

# 低渗透疏松油藏注水井试井分析

雷霆<sup>1</sup>, 孙召勃<sup>2</sup>, 王妍妍<sup>2</sup>, 刘双琪<sup>1</sup>, 王世朝<sup>1</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057

2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580

**摘要** 低渗透疏松油藏由于渗透率较低, 存在一定的启动压力梯度, 且由于储层岩石胶结疏松, 存在中等-较强的应力敏感性, 导致原油渗流速度很慢, 难以获得充足资料对储层做出合理的解释, 油井试井效果难以取得满意的效果, 而低渗透油藏注水井试井可以很好地解决这个难题。综合考虑流度比、启动压力梯度、应力敏感性等的影响, 建立了低渗透疏松油藏注水井低速非达西渗流有效井径试井的数学模型。由于所建模型具有强非线性, 采用稳定的有限差分格式利用 Newton-Raphson 迭代法求得数值解, 进一步研究了压力动态特征及其影响因素, 绘制了用于实际资料拟合分析的典型试井曲线。

**关键词** 低渗透; 注水井; 启动压力梯度; 试井; 应力敏感性

**中图分类号** TE353

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.011

## Well Test Analysis of Water Injection Wells in Low-permeability Unconsolidated Oil Reservoirs

LEI Xiao<sup>1</sup>, SUN Zhaobo<sup>2</sup>, WANG Yanyan<sup>2</sup>, LIU Shuangqi<sup>1</sup>, WANG Shichao<sup>1</sup>

1. Zhanjiang Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Zhanjiang 524057, China

2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

**Abstract** Low-permeability unconsolidated reservoirs have a threshold pressure gradient to a certain extent due to low permeability. In addition, the reservoir rock shows medium to strong stress sensitivity because of the unconsolidated cementation, resulting in low oil flow velocity. Therefore, it is difficult to obtain sufficient information to make a reasonable interpretation. Water-injection well test is a good way to solve this problem. Based on analysis of the mobility ratio, the effects of stress sensitivity and threshold pressure gradient, a mathematical model for water-injection well test in low-permeability unconsolidated reservoirs was established. Since this model has strong nonlinearity, stable finite-difference scheme and Newton-Raphson iteration method were adopted to obtain the arithmetic solution. The pressure performance and influencing factors were also evaluated, and the typical well testing curves for analysis of real data were plotted.

**Keywords** low-permeability unconsolidated reservoir; water-injection well; threshold pressure gradient; well test; stress sensitivity

近年来,随着低渗透油气藏的大力开发<sup>[1]</sup>,国内对低渗透油藏渗流和试井进行了大量研究,主要着眼于低渗透油藏中油井试井分析方法和低速非达西渗流试井分析方法<sup>[2-8]</sup>。事实上,由于低渗透油藏渗透率低且存在启动压力梯度,油在地层中传播速度很慢,即便延长关井时间也很难获得足够分析的资料,难以对储层做出合理的解释<sup>[9-11]</sup>。同时水平井及压裂井越来越广泛应用于开采低渗透油藏<sup>[12-14]</sup>,而水平井及压裂井的低速非达西试井分析相当困难。鉴于注水井不同,一方

面,油田大多采用直井注水,注水井单井注水量大于油井单井采油量,如反九点井网注采比 1:3;另一方面,水在地层中压力传播速度较快,因此注水井关井测试不需要像油井那样长的时间就可以获得可供分析储层特性的资料,而且试井解释相对简单。注水井试井是一种非常值得应用的方法。因此,有必要对低渗透油藏注水井试井进行系统研究,为现场注水井试井提供理论依据。

然而,目前大部分注水井试井研究忽略了储层应力敏感

收稿日期:2014-02-16;修回日期:2014-05-13

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05051)

作者简介:雷霆,高级工程师,研究方向为油气藏工程和油气藏数值模拟,电子信箱:leix@cnooc.com.cn

引用格式:雷霆,孙召勃,王妍妍,等.低渗透疏松油藏注水井试井分析[J].科技导报,2014,32(20):69-73.

