

聚合物-表面活性剂驱数值模拟技术理论与实践

郑浩, 苏彦春, 张迎春, 周凤军, 王月杰

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海油田勘探开发研究院, 天津 300452

摘要 油藏数值模拟作为一项成熟技术, 已被广泛应用于油田开采中生产措施的调整和方案优化, 以及提高采收率等方面。虽然化学驱数值模拟软件众多, 但化学驱原理的实现方法基本相同。本文以 Eclipse 数值模拟软件为例, 介绍了聚合物-表面活性剂驱数值模拟的基本原理及实现。在实践基础上, 给出了聚合物-表面活性剂二元复合驱数值模拟所需实验室测定参数处理方法以及取值范围, 提出了利用数值模拟软件结合二元驱油实验构造毛管减饱和度曲线的新方法, 并以实际油田为例进行了参数筛选及敏感性分析; 推荐实际区块聚合物注入浓度为 1500mg/L, 表面活性剂浓度为 0.1%。

关键词 油藏数值模拟; 聚合物; 表面活性剂; 参数处理

中图分类号 TE357

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.16.007

Eclipse Numerical Simulation Techniques for Polymer Surfactant Flooding: Theory and Practice

ZHENG Hao, SU Yanchun, ZHANG Yingchun, ZHOU Fengjun, WANG Yuejie

Bohai Oilfield Exploration and Development Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China

Abstract The reservoir numerical simulation, as a mature technology, is widely used in the adjustment and the optimization of the production measures in the oil exploration, and the oil recovery improvement. Although the numerical simulation softwares of chemical flooding are numerous, but their basic principles and the realization methods are similar. This paper takes the Eclipse numerical simulator as an example, discusses the basic principle and the numerical simulation implementation of the polymer-surfactant flooding, presents the laboratory parameters required and the determination methods. A new method of constructing the capillary desaturation curve is proposed by combining the numerical simulation calculation with the oil displacement experiments, and with a special oilfield as an example, the parameter selection and the sensitivity analysis are shown: the polymer concentration is 1500mg/L, and the surfactant concentration is 0.1%.

Keywords reservoir numerical simulation; polymer; surfactant; parameter processing

0 引言

具有化学驱模拟功能的油藏数值模拟软件很多, 国内外许多研究机构与学校都拥有自己的化学驱模拟软件。以美国 Texas 大学开发的化学驱数值模拟软件 UTCHEM 为例, 它拥有很好的程序框架和机理描述, 是理论研究方面很好的教学科研软件, 但不适合较为复杂地质模型的实际矿场应用^[1,2]。目前, 比较成熟的具有化学驱模块功能的商业化软件包括 Eclipse、VIP、CMG 3 个主流软件^[3], 具有较为强大的前后处理功能。本文以 Eclipse 数值模拟软件为例, 介绍聚合物-表面

活性剂驱数值模拟基本原理以及化学驱数值模拟所需实验室参数的选取和处理, 并在实践基础上给出合理取值范围。针对表面活性剂驱数值模拟过程中参数获取困难等因素, 提出利用数值模拟软件结合二元驱油实验构造毛管减饱和度曲线的新思路。

1 聚合物驱提高采收率基本原理及 Eclipse 数值模拟

1.1 聚合物驱提高采收率基本原理及数值模拟处理

聚合物溶液由于改善了水油流度比, 扩大了波及体积,

收稿日期: 2013-01-28; 修回日期: 2013-03-12

作者简介: 郑浩, 工程师, 研究方向为油藏工程, 电子邮箱: zhenghao2@cnooc.com.cn

提高了最终采收率。王德民等提出了黏弹性聚合物溶液的弹性提高微观驱油效率的观点^[4],此方向基础研究工作主要集中在聚合物驱相渗曲线特征,聚合物溶液黏性及弹性对驱油的贡献、表征,以及数值模拟实现等方面。

Eclipse 数值模拟软件不考虑聚合物溶液弹性提高微观驱油效率的作用,只考虑聚合物溶液注入后有利的流度比扩大了波及体积。流度比的改善主要来自两个方面:一是聚合物溶液的注入使驱替相的黏度增加;二是聚合物溶液在岩石表面的吸附及在孔隙中的滞留引起水相渗流能力的降低。有利的流度比会产生两方面作用:一方面减轻注入相的黏性指进,提高层内波及系数;另一方面,降低高渗层段的流体总流度,缩小高、低渗层段水线推进速度差,调整吸水剖面,提高层间波及系数。

