

致密储层垂直裂缝井压力动态特征

罗二辉¹, 王晓冬¹, 王建俊²

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083
2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

摘要 针对致密储层非达西渗流规律及垂直裂缝井的特殊流动模式, 采用考虑井筒存储和裂缝表皮三线流模型描述早、中期流动阶段及考虑启动压力梯度的有效井径模型反映晚期拟径向流阶段。通过三线流模型和有效井径模型的优化组合, 建立了致密储层垂直裂缝井不稳定渗流试井分析模型, 采用最小二乘法拟合三线流模型与有效井径模型的压力解。分析了无量纲导流系数、裂缝表皮及启动压力梯度对井壁压力及压力导数动态曲线的影响, 结果表明: 无量纲导流系数越大, 压力降越小, 从而能量损耗越小; 裂缝表皮主要影响早、中期压力动态; 启动压力梯度越大, 后期无量纲压力增加越明显, 说明渗流过程能量损失增大。

关键词 致密储层; 启动压力梯度; 动边界; 垂直裂缝井; 不稳定渗流; 非 Darcy 渗流

中图分类号 TE312

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)15-0058-04

Dynamic Pressure Behavior in Vertically Fractured Wells of Tight Reservoir

LUO Erhui¹, WANG Xiaodong¹, WANG Jianjun²

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract For non-Darcy flows of tight reservoir and special flow patterns in vertically fractured well, a trilinear flow model is developed to study the early-time and immediate-time flow stages, taking the effect of wellbore storage and the skin effect of vertical fracture into consideration. The effective wellbore radius is used to describe the effect of the threshold pressure gradient in the latter time flow regime. Combining the trilinear flow model with the effective wellbore radius, a transient flow well-testing model in tight reservoir is built, which is solved by the least squares method. At the same time, an analysis is made based on these solutions that include the effects of various parameters, such as the fracture conductivity, the skin on the fracture, and the threshold pressure gradient. It is shown that the larger the dimensionless fracture conductivity and the smaller the pressure drop, the smaller the energy loss will be; the pressure response in early-time and intermediate-time stages is mainly influenced by the skin factor; the larger the threshold pressure gradient and the more significant the dimensionless pressure increase, the larger the energy loss will be in the later stage.

Keywords tight reservoir; threshold pressure gradient; moving boundary; vertically fractured well; transient flow; Non-Darcy flow

0 引言

许多实验和理论表明, 致密储层中油气藏流体的渗流一般不遵守达西定律, 而是低速非达西流。水力压裂是改造低渗透油气层的有效方法, 经过水力压裂形成一条高导流能力的裂缝, 使径向渗流模式改变为线性渗流模式, 从而降低了渗流阻力。有关中、高渗透率储层垂直裂缝井的研究已有大量成果: 1974年, Gringarten等^[1]采用点源函数和 Newman 乘

积方法首次给出了无限导流垂直裂缝井的压力分布解析式; 1978年, Cinco-Ley等^[2-3]提出有限导流垂直裂缝井的双线流模型和二维平面模型; 1986年, Lee等^[4]提出有限导流垂直裂缝井的三线流模型; 1987年, 刘慈群^[5]、Riley等^[6]提出椭圆流模型; 1996年, 张义堂等^[7]总结有关人工垂直裂缝井试井模型有3种: 双线性流模型、三线流模型、椭圆流模型, 并指出了各种模型的优缺点; 2004年, 王晓冬等^[8]从较复杂的渗流

收稿日期: 2010-06-03

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX05009)

作者简介: 罗二辉, 硕士研究生, 研究方向为油藏工程及渗流力学, 电子信箱: luorhui2006@163.com; 王晓冬(通信作者), 教授, 研究方向为油藏工程、油气渗流力学及油藏数值模拟, 电子信箱: wxd_cug@cugb.edu.cn

