

Research on Numerical Simulation Method of Section Inversion during Polymer Flooding

Ailing Zheng¹, Xiaodong Kang², Dehua Liu¹

¹College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan Hubei

²CNOOC Research Center, Beijing

Email: kangxd@cnooc.com.cn

Received: Dec. 7th, 2015; accepted: Jan. 17th, 2016; published: Mar. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The inversion of injection profile was easily induced in single slug injection in heterogeneous reservoirs; it was unfavorable for enhancing oil recovery. In allusion to the problems of high cost, long duration and heavy workload of laboratory simulation, which were hard to be described by conventional reservoir simulation, based on percolation theory and physical-chemical property in polymer flooding, an uncross flow linear percolation model of two parallel layers was established. Compared with the characteristics of simulation software, a simulation method for profile inversion was proposed based on the sorting of reservoir physical property. The studied method is used for systematically studying the factors influencing the profile inversion; the result shows that the permeability contrast, its injection time and its concentration are the major factors affecting the inversion; it provides a technical support for studying the regulation and the reduction of profile inversion in polymer flooding.

Keywords

Polymer Flooding, Profile Inversion, Numerical Simulation, Physical Experiment, Inversion Mechanism

聚合物驱剖面返转数值模拟方法研究

郑爱玲¹, 康晓东², 刘德华¹

¹长江大学石油工程学院, 湖北 武汉

²中海石油研究总院, 北京

作者简介: 郑爱玲(1979-), 女, 硕士, 讲师, 现从事油气田开发方面的教学和科研工作; 通信作者: 康晓东。

Email: kangxd@cnooc.com.cn

收稿日期: 2015年12月7日; 录用日期: 2016年1月17日; 发布日期: 2016年3月15日

摘要

非均质油藏聚合物单一段塞驱油过程中吸液剖面易发生返转, 不利于提高采收率。针对室内物理模拟试验花费高、周期长、工作量大, 常规数值模型难以描述聚合物驱剖面返转现象的问题, 根据渗流理论、聚合物驱物化现象, 建立了聚合物驱两层并联不窜流线性渗流模型; 结合油藏数值模拟软件特点, 提出了根据储层物性分区进行聚合物特征参数差异赋值的剖面返转数值模拟方法。采用建立的剖面返转数值模拟方法对油田聚合物驱剖面返转现象的影响因素进行了系统研究, 结果表明, 渗透率级差、注聚时机、聚合物质量浓度对聚合物剖面返转现象影响较大, 为研究聚合物驱吸液剖面返转规律及减缓剖面返转现象提供技术支持。

关键词

聚合物驱, 剖面返转, 数值模拟, 物理实验, 返转机理

1. 引言

聚合物驱油技术已成为油田增储稳产的关键技术之一[1]-[3]。渤海稠油油藏原油黏度高、纵向层系多、非均质性严重且开发周期短, 在早期聚合物驱过程中吸液剖面返转问题更加复杂[4] [5]。目前聚合物驱常规数值模拟方法未能充分体现储层物性差异及造成的聚合物渗流动态规律差异, 难以准确描述聚合物驱剖面返转现象和驱油效果。为实现聚合物驱剖面返转精细模拟, 通过理论分析、室内物理试验和数值模拟, 建立能准确反映剖面返转现象的油藏数值模拟方法, 为研究聚合物驱过程中吸液剖面返转问题及相应的改善驱油效果的方法提供参考。

2. 聚合物驱剖面返转现象理论研究

根据渗流力学理论, 存在渗透率级差的两层并联不窜流线性渗流模型, 在聚合物驱时, 高、低渗透层分流率方程如下:

$$f_1 = \frac{Q_{o1} + Q_{p1}}{(Q_{o1} + Q_{p1}) + (Q_{o2} + Q_{p2})} = \frac{\frac{k_{rw1}}{\mu_w R_{m1}} + \frac{k_{ro1}}{\mu_o}}{\left(\frac{k_{rw1}}{\mu_w R_{m1}} + \frac{k_{ro1}}{\mu_o}\right) + \frac{1}{M} \left(\frac{k_{rw2}}{\mu_w R_{m2}} + \frac{k_{ro2}}{\mu_o}\right)} \quad (1)$$

$$f_2 = \frac{\frac{k_{rw2}}{\mu_w R_{m2}} + \frac{k_{ro2}}{\mu_o}}{M \left(\frac{k_{rw1}}{\mu_w R_{m1}} + \frac{k_{ro1}}{\mu_o} \right) + \left(\frac{k_{rw2}}{\mu_w R_{m2}} + \frac{k_{ro2}}{\mu_o} \right)} \quad (2)$$

