

考虑启动压力梯度的聚合物驱数值模拟

聂俊,于洪敏,王友启,刘平,许关利,张莉
(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:针对目前常用的化学驱数值模拟软件并不适用于低渗透油藏的问题,通过室内实验开展低渗透油藏聚合物驱油机理研究,量化表征中国石化江苏油田低渗透油藏中聚合物驱的关键物性参数,分别采用拟启动压力梯度模型和非线性模型建立低渗透油藏聚合物驱数学模型,进行数值求解并应用。研究结果表明,中国石化江苏油田低渗透油藏聚合物驱适宜采用相对分子质量为 $600\times 10^4\sim 900\times 10^4$ 的聚合物;拟启动压力梯度模型忽略了渗流曲线的弯曲段,夸大了低渗透油藏的渗流阻力,而非线性模型更适于模拟低渗透油藏聚合物驱过程。在江苏油田沙7断块的应用结果表明,基于非线性模型建立的数值模拟方法能够考虑低渗透油藏聚合物驱过程中启动压力梯度的影响,模拟计算结果与矿场实际生产数据更加吻合,为低渗透油藏化学驱的方案优化与动态预测提供了有效的技术与方法。

关键词:低渗透油藏 聚合物驱 启动压力梯度 数值模拟 渗流实验 江苏油田

中图分类号:TE357.431

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)01-0106-05

Numerical simulation study of polymer flooding considering start-up pressure gradient

Nie Jun, Yu Hongmin, Wang Youqi, Liu Ping, Xu Guanli, Zhang Li

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China)

Abstract: In view of the current commercial numerical simulation software of chemical flooding is not suitable for low permeability reservoir, the mechanism of polymer flooding in the low permeability reservoir was studied by laboratory experiments. The key physical property parameters of polymer flooding in the low permeability reservoir in SINOPEC Jiangsu oilfield were characterized quantitatively, and the mathematical model of polymer flooding in the low permeability reservoir was established by using the pseudo-start-up pressure gradient and nonlinear model respectively, and the model was solved by numerical method. Research results show that the suitable relative molecular mass is 6 million to 9 million for the polymer flooding in the low permeability reservoir. The pseudo-start-up pressure gradient model ignores the bending section of the percolation curve and exaggerated the seepage resistance of the low permeability reservoirs, so the nonlinear model is more suitable for the simulation of polymer flooding process in the low permeability reservoir. The application in Sha7 block of Jiangsu oilfield shows that the numerical simulation method based on the nonlinear model can consider the influence of start-up pressure gradient for the polymer flooding in the low permeability reservoir, and the simulation results are consistent with the actual production data of the oilfield. It provides an effective technique and method for the optimization and dynamic prediction of chemical flooding in the low permeability reservoir.

Key words: low permeability reservoir; polymer flooding; start-up pressure gradient; numerical simulation; seepage experiment; Jiangsu oilfield

室内实验和矿场应用表明,低渗透油藏中的渗流规律不再遵循达西定律,表现出存在启动压力梯

度及非线性的特征。为了描述这种非达西现象,多应用拟启动压力梯度模型对低渗透油藏水驱渗流

收稿日期:2016-10-09。

作者简介:聂俊(1983—),男,江西樟树人,工程师,硕士,从事油藏工程和提高采收率方面的研究。联系电话:(010)82315928,E-mail:271957646@qq.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“低渗透油藏化学驱机理及数值模拟方法研究”(P13124)。

理论及数值模拟进行相关研究^[1-3]。由于低渗透油藏非均质性强,渗透性差,随井网不断调整,剩余油分布较分散,因此,聚合物驱技术越来越多地应用于低渗透油藏。但常用的化学驱数值模拟软件均基于达西定律开发,并不能模拟低渗透油藏非达西现象,因此不适用于低渗透油藏化学驱过程^[4]。为此,笔者在低渗透岩心聚合物驱渗流实验基础上,建立两相多组分低渗透油藏聚合物驱数学模型。基于UTCHEM化学驱数值模拟的开放代码,形成了一种适用于低渗透油藏聚合物驱的数值模拟方法。

