

文章编号: 0253-2697(2005)05-0078-03

聚合物驱油开发指标预测模型

石成方¹ 肖伟² 王凤兰¹

(1. 中国地质大学能源学院 北京 100083; 2. 南京理工大学理学院 江苏南京 210094)

摘要: 根据聚合物驱油机理, 综合应用聚合物驱开发输入输出指标历史数据以及数学建模方法, 建立了聚合物驱开发指标动态规律数学模型, 分析了描述聚合物驱本质的油田开发动态特征。应用该模型, 对大庆油田聚合物驱区块开发指标进行的预测结果比较理想。

关键词: 三次采油; 聚合物驱油; 开发指标预测; 动态特征系数; 数学模型

中图分类号: T E357.431

文献标识码: A

Prediction model for polymer flooding development index

SHI Cheng-fang¹ XIAO Wei² WANG Feng-lan¹

(1. School of Energy resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: According to the polymer-flooding mechanism, the historical data of input and output index for polymer-flooding development and mathematical modeling method were synthetically applied to establishment of a mathematical model for describing the dynamic laws of polymer-flooding development index. The dynamic behaviors of oilfield development and characteristic coefficients for describing the essence of polymer flooding were analyzed. The model in the prediction for the development index of a polymer flooding block in Daqing Oilfield is applicable.

Key words: tertiary recovery; polymer flooding; development index prediction; dynamic characteristic coefficients; mathematical model

大庆油田聚合物驱油于1972年进入矿场试验, 现已进入工业化大规模生产, 聚合物驱年产油量 10×10^7 t, 约占大庆油田总产量1/5, 是世界上最大的聚合物驱生产基地。因此, 有效地控制聚合物驱油的开发过程、合理地规划聚合物驱产量, 及制定聚合物驱生产制度等与准确地预测聚合物驱开发指标密切相关。由于聚合物驱油机理复杂, 关于这方面的研究很少。已有文献都有一定的局限性^[1-4]。已有的预测方法仅从“输出指标动态序列”进行拟合预测, 没有考察输入指标(控制变量如注入液、注入压力等)和输出指标的影响关系, 无法有效地控制聚合物驱的开发过程。笔者从聚合物驱不同于水驱的本质出发, 根据聚合物驱机理建立了开发指标(产油量、产油量、含水率)的数学模型, 并描述了聚合物驱本质的动态特征。

1 假设条件

根据对聚合物驱油机理的分析, Polymer 数值模

拟软件计算的显示和大庆油田聚合物驱油工业化规模生产的实践, 在数学模型的建立过程中做出如下假设:

- ① 无论水驱还是聚合物驱, 油藏和驱替介质(水或聚合物溶液)均不可压缩;
- ② 油藏为等温, 因化学反应导致的温度变化忽略不计;
- ③ 注入聚合物在油层中因化学反应导致的压力、体积变化忽略不计;
- ④ 满足理想状态的混合规则, 即混合时体积变化为零;
- ⑤ 注入聚合物在地下流动过程中因化学反应所造成油藏、流体的物性参数(如渗透率、孔隙度等)变化忽略不计;
- ⑥ 在聚合物驱采油阶段, 流动流体为聚合物水溶液相和油相。在聚合物驱前的水驱采油阶段, 流动流体为水相和油相;
- ⑦ 如果模型以时间为自变量, 则假设注入速度不变, 否则作为选择注入孔隙体积倍数模型自变量;
- ⑧ 不考虑渗透率变异系数的影响, 因为油田注聚合物驱都是选定渗透率变异系数 V_k 近似于最佳值0.72的目的层;
- ⑨ 在聚合物驱过程中, 聚合物的注入对油的有效粘度的影响忽略不计(因聚合物不溶于油, 这种影响很小),

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G19990225)部分成果。

作者简介: 石成方, 男, 1961年6月生, 大庆油田勘探开发研究院总工程师, 在读博士, 高级工程师, 主要从事油气田开发工程。

E-mail: chinaxiao@sina.com

即注入聚合物前后油的粘度不变; ⑤注入聚合物溶液的质量浓度恒定不变(C_p 为 1mg/L), 即忽略浓度的变化及影响。

2 产液量模型的建立

在建立聚合物驱开发指标动态规律数学模型时, 主要考虑注入井(输入)吸水指数和生产井(输出)产液指数两方面的影响。首先考虑采液指数对采液量的影响, 在模型推导中将相应指标换算成单井指标, 以排除聚合物开发“区块规模”的影响。根据文献[5]有

$$Q_{lc} = \frac{J_1 h_c N_1 (p_{sc} - p_{fc})}{2L^2 \phi_c} \quad (1)$$

式中 Q_{lc} 为月产液量, m^3 ; J_1 为采液指数, m^3/MPa ; h_c 为油层有效厚度, m ; N_1 为采液井数量, 口; p_{fc} 为油井流压, MPa ; p_{sc} 为油井静压(油层压力), MPa ; L 为井距, m ; ϕ_c 为有效孔隙度, %。