性的影响<sup>[15]</sup>,对于存在中等-强应力敏感效应的胶结疏松低渗透层试井解释结果偏差与实际较大,本文综合考虑了流度比、启动压力梯度、应力敏感性等的影响,建立低渗透疏松油藏注水井低速非达西渗流有效井径试井的数学模型,并对模型进行数值求解。

### 1 数学模型的建立

将低渗油藏平面上径向划分为内、外两个区,内区为在注水井附近形成的相对高渗的水区,远离注水井的是未被注入水侵入的低渗油区,如图1所示。

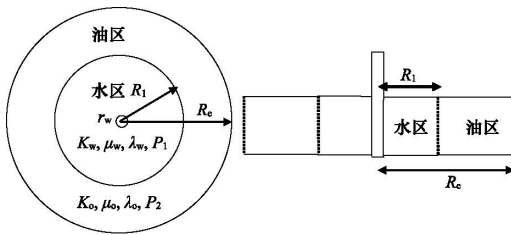


图1 低渗透油藏注水井两区复合模型示意

Fig. 1 Two zone composite model of an injection well in low-permeability reservoir

考虑如下假设条件:1) 低渗透油藏中一口注水井以定水量注水;2) 注水井注水前,地层压力分布均匀;3) 流体单相弱可压缩,在地层中的流动为等温流动,流体流动满足低速非达西定律,具有启动压力梯度;4) 考虑井筒储存和表皮系数的影响,忽略重力和毛管力的影响;5) 油藏为无限大地层,内外区的交界面半径为  $r_{1D}$ ,内外区的交界面处,地层压力无突变,无流量损失;6) 地层受压敏感性的影响,渗透率可表示为

$$K = K_0 e^{\gamma(P - P_i)} \quad (1)$$

其中,  $\gamma$  为渗透率模量,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $K$  为储层渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $K_0$  为储层初始渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $P$  为地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $P_i$  为原始地层压力,  $\text{MPa}$ 。

根据这些假设条件,考虑井筒储存和表皮效应的影响,利用有效井径概念建立无因次数学模型

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 P_{1D}}{\partial r_D^2} - \gamma_D \left( \frac{\partial P_{1D}}{\partial r_D} \right)^2 + \left( \frac{1}{r_D} - \lambda_{wD} e^{-S} \gamma_D \right) \frac{\partial P_{1D}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{wD} e^{-S}}{r_D} = \frac{1}{C_D} e^{(\gamma_D P_{1D} - 2S)} \frac{\partial P_{1D}}{\partial t_D} & 1 < r_D < r_{1D} \\ \frac{\partial^2 P_{2D}}{\partial r_D^2} - \gamma_D \left( \frac{\partial P_{2D}}{\partial r_D} \right)^2 + \left( \frac{1}{r_D} - \lambda_{oD} e^{-S} \gamma_D \right) \frac{\partial P_{2D}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{oD} e^{-S}}{r_D} = \frac{1}{C_D} e^{(\gamma_D P_{2D} - 2S)} \frac{\partial P_{2D}}{\partial t_D} & r_{1D} < r_D < \infty \\ P_{1,2D}(r_D, t_D = 0) = 0 \\ \left( \frac{\partial P_{1D}}{\partial r_D} + \lambda_{wD} e^{-S} \right)_{r_D=1} = e^{\gamma_D P_{1D}|_{r_D=1}} \left( -1 + \frac{dP_{wD}}{dt_D} \right) \\ P_{1D}(r_{1D}, t_D) = P_{2D}(r_{2D}, t_D) \\ \left( \frac{\partial P_{1D}}{\partial r_D} + \lambda_{wD} e^{-S} \right)_{r_D=r_{1D}} = M \left( \frac{\partial P_{2D}}{\partial r_D} + \lambda_{oD} e^{-S} \right)_{r_D=r_{1D}} \\ P_{2D}|_{r_D=\infty} = 0 \end{cases}$$

无因次数定义为

$$\begin{aligned} P_{1D} &= \frac{2\pi K_1 h (P_i - P_1)}{q \mu_w} & P_{2D} &= \frac{2\pi K_2 h (P_i - P_2)}{q \mu_o} & r_D &= \frac{r}{r_w} \\ C_D &= \frac{C}{2\pi r_w^2 h \varphi C_{11}} & t_D &= \frac{K_1 t}{\mu_w C_{11} r_w^2 C_D} & \lambda_{wD} &= \frac{2\pi K_1 h r_w \lambda_w}{q \mu_w} \\ & & & & \lambda_{oD} &= \frac{2\pi K_2 h r_w \lambda_o}{q \mu_o} & \gamma_D &= \frac{q \mu \gamma}{2\pi K_1 h} \end{aligned}$$

