

邸德家, 陶果, 张同义等. 2015. 电缆地层测试评价井旁裂缝的有限元数值模拟方法. 地球物理学报, 58(1):298-306, doi:10.6038/cjg20150127.

Di D J, Tao G, Zhang T Y, et al. 2015. Finite element studies on characterization of near wellbore fractures using the wireline formation tester. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(1):298-306, doi:10.6038/cjg20150127.

电缆地层测试评价井旁裂缝的有限元数值模拟方法

邸德家^{1,2}, 陶果^{2,3}, 张同义¹, 毛军¹, 王兵²

1 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101
2 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
3 The Petroleum Institute, Abu Dhabi, P. O. Box 2533, UAE

摘要 本文采用有限元方法模拟了电缆地层测试器的双封隔器和谐波脉冲测试方法在井旁裂缝中的压力响应. 根据裂缝性储层渗流力学原理, 首先模拟了双封隔器压力测试在裂缝与井壁相交和不相交两种情况下的压力响应, 模拟结果表明: 当裂缝与井壁相交时, 压力响应随裂缝导流性质的变化发生显著改变; 当裂缝与井壁不相交时, 除非裂缝的导流能力非常大或离井壁非常近, 否则压力响应随着裂缝导流能力的变化并不明显. 说明双封隔器测试方法可以有效评价与井壁相交裂缝的导流能力, 而对远离井壁的裂缝并不敏感. 谐波脉冲压力测试一直被用来探测地层的各向异性, 本文通过数值模拟方法探讨和分析了谐波测试方法探测和评价与井壁不相交裂缝的可行性, 数值模拟结果表明谐波的幅度变化和相位延迟对裂缝的导流能力变化敏感, 说明该方法可以用来评价井旁裂缝. 此外, 本文还对脉冲频率和双探针间距对评价效果的影响进行了分析.

关键词 有限元方法; 电缆地层测试器; 双封隔器压力测试; 谐波脉冲测试; 裂缝性储层渗流

doi:10.6038/cjg20150127 中图分类号 P631 收稿日期 2013-12-25, 2014-05-12 收修定稿

Finite element studies on characterization of near wellbore fractures using the wireline formation tester

DI De-Jia^{1,2}, TAO Guo^{2,3}, ZHANG Tong-Yi¹, MAO Jun¹, WANG Bing²

1 SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China
2 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
3 The Petroleum Institute, Abu Dhabi, P. O. Box 2533, UAE

Abstract Fractures play an important role in both reservoir fluid flow and well productivity. Fracture conductivity is an important parameter to evaluate the fractured reservoir. It is difficult to evaluate the fracture conductivity with conventional prospecting methods. The wireline formation tester has been applied to evaluate the fracture conductivity near wellbore. The effects of evaluating the fractures crossed and non-crossed well borehole with the method of interval pressure transient tests and harmonic pulse testing are analyzed.

In order to research the effects that evaluate the fractures in the reservoir with the wireline formation tester, we used the finite element method to simulate the pressure response of fractured reservoirs with the interval pressure transient tests and harmonic pulse testing. At first, we simulated the pressure response of different fracture parameters with interval pressure transient tests and analyzed the different effects of evaluating the fractures crossed and non-crossed well

基金项目 国家自然科学基金项目(41204094), 中石化科技部攻关项目(P13147), 中国石油科技创新基金项目(2013D-5006-0306)资助.

作者简介 邸德家, 男, 1980 年生, 吉林长春人, 博士后, 主要从事电缆地层测试器和随钻测井方面的研究工作. E-mail: ddj80@sina.com

borehole. Then we analyzed the feasibility of evaluating the fractures non-crossed well borehole with the harmonic pulse testing. The pressure response of different pulse frequencies and different dual probe spacing were simulated and the simulation results of different fracture parameters were compared and analyzed.

In order to investigate the effect of the fracture conductivity on the interval test behavior, at first, we changed the fracture conductivity in the range from $1 \times 10^{-15} \text{ m}^3$, $1 \times 10^{-14} \text{ m}^3$, $1 \times 10^{-13} \text{ m}^3$ to $5 \times 10^{-13} \text{ m}^3$. The simulation results indicate that pressure drawdown is faster and buildup occurs slower as the fracture conductivity decreases. The pressure differential and MDH curves of different fracture conductivity values can be distinguished easily from a pressure gauge. It presents that the fracture conductivity can be evaluated by the interval pressure transient tests efficiently. In the second case, the fractures do not intersect with the well borehole. The fracture conductivity varies from $1 \times 10^{-17} \text{ m}^3$, $1 \times 10^{-15} \text{ m}^3$, $1 \times 10^{-14} \text{ m}^3$ to $1 \times 10^{-12} \text{ m}^3$. The simulation results show that pressure responses have a small change when the fracture conductivity is varied. Although the values of different pressure differentials can be distinguished by a quartz gauge, the effect on pressure response is negligible. Then we used Harmonic pulse testing to evaluate non-crossed fractures. At first, the pulse frequency was defined as 0.1 Hz, the spacing of dual probe was defined as 20 cm. From the simulation results, there is a certain pressure differential and phase shift between the fractured reservoir and non-fractured reservoir. In addition, the pressure differential and phase shift can be distinguished between different fractures conductivity values. When the spacing of the dual probe was equal to 50 cm, there is evident amplitude differential and phase shift between fractured formation and non-fractured formation. Thus it indicates the long spacing of dual probe can detect those fractures near the well borehole more efficiently. Finally, we simulated the pressure response for different radial depths of fractures near well borehole, for which the pulse frequency was defined as 0.1 Hz and the spacing of the dual probe was 50 cm. According to the simulation results, the method of harmonic pulse testing can detect the fractures near the well borehole efficiently. However, it becomes more difficult and probably invalid for detecting those fractures located far away from the well borehole.