理论出发,推导出准确的有限导流垂直裂缝井不稳定渗流中期径向流公式和晚期拟稳态渗流公式。针对低渗透油气藏开发有别于中、高渗透油气藏的特殊问题,温庆志等^[9]通过室内实验结合数值模拟的方法研究了启动压力梯度对压裂油井生产动态的影响,指出低渗透油藏的开发不能忽略启动压力梯度的影响。在低速非达西渗流垂直裂缝井的试井方面,严涛等^[10]以三线性流试井分析模型为基础,考虑启动压力梯度,绘制出试井分析曲线。付春权等^[11]利用椭圆流模型和质量守恒的方法求解了考虑启动压力梯度的数学模型。目前还未形成一个完善的低渗透垂直裂缝井试井分析模型。由于垂直裂缝井的渗流难以用一个准确的物理模型来描述,不少学者^[12-14]提出将上述3种模型优化结合的计算思路,使各模型解的优势得以发挥,不足之处得以互补。本文在前人研究的基础上吸纳、借鉴组合思想,在人工压裂缝范围内采用公认较好的三线性流模型,而对晚期拟径向流选用考虑启动压力梯度和动边界影响的有效井径模型。

1 三线性流模型及其解

三线性流示意图如图1所示,定义如下无量纲量。

无量纲时间

$$t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} K t}{\varphi \mu c x_f^2}$$

无量纲压力

$$p_D = \frac{K h (p_i - p)}{1.842 q \mu B}$$

无量纲导流系数

$$F_{CD} = \frac{K b_f}{K x_f}$$

无量纲井筒存储系数

$$C_D = \frac{0.1592 C}{\varphi c h x_f^2}$$

无量纲裂缝扩散系数

$$\eta = \frac{K_f \varphi c_f}{K_f \varphi c_{fi}}$$

其中, K 为储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_f 为裂缝渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; φ 为储层孔隙度, %; φ_f 为裂缝孔隙度, %; h 为储层厚度, m; x_f 为裂缝半长, m; b_f 为裂缝宽度, m; q 为井产量, m^3/d ; μ 为原油黏

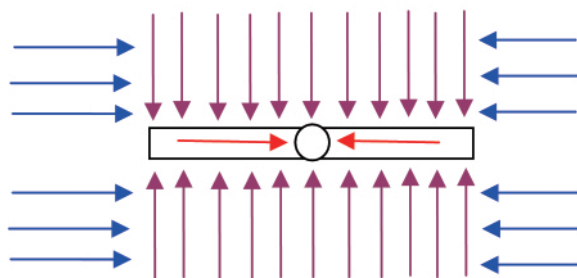


图1 三线性流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of trilinear flow

度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; B 为原油体积系数, m^3/m^3 ; p 为地层压力, MPa ; p_i 为原始地层压力, MPa ; t 为延续时间, h; C 为井筒储集系数; c_i 为系统压缩系数, $1/\text{MPa}$; c_{fi} 为裂缝压缩系数, $1/\text{MPa}$ 。

三线性流模型 Laplace 空间的井底压力解为^[4]

$$\tilde{p}_{wD}(s) = \frac{b}{s(s b C_D + \psi \tanh \psi)} \quad (1)$$

其中, s 为 Laplace 空间变量, $b = \frac{\pi}{F_{CD}}$, $\psi = \left[\frac{2(s+s^{-1})^2}{F_{CD}[1+(s+s^{-1})^2 S_f]} + \frac{s}{\eta} \right]$, S_f 为裂缝表皮。

2 考虑启动压力梯度的有效井径模型

在垂直裂缝井的压力探测半径超过裂缝半长后,流态进入拟径向流阶段^[7]。对于拟径向流阶段,如图2所示,在无限大低渗透油藏中心有一口定产生产井,考虑启动压力梯度和动边界的影响,建立下列数学模型。

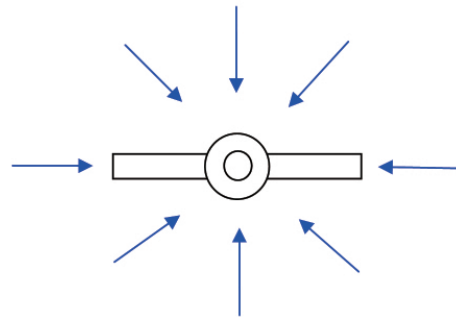


图2 有效井径示意图

Fig. 2 Effective wellbore radius

定义无量纲压力和无量纲井壁压力分别为

$$p_D = \frac{K h [p_i - p + (r - r_w) \lambda]}{1.842 q \mu B} \quad p_{wD} = \frac{K h (p_i - p_w)}{1.842 q \mu B}$$