其中,  $P_{1D}$  为水区无因次压力;  $P_{2D}$  为油区无因次压力;  $C_D$  为无因次井筒储存系数;  $r_D$  为无因次半径;  $t_D$  为无因次时间;  $\lambda_{wD}$  为无因次水相启动压力梯度;  $\lambda_{oD}$  为无因次油相启动压力梯度;  $\gamma_D$  为无因次渗透率模量;  $K_1$  为水区储层渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $K_2$  为油区储层渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $P_1$  为水区储层压力,  $\text{MPa}$ ;  $P_2$  为油区储层压力,  $\text{MPa}$ ;  $h$  为储层厚度,  $\text{m}$ ;  $q$  为注水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $\mu_w$  为水黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_o$  为油黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $M$  为油区油水流量比。

### 2 模型的数值求解

低渗透疏松油藏注水井试井模型中的偏微分方程为二阶非线性方程,解析解难以得到,采用数值方法求解。

#### 2.1 空间和时间的离散

靠近井底附近的压力梯度大,而远离井底附近的压力梯度较小。为了保证数值算法的稳定性和结果的准确性,采用先密后疏的不均匀网格划分,即等对数步长

$$r_{Di} = e^{\left( \frac{\lg R_{eD}}{N} \right) i} \quad i = 0, 1, 2, \dots, N$$

同样对时间变量采用先密后疏的不均匀网格

$$t_{Dj} = 10^{(j/50-2)} \quad j = 0, 1, 2, \dots, M$$

其中,  $N$  为径向上的最大网格数,  $M$  为迭代求解的最大时间步数。

#### 2.2 模型的离散

取空间坐标变换  $x = \ln r_D$ , 将不等距径向坐标转换为等距直角坐标,对试井模型进行离散。渗流方程离散为

$$\begin{aligned} a(i)P_{Di-1}^j + b(i)P_{Di}^j + c(i)P_{Di+1}^j + d(i)\left(P_{Di}^j\right)^2 + e(i)P_{Di}^j P_{Di+1}^j + \\ f(i)\left(P_{Di+1}^j\right)^2 + g(i)e^{\gamma_D P_{Di}^j} + h(i)P_{Di}^j e^{\gamma_D P_{Di}^j} + k(i) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} a(i) &= \frac{1}{\Delta x^2}, \quad b(i) = -\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{\lambda_{wD} e^{-S} \gamma_D e^{-(i-1)\Delta x}}{\Delta x}, \quad c(i) = -\frac{1}{\Delta x^2} - \frac{\lambda_{wD} e^{-S} \gamma_D e^{-(i-1)\Delta x}}{\Delta x}, \\ d(i) &= -\frac{\gamma_D}{\Delta x^2}, \quad e(i) = \frac{2\gamma_D}{\Delta x^2}, \quad f(i) = -\frac{\gamma_D}{\Delta x^2}, \quad g(i) = \frac{e^{2(i-1)\Delta x} P_{Di}^{j-1}}{C_D e^{2S} \Delta t_D}, \\ h(i) &= -\frac{e^{2(i-1)\Delta x}}{C_D e^{2S} \Delta t_D}, \quad k(i) = \lambda_{wD} e^{-S} e^{-(i-1)\Delta x} \end{aligned}$$

内边界条件离散为

$$b(1)P_{1D1}^j + c(1)P_{1D2}^j + g(1)e^{\gamma_D P_{1D1}^j} + h(1)P_{1D1}^j e^{\gamma_D P_{1D1}^j} + k(1) = 0 \quad (3)$$