The fractures intersecting the well borehole can be evaluated efficiently by interval pressure transient tests depending on fracture conductivities. Non-intersecting fractures in the vicinity of the well borehole have negligible effects with the method. However, when the fracture conductivity increases, or the fractures get close to the well borehole, the effect becomes noticeable. Harmonic pulse testing can detect and evaluate the non-crossed fractures with appropriate spacing of the dual probe and pulse frequency. Through decreasing pulse frequency and increasing dual probe spacing, it can increase detection distance and improve the detection precision. However, this method becomes much less precise when the fractures conductivity become enough large or fractures located far away from the well borehole.

Keywords Finite element method; Wireline formation tester; Interval pressure transient tests; Harmonic pulse testing; Fracture reservoir seepage

1 引言

裂缝储层在流体流动和油井生产过程中扮演着重要的角色,裂缝和断层作为隔挡、障碍或者通道经

常引起储层早期的水淹和气窜等现象,对油气田开发产生了重要的影响,准确地探测和评价裂缝是成功开发裂缝性油气藏的重要保障.裂缝的导流性质是重要的物性参数,影响着裂缝储层的管理和油井的生产,准确地预测流体在储层基质和裂缝中的流

动对评价储层产能至关重要(Widjaja et al., 2010). 微孔隙和裂缝在碳酸盐岩中普遍存在, 很难将渗透率和孔隙度与岩性建立直接的关系. 虽然裂缝和断层的导流性质可以从微电阻率扫描和地震勘探间接得到, 但是这些方法并不准确和可靠, 因为裂缝和断层的导流能力在裂缝的长度和宽度一定的情况下, 主要由裂缝的渗透率决定. 岩芯易受损坏, 裂缝和断层的渗透率也难以从岩芯分析中获得(Zeybek and Kuchuk, 2002; Singh et al., 2011).

储层中裂缝和断层的导流性质尽管可以通过试井、试油等压力测试方法得到, 但这些方法耗时长、花费高, 且不适用于对井旁裂缝情形. 电缆地层测试现阶段有多种测量方式, 而目前用于裂缝地层测量的只有双封隔器测试方式(Kuchuk et al., 1994; Kuchuk, 1998; Grayson et al., 2000). 电缆地层测试的双封隔器模块能够进行近井眼的压力测试, 根据地层渗透率的不同, 可测量井周 10~50 m 范围内地层的渗流性质. 针对裂缝性储层, 双封隔器模块利用两个间隔 1 m 左右的膨胀胶囊, 可封隔一条裂缝、一组裂缝或一个断层区域, 可以对裂缝或断层导流特性进行快速、直接测量, 其压力响应反映裂缝或断层的导流能力. 谐波测试作为一种新的压力脉冲测试方法由 Proett 等(1999, 2000a, 2000b)首先提出, 随后陶果等人(周波和陶果, 2003; 陶果等, 2004)对该方法进行了改进. 这种方法通过电缆地层测试器抽吸流量的变化产生压力谐波, 通过比较抽吸探针和监测探针的压力幅度和相位延迟来计算地层的渗透率和地层各向异性. 本文采用有限元方法分别模拟双封隔器和谐波脉冲测试在裂缝性储层中的压力响应特征, 以期提出一套能定量评价井旁裂缝导流能力的方法.

2 数值模拟方法

2.1 电缆地层测试数学模型的建立

为了研究电缆地层测试对井旁裂缝评价的效果, 在电缆地层测试有限元模拟软件基础上(谷宁等, 2005; 周波等, 2007), 根据裂缝性储层渗流原理, 建立了离散裂缝储层的有限元数值模型(Kristinof et al., 2000; Koyama et al., 2009; 黄朝琴等, 2011). 在达西定律的基础上, 通过将裂缝降维处理(模型为三维体, 裂缝设置为二维面)并把裂缝等效为内部边界条件, 同时考虑裂缝的宽度以减少计算量, 提高计算精度. 流体在裂缝和基质间相互流动,

流压是连续的, 同时流体在基质和裂缝中的流动满足达西定律.

运动方程即达西定律:

$$v = -\frac{K}{\mu} \nabla P, \quad (1)$$

其中, v 为渗流速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), K 为储层渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$), P 为地层压力 (psi).

岩石及饱和的流体都具有弹性, 渗流过程即是一个运动过程, 也是一个状态不断变化的过程. 弹性介质的状态方程为

$$\rho = \rho_0 e^{C_f(P-P_0)}, \quad (2)$$

其中 ρ 为流体密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), ρ_0 为地层压力 P_0 时的流体密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), C_f 为流体的压缩系数 (psi^{-1}).

孔隙介质的状态方程为:

$$\phi = \phi_0 e^{C_\phi(P-P_0)}, \quad (3)$$

其中 ϕ 是孔隙度, ϕ_0 是压力为 P_0 时地层的孔隙度, C_ϕ 是岩石的压缩系数 (psi^{-1}). 令

$$C_t = \phi C_f + (1 - \phi) C_\phi, \quad (4)$$

C_t 为流体和岩石总的压缩系数 (psi^{-1}).

渗流在岩石基质中的连续性方程为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) + \frac{\partial(\phi \rho)}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

将公式(1)~(4)代入公式(5)中得到饱和流体在孔隙介质中的渗流方程:

$$\nabla \cdot \left(-\rho \frac{K}{\mu} \nabla P\right) + \rho C_t \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

同理得到饱和流体在裂缝中的渗流方程

$$\nabla \cdot \left(-\rho \frac{K_f}{\mu} d_f \nabla P\right) + \rho d_f C_t \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \quad (7)$$

其中 d_f 为裂缝的宽度 (m), K_f 为裂缝的渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$).

当裂缝与井壁相交时, 通过电缆地层测试的双封隔器模块进行测试, 裂缝作为渗流边界

$$\left(-\rho \frac{K_f}{\mu} d_f \nabla P\right) L \Big|_{\text{裂缝作为流动边界}} = q_f, \quad (8)$$

其中 L 为裂缝与井壁相交的长度 (m), q_f 为流体在封隔段裂缝处的流量 (cm^3).

