

聚合物水溶液基泡沫在多孔介质中非稳态流动的数值计算

杨立国^{1,2} 宣 杨¹ 崔海清¹ 张淑云¹ 田子朋¹

(东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室¹, 大庆 163318; 中国石油天然气集团公司吉林油田公司科技处², 松原 138000)

摘 要 在用幂律模式来描述聚合物水溶液基泡沫液相流变性的基础上,建立了聚合物水溶液基泡沫在多孔介质中一维非稳态流动的数学模型。给出了聚合物水溶液基泡沫在多孔介质中非稳态流动的数值计算方法;并以聚丙烯酰胺水溶液基泡沫为例,对其在 Boise 岩心中一维非稳态流动的压降、含液饱和度、流动泡沫平均密度分布以及压降与无因次注入时间的关系进行了数值计算与分析。

关键词 聚合物水溶液基泡沫 非稳态流 多孔介质 数值计算

中图分类号 TE81; **文献标志码** A

聚合物水溶液基泡沫是指以聚合物——表面活性剂水溶液为液相的泡沫。研究聚合物水溶液基泡沫在多孔介质中的非稳态流动可为泡沫钻井储层伤害评价和聚合物水溶液基泡沫驱油提供理论基础。Kovseck 等^[1]建立了水基泡沫在多孔介质中非稳态流动的数学模型,并通过实验验证了该模型的正确性。Bertin^[2]给出了两种泡沫总量模型,一种是泡沫总量平衡模型,另一种是泡沫总量关联模型,并用实验验证了两种模型的正确性。程浩等^[3]阐述了泡沫在多孔介质中的产生和破灭机理,并分析了流动方式、流速和干度因素对泡沫流动的影响。Li 等^[4]通过实验验证了聚合物水溶液基泡沫可以提高泡沫驱油的波及效率。杜庆军等^[5]建立了聚合物强化泡沫流动的多组分数学模型,并考虑了聚合物浓度、剪切速率、地层水矿化度等因素对于聚合物水溶液黏度的影响。Pei 等^[6]分析了气液比、注入段塞尺寸、原油黏度对于聚合物水溶液基泡沫驱替效率的影响。本文用幂律模式来描述聚合物水溶液基泡沫液相的流变性,建立聚合物水溶

液基泡沫在多孔介质中一维非稳态流动的数学模型,给出其数值计算方法,并以聚丙烯酰胺(HPAM)水溶液基泡沫为例,对其在多孔介质中一维非稳态流动进行数值计算与分析。

1 数学模型

1.1 假设条件

(1) 聚合物水溶液基泡沫的液相为聚合物和表面活性剂水溶液,视为不可压缩幂律流体,表面活性剂浓度为常数;气相视为理想气体;(2) 岩心为均质、各向同性、不可压;(3) 不考虑聚合物和表面活性剂水溶液在岩心中的对流、扩散、吸附损耗及重力,考虑毛管力的影响;(4) 注入流体与孔隙介质中流体在多孔介质中等温流动,并满足广义达西(Darcy)定律;(5) 泡沫相对渗透率可用气相相对渗透率模型表征。

1.2 气液两相质量守恒方程

聚合物水溶液基泡沫在多孔介质中一维非稳态流动的气液两相质量守恒方程为^[1,2]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_p \frac{KK_{rp}}{\mu_p} \left(\frac{\partial P_p}{\partial x} \right) \right] + q_p = \frac{\partial(\phi \rho_p S_p)}{\partial t} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_g \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(\frac{\partial P_g}{\partial x} \right) \right] + q_g = \frac{\partial(\phi \rho_g S_g)}{\partial t} \quad (1b)$$

