

聚合物驱数值模拟参数敏感性研究

王业飞, 黄勇, 孙致学, 侯宝峰, 刘瑞珍
(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 聚合物驱数值模拟技术是指导聚合物驱方案实施的重要手段, 由于聚合物驱数值模拟参数的不确定性, 导致聚合物驱历史拟合难度加大。基于室内聚合物岩心驱替实验结果, 应用岩心驱替数值模拟方法拟合含水率与采收率曲线, 确定聚合物驱数值模拟参数, 进而得到了比较可靠的岩心数值模型。在此基础上, 分别分析了聚合物溶液粘度、不可及孔隙体积、残余阻力系数和聚合物吸附量等数值模拟参数对含水率曲线以及采收率曲线的影响, 并引入敏感系数评价了含水率下降幅度以及采收率增加幅度对各参数的敏感性。结果表明, 采收率增加幅度和含水率下降幅度对不同参数的敏感程度顺序保持一致, 敏感性从强到弱依次为聚合物吸附量、聚合物溶液粘度、残余阻力系数、不可及孔隙体积。

关键词: 岩心驱替 数值模拟 聚合物驱 敏感性分析 历史拟合

中图分类号: TE319

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)01-0075-05

Study on sensitivities of numerical simulation parameters in polymer flooding

Wang Yefei, Huang Yong, Sun Zhixue, Hou Baofeng, Liu Ruizhen

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China)

Abstract: Numerical simulation is of great importance as implementation guides of polymer flooding projects. However, there are still significant difficulties remaining in the history matching process of polymer flooding simulation due to uncertainties of some related parameters in polymer flooding. Based on laboratory experiments of polymer core-flooding, the reservoir simulation parameters for polymer flooding were determined by curve matching of water cut and oil recovery. A more reliable numerical simulation model of polymer core-flooding was then constructed. The effect of viscosity of polymer solutions, inaccessible pore volume, residual resistance coefficient and polymer adsorptive capacity and other related parameters on curves of water cut and oil recovery were analyzed. The sensitive coefficient was introduced in the model to evaluate the sensitivities of these parameters. Results show that the sensitivity order of different parameters to the increase rate of oil recovery and the decline rate of water cut is consistent. The sensitivity of these parameters from strong to weak is: polymer adsorptive capacity, viscosity of polymer solutions, residual resistance coefficient and inaccessible pore volume.

Key words: core flooding; numerical simulation; polymer flooding; sensitivity analysis; history matching

聚合物驱是指通过向注入液中加入水溶性高分子聚合物, 增加水相粘度, 降低水相渗透率, 同时改善水油流度比, 从而提高原油采收率的方法^[1-2]。然而在聚合物溶液驱油过程中, 受各种因素的影响, 聚合物驱效果存在差异, 而且不同因素对聚合物驱效果的影响程度不同^[3-7]。在石油与天然气领域,

数值模拟方法贯穿于油气田勘探与开发的始终, 特别是在聚合物驱方面, 数值模拟方法是指导聚合物驱方案实施的重要手段^[8-13]。由于聚合物驱数值模拟所应用的特性参数都是由实验室提供的, 与实际驱替过程中的聚合物溶液存在很大差异, 直接应用这些参数预测或拟合一个实际区块聚合

收稿日期: 2016-09-26。

作者简介: 王业飞(1968—), 男, 湖北天门人, 教授, 博导, 从事油田化学及提高采收率研究。联系电话: 18953230699, E-mail: wangyf@upc.edu.cn。

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT1294)。

物驱的生产状况,其结果会发生严重的失真或偏差^[14-15]。在聚合物驱室内实验研究的基础上,以实验室测定的聚合物特性参数为主要调整对象^[7,9],应用Eclipse软件对室内岩心驱替规律进行拟合,得到聚合物驱数值模拟参数,进而建立比较可靠的岩心数值模型。应用岩心数值模拟方法研究数值模拟参数对聚合物驱效果的影响,并引入敏感系数的概念,进一步评价聚合物驱效果对各数值模拟参数的敏感性^[16]。