无量纲时间、无量纲径向距离和动边界为

$$t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} K t}{\varphi \mu c r_w^2} \quad r_D = \frac{r}{r_w} \quad r_{wD} = \frac{r(t)}{r_w}$$

无量纲启动压力梯度为

$$\lambda_D = \frac{K h r_w \lambda}{1.842 q \mu B}$$

其中, r_w 为井筒半径, m; r_f 为压力扰动外边界, m; r 为距离井底的半径, m; p_w 为井底压力, MPa ; λ 为启动压力梯度, MPa/m 。

无限大低渗地层径向不定常渗流的控制方程

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left[r_D \left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) \right] = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad 1 \leq r_D \leq r_{wD}(t_D), t_D \geq 0 \quad (2)$$

初始条件

$$p_D(r_D, 0) = 0 \quad r_D = r_{wD}(0) = 1 \quad t_D = 0 \quad (3)$$

内边界定产条件

$$r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = -1 \quad (4)$$

外边界移动界面条件

$$\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{wD}(t_D)} = 0 \quad (5)$$

对于含启动压力梯度和动边界影响的不定常渗流问题,一般方法对其较强的非齐次性和非线性束手无策。本文在无量纲化的同时进行一种因变量变换,从而方便解析求解。

分两步解析求解式(2)~式(5):①解析求解由式(2)~式(5)组成(边界移动)的封闭储层的不定常渗流控制方程组;②将解析式代入式(5),得到动边界运动方程。计算压力过程的步骤相反。

对式(2)~式(4)组成的不定常渗流问题进行 Laplace 变换,得到压力分布解式为

$$\tilde{sp}_D(r_D, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \frac{K_0(r_D \sqrt{s}) I_1(R_D \sqrt{s}) + K_1(R_D \sqrt{s}) I_0(r_D \sqrt{s})}{I_1(R_D \sqrt{s}) K_1(\sqrt{s}) - K_1(R_D \sqrt{s}) I_1(\sqrt{s})} \quad (6)$$

式中, J_0, K_0 分别为零阶第一、二类修正 Bessel 函数, J_1, K_1 分别为二阶第一、二类修正 Bessel 函数, $R_D = \tilde{r}_{D0}(s), \tilde{r}_{D0} = \int_0^\infty e^{-st} r_{D0}(t) dt$ 。

将式(6)代入式(5),得到动边界传播方程

$$I_1(R_D \sqrt{s}) K_1(\sqrt{s}) - K_1(R_D \sqrt{s}) I_1(\sqrt{s}) = \frac{1}{s \lambda_D R_D (R_D - 1)} \quad (7)$$

在得到式(7)的过程中应用了 Bessel 函数相应的 Wronskians 关系式。

首先利用牛顿迭代方法在 Laplace 变换域中计算式(7),再采用 Stehfest 数值反演方法计算式(6),最终得到储层无量纲压力分布或井壁压力。

3 动态曲线计算及两种模型的组合

对三线性流模型拉氏空间井底压力采用 Stehfest 反演,计算了无量纲导流系数和裂缝表皮效应的井壁压力及压力导数动态曲线,如图 3、图 4 所示,图中粗线表示压力曲线,细线表示压力导数曲线。结果表明,填砂裂缝导流能力越大无量纲压力越小,说明压力降越小,能量损耗小;裂缝表皮主要对早、中期的压力及压力导数产生影响。对考虑启动压力梯度的有效井径模型采用第 2 节提及的方法计算了启动压力梯度对井壁压力及其压力导数的影响,如图 5 所示,图中粗线表示压力曲线,细线表示压力导数曲线。结果表明,启动压力梯度主要影响了后期压力动态特征,启动压力梯度越大,无量纲压力增加越明显,且无量纲压力增加正比于压力降落,它的增加说明渗流过程中能量损失增大。

