

三元复合驱油井流入动态特征研究

张淑云 崔海清

(大庆石油学院提高油气采收率教育部重点实验室, 大庆 163318)

摘要 在用黏弹性流体本构模型描述三元复合驱地层流体流变特性的基础上,建立了三元复合驱地层流体在地层中渗流的基本微分方程,采用有限差分法对其进行了数值求解,并用拉格朗日插值法对产能进行预测,分析了流体的流变参数对产能的影响。通过对大庆油田采油四厂5口油井的产能预测结果与实测结果进行对比分析,其相对误差在20%以内,表明用黏弹性流体本构模型来描述地层流体的流变性能较好地预测油井的产能。

关键词 黏弹性流体 三元复合驱 流变特性 数值求解

中图法分类号 TE357.46; **文献标志码** A

三元复合体系是指碱、表面活性剂和聚合物三者按一定配方混合组成的复合体系(简称ASP体系),其驱油效率比单一聚合物驱和二元驱的要高,因而其研究在国内已受到高度重视。三元复合驱是典型的非牛顿流体,不仅具有黏性特征,而且在复杂孔隙结构的地层中渗流时表现出较强的弹性效应。因此,ASP复合驱的生产动态预测方法与注水开发的不同,必须根据地层流体及采出液特点优选生产参数,制定合理的工作制度。抽油机井采油系统调整的主要依据是油井流入动态研究。在进行油井流入动态预测时必须弄清流体在油藏中的渗流情况和压力分布。

采用第一法向应力差来描述三元复合驱地层流体的弹性效应,所建立的理论模型较全面地描述了三元复合驱地层流体在渗流过程中复杂的流变行为和渗流规律,可较准确地预测三元复合驱油井的流入动态,其结果可为三元复合驱油井机、杆、泵工作参数优选及调整提供可靠依据。

1 黏弹性流体在多孔介质中渗流的数学模型

1.1 基本假设

油藏均质、等厚、等温和各向同性;流体以径向流动的形式从泄油边界处流到井底;运动方程采用修正达西方程形式;忽略重力影响及毛细管力;流体的压缩系数很小且为常数;流体视为黏弹性流体;弹性黏度用第一法向应力差等描述。

1.2 基本微分方程的建立

1.2.1 有效黏度

三元复合驱地层流体在多孔介质中流动时,存在剪切流动和拉伸流动,其有效黏度 μ_{eff} 由剪切黏度 μ_v 和弹性黏度 μ_e 组成。

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_v + \mu_e \quad (1)$$

(1) 剪切黏度

剪切黏度采用幂律流体模式: $\mu_v = k\gamma^{n-1}$, γ 与 v 之间的关系式^[1]

$$\gamma = \frac{3n+1}{4n+1} \frac{12v}{(150k\varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

式(2)中: γ 为剪切速率, s^{-1} ; v 为渗流速度, m/s ; k 为稠度系数, $Pa \cdot s^n$; n 为流性指数; φ 为孔隙度。其中

2010年3月30日收到

第一作者简介:张淑云(1970—),女,大庆石油学院博士研究生,研究方向:石油工程非牛顿流体力学。

$$k = \frac{d_p^2 \varphi^3}{150(1-\varphi)^2} \quad (3)$$

式(3)中 d_p 为颗粒直径, μm 。

令

$$L_c = \frac{3n+1}{4n+1} \frac{12}{(150k\varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