1 聚合物驱岩心数值模型的建立

1.1 聚合物驱室内实验

在进行聚合物驱数值模拟之前,进行聚合物特性参数的测定以及聚合物岩心驱替等室内实验。聚合物特性参数主要包括聚合物溶液粘度、阻力系数、残余阻力系数、不可及孔隙体积以及聚合物吸附量等。

为了使聚合物驱的数值模拟更加符合实际,进行了聚合物室内岩心驱替实验,实验流程如图1所示。实验步骤包括:①将天然岩心饱和模拟地层水后,测其孔隙度和孔隙体积;②将天然岩心饱和原油,计算初始含水饱和度;③以0.2 mL/min的速度水驱至产出液含水率达90%,计算水驱采收率;④注入0.3倍孔隙体积粘度为12.4 mPa·s的HPAM溶液,再水驱至产出液含水率为98%,计算最终采收率。

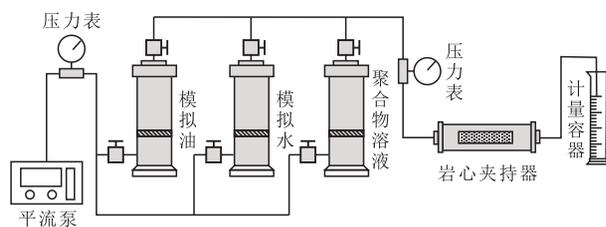


图1 聚合物岩心驱替流程

Fig.1 Flow chart of polymer flooding using cores

岩心驱替相关的主要参数以及聚合物驱实验结果包括:岩心直径为2.5 cm,岩心长度为10 cm,气测渗透率为 $1\ 800\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,孔隙度为32.5%,含油饱和度为75.62%,水驱采收率为61.25%,最终采收率为72.79%,采收率增加幅度为11.54%,含水率下降幅度为28%。

1.2 聚合物驱岩心数值模型

岩心数值模拟研究必须基于一定的岩心数值模型,岩心数值模型的准确与否关系着岩心数值模拟结果的准确程度。聚合物驱岩心数值模型的建

立包括聚合物驱替规律拟合以及聚合物驱数值模拟参数的确定。聚合物驱数值模拟参数与实验室聚合物特性参数测定不同,聚合物驱数值模拟参数一般很难测定^[14-15],在聚合物驱室内实验研究的基础上,以实验室测定的聚合物特性参数为依据,通过调整聚合物驱数值模拟参数,对室内岩心聚合物驱替规律进行拟合(图2),进而建立了比较可靠的岩心数值模型。在拟合驱替曲线的过程中,确定了主要聚合物驱数值模拟参数(表1)。从表1中可以看出,由实验测得的聚合物特性参数与数值模拟参数存在一定的差别,如果直接使用实验室的测试数据进行数值模拟,难免会产生严重的偏差或失真。

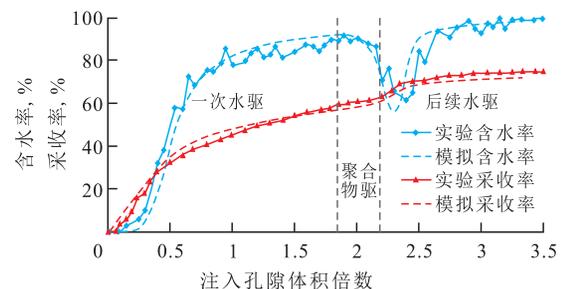


图2 岩心驱替实验曲线及数值模拟拟合结果

Fig.2 Curves of core flooding experiments and the matching results of numerical simulation

表1 聚合物驱室内实验所得特性参数与数值模拟参数的对比

Table1 Differences between the characteristic parameters of laboratory experiments and the numerical simulation parameters in polymer flooding

参数	聚合物溶液粘度/(mPa·s)	不可及孔隙体积	残余阻力系数	动态吸附量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
实验所得特性参数	12.4	0.14	5.4	32.6
数值模拟参数	10.6	0.24	2.3	25.0

