

文章编号: 0253-2697(2010)05-0801-05

## 残留聚合物再利用数值模拟研究

冯其红<sup>1,2</sup> 史树彬<sup>1</sup> 付 晓<sup>3</sup> 戴彩丽<sup>1</sup> 唐恩高<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东青岛 266555; 2. 中国石油大学石油天然气工程学院 北京 102249;  
3. 中国石油大学外国语学院 山东东营 257061; 4. 中海油研究总院技术研究部 北京 100027)

**摘要:** 为了描述残留聚合物再利用过程中絮凝剂和絮凝体在地下的运移规律和渗流特征,在化学驱模型的基础上,考虑了固体组分的滞留以及对孔隙度和渗透率的影响,建立了残留聚合物再利用调剖的三维两相五组分数学模型。分别对模型各组分方程进行了差分离散,最后转化成线性方程组进行求解,其中在对絮凝剂和絮凝体质量守恒方程求解时,利用算子分离技术将方程转化为抛物线方程和双曲线方程进行求解,提高了计算的精度和速度。建立了概念模型,对影响残留聚合物再利用调剖效果的地层参数和注入参数进行了敏感性分析。结果表明,随着渗透率级差的增大,残留聚合物再利用提高采收率的幅度先增加后减小;注絮凝剂越早、注入量及注入浓度越大,残留聚合物再利用提高采收率效果越好。

**关键词:** 残留聚合物;絮凝剂;絮凝体;滞留;数值模拟;敏感性分析

中图分类号: TE357

文献标识码: A

## Numerical simulation of the residual polymer reutilization

FENG Qihong<sup>1,2</sup> SHI Shubin<sup>1</sup> FU Xiao<sup>3</sup> DAI Caili<sup>1</sup> TANG Engao<sup>4</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;  
2. Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
3. School of Foreign Languages, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;  
4. Technology Research Department, CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

**Abstract:** The present paper, based on chemistry flooding model and integrated with the detention of solid constituents and its influence on porosity and permeability, deciphered underground migration law and vadose characteristics of flocculant and floc units in the process of residual polymer reutilization by means of establishing a three-dimension, two-phase and five-component mathematical model for simulating profile control of residual polymer reutilization. An infinite difference method was used to discretize equations of each component in the model, respectively and then a system of linear equations was obtained. The mass-conservation equation of flocculants and floc-units was split into a parabolic equation for diffusion and a hyperbolic equation for convection by means of operator-splitting algorithms. This approach improved the precision and speed of calculations. The paper introduced a number of conceptual models and carried out sensitivity analyses on formation parameters and injection parameters that influence the effect of profile control on residual polymer reutilization. The results indicated that with the increase of permeability grade, the extent of residual polymer reutilization for the recovery enhancement increased first and then decreased, and that the earlier the flocculant injection, the bigger the quantity of injected flocculants and the higher the concentration of injected flocculants, the better the effect of residual polymer reutilization for the recovery enhancement.

**Key words:** residual polymer; flocculant; floc units; detention; numerical simulation; sensitivity analysis

聚合物驱油技术是一项推广规模大、具有经济价值的三次采油技术。该技术可提高采收率 8%~15%,但是聚合物驱后仍约有 50% 的原油不能被采出<sup>[1]</sup>,且聚合物驱后转后续水驱,由于不合理的流度比,存在严重的指进现象,水淹速度较快,大大降低了水的波及系数<sup>[2-5]</sup>。近几年许多学者研究了残留聚合

物再利用技术,主要是以室内研究为主<sup>[1,6-7]</sup>,矿场运用中注入参数的确定也是根据室内研究和经验得出,往往具有一定的不确定性,而且缺乏各组分在地下的运移动态及各参数间的定量关系研究。为了描述聚合物、絮凝剂、絮凝体在地下的运移规律和复杂的物理化学机理,笔者提出了残留聚合物再利用数值模拟研究。该方法

