $y$  方向虚线代表井眼中心线,沿井深建模为 20 m,井眼中心线与井壁的距离为 0.1 m,沿井壁两侧分别是模拟井内环空钻井液和页岩地层的平面单元,材料参数设置与上文相同。

设置井液和地层的网格步长不大于 0.05 m,共划分 189 383 个节点,在井体单元纵坐标为 10 m 的位置设置中心频率为 10 kHz 声波激励声源。

当井旁存在交叉裂缝时,为了了解井旁地层中声波信号传播的情况,分别取源激励后的 0.5 ~ 2 ms 时间段内声波传播云图,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,声波信号在井内的振幅要高于地层中的振幅,由于信号波折射反射的衰减影响,使得信号波的最大振幅始终在井内,在 4 个时刻下信号波的最大幅值分别为 0.241、0.173、0.145 和 0.128,振幅变化的整体趋势是随着信号波传播时间

的增加而逐渐减小。传播速度方面,由井内折射至井壁进行传播的滑行波传播速度最快,传播时间越长,滑行波的速度优势体现得更加明显,滑行波的信号强度要明显弱于井内传达的信号波强度。大约在 1 ms 时信号波传至裂缝处,之后反射回地层中。由于交叉裂缝的存在,信号波传至裂缝交叉处会有信号波的进一步扩散,这会导致信号波经由裂缝处反射回接收器的强度减弱,影响对反射信号波的识别<sup>[17]</sup>。

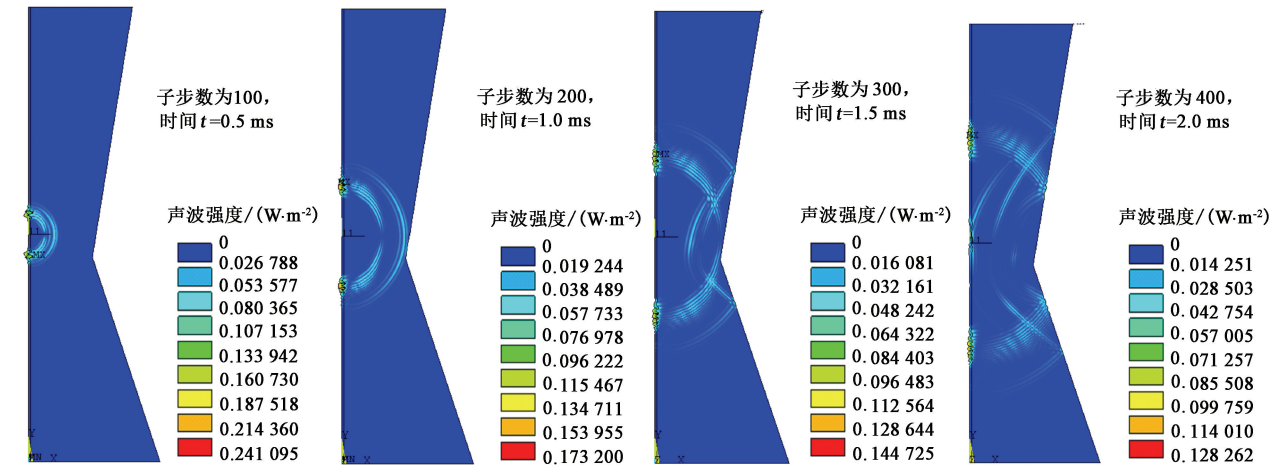


图 5 交叉裂缝声源激励不同时刻声波传播云图

Fig.5 Acoustic propagation at different time

在井深方向上,通过改变声波换能器发射探头和接收探头的位置,在井眼中心线纵坐标 3 ~ 14 m 范围内设立声波换能器发射探头,在深度 6 ~ 17 m 范围设立声波换能器接收探头,每次模拟的源距保持 3 m 不变,记录下接受信号波波形如图 6 所示,对信号波数据进行叠加处理之后的波形如图 7 所示。

1 ~ 1.5 ms 附近微弱的信号波是由于有限元计算中的网格误差导致,不影响对反射波信号的识别。另外,可以看出源距为 3 m 的情况下,声源纵坐标在 7 m 附近时反射信号波的强度较弱,这是由于反射信号传播路径经过井旁裂缝的交叉处,导致了信号波

