

低渗油层压裂水平井两相流研究¹⁾

姚同玉^{*,2)} 王 明[†] 朱维耀[†] 李继山^{**}

^{*}(中国石油大学石油工程学院, 山东东营 257061)

[†](北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

^{**}(胜利油田有限责任公司地质科学研究院, 山东东营 257015)

摘要 依据压裂水平井不同流动区域的流动规律, 将压裂水平井的渗流分为裂缝中的高速非达西流动区、裂缝控制影响的椭圆渗流区、远离裂缝的基质非达西渗流区, 考虑启动压力梯度的影响, 对压裂水平井两相渗流进行了分析, 得到了低渗透油层压裂水平井的产量公式. 研究表明, 裂缝的导流能力越大, 压裂水平井的产量越高. 但随着开采时间的增加, 其产量递减幅度越大; 压裂裂缝长度越小, 压裂水平井的初始产量越高. 但随着生产时间的推移, 压裂裂缝的长度越大, 产量的递减幅度越小; 中间裂缝长, 两翼裂缝短的情况下, 压裂水平井的产量最高.

关键词 压裂水平井, 两相渗流, 裂缝, 低渗透

中图分类号: TE319 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2011)01-066-04

ANALYSIS OF TWO-PHASE PERCOLATION OF FRACTURED HORIZONTAL WELLS IN LOW PERMEABILITY OIL RESERVOIRS¹⁾

YAO Tongyu^{*,2)} Wang Ming[†] ZHU Weiyao[†] LI Jishan^{**}

^{*}(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Shandong Dongying 257061, China)

[†](Civil and Environmental Engineering School, University of Science Technology Beijing, Beijing 100083, China)

^{**}(Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield Company Ltd., Shandong Dongying 257015, China)

Abstract According to flow characteristics of different flow areas of fractured horizontal wells in low permeability oil reservoirs, the vadose region of fractured horizontal wells can be divided into three districts, the non-Darcy flow district with a high speed controlled by cracks, the ellipse flow district and the matrix non-Darcy flow district. Two-phase porous flow mathematical models of matrix non-Darcy flow with start-up pressure gradient are built. The results indicate that the production goes with the increase of fracture conductivity; the incremental scope of production decreases with the increase of production time; initial production of fractured horizontal decreases progressively with the increase of fracture length, the incremental scope of production decreases with the increase of fracture length; the production of fractured horizontal wells is the maximum in the situation with a long median crack and a short two-way crack.

Key words fractured horizontal well, two-phase flow, fracture, low permeability

由于低渗透油藏渗流阻力大, 连通性差, 油井自然产能很低, 通常要对低渗透油藏采用水平井压裂的方法来提高油藏产能. Giger^[1] 首先论及水平井

压裂问题, 此后国内外许多学者研究了低渗透油藏压裂水平井单相稳态和非稳态产能预测并得到了一些有价值的成果^[2-8]. 邓英尔等^[9] 建立了未压裂水

2010-02-26 收到第 1 稿, 2010-04-06 收到修改稿.

1) 中石油股份公司项目资助 (020132-1-2).

2) 姚同玉, 1976 年生, 女, 博士, 副教授, 主要从事油藏工程、多孔介质渗流物理和提高采收率等方面的教学与科研工作.

E-mail: yaotongyu@126.com

平井油水两相非达西椭球三维渗流数学模型；姜瑞忠等^[10]研究了非均质油藏未压裂水平井两相渗流问题，而对压裂水平井的两相渗流问题研究尚少。

本文考虑裂缝之间的干扰、裂缝与水平段同时生产的情况，推导了低渗油藏压裂水平井油水两相渗流的产量公式，并分析了压裂水平井产量的影响因素。

1 压裂水平井油水两相渗流数学模型

为简化问题，特做如下假设：

- (1) 油藏中不存在自由气体，只有油水两相；
- (2) 油藏为均质和各向同性；
- (3) 裂缝为垂直于水平井筒的垂直裂缝，裂缝高度等于油层厚度。

根据流体在不同的流动区域表现出不同流动规律，可把低渗压裂水平井每条压裂裂缝的流动划分成 3 个物理区域：I 区为压裂裂缝内的高速非达西流动区；II 区为裂缝控制范围内的椭圆渗流区；III 区为人工裂缝的基质非达西渗流区（见图 1）。