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06200)、山东省泰山学者建设工程(TS20070704)和国家油气重大专项(2008ZX05024-002)联合资助。

**作者简介:** 冯其红,男,1969年6月生,1993年毕业于石油大学(华东),现为中国石油大学(华东)教授,中国石油大学(北京)在站博士后,主要从事油藏工程和调剖堵水方面的教学和科研工作。E-mail: fengqihong@126.com

在考虑物化现象的基础上,通过数学描述建立各参数的定量关系,为现场聚合物驱后的调剖提供理论依据。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 假设条件

数学模型的基本假设为:①整个流动和化学反应过程是等温的;②流体只包括油、水两相渗流;③除油组分外,其余的组分均在水相中;④忽略化学剂对水相密度的影响,化学剂仅影响水相黏度和相对渗透率,对油相无影响;⑤絮凝剂和絮凝体对水相质量守恒方程的影响忽略不计;⑥聚合物在岩石表面上的吸附遵循 Langmuir 等温吸附理论,且吸附过程不可逆;⑦絮凝剂和絮凝体在孔隙中滞留后,流体渗流仍遵循达西定律。

### 1.2 渗流数学模型

按照质量守恒原理建立数学模型,油、水、聚合物方程与化学驱模型相同<sup>[8]</sup>。

油组分质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \left[ \frac{KK_{ro}}{\mu_o B_o} (\nabla p_o - \gamma_o \nabla D) \right] + q_o = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi S_o}{B_o} \right) \quad (1)$$

水组分质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \left[ \frac{KK_{rw}}{R_k \mu_w B_w} (\nabla p_w - \gamma_w \nabla D) \right] + q_w = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (2)$$

聚合物组分质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \left[ \frac{KK_{rp}}{R_k \mu_w B_w} (\nabla p_w - \gamma_w \nabla D) C_p \right] + q_p + R_p = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\phi_p (S_w C_p + C_{pads})}{B_w} \right] \quad (3)$$

固体颗粒随注入水进入地层以后,在运移过程中,会有一部分滞留在孔隙内。对于絮凝剂悬浮液的任意油层,取一微小单元体,单位体积固相滞留量为  $\delta_{cp}$ ,生成絮凝体的量为  $\delta_{fl}$ ,造成悬浮液浓度变化的因素包括与聚合物桥接的絮凝剂、源项、微元体孔隙中由于滞留增加的质量以及水相饱和度变化引起的质量变化量。

根据质量守恒原理,进入微元体的絮凝剂质量减去流出微元体的絮凝剂质量加上微元体中注入的絮凝剂质量等于微元体孔隙中由于滞留增加的絮凝剂质量、微元体中与聚合物桥接的絮凝剂质量与微元体中水相饱和度变化引起质量变化量之和,其差分格式可表示为

$$\begin{aligned} & (\rho_{cp} v_x C_{cp})|_x \Delta y \Delta z \Delta t - (\rho_{cp} v_x C_{cp})|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z \Delta t + \\ & (\rho_{cp} v_y C_{cp})|_y \Delta x \Delta z \Delta t - (\rho_{cp} v_y C_{cp})|_{y+\Delta y} \Delta x \Delta z \Delta t + \\ & (\rho_{cp} v_z C_{cp})|_z \Delta x \Delta y \Delta t - (\rho_{cp} v_z C_{cp})|_{z+\Delta z} \Delta x \Delta y \Delta t + \\ & \rho_{cp} q_{cp} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t = \rho_{cp} (\delta_{cp}|_{t+\Delta t} - \delta_{cp}|_t) \Delta x \Delta y \Delta z + \\ & \rho_{cp} R_{cp} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t + \end{aligned}$$

$$\rho_{cp} S_w (\phi_{cp} C_{cp}|_{t+\Delta t} - \phi_{cp} C_{cp}|_t) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (4)$$