1.2 Eclipse 聚合物驱数值模拟实现

Eclipse 数值模拟软件考虑的聚合物物化特征有盐敏、剪切、吸附、不可及孔隙体积以及渗透率下降。从数值模拟软件描述看,能够较完整地反映出聚合物的物化特征。由于聚合物溶液通常为段塞注入,为了描述聚合物段塞的前缘扩散及后续水驱不利的流度比产生的黏性指进,通过 Todd-Longstaff^[5]参数 ω 描述这种行为。

关于聚合物驱数值模拟的实现,文献[5]进行了较为详尽的叙述,本文不再赘述。Eclipse 聚合物驱采用的仍为相模型,通过修改水相参数体现聚驱特征,因此 Eclipse 聚合物驱数值模拟是在黑油模型基础上的发展,数值模拟的实现与常规黑油模型的差别如表 1 所示。

表 1 Eclipse 聚合物驱数值模拟与黑油模型对比
Table 1 Comparison between the polymer flooding model and the black oil model

水驱	聚驱
RUNSPEC	POLYMER(BRINE)
GRID	—
EDIT	—
PROPS	PLYADS/PLYROCK/PLYMAX/PLYSHEAR/ PLYVISC(S)/TLMIXPAR/(SALTNODE)
REGIONS	—
SOLUTION	(SALTVD/SALT)
SUMMARY	—
SCHEDULE	WPOLYMER

2 表面活性剂驱提高采收率原理及 Eclipse 数值模拟

2.1 表面活性剂驱提高采收率原理及数值模拟处理

表面活性剂驱研究较早,始于 20 世纪 20 年代,50 年代开展大规模实验室研究,70 年代开始进行矿场实践^[6]。整个 70 年代,无论是基础研究还是矿场试验,驱油用表面活性剂主要是石油磺酸盐,它具有低界面张力、较高增容能力且价格低等特点。

表面活性剂驱按照驱油体系及驱油机理^[7],可以分为微

乳液驱与活性水驱两类。微乳液通常由表面活性剂、助表面活性剂、油、水或盐水等组分在适当配比下自发生成,提高微观洗油效率的原理主要是微乳液对原油的增容作用。微乳液的相态很复杂,与许多因素有关,包括表面活性剂的类型、浓度、助剂、油、盐,以及温度和压力。即使简单的微乳液,也没有通用的状态方程,因此体系的相态是通过实验测定的,较为完善的数值模拟器描述了表面活性剂的多相体系的平衡相组成、相密度、相黏度、相间界面张力、醇对最佳矿化度的影响、活性剂在岩石表面的吸附损失、离子交换及驱动相与被驱油相的渗透率等^[8,9]。

对于活性水驱,表面活性剂会吸附在油水界面和岩石表面,从而改变油水界面张力和岩石的润湿性,因此产生的各种作用可以驱动残余油,提高采收率。

对于岩心尺度,从驱替效率来讲,主要体现在毛管减饱和度曲线上。如图 1^[10]所示,纵坐标为驱油效率及残余油饱和度,横坐标为油水界面张力 σ 及毛管数 N_c ,随着界面张力的降低及毛管数的增大,残余油饱和度逐渐降低,当达到 10^{-2} 数量级时,残余油饱和度开始大幅度降低。

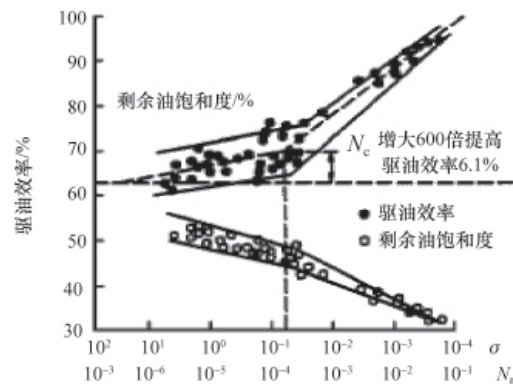


图 1 毛管减饱和度曲线

Fig. 1 Capillary desaturation curves

实际油田中大多数的水驱处于较低的毛管数范围 (10^{-7} ~ 10^{-5} 数量级)^[11],毛管数处于残余油降低的水平段上,不改变注水的毛管数,则残余油很难降低。为了降低残余油,需要将毛管数再增大 10^2 ~ 10^4 数量级,实际生产中依靠增大生产压差是不可能实现的,只能降低油水间的界面张力。此时,油水界面张力降低到 10^{-2} ~ 10^{-3} 数量级,这也是 10^{-3} 数量级超低界面张力提出的原因。

