

聚合物驱油过程中不同粘度比情况下波及系数计算方法

王 强, 计秉玉, 聂 俊

(中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:在分析聚合物驱油机理的基础之上,建立了考虑吸附因子和不可入孔隙体积的聚合物驱油的五点井网模型。应用流管法将二维平面模型简化为若干个一维驱替模型,从而建立了聚合物驱油的一维数学模型。利用前缘驱替理论,通过求解每根流管中的驱替动态,然后叠加至整个五点井网,从而模拟二维平面上完整的聚合物驱油过程。将该计算过程编制成 VBA 程序,绘制了不同含水率条件下,聚合物驱油波及系数与流度比的关系图版,为矿场实施聚合物驱提高采收率项目时,对聚合物溶液粘度的配制提供了理论依据。将计算得到的聚合物驱油动态参数和实验结果对比,发现两者具有较好的一致性。文章建立的流管模型的优点在于输入参数较少,计算快捷,适应性强,同时克服了传统矩形网格油藏数值模拟带来的数值弥散作用,为使用聚合物驱油的油田早期筛选及油藏动态管理提供了一种有效工具。

关键词:粘度比;波及系数;聚合物驱油;五点井网;采收率

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Calculation methods of sweep efficiency under different viscosity ratios for polymer flooding process

Wang Qiang, Ji Bingyu, Nie Jun

(Petroroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering the absorbing factor and inaccessible pore, a five-spot well pattern model of polymer flooding was built on the base of polymer flooding mechanism analysis. By applying the stream tube method, the areal two-dimensional model was simplified to several one-dimensional displacement models, and a one-dimensional mathematical model of polymer flooding was established. On the basis of frontal displacement theory, the whole process of two-dimensional polymer flooding was simulated by superimposing the displacement performance in each stream tube on the five-spot well pattern. This calculation process was compiled into the VBA software to map the relation between the sweep efficiency and mobility ratios under different water cut conditions are draw, thus providing a theoretical criteria for the polymer solution viscosity preparation when performing IOR through polymer flooding. Comparison between the dynamic parameters with the experimental results shows a good consistency. The advantages of the stream tube model set up in this paper are as following: less input parameters, quick calculation, well-adapting, and no dispersion effect of numerical simulation as in the traditional rectangular grid. Therefore, this method offers an effective tool for the early selection for polymer flooding and reservoir dynamic management.

Key words: viscosity ratio, sweep efficiency, polymer flooding, five-spot well pattern, oil recovery

波及系数是描述油田开发效果的关键性参数,扩大波及体积是各种提高采收率方法所追求的目标。高粘原油水驱采收率较低的一个主要原因是注入水与原油的粘度比较低,舌进严重,波及系数低,从而影响了采收率,所以聚合物驱方法要保证注入体系有一定的粘度。但这个粘度一般是以聚合物的浓度或用量做为代价得到的,因此存在聚合物浓度和扩大波及体积效果的平衡和优化问题。而实现这个平衡或优化的基础是

搞清楚粘度比(流度比)与波及系数之间的关系^[1-2],因此,两者关系的研究是化学驱油方案设计的指导依据。

Craig 等人^[3-4]利用物理模拟方法研究了不同粘度比情况下的水驱波及系数,并给出了图版,但没有给出存在吸附等物理化学作用对浓度以及水相渗透率的影响作用,其它类似方法的深入研究尚未见到报导。大庆油田、胜利油田和河南等油田都实施了较大规模的聚合物驱^[5-7],但对粘度比(流度比)的认识和界限

收稿日期:2014-05-08;修订日期:2014-06-20。

第一作者简介:王强(1982—),男,工程师,油气藏开发工程。E-mail:wanqiang2008.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化工程股份有限公司科技部基础前瞻项目(P09030)。

确定方面还存在较大差异。例如胜利油田提出粘度比界限为0.15~0.5,河南油田粘度比为1.0以上,而大庆油田高达2.0左右。因此,有必要从渗流力学理论上深入探讨粘度比对波及体积和采收率的影响,深化化学驱油藏工程方法研究,进一步指导化学驱油设计。

