

文章编号: 0253-2697(2009)03-0430-04

基于动态渗透率效应的低渗透油藏试井解释模型

姚军 刘顺

(中国石油大学石油工程学院 山东东营 257061)

摘要: 对于低渗透油藏,驱替压力梯度较小时,渗透率和启动压力梯度随着驱替压力梯度的增加而增加;当驱替压力梯度大于某临界值时,渗透率和启动压力梯度不再发生变化,保持为常数。基于这种动态渗透率效应,建立了低渗透油藏的试井解释模型,并采用数值方法进行了求解。计算结果表明,在相同最小和最大渗透率条件下,动态渗透率效应持续时间越短,对应的启动压力梯度越大,则压力响应及其导数曲线抬升越大;比基于启动压力梯度的试井解释模型的压力响应及其导数曲线抬升幅度要平缓很多,计算结果更加符合实际情况;比封闭边界效应使导数曲线抬升的幅度要小且时间要早,分辨点明显。

关键词: 低渗透油藏;动态渗透率效应;试井解释模型;数值方法;启动压力

中图分类号: TE348

文献标识码: A

Well test interpretation model based on mutative permeability effects for low permeability reservoir

YAO Jun LIU Shun

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The permeability and start-up pressure gradient will increase with the increase of the displacement pressure gradient when the displacement pressure is low in the low-permeability reservoir. However, those parameters will become constant numbers as the displacement pressure gradient is over a critical value. A well test interpretation model was established by taking into account the mutative permeability effect. This model was solved with simulation method. The calculation showed that the shorter lasting time of mutative permeability corresponded a greater start-up pressure gradient, and the double log pressure and derivative pressure curves were more obviously upward, when the maximum value of permeability was equal with the minimum value. The curves calculated with the new model were more gentle than those obtained from the start-up pressure gradient method. More logical and reliable results could be obtained. The pressure curve of mutative permeability effect was more gentle, and the upward time of the curves was earlier than that obtained from the closed boundary effect, and the distinction point was obvious on the curves.

Key words: low-permeability reservoir; mutative permeability effect; well test interpretation model; numerical method; start-up pressure

研究低渗透油藏时,认为地层流体只有在作用压力大于某一临界值时才能流动^[1-2],在数学表征时,应该考虑用曲线渗流规律^[3-4]。但因其表征较困难,因而目前在工程计算中采用启动压力梯度来描述低渗透介质的渗流规律^[5-10]。这显然是一种近似的处理,曲线渗流规律方法才真实反映了低渗介质渗流的固有本质。笔者基于实际的曲线渗流规律形式,建立了低渗透油藏的试井解释模型,并采用数值方法进行了求解。

1 动态渗透率效应

对于低渗透油藏,渗透率是随着压力梯度的变化

而变化的。当压力梯度大于某一临界值时,渗透率不再发生变化。笔者将这一现象称为低渗透介质的动态渗透率效应。这样在表征低渗透介质的渗流规律时,认为流动服从非线性渗流定律,渗透率和启动压力梯度是随驱替压力梯度变化的。

低渗透油藏的运动方程描述如下:

$$v = - \frac{10^{-3} \times K(dp/dr)}{\mu} \left[\frac{dp}{dr} - G(dp/dr) \right] \quad (1)$$

式中: v 为渗流速度, m/s; K 为低渗透介质的渗透率,是驱替压力梯度的函数, μm^2 ; G 为对应于渗透率 K 时的启动压力梯度,是驱替压力梯度的函数, MPa/m。

基金项目: 中国石油化工集团公司科技攻关项目“低渗透油藏渗流机理与应用”(P06074)部分成果。

作者简介: 姚军,男,1964年3月生,1984年毕业于华东石油学院,现为中国石油大学(华东)教授,博士生导师,主要从事油气田开发工程的教学和科研工作。E-mail: youcang@hdpu.edu.cn