则剪切速率为 $\gamma = L_c v$ 。

根据流量与渗流速度之间的近似线性形式

$$v = \frac{QB}{2\pi rh} \quad (5)$$

式(5)中: Q 为流量, m^3/s ; B 为体积系数, 无因次量。

则剪切黏度为

$$\mu_v(r) = k \left[L_c \frac{QB}{2\pi rh} \right]^{n-1} r^{1-n} \quad (6)$$

式中: h 为油层有效厚度, m ; r 为距井底的半径, m 。

(2) 弹性黏度

弹性黏度采用 Masuda 等提出的弹性黏度模型^[2]

$$\mu_e = \mu_v C (D_e)^m \quad (7)$$

式(7)中 D_e 为德博拉数, 无因次量, 描述多孔介质中流体黏弹效应的一个重要参数; C, m 为常数, 取决于多孔介质中孔隙几何形状的复杂程度。

对于均匀粒子充填床层, D_e 与床层结构及流体参数之间存在下列关系^[3,4]

$$D_e = 2.3\theta \frac{v}{\varphi d_p} \quad (8)$$

式中 θ 为流体松弛时间, s 。

在层流条件下, 流体的松弛时间与剪切速率、剪切应力及第一法向应力差之间存在下列关系^[5,6]

$$\theta = \frac{1}{2\gamma} \left(\frac{\tau_{11} - \tau_{22}}{\tau_{12}} \right) \quad (9)$$

式(9)中 $\tau_{11} - \tau_{22}$ 为地层流体的第一法向应力差, Pa ; τ_{12} 为剪切应力, Pa 。

将 $\tau_{11} - \tau_{22} = N_1 = A_1 \gamma^{n_1}$, $\tau_{12} = \mu_s \gamma = k \gamma^n$ ^[7] 代入式(9)中得

$$\theta = \frac{1}{2\gamma} \frac{A_1 \gamma^{n_1}}{k \gamma^n} = \frac{A_1}{2k} \lambda^{(n_1-1-n)} \quad (10)$$

式(10)中 A_1, n_1 为弹性参数, 无因次量。将式(10)

代入式(8)中得

$$D_e = 1.15 \frac{A_1 v \gamma^{(n_1-1-n)}}{k \varphi d_p} \quad (11)$$

平均颗粒直径可根据多孔介质的渗透率和孔隙度计算^[8]

$$d_p = 10^{-2} \frac{1-\varphi}{\varphi} \sqrt{\frac{150k_r}{\varphi}} \quad (12)$$

将式(2)及式(12)代入式(11)中得

$$D_e = 1.15 \frac{A_1}{k \varphi d_p} L_c^{(n_1+n)} \left(\frac{QB}{2\pi h} \right)^{(n_1+n)} r^{(n_1+n)} \quad (13)$$

将式(13)代入式(7)中得

$$\mu_e = \mu_v C \left[1.15 \frac{A_1}{k \varphi d_p} L_c^{(n_1+n)} \left(\frac{QB}{2\pi h} \right)^{(n_1+n)} r^{(n_1+n)} \right]^m r^{m(n_1)} \quad (14)$$

(3) 有效黏度

将式(6)及式(14)代入式(1)得到可视黏弹性流体的三元复合驱地层流体在多孔介质中渗流的有效黏度为

$$\mu_{\text{eff}} = Er^{1-n} + Fr^{m(n-n_1)+(1-n)} \quad (15)$$

式(15)中 $E = k \left(L_c \frac{QB}{2\pi h} \right)^{(n-1)}$;

$$F = EC \left[1.15 \frac{A_1}{k \varphi d_p} L_c^{(n_1+n)} \left(\frac{QB}{2\pi h} \right)^{(n_1+n)} r^{(n_1+n)} \right]^m。$$

1.2.2 基本微分方程

根据运动方程、状态方程及连续性方程得到黏弹性流体在多孔介质中渗流的基本微分方程为

$$\frac{1}{Er^{1-n} + Fr^{m(n-n_1)-n+1}} \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{nEr^{-n-1} - [m(n-n_1) - n] Fr^{m(n-n_1)-n-1}}{r[Er^{-n} + Fr^{m(n-n_1)-n}]^2} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\varphi C_t}{k_r} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (16)$$