当裂缝不与井壁相交时, 把探针与井壁相交的面积作为渗流边界

$$\left(-\rho \frac{K}{\mu} \nabla P\right) S \Big|_{\text{基质作为流动边界}} = q, \quad (9)$$

S 为井壁的渗流面积 (m^2), q 为流体在探针面处的流量 (cm^3).

综上所述,裂缝性储层电缆地层测试的数学模型为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \left(-\rho \frac{K}{\mu} \nabla P \right) + \rho C_t \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \\ \nabla \cdot \left(-\rho \frac{K_f}{\mu} d_f \nabla P \right) + \rho d_f C_t \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \\ P|_{t=0} = P|_{\text{无穷远处}} = P_0, \\ \left(-\rho \frac{K}{\mu} \nabla P \right) S|_{\text{基质作为流动边界}} = q, \\ \left(-\rho \frac{K_f}{\mu} d_f \nabla P \right) L|_{\text{裂缝作为流动边界}} = q_f. \end{cases} \quad (10)$$

2.2 有限元模型的建立

根据有限元加权余量法的 Garlerkin 方法推导公式(10)的有限元格式,分别推导基质和裂缝三维模型的有限元格式。

根据公式(6)可推得岩石基质的渗流方程:

$$\iiint_{\Omega} \left[\nabla \cdot \left(-\rho \frac{K}{\mu} \nabla P \right) + \rho C_t \frac{\partial P}{\partial t} \right] N_{pi} d\Omega = 0, \quad (11)$$

其中 N_{pi} 为压力场的形函数。

将方程展开,对方程左边第一项进行分部积分

$$\iiint_{\Omega} \nabla \cdot \left(-\rho \frac{K}{\mu} \nabla P \cdot N_{pi} \right) d\Omega + \iiint_{\Omega} \left(\rho \frac{K}{\mu} \nabla P \nabla N_{pi} \right) d\Omega + \iiint_{\Omega} \left(\rho C_t \frac{\partial P}{\partial t} N_{pi} \right) d\Omega = 0. \quad (12)$$

根据格林公式得:

$$\iiint_{\Omega} \left(\rho \frac{K}{\mu} \nabla P \nabla N_{pi} \right) d\Omega + \iint_{\Gamma} -\rho \frac{K}{\mu} \nabla P \cdot N_{pi} d\Gamma + \iiint_{\Omega} \left(\rho C_t \frac{\partial P}{\partial t} N_{pi} \right) d\Omega = 0. \quad (13)$$

同理根据公式(7)可得裂缝的有限元格式:

$$\iiint_{\Omega} \left(\rho \frac{K_f}{\mu} d_f \nabla P \nabla N_{pi} \right) d\Omega + \iint_{\Gamma} -\rho \frac{K_f}{\mu} d_f \nabla P \cdot N_{pi} d\Gamma + \iiint_{\Omega} \left(\rho C_t \frac{\partial P}{\partial t} d_f N_{pi} \right) d\Omega = 0, \quad (14)$$

当裂缝与井壁相交时,将边界条件(8)代入公式(14)得

$$\iiint_{\Omega} \left(-\rho \frac{K_f}{\mu} d_f \nabla P_f \nabla N_{pi} \right) d\Omega + \iint_{\Gamma} \frac{q_f}{L} N_{pi} d\Gamma + \iiint_{\Omega} \left(\rho C_t \frac{\partial P}{\partial t} d_f N_{pi} \right) d\Omega = 0, \quad (15)$$

当裂缝不与井壁相交时,将边界条件(9)代入公式(13)得

$$\iiint_{\Omega} \left(-\rho \frac{K}{\mu} \nabla P \nabla N_{pi} \right) d\Omega + \iint_{\Gamma} \frac{q}{S} N_{pi} d\Gamma + \iiint_{\Omega} \left(\rho C_t \frac{\partial P}{\partial t} N_{pi} \right) d\Omega = 0. \quad (16)$$

假设单元各个节点处的压力值用 P_i 表示,则每个单元中任意点的压力值

$$P_e = N_{pi}^T P_i, \quad (17)$$

可以得到压力场对时间的导数

$$P'_e = \frac{\partial P_e}{\partial t} = N_{pi}^T \frac{\partial P_i}{\partial t} = N_{pi}^T P'_i. \quad (18)$$

令矢量算子 $L^T = \nabla^T$, 则

$$L P_e = L N_{pi}^T P_i. \quad (19)$$

将(17)~(19)式分别代入到(15)和(16)式中,可以得到:

$$C_{pe} P'_i + K_{pe} P_i = Q_{pe}, \quad (20)$$

其中, $C_{pe} = \rho C_t d_f \iiint_{\Omega} N_{pi} N_{pi}^T d\Omega$, 为压力场的质量矩阵;

$K_{pe} = \rho d_f \frac{K_f}{\mu} \iiint_{\Omega} B_p^T B_p d\Omega$, 为压力场的刚度矩阵,

$B_p = L N_{pi}^T$; $Q_{pe} = -\oint_{\Gamma} \frac{q_f}{L} N_{pi} d\Gamma$ 和 $Q_{pe} = -\oint_{\Gamma} \frac{q}{S} \times N_{pi} d\Gamma$ 分别为公式(15)和公式(16)压力场的载荷向量。

对整个渗流场的所有单元进行叠加,可以得到:

$$C_p^t P'_i + K_p P_i = Q_p, \quad (21)$$

其中 $C_p^t = \sum_e C_{pe}$ 为压力场的总质量矩阵; $K_p = \sum_e K_{pe}$ 为压力场的总刚度矩阵; $Q_p = \sum_e Q_{pe}$ 为压力场的总载荷向量。