其中阻力系数 R_m 为水的流度与聚合物溶液流度的比值，即：

$$R_m = \left(\frac{k_w}{\mu_w} \right) / \left(\frac{k_p}{\mu_p} \right) \quad (3)$$

式中： f_1 、 f_2 分别为高、低渗透层分流率，1； Q_{o1} 、 Q_{p1} 、 Q_{o2} 、 Q_{p2} 分别为高、低渗透层油、聚合物溶液流量， m^3/s ； k_{ro1} 、 k_{rw1} 、 k_{ro2} 、 k_{rw2} 分别为高、低渗透层油相、水相相对渗透率，1； R_{m1} 、 R_{m2} 分别为高、低渗透层阻力系数，1； μ_o 、 μ_w 、 μ_p 分别为油、水、聚合物溶液黏度， $mPa \cdot s$ ； k_w 、 k_p 分别为水相、聚合物溶液的渗透率， mD ； M 为高、低渗透层渗透率级差，1。

从式(1)、(2)可看出，总流量在高、低渗透层的分配不仅与储层非均质性有关，也与聚合物物化性质相关。多层非均质油藏由于沉积环境差异，使得纵向上各层的渗透率、孔隙度、润湿性、相对渗透率曲线等存在差异，这种差异和聚合物在多孔介质中渗流的物化性质使得各层中流体的渗流动态规律不同，影响总流量在各层中的分配。

3. 剖面反转数值模拟方法

3.1. 聚合物驱数值模拟关键参数

基于聚合物驱剖面反转现象理论研究，能有效体现剖面反转的聚合物驱数值模拟关键参数及室内试验研究如下。

1) 聚合物吸附

聚合物在多孔介质中流动时，会在多孔介质或岩石表面吸附滞留，聚合物吸附的强弱与流体类型、分子量、流速、岩石矿物性质及渗透率等相关[6]。试验结果表明，SZ36-1 油田所用 AP-P4 疏水缔合聚合物溶液吸附量随质量浓度增加而增加，随孔隙度降低而增加。

2) 聚合物黏度

聚合物溶液的高黏度能增加水相黏度，降低油水黏度比，为非牛顿流体[7] [8]。试验结果表明，SZ36-1 油田所用 AP-P4 疏水缔合聚合物黏度随质量浓度增加而增加。

3) 渗透率下降系数

由于聚合物溶液在多孔介质中的吸附、机械及水动力捕集等滞留作用，导致岩石孔隙介质渗透率变化。渗透率下降系数是聚合物吸附和残余阻力系数的函数[9]：

$$R_k = 1 + (RRF - 1) \cdot \frac{C_p^a}{C_{pmax}^a} \quad (4)$$

式中： R_k 为渗透率下降系数，1； C_{pmax}^a 为单位岩石体积中聚合物最大吸附量， kg/m^3 ； C_p^a 为单位岩石体积中聚合物吸附量， kg/m^3 ； RRF 为残余阻力因子，1。

4) 不可及孔隙体积(IPV)

高分子聚合物溶液流过多孔介质时，仅能通过部分孔隙体积，有一部分孔隙不能到达。不可及孔隙体积主要取决于储层渗透率、孔隙大小、聚合物分子量等因素[10]。

3.2. 数值模拟方法研究

聚合物驱数值模拟关键参数的研究表明, 聚合物驱油机理的特征参数与储层物性相关, 而目前聚合物驱常规数值模拟过程中未能充分体现这些差异, 也未考虑黏-弹性聚合物驱替后微观残余油降低、微观驱替效率增加的影响对相渗曲线进行聚合物驱修正, 因而难以准确描述聚合物驱剖面返转规律和模式。