式(16)中: C_t 为综合压缩系数, MPa^{-1} ; k_r 为地层渗透率, μm^2 。

1.2.3 定解条件

初始条件

$$P(r, 0) = P_e \quad (17a)$$

式(17)中 P_e 为油井供给边界压力, Pa 。

外边界定压

$$P(r_e, t) = P_e \quad (17b)$$

内边界定产

$$\left. \frac{dP}{dr} \right|_{r=r_w} = \frac{Er_w^{1-n} + Fr_w^{1-n-m}}{k_r} \frac{QB}{2\pi hr_w} \quad (17c)$$

式中 r_w 为井筒半径, m 。

1.2.4 基本微分方程的转换

由于在平面径向流情况下,靠近生产井井底附近的压力梯度很大,而远离生产井井底附近的压力梯度较小,因此,在计算中需采用不均匀对数网格,即靠近井底附近网格取密一些,而沿径向向外逐渐稀疏,坐标变换如下

$$r = r_w e^x \quad (18)$$

式(18)中 x 为坐标变换后的空间距离。

则微分方程式(16)转化成如下形式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \\ & \frac{(n-1)E - [m(n-n_1) - n + 1]F(r_w e^x)^{m(n-n_1)}}{E + F(r_w e^x)^{m(n-n_1)}} \times \\ & \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\varphi C_t}{k_r} (E(r_w e^x)^{3-n} + \\ & F(r_w e^x)^{m(n-n_1)-n+3}) \frac{\partial P}{\partial t} \end{aligned} \quad (19)$$

1.2.5 定解条件的转换

初始条件

$$P(x, 0) = P_e \quad (20a)$$

外边界条件

$$P\left[\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right), t\right] = P_e \quad (20b)$$

内边界条件

$$\left. \frac{dP}{dx} \right|_{x=0} = \frac{Er_w^{1-n} + Fr_w^{m(n-n_1)+(-1+n)}}{k_p} \frac{QB}{2\pi h} \quad (20c)$$

2 基本微分方程的数值求解

利用有限差分法对基本微分方程进行数值求解,对空间采用中心差分格式,对时间采用一阶向后隐式差分格式。

2.1 基本微分方程的离散化

基本微分方程式(19)通过差分离散得到差分方程

$$A_i P_{i-1}^{j+1} + B_i P_i^{j+1} + C_i P_{i+1}^{j+1} = D_i P_i^j \quad (i = 1, 2, \dots, L, m-2) \quad (21)$$

式(21)中

$$A_i = 1 - \frac{\Delta x}{2} H_r \quad (22a)$$

$$B_i = -\left(2 + \frac{\Delta x^2}{\Delta t} J_r\right) \quad (22b)$$

$$C_i = 1 + \frac{\Delta x}{2} H_r \quad (22c)$$

$$D_i = -\frac{\Delta x^2}{\Delta t} J_r \quad (22d)$$

其中

$$H_r = \frac{(n-1)E - [m(n-n_1) - n + 1]F(r_w e^{i\Delta x})^{m(n-n_1)}}{E + F(r_w e^{i\Delta x})^{m(n-n_1)}} \quad (23a)$$

$$J_r = \frac{\varphi C_t}{k_r} [E(r_w e^{i\Delta x})^{3-n} + F(r_w e^{i\Delta x})^{m(n-n_1)-n+3}] \quad (23b)$$

2.2 初始条件的离散化

对初始条件式(20a)进行离散,离散方程为

$$A_i P_{i-1}^1 + B_i P_i^1 + C_i P_{i+1}^1 = D_i P_e \quad (i = 1, 2, \dots, m-1) \quad (24)$$