1 低渗透油藏聚合物驱关键参数确定

1.1 聚合物相对分子质量

选择与渗透率相匹配的聚合物相对分子质量是低渗透油藏聚合物驱提高采收率技术的关键^[5-8]。选用中国石化江苏油田渗透率为 $39 \times 10^{-3} \sim 52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心,对相对分子质量分别为 400×10^4 , 600×10^4 , 900×10^4 , $1\,400 \times 10^4$ 和 $1\,800 \times 10^4$ 的聚合物进行注入性测试。在残余油饱和度下,以 0.2 mL/min 的注入速度注水,记录稳定压力值;然后注入不同质量浓度的聚合物溶液,记录稳定压力值;再转注水,记录稳定压力值。根据岩心流动实验获得的注入压力数据,计算得到不同相对分子质量聚合物溶液的阻力系数和残余阻力系数(表1)。相对分子质量为 400×10^4 的聚合物溶液注入性好,但是增粘效果差,阻力系数和残余阻力系数都偏低,不能改善水油比;相对分子质量小于 900×10^4 的聚合物溶液在岩心中流动不发生堵塞,残余阻力系数较小;而相对分子质量大于 900×10^4 的聚合物溶液在低渗透岩心的入口端发生堵塞,残余阻力系数偏大,因此,针对中国石化江苏油田的实际情况,选择驱油用聚合物适宜的相对分子质量为 $600 \times 10^4 \sim 900 \times 10^4$ 。

表1 不同相对分子质量聚合物注入实验结果
Table1 Experimental results of polymer injection with different relative molecular mass

岩心编号	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	相对分子质量/ 10^4	阻力系数	残余阻力系数	备注
1	42	400	2.3	1.6	
2	39	600	3.2	1.9	
3	48	900	5.1	3.9	
4	43	1 400	13.9	13.9	堵塞
5	52	1 800	17.5	16.7	堵塞

1.2 聚合物不可及孔隙体积

聚合物溶液流经地层岩心时,并不是所有的孔

隙空间中均有聚合物分子流过。由于地层多孔介质的孔隙是由一系列大小不同的孔隙所组成,其中尺寸较小的孔隙对于溶液中无规则线团尺寸较大的聚合物分子来说是不可入的^[9]。在数值模拟中,聚合物有效孔隙度采用输入其有效孔隙度系数计算,其表达式为

$$\phi_p = \phi \theta_p \quad (1)$$

采用中国石化江苏油田岩心开展不可及孔隙体积实验,渗透率为 $51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为18.0%,得到相对分子质量为 900×10^4 的聚合物有效孔隙度系数为0.739。

2 低渗透油藏聚合物驱渗流曲线表征

低渗透储层存在启动压力梯度,实施聚合物驱后启动压力梯度影响更突出。将聚合物溶液看作宾汉姆流体,建立低渗透油藏聚合物驱非线性模型^[10-11]

$$v = \frac{K}{\mu} \times \frac{\Delta p}{L} \left(1 - \frac{\alpha}{\frac{\Delta p}{L} - \beta} \right) \quad (2)$$

当 α 和 β 不为0时,式(2)是非线性模型,且最小启动压力梯度等于 α 与 β 之和。当 α 大于0, β 为0时,式(2)变成低渗透油藏中常见的拟启动压力梯度模型,此时 α 等于拟启动压力梯度 G ;当 α 等于0时,式(2)变成达西公式,适用于中、高渗透油藏。

选用中国石化江苏油田渗透率为 $39 \times 10^{-3} \sim 52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心,相对分子质量为 900×10^4 的聚合物分别配制粘度为1.57, 2.9和5 mPa·s的聚合物溶液。采用压差一流量法开展聚合物驱渗流实验。分别用拟启动压力梯度模型和非线性模型对实验结果进行拟合,拟合效果较好,其中粘度为1.57 mPa·s的聚合物溶液拟合效果见图1。

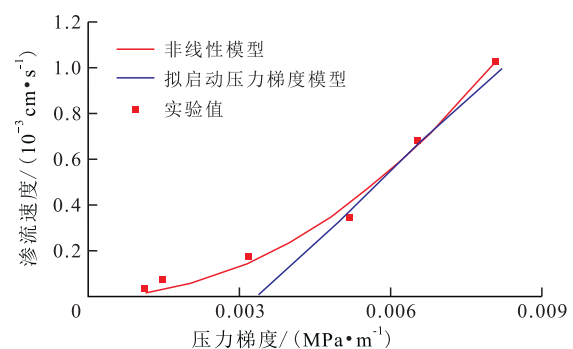


图1 非线性模型和拟启动压力梯度模型拟合曲线

Fig.1 Fitting curves of nonlinear model and pseudo-threshold pressure gradient model