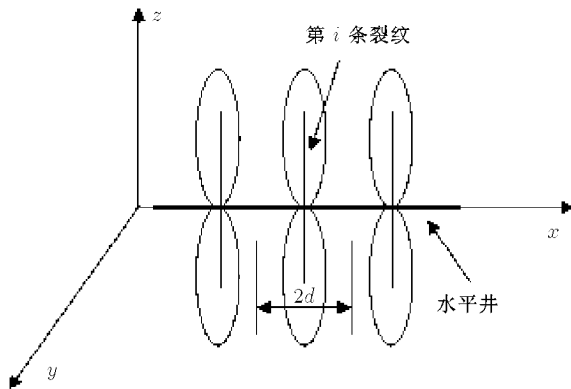


图 1 水平井压裂情况下水平井、裂缝及油藏物理模型

依据不同流动区域内的不同渗流特征，不考虑水平井井筒内的压降损失及压裂裂缝之间的流动干扰，则任意一条裂缝控制范围内的渗流规律可表示为：

1.1 油藏深处油水渗流特点

油藏深处距离压裂裂缝区较远，流体流动为低速非达西平面径向流，渗流过程特征参数为渗流半径 r 和渗流时间 t ，渗流偏微分方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[-rk \frac{k_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right) \right] + \phi \frac{\partial s_o}{\partial t} &= 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[-rk \frac{k_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right) \right] + \phi \frac{\partial s_w}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

等饱和度平面移动的微分方程为

$$\frac{dr}{dt} = \frac{Q_1 f'_w}{2\pi r h \phi} \quad (2)$$

式中， k 为基质渗透率， k_{ro} 为油相相对渗透率， k_{rw} 为水相相对渗透率， G 为启动压力梯度， s_o 为含油饱和度， s_w 为含水饱和度， μ_o 为油的黏度， μ_w 为水的黏度， ϕ 为孔隙度， f'_w 为含水率的导数， Q_1 为注入量。

1.2 裂缝控制椭圆区域内的椭圆不定常渗流

裂缝椭圆区内，压力波以旋转椭球方式传播，该区流动为椭圆渗流。基于扰动椭圆的概念，用发展的矩形族

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= x_f \cdot \text{ch} \xi \\ \bar{y} &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} b \sin \eta d\eta = \frac{2x_f}{\pi} \text{sh} \xi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

来描述等压椭圆族。则 II 区中的椭圆渗流偏微分方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left[\frac{k k_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{\partial p}{\partial \bar{y}} - G \right) \right] &= \phi \frac{\partial s_o}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left[\frac{k k_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p}{\partial \bar{y}} - G \right) \right] &= \phi \frac{\partial s_w}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

流量公式为

$$Q = 8x_f^2 \sinh \xi \cosh \xi \left[\frac{k k_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{\partial p}{\partial \bar{y}} - G \right) \right] \quad (5)$$

式中， ξ 为椭圆外边界， x_f 为人工压裂裂缝的长度。

1.3 裂缝中的高速非达西非定常渗流

前人从大量的实验中发现，当渗流速度超过一定值后，速度与压力梯度之间的线性关系开始破坏。经过理论推导，得出了流体非线性渗流的各种表达式，其中以二项式的高速非线性渗流模型用的最为广泛^[11]。

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} v + \zeta \rho v^2 \quad (6)$$

人工压裂裂缝中的高速非线性渗流模型可简化为一维的情况

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dp}{dx} &= \frac{\mu_o}{k_f k_{ro}} v_o + \zeta \rho_o v_o^2 \\ -\frac{dp}{dx} &= \frac{\mu_w}{k_f k_{rw}} v_w + \zeta \rho_w v_w^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

裂缝中的流速表达式为

$$v = v_o + v_w = \frac{Q}{w_f h} \quad (8)$$

式中, h 为油层厚度, ζ 为高速非线性渗流系数, 即惯性系数 [11].

$$\zeta = -\frac{1}{[\phi(1-s_w)]^2} \exp\left(45 - \sqrt{407 - 81 \ln\{k_f / \{\phi[(1-s_w)]\}\}}\right) \quad (9)$$

式中, k_f 为裂缝渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; w_f 为压裂裂缝的宽度; Q 为地层中的流量; ρ 为油的密度.

1.4 定解条件

初始条件为

$$p(r = r_w) = p_o, \quad p(r = l_a) = p_w, \quad s_w(\xi, 0) = s_{wc}$$

内边界条件为

$$s_w(0, t) = 1 - s_{or}$$

外边界条件是在三角形的 C 点上压力导数为零, 即

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_C = 0$$

交界面条件为

$$p_1 = p_2 \Big|_{x_f = \xi_0}, \quad p_2 = p_3 \Big|_{r = \xi}$$

1.5 压裂水平井基质-裂缝耦合流动方程

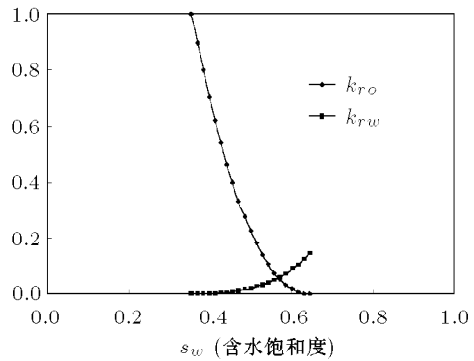
因为流体在两种流动的交界处压力相等, 裂缝内的流动和裂缝外的流动相加即得此时压裂生产井的流量. 由上述几式可得