2 数值模拟参数对聚合物驱效果的影响

大量的实验室和现场研究认为,聚合物驱过程涉及多种物理和化学现象,通过借鉴室内岩心驱替实验以及驱替规律的拟合结果,筛选出影响聚合物驱数值模拟结果的主要敏感性参数包括聚合物溶液粘度、不可及孔隙体积、残余阻力系数以及聚合物吸附量等^[3-7]。通过建立聚合物驱岩心数值模型,所有的基础数据均以驱替规律拟合时的最终调整参数为准,采用单一变量法来研究数值模拟参数对聚合物驱效果的影响。

岩心数值模拟以室内岩心驱替实验为基础(图

3),即首先以一定的注入速度水驱至含水率达90%,接着注入0.3倍孔隙体积的聚合物溶液,再次水驱至含水率达到98%,模拟结束。通过绘制聚合物驱以及后续水驱阶段的含水率曲线与采收率增值曲线,来研究不同参数对聚合物驱效果的影响。评价指标主要包括采收率增加幅度(EOR)以及含水率下降幅度(Δf_w)。

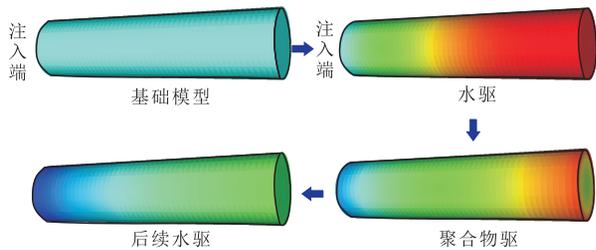


图3 岩心数值模型模拟聚合物驱的基本流程

Fig.3 Basic processes of polymer flooding using numerical simulation model of cores

2.1 聚合物溶液粘度的影响

聚合物溶液的粘度是影响聚合物驱最终采收率的重要因素。聚合物驱之所以可以提高采收率,主要是因为聚合物溶液通过增加水相粘度,降低水油流度比,扩大了波及体积。在岩心数值模型的基础上,分别研究了聚合物溶液粘度为5,10,15和20 mPa·s时的聚合物驱效果。从图4可以看出,随着聚合物溶液粘度的增大,聚合物驱降低含水率的幅度越大;当聚合物溶液注入量相同时,聚合物溶液粘度越大,提高采收率的幅度越大。

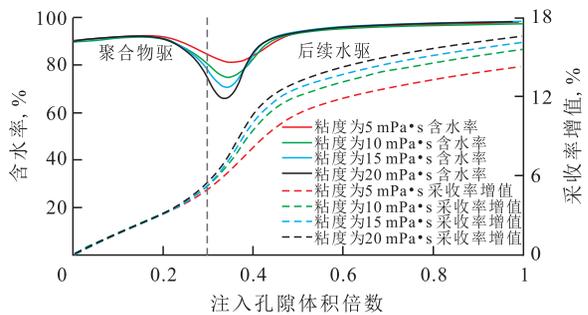


图4 聚合物溶液粘度对聚合物驱效果的影响

Fig.4 Influence of the polymer viscosity on the effect of polymer flooding

2.2 不可及孔隙体积的影响

对于特定的聚合物和岩石,不可及孔隙体积是指聚合物分子不能进入孔喉空间的那部分孔隙体积所占岩石总体积的比例,在聚合物驱注入参数设计和效果预测时,必须考虑不可及孔隙体积。从不可及孔隙体积对聚合物驱效果的影响(图5)可以看出,不可及孔隙体积越大,聚合物驱见效时间越早,降低含水率的幅度越大,而最终采收率受不可及孔隙体积的影响不大。