式中^[7,8]

$$K_{rp} = K_{rp}^0 \left(\frac{S_p - S_{pc}}{1 - S_{pc}} \right)^{m_{rp}} \quad (2)$$

$$\mu_p = \left(K_c \left[\frac{3n+1}{n+1} \frac{1}{\sqrt{8c'K_c\varphi}} \left(-KK_{rp} \left(\frac{\partial P_p}{\partial x} \right) \right) \right] \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$\rho_g = \rho_{ga} \frac{P_g}{P_{ga}} \quad (4)$$

$$K_{rg} = K_{rg}^0 \left(x_f \left(1 - \frac{S_p - S_{pc}}{1 - S_{pc}} \right) \right)^{m_{grp}} = K_{rf} \quad (5)$$

$$x_g = 1 - x_t \quad (6)$$

$$x_t = x_{t,\max} \left(\frac{\beta n_t}{1 + \beta n_t} \right) \quad (7)$$

$$n_t = \frac{K_f A_f n_f}{1 + K_f n_f} \quad (8)$$

$$\mu_g = \mu_f = \mu_{gs} + \frac{\alpha n_f}{v_g^{\frac{1}{3}}} \quad (9)$$

式中 ρ_p 为液相密度, kg/m^3 ; K 为岩心渗透率, m^2 ; K_{rp} 为液相相对渗透率, 无因次; μ_p 为液相黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; P_p 为液相压力, Pa ; q_p 为液相注入量, $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$; φ 为岩心孔隙度, 无因次; S_p 为液相饱和度, 无因次; ρ_g 为气相密度, kg/m^3 ; K_{rg} 为气相相对渗透率, 无因次; μ_g 为气相黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; P_g 为气相压力, Pa ; q_g 为气相注入量, $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$; S_g 为气相饱和度, 无因次; K_{rp}^0 为计算液相相对渗透率系数, 无因次; S_{pc} 为束缚液相饱和度, 无因次; m_{rp} 为计算液相相对渗透率的幂指数, 无因次; n 为幂律流体流性指数, 无因次; K_c 为幂律流体稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; c' 为孔隙迂曲系数, 无因次; ρ_{ga} 为标准大气条件下气体的密度, kg/m^3 ; P_{ga} 为标准大气条件下的压力, Pa ; K_{rg}^0 为计算气相相对渗透率系数, 无因次; x_f 为流动泡沫含气饱和度占总泡沫含气饱和度的分数, 无因次; m_{grp} 为计算气相相对渗透率的幂指数, 无因次; K_{rf} 为泡沫相对渗透率, 无因次; x_t 为截留泡沫含气饱和度占总泡沫含气饱和度的分数, 无因次; $x_{t,\max}$ 为最大截留泡沫含气饱和度占总泡沫含气饱和度分数, 无因次; β 为捕集常数, m^3 ; n_t 为截留泡沫平均密度, m^{-3} ; K_f, A_f 为气泡圈闭参数, m^3 ; n_f 为流动泡沫平均密度, m^{-3} ; μ_f 为泡沫的有效黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_{gs} 为气体

黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; α 为表面活性剂结构和浓度有关的黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{2/3} \cdot \text{m}^{10/3}$; v_g 为气相真实流速, m/s 。

1.3 泡沫总量关联方程

聚合物水溶液基泡沫总量关联方程为^[9]

$$n_f = A_k \left(\frac{180(1-\varphi)^2}{\varphi^3} K \right)^{-\frac{3}{2}} S_g x_f \left(\frac{P_c^* - P_c}{P_c} \right) \quad (10)$$

式(10)中

$$P_c = \sigma \left(\frac{\varphi}{K} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{S_p - S_{pc}}{1 - S_{pc}} \right)^{-0.2} \quad (11)$$

式(10)中 A_k 为形状因子, 无因次(取值范围 1—1.5); P_c^* 为临界毛细管压力, Pa ; P_c 为毛细管压力, Pa ; σ 为界面张力, N/m 。

1.4 约束条件

毛细管压力 P_c 的表达式为

$$P_c(x, t) = P_g(x, t) - P_p(x, t) \quad (12a)$$

液相饱和度和气相饱和度的关系式为

$$S_p(x, t) + S_g(x, t) = 1 \quad (12b)$$

1.5 定解条件

1.5.1 初始条件

$$\mu_p(x, 0) = \mu_{p0} \quad (13a)$$

$$\mu_g(x, 0) = \mu_{g0} \quad (13b)$$

$$n_f(x, 0) = 0 \quad (13c)$$

$$K_{rp}(x, 0) = 1 \quad (13d)$$

$$K_{rg}(x, 0) = 0 \quad (13e)$$

$$S_p(x, 0) = S_{pi} \quad (13f)$$

$$S_g(x, 0) = 0 \quad (13g)$$

$$P_p(x, 0) = P_{pi} \quad (13h)$$

$$P_g(x, 0) = P_{pi} \quad (13i)$$

$$P_c(x, 0) = 0 \quad (13j)$$

式中 μ_{p0} 为初始液相黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_{g0} 为初始气相黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; S_{pi} 为初始含液饱和度, 无因次; P_{pi} 为初始液相压力, Pa 。

