

文章编号:1673-5005(2010)02-0089-04

# 聚合物溶液注入附加阻力对驱油效果的影响

张志英<sup>1,2</sup>, 姜汉桥<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 石油天然气工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266555)

**摘要:**利用试验方法对 HPAM 溶液在不同渗透率岩心上的注入能力进行研究, 基于试验结果建立聚合物驱附加阻力与岩心渗透率的相关关系, 并在此基础上建立考虑聚合物注入附加阻力效应的油藏数值模拟模型。模拟结果表明: 低渗岩心中注入聚合物时稳定注入压力增大, 即确实存在附加阻力效应; 聚合物注入附加阻力对聚合物驱效果预测有较大影响, 考虑聚合物注入附加阻力, 聚合物起效时间早、含水率下降幅度减小、聚合物有效期变长。

**关键词:** 聚合物驱; 附加阻力; 数值模拟; 提高采收率

中图分类号: TE 357 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.018

## Influence of additional resistance during polymer injection on oil displacement effect

ZHANG Zhi-ying<sup>1,2</sup>, JIANG Han-qiao<sup>1</sup>

(1. Faculty of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** The injection properties of HPAM polymer solution on cores with different permeability were studied by experiments. And a correlation of additional resistance of polymer flow with the core permeability was established based on the experimental results. And a numerical reservoir simulation model of polymer flooding was established considering the influence of additional resistance. The results show that the injection pressure increases when the polymer is injected into low-permeability cores, which indicates the existence of additional resistance. The additional resistance has a great influence on performance prediction of polymer flooding. Early response, smaller decrease in water cut and longer period of validity are observed when the additional resistance effect is taken into account in the simulation model.

**Key words:** polymer flooding; additional resistance; numerical simulation; improved oil recovery

聚合物驱是一种技术及经济上非常成功的三次采油方法, 在国内外得到了广泛应用。中国部分大中型油田先后开展了聚合物驱油, 并取得了很好的开发效果<sup>[1]</sup>。对聚合物驱效果进行准确预测, 是聚合物驱可行性论证必不可少的基础工作。数值模拟是一种很重要的聚合物驱效果预测方法<sup>[2-7]</sup>。现有的聚合物驱数值模拟软件在进行聚合物驱模拟计算时, 并没有考虑聚合物注入附加阻力对驱油效果的影响<sup>[8-12]</sup>。室内试验表明, 聚合物相对分子质量与地层渗透率之间存在一定的匹配关系。注聚过程中由于存在附加阻力, 聚合物不能有效进入某些低渗地层<sup>[13-14]</sup>。忽略聚合物注入过程中的附加阻力必

然对驱油效果预测产生影响。笔者应用试验方法对 HPAM 溶液注入附加阻力进行研究, 并根据试验结果建立考虑聚合物溶液附加阻力的油藏数值模拟模型。

## 1 聚合物注入附加阻力试验

利用岩心驱替装置模拟瓦 6 块油层条件, 采用人造岩心, 研究相对分子质量为  $1.8 \times 10^7$ 、质量浓度为 1.5 g/L 的 HPAM 溶液在不同渗透率岩心上的注入能力, 并应用达西公式计算了相应条件下的驱动压差, 结果见图 1。

由试验结果可知, 在高渗岩心中, HPAM 溶液的

收稿日期: 2009-06-04

作者简介: 张志英(1972-), 女(汉族), 河北深泽人, 副教授, 博士研究生, 从事油藏工程研究。

流动近似符合达西定律,而在渗透率较低的岩心中,聚合物注入受到限制,稳定注入压力增大。因此,当岩心渗透率较低时,聚合物要进入岩心孔道须克服一个附加阻力,此附加阻力与岩心渗透率和聚合物类型相关。附加压差与岩心渗透率的关系可用指数方程表示为

$$y(k) = a \exp(-bk).$$

式中,  $y$  为计算压差与实测压差的差值,即附加压差,MPa;  $k$  为岩心渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $a$  和  $b$  为常数,与聚合物类型有关,这里  $a = 126$ ,  $b = 6.47$ 。

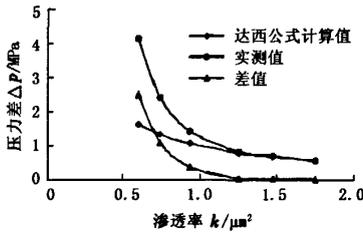


图1 HPAM 溶液在不同渗透率岩心上的稳定注入压差  
Fig.1 Stable injection pressure drop of HPAM on cores with different permeability