其中,  $b(1) = -\frac{1}{\Delta x}$ ,  $c(1) = \frac{1}{\Delta x}$ ,  $k(1) = \lambda_{oD} e^{-S}$ ,  $h(1) = -\frac{1}{\Delta t_D}$ ,

$$g(1) = 1 + \frac{P_{1D1}^{j-1}}{\Delta t_D}。$$

外边界离散为

$$P_{2DN}^j = 0 \quad (4)$$

初始条件离散为

$$P_{1Dn}^j = P_{2Dn}^j = 0 \quad (5)$$

内外交界面处方程离散为

$$P_{D(n-1)}^j - (1+M)P_{Dn}^j + MP_{D(n+1)}^j + \Delta x e^{(n-1)\Delta x} (M\lambda_{oD} e^{-S} - \lambda_{wD} e^{-S}) = 0 \quad (6)$$

其中,  $P_{Dn}^j$  代表交界面处压力。

### 2.3 求解方法

式(2)~式(4)构成  $N$  个非线性方程组,采用 Newton-Raphson 迭代法<sup>[22]</sup>进行求解,采用列主元三角分解法求解迭代过程中的线性方程组,避免了三角分解时除数绝对值很小甚至为零的情况出现,保证算法稳定性;初始时刻压力已知,由  $j$  时间步上的压力求解  $j+1$  时间步上的压力时,通过求解非线性方程组得到,最后便求出井底压力  $P_{wDn}^j$ 。

## 3 结果分析

应用建立的数学模型进行数值求解后,绘制出考虑应力敏感性低渗透油藏注水井典型试井曲线,作参数敏感性分析。

设置不同的  $\lambda_w$  和  $\lambda_o$  值,可以得到不同组合模型的试井曲线,其中  $C_D = 10, S = -1, M = 0.5$ 。图2分别为水区达西+油区达西模型、水区达西+油区非达西耦合模型和水区非达西+油区非达西模型的试井曲线,横坐标为无量纲时间  $t_D$  与无量纲储集系数  $C_D$  的比值,纵坐标为无量纲压力  $P_D$  与无量纲压力导数  $dP_D/d(t_D/C_D) \cdot t_D/C_D$ ,其中相同颜色靠上的曲线为无量纲压力,靠下的曲线为无量纲压力导数。从图中可以看出,水区达西+油区达西模型的典型试井曲线后期没有上翘段,导数曲线上水区径向流段和油区径向流段均为水平线。水区达西+油区非达西耦合模型典型试井曲线后期油区径向流段出现上翘,而水区径向流段没有上翘,为0.5的水平线。水区非达西+油区非达西模型试井曲线无论水区径向流段还是油区径向流段均出现上翘。

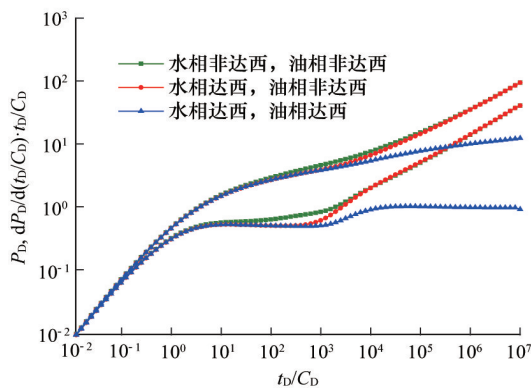
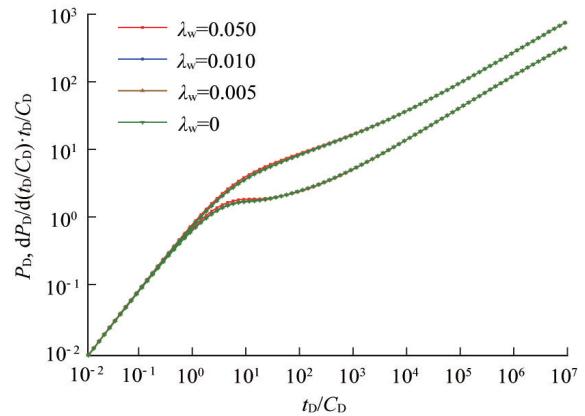