1 计算方法

五点井网是聚合物驱油比较常用的一种井网形式。由五点井网几何特征,可以认为油藏由一系列如图1所示的计算单元组成。采出井和注入井相等,一口井产出或注入量是该计算单元的八倍。而在见水时间,波及系数等方面与计算单元相同。因此,本文主要以图1所示计算单元作为研究对象。

由于窜流在拟流管不会发生,所以将计算单元剖分成一系列拟流管,计算出分流管开发指标,求和可得出整个计算单元开发状态。

1.1 浓度、饱和度流管方程

假定水相中有聚合物和水组分,油相中有油组分。考虑到不可及孔隙体积和岩石吸附作用,聚合物浓度连续方程为^[8]:

$$A(\xi)\Phi \frac{\partial}{\partial t} [C_{pw}(S - \Phi_d + C_{ps})] + q_t \frac{\partial}{\partial \xi} (C_{pw}f_w) = 0 \quad (1)$$

式中: $A(\xi)$ ——计算单元任意位置的横截面积, m^2 ;

Φ ——孔隙度, %;

C_{pw} ——水相中聚合物质量浓度, g/L ;

S ——饱和度, %;

Φ_d ——不可入孔隙体积百分数, %;

ξ ——距离, m ;

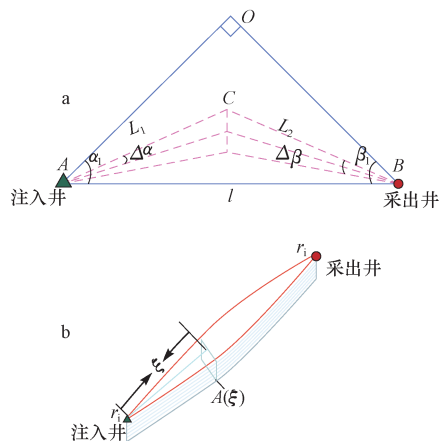


图1 五点法井网计算单元与单流管示意图^[1]

Fig. 1 Schematic diagram of five-spot well pattern calculation unit and flow tube^[1]

a. 五点法井网计算单元; b. 单流管示意图

t ——时间, 天;

C_{ps} ——岩石中聚合物质量浓度, g/L ;

q_t ——通过计算单元的流量, m^3/d ;

f_w ——含水率, %。

根据物质平衡原理,假设水组分浓度1,导出水组分连续性方程为:

$$A(\xi)\Phi \frac{\partial S_w}{\partial t} + q_t \frac{\partial f_w}{\partial \xi} = 0 \quad (2)$$

公式(1)和公式(2)结合,可导出特定聚合物浓度在 C_{pw} 下的运移速度^[9]:

$$V_{cpw} = \frac{d\xi}{dt} = \frac{q_t f_w}{A(\xi)\Phi(S_w - \Phi_d + C_{pd})} \quad (3)$$

式中: V_{cpw} ——聚合物浓度在 (C_{pw}) 下的运移速度, m/d ;

S_w ——含水饱和度, %;

C_{pd} ——描述岩石吸附能力参数, $C_{pd} = \frac{\partial C_{ps}}{\partial C_{pw}}$ 由实

验室给出, 小数。

同样可以导出与特定浓度 (C_{pw}) 相应的含水饱和度 (S_w) 下的水相运移速度:

$$V_{sw} = \frac{q_t \frac{\partial f_w}{\partial S_w}}{A(\xi)\Phi} \quad (4)$$

式中: V_{sw} ——与特定浓度 (C_{pw}) 相应的含水饱和度 (S_w) 下的水相运移速度, m/d 。

考虑到在聚合物段塞前缘处,两者相等,得到

$$\frac{f_w}{S_w - \Phi_d + C_{pd}} = \frac{\partial f_w}{\partial S_w} \quad (5)$$

求解不同时刻前缘位置 ξ :

$$\xi = \frac{q_t \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{swf}}{A(\xi)\Phi} \quad (6)$$

$$V_{\Phi f} = Q_t \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{swf} \quad (7)$$

$$\int_0^t q_t dt = Q_t \quad (8)$$

式中: Q_t ——通过计算单元的液体总量, m^3 。

求解第一时刻饱和度分布 $(S_w - \xi)$:

$$V_{\Phi}(\xi) = f'_w(S_w) Q_t \quad (9)$$

$$f'_w(S_w) = \frac{V_{\Phi}}{V_{\Phi f}} f'_w(S_{wf}) \quad (10)$$

给出某一时刻后, $V_{\Phi f}$ 和 $f'_w(S_{wf})$ 均为已知,由上式即可求出 $S_w - \xi$ 关系,即从注入井到前缘饱和度分布。前缘到达生产井时间:

$$V_{\Phi} = Q_t \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right)_{swf} \quad (11)$$