## 2 考虑聚合物溶液附加阻力的数学模型的建立

考虑聚合物驱的主要物理化学机制,如聚合物的黏度、吸附、剪切、渗透率下降、不可及孔隙体积等建立三维、油水两相、三组分(油、水、聚合物)聚合物驱数学模型。在井处理模型中加入附加压差,以考察聚合物的注入能力。

油相:

$$\nabla \cdot \left[ \frac{kK_{ro}}{\mu_o B_o} (\nabla p_o - \rho_o g \nabla D) \right] + q_o = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\varphi S_o}{B_o} \right);$$

水相:

$$\nabla \cdot \left[ \frac{kK_{rw}}{R_k \mu_w B_w} (\nabla p_w - \rho_w g \nabla D) \right] + q_w = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\varphi S_w}{B_w} \right);$$

聚合物:

$$\nabla \cdot \left[ \frac{kK_{rp}}{R_k B_w \mu_w} C_p (\nabla p_w - \rho_w g \nabla D) \right] + q_p =$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\varphi_p (S_w C_p + C_{pads})}{B_w} \right];$$

$$S_o + S_w = 1;$$

$$p_{cov} = p_o - p_w;$$

聚合物溶液黏度:

$$\mu_{p0} = \mu_w [1 + (a_{p1} C_p + a_{p2} C_p^2 + a_{p3} C_p^3) C_{sep}^p];$$

剪切特征:

$$\mu_p = \mu_\infty + \frac{\mu_{p0} - \mu_\infty}{1 + \left( \frac{\gamma}{\gamma^{1/2}} \right)^{n-1}};$$

吸附:

$$C_{pads} = C_{padmax} \frac{a_1 C_p}{1 + b_1 C_p};$$

渗透率降低系数:

$$R_k = 1 + \frac{(R_{kmax} - 1) b_k C_p}{1 + c_k C_p}.$$

式中,  $K_{ro}$  和  $K_{rw}$  分别为油、水相相对渗透率;  $\mu_o$  和  $\mu_w$  分别为油和水的黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $B_o$  和  $B_w$  为油和水的体积系数;  $p_o$  和  $p_w$  分别为油、水相的压力,  $\text{kPa}$ ;  $q_o$ ,  $q_w$ ,  $q_p$  分别为油、水及聚合物的注入采出量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $\rho_o$  和  $\rho_w$  分别为油、水相的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $D$  为海拔高度,  $\text{m}$ ;  $S_o$  和  $S_w$  分别为油、水相的饱和度;  $\varphi$  为孔隙度;  $C_p$  为聚合物质量浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $C_{pads}$  和  $C_{padmax}$  为聚合物吸附量及其最大值;  $R_k$  和  $R_{kmax}$  为渗透率下降系数及其最大值;  $\mu_{p0}$  聚合物的零剪切黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\mu_\infty$  为无限大剪切速率下聚合物黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\varphi_p$  为聚合物的可入孔隙度;  $a_{p1}$ ,  $a_{p2}$ ,  $a_{p3}$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  及  $s_p$  为由试验确定的常数;  $C_{sep}$  为水相中有效含量,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $\gamma$  为剪切速率,  $\text{s}^{-1}$ 。

聚合物物化参数可以以方程形式输入,也可以以数据表的形式给出。

在油藏数值模拟中,通常井的处理方法是应用达西公式建立流量与压差的关系,计算公式为

$$Q_i = \frac{2\pi h k K_{ri}}{\mu_i B_i \ln(r_e/r_w)} \Delta p.$$

在聚合物注入过程中,聚合物若要进入低渗层,需要克服附加阻力。考虑了聚合物注入附加阻力之后井的流量公式修正为

$$\begin{cases} Q_i = \frac{2\pi h k K_{ri}}{\mu_i B_i \ln \frac{r_e}{r_w}} [\Delta p - y(k)], & \Delta p > y(k); \\ Q_i = 0, & \Delta p < y(k). \end{cases}$$