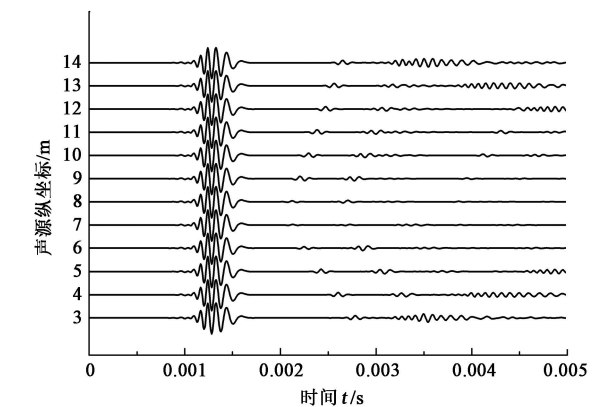


图 6 固定源距条件下接收的波形

Fig.6 Received waveform under the same source distance

由图 6 可以看出,源距固定为 3 m 条件下,声波换能器探头位置的改变,接收器最先接收到的信号波是幅值很小的沿井壁传至的滑行波信号,接着是由井内传至的直达波和全反射波。由图 7 可知,在

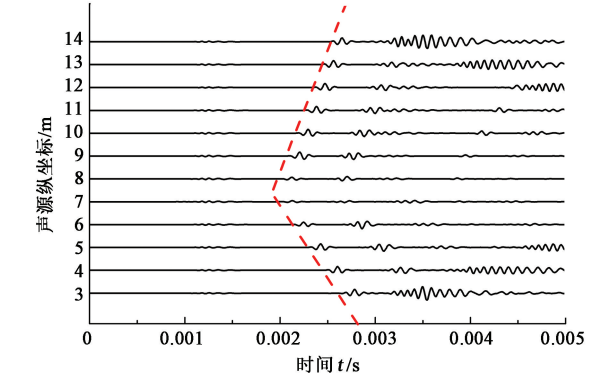


图 7 相同源距条件下处理后的波形

Fig.7 Waveform of the same distance after data processing

的进一步扩散。整体上,图 7 中可明显观察到反射波信号的波至时间,在发射探头位置纵坐标在 7 m 以下时,随着声源纵坐标的增加,反射波信号的波至时间逐渐变小,声源纵坐标在 8 m 以上之后,反射波信号波至时间随着声源纵坐标的增加而变长,如图

7 中虚线所示,反射波波至时间的变化规律与井旁裂缝形态相符,可以有效地得出井旁裂缝形态。不同声源位置下的波至时间如表 2 所示。

表 2 不同声源位置下的波至时间

Table 2 Wave arrival time at different source locations

| 声源纵坐标/m | $t_{pp}/\text{ms}$ |
|---------|--------------------|
| 3       | 2.611              |
| 4       | 2.435              |
| 5       | 2.252              |
| 6       | 2.103              |
| 7       | 1.926              |
| 8       | 1.934              |
| 9       | 2.022              |
| 10      | 2.113              |
| 11      | 2.203              |
| 12      | 2.304              |
| 13      | 2.381              |
| 14      | 2.475              |

为了验证有限元计算结果的可靠性,在本模型中,当  $\theta_2 = 90^\circ$  时,根据声速关系计算得到  $\theta_1 = 55.36^\circ$ ,这个角度即为临界角  $\theta'$ ,这种临界情况下,信号波在井眼内传播的距离最远,当  $\theta_1 > \theta'$  时,信号波将在井眼内进行全反射传播。所以在反射波传播路线中  $0 < \theta_1 < \theta'$ ,  $a$  为井眼半径,反射波在井内所需传播时间满足:

$$\frac{2a}{v_1} < t_0 < \frac{2a}{\cos \theta' v_1} .$$

(12)

模型尺寸以及源距选择的改变,反射波信号的  $\theta_1$  也随之改变,这里取  $\theta_1 = \theta_s = \theta'/2$ ,将得到的反射波波至时间数据分上、下两部分,分别取上半部分 (0,10)、(0,11) 两点计算结果代入公式 (4) ~ (6),取下半部分 (0,4)、(0,5) 两点代入计算公式 (4)、(8)、(9),计算得到井旁裂缝倾角为  $10.13^\circ$  和  $20.19^\circ$ ,  $b$  值分别为 18.34 和 13.46,倾角的相对误差分别为 1.31% 和 0.95%,计算得到  $b$  值相对误差分别为 1.32% 和 0.51%,误差的来源主要来自于反射波波至时间的读取以及井内入射角的近似计算方面。总体上,计算结果较为准确地反映了井旁裂缝形态以及与井眼的距离,有效地证实了模拟结果的可靠性。