求出 Q_t , 即可求出达到时间。

油井见聚后某一时刻饱和度分布:

$$V_{\phi} = Q_i \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right) \quad (12)$$

式中 Q_i 为已知, 可以求出油井端饱和度 S_{wi} :

$$f'_w(S_w) = \frac{V_{\phi}}{V_{\phi f}} f'_w(S_{wi}) \quad (13)$$

经过上述计算, 可求出 $S_w \sim \xi$ 分布。

1.2 单元指标计算方法

计算单元由一系列流管构成, 由各流管的指标汇总即可得到单元指标。各流管之间在渗流区域内不存在质量交换问题, 但存在注入、采油井的流量分配, 且分配是动态的, 取决于各个流管综合流动特征, 以五点法井网为例进行分析。

1) 流量比例分配计算^[10-11]

如图1所示, 井距为 l , 厚度为 h , 将计算单元划分为 N 份, 几何参数如下:

$$\alpha_1 = \beta_1 = \pi/4 \quad (14)$$

$$\frac{\alpha_1}{\beta_1} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta} \quad (15)$$

$$\Delta\beta = \Delta\alpha = \frac{\pi}{4N} \quad (16)$$

第 i 个拟流管中线由 L_1 和 L_2 组成:

$$\alpha = (i-1)\Delta\alpha + 1/2 \quad (17)$$

中线长度:

$$L = l/\cos\alpha \quad (18)$$

ξ 处方程:

$$A(\xi) = 2h\xi \lg\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right) \quad (19)$$

对第 i 个拟流管, 由达西定律有:

$$-\frac{dp}{d\xi} = \frac{q_i}{A(\xi)K\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{1}{R_K} \frac{K_{rw}}{\mu_w}\right)} \quad (20)$$

式中: p ——压差, MPa;

K_{ro}, K_{rw} ——分别为油相和水相的相对渗透率, 小数;

μ_o, μ_w ——分别为油和水的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

R_K ——修正系数, 小数。

从而得到:

$$p_h - p_l = \frac{q_i}{K} \left[\int_0^{\xi} \frac{d\xi}{A(\xi) \left[\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{1}{R_K} \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right]} + \int_{\xi}^l \frac{d\xi}{A(\xi) \frac{K_{ro}}{\mu_o}} \right] \quad (21)$$

解出:

$$q_i = \frac{p_h - p_l}{R_i} \quad (22)$$

$$R_i = \frac{1}{K} \left[\int_0^{\xi f} \frac{d\xi}{A(\xi) \left[\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{1}{R_K} \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right]} + \int_{\xi f}^l \frac{d\xi}{A(\xi) \frac{K_{ro}}{\mu_o}} \right] \quad (23)$$

单元体总流量

$$Q_T = \sum_{i=1}^N q_i = (p_h - p_l) \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} \quad (24)$$

在已知 Q_T 情况下, 每个拟流管分配比例

$$r_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^N q_i} = \frac{1/R_i}{\sum_{i=1}^N 1/R_i} \quad (25)$$

由流管渗流物理方程可知, 在不同时刻 R_i 是变化的, 所以 r_i 也是时变的。计算流管分配比例的关键是计算不同时刻的阻力 R_i 。

2) 渗流阻力 R_i 计算迭代方法^[12-15]

第1步: 每个流管网格划分成 N 个;

第2步: 求出各流管水相前缘位置 ξ_f , 若 $\xi_f > L$ (流管长度), 则求出末端含水饱和度;

第3步: 求含水饱和度分布;

第4步: 求各流管各节点 $A(\xi) \left[\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{1}{R_K} \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right]$ 和

$A(\xi) \frac{K_{ro}}{\mu_o}$ 数值积分, 可计算出各流管 R_i 。

在时间段上, 采用迭代法给出时间间隔 Δt , $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ 。初始时刻 $t_0 = 0$ 时, $\xi_f = 0$, 仅由油相计算出 R_i 进而求出 r_i 。此参数计算 Δt 变化后 ξ_f 等参数, 从而求出 R_i, r_i 值。循环此过程, 即可计算出各时间阶段的流动特点。