Eclipse 数值模拟不考虑表面活性剂驱的物理化学过程,只是宏观地描述整个表面活性剂驱油的过程。由于残余油饱和度端点发生移动,两相渗流发生变化,因此数值模拟的核心在于表征变化后的两相渗流。Eclipse 技术手册中虽然未给出相渗的实际插值过程,但从插值描述中可以发现,其插值过程与文献[9]、[12]描述基本相同。文献[12]关于相渗插值叙述较为详细和完善,本文不再赘述。

2.2 Eclipse 表面活性剂驱数值模拟实现

Eclipse 中对表面活性剂的描述主要有表面活性剂浓度对体系黏度的影响、表面活性剂的吸附、不同表面活性剂浓度下的油水界面张力值,更为重要的是,需要输入表面活性剂驱相渗、毛管减饱和度数据。毛管减饱和度表控制相渗插值。Eclipse 表面活性剂驱采用的仍为相模型,通过修改残余油饱和度及两相渗流过程体现表面活性剂驱特征,因此,Eclipse 表面活性剂驱数值模拟是在黑油模型基础上的发展,数值模拟的实现与常规黑油模型的差别如表 2 所示。

表 2 Eclipse 表面活性剂驱数值模拟与黑油模型对比
Table 2 Comparison between surfactant flooding model and the black oil model

水驱	表面活性剂驱
RUNSPEC	SURFACT
GRID	-
EDIT	-
PROPS	SURFVISC/SURFADS/SURFST/SURFCAPD/ SURROCK
REGIONS	-
SOLUTION	-
SUMMARY	-
SCHEDULE	WSURFACT

3 聚合物-表面活性剂二元复合驱数值模拟的实现及 Eclipse 软件存在的问题

由于 Eclipse 数值模拟软件聚合物和表面活性剂驱均采用相模型,因此,在 Eclipse 数值模拟中实现聚合物表面活性剂二元复合驱就是将描述二者的物化参数输入。但实际两相渗流过程中,对于吸附来说,由于两相渗流时存在竞争吸附,因此两相的吸附行为十分复杂,Eclipse 数值模拟软件中没有此种机理的描述及处理;另外,实验发现,两相渗流时各自吸附损失要比各自单独吸附损失小,由于数值模拟输入的吸附是两相单独渗流时的吸附曲线,数值模拟过程中应依据两相渗流时的结果予以简单、适当地处理。

4 数值模拟中应注意的问题

4.1 聚合物数值模拟

从数值模拟参数敏感性分析可知,聚合物黏浓关系对采收率的影响最为显著,因此,聚合物黏浓关系的准确获取,对结果预测的可靠性起着决定性的作用。如图 2^[3]所示,大庆油田矿场实际测量表明,经过配注站、注入泵、注入井,聚合物溶液黏度发生较大幅度的损失,损失主要产生于配注的熟化过程,经过地面截流管汇、炮眼时对聚合物的剪切作用。依据数值模拟跟踪预测时黏度的调整值并参考实际油田实测数据,建议聚合物方案设计指标预测时,聚合物溶液黏度值不超过实验室条件下的 30%。

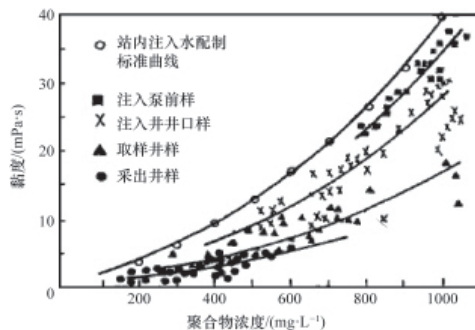


图 2 聚合物注入过程中黏度变化曲线

Fig. 2 Polymer injection viscosity variation curve

实验室参数的选取及处理参见文献[5]。在实践基础上,给出了聚合物驱所需其他参数的取值范围,如表 3 所示。

表 3 聚合物驱参数

Table 3 Polymer flooding parameters

设置项	说明
吸附损失	设置为可逆吸附,取动态吸附值,量值在 $(1\sim 10)\times 10^{-6}\text{kg/kg}$
残余阻力系数	一般取 2 左右(根据实际霍尔曲线计算值)
不可及孔隙体积	一般取 0.15~0.2,主要影响溶液的渗流速度
混合参数	$\omega=1$,认为聚合物溶液能够在地下充分混合