油藏的压力分布,从而可知道井底的每一时间步长的压力。压力导数用井筒网格的压力差除以网格距离,再乘以时间步长而得到。

3.2 动态渗透率效应及其对应的启动压力梯度的处理方法

采用显式方法来处理动态渗透率效应与其对应的启动压力梯度问题,即利用上一时间步长计算得到的压力分布来确定下一时间步长的渗透率及其对应的启动压力梯度。压力梯度 J 的计算式为

$$J = \frac{|p_{i-1}^j - p_i^j|}{0.5(r_{i-1} + r_i)} = \frac{|p_{i-1}^j - p_i^j|}{r_{i-0.5} - r_{i-1} + r_{i+0.5} - r_i} \quad (14)$$

如果 J 所对应的渗透率及其对应的启动压力梯度值处于临近两离散渗透率与其对应的启动压力梯度值之间,即 $J_{n-1} < J < J_n$,此时用插值法处理,有

$$K_J = K_{n-1} + \frac{J - J_{n-1}}{J_n - J_{n-1}} (K_n - K_{n-1})$$

$$G_J = G_{n-1} + \frac{J - J_{n-1}}{J_n - J_{n-1}} (G_n - G_{n-1}) \quad (15)$$

如果 $J = J_{\min}$,则

$$K_J = K_{\min}$$

$$G_J = G_{\min} \quad (16)$$

如果 $J = J_{\max}$,则

$$K_J = K_{\max}$$

$$G_J = G_{\max} \quad (17)$$

式中: K_{\min} 为动态渗透率的最小值, μm^2 ; G_{\min} 为 K_{\min} 对应的启动压力梯度,对应驱动压力梯度 J_{\min} ; K_{\max} 为动态渗透率的最大值, μm^2 ; G_{\max} 为 K_{\max} 对应的启动压力梯度,当达到 K_{\max} 时对应的驱动压力梯度为 J_{\max} 。

4 计算结果

4.1 不同动态渗透率效应的压力响应对比

有3种不同渗流流动的无限大油藏,由渗流曲线可得到其渗透率和压力梯度的关系(图1);其启动

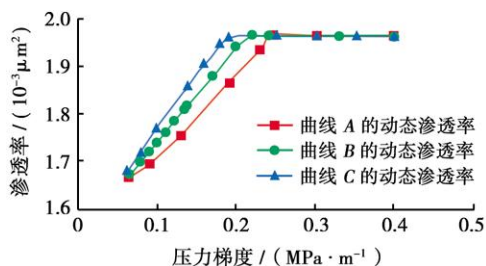


图1 渗透率随压力梯度变化曲线

Fig. 1 Curves for permeability vs. pressure gradient

压力梯度与驱动压力梯度的关系曲线见图2。相关基础数据为: $q = 50 \text{ m}^3/\text{d}$, $h = 10 \text{ m}$, $\mu = 5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $B = 1$,

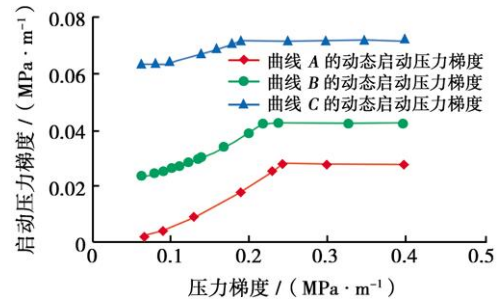


图2 启动压力梯度随压力梯度变化曲线

Fig. 2 Curves for start-up pressure gradient vs. pressure gradient

$r_w = 0.1 \text{ m}$, $\phi = 0.1$, $C_t = 0.0036 \text{ MPa}^{-1}$, $p_e = 20 \text{ MPa}$ 。计算结果如图3所示。

从图3可以看出,对于一定的 s 、 C 值,在相同的最小和最大渗透率值条件下,动态渗透率效应持续时间越短,启动压力梯度越大,反映在试井压力响应及其导数的双对数曲线上翘越大。