上述为对地层测试模型(10)在空间上的离散,求解过程中,可以把时间坐标当作空间坐标一样做有限元剖分,这就是时空有限元法。但是这种方法处理过程复杂,而且增维造成计算机内存和运算机时的增加,因此采用把 $\partial P / \partial t$ 项用有限差分格式展开的推进积分解法,充分利用了有限元在空间域划分的优点和有限差分在时间推进上的优点。在工程实际中经常采用中心差分法和向后差分法,中心差分具有二阶精度,但容易引起振荡,向后差分虽然具有一阶精度,但稳定性很好,不容易引起解的振荡。因此对(21)式中 $\partial P / \partial t$ 项采用时间向后差分的方法。在网格划分上,对整个计算域进行非结构化网格剖分。考虑计算机资源的限制,对于基质划分了比较粗的单元,在裂缝上划分非常精细的单元。

3 双封隔器测试方法

电缆地层测试的双封隔器模块使用两个密封胶圈将测试井段与井壁封隔开,泵出模块借助井内流体可以使密封胶圈的膨胀压力超出液柱压力 10000 psi. 双密封胶圈的间隔可调,最小间隔可达 1 m,这提供了一个接近标准探针的 3000 倍的井壁面积,这么大的井壁面积在低压降的情况下,允许流体在泡点压力以上被高速抽出. 可以用该方法坐封地层、裂缝或者断层,通过恒定流量抽吸地层中的流体,监测封隔段上的压力变化(王国斌等,2008).

首先测试与井壁相交裂缝的情况,如图 1 所示. 储层的几何模型为半圆柱体,半径和厚度均为 2 m,井眼位于模型中间,半径为 0.1 m,在储层中间设置一个与井壁相交的垂直裂缝,模型的参数如表 1 所示,初始压力和边界压力都设置为 10000 psi.

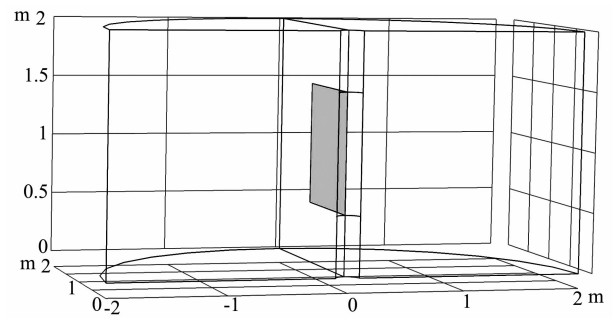


图 1 跨井壁裂缝的几何模型
Fig. 1 Geometry of the fracture intersecting the wellbore

表 1 模型中地层和裂缝的各项参数		
Table 1 Parameters of matrix and fracture		
模型参数	基质	裂缝
孔隙度	0.15	0.5
渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	10	$1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$
流体密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	800	800
流体黏度($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	1.0	1.0
综合压缩系数(psi^{-1})	3×10^{-6}	3×10^{-6}
裂缝宽度(mm)		1.0
裂缝长度(m)		0.5~1.5

根据渗流力学的双孔隙度双渗透率原理,当地层测试的封隔段内有裂缝与井筒相交时,流体主要从裂缝流向井筒,在裂缝和基质间产生压力梯度后,流体开始从基质流向裂缝,最后从裂缝流向井筒. 因此在模型中只设置与井壁相交的裂缝为流动边界,封隔段内的其他部分为非渗透层. 为了模拟抽吸流

体压力降和压力恢复的压力响应,首先在封隔段以恒定流量 $12.5 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 抽吸 30 s,在抽吸过程中监测封隔段内的压力下降情况. 30 s 之后停止抽吸,压力开始恢复,到 60 s 结束.

为了研究裂缝导流能力对压力测试的影响,在裂缝其他参数不变的情况,分别设置裂缝的导流能力(裂缝渗透率 \times 裂缝宽度)为 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^3$, $1 \times 10^{-14} \text{ m}^3$, $1 \times 10^{-13} \text{ m}^3$ 和 $5 \times 10^{-13} \text{ m}^3$,对应的裂缝无因次导流能力分别为 0.1, 1.0, 10 和 50. 无因次导流能力的计算公式为

$$F_{\text{cd}} = \frac{K_{\text{f}} d_{\text{f}}}{K x_{\text{f}}}, \tag{22}$$

其中 K_{f} 和 K 分别为岩石裂缝和基质的渗透率, d_{f} 为裂缝的宽度, x_{f} 为裂缝的半长.

图 2 表示了裂缝不同导流能力的压力响应. 从模拟结果得到,随着裂缝导流能力的降低,压降变快,压力恢复变慢,并且流压增加. 在 30 s 时刻,不同导流能力裂缝的流压与初始压力的压差分别为 771.22 psi, 424.38 psi, 267.52 psi 和 243.59 psi. 石英压力计的分辨率为 0.01 psi, 因此可以很容易分辨出不同裂缝导流能力的压力响应. 然后,通过 Saphir 商业软件对模拟的压力曲线进行处理,得到了压力降的 MDH 曲线,如图 3 所示,不同裂缝导流能力的 MDH 曲线区分明显,说明通过电缆地层测试的双封隔器压力测试方法可以有效定量评价与井壁相交裂缝的导流能力.