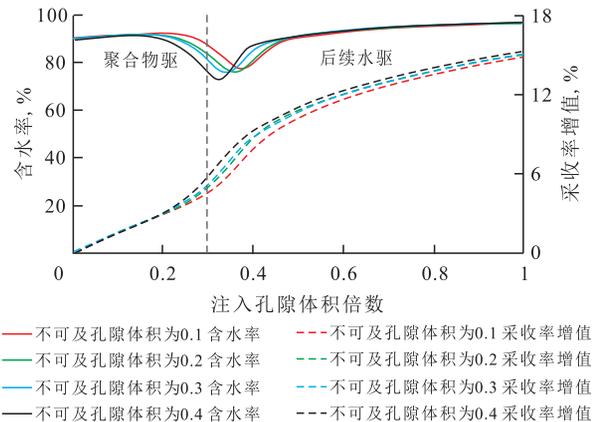


图5 不可及孔隙体积对聚合物驱效果的影响

Fig.5 Influence of the inaccessible pore volume on the effect of polymer flooding

2.3 残余阻力系数的影响

残余阻力系数是描述聚合物降低水相渗透率能力的参数,它是聚合物驱后与聚合物驱前岩石水相渗透率的比值。由残余阻力系数对聚合物驱效果的影响(图6)可以看出,残余阻力系数越大,聚合物驱降低含水率的能力越强,增产效果越好。这是因为聚合物体系残余阻力系数越大,降低水相渗透率的幅度越大,流度控制能力加强,最终导致聚合物驱采收率增值大幅度增加。

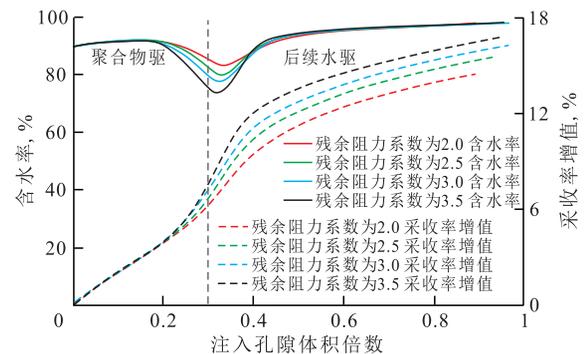


图6 残余阻力系数对聚合物驱效果的影响

Fig.6 Influence of the residual resistance factor on the effect of polymer flooding

2.4 聚合物吸附量的影响

聚合物的吸附可使水相渗透率降低,进而可以改善流度比,并起到调整水相渗透率剖面的作用。由于聚合物在岩石表面的吸附,使得聚合物驱过程中聚合物质量浓度降低,从而影响聚合物驱油效果。如果吸附量很大,导致地下聚合物损耗增大,会使水相渗透率降低的作用不能补偿因吸附而导致的粘度下降,那么吸附将起不利的作用。在室内测试数据的基础上,通过数值模拟分别研究吸附量为10,20,30和40 $\mu\text{g/g}$ 对聚合物驱的影响(图7),可以看出,随着聚合物吸附量的增大,含水率下降幅度减小,采收率增值下降。

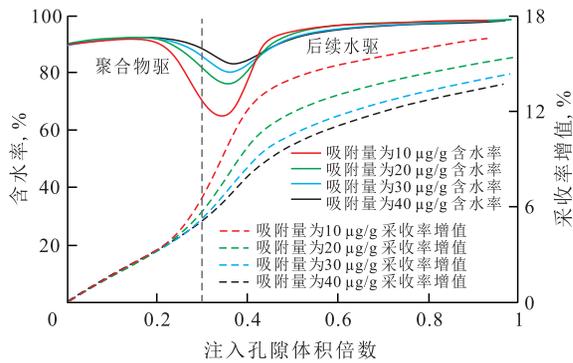


图7 最大吸附量对聚合物驱效果的影响

Fig.7 Influence of the polymer adsorptive capacity on the effect of polymer flooding

3 数值模拟参数敏感性分析

在油田现场聚合物驱跟踪调整和聚合物驱历史拟合的过程中,很难考虑到所有因素的影响,因而有必要筛选出影响聚合物驱效果的主要参数作为优先调整的对象。借鉴数理统计学中变异系数的概念^[13],引入敏感系数作为聚合物驱参数敏感性的评价指标。将敏感系数定义为一组参数的采收率增加幅度(或含水率下降幅度)的标准差与平均采收率增加幅度(或平均含水率下降幅度)的比值,以采收率增加幅度为例,计算敏感系数的表达式为

$$S = \frac{1}{EOR} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (EOR_i - \overline{EOR})^2} \quad (1)$$