利用有限差分方法,采用隐式压力显式饱和度技术求解上述方程。

## 3 计算实例

以江苏油田瓦6断块为基础,建立典型模型,应用该模型对水驱及聚合物驱效果进行预测,对比研究考虑聚合物注入附加阻力后对聚合物驱效果预测的影响。地质模型参数见表1,聚合物主要物性参数见表2。模型中地面原油黏度为  $35.52 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,

地下原油黏度为 10.16 mPa·s,原油体积系数为 1.086,地面原油密度为 0.891 g/cm<sup>3</sup>,地层水黏度为 0.306 mPa·s。

表 1 地质参数

Table 1 Geologic parameters

层号	厚度 h/m	孔隙度 φ/%	渗透率 k/μm <sup>2</sup>
1	5	26	1.20
2	5	22	0.55
3	5	23	0.60
4	5	20	0.30

表 2 聚合物主要物性参数

Table 2 Physical properties of HPAM solution

质量浓度 C <sub>p</sub> /(g·L <sup>-1</sup> )	黏度 μ <sub>p</sub> /(mPa·s)	吸附量 C <sub>pads</sub>	渗透率下降系数 R <sub>k</sub>
0	0.31	0	1.00
0.4	7.04	16.84	2.17
0.8	15.25	29.07	3.20
1.2	25.89	38.36	3.62
1.6	39.88	45.66	3.90
2.0	58.16	51.55	4.10

模型中采用一注一采系统,注采井距 280 m。水驱至含水率 90%,注入 0.2V<sub>p</sub>(V<sub>p</sub>为孔隙体积) 1.5 g/L 的 HPAM 溶液,继续水驱至含水率 98% 结束。

图 2 为水驱及聚合物驱过程中含水率、采出程度以及日产量随时间的变化曲线。注入水中加入高分子聚合物可以增大水的黏度,降低水相渗透率,从而降低水的流度,改善水油流度比,使水驱波及系数增大,提高原油采收率。

由于聚合物相对分子质量与地层渗透率存在一定的匹配关系,聚合物不能有效进入渗透率较低的层位。考虑聚合物注入附加阻力后各小层聚合物吸入量见表 3。

由计算结果可以看出,聚合物注入附加阻力对聚合物驱油过程有较大影响。由于各层渗透率不同,考虑聚合物注入附加阻力后,聚合物吸入量发生变化。渗透率高的地层聚合物吸入量增大,而渗透率较小的地层聚合物吸入量变小,当渗透率小到一定程度,则聚合物不能有效进入地层。聚合物有效进入水驱程度较高的地层,起到了调整吸水剖面的作用,因此与不考虑聚合物注入附加阻力相比,油井含水率下降快,有效期延长。考虑聚合物注入附加阻力后聚合物驱有效期延长 150 d 左右,但含水率下降幅度相对较小(最低含水率比不考虑聚合物注入附加阻力高出 8.5%),而最终采收率变化不大。

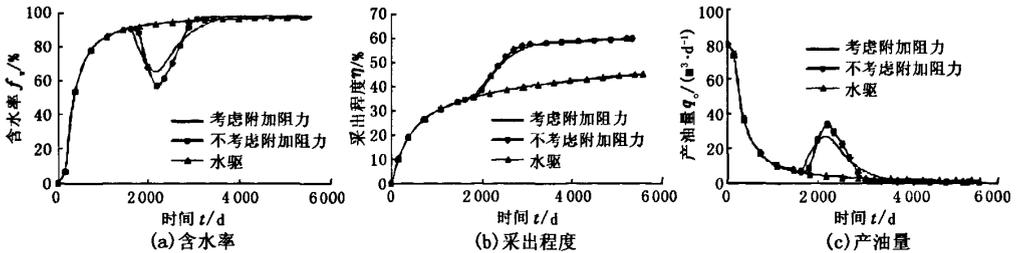


图 2 水驱及聚合物驱含水率、采出程度和日产量随时间的变化

Fig. 2 Variation of water cut, recovery factor and daily oil production rate with time for water and polymer flooding

表 3 各小层聚合物吸入量

Table 3 Polymer injection volume in different layers

小层号	吸入量 Q <sub>p</sub> /kg	
	不考虑附加阻力	考虑附加阻力
1	24 608	34 485
2	12 000	9 906
3	13 261	12 609
4	7 131	0