4.2 表面活性剂驱数值模拟

前文提到,毛管减饱和度曲线与相渗是实现表面活性剂驱最重要的两组数据,对于毛管减饱和度曲线,需要测得较为完整的毛管减饱和度曲线,找到残余油饱和度开始下降以及在现有条件下残余油不再降低的毛管束值,以达到控制相渗插值的目的;对于表面活性剂驱相渗,由于实验室条件下存在较为严重的乳化现象,而且实验岩心短,不容易计量用于相渗曲线处理的累产油随时间的变化,因此,很难从实测角度获得理想的表面活性剂驱相渗。参照表面活性剂驱基本原理以及文献中关于相渗插值的描述,本文给出两种处理方式。首先根据毛管减饱和度曲线确定最低残余油饱和度,与水驱条件对比,折算到岩心情况,以提高采收率幅度为类比,确定与归一化后水驱相渗对比的表面活性剂驱油相相渗端点值,对于油水相渗的形态,按照两种方式进行处理:非混相构造时,根据归一化的相渗曲线减小 n 指数实现;混相构造时,类似活塞式驱替的特征,此时 n 指数等于 1(图 3)。

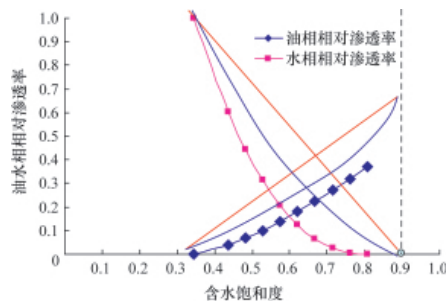


图 3 表面活性剂驱相渗构造示意

Fig. 3 Relative permeability of surfactant flooding

5 聚合物-表面活性剂二元复合驱注入参数确定及敏感性分析

聚合物溶液性质中的黏浓关系以及表面活性剂的界面张力是影响聚合物-表面活性剂二元复合驱效果的最重要的两项参数。在实验室聚合物、表面活性剂溶液性质测定及驱油实验的基础上,海上某油田已开展聚合物及聚合物驱基础上的二元复合驱,本文以实际区块为例,通过建立理论模型,模拟实际生产过程,通过数值模拟手段确定聚表二元复合驱注入浓度并对参数开展敏感性分析。

5.1 模型建立

(1) 地质模型。

均质模型;孔隙度 0.26,渗透率 $k_x=k_y=10k_z=1000\text{mD}$ 。

网格系统: $X \times Y \times Z=80 \times 80 \times 1$,平面网格步长 20m,单层模型,纵向网格步长 10m。原油原始地质储量 $422.65 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

(2) 流体模型。

采用油田实际流体高压物性数据及油气相对渗透率曲线。油藏埋深-1600m,原始地层压力 16.7MPa,饱和压力 13.1MPa,饱和压力下地下原油黏度 $10\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

5.2 生产控制

模拟实际区块的生产过程,采用反 9 点面积井网(图 4),当地层压力降低到饱和压力附近时进行注水开发,进入中高水期(含水率 80%)开展聚合物驱及聚表二元复合驱,考虑矿化度对聚合物溶液的影响。区块初期控制采油速度 $\leq 3\%$,采液速度 $\leq 6\%$,采油井定压生产,限制单井产油量及产液量,注水后保持地层能量生产,注采比控制在 1.0(I1/I2/I3/I4 为注入井,P1~P21 为采油井)。