在数理统计学中,采用变异系数来衡量数据之间的离散程度或差异程度,变异系数越大说明该组数据受自变量的影响越大。在聚合物驱参数敏感性分析中,敏感系数表征了聚合物驱效果对参数的敏感性强弱,敏感系数越大,表明对该参数的敏感性越强。通过对比不同参数敏感系数可确定影响聚合物驱效果的主要因素。

通过对聚合物驱数值模拟参数的分析,从图4—图7中统计出了各参数分别在4组不同取值水平下的提高采收率幅度以及降低含水率幅度(表2),并分别计算了采收率增加幅度与含水率下降幅度对各参数的敏感系数(表3)。从统计结果可以看出,聚合物驱效果(包括采收率增加幅度以及含水率下降幅度)对不同参数的敏感性不同,而两者对不同参数的敏感程度顺序保持一致,敏感程度从强到弱依次为聚合物吸附量、聚合物溶液粘度、残余阻力系数、不可及孔隙体积。其中不可及孔隙体积的敏感系数最小,主要是因为不可及孔隙体积主要影响聚合物驱的见效时间,而对于降低含水率以及

提高采收率的作用不太明显。

表2 各参数在不同取值水平下的采收率增加幅度以及含水率下降幅度

Table2 Increase rate of oil recovery and decline rate of water cut under various levels of reservoir simulation parameters %

水平	聚合物溶液粘度		不可及孔隙体积		残余阻力系数		聚合物吸附量	
	EOR	Δf_w	EOR	Δf_w	EOR	Δf_w	EOR	Δf_w
1	14.29	8.76	16.77	16.87	13.90	6.37	13.77	5.95
2	15.61	15.04	16.72	14.99	14.90	9.96	14.56	8.95
3	16.16	19.93	16.68	13.79	15.63	11.81	15.63	13.54
4	16.63	23.90	16.59	11.96	16.10	15.68	16.79	22.68
平均值	15.67	16.91	16.69	14.40	15.13	10.96	15.19	12.78

表3 采收率增加幅度与含水率下降幅度对各参数的敏感系数

Table3 Sensitive coefficients of increase rate of oil recovery and decline rate of water cut to reservoir simulation parameters

数值模拟参数	取值	S_{EOR}	$S_{\Delta f_w}$
聚合物吸附量	10~40 $\mu\text{g/g}$	0.086	0.571
聚合物溶液粘度	5~20 $\text{mPa}\cdot\text{s}$	0.065	0.386
残余阻力系数	2.0~3.5	0.063	0.354
不可及孔隙体积	0.1~0.4	0.005	0.143

4 结论

以聚合物驱室内岩心实验为依据,通过拟合含水率与采收率曲线,确定了聚合物溶液粘度、不可及孔隙体积、残余阻力系数以及聚合物吸附量等数值模拟参数。通过岩心数值模拟分析了聚合物驱数值模拟参数对聚合物驱效果的影响。结果表明:采收率增加幅度与含水率下降幅度随聚合物溶液粘度和残余阻力系数的增大而增大,随聚合物吸附量的增大而减小;而不可及孔隙体积主要影响聚合物驱的见效时间,对增加采收率以及降低含水率的幅度影响不大。

引入敏感系数评价聚合物驱效果对各数值模拟参数的敏感性。结果表明,聚合物驱效果对各参数的敏感性从强到弱依次为聚合物吸附量、聚合物溶液粘度、残余阻力系数、不可及孔隙体积。通过对聚合物驱数值模拟参数的分析,为聚合物驱历史拟合过程中参数的调整提供了一定的参考。

符号解释:

EOR ——采收率增加幅度,%; Δf_w ——含水率下降幅度,%; S ——敏感系数; \overline{EOR} ——采收率增加幅度的平均值,%; n ——参数的取值个数,本文数值模拟参数的取值个