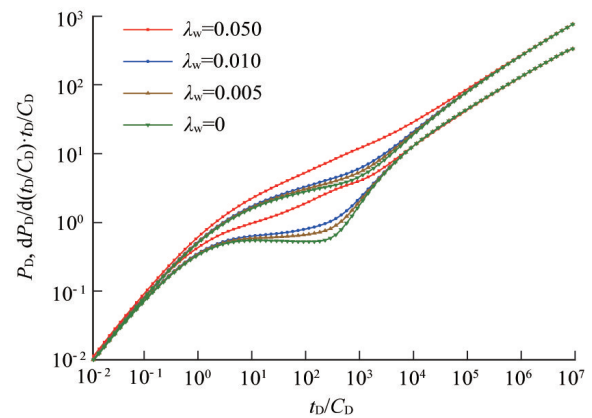
图2 不同模型试井曲线对比

Fig. 2 Comparison of well test curves Comparison of different models

由图3可以看出,内区水相的启动压力梯度  $\lambda_w$  对试井曲线的影响,通过研究发现,当  $S > 0$  时,以  $S = 2$  为例,  $\lambda_w$  对试井曲线的影响很小,此时水区达西+油区非达西耦合模型和水区非达西+油区达西模型相差无几;当  $S \leq 0$  时,以  $S = -1$  为例,  $\lambda_w$  主要影响试井曲线的早期水区径向流段,  $\lambda_w$  越大,曲线早期水区径向流段上翘越大,非达西效应越明显。