三线性流模型与有效井径模型组合的核心和关键是有有效井径 r_{we} 的确定,须满足如下关系:

$$r_{we} = f(r_w, F_{CD}, S_f) \quad (8)$$

即拟径向流阶段的有效井径 r_{we} 是井筒半径 r_w 、裂缝导流系数 F_{CD} 、裂缝表皮 S_f 等参变量的函数。研究结果表明,很难找到一个具体的函数形式表达式^[7]。本文采用在同一参数系统下,利用后期压力数据,用有效井径模型的解去拟合三线性流模型的解。构造目标函数

$$J = \sum_{t_D > T} (p_{WD}^{三线性流} - p_{WD}^{有效井径})^2 \quad (9)$$

这样,问题归结为求最小值 $\min J$ 的问题。可采用最小二乘法编写计算程序,方便求解。

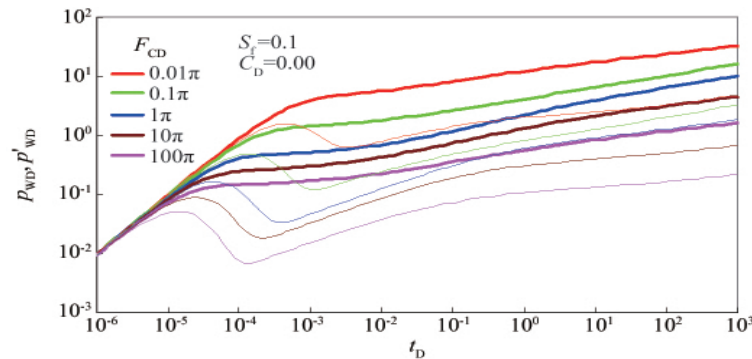


图 3 导流能力对压力动态曲线的影响

Fig. 3 Influence of flow conductivity on pressure dynamic curve

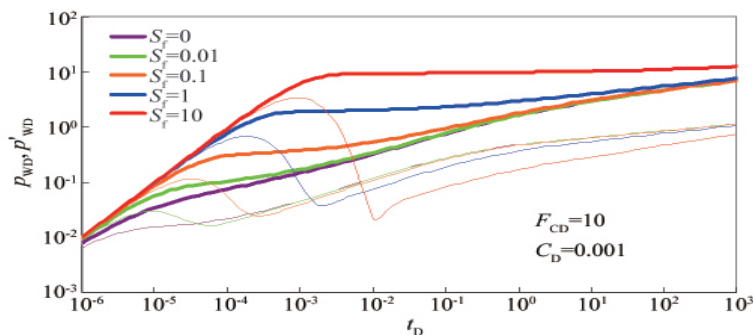


图 4 裂缝表皮对压力动态曲线的影响

Fig. 4 Influence of fracture skin on dynamic curve

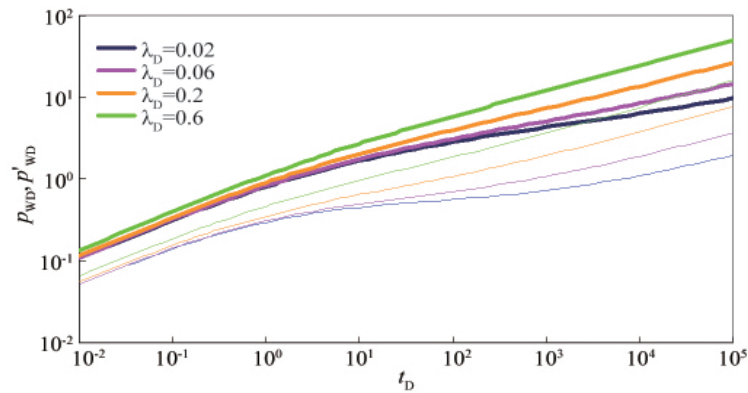


图5 启动压力梯度对动态曲线的影响

Fig. 5 Influence of threshold pressure gradient on dynamic curve

给定 F_{CD} 和 S_f 参数值,可由三线性流模型计算出早、中期的压力值,再由拟径向流模型计算出晚期拟径向流阶段的压力值。对于中、晚期之间过渡带的压力值,可插值求得。