通过分析不同渗透率和粘度条件下非线性模型表征方程,发现粘度和渗透率与非线性模型参数以及拟启动压力梯度模型参数具有单调函数关系,在此基础上建立拟启动压力梯度模型参数及非线性模型参数与流度的幂函数关系为

$$G = a\lambda^b \quad (3)$$

$$\alpha = c_1\lambda^{d_1} \quad (4)$$

$$\beta = c_2\lambda^{d_2} \quad (5)$$

其中

$$\lambda = \frac{K}{\mu_p} \quad (6)$$

采用中国石化江苏油田低渗透岩心开展聚合物驱渗流实验,可以分别得到拟合参数 a, b, c_1, d_1, c_2 和 d_2 的值。

3 数学模型的建立及其求解

3.1 模型基本假设

模型基本假设包括:①整个过程为等温渗流;②流体流动为存在启动压力梯度的非达西渗流;③组分弥散规律遵循 Fick 定律;④流体只包括油、水两相;⑤除油组分外,其余组分都在水相中;⑥各相间的平衡瞬间完成;⑦岩石和流体为微可压缩。

3.2 质量守恒方程

对单位孔隙岩石内多组分流体的流动按照质量守恒原理建立了质量守恒方程,其中组分 k 的质量守恒方程为

$$q_k = \frac{\partial(\phi\rho_k\tilde{c}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\sum_{l=1}^{n_p} \rho_l(c_{kl}u_l - \phi S_l K_{kl} \cdot \nabla c_{kl}) \right] \quad (7)$$

其中

$$\tilde{c}_k = \left(1 - \sum_{k=1}^{n_c} \hat{c}_k \right) \sum_{l=1}^{n_p} S_l c_{kl} + \hat{c}_k \quad (8)$$

$$\rho_k = 1 + C_k^0(p - p_r) \quad (9)$$

3.3 运动方程

根据低渗透油藏聚合物驱渗流实验结果以及推导建立的非线性模型,得到运动方程为

$$u_i = -\frac{K \cdot K_{rel}}{\mu_i} (\nabla p_i \cdot N - \gamma_i \nabla h) \quad (10)$$

其中

$$N = \begin{cases} 1 - \frac{\alpha}{|\nabla p_i| - \beta} & |\nabla p_i| \geq \alpha + \beta \\ 0 & |\nabla p_i| < \alpha + \beta \end{cases} \quad (11)$$

设 β 等于 0,将 $\alpha = G$ 代入式(11),可以得到基于拟启动压力梯度模型的运动方程。

3.4 辅助方程

多孔介质中多相多组分渗流的约束方程包括饱和度方程、相浓度方程、组分总浓度方程和毛管压力方程,其表达式分别为

$$S_w + S_o = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^{n_c} c_{kl} = 1 \quad (13)$$

$$c_k = \sum_{l=1}^{n_p} c_{kl} S_l \quad (14)$$

$$p_c = p_o - p_w \quad (15)$$

3.5 压力方程

将所有占体积的组分质量守恒方程相加,并将运动方程代入,同时利用毛管压力的定义,可以得到参考相为水相的压力方程为

$$\sum_{k=1}^{n_c} q_k = \phi C_i \frac{\partial p_w}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \sum_{l=1}^{n_p} K N \lambda_{dl} \vec{\nabla} p_w - \vec{\nabla} \cdot \sum_{l=1}^{n_p} K \lambda_{dl} \gamma_l \vec{\nabla} h + \vec{\nabla} \cdot K \lambda_{rc} \vec{\nabla} p_c \quad (16)$$