将水相速度代入式(4)并假定絮凝剂密度不变,该差分方程的微分形式为

$$\nabla \cdot \left[ \frac{KK_{rw}}{R_k \mu_w B_w} (\nabla p_w - \rho_w g \nabla D) C_{cp} \right] + q_{cp} = \frac{\partial}{\partial t} (\delta_{cp}) + R_{cp} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi_{cp} C_{cp} S_w}{B_w} \right) \quad (5)$$

同理,进入微元体的絮凝体质量减去流出微元体的絮凝体质量加上微元体中生成的絮凝体质量等于微元体中絮凝体滞留量、微元体中水相饱和度变化引起质量变化量之和,经整理得到

$$\nabla \cdot \left[ \frac{KK_{rw}}{R_k \mu_w B_w} (\nabla p_w - \rho_w g \nabla D) C_{fl} \right] + R_{fl} = \frac{\partial}{\partial t} (\delta_{fl}) + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi_{fl} C_{fl} S_w}{B_w} \right) \quad (6)$$

辅助方程为

$$S_o + S_w = 1$$

$$p_{cow} = p_o - p_w = p_c(S_w, \sigma_{wo})$$

式中:下标 o, w, p, cp, fl 分别代表油、水、聚合物、絮凝剂、絮凝体;  $D$  为由某一基准面算起的深度,向下为正,  $m$ ;  $p$  为压力,  $10^{-1}$  MPa;  $S$  为饱和度;  $K$  为渗透率,  $\mu m^2$ ;  $K_r$  为相对渗透率;  $v_x, v_y, v_z$  分别为  $x, y, z$  方向的水相速度,  $cm/s$ ;  $\mu$  为黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $B$  为体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $\rho_o, \rho_w$  分别为油、水的密度,  $g/cm^3$ ;  $\phi$  为多孔介质的孔隙度;  $R_k$  为渗透率降低系数;  $C$  为水相中组分浓度;  $q$  为注入或产出量,  $cm^3/s$ ;  $\phi_p, \phi_{cp}, \phi_{fl}$  分别为聚合物、絮凝剂、絮凝体的可及孔隙体积;  $R$  为单位时间、单位体积内反应量或生成量,  $cm^3/s$ ;  $\delta$  为滞留量,  $cm^3$ ;  $\delta_{wo}$  为油水两相之间的界面张力,  $10^{-3}$  N/m;  $p_{cow}$  为油水两相之间的毛管压力,  $10^{-1}$  MPa。

### 1.3 固体组分滞留模型

将絮凝剂和絮凝体看作是水相中的组分,但是它们在运移过程中会发生滞留现象。比孔隙半径小的固体颗粒在各种力的综合作用下沉积在孔隙表面<sup>[9]</sup>,其絮凝剂滞留方程可描述为

$$\frac{\partial \delta_{cp}}{\partial t} = A v_w C_{cp} \quad (7)$$

同理,絮凝体的滞留方程也可描述为

$$\frac{\partial \delta_{fl}}{\partial t} = B v_w C_{fl} \quad (8)$$

式中:  $A, B$  为表面滞留速度常数,可由实验得到;  $v_w$  为水相速度,  $cm/s$ 。

### 1.4 储层孔隙度、渗透率变化模型

注入的絮凝剂选择性进入大孔道,颗粒的滞留导致储层孔隙度下降,同时由于絮凝剂与残留聚合物的桥接、卷曲生成絮凝体,其滞留固体颗粒的体积分为两

部分,一部分是滞留的絮凝剂体积  $\delta_{cp}$ ,另一部分是絮凝体的体积  $\delta_{fl}$ 。

由于絮凝剂和絮凝体在孔隙中的滞留造成地层孔隙度体积减小,减小的量等于滞留占据的体积<sup>[9]</sup>,则瞬时孔隙度的表达式为

$$\phi = \phi_0 - \delta_{cp}(x, y, z, t) - \delta_{fl}(x, y, z, t) \quad (9)$$

式中: $\phi_0$  为初始孔隙度。

孔隙度的减小将会引起储层渗透率的降低,固体颗粒滞留后的渗透率可用修正的 Kozeny 方程<sup>[10]</sup>表示为

$$K(x, t) = K_0 \left[ \frac{D(1-f) + f \frac{\phi(x, y, z, t)}{\phi_0}}{\phi_0} \right]^3$$