数均为4个; EOR_i ——参数在第*i*组取值下的采收率增加幅度,%; S_{EOR} ——以采收率增加幅度计算得出的敏感系数; $S_{\Delta c}$ ——以含水率下降幅度计算得到的敏感系数。

参考文献:

- [1] 赵福麟.EOR原理[M].东营:石油大学出版社,2001:65-69.
Zhao Fulin.EOR principle[M].Dongying: University of Petroleum Press, 2001: 65-69.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 李相远,侯健,杜庆军.基于潜力预测模型的聚合物驱参数敏感性分析[J].油田化学,2006,22(2):163-167.
Li Xiangyuan, Hou Jian, Du Qingjun. Sensibility analysis of polymer flood parameters by using a novel potential predictive mathematical model [J]. Oilfield Chemistry, 2006, 22(2): 163-167.
- [6] 章威,喻高明,胡海霞,等.含水率曲线对聚合物驱特征参数的敏感性分析[J].岩性油气藏,2012,24(1):125-128.
Zhang Wei, Yu Gaoming, Hu Haixia, et al. Sensitivity analysis of polymer flooding characteristic parameters on water cut curve [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(1): 125-128.
- [7] 元福卿,李振泉.不同因素对聚合物驱效果的影响程度研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(4):98-100.
Yuan Fuqing, Li Zhenquan. The influence degree of different factors on the effectiveness of polymer flooding [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(4): 98-100.
- [8] 王晓超,沈思,王锦林,等.渤海S油田聚合物驱剩余油分布规律研究[J].特种油气藏,2016,23(3):102-105.
Wang Xiaochao, Shen Si, Wang Jinlin, et al. Remaining oil distribution of polymer flooding in Bohai S Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(3): 102-105.
- [9] 王正波,王强,叶银珠,等.多参数约束聚合物驱历史拟合方法[J].石油勘探与开发,2010,37(2):216-219.
Wang Zhengbo, Wang Qiang, Ye Yinzhui, et al. A multiple-parameter-constraint history matching method for polymer flooding [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 216-219.
- [10] 张彦辉,曾雪梅,王颖标,等.大庆油田三类油层聚合物驱数值模拟研究[J].断块油气田,2011,18(2):232-234.
Zhang Yanhui, Zeng Xuemei, Wang Yingbiao, et al. Numerical simulation of polymer flooding in Class III reservoir of Daqing Oilfield [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 232-234.
- [11] 张官亮,张祖波,刘庆杰,等.利用CT扫描技术研究层内非均质油层聚合物驱油效果[J].油气地质与采收率,2015,22(1):78-83.
Zhang Guanliang, Zhang Zubo, Liu Qingjie, et al. Study on effects of polymer flooding on layered heterogeneous reservoirs using CT scanning [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 78-83.
- [12] Chen G, Wei C, Han X, et al. Simulation for high viscoelasticity polymer flooding pilot in LMDN4-4 Block of Daqing Oilfield [C]. // Society of Petroleum Engineers. Kuala Lumpur: SPE Asia Pacific Enhanced Oil Recovery Conference, 2015.
- [13] Zechner M, Clemens T, Suri A, et al. Simulation of polymer injection under fracturing conditions—An injectivity pilot in the Matzen Field, Austria [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2015, 18(2): 236-249.
- [14] 张忠勋,沈全富,陈文若,等.聚合物驱多学科油藏研究与应用[M].北京:石油工业出版社,2014:154-165.
Zhang Zhongxun, Shen Quanfu, Chen Wenruo, et al. Reservoir multidisciplinary research and application of polymer flooding [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 154-165.
- [15] 王新海.聚合物驱数值模拟主要参数的确定[J].石油勘探与开发,1990,17(3):69-76.
Wang Xinhai. Determination of the main parameters in the numerical simulation of polymer flooding [J]. Petroleum Exploration and Development, 1990, 17(3): 69-76.
- [16] 茆诗松,程依明,濮晓龙.概率论与数理统计教程[M].北京:高等教育出版社,2011:279-280.
Mao Shisong, Cheng Yiming, Pu Xiaolong. Probability theory and mathematical statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 279-280.

编辑 经雅丽