3 弧状裂缝反射界面模拟

通过变换声源发射点和接收点纵坐标的位置,使声源纵坐标位置在 3 ~ 14 m 之间变化,信号波接收点在 6 ~ 17 m 变化,保持源距 3 m 不变,对接收到的信号波数据进行叠加处理之后的波形如

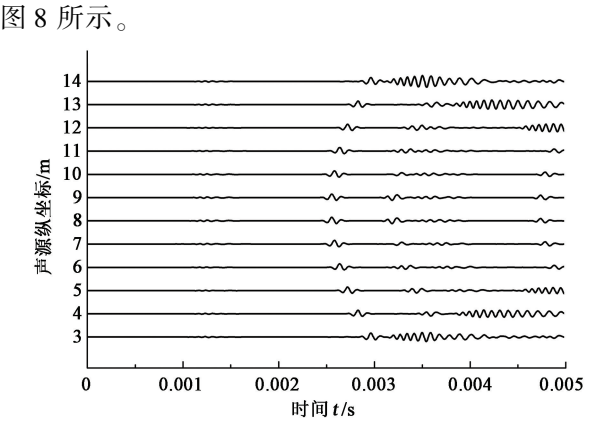


图 8 弧形裂缝相同源距条件下处理后的波形

Fig.8 Waveform of the same source distance after data processing

可以看出,在井旁裂缝呈弧状存在时,随着声源位置的变化,反射波的波至时间变化规律呈现的形态也是呈弧形,另外,声源纵坐标在 8 ~ 9 m 附近时反射信号波接收时间几乎一致,即声源纵坐标在这附近时反射信号波经过裂缝所在位置的切角近似为  $0^\circ$ 。读取反射波的波至时间如表 3 所示,根据反射波波至时间的变化规律基本上可以确定井旁裂缝的形态特征。

当井旁存在弧状裂缝时,分别取源激励后的 1 ~ 2.5 ms 时间段内声波传播云图,如图 9 所示。在 4 个不同时刻下信号波的最大幅值分别为 0.173、0.145、0.128 和 0.113,对比前文井旁存在交叉裂缝时各个时刻模型中的最大幅值,可见相同时刻模型中的最大幅值与井旁存在交叉裂缝时相同,即模型中最大幅值始终在井内,与井旁裂缝形态分布没有关系,信号波的分布大致呈上下对称分布。

表 3 反射波波至时间

Table 3 Arrival time of reflected wave

| 声源纵坐标/m | $t_{pp}/\text{ms}$ |
|---------|--------------------|
| 3       | 2.802              |
| 4       | 2.725              |
| 5       | 2.606              |
| 6       | 2.512              |
| 7       | 2.454              |
| 8       | 2.413              |
| 9       | 2.416              |
| 10      | 2.471              |
| 11      | 2.501              |
| 12      | 2.584              |
| 13      | 2.632              |
| 14      | 2.702              |