1.5.2 边界条件

$$u_p(0, t) = u_{p0} \quad (13k)$$

$$u_g(0, t) = u_{g0} \quad (13l)$$

$$P_g(L, t) = P_p(L, t) = P_0 = P_{pi} \quad (13m)$$

式中 u_{p0} 为注入液体速率, m/s ; u_{g0} 为注入气体速率, m/s ; L 为岩心长度, m ; P_0 为回压, Pa 。

上述式(1)~式(13)即聚合物水溶液基泡沫在多孔介质中一维非稳态流动的数学模型。

2 数值计算方法

采用有限差分法对上述聚合物水溶液基泡沫在多孔介质中一维非稳态流动的数学模型式(1)~式(13)进行数值求解。求解时对差分方程应用IMPES方法进行数值求解。计算步骤如下:

- (1) 输入计算所要用的参数 L 、 K 、 φ 、 c' 、 A_k 、 β 、 K_f 、 A_f 、 K_{rp}^0 、 K_{rg}^0 、 m_{prp} 、 m_{grp} 、 S_{pc} 、 S_{pi} 、 S_p^* 、 σ 、 ρ_p 、 ρ_{ga} 、 n 、 K_c 、 μ_{g0} 、 μ_{p0} 、 α 、 u_{g0} 、 u_{p0} 、 P_0 、 P_{pi} 、 P_{ga} 、 $x_{t,max}$;
- (2) 通过式(13a)~式(13j)给变量 $\mu_p(i,0)$ 、 $\mu_g(i,0)$ 、 $n_f(i,0)$ 、 $K_{rp}(i,0)$ 、 $K_{rg}(i,0)$ 、 $S_p(i,0)$ 、 $S_g(i,0)$ 、 $P_p(i,0)$ 、 $P_g(i,0)$ 及 $P_c(i,0)$ 赋初值;
- (3) $n = 1$;
- (4) 若 $n > N_t$,转步(8);否则转步(5);
- (5) 通过式(1)~式(13)计算液相压力 $P_p(i,n)$ 、气相压力 $P_g(i,n)$ 、液相饱和度 $S_p(i,n)$ 、气相饱和度 $S_g(i,n)$ 和流动泡沫平均密度 $n_f(i,n)$;
- (6) 输出 $P_p(i,n)$ 、 $S_p(i,n)$ 、 $n_f(i,n)$;
- (7) $n = n + 1$,转步(4);
- (8) 计算结束。

3 实例计算

向已饱和0.83wt% α -烯烃磺酸盐(AOS1416)水溶液的Boise岩心中同时注入氮气(N_2)、0.001wt%聚丙烯酰胺和0.83wt% α -烯烃磺酸盐水溶液,则0.001wt%聚丙烯酰胺和0.83wt% α -烯烃磺酸盐水溶液基泡沫在Boise岩心中一维非稳态流动。现应用上述聚合物水溶液基泡沫在多孔介质中一维非稳态流动的数学模型式(1)~式(13)及相应数值计算方法,对上述流动进行数值计算与分析。

3.1 基本参数

计算中所用到的参数及其数值如表1^[1,10]

表1 计算中所用到的参数及其数值

参数	数值	参数	数值
L/m	0.60	$\sigma \times 10^{-1}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.33
$K \times 10^{-12}/\text{m}^2$	1.30	$\rho_p/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 000.00
φ	0.25	$\rho_{ga} \times 10^{-1}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	11.66
c'	2.30	$n \times 10^{-1}$	9.78
A_k	1.00	$K_c \times 10^{-2}/(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	0.09
$\beta \times 10^{-9}/\text{m}^3$	1.00	$\mu_{g0} \times 10^{-4}/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.18
K_f/m^3	4.00	$\mu_{p0} \times 10^{-1}/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.01
A_f/m^3	1.25	$\alpha \times 10^{-14}/(\text{Pa} \cdot \text{s}^{2/3} \cdot \text{m}^{10/3})$	6.00
K_{rp}^0	0.70	$u_{g0}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	0.43
K_{rg}^0	1.00	$u_{p0} \times 10^{-1}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	0.46
m_{prp}	3.00	P_0/MPa	4.80
m_{grp}	3.00	P_{pi}/MPa	4.80
S_{pc}	0.25	P_{ga}/MPa	1.00
S_{pi}	1.00	$x_{t,max}$	0.90
S_p^*	0.26		