$$f = 1 - \beta [\delta_{cp}(x, y, z, t) + \delta_{fl}(x, y, z, t)] \quad (10)$$

式中: $K_0$  为初始渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $f$  为流动效率因子;  $D$  为堵塞后孔隙允许流体渗流的常数;  $\beta$  为常数。

## 2 物化方程描述

残留聚合物再利用调剖过程中设计的物化方程包括聚合物吸附的描述、不可及孔隙体积、相对渗透率曲线的描述等,这些方程在文献<sup>[11]</sup>中有相应的描述,笔者主要介绍反应动力学、混合流体的表观黏度描述、渗透率下降系数和残余阻力系数。

为了描述问题方便,现将絮凝剂和聚合物桥接的过程看成是反应的过程,其反应过程为絮凝体与残留聚合物反应生成絮凝体。

反应动力学可描述为

$$R_{cp} = \frac{dC_{cp}}{dt} = -knC_{cp}C_p \quad (11)$$

$$R_p = \frac{dC_p}{dt} = -kC_{cp}C_p \quad (12)$$

$$R_{fl} = \frac{dC_{fl}}{dt} = kC_{cp}C_p \quad (13)$$

式中: $k$ 、 $n$  为反应系数,由实验获得。

借鉴文献<sup>[12]</sup>计算混合溶液的整体表观黏度的方法,通过对各组分黏度进行线性求和可以得到混合溶液表观黏度,即

$$\mu_T = a\mu_w + b\mu_p + c\mu_{cp} + d\mu_{fl} \quad (14)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  由实验获得。

渗透率下降系数是水相中组分的吸附和滞留引起的,主要对水相起作用,聚合物引起的渗透率下降系数可描述为

$$R_k = \frac{K_w}{K_p} \quad (15)$$

式中: $K_w$  为不含聚合物时的水相有效渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $K_p$  为有聚合物时的水相有效渗透率,  $\mu\text{m}^2$ 。

絮凝剂和絮凝体引起的渗透率下降系数描述方程与聚合物类似。残余阻力系数的大小与聚合物、絮凝剂以及絮凝体的浓度有关,定义为

$$F_{rr} = F_{rr}(C_p, C_{cp}, C_{fl}) \quad (16)$$

式中: $F_{rr}$  为残余阻力系数,该值由实验室测定。

## 3 数学模型求解

数学模型的求解过程如下:①对于油水渗流方程,利用有限差分法对非线性偏微分方程进行差分离散,得到非线性代数方程组,对得到的非线性方程组进行线性化处理,得到线性方程组;求解得到油水两相的压力和饱和度。②对于聚合物方程,首先进行分步微分,然后用四阶 Runge-Kutta 方法<sup>[13]</sup>进行差分离散,最后求解线性方程组得到聚合物浓度的分布。③对于絮凝剂和絮凝体的方程,利用算子分离技术<sup>[14]</sup>将对流扩散方程分解为一个描述对流项的双曲型方程和一个描述扩散项的抛物型方程,然后分别用 MacCormack 格式<sup>[15-16]</sup>和有限差分离散上述两方程,最后求出两组分的浓度分布;根据计算出的浓度,更新下一步的滞留量。④根据絮凝剂和絮凝体的滞留量分布更新储层孔隙度和渗透率参数场。⑤利用迭代方法对步骤②—步骤④得到的结果进行计算,直至解收敛。⑥重复步骤②—步骤⑤至模拟时间结束。