为了研究双封隔器测试方法对与井壁不相交裂缝的评价效果,设计了一个裂缝不与井壁相交的几何模型,如图 4 所示. 模型中的裂缝由三个相同的椭圆面构成,其长半轴为 0.5 m,短半轴为 0.05 m,裂

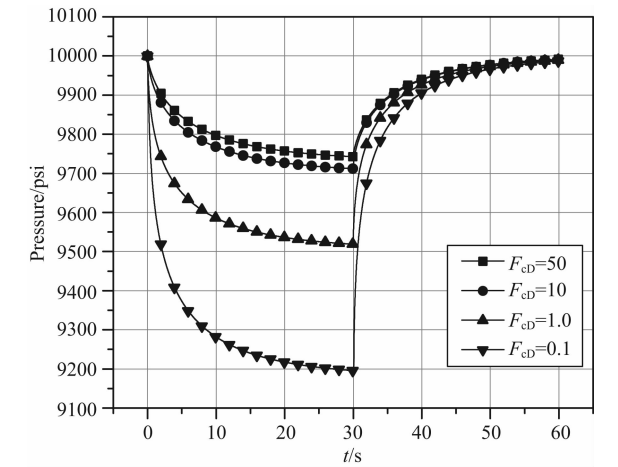


图 2 裂缝不同导流能力的压力响应
Fig. 2 Pressure response of different fracture conductivities

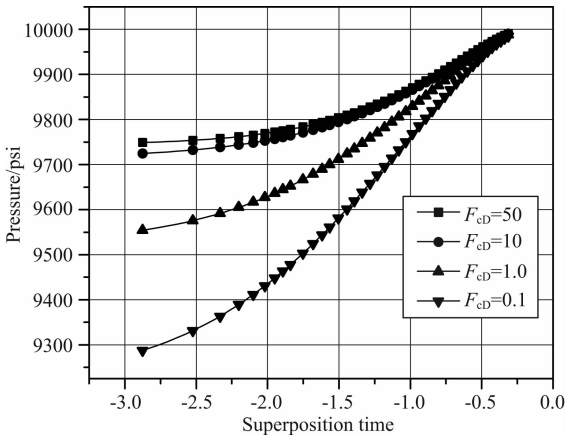


图 3 裂缝不同导流能力压力测试的 MDH 曲线
Fig. 3 MDH curves of different fracture conductivities

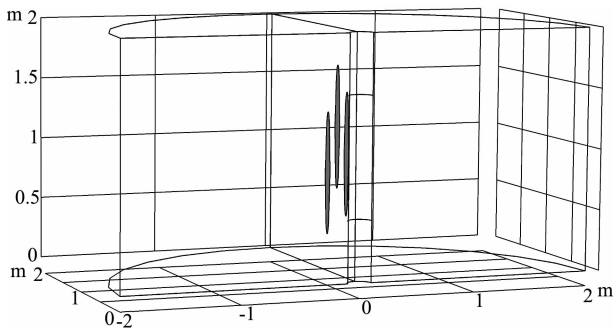


图 4 与井壁不相交裂缝的几何模型

Fig. 4 Geometry of the fractures not intersecting the wellbore

缝的中心距离井筒分别为 30 cm, 50 cm 和 70 cm. 模型的其他参数与第一种情况相同. 由于裂缝不与井壁相交, 我们定义整个封隔段的井壁为渗流通道, 抽吸流量定义为 $40\text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 恒定地抽吸地层流体 30 s, 然后停止抽吸, 压力从 30 s 恢复到 60 s.

在裂缝其他参数不变的情况下, 改变裂缝的导流能力(裂缝渗透率 \times 裂缝宽度), 从 $1 \times 10^{-17}\text{ m}^3$, $1 \times 10^{-15}\text{ m}^3$, $1 \times 10^{-14}\text{ m}^3$ 到 $1 \times 10^{-12}\text{ m}^3$, 对应的无因次裂缝导流能力分别为 0.001, 0.1, 1.0 到 100. 图 5 和图 6 分别表示了四种情况的压力响应和 MDH 分析曲线. 从模拟结果得到, 当裂缝的导流能力发生显著改变, 封隔段内的压力响应并没有发生明显的变化. 对应于裂缝不同的导流能力, 在 30 s 时刻的压差(初始压力与 30 s 时刻压力的差值)分别为 299.16 psi, 296.77 psi, 293.67 psi, 291.35 psi. 虽然石英压力计可以分辨出不同的压差, 但是在实际测试过程中是很难被区分的. 当裂缝不与井壁相交时, 地层测试的渗流通道为整个封隔段, 压力响应主要受井筒周围地层渗透率的影响, 裂缝的导流性质对压力变化的影响较小, 这也是目前通过测试方法或者试井方法很难探测到较远距离裂缝的原因.

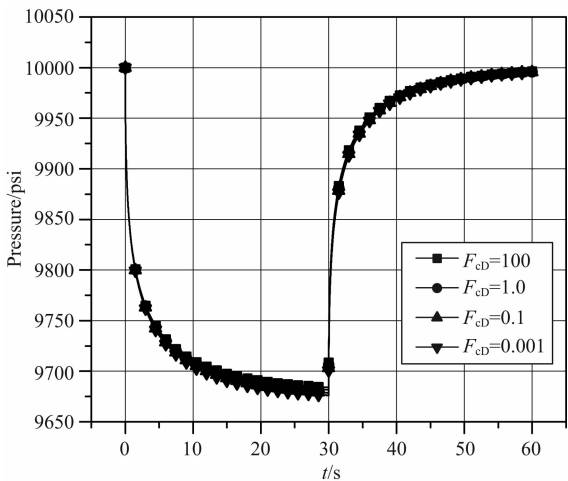


图 5 裂缝不同导流能力的压力响应

Fig. 5 Pressure response of different fracture conductivities

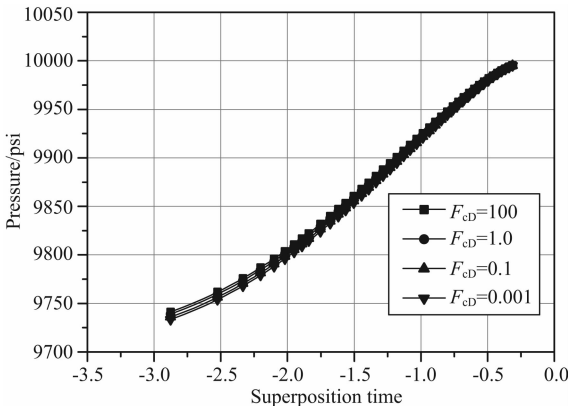


图 6 裂缝不同导流能力的 MDH 曲线

Fig. 6 MDH curves of different fracture conductivities

最后, 我们模拟了裂缝不同径向深度的压力响应, 径向深度分别为 20 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm 和 100 cm. 图 7 显示了封隔段的压力响应, 不同径向深度裂缝的压力响应并没有明显的变化, 只有当裂缝足够靠近井筒时, 压力变化才越来越明显. 由于地层测试的时间较短, 压力响应主要受井筒附近地层渗透率的影响, 当裂缝距离井筒较远时, 裂缝的导流性质对测试压力的影响减弱, 因此在压力曲线上区分不明显. 表 2 显示了在 30 s 时刻不同裂缝导流能力