3.2 数值结算与分析

0.001wt% 聚丙烯酰胺和 0.83wt% α -烯烃磺酸盐水溶液基泡沫在 Boise 岩心中非稳态流动的压降 ΔP_p 分布如图 1 所示。由图 1 可见,该流动前缘上游压降 ΔP_p 随无因次距离 x/L 的增加线性减小,这是由于流动前缘上游有泡沫通过岩心;流动前缘下游压降 ΔP_p 近似为零,这是由于下游没有泡沫通过岩心。另外,流动前缘上游的压降 ΔP_p 随无因次注入时间 PV 的推移而增大,这是因为随着无因次注入时间 PV 的推移泡沫活塞强度增加所致。

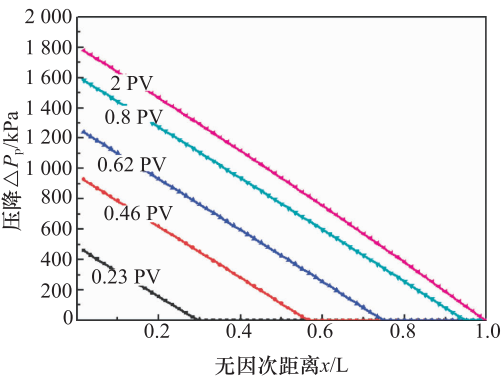


图1 压降 ΔP_p 分布

0.001wt% 聚丙烯酰胺和 0.83wt% α -烯烴磺酸盐水溶液基泡沫在 Boise 岩心中非稳态流动的含液饱和度 S_p 分布如图 2 所示。由图 2 可见,该流动前缘上游含液饱和度 S_p 为 0.30,下游含液饱和 S_p 为 1.00,且流动前缘的含液饱和度 S_p 随着无因次注入时间 PV 的推移变化很小。

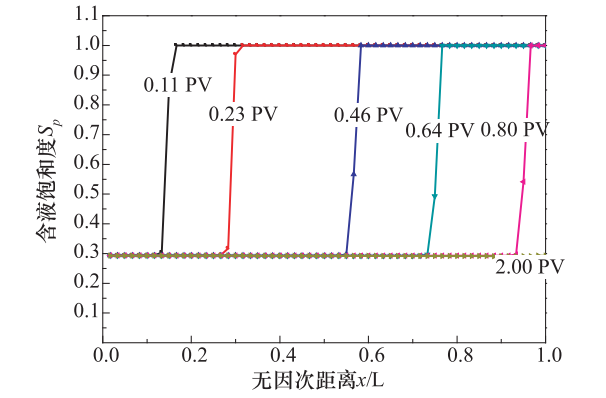


图 2 含液饱和度 S_p 分布

0.001wt% 聚丙烯酰胺和 0.83wt% α -烯烴磺酸盐水溶液基泡沫在 Boise 岩心中非稳态流动的流动泡沫平均密度 n_f 分布如图 3 所示。由图 3 可见,该流动存在流动前缘。在流动前缘,流动泡沫平均密度 n_f 达到峰值,这是由于流动前缘的含液饱和度 S_p 陡然升高至 1.0 时,毛细管力 P_c 下降,泡沫结构变细所致。另外,流动前缘的流动泡沫平均密度 n_f 峰值随无因次注入时间 PV 的推移而增大,这是由于随着无因次注入时间 PV 的推移泡沫活塞强度增加所致。