(a)  $S=2$



(b)  $S=-1$

图3 水相启动压力梯度对试井曲线的影响

Fig. 3 Impact of aqueous phase starting pressure gradient on testing curves

由图4可以看出,外区油相的启动压力梯度  $\lambda_o$  越大,试井曲线上翘时间出现时间越早,上翘幅度越大,非达西效应越明显。

由图5可以看出,渗透率模数对试井曲线的影响,渗透率模数  $\gamma$  越大,试井曲线上翘幅度越大,应力敏感性越明显。

由图6可以看出,油水流量比  $M$  影响试井曲线上外区径向流段的高低,油水流量比越小,外区径向流段越高。

由图7可以看出,水区半径主要影响试井曲线早期水区径向流,水区半径越大,水区径向流段持续的时间就越长。

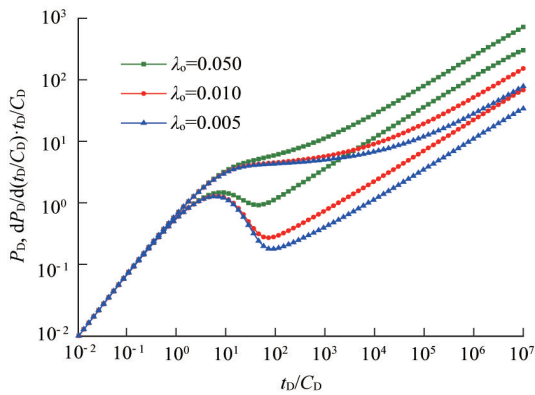


图4 油相启动压力梯度对试井曲线的影响

Fig. 4 Impact of oleic phase starting pressure gradient on testing curves

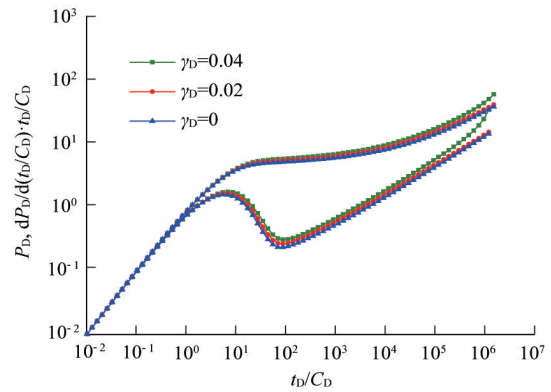


图5 渗透率模数对试井曲线的影响

Fig. 5 Impact of permeability modulus on testing curves

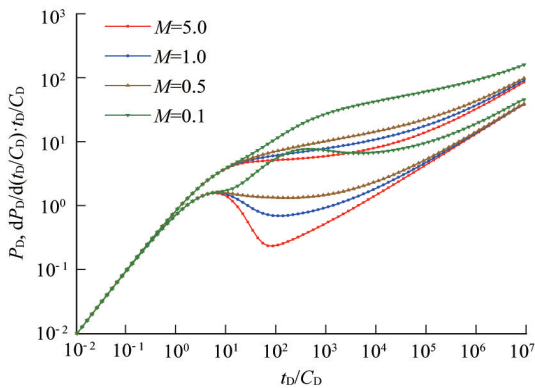


图6 流度比对试井曲线的影响

Fig. 6 The impact of mobility ratio on testing curves

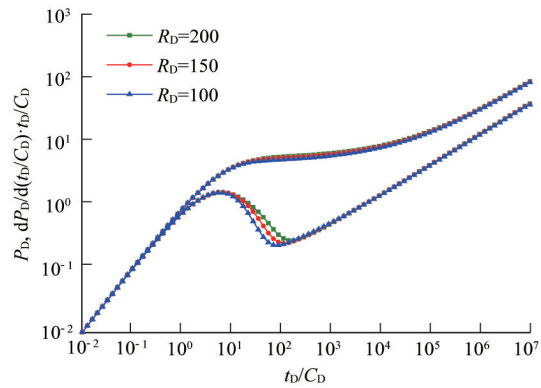


图7 水区半径对试井曲线的影响

Fig. 7 Impact of water zone radius on testing curves

#### 4 实例应用

某注水井,所在油藏为低渗透疏松储层,孔隙度为0.276,油层厚度为10 m,  $S_w=0.605$ ,原油体积系数为1.116,原油黏度为1.361 mPa·s,综合压缩系数为  $3.75 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ 。

利用本文建立的低渗透疏松油藏注水井试井方法,选取水区达西油区非达西耦合模型,进行双对数曲线拟合结果如图8所示。井筒储集系数  $6.5 \times 10^{-3} \text{ m/MPa}$ ,表皮系数1.08,启动压力梯度  $0.0053 \times 10^{-3} \text{ MPa/m}$ ,渗透率模数为0.032,地层

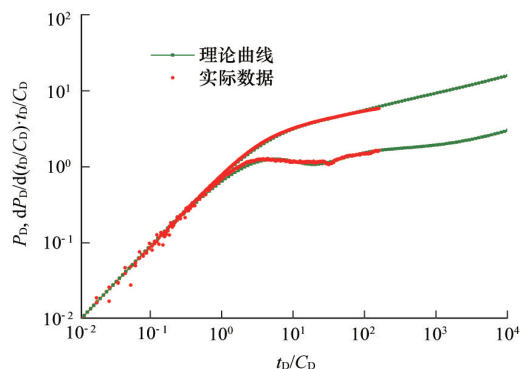


图8 注水井试井解释曲线

Fig. 8 Well-test interpretation curve of injection well

渗透率  $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,流度比为0.405,地层平均压力10.5MPa。

#### 5 结论

1) 综合考虑启动压力梯度、应力敏感性、流度比等的影响,建立了低渗透油藏注水井低速非达西渗流有效井径试井的数学模型,并对模型进行数值求解。

2) 分析了不同耦合模型的注水井试井曲线特征,水区达西+油区达西模型下的试井曲线没有出现上翘段,水区达西+油区非达西耦合模型下的试井曲线在油区径向流段出现上翘,水区非达西+油区非达西模型下的试井曲线在水区径向流段和油区径向流段均出现上翘。

3) 分析了启动压力梯度、应力敏感性、流度比、水区半径等因素对试井曲线的影响,并做出了相应理论图版。

4) 对于同时存在启动压力梯度与中等-强应力敏感性的低渗透疏松油藏,若忽略应力敏感性的影响,则试井解释结果与实际偏差较大,因此在开发中必须考虑应力敏感,对储层参数进行综合解释。