为实现聚合物驱精细数值模拟, 根据各层渗透率、孔隙度、润湿性分布情况进行分区, 依据室内试验数据, 分别设置不同的润湿性、相对渗透率曲线、聚合物吸附数据、残余阻力系数、不可及孔隙体积等特征参数。

根据研究区块地质特征、流体特征及聚合物特征, 采用加拿大 CMG 软件 STARS 化学驱模拟器进行剖面返转现象对比研究。高、低渗层渗透率分别为 1500、500 mD, 原油为目标油田 SZ36-1 稠油(65℃下, 黏度为 70 mPa·s), 模拟水黏度为 0.5 mPa·s, 注入 0.5 PV 水后注入 0.6 PV 聚合物, 后续水驱 1.4 PV, 模拟结果见图 1、图 2。

从图 1 可看出, 高、低渗层相渗曲线、吸附数据、残余阻力系数和不可及孔隙体积对聚合物驱分流率曲线形态、剖面返转时机和返转幅度影响较大。图 2 表明, 根据储层物性进行聚合物特征参数差异赋值的方法和常规笼统赋值的方法分流率曲线存在较大差异。

通过特征参数差异赋值法和常规笼统赋值方法对室内剖面返转物理试验进行反演, 验证方法的可靠性。双层并联人造岩心, 岩心为 30 cm × 4.5 cm × 4.5 cm, 高、低渗层渗透率分别为 950、317 mD。不同方法的油藏数值模拟反演结果见图 3, 从图 3 可看出, 与常规笼统赋值法相比, 特征参数差异赋值法的拟合效果更好, 更能准确反映聚合物驱剖面返转特征。

4. 实例应用

SZ36-1 油田为海上普通稠油油田, 油田 1993 年投产, 采用反九点井网注水开发, 2003 年开展聚合物驱单井试验, 2008 年开始实施井组扩大注聚。采用聚合物驱剖面返转新数值模拟方法剖析了注聚井剖面返转规律及影响因素。

研究表明, 随渗透率级差增加, 高渗层渗透率增大, 注入压力降低, 低渗层吸液压差小, 改善吸液剖面效果不理想, 低渗层吸液剖面形态从倒 U 型向倒 V 型变化; 低渗层启动程度低, 分流率峰值显著降低; 低渗层对聚合物的吸附和滞留更加敏感, 导致渗透率下降速度、幅度越大, 吸液压差减少越多, 剖面返转时机越早。为使聚合物注入剖面更加均匀, 增加中、低渗透油层的动用程度, 应尽量降低层系内的渗透率级差(图 4)。

随注聚时机推迟, 低渗层吸液剖面峰值先增加后略下降; 剖面返转时机先提前, 含水率大于 90%后推迟; 剖面形态从倒 U 型向倒 V 型转化。为减弱剖面返转现象对聚合物驱油效果的影响, 应选择合适的注聚时机(图 5)。

随聚合物质量浓度增大, 聚合物黏度增加, 注入压力升高, 调剖能力越强, 低渗层启动越快, 调整低渗层吸液剖面效果越好, 低渗层峰值增加, 返转时机提前; 浓度增大到一定程度, 低渗层注入困难, 堵塞严重, 造成注聚后期层间矛盾更突出, 扩大波及体积效果和提高洗油效率能力降低。只有当聚合物溶液浓度(黏度)适中, 与岩心孔喉具有良好配伍性, 才能满足非均质储层不同渗透层对流度控制强度的需求, 提高增油效果(图 6)。