由于采液指数的大小与聚合物水溶液和油相同时流动的总流量成正比, 即

$$J_1 \propto \lambda_{\text{tot}} = \lambda_w + \lambda_o = \frac{K_w^{\text{op}}}{\mu_w^{\text{op}}} + \frac{K_o^{\text{op}}}{\mu_o^{\text{op}}} \quad (2)$$

式中 λ_{tot} 为聚合物溶液和油相流动的总流量; λ_w 和 λ_o 分别为聚合物驱过程中水溶液和油相的流量; μ_w^{op} 和 μ_o^{op} 分别为聚合物驱水和油的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; K_w^{op} 和 K_o^{op} 分别为聚合物驱水相和油相的相对渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

考虑吸水指数对产液量的影响, 生产井的吸水指数为

$$I_w = \frac{Q_{wr}}{N_w (p_{fr} - p_{sr})} \quad (3)$$

式中 I_w 为吸水指数, m^3/MPa ; Q_{wr} 为注入井月注入溶液量, m^3 ; p_{sr} 和 p_{fr} 分别为注入井流压和静压, MPa 。

因为产液量与吸水指数成正比, 由式(1)、式(2)和式(3)得

$$Q_{lc} \propto \frac{h_c N_1 Q_{wr} (p_{sc} - p_{fc})}{L^2 \phi_c N_w (p_{fr} - p_{sr})} \left(\frac{K_w^{\text{op}}}{\mu_w^{\text{op}}} + \frac{K_o^{\text{op}}}{\mu_o^{\text{op}}} \right) \quad (4)$$

将达西定律应用于聚合物驱前在水驱结束时刻的地下状态, 有

$$\frac{\lambda_w^w}{\lambda_o^w} = \frac{1 - f_{wi}}{f_{wi}} \quad (5)$$

式中 λ_w^w 和 λ_o^w 分别为油、水两相中水和油的流量; f_{wi} 为水驱结束、聚合物驱之前油层的含水率, %。

同样, 对聚合物驱过程可类似导出:

$$\frac{K_o^{\text{op}}}{\mu_o^{\text{op}}} + \frac{K_w^{\text{op}}}{\mu_w^{\text{op}}} = \frac{K_w^{\text{op}}}{\mu_w^{\text{op}}} \left(1 + \frac{\lambda_w^w}{\lambda_o^w} \right) = \frac{K_w^{\text{op}}}{\mu_w^{\text{op}}} \cdot \frac{1}{f_w} \quad (6)$$

式中 f_w 为聚合物驱阶段动态含水率, %; λ_w^{op} 和 λ_o^{op} 分别为聚合物驱中油和水的流量。

根据对聚合物驱效果评价的阻力系数的定义以及式(5)并注意油的粘度不变的假设, 有

$$\frac{K_w^{\text{op}}}{\mu_w^{\text{op}}} = \frac{f_{wi}}{f_r (1 - f_{wi})} \frac{K_o^{\text{ow}}}{\mu_o^{\text{ow}}} \quad (7)$$

式中 μ_o^{ow} 为原油粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; K_o^{ow} 为聚合物驱之前水驱阶段油相相对渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$; f_r 为聚合物驱阻力系数。

在水驱结束时, 地下油、水两相中油相相对渗透率 K_o^{ow} 完全由水驱结束时的剩余油饱和度 S_{or} (即聚合物驱初期油层剩余油饱和度) 所决定。水驱结束时剩余油饱和度越高, 油、水两相中油相的渗透率也越高, 而剩余油饱和度又是由采出程度和油藏原油饱和度所决定的。因此, 聚合物驱初期状态的 K_o^{ow} 可近似地表示为

$$K_o^{\text{ow}} \propto S_{oi} (1 - R_w) \quad (8)$$

式中 S_{oi} 为原始含油饱和度, %, R_w 为水驱采出程度, %。

联立式(5)、式(6)、式(7)、式(8)并代入式(4)有

$$Q_{lc} \propto \frac{h_c S_{oi} (1 - R_w) f_{wi}}{L^2 \phi_c \mu_{bi} (1 - f_{wi})} \frac{N_1 (p_{sc} - p_{fc})}{f f_w N_w (p_{fr} - p_{sr})} Q_{wr} \quad (9)$$