3) 计算单元指标汇总

假定了注采平衡, 每根流管的产量等于相应的注入量。由相对渗透率曲线, 可计算出含水率, 即可求出每根流管的产油量。

产量指标

$$F_w = \sum_{i=1}^N (r_i \cdot f_{wi}) \quad (26)$$

$$Q_o = Q_i (1 - F_w) \quad (27)$$

由每根流管的水相前缘 ξ_i , 可以计算相应的水相波及到的面积 S_i , 从而得到累加各流管水淹面积 S 和波及系数 R_s :

$$S = \sum_{i=1}^N S_i \quad (28)$$

$$R_s = S/S_T \quad (29)$$

式中: S_T ——计算单元总面积, m^2 ;

2 计算分析

运用流管法可以非常方便地计算驱替动态特征。选取胜利油田某油藏为例, 根据计算模型运用 VBA 编译程序进行数值积分计算驱替动态。建立的油藏模型参数如下: 五点法井网, 井距为 250 m, 油藏油层厚度为 6 m, 束缚水饱和度为 36%, 油藏孔隙度为 15%, 剩

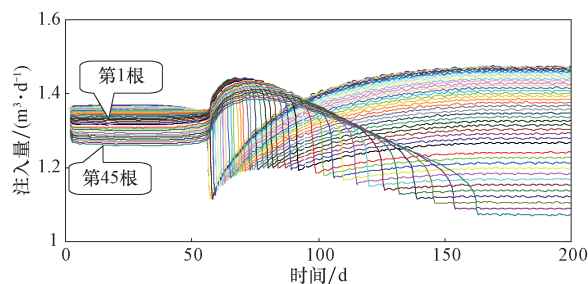


图2 流管注入量的变化

Fig. 2 Injection amount change of stream tube

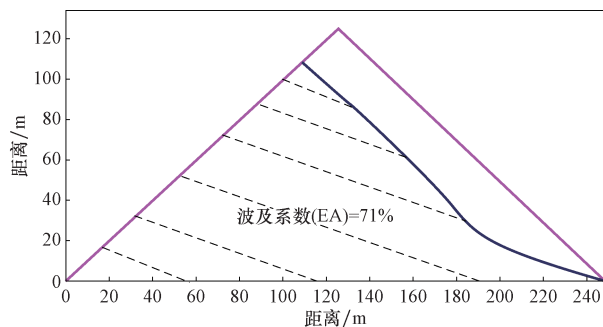


图3 流管模型计算突破时前缘位置

Fig. 3 Frontal displacement position calculated with stream tube model

余油饱和度为 20%, 注入井注入量 $60\text{ m}^3/\text{d}$, 注入(采出)井筒半径 15 cm, 以井网 1/8 作为一个计算单元, 分成 45 根拟流管, 设定计算的步长时间为 1 天, 步长距离为 1 m。油相粘度 $2\text{ mPa}\cdot\text{s}$, 按照流度比定义, 驱替相粘度 $0.4\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时, 及流度比为 1。

2.1 流管流量分配

利用上述计算方法, 可以计算每个阶段流管注入量变化(图2)。即主流管突破前, 各分流管计算分配的注入量相对不变, 一旦突破后, 计算的分配注入量相应减小, 随后逐渐增大。导致未突破流管分配的注入量逐渐增加直至突破的原因是主流管突破后分配的注入量相对减少。

2.2 前缘位置分布

为了验证流管模型的合理性, 用流管法计算的前缘位置分布图与 1937 年 Muskat 电模拟实验的前缘位置动态分布图进行对比, 得出形态基本相似; Muskat 室内电模拟实验突破波及系数 $(71 \pm 2)\%$, 拟流管法计算突破波及系数 71%。Muskat 电模拟室内实验结果与拟流管模型计算结果基本一致, 因此拟流管模型用于计算五点井网驱替动态是可靠的。

由图3可以看出沿主流线(注入端与采出端得连线)方向流速较高, 靠近主流线上的流管见水早, 吸水指数逐步提高, 注水量劈分系数逐渐加大, 驱替程度越来越高, 而远离主流线的流管注水量劈分系数逐渐变