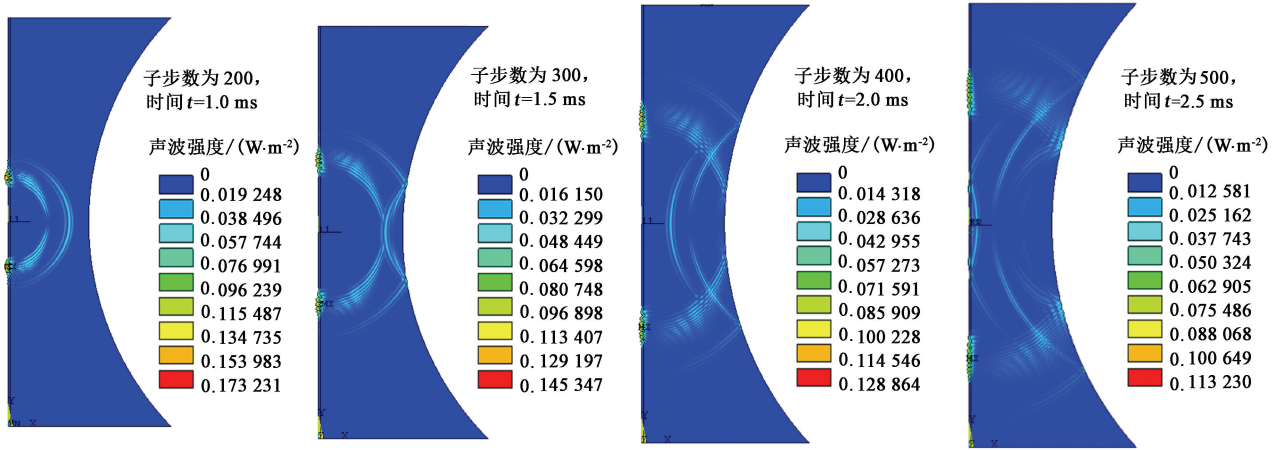


图9 弧形裂缝声源激励不同时刻声波传播云图

Fig.9 Acoustic propagation at different time

结合反射波传播路径分析中的相关几何关系,根据波至时间与模型参数关系,推得波源在 $(x_0, y_0)$ 位置时反射点的位置坐标 $(x_p, y_p)$ 公式为

$$\left( \sqrt{\left( \frac{b't_p v_p}{2b+L'} \right)^2 - b'^2 \sin^2 \theta} + b' \cos \theta \right) \sin \theta + 0.1 = x_p, \quad (13)$$

$$\left( \sqrt{\left( \frac{b't_p v_p}{2b+L'} \right)^2 - b'^2 \sin^2 \theta} \cos \theta - b' + \tan \theta' + y_0 = y_p. \quad (14)$$

当倾角为负时,反射点的位置坐标 $(x_p, y_p)$ 公式为

$$\left( b' \cos \theta - \sqrt{\left( \frac{b't_p v_p}{2b-L'} \right)^2 - b'^2 \sin^2 \theta} \right) \sin \theta + 0.1 = x_p, \quad (15)$$

$$b' - \left( b' \cos \theta - \sqrt{\left( \frac{b't_p v_p}{2b+L'} \right)^2 - b'^2 \sin^2 \theta} \right) \cos \theta + \tan \theta' + y_0 = y_p. \quad (16)$$

根据波源点的不同,将井旁裂缝反射点的坐标分段计算,由反射波波至时间计算反射界面坐标,各个反射点的坐标如下:(4.748, 5.278), (4.525, 6.638), (4.357, 7.324), (4.225, 8.035), (4.127, 8.550), (4.034, 9.983), (4.172, 11.239), (4.183, 11.791), (4.368, 13.045), (4.442, 13.854)。

根据反射波测井的基本原理,将这些坐标与模型中反射界面形态位置特征进行对比,如图10所示。可以看出,由反射波波至时间能够有效地推断出井旁裂缝的位置和形态,有限元计算给出的弧形裂缝中心位置的纵坐标在9.983 m,与实际中心位置的纵坐标(10 m)相对误差为1.70%,图10中给出的其他计算点裂缝形态与反射点坐标数值的相对误差均小于2%。这进一步证实了声波有限元计算

结果的可靠性,并且结果具有很高的计算精度。

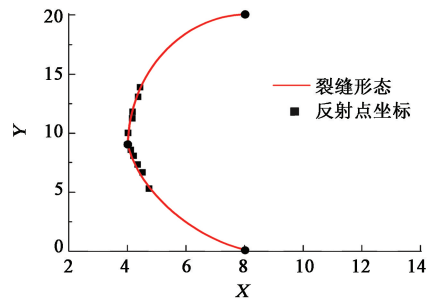


图10 弧形裂缝有限元计算结果与模型结果对比

Fig.10 Comparison between calculation results and model

## 4 结 论

(1) 声波信号在井内的振幅要高于地层中的振幅,振幅随着信号波传播时间的增加而逐渐减小,沿井壁传至接收器的滑行波传播速度最快,滑行波的信号强度要明显弱于井内传达的信号波强度。

(2) 井旁存在交叉裂缝时,通过对相同源距条件下不同接收点接收的波形数据进行处理,成功得到了反射波波至时间,反射波的波至时间随声源纵坐标变化而呈现的规律与井旁裂缝的形态表现出了很好的一致性,根据波至时间计算得到井旁裂缝倾角为 $10.13^\circ$ 和 $20.19^\circ$ ,与模型对比的相对误差分别为1.31%和0.95%,计算结果有效地证实声波有限元数值模拟的可靠性。