由此得到了采液量与聚合物驱区块初始状态及其聚合物驱的动态关系。

在聚合物驱油开发过程中, 难以准确计算聚合物溶液在油层条件下的工作粘度 μ_w^{op} 、相对渗透率 K_w^{op} 、阻力系数 f_r 。这些重要参数受多种因素影响, 且随着地层位置、时间的改变而改变。对于计算聚合物驱阻力系数以及残余阻力系数, 许多学者都做过研究。笔者用 Hall 曲线法^[5,6] 计算阻力系数 f_r 。如果将注入聚合物之时记为初始时刻, 聚合物驱之前的水驱时间段记为 $[-T_{wb}, 0]$, 聚合物驱之后的时间段记为 $[0, T_p(t)]$ 或者 $[0, t]$ (自变量 t 表示时间), 统一固定聚合物驱之前的水驱时间段, 以能确定水驱 Hall 曲线斜率为标准, 则根据 Hall 曲线法中累计注入压力与累计注入量的关系是一条直线的原理, 得

$$f_r(t) = \frac{\int_0^t \Delta p_r(t) dt \left[\int_0^t Q_{wr}(t) dt \right]^{-1}}{\int_{-T_{wb}}^0 \Delta p_r(t) dt \left[\int_{-T_{wb}}^0 Q_{wr}(t) dt \right]^{-1}} \quad (10)$$

式中 $\Delta p_r(t) = p_{fr}(t) - p_{sr}(t)$ 为注入压差。

将式(10)代入式(9)后, 由于目的层有效厚度 h_c 、原油粘度 μ_o^{ow} 、井距 L 、初始含水率 f_{wi} 以及聚合物驱之前水驱 Hall 曲线斜率(式(10)中的分母)都是聚合物驱过程中的非动态因子, 它们体现了聚合物驱之前区块对聚合物驱状态影响的“剩余油初始态”。因此, 可令聚合物驱开发因子为

$$\Theta = \frac{h_c S_{oi} (1 - R_w) f_{wi} \int_{-T_{wb}}^0 (p_{fr}(t) - p_{sr}(t)) dt}{L^2 \phi_c \mu_{bi} (1 - f_{wi}) \int_{-T_{wb}}^0 Q_{wr}(t) dt} \quad (11)$$

聚合物驱开发因子 Θ 体现了聚合物驱区块开发的潜在能量,体现了不同区块聚合物驱初始状态。聚合物驱开发因子的计算值可以用于衡量聚合物驱区块的开发潜能。为了将式(9)写成等式形式以便应用,引入影响聚合物驱开发动态变化特征的因子——聚合物驱开发动态特征系数 $\Omega(t)$,式(9)改写为

$$Q_{lc}(t) = \Omega(t) \frac{N_1(t)[p_{sc}(t) - p_{fc}(t)]}{f_w(t)N_w(t)[p_{fr}(t) - p_{sr}(t)]} \cdot \frac{Q_{wr}(t) \int_0^t Q_{wr}(t) dt}{\int_0^t [p_{fr}(t) - p_{sr}(t)] dt} \quad (12)$$

式中 $\Omega(t)$ 是一个待定系数,在某种程度上它体现了该区块有关的聚合物驱开发特征。这种输入输出数据变化特征也是聚合物驱油藏内部能量交换的表征之一,因此,将其定义为聚合物驱开发特征系数。

3 产油量及含水率模型的建立

将式(12)中的采液量通过聚合物驱的含水率 $f_w(t)$ 转换为产油量,得到

$$Q_{oc}(t) = \Omega(t) \frac{N_1(t)[1 - f_w(t)][p_{sc}(t) - p_{fc}(t)]}{N_w(t)f_w(t)[p_{fr}(t) - p_{sr}(t)]} \cdot \frac{Q_{wr}(t) \int_0^t Q_{wr}(t) dt}{\int_0^t [p_{fr}(t) - p_{sr}(t)] dt} \quad (13)$$

根据式(12)求得含水率为

$$f_w(t) = \Omega(t) \frac{N_1[p_{sc}(t) - p_{fc}]}{N_w(t)[p_{fr}(t) - p_{sr}(t)]} \cdot \frac{Q_{wr}(t) \int_0^t Q_{wr}(t) dt}{Q_{lc}(t) \int_0^t [p_{fr}(t) - p_{sr}(t)] dt} \quad (14)$$

只要知道聚合物驱区块的聚合物驱动态特征系数,对于3个主要开发指标的产液量、产油量、含水率,在确定其中1个指标的情况下,根据式(12)、式(13)和式(14)就能预测其余2个开发指标。