## 4 模型的参数敏感性分析

由于影响油层非均质性的因素很多,为了研究方便,在研究时只考虑了纵向上的渗透率级差,建立了一套相对较细的  $21 \times 21 \times 5$  均匀网格系统,其中  $x$ 、 $y$  方向的网格尺寸为每网格长 15.0 m,纵向上划分为 5 个模拟层,各层厚度均为 4 m,地层埋深为 1 200 m,平均渗透率为  $0.5 \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为 0.3。地层原油黏度为  $30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,注入水黏度为  $0.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,聚合物黏度为  $30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,聚合物浓度为  $1 000 \text{ mg/L}$ 。定流量生产,对参数进行敏感性分析时,各模型注聚合物时机和注絮凝剂时机均为含水率 90%。

### 4.1 油藏非均质性对提高采收率的影响

建立 20 个不同渗透率级差的概念模型,模拟当含水率为 90%时,注入聚合物段塞 0.6PV,当含水率再次上升为 90%时,注入浓度为 3%的絮凝剂悬浮液 0.008 1PV,最后进行水驱,结果见图 1。从图 1 可以看出,随着渗透率级差的增大,最终采收率逐渐减小,提高的采收率越来越大。但当渗透率级差达到一定值以后,提高的采收率逐渐减小,而且随着渗透率级差的增大,提高的采收率值下降越来越快。

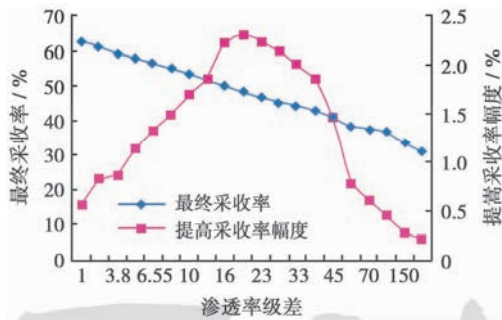


图1 不同渗透率级差下的采收率值与提高采收率值

Fig. 1 The recovery ratio value and enhanced recovery ratio value under different permeability grade

#### 4.2 注絮凝剂时机对提高采收率的影响

聚合物驱后续水驱阶段,设计在注入不同的后续水 PV 数时注入固定 PV 数的絮凝剂悬浮液段塞,模拟不同注絮凝剂时机下的效果。利用渗透率级差是 19.45 的模型,在其他参数不变的情况下,分别模拟后续水为 0.002 7~0.032 2 PV 时,注入絮凝剂悬浮液 0.008 1 PV,最后再进行水驱的效果。为了更好地显示注絮凝剂效果,只作出了聚合物驱后含水上升阶段注絮凝剂后的采出程度与含水率曲线,如图2所示。

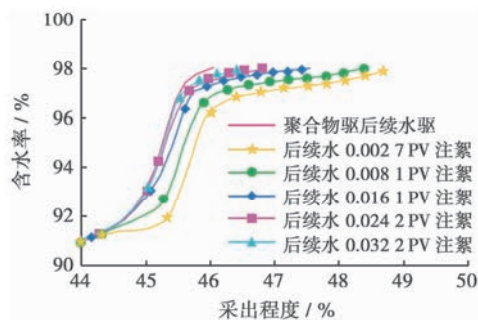


图2 不同后续水 PV 数下采出程度与含水率曲线

Fig. 2 The curves of oil recovery factor and water cut under different PV value of subsequent water

从图2可以看出,尽管注入絮凝剂的量相同,越早注入,含水率上升越慢。原因是早期注入,采出程度较低,剩余油饱和度,而且聚合物利用率也越高。更为重要的是越早注入,生成的絮凝体就越早控制高渗透层,越能提高注入水的波及系数,因此采收率越高。