式(24)中

$$A_i = 1 - \frac{\Delta x}{2} \left[\frac{(n-1)E - [m(n-n_1) - n + 1]F(r_w e^{i\Delta x})^{m(n-n_1)}}{E + F(r_w e^{i\Delta x})^{m(n-n_1)}} \right] \quad (25a)$$

$$B_i = \left\{ 2 + \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \frac{\varphi C_t}{k_r} [E(r_w e^{i\Delta x})^{3-n} + F(r_w e^{i\Delta x})^{m(n-n_1)-n+3}] \right\} \quad (25b)$$

$$C_i = 1 + \frac{\Delta x}{\Delta t} \left[\frac{(n-1)E - [m(n-n_1) - n + 1]F(r_w e^{i\Delta x})^{m(n-n_1)}}{E + F(r_w e^{i\Delta x})^{m(n-n_1)}} \right] \quad (25c)$$

$$D_i = -\frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \left\{ \frac{\varphi C_t}{k_r} [E(r_w e^{i\Delta x})^{3-n} + F(r_w e^{i\Delta x})^{m(n-n_1)-n+3}] \right\}$$

(25d)

2.3 外边界条件的离散化

对外边界条件式(20b)进行离散,离散方程为

$$A_{N-1}P_{N-2}^{j+1} + B_{N-1}P_{N-1}^{j+1} + C_{N-1}P_e = D_{N-1}P_{N-1}^j \quad (N=m)$$

(26)

式中

$$A_{N-1} = 1 - \frac{\Delta x}{2} \left[\frac{(n-1)E}{E + F(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{m(n-n_1)}} - \frac{[m(n-n_1) - n + 1]F(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{m(n-n_1)}}{E + F(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{m(n-n_1)}} \right]$$

(27a)

$$B_{N-1} = - \left\{ 2 + \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \left\{ \frac{\varphi C_t}{k_r} [E(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{3-n} + F(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{m(n-n_1)-n+3}] \right\} \right\}$$

(27b)

$$C_{N-1} = 1 + \frac{\Delta x}{2} \left[\frac{(n-1)E}{E + F(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{m(n-n_1)}} - \frac{[m(n-n_1) - n + 1]F(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{m(n-n_1)}}{E + F(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{m(n-n_1)}} \right]$$

(27c)

$$D_{N-1} = -\frac{\Delta x^2}{\Delta t} \frac{\varphi C_t}{k_r} [E(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{3-n} + F(r_w e^{(N-1)\Delta x})^{m(n-n_1)-n+3}]$$

(27d)

2.4 内边界条件的离散化

对内边界条件式(20c)进行离散,离散方程为

$$-P_0^{j+1} + P_1^{j+1} = \frac{E(r_w)^{1-n} + F(r_w)^{m(n-n_1)+(1-n)}}{k_r} \frac{QB}{2\pi h} \Delta x$$

(28)

$$A_0 = -1$$

(29a)

$$B_0 = 1$$

(29b)

$$D_0 = \frac{E(r_w)^{1-n} + F(r_w)^{m(n-n_1)+(1-n)}}{k_r} \frac{QB}{2\pi h} \Delta x$$

(29c)

采用追赶法对差分方程组式(21)进行数值求解。求解过程为:选定时间步长,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值及压力稳定后地层中任一点的压力值。给定不同的产液量,得到不同的井底流压值,在此基础上利用拉格朗日插值法对三元复合驱油井的产能进行预测。

3 影响因素分析

以大庆油田采油四厂 X1-3-SP35 井为例,对三元复合驱油井流入动态的影响因素进行分析。

基础数据:油层有效厚度 $h = 7.4 \text{ m}$, 地层静压 $P = 7.38 \text{ MPa}$, 渗透率 $k_r = 4.7372 \times 10^{-13} \text{ m}^2$; 颗粒直径: $d_p = 0.00207 \text{ m}$, 稠度系数 $k = 0.0239 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$,

流性指数 $n = 0.789$, 弹性参数 $A_1 = 0.092 \text{ 1N} \cdot \text{s}^{-n_1+2} \cdot \text{m}^2$, $n_1 = 0.742 \text{ 3}$; 测试点流压及产液量分别为: $P_{wf} = 3.39 \text{ MPa}$, $Q = 6.0185 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