4 模型的应用

为了应用式(12)预测时刻 t 的采液指标,必须导出待预测区块的聚合物驱开发特征系数,而聚合物驱开发特征系数这一聚合物驱本征是隐藏在开发区块内部的属性,只能通过开发过程中的输入和输出历史数据(当然也包含地质因素)来显示。为此,可以通过历史数据拟合采液特征系数 $\Omega(t)$,以寻求区块产液变化的本征。由式(12)得

$$\Omega(t) = \frac{f_w(t)N_w(t)[p_{fr}(t) - p_{sr}(t)]}{N_1(t)[p_{sc}(t) - p_{fc}(t)]} \cdot \frac{Q_{lc}(t) \int_0^t [p_{fr}(t) - p_{sr}(t)] dt}{Q_{wr}(t) \int_0^t Q_{wr}(t) dt} \quad (15)$$

对聚合物区块的开发历史数据,应用式(15)模拟出聚合物驱开发动态特征系数,就可应用模型式(12)、式(13)和式(14)对开发指标进行预测。

聚合物驱开发因子 Θ 与聚合物驱开发特征系数综合表征了聚合物驱区块的聚合物驱产油特征,是区分不同地质状态以及不同水驱开发结果后的聚合物驱开发效果的关键因素。因此,定义因子 $[\Theta, \Omega(t)]$ 为聚合物驱开发动态特征。显然,它可以作为聚合物驱采收率的一个重要表征因素之一。利用聚合物驱开发特征可以对新投产聚合物驱区块进行预测,计算出已知聚合物区块本质不同的开发特征(如大庆已有10个利用历史数据可描述开发动态特征的区块)。设为

$$[\Theta_1, \Omega_1(t)]; [\Theta_2, \Omega_2(t)]; \dots; [\Theta_n, \Omega_n(t)]$$

利用新区块的初始资料,根据式(11)计算出开发因子 Θ_k 如果

$$\Theta_{k_0} = \min_{1 \leq k \leq n} |\Theta - \Theta_k|$$

则有理由应用区块 k_0 的聚合物驱开发动态特征系数 $\Omega_{k_0}(t)$ 预测这一新区块。

5 计算实例

对大庆油田聚合物驱某区块开发指标进行了预测。样本数据起始于1997年1月,终止于2001年12月,该区块的静态参数包括油层有效厚度为15.0m,原油粘度为 $9.3 \times 10^{-3} \text{ mPa}\cdot\text{s}$,井距为250m,油层有效孔隙度为26.1%,原始含油饱和度为74.6%,注聚合物驱前含水率为87.3%,水驱采出程度为30.64%。

由于聚合物驱前水驱 Hall 曲线相对于聚合物驱区块而言是一个非动态固定参数,且没有聚合物驱前水驱历史数据,因此假设水驱 Hall 曲线斜率为1。应用式(11)可计算出该区块开发因子 $\Theta = 5.7456$,它表征了聚合物驱区块提高采收率的潜力。

根据该区块历史数据^[7],应用式(15)计算了聚合物驱开发动态特征系数,再应用微分模拟模型 GM(1,1)^[8]对动态特征系数拟合,得到其预测公式为

$$\hat{\Omega}(t+1) = -162.3362 \{ \exp(-0.00116t) - \exp[-0.00116(t-1)] \} \quad (16)$$

式中 $\hat{\Omega}(t)$ 表示对聚合物驱开发特征系数 $\Omega(t)$ 的预测。如果采用定液法,即定时刻 $t+1$ 的产液量为 $Q_{lc}(t+1)$,则将式(16)代入式(14)可预测含水率 $\hat{f}_w(t+1)$,再代入式(13)可预测产油量 $\hat{Q}_{oc}(t+1)$ 。应用这一计算过程得到的预测结果见表1。

(下转第84页)

团-集团凝聚”模型和“反应置限集团-集团凝聚”模型。这 2 种模型都已成功地用于研究不同胶体的形成过程。在本研究中没有反应过程,只有扩散过程,因此可用“扩散置限集团-集团凝聚”模型来描述 HPAM 固体膜的形成过程。即在水分蒸发过程中,随着水分的减少,聚丙烯酰胺分子的随意游走逐渐受到限制,形成了聚集体。随后,聚集体的体积越来越大。当聚集体增大到一定体积时,会因空间的限制而自动终止,并选择另一个有利反应点开始新的聚集。分子结构不同,分子之间的相互作用力就不同,因此形成的聚集体的大小和分布规律就会有很大的差别,从而最终形成了云母片上不同的分布。