小, 开采速度较慢, 从而形成了平面上开采的不平衡性, 在主流线方向出现了明显的舌进现象。

2.3 不同粘度比与波及系数及采出程度的关系

计算驱替相粘度在 0.001, 0.01, 0.1, 1, 2, 4, 10 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 下的波及系数; 对应流度比 8, 3.6, 1.8, 0.6, 0.4, 0.25, 0.11 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。含水率及分流曲线对含水饱和度导数曲线见图4及图5。

应用上述拟流管模型, 计算得出波及系数和采出程度变化的情况。从图6中可以看出, 突破越早, 波及系数越小, 驱替相粘度相对较小。驱替相粘度增加, 注入倍数增加, 采出程度也增加, 但增幅越来越小。在某特定驱替相粘度下, 前缘突破前, 采出程度呈线性变化; 前缘突破后, 采出程度达到某一个临界值。

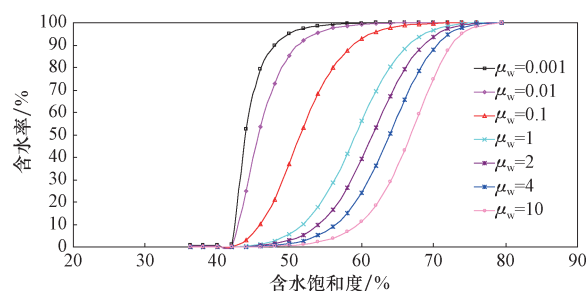


图4 驱替相不同粘度情况下的分流曲线

Fig. 4 Shunt curves of displacing phase at different viscosities

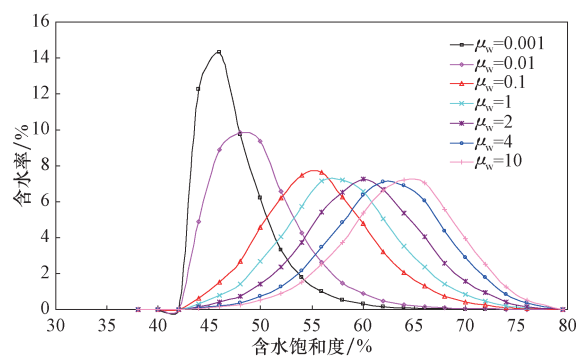


图5 驱替相不同粘度下含水率与含水饱和度的导数曲线

Fig. 5 Water cut and water saturation derivative curves of displacing phase at different viscosities

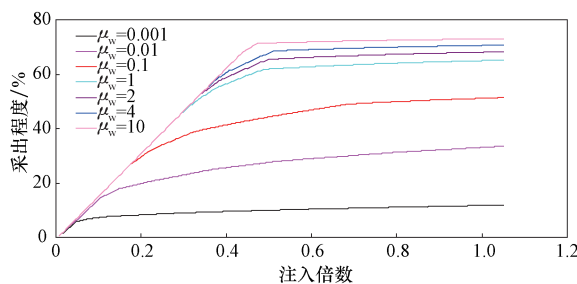
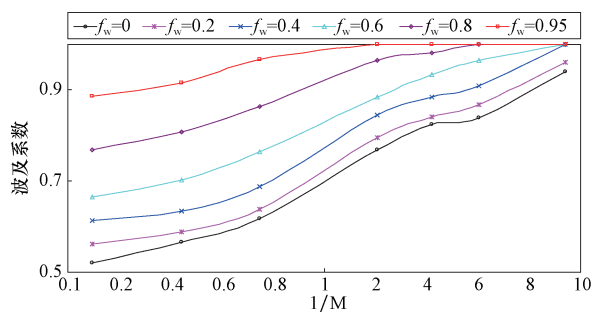


图6 采出程度与注入倍数关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between recovery degree and injection multiples

图7 流度比 M 倒数与波及系数关系曲线Fig. 7 Relationship curves between mobility ratio reciprocal M and sweep efficiency