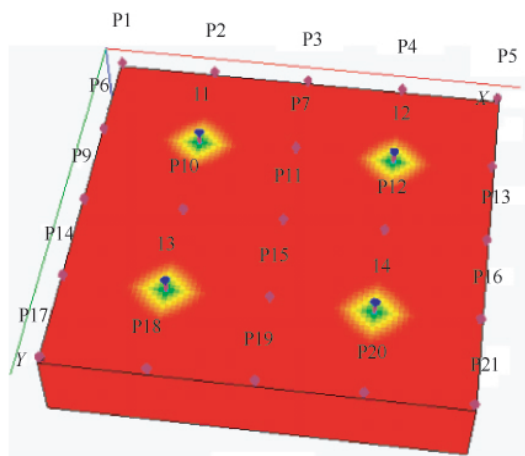


图 4 反 9 点面积井网典型模型示意

Fig. 4 Typical model of anti-nine point well pattern

聚合物黏浓曲线及表面活性剂与原油界面张力曲线如图 5 和图 6 所示。

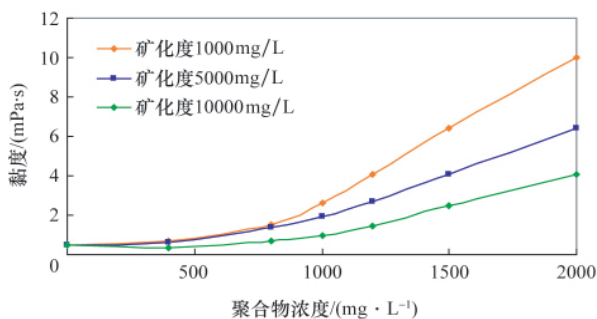


图 5 不同矿化度下聚合物黏浓关系曲线

Fig. 5 Polymer stick concentrated curve

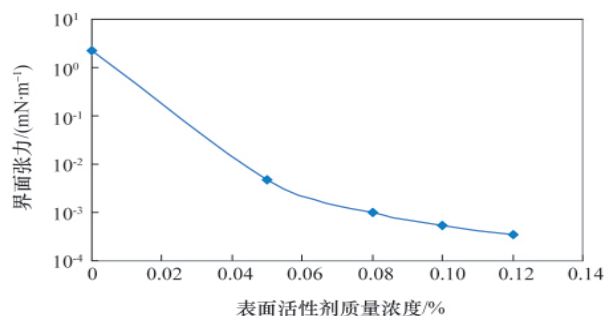


图 6 表面活性剂与原油界面张力曲线

Fig. 6 Surfactant and crude oil interfacial tension curve

5.3 实验设计及结果分析

(1) 将聚合物溶液浓度设定在 1000~2000mg/L,表面活性剂浓度设定在 0~0.2%的实际生产可以接受的范围内,具体为:聚合物浓度 1000、1200、1500、1800mg/L,表面活性剂 0、0.05%、0.1%、0.15%、0.2%,开展完全组合的数值模拟实验,结果如图 7 所示。

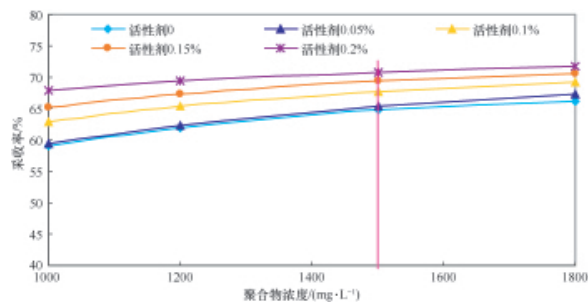


图 7 不同聚合物浓度及表面活性剂浓度组合实验结果

Fig. 7 The surfactant concentration and the polymer concentration

由图 7 可以看出,当表面活性剂浓度 $> 0.1\%$ 后,采收率增加幅度逐渐变缓;当聚合物浓度 $> 1500\text{mg/L}$ 后,采收率增加幅度逐渐变缓。

(2) 固定聚合物浓度 1500mg/L, 表面活性剂浓度 0.15%, 对影响聚合物性质的黏度、残余阻力系数、表面活性剂吸附及界面张力开展正交实验, 实验设计方案及结果如表 4 所示。从结果可以看出, 按照极差从大到小的顺序, 依次为聚合物黏度保留率、残余阻力系数、表面活性剂吸附浓度、界面张力, 实验极差反映了各因素(因素水平极差范围内)对结果的影响程度, 极差越大, 说明该因素在该水平范围内对结果的作用越显著。由此可知, 对于聚表二元复合驱, 在合适的界面张力范围内, 聚合物溶液的性质会对复合驱的效果产生主要影响, 因此在筛选二元配方时, 表面活性剂与聚合物混合溶液的黏度保留率以及残余阻力系数是 2 个十分重要的指标, 尤其是在聚合物驱基础上开展的聚合物-表面活性剂二元复合驱, 黏度保留率以及残余阻力系数应作为筛选表面活性剂的决定性指标。