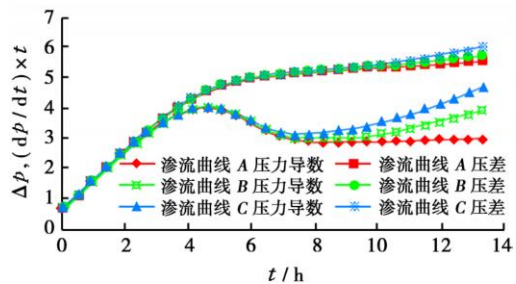


图3 当 $s = 0.1$ 、 $C = 1 \text{ m}^3/\text{MPa}$ 时的双对数及导数典型曲线

Fig. 3 Typical curves for double log pressure and derivative of pressure at $s = 0.1$ 、 $C = 1 \text{ m}^3/\text{MPa}$

4.2 不同方法模型压力响应的对比

对某油藏用3种不同方法计算其压力响应(基础参数同前)。这3种方法分别为: 中高渗流方法。此时 $K = 5.313 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $G = 0 \text{ MPa}/\text{m}$,即不考虑动态渗透率效应也不考虑启动压力梯度的模型; 带启动压力梯度方法。此时 $K = 5.313 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $G = 0.054 \text{ MPa}/\text{m}$,即只考虑带启动压力梯度的模型; 本文基于动态渗透率效应方法。此时 $K = (1 \sim 5.313) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $G = (0 \sim 5.4) \times 10^{-2} \text{ MPa}/\text{m}$ 。计算结果如图4(a)和图4(b)所示。

从图4(a)可以看出:对于无限大油藏,笔者所建立的模型压力响应及其导数曲线上翘的幅度比考虑带启动压力模型压力响应及其导数曲线上翘的幅度小且平缓^[11-13],比较符合实际情况。从图4(b)可以看出:对于有界封闭油藏,封闭边界会导致3种方法的压力导数曲线上翘,它们上翘的斜率相同。同时,动态渗透率效应使导数曲线上翘的幅度比封闭边界效应使之上翘的幅度小;其上翘幅度小于1且比封闭边界效应影

响的上翘早。两种影响的分辨点明显。

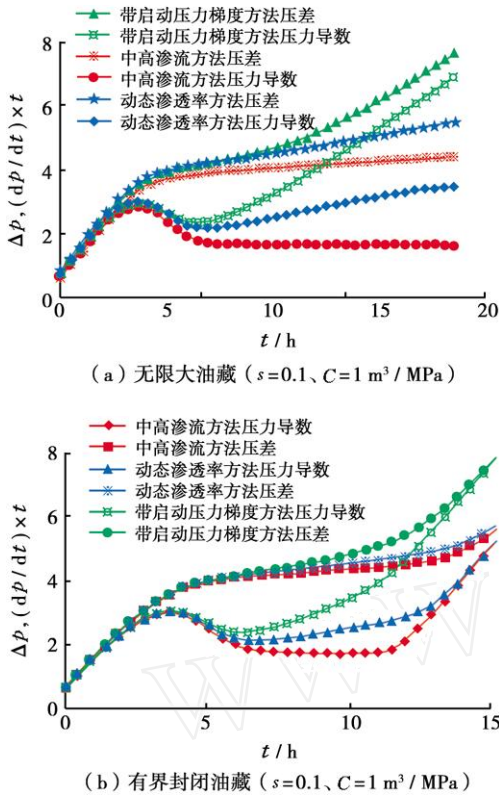


图 4 3 种不同方法的双对数及导数典型曲线

Fig. 4 Typical pressure curves of double log and derivative for three different methods

5 结 论

- (1) 引入了低渗透介质的动态渗透率效应概念,建立了反映低渗透介质真实渗流过程的试井解释模型。
- (2) 在相同的最小和最大渗透率值条件下,动态渗透率效应持续时间越短,启动压力梯度越大,反映在试井压力响应及其导数的双对数曲线上翘越大。
- (3) 所建立的模型压力响应及其导数曲线上翘的幅度比考虑带启动压力模型压力响应及其导数曲线上翘的幅度小且平缓,符合实际情况。
- (4) 动态渗透率效应比封闭边界效应使导数曲线上翘的幅度小且时间早,两种影响的分辨点明显。

参 考 文 献

[1] 闫庆来,何秋轩,尉立岗,等.低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究[J].西安石油学院报:自然科学版,1990,5(2):1-6.
Yan Qinglai, He Qiuxuan, Wei Ligang, et al. A laboratory study on percolation characteristics of single phase flow in low-permeability reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 1990, 5(2): 1-6.