3 结 论

(1) 原子力显微镜在研究 HPAM 等大分子结构形貌方面具有一定的优势,它的观测范围可大可小,可以达到纳米级的研究需要。所形成的三维立体图像清晰直观,在研究表面膜的形貌方面具有重要的作用。

(2) HPAM 在云母片表面可以形成规则的分布,

体现出大分子的结构特性。不同的 HPAM 具有不同的表面形貌。这说明它们具有不同的结构,因而呈现出不同的特性。

参 考 文 献

- [1] T song P H, Claude C. Observations on the structure of a polyamide gel from electron micrographs [J]. *Polymer*, 1984, 25 (10): 419.
- [2] Gimzewski J K, Joachim C. Nanoscale science of single molecules using local probes [J]. *Science*, 1999, 238(5408): 683-688.
- [3] 屈小中, 史意, 金熹高. 原子力显微镜在 高分子领域的应用[J]. *功能高分子学报*, 1999, 12(2): 218-224.
- [4] 罗健辉, 卜若颖, 朱怀江, 等. 梳形聚丙烯酰胺的特性及应用[J]. *石油学报*, 2004, 25(2): 65-73.
- [5] 谭忠印, 马金, 王琛, 等. 原子力显微镜对部分水解聚丙烯酰胺凝胶分形结构的研究[J]. *中国科学 B 辑*, 1999, 29(2): 97-100.
- [6] 罗开富, 张熙, 黄荣华. 疏水缔合水溶性聚合物的合成[J]. *油田化学*, 1999, 16(3): 283-290.
- [7] 杨展如. 分形物理学[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1996: 209-234.

(收稿日期 2004-08-14 改回日期 2004-10-10 编辑 孟伟铭)

(上接第 80 页)

表 1 聚合物驱区块产油量预测结果

Table 1 Oil productions in a ploymer flooding blocks

时 间 / 月	实际值 / 10 ⁴ t	预测值 / 10 ⁴ t	相对误差 / %
1	2. 1501	2. 0848	- 6. 12
2	1. 9499	1. 8533	- 7. 90
3	2. 1788	2. 0174	- 1. 021
4	1. 9664	2. 1784	7. 49
5	1. 9875	2. 0926	2. 24
6	2. 0285	1. 9635	- 5. 92

6 结 论

(1) 建立了聚合物驱开发指标动态模型, 该模型可用于预测聚合物驱开发指标, 制定开发方案。

(2) 引进了描述聚合物驱开发初始态的“聚合物驱开发因子 Θ ”以及聚合物驱开发动态过程本质表征的“聚合物驱开发动态特征系数”, 从而建立了由“聚合物驱开发动态特征 $[\Theta, \Omega(t)]$ ”表征的聚合物驱开发模式。该方法优于同类研究方法, 并能预测聚合物驱油新区块的开发指标。

(3) 对聚合物驱开发动态特征系数的拟合能保证开发动态规律模型预测精度。动态特征系数 $\Omega(t)$ 逼近 $\hat{\Omega}$ 所产生的误差全部传递到开发指标的预测上, 因此, 要保证预测精度, 必须提高动态特征系数的逼近精度。从分析结果来看, 产油量预测误差还可大幅度

降低。通过对式 (15) 预测的区块动态特征系数的残差分析后发现, 还存在确定性趋势(周期指数增长)。因此, 可选择适当函数对残差拟合, 直到没有确定性趋势为止。然后应用时间序列拟合, 这样可将误差降到最低。

参 考 文 献

- [1] 王兴峰, 葛家理, 陈福明. 三次采油指标预测及开发最优接替模型研究[J]. *石油学报*, 2001, 22(5): 43-47.
- [2] 孔祥亨, 唐莉, 周学民, 等. 聚合物驱开发规划指标预测方法研究[J]. *大庆石油地质与开发*, 2001, 20(5): 47-49.
- [3] 陈福明, 卢金凤, 陈鹏, 等. 聚合物驱开采指标测算方法研究[J]. *大庆石油地质与开发*, 1999, 18(2): 33-37.
- [4] 李瑞章, 陈福明. 大庆油田聚合物驱开采指标测算方法[A]. 见: 冈秦麟. 化学驱油论文集(上册)[C]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 89-98.
- [5] 胡博仲. 聚合物驱采油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-250.
- [6] 杨承志. 化学驱提高石油采收率[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 1-150.
- [7] 肖伟. 聚合物驱油开发指标预测方法及其计算研究[D]. 黑龙江大庆: 大庆油田有限责任公司博士后工作站, 2004.
- [8] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 1-200.

(收稿日期 2004-11-01 改回日期 2005-01-25 编辑 孟伟铭)