其中

$$\lambda_{dl} = \frac{K_{dl}}{\mu_l} \sum_{k=1}^{n_c} \rho_k c_{kl} \quad (17)$$

$$C_i = C_r + \sum_{k=1}^{n_c} C_k^0 \tilde{c}_k \quad (18)$$

3.6 数值解法

质量守恒方程、压力方程和辅助方程构成了描述在可渗透介质中两相多组分流体的基本关系式,一共 $2n_c + (5 + n_c)n_p$ 个独立方程,独立变量个数为:① n_c 个组分总体积分数 c_k ;② n_c 个组分吸附体积分数 \hat{c}_k ;③ $n_p n_c$ 个组分在相中的体积分数 c_{kl} ;④ n_p 个相饱和度 S_l ;⑤ n_p 个相对渗透率 K_{rl} ;⑥ n_p 个相粘度 μ_l ;⑦ n_p 个相密度 ρ_l ;⑧ n_p 个相压力 p_l 。独立方程数与独立变量数相等,系统可以封闭求解。

在 UTCHEM 代码的基础上,新增 1 个是否考虑非线性渗流的开关,新增 3 个考虑非线性模型或启动压力梯度模型的关键字,修改传导率系数计算、井处理、压力方程求解以及浓度方程计算 4 个模块,采用 IMPES 方法进行求解,得到了一种考虑启动压力梯度的聚合物驱数值模拟方法^[12-14]。

4 实例计算与分析

4.1 非线性模型和拟启动压力梯度模型的对比

采用江苏油田沙 7 断块油藏物性数据,建立反九点网格模型,网格为 $49 \times 49 \times 4$,油藏长度为 245 m,宽度为 245 m,有效厚度为 16 m。注入井注入量为

18 m³/d,保证注采平衡,边井产油量为3 m³/d,角井产油量为1.5 m³/d。拟启动压力模型中拟启动压力梯度为0.006 MPa/m,非线性模型中最小启动压力梯度为0.001 MPa/m。采用这2种模型,分别计算注入0.1倍孔隙体积聚合物溶液后的压力梯度分布(图2)。

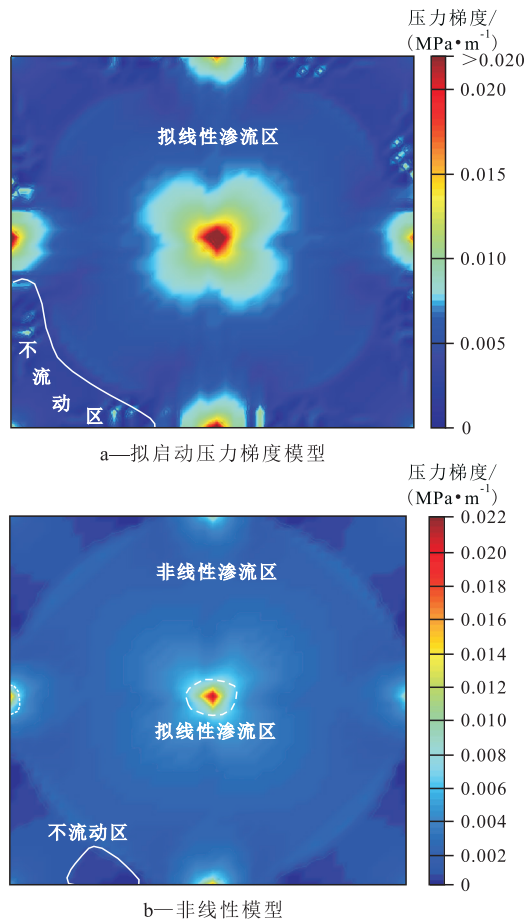


图2 不同模型计算的的压力梯度场

Fig.2 Pressure gradient field calculated by different models

对比图2a和图2b可以看出,拟启动压力梯度模型计算出的不流动区域面积比非线性模型计算的不流动区域面积要大,注采井间的压力梯度也更大。主要是因为拟启动压力梯度模型忽略了渗流曲线的弯曲段,夸大了低渗透率油藏的渗流阻力。从图2b可以看出,拟线性渗流只发生在注采井附近的局部小区域内,而地层内部相当大的区域内是非线性渗流,这与对低渗透渗流的常规认识相一致,即低渗透油藏中非线性渗流占据主导地位。因此,认为非线性模型更适于模拟低渗透油藏聚合物驱。