5) 结合一口注水井试井数据,拟合双对数曲线可对储层参数进行快速解释。

## 参考文献 (References)

- [1] 王光付, 廖荣凤, 李江龙, 等. 中国石化低渗透油藏开发状况及前景[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 84-89.  
Wang Guangfu, Liao Rongfeng, Li Jianglong, et al. The development situation and future of low permeability reservoirs of SINOPEC[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(3): 84-89.
- [2] 尹洪军, 何应付. 变形介质油藏渗流规律和压力特征分析[J]. 水动力学进展与研究, 2002, 17(5):538-546.  
Yin Hongjun, He Yingfu. Analysis on flow through porous media and pressure characteristics deformed reservoirs [J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(5): 538-546.
- [3] 黄延章. 低渗透油层渗流机理研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.  
Huang Yanzhang. Seepage mechanism of low permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [4] 祝春生, 程林松, 阳忠华, 等. 特低渗透砂岩油藏渗流特性研究[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(2): 102-104.  
Zhu Chunsheng, Cheng Linsong, Yang Zhonghua, et al. Flowing characteristics in extra-low permeability sandstone reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(2): 102-104.
- [5] 方甲中, 程林松, 任胜利, 等. 动边界复合油藏低速非达西渗流试井分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(5): 104-108.  
Fang Jiazhong, Cheng Linsong, Ren Shengli, et al. Well test analysis of low velocity and non-darcy flow in composite reservoir with dynamic boundary[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(5): 104-108.
- [6] 张艳玉, 张卫东, 崔国亮, 等. 低渗透双重介质油藏试井解释模型[J]. 陕西科技大学学报: 自然科学版, 2012, 30(3): 65-69.  
Zhang Yanyu, Zhang Weidong, Cui Guoliang, et al. Well test interpretation model for dual media low permeability reservoir[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2012, 30(3): 65-69.
- [7] 刘启国, 杨旭明, 魏红梅, 等. 动边界影响的低渗双重介质油气藏试井解释模型[J]. 西南石油学院学报: 自然科学版, 2004, 26(5): 30-33.  
Liu Qiguo, Yang Xuming, Wei Hongmei, et al. Study of well-test model of low permeability's dual-pore media with flowing boundary in oil and gas [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2004, 26(5): 30-33.
- [8] 张德志, 王子胜, 战艾婷. 高速非达西渗流时三重介质油藏的压力响应[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(1): 97-110.  
Zhang Dezhi, Wang Zisheng, Zhan Aiting. Pressure response of triple-porosity-media oil reservoirs with high-velocity non-Darcy flow [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(1): 97-110.
- [9] 尹洪军, 付春权, 万贵春, 等. 多重复合低渗透油藏注水井压力动态分析[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 70-75.  
Yin Hongjun, Fu Chunquan, Wan Guichun, et al. Pressure transient analysis of water injection well in multiple composite low permeability reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(4): 70-75.
- [10] 刘佳洁, 孟英峰, 李皋, 等. 三区流体复合注水井试井模型研究[J]. 石油天然气学报, 2013(2): 120-125.  
Liu Jiajie, Meng Yingfeng, Li Gao, et al. Three-zone fluid composite well test model of injection wells [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013(2): 120-125.
- [11] 刘曰武, 刘俊丽, 刘振庆. 注水井试井方法综述[J]. 油气井测试, 1998, 7(1): 69-73.  
Liu Yuewu, Liu Junli, Liu Zhenqing. Overview of the well testing method for injection wells [J]. Well Testing, 1998, 7(1): 69-73.
- [12] 黄勇, 李春兰, 程林松, 等. 低渗透油藏垂直裂缝井产能评价新方法[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(1): 99-101.  
Huang Yong, Li Chunlan, Cheng Linsong, et al. A new method of estimating productivity of vertically fractured wells in low permeability oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(1): 99-101.
- [13] 雷群, 胥云, 蒋廷学, 等. 用于提高低-特低渗透油气藏改造效果的缝网压裂技术[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 237-241.  
Lei Qun, Xu Yun, Jiang Tingxue, et al. "Fracture network" fracturing technique for improving post-fracturing performance of low and ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 237-241.
- [14] 汪全林, 唐海, 吕栋梁, 等. 低渗薄层油藏多垂直裂缝水平井产量计算公式[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(5): 42-45.  
Wang Quanlin, Tang Hai, Lü Dongliang, et al. Production formula for the horizontal well in thin low-permeability reservoir with multiple vertical fracturing fractures [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2010,25(5):42-45.
- [15] 李维国, 黄炳家, 同登科, 等. 数值计算方法[M]. 东营: 石油大学出版社, 2004.  
Li Weiguo, Huang Bingjia, Tong Dengke, et al. Numerical calculation methods[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2004.

(责任编辑 刘志远)

 科技导报  
SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

## 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。