

考虑注采强度的黏弹性聚合物驱压力恢复分析

袁鸿飞, 尹洪军, 徐国涵, 刘奇鑫, 邢翠巧

(1.东北石油大学石油工程学院, 黑龙江大庆 163318;

2.东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江大庆 163318, Email: 385453331@qq.com)

摘要: 聚合物驱是一种重要的三次采油技术, 目前已取得了较好的技术经济效益。在大多数聚合物驱压力动态分析中, 通常假设圆形封闭或无限大地层中心仅有一口注入井, 忽略了注采强度的影响。而在实际生产过程中, 常存在多井干扰和注采不平衡的情况, 因此, 本文建立了考虑注采强度的均质油藏的黏弹性聚合物溶液不稳定渗流数学模型。采用有限差分法对模型进行求解, 绘制了相应地层压力的动态曲线并进行了敏感性分析。研究表明: 稠度系数、幂律指数、松弛时间等参数都会影响曲线形态, 稠度系数越大, 径向流段的压力和压力导数值越大, 幂律指数和松弛时间越小, 压力导数曲线上翘越严重, 聚合物溶液的黏弹性越突出。因此在聚合物驱压力动态分析中, 有必要考虑非牛顿流体的粘弹性。该研究可为多井系统黏弹性聚合物驱压力动态分析提供理论依据。

关键词: 聚合物溶液; 黏弹性; 压力动态; 敏感性分析; 注采强度

1 引言

为了满足全球能源需求的持续增长, 提高采收率技术逐渐得到发展, 其中聚合物驱是应用最广泛、最成功的化学方法^[1-3], 即在水驱中加入聚合物以增加其黏度, 使被驱替流体(油)与驱替流体(聚合物溶液)流度比降低, 提高波及效率, 从而获得更高的采收率。为了取得更好的开采效果, 人们对非牛顿流体的不稳定流动及压力动态分析进行了大量的研究^[4-8], 目前还未考虑过注采强度对压力动态的影响。

关于非牛顿流体流动的研究常采用数值方法^[9-12], 本文利用有限差分法, 将非牛顿流

基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX05071005)、黑龙江省自然科学基金项目(E2016015).

作者简介: 袁鸿飞(1995-), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士研究生.

通讯作者: 袁鸿飞, Email: 385453331@qq.com

体模型与均质油藏模型相结合，并且考虑了注采强度^[13]，建立了更加完善的粘弹性聚合物溶液不稳定渗流数学模型，进行了求解，考虑到实际油田通常采用压力恢复测试方法，因此绘制了关井后的压力动态曲线并进行了敏感性分析，与以往压力降落动态分析相比，更具实用性。

2 物理模型

径向流流动系统如图 1 所示，基本假设条件为：① 油藏是等厚、等温、均质和各相同性；② 流体在地层中是一维径向流动；③ 地层岩石和流体的压缩系数很小且为常数；④ 运动方程类似于达西方程形式；⑤ 忽略重力效应；⑥ 非牛顿幂律流体的剪切黏度服从幂指数模式，弹性黏度用松弛时间描述；⑦ 不考虑聚合物溶液在地层中的稀释及吸附。

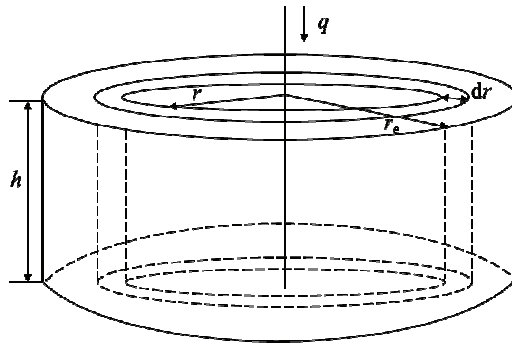


图 1 径向流流动系统

3 数学模型的建立与求解

定义无因次变量：

$$p_D = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} qB\mu^*} (p - p_i), \quad t_D = \frac{3.6Kt}{\phi\mu^* C_r r_w^2}, \quad r_D = \frac{r}{r_w}$$