$$p_w - p_o - G(r - r_o) - \frac{2x_f G}{\pi} [\sinh(\xi) - \sinh(\xi_0)] = \frac{\mu Q x_f}{k_f w_f h} + \int_0^{x_f} \zeta \rho \left(\frac{Q}{w_f h}\right)^2 dx + \frac{Q \mu_o}{4\pi k x_f} \int_{\xi_0}^{\xi} \frac{1}{\sinh(\xi) \left(\frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{ro}}{\mu_o}\right)} d\xi + \frac{Q}{k \phi A^2} \int_0^t Q_I dt \int_{s_{w0}}^{s_{wf}} \frac{f_w''}{\left(\frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{ro}}{\mu_o}\right)} ds_w \quad (10)$$

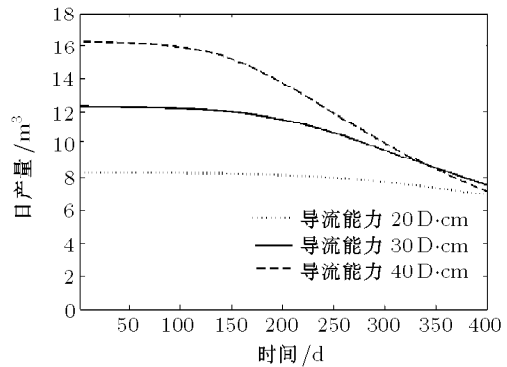
由单条裂缝的产量公式可知, 裂缝控制产量的大小主要取决于裂缝控制椭圆的面积. 若两条压裂裂缝之间的距离较短, 则压裂水平井生产时两条裂缝之间的渗流干扰较大, 此时两条压裂裂缝控制的椭圆会相交. 此时两条压裂裂缝生产时的产量为每条压裂裂缝的产量减去两条压裂裂缝控制椭圆相交范围的产量. 同理可得到具有多条压裂裂缝的压裂水平井的产量公式.

2 水平井压裂产能影响因素分析

某水平井压开 3 条裂缝, 裂缝半长分别为 106 m, 118 m, 130 m, 有效厚度为 3.0 m, 空气渗透率为 $13.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均孔隙度 17.5%. 地面原油密度平均为 0.854 g/cm^3 , 原油黏度平均为 $20.9 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. 预测 30 d 时, 产油 $8.5 \text{ m}^3/\text{d}$. 其相对渗透率曲线如图 2.



(a) 油水相对渗透率曲线



(b) 导流能力与产量的变化关系曲线

图 2 不同裂缝导流能力与产量的变化关系曲线

由图可以看出, 裂缝的导流能力越大, 压裂水平井的初始产量越高, 但随着开采时间的增加, 其产量递减幅度越大. 在 350 d 后导流能力为 40 D·cm 的产量要低于导流能力为 30 D·cm 产量.

由图 3 可以看出, 压裂裂缝长度越小, 压裂水平井的初始产量越高, 但随着生产时间的推移, 压裂裂缝的长度越大, 产量的递减幅度越小. 这表明压裂裂缝的长度越大, 压裂水平井的有效开发时间越长.

由图 4 可以看出靠近直井端裂缝长度长, 远离直井端的裂缝长度短的情况下, 压裂水平井的产量居中; 靠近直井端裂缝长度短, 而远离直井端的裂缝长度长的情况下, 压裂水平井的产量最低. 综合