### 4 结论

(1) 岩心渗透率不同,聚合物稳定注入压力不同,聚合物在注入低渗岩心时存在附加阻力,会使驱压差增大。

(2) 聚合物注入附加阻力对聚合物驱开发动态预测有较大影响。模型中考虑聚合物注入附加阻力后,预测的聚合物起效早、有效期延长,但含水率下降幅度小。

(3) 聚合物注入附加阻力对聚合物驱最终采收率影响不大。

### 参考文献:

[1] 胡博仲. 聚合物驱采油工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2004:62-64.  
 [2] 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 Fu-qing, LI Zhen-quan. 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.
- [3] 刘宗宗, 聂洋, 宋考平, 等. 不同油层条件下聚驱剩余油分布的数值模拟研究[J]. *油气田地面工程*, 2008, 27(10):6.
- LIU Zong-zong, NIE Yang, SONG Kao-ping, et al. Numerical simulation of remaining oil distribution for polymer flooding in different layers[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2008, 27(10):6.
- [4] 赵国. 大庆油田三类油层聚合物驱的合理注采比[J]. *大庆石油学院学报*, 2008, 32(1):108-111.
- ZHAO Guo. Numerical simulation of the proper development priorities of the second and third type reservoirs [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2008, 32(1):108-111.
- [5] 杜庆军, 高德波, 束青林, 等. 孤岛油田聚合物驱见效特征及剩余油分布规律研究[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(1):106-109.
- DU Qing-jun, GAO De-bo, SHU Qing-lin, et al. On polymer response features and distribution rules of remaining oil in Gudao Oilfield [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(1):106-109.
- [6] 夏惠芬, 王海峰, 王刚, 等. 聚合物/甜菜碱表面活性剂提高水驱后残余油采收率研究[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2007, 31(6):74-78.
- XIA Hui-fen, WANG Hai-feng, WANG Gang, et al. Enhanced residual oil recovery by using polymer/betaine surfactant system after water flooding[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2007, 31(6):74-78.
- [7] 付雅观, 钱杰. 数值模拟技术在聚合物驱油过程中跟踪调整应用[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2008, 35(1):11-14.
- FU Ya-guan, QIAN Jie. Monitoring and modification application of numerical simulation in polymer flooding[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2008, 35(1):11-14.
- [8] 戚连庆. 聚合物驱油工程数值模拟研究[M]. 北京:石油工业出版社, 2000.
- [9] 邵振波, 陈国, 孙刚. 新型聚合物驱油数学模型[J]. *石油学报*, 2008, 29(3):409-413.
- SHAO Zhen-bo, CHEN Guo, SUN Gang. A new mathematical model for polymer flooding[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3):409-413.
- [10] 叶仲斌, 洪楚侨, 施雷庭, 等. 疏水缔合聚合物驱油数学模型[J]. *西南石油大学学报:自然科学版*, 2007, 29(6):171-175.
- YE Zhong-bin, HONG Chu-qiao, SHI Lei-ting, et al. Mathematical model of hydrophobic associating polymer flooding [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2007, 29(6):171-175.
- [11] 李福全, 佟斯琴. 全隐式聚驱数值模拟软件研制[J]. *内蒙古石油化工*, 2008, 15:6-8.
- LI Fu-quan, TONG Si-qin. Development of a fully implicit polymer simulator[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2008, 15:6-8.
- [12] BONDOR P L. Mathematical simulation of polymer flooding in complex reservoirs[R]. SPE 3524, 1972.
- [13] 张运来, 卢祥国, 张云宝, 等. 江苏油田中高渗油藏聚合物驱聚合物适应性研究[J]. *油田化学*, 2008, 25(3):245-248.
- ZHANG Yun-lai, LU Xiang-guo, ZHANG Yun-bao, et al. Adaptability of EOR polymers to sandstone reservoirs of intermediate to high permeability in Jiangsu Oilfields [J]. *Oilfield Chemistry*, 2008, 25(3):245-248.
- [14] 卢祥国, 高振环. 聚合物分子量与岩心渗透率配伍性-孔隙喉道半径与聚合物分子线团回旋半径比[J]. *油田化学*, 1996, 13(1):72-75.
- LU Xiang-guo, GAO Zhen-huan. Pore throat radius to coil gyration radius ratio as characteristic of adaptivity of polymer molecular mass to core permeability [J]. *Oilfield Chemistry*, 1996, 13(1):72-75.

(编辑 李志芬)