视黏度定义为

$$\mu_a = \mu_v + \mu_e = Er^{1-n} + Fr^{-n}$$

其中

$$E = HF_s^{n-1}, \quad F = 2\theta_f F_s E, \quad F_s = \frac{3n+1}{2n+1} \frac{1}{\sqrt{2c'K\phi}} \frac{1.842q}{h}$$

式中: B 为体积系数; C_l 为综合压缩系数, 1/MPa; h 为储层有效厚度, m; K 为渗透率, μm^2 ; p 为半径为 r 处的地层压力, MPa; p_i 为原始地层压力, MPa; q 为体积流量值, m^3/d ; r_w 为井径, m; R_{IP} 为注采强度; t 为时间, h; ϕ 为孔隙度; μ^* 为特征黏度, 即井底处聚合物溶液的表观黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_v 为剪切黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_e 为弹性黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; n 为非牛顿流体幂律指数, 无因次; H 为非牛顿流体稠度系数, $\text{mPa}\cdot\text{s}^n$; θ_f 为松弛时间, s; c' 为与毛细管迂曲度有关的系数。

将运动方程、状态方程代入连续性方程, 通过上述无因次变量的定义进行无因次化可得到数学模型为

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(\frac{\mu^*}{\mu_a} r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (1)$$

$$p_D|_{t_D=0} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\mu^*}{\mu_a} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = -1 \quad (3)$$

$$r_{eD} \frac{\mu^*}{\mu_a} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{eD}} = -\frac{1}{R_{IP}} \quad (4)$$

采用不均匀网格, 令

$$r_D = e^x \quad (5)$$

应用隐式差分方法, 利用 $p(x, t_D)$ 关于 t_D 的一阶向前差商和 $p(x, t_D)$ 关于 x 的一阶中心差商和二阶差商, 可以写出点 (i, j) 处的有限差分模型:

$$a_i p_{Di-1}^{j+1} + b_i p_{Di}^{j+1} + c_i p_{Di+1}^{j+1} = d_i, \quad (i=1, 2, 3, \dots, N-1) \quad (6)$$

$$p_{Di}^0 = 0, \quad (i=1, 2, 3, \dots, N-1) \quad (7)$$

$$-p_{Di}^{j+1} + p_{Di+1}^{j+1} = d_0, \quad (i=0) \quad (8)$$

$$-p_{Di-1}^{j+1} + p_{Di}^{j+1} = d_N, \quad (i=N) \quad (9)$$

其中

$$a_i = 1 - e_i, \quad b_i = -(2 + f_i), \quad c_i = 1 + e_i, \quad d_i = -f_i p_{Di}^j$$

$$e_i = \frac{(n-1)Er + nF}{Er + F} \frac{\Delta x}{2}, \quad f_i = \frac{\Delta x^2 r_D^2 (Er^{1-n} + Fr^{-n})}{\mu^* \Delta t_D}$$

$$d_0 = -\Delta x, \quad d_N = -\frac{1}{R_{ip}} \Delta x \frac{Er_e^{1-n} + Fr_e^{-n}}{Er_w^{1-n} + Fr_w^{-n}}$$

式中 Δx 为空间步长, $\Delta x = \frac{\ln(r_e/r_w)}{N}$; N 为地层剖份数; i 为节点标号。

用追赶法迭代求解代数方程组。求解过程为: 选定步长, 将前一时刻的解代入, 求得新时刻的解, 循环迭代, 得到不同时刻的井底压力。

4 压力恢复分析

考虑注采强度的黏弹性聚合物驱压力恢复分析典型曲线如图 2 所示。在纯井筒储集阶段压力和压力导数曲线为斜率为 1 的直线, 在径向流阶段曲线出现上翘, 说明黏弹性流体在地层中渗流所受到的阻力较牛顿流体大, 渗流所需能量也较高, 当受到外边界影响时, 压力导数曲线出现明显下掉。

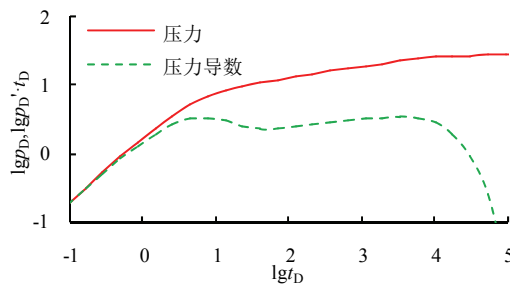


图 2 黏弹性聚合物压力恢复分析典型曲线

松弛时间对压力恢复典型曲线的影响如图 3 所示。随着松弛时间的降低, 过渡段的压力和压力导数曲线逐渐下降, 径向流阶段的导数曲线上翘现象变得更加明显, 聚合物黏弹性更突出。