**表 4 聚合物-表面活性剂二元复合驱参数敏感性
正交实验设计方案及结果**

**Table 4 Orthogonal experimental design and results of
polymer-surfactant flooding parameters**

因素	黏度保留率	残余阻力系数	表面活性剂吸附倍数	界面张力倍数	采收率/%
实验 1	1	2.5	1	1	70.37
实验 2	1	2.0	0.75	5	69.26
实验 3	1	1.5	0.5	10	66.17
实验 4	0.75	2.5	0.75	10	67.05
实验 5	0.75	2.0	0.5	1	69.67
实验 6	0.75	1.5	1	5	65.50
实验 7	0.5	2.5	0.5	5	67.53
实验 8	0.5	2.0	1	10	62.74
实验 9	0.5	1.5	0.75	1	63.84
均值 1	68.60	68.32	66.20	67.96	
均值 2	67.41	67.22	66.72	67.43	
均值 3	64.70	65.17	67.79	65.32	
极差	3.90	3.15	1.59	2.64	

6 结论

以 Eclipse 数值模拟软件为例, 介绍了聚合物-表面活性剂驱数值模拟的基本原理及实现。在实践基础上, 给出了化学驱数值模拟参数选取及处理方法。通过数值模拟实验, 对影响聚表二元复合驱的参数进行了敏感性分析, 表面活性剂与聚合物混合溶液的黏度保留率以及残余阻力系数是筛选表面活性剂的两个十分重要的指标。

参考文献 (References)

- [1] 余庆东. 化学驱数值模拟软件介绍[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 62.
Yu Qingdong. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing,

2001, 20(2): 62.

- [2] 宋道万, 孙玉红. 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. Oil and Gas Recovery Technology, 2000, 7(2): 41-44.
- [3] 侯树伟, 常晓平, 袁庆. 聚合物驱数值模拟应用方法研究[J]. 石油地质与工程, 2009, 23(2): 110-111.
Hou Shuwei, Chang Xiaoping, Yuan Qing. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(2): 110-111.
- [4] 夏惠芬, 王德民, 王刚, 等. 化学驱中黏弹性驱替液的微观力对残余油的作用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 150-155.
Xia Hui fen, Wang Demin, Wang Gang, et al. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2009, 30(4): 150-155.
- [5] 郑浩, 张迎春, 王惠芝, 等. Ecl-POLYMER 模块对海上聚合物驱数值模拟实现的应用探讨 [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2011, 13(5): 152-154.
Zheng Hao, Zhang Yingchun, Wang Huizhi, et al. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2011, 13(5): 152-154.
- [6] 王云峰, 张春光, 侯万国. 表面活性剂及其在油气田中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
Wang Yunfeng, Zhang Chunguang, Hou Wanguo. Surfactant and its application in the oil and gas fields [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [7] 叶仲斌. 提高采收率原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
Ye Zhongbin. EOR [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [8] 陈惠琴, 姜言里, 吴军政, 等. 表面活性剂驱数值模拟参数测定方法[J]. 油田化学, 1990, 7(2): 162-170.
Chen Huiqin, Jiang Yanli, Wu Junzheng, et al. Oilfield Chemistry, 1990, 7(2): 162-170.
- [9] 廖广志, 王启民, 王德民. 化学复合驱原理及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 68-92.
Liao Guangzhi, Wang Qimin, Wang Demin. Principle and application of chemical flooding[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 68-92.
- [10] 王德民. 发展三次采油新理论新技术 确保大庆油田持续稳定发展 (上)[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(3): 1-6.
Wan Demin. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(3): 1-6.
- [11] 何更生. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 299-300.
He Gengsheng. Petrophysics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 299-300.
- [12] 戚连庆, 王为, 汪佑江, 等. 复合驱相渗透曲线再研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2010, 29(3): 137-141.
Qi Lianqing, Wang Wei, Wang Youjiang, et al. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2010, 29(3): 137-141.
- [13] 赵长久, 韩培慧, 李新峰. 聚合物驱注入压力探讨 [J]. 油气采收率技术, 1997, 4(2): 17-21.
Zhao Changjiu, Han Peihui, Li Xinfeng. Oil and Gas Recovery Technology, 1997, 4(2): 17-21.

(责任编辑 王媛媛)