表 2 在 30 s 时刻裂缝不同参数的压差
Table 2 The pressure differential for different fracture parameters after the 30 seconds

无因次裂缝导流能力 F_{cd}	压差 (psi)	裂缝径向距离 (cm)	压差 (psi)
0.001	299.16	20	311.71
0.1	296.77	30	318.57
1.0	293.67	50	322.56
100	291.35	70	323.48
		100	323.81

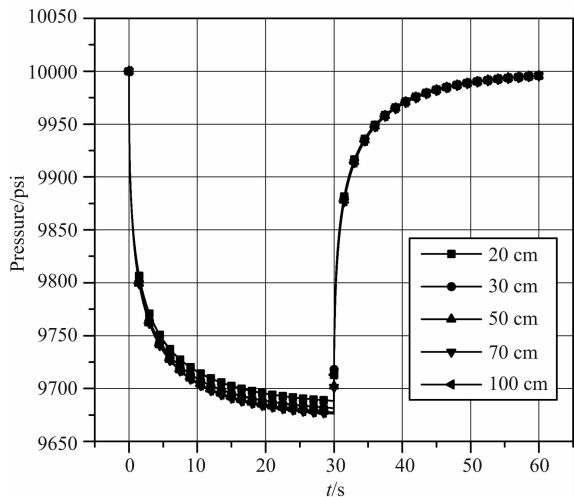


图 7 裂缝不同径向距离的压力响应

Fig. 7 Pressure response of different fracture radial depths

和裂缝不同径向距离的压差,这些数据表明地层测试的压力响应对与井壁不相交裂缝参数的变化并不敏感,说明双封隔器压力测试方法用于探测和评价与井壁不相交裂缝的效果并不理想。

4 谐波脉冲测试方法

谐波脉冲测试通过地层测试器活塞的往复运动,将压力波通过探针传导进地层,压力波被高精度的压力计记录,通过比较具有一定间距探针的压力幅度和相位延迟可以计算地层的渗透率和相关属性。Chin 和 Proett 在 1997 年建立了探针间压力幅度和时间延迟的基本关系式(Proett et al., 1999, 2000a, 2000b)。当抽吸频率为 f 时,抽吸探针和监测探针的时间延迟公式为:

$$\Delta t_{\text{phase}} = \frac{(r - r_p)}{2\pi f} \sqrt{14696 \phi \mu C \pi f / K}, \quad (23)$$

如果抽吸探针的压力幅度为 P_0 ,监测探针的压力幅度为 $P(r)$,那么幅度比为:

$$A_r = \frac{P(r)}{P_0} = \left(\frac{r_p}{r}\right) e^{-(r-r_s) \sqrt{14696 \phi \mu C \pi f / K}}, \quad (24)$$

其中 Δt_{phase} 为双探针脉冲延迟时间(s), f 为脉冲频率(Hz), r 为球形流坐标(cm), r_s 为球形流半径(cm), r_p 为探针半径(cm), ϕ 为孔隙度, μ 为流体黏度($\text{mPa} \cdot \text{s}$), C 为综合压缩系数(psi^{-1}), K 为地层渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

通过前面的模拟结果,双封隔器压力测试方法评价与井壁不相交的裂缝效果并不理想,本文尝试通过谐波压力测试方法评价与井壁不相交裂缝储层的可行性。谐波压力测试的几何模型沿用双封隔器

测试方法探测与井壁不相交裂缝的几何模型,如图 4 所示。在井壁的 0.5 m 处设置一个抽吸探针,抽吸探针上方一定间距处设置一个监测探针,初始流量定义为 $1.25 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,通过活塞的往复运动引起正弦压力波,分别测量抽吸探针处和监测探针处的压力幅度和脉冲延迟。

首先,脉冲频率被定义为 1 Hz,探针间距设置为 20 cm,裂缝的无因次导流能力分别定义为 100, 1.0, 0.1 和 0.001,模拟探针抽吸流体 30 s 的过程,为了便于对模拟数据进行分析,仅取 15 s 到 16 s 的时间段。图 8 表示了裂缝不同导流能力的压力响应,从模拟的结果可得,在整个时间段内不同裂缝导流能力的压力幅度和相位延迟没有明显的变化,裂缝储层和均质储层的压力响应在波谷(15.6 s)处的压差小于 0.02 psi,虽然压力计可以区分出不同的压差,但是在复杂环境的井眼中,这样微弱的区别很难被探测到。

然后,脉冲频率被定义为 0.1 Hz,探针间距分别设置为 20 cm 和 50 cm。图 9 表示了探针间距为 20 cm 时不同裂缝导流能力的压力响应和相位延迟。从模拟结果可得,裂缝性储层和均质储层具有一定的压力差和相位延迟(相位延迟在波谷处超过了 0.35 s)。而且不同裂缝导流能力的压力差和相位延迟能够被区分。图 10 表示探针间距为 50 cm 的压力响应,从模拟结果得到,裂缝性储层与均质储层具有明显的幅度差和相位延迟。表 3 表示了抽吸探针和监测探针的相位延迟,同时根据公式(23)计算了储层的垂直渗透率。它指出随着裂缝导流能力的增加,探针间相位延迟减小,储层垂直渗透率增加。当裂缝的无因次导流能力大于 1.0 时,裂缝基本处于导通状态,因此继续增加裂缝的导流能力,对压力波的影响有限,因此表 3 中当裂缝的无因次导流能力分别为 1.0 和 100 时计算的地层渗透率差异较小。与探针间距为 20 cm 的压力响应相反,当探针间距为 50 cm 时,随着裂缝导流能力的增加,压力幅度也增加,这是由于随着裂缝导流能力的增加,减弱了压力波在地层中的衰减,说明增大探针间距能够更好地评价井旁裂缝。