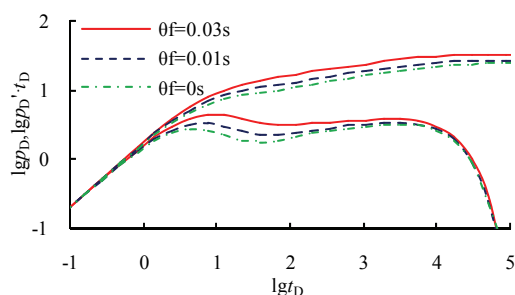


图3 松弛时间对压力恢复典型曲线的影响

稠度系数对压力恢复典型曲线的影响如图4所示。在纯井筒储集阶段之后，稠度系数越小，压力和压力导数曲线越靠下，边界反应阶段出现的越早。

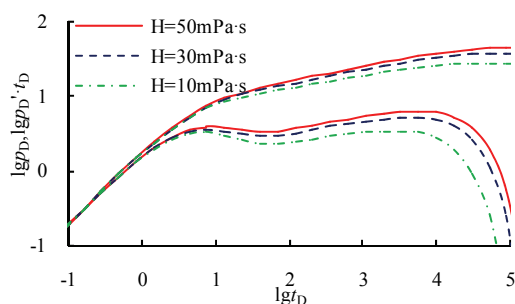


图4 稠度系数对压力恢复典型曲线的影响

幂律指数对压力恢复典型曲线的影响如图5所示。幂律指数越小，流体的非牛顿性越严重，因此径向流段压力导数曲线上翘现象越明显。随着幂律指数的减小，流体剪切变稀的能力变强，近井高剪切速率地带流体黏度变小，流体在地层中渗流所受的阻力就越小，从而，需要的注入井井底压力就越低，压力与压力导数曲线越靠下。

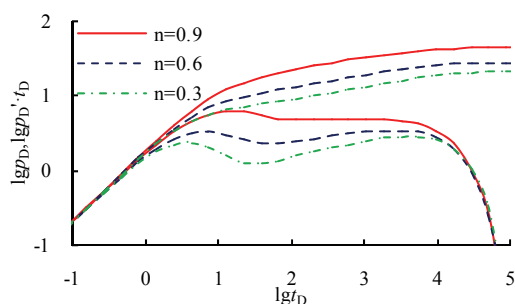


图5 幂律指数对压力恢复典型曲线的影响

注采强度对压力恢复典型曲线的影响如图 6 所示。从图 6 可以看出，注采强度对试井曲线的后期影响较为明显。注采比越接近 1，试井曲线受邻井的干扰越小。注采比大于 1 时，在径向流结束后曲线出现上翘，注采强度越大，曲线上翘幅度越大，受外边界影响越明显。

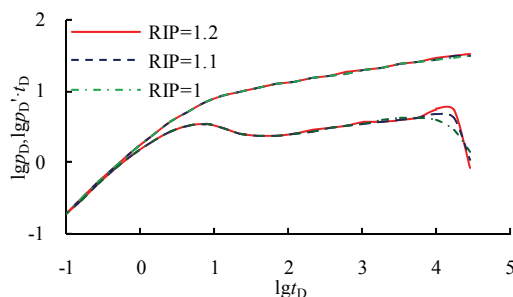


图 6 注采强度对压力恢复典型曲线的影响

5 结论

(1) 建立了考虑注采强度的均质油藏的黏弹性聚合物溶液不稳定渗流数学模型，利用有限差分法进行了求解并绘制了关井后的聚合物驱压力恢复典型曲线，由于黏弹性聚合物溶液黏性和弹性的影响，在径向流阶段压力导数曲线出现上翘；

(2) 对压力恢复典型曲线进行了敏感性分析：松弛时间和幂律指数越小，径向流阶段压力导数曲线上翘越明显；稠度系数越小，压力和压力导数曲线越靠下；

(3) 注采强度主要影响边界流动阶段，注采比越大，曲线在径向流之后的上翘幅度越大，说明受外边界影响越明显，受到井间干扰越严重。因此在聚合物驱压力动态分析中考虑注采强度影响十分必要。