#### 4.3 注絮凝剂量对提高采收率的影响

聚合物驱后设计在注入相同后续水 PV 数时注入不同 PV 数的絮凝剂段塞,模拟不同注絮凝剂量下的效果。利用渗透率级差是 19.45 的地质模型,在其他参数不变的情况下,分别模拟注入浓度为 3% 的絮凝剂悬浮液 0.0027~0.0134 PV,然后再水驱的效果,其注絮凝剂效果如图3所示。从图3看出,随注絮凝剂

量的增加,采出程度越高、含水率上升幅度越小,由于注入絮凝剂悬浮液的量愈大,生成的絮凝体在多孔介质中的滞留量愈大,对高渗透层封堵愈有效,就越有利于后续水进入中、低渗透层,扩大波及体积,取得较高的采收率。

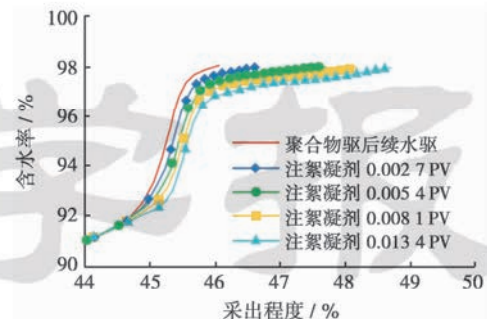


图3 不同注絮凝剂 PV 数下的采出程度与含水率曲线

Fig. 3 The curves of oil recovery factor and water cut under different PV value of flocculant suspending liquid

#### 4.4 注絮凝剂浓度对提高采收率的影响

聚合物驱后续水驱阶段,设计在注入一定后续水 PV 数时注入固定 PV 数、不同浓度的絮凝剂悬浮液段塞,模拟不同注絮凝剂浓度下的效果。利用渗透率级差是 19.45 的地质模型,在其他参数不变的情况下,分别模拟注入不同浓度的絮凝剂悬浮液 0.008 1 PV,然后再水驱的效果,其注絮凝剂效果如图4所示。

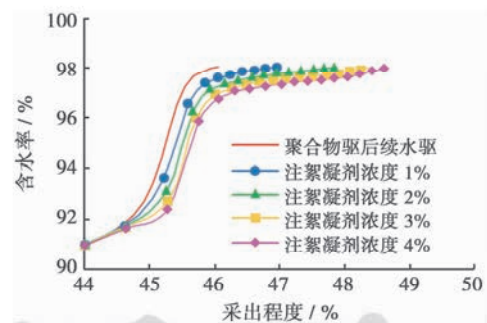


图4 不同注絮凝剂浓度下的采出程度与含水率曲线

Fig. 4 The curves of oil recovery factor and water cut under different flocculant concentration

从图4看出,在后续水段塞和注絮凝剂 PV 数一定的情况下,随着絮凝剂悬浮液浓度的增加,采出程度越高、含水率上升幅度越小。由于注入絮凝剂悬浮液的浓度愈大,生成的絮凝体越多,在多孔介质中的滞留量就愈大,对高渗透层封堵愈有效,就越有利于实现调剖的作用提高采收率。但受现场工艺的要求,絮凝剂悬浮液的浓度不能太高。

## 5 结论

(1) 在化学驱模型的基础上建立了残留聚合物再

利用的数学模型,模型中考虑了絮凝剂和絮凝体的滞留,以及对孔隙度、渗透率参数场的影响,同时可以满足水驱、聚合物驱、残留聚合物再利用的各类研究。

(2) 将模型中各组分方程差分离散,并将离散后得到非线性方程组线性化处理,然后求解线性方程组,通过迭代完成了残留聚合物再利用的数学模型的求解。

(3) 建立了概念模型,对影响残留聚合物再利用的各因素进行了敏感性分析。结果表明,随着渗透率级差的增大,残留聚合物再利用提高采收率幅度先增加后减小;注絮凝剂越早、注絮凝剂量及浓度越大,残留聚合物再利用提高采收率效果越好。