其他数据:孔隙度 $\varphi = 0.254$, 井间距离 $L = 150 \text{ m}$, 油井半径 $r_w = 0.1 \text{ m}$, 体积系数 $B = 1.116$, 综合压缩系数 $C_t = 8.2 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, 介质常数 $C = 1.23 \times 10^{-3}$, $m = 1.216$ 。

图1—图4分别为采出液稠度系数、流性指数、弹性参数 A_1 及 n_1 不同时的油井流入动态曲线。从图中可以看出,油井最大无阻产液量随采出液稠度系数、流性指数、弹性参数 A_1 及 n_1 的减小而增大。

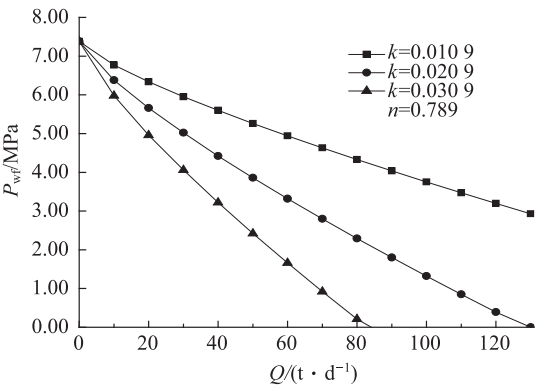


图1 稠度系数 k 不同时 IPR 曲线

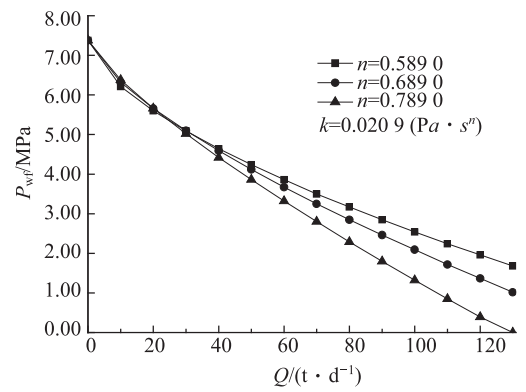


图2 流性指数 n 不同时 IPR 曲线

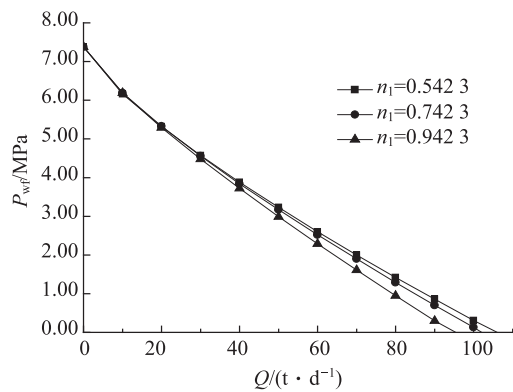


图4 弹性参数 n_1 不同时的 IPR 曲线

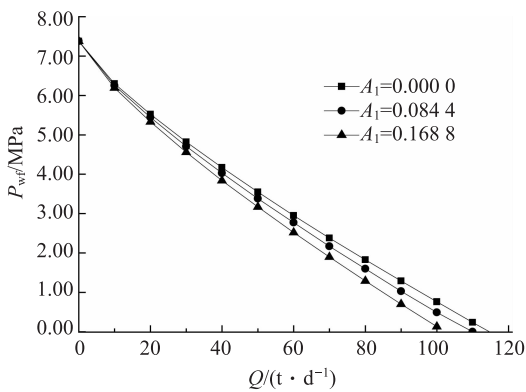


图3 弹性参数 A 不同时的 IPR 曲线

4 实例计算

现场验证 5 口井,验证井的基础数据见表 1,利用本文建立的粘弹性流体在多孔介质中渗流的数学模型计算验证井的产液量,并将计算结果与实测的产液量进行对比,计算误差见表 2。通过表 2 中的数据可以看出,采用黏弹性流体模型理论计算的产液量与实测产液量之间的相对百分比误差小于 10% 的井数占验证井总井数的 80%。