参 考 文 献

- 1 蒋明, 许震芳. 辽河常规稠油油藏的聚合物驱问题研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 1999(02): 240-246.
- 2 侯佳. 以聚合物为载体的三次采油技术实践[J]. 化学工程与装备, 2019(03): 176-177.
- 3 武建明, 王洪忠, 陈依伟, 等. 聚合物驱提高采收率技术在昌吉油田吉 7 井区的研究与应用[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(06): 64-67.
- 4 尹洪军, 吕彦平, 于开春, 等. 黏弹性聚合物溶液不稳定渗流模型[J]. 大庆石油学院学报, 2004(02):

28-30+42-128.

- 5 Garcia-Pastrana, J. R., Valdes-Perez, A. R., Blasingame, T. A. Flow of Non-Newtonian Fluids within a Double Porosity Reservoir under Pseudosteady State Interporosity Transfer Conditions[C]. SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, SPE 185479, 2017.
- 6 De Simoni, M., Boccuni, F., Sambiasi, M., et al. Polymer Injectivity Analysis and Subsurface Polymer Behavior Evaluation[C]. SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia, Muscat, Oman, SPE 190383, 2018.
- 7 Raghavan, R., Chen, C. Fractured-Injection-Well Performance Under Non-Newtonian, Power-Law Fluids[J]. Society of Petroleum Engineers, SPE 187955, 2018, 21(02): 1-12.
- 8 徐有杰, 刘启国, 王庆, 等. 聚合物驱有限导流压裂井压力动态特征分析[J]. 油气井测试, 2019, 28(01): 7-13.
- 9 牛小静, 余锡平. 复杂黏弹性流体运动的数值计算方法[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2008(03): 331-337.
- 10 杨树人, 吴楠, 刘丽丽, 等. 黏弹性流体在油藏孔隙中的流动特性[J]. 特种油气藏, 2007(05): 70-72+87+109.
- 11 崔桂香, 柴天峰. 粘弹性流体平面收缩流动的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 1995, 10(5): 510-515.
- 12 高双华, 常晓平, 赵春旭, 等. 普通稠油油藏聚合物驱可行性研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 34(11): 76.
- 13 王庆霞, 黄金凤, 尹洪军. 考虑启动压力梯度和注采比的不稳定压力动态特征[J]. 石油钻采工艺, 2003(06): 57-59+87.

Build-up analysis on pressure of viscoelastic polymer flooding considering injection production intensity

YUAN Hong-fei, YIN Hong-jun, XU Guo-han, LIU Ke-xin, XING Cui-qiao

(1. Department of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing China 163318;

2. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery(Northeast Petroleum University), Ministry of Education, Daqing China 163318.

Email: 385453331@qq.com)

Abstract: Polymer flooding is an important technology of tertiary oil recovery, which has achieved good technical and economic benefits. In most transient analysis of polymer flooding pressure, it is usually assumed that there is only one injection well in the center of a circular closed or infinite formation, ignoring the influence of injection production intensity. In actual production process, there are often multi-well interference and imbalance of injection and

production. In this paper, a mathematical model of unstable percolation of viscoelastic polymer solution in homogeneous reservoirs with injection production intensity considered is established. The finite difference method was used to solve the model, and the corresponding dynamic curve of formation pressure was drawn and the sensitivity analysis was carried out. The study shows that the parameters such as consistency coefficient, power law index and relaxation time will affect the shape of the curve. The larger the consistency coefficient is, the greater the pressure and pressure derivative value of the radial flow section will be, the smaller the power law index and relaxation time will be, the more serious the upturning of the pressure derivative curve will be, and the more prominent the viscoelasticity of the polymer solution will be. Therefore, it is necessary to consider the viscoelasticity of non-newtonian fluid in the dynamic analysis of polymer flooding pressure. This study can provide theoretical basis for dynamic analysis of viscoelastic polymer flooding pressure in multi-well system.

Key words: polymer solution; viscoelasticity; transient pressure; sensitivity analysis; injection production intensity.