### 参 考 文 献

- [1] 韩培慧,赵群,穆爽书,等. 聚合物驱后进一步提高采收率途径的研究[J]. 大庆石油地质与开发,2006,25(5):81-84.  
Han Peihui, Zhao Qun, Mu Shuangshu, et al. Study on further EOR after polymer flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(5): 81-84.
- [2] Allen E, Boger D V. The influence of rheological properties on mobility control in polymer-augmented waterflooding[R]. SPE 18097, 1988.
- [3] Seright R S. Impact of dispersion on gel placement for profile control[R]. SPE 20127, 1991.
- [4] Pavone D. Observation and correlations for immiscible viscous-fingering experiments[R]. SPE 19670, 1992.
- [5] Sorbie K S, Tsibuklls N B, Dwebi A. Experimental testing of mobility prediction in averaged models of viscous fingering[R]. SPE 22617, 1991.
- [6] 熊生春,王业飞,何英,等. 孤岛油田聚合物驱后提高采收率实验研究[J]. 断块油气田,2005,12(3):38-40.  
Xiong Shengchun, Wang Yefei, He Ying, et al. The study on IOR after polymer flooding of Gudao Oilfield[J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2005, 12(3): 38-40.
- [7] 戴彩丽,赵福麟,肖建洪,等. 聚合物驱后地层残留聚合物再利用技术研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2006,21(6):56-60.  
Dai Caili, Zhao Fulin, Xiao Jianhong, et al. Studies on the reutilization techniques of the residual polymer in formation after polymer flooding[J]. Journal of Xi'an Petroleum University: Natural Science Edition, 2006, 21(6): 56-60.
- [8] 冯其红. 聚合物驱后深部调驱理论与技术[M]. 东营:中国石油大学出版社,2007:56-88.  
Feng Qihong. Theory and technology of profile control after polymer flooding[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007: 56-88.
- [9] 刘想平,侯立朋. 油田注入水中固体颗粒对地层伤害的数学模型[J]. 江汉石油学院学报,1995,17(2):69-73.  
Liu Xiangping, Hou Lipeng. A mathematical model for simulation formation damage due to solid particles invasion during injection[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1995, 17(2): 69-73.
- [10] Liu X, Civan F. Characterization and prediction of formation damage in two-phase flow systems[R]. SPE 25429, 1993.
- [11] 袁士义. 聚合物地下交联调剖数学模型[J]. 石油学报,1991,12(1):49-58.  
Yuan Shiyi. A mathematical model of high permeability channel blockage in a heterogeneous reservoir by in-situ polymer gelation process[J]. Acta Petrolei Sinica, 1991, 12(1): 49-58.
- [12] 冯其红. 可动凝胶深部调驱油藏工程方法研究[D]. 北京:中国石油勘探开发研究院,2004:72-75.  
Feng Qihong. Reservoir engineering study on weak gel flooding[D]. Beijing: PetroChina Exploration and Development Research Institute, 2004: 72-75.
- [13] 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,2004:243-249.  
Li Weiguo, Huang Bingjia, Tong Dengke, et al. Numerical calculus method[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2004: 243-249.
- [14] Rodriguez P G, Segura M K, Mustieles Moreno F J. Streamline methodology using an efficient operator splitting for accurate modeling of capillarity and gravity effects[R]. SPE 79693, 2003.
- [15] N N 雅宁柯. 分数步法:数学物理中多变量问题的解法[M]. 周宝熙,林鹏,译. 北京:科学出版社,1992:19-47.  
Yanenko N N. The method of fractional steps: The solution of problems of mathematical physics in several variables[M]. Translated by Zhou Baoxi, Lin Peng. Beijing: Science Press, 1992: 19-47.
- [16] 陆金浦,关治. 偏微分方程数值解法[M]. 北京:清华大学出版社,1987:100-130.  
Lu Jinpu, Guan Zhi. Numerical methods for partial differential equations[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987: 100-130.

(收稿日期 2010-02-03 改回日期 2010-04-13 编辑 黄小娟)