表 1 验证井基础数据

井号	有效 厚度/m	井距/m	孔隙度/%	渗透率 / $9.869\ 2\times10^{-16}\ \text{m}^2$	地层静压 /MPa	综合压缩系数 / $10^{-4}\ \text{MPa}$	体积 系数/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	见聚浓度	实测流压/MPa
X1-2-P31	12.1	150	25.40	517	6.95	8.2	1.116	73.9	2.56
X1-3-SP35	7.4	150	25.40	473	7.38	8.2	1.116	153.6	3.39
X2-2-P46	6.6	150	25.40	961	7.31	8.6	1.113	105.1	6.09
X2-31-SP46	9.3	150	25.40	395	10.10	8.6	1.113	180.3	2.38
X2-D2-P43	4.7	150	25.40	391	10.30	8.6	1.113	351.0	2.52

表 2 产液量理论计算值误差检验结果

序号	井号	理论计算的产 液量/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	实测产液量 / $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	相对百分 比误差/%
1	X1-2-P31	95.08	82	15.95
2	X1-3-SP35	52.13	52	2.15
3	X2-2-P46	82.94	80	3.67
4	X2-31-SP46	58.72	56	4.86
5	X2-D2-P43	53.22	53	0.42

5 结论

- (1) 采用黏弹性流体本构模型描述三元复合驱地层流体流变特性能够较好地预测三元复合驱油井流入动态产能；
- (2) 三元复合驱油井最大无阻产液量随采出液的稠度系数、流性指数、弹性参数的增大而减小。

参 考 文 献

1

Fred H L,Larry J,Erwin E. Influences of polymer solution properties on flow in porous media. SPE 8418,1979

2

Delshad M,Kim D H,Huh C,*et al.* Mechanistic interpretation and utilization of viscoelastic behavior of polymer solutions for improved polymer-flood efficiency. SPE 113620,2008

3

佟曼丽,郭小莉. 聚合物稀溶液流经孔隙介质时的粘弹效及其表征. 油田化学,1992;2:145—150

4

佟曼丽. 流经孔隙介质时聚合物稀溶液 Deborah 数的确定. 油田化学,1992;2:50—53

5

Wissler E H. Viscoelastic effects in the flow of non-Newtonian fluids through a porous medium. Ind Eng Chem Fundam, 1971; 10 (3) : 441—417

6

Marshall R J,Metaner A B. Flow of viscoelastic fluids through porous Media. I&EC Fundamentals,1967;6(3):393—400

7

顾培韵,潘勤敏,孙建中,等. 粘弹性流体流变学特性的研究. 浙江大学学报,1994;28(1):80—93

8

Hester R D,Flesher L M. Polymer solution extension viscosity effects during reservoir flooding. SPE 27823,1994

Research on Characteristics of Inflow Performance for ASP Oil Well

ZHANG Shu-yun,CUI Hai-qing

(Enhanced Oil and Gas Recovery Key Laboratory of Ministry of Education,Daqing Petroleum Institute,Daqing 163318,P. R. china)

[**Abstract**] Based on description of the rheological characteristics of ASP combination flooding formation fluid using the constitutive model of viscoelastic fluid,the basic differential equations of flow of ASP reservoir fluid in porous medium were established and numerically calculated using finite differential method,on the works of above mentioned,the productivity of ASP oil well was forecasted using Lagrange interpolation method,the rheological parameters which affected productivity of ASP oil well were analyzed. By means of relative analysis of the results of theoretical arithmetic and the measured data of 5 oil wells of the forth oil recovery factory in Daqing,the percentage of error is less than 20% ,the results indicate that the method using rheology of ASP reservoir fluid which is described using viscoelastic fluid constitutive equation model can predicated productivity of ASP oil well very well.

[**Key words**] viscoelastic fluid ASP rheology numerically calculated.