[2] 黄延章.低渗透油层非线性渗流特征[J].特种油气藏,1997,4(1):9-14.
Huang Yanzhang. Nonlinear percolation feature in low permeability reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 1997, 4(1): 9-14.

[3] 邓英尔,刘慈群.低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应

[J].石油学报,2001,22(4):72-77.
Deng Ying'er, Liu Ciqun. Mathematical model of nonlinear flow law in low permeability porous media and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 72-77.

[4] 智天翼,陈家军,王恩志.低渗非达西多相渗流的数值模拟分析[J].安全与环境学报,2004,4(5):81-83.
Zhi Tianyi, Chen Jiajun, Wang Enzhi. Simulated analysis of low permeability of non-Darcy multi-phase seepage[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(5): 81-83.

[5] 程时清,徐论勋,张德超.低速非达西渗流试井典型曲线拟合法[J].石油勘探与开发,1996,23(4):50-53.
Cheng Shiqing, Xu Lunxun, Zhang Dechao. Type curve matching of well test data for non-Darcy flow at low velocity[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(4): 50-53.

[6] Wu Y S. Flow and displacement of Bingham non-Newtonian fluids in porous media[R]. SPE 20051, 1990.

[7] 郭永存,卢德唐,马凌霄.低渗透油藏渗流的差分法数值模拟[J].水动力学研究与进展:A辑,2004,19(3):288-293.
Guo Yongcun, Lu Detang, Ma Lingxiao. Numerical simulation of fluid flow in low permeability reservoir using finite difference method[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser. A, 2004, 19(3): 288-293.

[8] 王道富,李忠兴,赵继勇,等.低渗透油藏超前注水理论及其应用[J].石油学报,2007,28(6):78-81,86.
Wang Daofu, Li Zhongxing, Zhao Jiyong, et al. Advance water flooding theory for low-permeability reservoirs and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 78-81, 86.

[9] 冉新权,程启贵,屈雪峰,等.特低渗透砂岩油藏水平井网形式研究[J].石油学报,2008,29(1):89-92.
Ran Xinquan, Cheng Qigui, Qu Xuefeng, et al. Study on horizontal well pattern in ultra-low permeability sandstone reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 89-92.

[10] 计秉玉,李莉,王春艳.低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法[J].石油学报,2008,29(2):256-261.
Ji Bingyu, Li Li, Wang Chunyan. Oil production calculation for areal well pattern of low-permeability reservoir with non-Darcy seepage flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 256-261.

[11] 成履民,甘庆明,成珍,等.低渗油藏非线性渗流压力分析[J].油气井测试,2005,14(3):1-4.
Cheng Suimin, Gan Qingming, Cheng Zhen, et al. Pressure analysis for non-linear percolation flow in low permeability reservoir[J]. Well Testing, 2005, 14(3): 1-4.

[12] 尚建林,杨学文,郭建国,等.低速非线性渗流试井分析理论研究[J].新疆石油地质,2002,23(4):321-325.
Shang Jianlin, Yang Xuewen, Guo Jianguo, et al. Theoretical study on well test analysis of low velocity nonlinear flow[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(4): 321-325.

[13] 姚约东,葛家理.低渗透油藏不稳定渗流规律的研究[J].石油大学学报:自然科学版,2003,27(2):55-58,62.
Yao Yuedong, Ge Jiali. Non-steady in low-permeability reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2003, 27(2): 55-58, 62.

(收稿日期 2008-08-14 改回日期 2008-11-30 编辑 黄小娟)