来看中间裂缝长，两翼裂缝短的情况下，压裂水平井的生产效果最好。

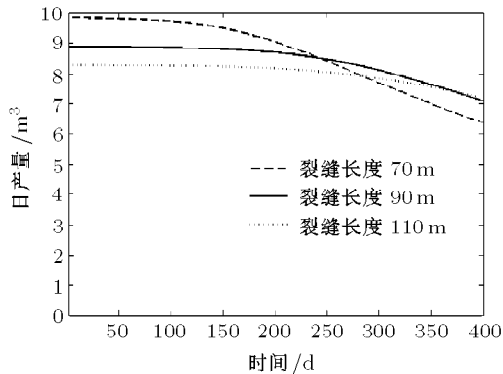


图 3 不同裂缝长度与产量的变化关系曲线

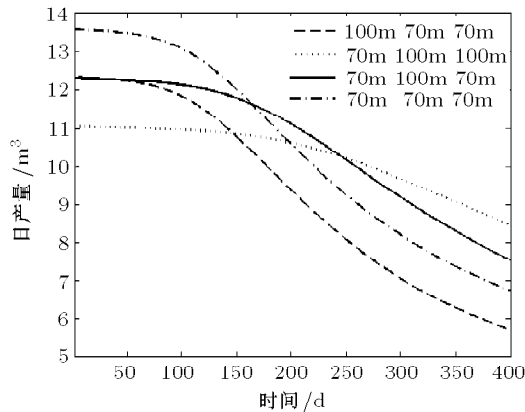


图 4 相同裂缝间距不同裂缝半长情况下产量变化关系曲线

3 结 论

(1) 建立了反映低渗透油层整体压裂基质-裂缝耦合物理本质的开采过程三区模型，建立了考虑启动压力梯度的低渗透油藏菱形反九点注水开发井网基质与裂缝耦合的渗流数学模型。

(2) 模拟结果表明，裂缝的导流能力越大，压裂水平井的初始产量越高，但随着开采时间的增加，其产量递减幅度越大；压裂裂缝长度越小，压裂水平井的初始产量越高，但随着生产时间的推移，压裂裂缝的长度越大，产量的递减幅度越小；中间裂缝长，两翼裂缝短的情况下，压裂水平井的生产效果最好。

(3) 通过对开采井网、井距的分析，进一步揭示了整体压裂基质-裂缝耦合两相流动开采变化规律。

参 考 文 献

- Giger FM. Reservoir engineering aspects of horizontal drilling. SPE, 13024, 1984. 1-7
- Ozkan E, et al. Horizontal wells pressure analysis. SPEFE Dec., 1989. 567-575
- Davlau F, et al. Pressure analysis for horizontal wells. SPEFE Dec. 1998. 716-724
- 徐严波, 齐桃, 杨凤波等. 压裂后水平井产能预测新模型. 石油学报, 2006, 27(1): 89-91 (Xu Yanbo, Qi Tao, Yang Fengbo, et al. New model for productivity test of horizontal well after hydraulic fracturing. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(1): 89-91 (in Chinese))
- 张学文, 方宏长, 袁怿楠等. 低渗透率油藏压裂水平井产能影响因素. 石油学报, 1999, 27(1): 51-55 (Zhang Xuewen, Fang Hongchang, Qiu Yinan, et al. A study on factors affecting the performance of hydraulically fractured horizontal well in low permeability reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 27(1): 51-55 (in Chinese))
- 宋付权, 刘慈群, 张慧生. 低渗透油藏中水平井两相渗流分析. 水动力学研究与进展, 2002, 17(2): 181-188 (Song Fuquan, Liu Ciqun, Zhang Huisheng. Analysis of two-phase percolation of a horizontal well in low-permeability porous media. *Journal of Hydrodynamics*, 2002, 17(2): 181-188 (in Chinese))
- 李廷礼, 李春兰, 吴英等. 低渗透油藏压裂水平井产能计算新方法. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(2): 48-52 (Li Tingli, Li Chunlan, Wu Ying, et al. A new way to calculate fractured horizontal wells productivity in low permeability oil reservoirs. *Journal of China University of Petroleum*(Edition of Natural Science), 2006, 30(2): 48-52 (in Chinese))
- 李军诗, 侯建锋, 胡永乐等. 压裂水平井不稳定渗流分析. 石油勘探与开发, 2008, 35(1): 92-96 (Li Junshi, Hou Jianfeng, Hu Yongle, et al. Performance analysis of unsteady porous flow in fractured horizontal wells. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(1): 92-96 (in Chinese))
- 邓英尔, 刘慈群. 水平井两相非达西球形渗流特征线解与差分解. 西南石油学院学报, 1999, 21(4): 30-34 (Deng Ying'er, Liu Ciqun. Characteristic linear and finite difference solutions of two-phase non-Darcy spheroidal flowing through porous media for horizontal well. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1999, 21(4): 30-34 (in Chinese))
- 姜瑞忠, 陶磊, 张娜等. 低渗非均质油藏水平井油水两相产能分析. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 384-388 (Jiang Ruizhong, Tao Lei, Zhang Na, et al. Analysis of production for two-phase horizontal wells in low permeability heterogeneous reservoirs. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(3): 384-388 (in Chinese))
- Frederic JDC, et al. New correlations to predict non-darcy flow coefficients at immobile and mobile water saturation. SPE 28541, 1994

(责任编辑: 刘俊丽)