5. 结论

1) 根据渗流力学理论, 建立了聚合物驱两层并联不窜流线性渗流模型, 揭示了聚合物驱剖面返转的影响因素在于高、低渗透层的物性差异及聚合物物化性质。

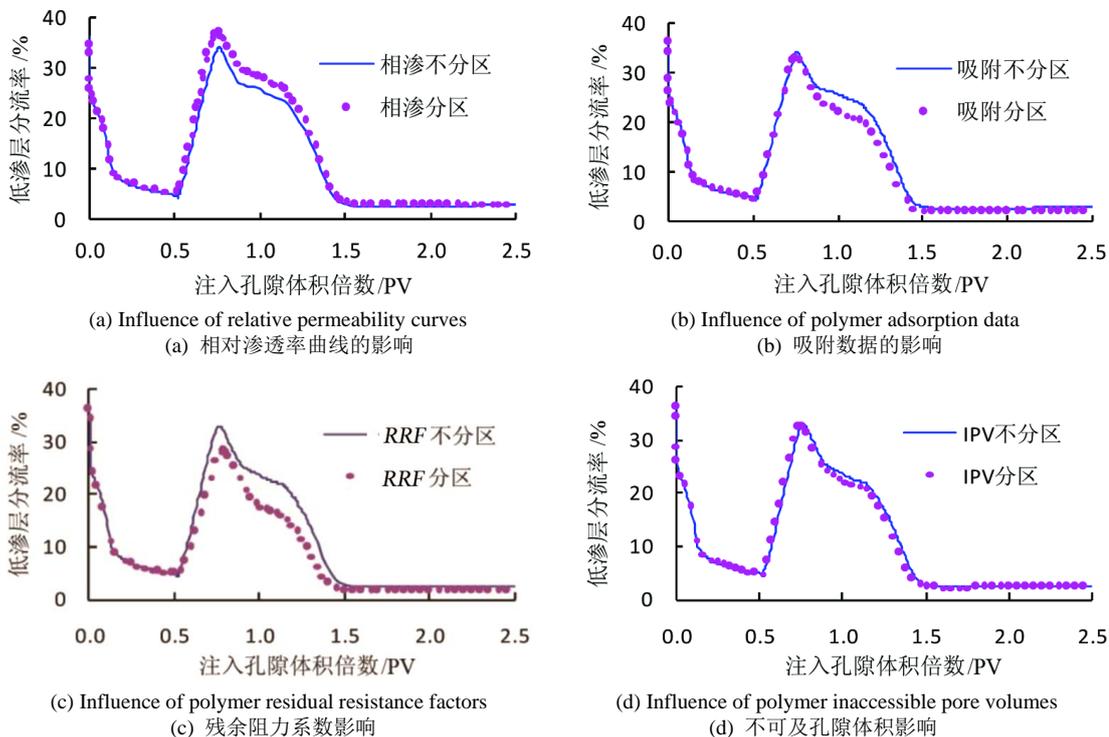


Figure 1. Relative liquid injection rate curves of influence factors

图 1. 不同影响因素下低渗层分流率对比曲线

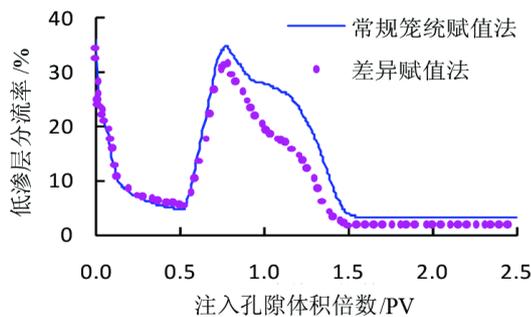


Figure 2. Relative liquid injection rate curves of different methods

图 2. 不同方法低渗层分流率对比曲线

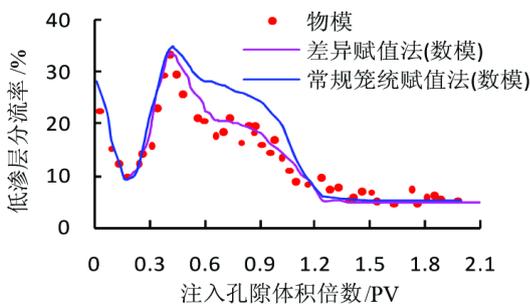


Figure 3. Relative liquid injection rate fitting curves of physics experiment and numerical simulation