4 结论

1) 三线性流模型能客观反映垂直裂缝井早、中期流动阶段,本文计算了考虑井筒存储效应和表皮效应的井壁压力及其压力导数。

2) 致密储层的晚期拟径向流阶段,采用考虑启动压力梯度和动边界交互影响的有效井径模型,通过变换因变量,首次解析求解并计算了启动压力梯度对压力动态曲线的影响。

3) 同时考虑井筒存储、表皮效应和启动压力梯度的三线性流模型与有效井径模型的有机组合,可方便、快速计算致密储层垂直裂缝井不稳定压力动态曲线。

参考文献 (References)

- [1] Gringarten A C, Ramey Jr H J, Raghavan R. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture[J]. *SPE Journal*, 1974, 14(4): 347-360.
- [2] Cinco L H, Samaniego V F, Dominguez A N. Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture [J]. *SPE Journal*, 1978, 18(4): 253-264.
- [3] Cinco L H, Samaniego V F. Transient pressure analysis for fractured wells[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1981, 33(9): 1749-1766.
- [4] Lee S T, Brockenbrough J R. A new approximate analytic solution for finite-conductivity vertical fractures[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1986, 1(1): 75-88.
- [5] 刘慈群. 垂直裂缝地层中流体的渗流[J]. 石油勘探与开发, 1987, 13(3): 69-73.
Liu Ciqun. *Petroleum Exploration and Development*, 1987, 13(3): 69-73.
- [6] Riley M F, Brigham W E, Horne R N. Analytical solutions for elliptical finite conductivity fractures [C]/SPE/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 1991: 22656-MS.
- [7] 张义堂, 闫亚茹. 垂直裂缝井三线性流模型与 Cinco-Ley 模型[J]. 石油钻采工艺, 1996, 18(6): 64-79.
Zhang Yitang, Yan Yaru. *Oil Drilling & Production Technology*, 1996,

18(6): 64-79.

- [8] 王晓冬, 张义堂, 刘慈群. 垂直裂缝井产能及导流能力优化研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 78-81.
Wang Xiaodong, Zhang Yitang, Liu Ciqun. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(6): 78-81.
- [9] 温庆志, 蒲春生. 启动压力梯度对压裂井生产动态影像研究 [J]. 西安石油大学学报, 2009, 24(4): 50-53.
Wen Qingzhi, Pu Chunsheng. *Journal of Xi'an Shiyou University*, 2009, 24(4): 50-53.
- [10] 严涛, 贾永禄. 低速非达西流有限导流垂直裂缝模型[J]. 天然气工业, 2005, 25(2): 130-132.
Yan Tao, Jia Yonglu. *Natural Gas Industry*, 2005, 35(2): 130-132.
- [11] 付春权, 尹洪军, 刘宇, 等. 低速非达西渗流垂直裂缝井试井分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(5): 53-56.
Fu Chunquan, Yin Hongjun, Liu Yu, et al. *Petroleum Geology & Development in Daqing*, 2007, 26(5): 53-56.
- [12] Azari M, Wooden W O, Coble L E. A complete set of Laplace transforms for finite conductivity vertical fractures under bilinear and trilinear flows [C]/SPE/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 1990: 20556-MS.
- [13] 单彩艳, 孙逊, 王晓冬. 有限导流垂直裂缝典型曲线新算法 [J]. 油气井测试, 1998, 7(2): 22-25.
Shan Caiyan, Sun Xun, Wang Xiaodong. *Well Testing*, 1998, 7(2): 22-25.
- [14] 郭大立, 曾晓慧, 赵金洲, 等. 垂直裂缝井试井分析模型和方法[J]. 应用数学和力学, 2005, 26(5): 527-533.
Guo Dali, Zeng Xiaohui, Zhao Jinzhou, et al. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2005, 26(5): 527-523.

(责任编辑 刘志远)

本期推理小游戏答案

手表是 B 发现的。

因为三个人都在现场, 所以 B 说他不知道是谁先发现的, 是假的; 故他说他不是, 是真的。所以是 B 最先发现的手表。