4.2 实例分析

江苏油田沙7断块平均空气渗透率为 $34.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,1994年开始注水开发,含水率达到90%后改为聚合物驱开发。采用三注六采注采井组,注入

质量分数为0.1%的聚合物溶液,注聚井S7-39和S7-33的注入量分别为25和35 m³/d,注水井S7-11的注入量为30 m³/d,产油井定产油量为15 m³/d。采用考虑启动压力梯度的聚合物驱数值模拟方法对水驱阶段进行历史拟合后,模拟预测聚合物驱的驱替动态特征。

分别用新建立的非线性模型和UTCHEM常规模型进行模拟计算,得到注入压力升高变化值(表2)。可以看出将UTCHEM常规模型应用于低渗透油藏聚合物驱计算,得到的注入压力升高值明显偏小。而采用新建立的非线性模型模拟计算的注入压力升高值与矿场实际测量值较吻合,误差控制在4%以内。这也进一步证明了考虑启动压力梯度的聚合物驱数值模拟方法更适用于矿场的模拟计算。

表2 模拟计算注入井压力升高值与矿场实际测量结果对比

Table2 Comparison of pressure rising value of injection well for simulation calculation and field test

井号	注入井压力升高值/MPa		现场实测	新方法计算值与矿场实际测量误差,%
	UTCHEM常规模型模拟计算	新建立的非线性模型模拟计算		
S7-33	1.20	2.08	2.02	2.97
S7-39	1.40	2.28	2.20	3.60

5 结论

不同相对分子质量的聚合物溶液在低渗透油藏具有不同的注入性,较低相对分子质量的聚合物溶液具有较好的注入性,而较高相对分子质量的聚合物溶液有堵塞倾向。室内驱替实验表明,江苏油田低渗透油藏聚合物驱适宜采用相对分子质量为 $600 \times 10^4 \sim 900 \times 10^4$ 的聚合物。

建立了考虑启动压力梯度的聚合物驱数学模型并进行数值求解,形成了一种考虑启动压力梯度的聚合物驱数值模拟方法,填补了常规化学驱数值模拟软件不适用于低渗透油藏空白。

概念模型计算表明,非线性表征方法比拟启动压力梯度表征方法计算结果更准确。与矿场实际测量结果对比表明,该数值模拟方法适用于低渗透油藏聚合物驱。

符号解释:

ϕ_p ——聚合物有效孔隙度; ϕ ——孔隙度; θ_p ——聚合物有效孔隙度系数; v ——渗流速度,cm/s; K ——渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ ——粘度,mPa·s; Δp ——岩心两端压差,MPa; L ——

岩心长度, m; α, β ——非线性模型参数, MPa/m; G ——拟启动压力梯度, MPa/m; λ ——聚合物的流度, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$; a, b ——拟启动压力梯度模型的拟合参数; c_1, d_1, c_2, d_2 ——非线性模型的拟合参数; μ_p ——聚合物溶液粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; q_k ——组分 k 的注入或产出量, cm^3/s ; ρ_k ——组分 k 的密度, g/cm^3 ; \bar{c}_k ——每单位孔隙体积组分 k 的总体积, cm^3/cm^3 ; t ——时间, s; n_p ——体系的总相数; l ——相, $l=1$ 表示水相, $l=2$ 表示油相; c_{kl} ——组分 k 在第 l 相中的体积分数, cm^3/cm^3 ; u_l ——第 l 相包括 x, y, z 共 3 个方向的相速度, cm/s ; S_l ——第 l 相的饱和度; K_{dl} ——组分 k 在第 l 相中的扩散张量, cm/s ; \hat{c}_k ——单位孔隙体积组分 k 的吸附体积, cm^3/cm^3 ; n_c ——体系的总组分数; C_k^0 ——组分 k 的压缩系数; p ——压力, MPa; p_r ——参考压力, MPa; K_{rl} ——第 l 相的相对渗透率; p_l ——第 l 相的驱替压力, MPa; μ_l ——第 l 相的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; N ——修正系数; γ_l —— l 相流体重度, N/cm^3 ; h ——深度, m; S_w ——水相饱和度; S_o ——油相饱和度; c_k ——组分 k 的总体积分数; p_c ——油水相界面毛管压力, MPa; p_o ——油相压力, MPa; p_w ——水相压力, MPa; C_t ——综合压缩系数, MPa^{-1} ; λ_{dl} ——第 l 相的相对流度, $\text{g}/(\text{cm}^3\cdot\text{mPa}\cdot\text{s})$; λ_{oc} ——油相的相对流度, $\text{g}/(\text{cm}^3\cdot\text{mPa}\cdot\text{s})$; C_r ——岩石压缩系数, MPa^{-1} 。