(3) 井旁存在弧状裂缝时,根据反射波测井的基本原理,得到井旁裂缝反射点的坐标公式,由反射波波至时间得出反射界面的坐标与模型进行对比,裂缝中心位置的误差为1.70%,其他裂缝形态与反射点坐标数值的相对误差均小于2%。可以看出,这种方法可以有效地反演出井旁裂缝的位置和形态特征。

## 参考文献:

- [1] 董大忠,邹才能,杨桦,等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报,2012,33(增1):107-114.  
DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (sup1):107-114.
- [2] KHOSROLHAVAR R. Shale gas formations and their potential for carbon storage: opportunities and outlook [M]//Mechanisms for CO<sub>2</sub> Sequestration in Geological Formations and Enhanced Gas Recovery. Delft:Springer International Publishing, 2016:595-611.
- [3] IHARA M. Shale gas evolution: a tremendous increase of natural gas reserves and its effects on the LNG market (electric supplier after the Great East Japan Earthquake-natural gas development projects for stable LNG supply) [J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2012,91: 96-103.
- [4] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(6):641-653.
- [5] 张大伟. 加快中国页岩气勘探开发和利用的主要路径[J]. 天然气工业,2011,31(5):1-5.  
ZHANG Dawei. Main solution ways to speed up shale gas exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry,2011, 31(5):1-5.
- [6] 张金川,姜生玲,唐玄,等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业,2009,29(12):109-114.  
ZHANG Jinchuan, JIANG Shengling, TANG Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry,2009,29(12):109-114.
- [7] 乔文孝,陈雪莲,杜光升,等. 相控声波测井的模拟实验研究[J]. 声学学报,2003,28(2):116-122.  
QIAO Wenxiao, CHEN Xuelian, DU Guangsheng, et al. Laboratory simulation on acoustic well-logging with phased array transmitter[J]. Acta Acustica, 2003,28(2):116-122.
- [8] 车小花,乔文孝,闫相祯. 反射声波成像测井的有限元模拟[J]. 应用声学,2004,23(6):1-4.  
CHE Xiaohua, QIAO Wenxiao, YAN Xiangzhen. Numerical simulation of borehole acoustic-reflection imaging using the finite element method[J]. Applied Acoustics, 2004,23(6):1-4.
- [9] 车小花,乔文孝,李刚,等. 井旁裂缝几何特性模拟实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版),2003,27(2):36-40.  
CHE Xiaohua, QIAO Wenxiao, LI Gang, et al. Experiment on geometrical properties of fractures near borehole [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(2):36-40.
- [10] 魏周拓,陈雪莲. 井中偶极声源激励下的反射横波实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(6):1-8.  
WEI Zhoutuo, CHEN Xuelian. Experimental study on shear wave reflection of a borehole dipole source excitation [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013,35(6):1-8.
- [11] 孙锋. 反射声波测井资料处理方法研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2011.  
SUN Feng. Study on processing method of the reflection acoustic logging data[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [12] EISSA E A, KAZI A. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988,25(6):479-482.
- [13] ENDO T, TEZUKA K, FUKUSHIMA T, et al. Fracture evaluation from inversion of stoneley transmission and reflections:proceeding of the 4th Well Logging Symposium of Japan[C]. Tokyo: Society of Professional Well Log Analysts, 1998:389-394.
- [14] 孙志峰,陈洪海,刘西恩. 超声反射成像测井的有限元分析[J]. 应用声学,2013,32(6):495-500.  
SUN Zhifeng, CHEN Honghai, LIU Xien. The finite element analysis of ultrasonic reflection method used in acoustic logging[J]. Applied Acoustics, 2013,32(6):495-500.
- [15] 李增刚,詹福良. Virtual Lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [16] YAMAMOTO H, HALDORSEN J, MIKADA H, et al. Fracture imaging from sonic reflections and mode conversion [C]//Expanded Abstracts of 69th SEG Annual Meeting. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 1999.
- [17] HOMBY B E. Imaging of near-borehole structure using full-waveform sonic data [J]. Geophysics, 1989, 54(6):747-757.

(编辑 修荣荣)