最后,模拟了裂缝距离井筒不同径向深度的压力响应,脉冲频率被定义为 0.1 Hz,探针间距设置为 50 cm。图 11 显示了压力幅度和相位延迟。根据模拟结果,当裂缝距离井筒为 20 cm 和 30 cm 时,压力幅度和相位延迟具有明显的变化,当裂缝距离井筒超过 50 cm 时,压力变化曲线基本重合在一起,这

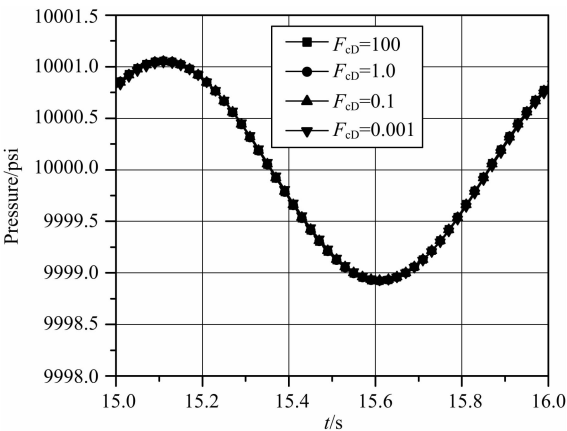


图 8 裂缝不同导流能力的压力响应特征
脉冲频率为 1 Hz, 探针间距为 20 cm.

Fig. 8 Pressure response for different fracture conductivities
The pump pulse frequency is 1 Hz and the spacing
of the dual probe is 20 cm.

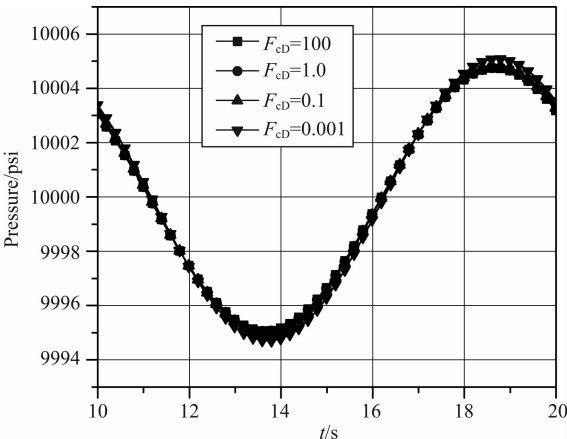


图 9 裂缝不同导流能力的压力响应特征
脉冲频率为 0.1 Hz, 探针间距为 20 cm.

Fig. 9 Pressure response of different fracture conductivities
The pump pulse frequency is 0.1 Hz and the spacing
of the dual probe is 20 cm.

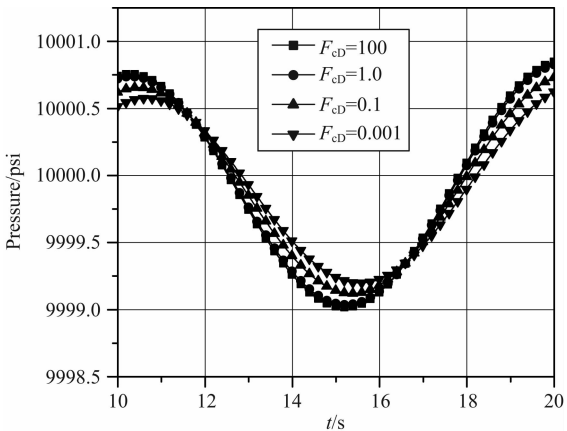


图 10 裂缝不同导流能力的压力响应特征
脉冲频率为 0.1 Hz, 探针间距为 50 cm.

Fig. 10 Pressure response of different fracture conductivities
The pump pulse frequency is 0.1 Hz and the spacing
of the dual probe is 50 cm.

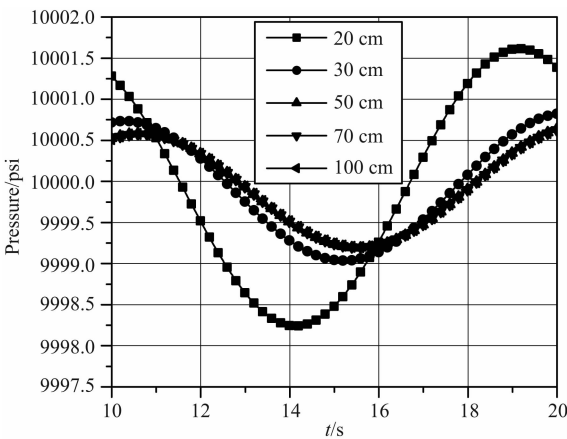


图 11 裂缝不同径向深度的压力响应特征
脉冲频率为 0.1 Hz, 探针间距为 50 cm.

Fig. 11 Pressure response of different fracture radial depths
The pump pulse frequency is 0.1 Hz and the spacing
of the dual probe is 50 cm.