参考文献:

- [1] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 31-32.
Huang Yanzhang. Percolation mechanism of low-permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 31-32.
- [2] 计秉玉, 赵宇, 宋考平, 等. 低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 129-133.
Ji Bingyu, Zhao Yu, Song Kaoping, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.
- [3] 姜瑞忠, 杨仁锋. 低渗透油藏非线性渗流理论与数值模拟技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 26-42.
Jiang Ruizhong, Yang Renfeng. Non-linear flow theory and numerical simulation technology of low permeability reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 26-42.
- [4] 周丛丛, 张晓芹, 崔长玉. 聚合物驱合理地层压力控制方法[J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 111-113.
Zhou Congcong, Zhang Xiaoqin, Cui Changyu. Reasonable formation pressure control in polymer flooding [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 111-113.
- [5] 李爱芬, 宋浩鹏, 谢昊君. 聚合物驱不可及孔隙体积对渗流规律的影响[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(2): 70-75.
Li Aifen, Song Haopeng, Xie Haojun. Influence of inaccessible pore volume on seepage law of polymer flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 70-75.
- [6] 李丹丹, 王业飞, 张鹏, 等. 低渗透油藏驱油用聚合物相对分子质量确定方法的研究进展[J]. 油田化学, 2014, 31(3): 470-474.
Li Dandan, Wang Yefei, Zhang Peng, et al. Research progress of determination of polymer molecular weight for oil recovery in low permeability reservoirs [J]. Oilfield Chemistry, 2014, 31(3): 470-474.
- [7] 孙业恒, 龙运前, 宋付权, 等. 低渗透油藏纳微米聚合物颗粒分散体系封堵性能评价[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(4): 88-94.
Sun Yeheng, Long Yunqian, Song Fuquan, et al. Evaluation on plugging performance of aqueous dispersion system of nano/micron-sized polymer particles in low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 88-94.
- [8] 徐洪玲. 油藏非均质性对聚合物驱开发效果的影响[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(5): 99-102.
Xu Hongling. Impact of plane heterogeneity of oil reservoir on development effect of polymer flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 99-102.
- [9] 李爱芬, 宋浩鹏, 谢昊君. 聚合物驱不可及孔隙体积对渗流规律的影响[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(2): 70-75.
Li Aifen, Song Haopeng, Xie Haojun. Influence of inaccessible pore volume on seepage law of polymer flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 70-75.
- [10] 王友启, 于洪敏, 刘平, 等. 低渗透油藏聚合物驱启动压力梯度研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(4): 126-130.
Wang Youqi, Yu Hongmin, Liu Ping, et al. Start-up pressure gradient of polymer flooding in low permeability reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2015, 39(4): 126-130.
- [11] 杨正明, 于荣泽, 苏致新, 等. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 94-98.
Yang Zhengming, Yu Rongze, Su Zhixin, et al. Numerical simulation of the nonlinear flow in ultra-low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1): 94-98.
- [12] 宋道万, 孙玉红, 戴家林. 化学驱数值模拟软件的改进和完善[J]. 油气采收率技术, 2000, 7(2): 41-44.
Song Daowan, Sun Yuhong, Dai Jialin. Improvement and perfection of the numerical simulation software of chemical flooding [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2000, 7(2): 41-44.
- [13] 卢祥国, 胡广斌, 曹伟佳, 等. 聚合物滞留特性对化学驱提高采收率的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(3): 99-105.
Lu Xiangguo, Hu Guangbin, Cao Weijia, et al. Influences of the polymer retention characteristics on the enhanced oil recovery of the chemical flooding [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(3): 99-105.
- [14] Delshad M. Technical documentation of UTCHEM6.0 [M]. Austin: Center for Petroleum and Geosystems Engineering of the University of Texas, 2000.

编辑 刘北羿