驱替相粘度为 $0.001 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 拟主流管突破波及系数为 52%; 驱替相粘度为 $0.1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 拟主流管突破波及系数为 61.8%。粘度增加, 拟主流管突破波及系数相应增加。因此, 提取不同含水率波及系数与流度比倒数的相应数据, 即可描述二者的关系(图7)。可知波及系数随着流度比倒数的增加而增加, 即含水率增大, 波及系数也随之增大。从以上计算得出聚驱过程中要改善聚驱油水流动度比、扩大聚驱波及系数, 可以通过加入高分子聚合物增加水相粘度来实现。

3 结论

1) 本文建立了聚合物驱流管运动方程, 同时考虑了存在吸附等物理化学作用对浓度以及水相渗透率的影响作用。运用此流管法建立的五点井网化学驱粘度比与波及系数、采收率关系数学模型是合理可行的。

2) 提出了聚合物驱流管模型。将实际油层划分为一系列不同长度、不同渗透率的流管, 由于流管是按流线剖分的, 流管间不存在窜流, 所以整个油层的开发指标如产油量、含水率变化、波及系数等可先按单流管逐根分别计算, 然后迭加得到。与 1937 年麦斯盖特电模拟实验资料验证, 模型的计算结果比较可靠。

3) 流管法描述化学驱替过程具有重要意义, 可以克服使用矩形网格油藏数值模拟带来的数值弥散作用。

参 考 文 献

- [1] 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(02): 256-261
Ji Bingyu, Li Li, Wangchunyan. Oil production calculation for areal well pattern of low-permeability reservoir with non-Darcy seepage flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(02): 256-261
- [2] 计秉玉. 油藏工程理论与方法研究文集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 101-103.
Ji Bingyu. Collection reservoir engineering theory and methods [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 101-103.
- [3] G 鲍尔, 威尔海特. 注水[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 318.

- G Baul, Willhite. Water flooding [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 121-149.
- [4] Gupta A D, Pope G A, Sepehrmoori K. et al. Effects of erogeneity on chemical enhanced oil recovery // SPE Reservoir Engineering, 1998
- [5] 计秉玉. 国内外油田提高采收率技术进展与展望[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 111-117.
Ji Bingyu. Progress and prospects of enhanced oil recovery technologies at home and abroad[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 111-117.
- [6] 李海成. 大庆油田聚合物驱分注工艺现状[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 296-301.
Li Haicheng. Overview of separate injection technique for polymer flooding in Daqing oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 296-301.
- [7] 李朝霞, 夏惠芬. 聚合物溶液对孔隙结构特征的影响[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 479-483.
Li Zhaoxia, Xia Huifen. Effect of polymer solution on pore structure characteristics[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 479-483.
- [8] 陈朝晖, 邓勇, 许博, 等. 缝洞型底水油藏井底水突破时间预测方法——以塔河油田4区S48井为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 791-795.
Chen Zhaohui, Deng Yong, Xu Bo, et al. Bottom water breakthrough prediction in fractured-vuggy reservoirs with bottom water—an example from the well S48 in Block 4 of Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 791-795.
- [9] 杨超, 李彦兰, 徐兵祥, 等. 油水相对渗透率曲线非线性优化校正新方法及其应用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 394-399.
Yang Chao, Li Yanlan, Xu Bingxiang, et al. New nonlinear correction method of oil-water relative permeability curves and their application [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 394-399.
- [10] 葛家理, 宁正福, 刘月田, 等现代油藏渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 58-61.
Ge Jiali, Ning Zhengfu, Liu Yuetian, et al. The percolating flow mechanics of reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 58-61.
- [11] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 12.
Huang Yanzhang. Percolating flow mechanics of low permeability reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 12
- [12] 时宇, 杨正明, 黄延章. 低渗透储层非线性渗流模型研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 732-734.
Shi Yu, Yang Zhengming, Huang Yanzhang. Study on non-linear seepage flow model for low-permeability reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 732-734.
- [13] 计秉玉, 李莉, 李群, 等. 不同类型储层驱替速度对提高原油采收率的影响[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 58-65.
Ji Bingyu, Li Li, Li Qun, et al. Effects of displacement rate on enhance oil recovery efficiency in different types of reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 58-65.
- [14] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 124-126.
Li Daopin. The development of the low permeability sandstone oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 124-126
- [15] 李道品. 低渗透油田高效开发决策论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 8-9.
Li Daopin. Effective development technique of low permeability oil field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 8-9.

(编辑 董立)