表 3 裂缝不同导流能力计算的相位延迟和储层渗透率

Table 3 Phase shift and reservoir permeability
for different fracture conductivities

无因次裂缝渗流能力 F_{cd}	相位延迟 (s)	储层渗透率 ($10^{-3} \mu m^2$)
100	0.7	15.62
1.0	0.73	15.18
0.1	0.82	11.75
0.001	0.9	9.8

是因为地层测试抽吸流量有限,压力谐波的传播距离较浅,当裂缝距离井筒越近,对压力波的影响越大;当裂缝距离井筒较远时,裂缝的导流能力对压力波的影响减弱.因此,当裂缝远离井壁,评价效果变

得越来越差.

5 结论

本文根据渗流力学原理建立了电缆地层测试在裂缝性储层中应用的数学模型,根据裂缝与井壁相交和不相交两种情况,分别设置了渗流边界条件,推导了有限元格式,并给出了有限元求解的方法.根据有限元数值分析得到以下结论:

电缆地层测试的双封隔器压力测试方法能够有效评价与井壁相交裂缝的导流能力,但是应用此方法评价与井壁不相交的裂缝,效果并不理想.当裂缝不与井壁相交时,地层测试的渗流通道为整个封隔

段,压力响应主要受井筒周围地层渗透率的影响,裂缝的导流性质对压力变化的影响较小,然而当裂缝靠近井壁时,对压力测试的影响较大,因此效果越来越明显.

谐波压力测试方法能够有效探测和评价与井壁不相交的裂缝. 通过降低脉冲频率和增加探针间距,能够增加谐波测试的探测深度,同时提高探测精度. 但是当裂缝的导流能力很大或者裂缝远离井壁时,这种方法变得越来越困难. 这是因为当裂缝的导流能力超过一定范围后,裂缝内的流体基本处于导通状态,因此不同裂缝的导流能力对压力测试的影响有限,同时当裂缝距离井筒较远时,裂缝的导流性质对测试压力的影响减弱,因此压力响应区分并不明显.

References

Chin W C, Proett M A. 1997. Formation evaluation using phase shift periodic pressure pulse testing; US, Patent No. 5672819. 1997-09-30.

Grayson S T, Morris C W, Blume C R. 2000. Fluid identification and pressure transient analysis in the fractured monterey using the modular dynamics tester. SPE/AAPG Western Regional Meeting. Long Beach, California.

Gu N, Tao G, Liu S M. 2005. The finite element simulation of wireline formation testing for oil-water two-phase flow. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 20(2): 337-341, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2005. 02. 014.

Huang Z Q, Yao J, Wang Y Y, et al. 2011. Numerical study on two-phase flow through fractured porous media. *Sci. China: Tech. Sci.* (in Chinese), 41(9): 1240-1248.

Koyama T, Li B, Jiang Y, et al. 2009. Numerical modelling of fluid flow tests in a rock fracture with a special algorithm for contact areas. *Computers and Geotechnics*, 36(1-2): 291-303.

Kristinof R, Ranjith P G, Choi S K. 2000. Finite element simulation of fluid flow in fractured rock media. *Environ. Earth Sci.*, 60(4): 765-773.

Kuchuk F J, Ramakrishnan T S, Dave Y. 1994. Interpretation of wireline formation tester packer and probe pressures. SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, LA, USA.

Kuchuk F J. 1998. Interval pressure transient testing with MDT packer-probe module in horizontal wells. SPE India Oil and Gas Conference and Exhibition. New Delhi, India.

Proett M A, Gregory G N, Chin W C, et al. 1999. New wireline formation testing tool with advanced sampling technology. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas.

Proett M A, Chin W C, Manohar M, et al. 2000a. New dual-probe wireline formation testing and sampling tool enables real- time permeability and anisotropy measurements. SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference. Midland, Texas.

Proett M A, Chin W C, Mandal B. 2000b. Advanced permeability and anisotropy measurements while testing and sampling in real-time using a dual probe formation tester. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas.

Singh R K, Nangia V, Dunlap J J, et al. 2011. Wireline dual-packer formation testing operations in fractured basement: a case study from the west coast offshore India. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA.

Tao G, Zhou B, Gu N. 2004. Stratum parameter test method based on multi-probe: China patent No. 200410006448 (in Chinese). 2004-03-08.

Wang G B, Duan Q Q, Cheng F, et al. 2008. Application of MDT dual packer technique to Xinjiang oilfield. *Petroleum Instrument* (in Chinese), 22(3): 28-30.

Widjaja D R, Alhuthali A, Guerrero R P, et al. 2010. A novel fracture characterization approach: mini-dst using a wireline formation tester. SPE/DGS Annual Technical Symposium and Exhibition. Al-Khobar, Saudi Arabia.

Zeybek M, Kuchuk F J. 2002. Fault and fracture characterization using 3D interval pressure transient tests. 10th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi, U. A. E. .

Zhou B, Mo X W, Tao G. 2007. The numerical simulation of wireline formation tester with finite element method. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 37(3): 629-632.

Zhou B, Tao G. 2003. Study on the method of flow harmonic testing for wireline formation tester with multi-probe. // Chinese Geophysical Society 19th Annual Meeting. 56-60.

附中文参考文献

谷宁, 陶果, 刘书民. 2005. 电缆地层测试器测量的油水两相有限元模型. 地球物理学进展, 20(2): 337-341, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2005. 02. 014.

黄朝琴, 姚军, 王月英等. 2011. 裂隙介质两相渗流数值模拟研究. 中国科学: 技术科学, 41(9): 1240-1248.

陶果, 周波, 谷宁. 2004. 基于多探针的地层参数测试方法: 中国, 专利编号 200410006448. 2004-03-08.

王国斌, 段庆庆, 程芳等. 2008. 双封隔器的 MDT 测井技术在新疆油田的应用. 石油仪器, 22(3): 28-30.

周波, 莫修文, 陶果. 2007. 电缆地层测试器的有限元数值模拟. 吉林大学学报(地球科学版), 37(3): 629-632.

周波, 陶果. 2003. 多探针电缆地层测试器的流量谐波测试方法研究. // 中国地球物理学会第十九届年会论文集. 56-60.

(本文编辑 何燕)