图 3. 低渗层分流率物理试验与数值模拟拟合曲线

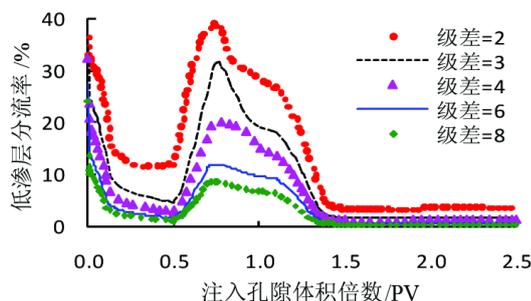


Figure 4. Relative liquid injection rate curves of different permeability ratios

图 4. 不同渗透率级差下低渗层分流率曲线

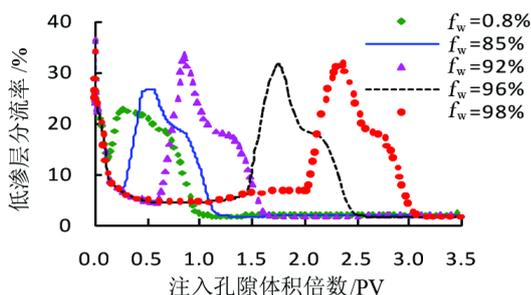


Figure 5. Relative liquid injection rate curves of different polymer injection time

图 5. 不同注聚时机下低渗层分流率曲线

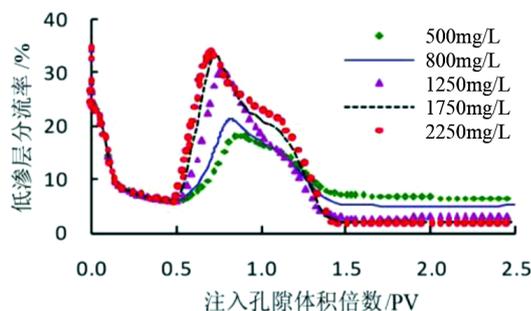


Figure 6. Relative liquid injection rate curves of different polymer concentrations

图 6. 不同聚合物质量浓度下低渗层分流率曲线

2) 通过理论分析、室内物理试验及油藏数值模拟技术，提出了根据储层物性分区进行特征参数差异赋值的剖面返转数值模拟方法。

3) 剖析了不同渗透率级差、注聚时机、聚合物质量浓度下的剖面返转规律，聚合物驱过程中，应尽量降低层系内的渗透率级差，增加低渗透油层的动用程度；选择合适的聚合物注入时机，减弱剖面返转对驱油效果的影响；根据储层渗透率选择合适的聚合物质量浓度，实现非均质储层不同渗透层均衡驱替。

基金项目

中国海洋石油总公司科研项目(YXKY-2014-ZY-03)；国家科技重大专项(2011ZX05010-002)。

参考文献 (References)

- [1] 曹瑞波, 韩培慧, 侯维虹. 聚合物驱剖面反转规律及反转机理[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 267-270.
- [2] 徐新霞. 聚合物驱“吸液剖面反转”现象机理研究[J]. 特种油气藏, 2010, 17(2): 101-104.
- [3] 曹瑞波. 聚合物驱剖面反转现象形成机理实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(4): 72-73.
- [4] 张景存. 大庆油田三次采油试验研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 3-10.
- [5] 耿娜, 杨东东, 刘小鸿, 等. 渤海油田聚合物驱储层吸水剖面变化特征及影响因素研究[J]. 油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(7): 127-130.
- [6] 石京平, 杨清彦, 刘成芬, 等. 聚合物溶液吸附对油层物性影响的试验研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2005, 27(1): 224-227.
- [7] 刘丽, 宋考平, 皮彦夫, 等. 水驱后聚合物驱全过程的相对渗透率曲线研究[J]. 油田化学, 2011, 28(1): 45-48.
- [8] 卫敏, 李奔, 李卉, 等. 化学驱相对渗透率曲线特征[J]. 特种油气藏, 2010, 17(3): 101-103.
- [9] 张晓华. 阻力系数对聚合物驱油效果的影响[J]. 特种油气藏, 2011, 18(3): 81-83.
- [10] 徐婷, 李秀生, 莫文丽, 等. 聚合物不可入孔隙体积影响因素研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(3): 56-59.