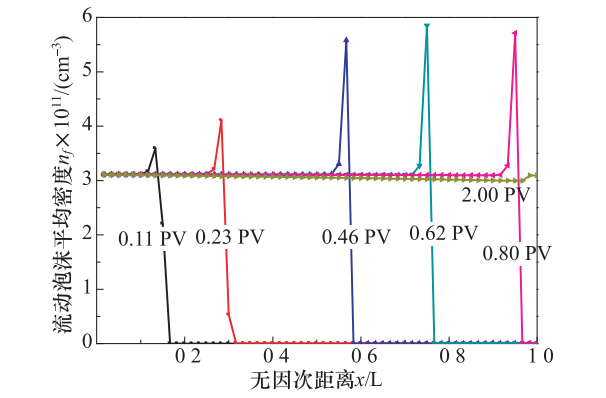


图 3 流动泡沫平均密度 n_f 分布

0.001wt% 聚丙烯酰胺和 0.83wt% α -烯烴磺酸盐水溶液基泡沫在 Boise 岩心中非稳态流动的压降 ΔP_p 与无因次注入时间 PV 关系如图 4 所示。由图 4 可见,当无因次注入时间小于 1.5 PV 时,流动为非稳态,流动压降 ΔP_p 随着无因次注入时间 PV 的推移呈线性增加;当无因次注入时间 PV 大于 1.5 PV 时,流动为稳态,压降 ΔP_p 不随着无因次注入时间 PV 的推移而变化。

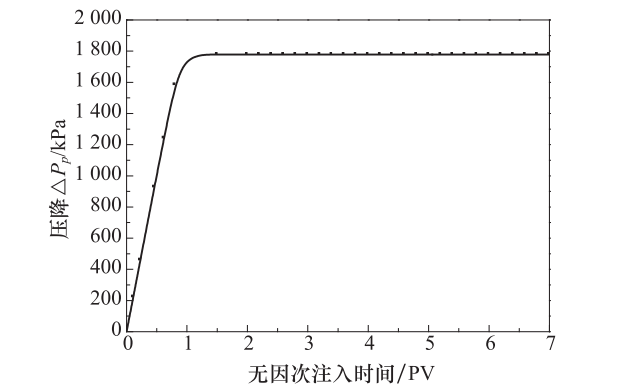


图 4 压降 ΔP_p 与无因次注入时间 PV 的关系

4 结论

- (1) 建立了聚合物水溶液基泡沫在多孔介质中一维非稳态流动的数学模型,并给出了相应的数值计算方法;
- (2) 以 0.001wt% 聚丙烯酰胺和 0.83wt% α -烯烴磺酸盐水溶液基泡沫为例,对其在 Boise 岩心中一维非稳态流动的压降、含液饱和度、流动泡沫平均密度分布以及压降与无因次注入时间的关系进行了数值计算与分析。

参 考 文 献

1 Kovscek A R, Radke C J. Fundamentals of foam transport in porous media. Foams: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry. Washington, DC: American Chemical Society, 1994: 115—163

2 Bertin H. Modeling transient foam transport in porous media. Porous Media: Physics, Models, Simulation, Proceedings of International Conference. Moscow: World Scientific, 1997: 187—204

3 程 浩,郎兆新. 泡沫在多孔介质中的流动规律及其数值模拟.

第六届全国流体力学会议论文集,上海,2001;290—294

4 Li Zhengquan,Zhou Guohua,Zhou Zongming. The feasibility studies of polymer foam flooding in gudao oilfield. SPE, September, 2006; 1—8

5 杜庆军,候健,李振泉,等. 聚合物强化泡沫驱数学模型及其应用. 计算物理,2009;26(6):872—878

6 Pei H,Zhang G,Ge J,*et al.* Investigation of polymer-enhanced foam flooding with low gas/liquid ration for improving heavy oil recovery. SPE,October,2010;1—11

7 Garrouch A A. A viscoelastic model for polymer flow in reservoir rocks. SPE, April, 1999;1—10

8 Friedmann F,Chen W H,Gauglitz P A. Experimental and simulation study of high-temperature foam displacement in porous media. SPE, February, 1991;37—45

9 Bertin H J,Quintard M Y,Castanier L M. Development of a bubble-population correlation for foam-flow modeling in porous media. SPE, December, 1998;356—362

10 程浩. 强化采油中泡沫渗流机理和数值模拟研究. 中国石油大学博士学位论文,2001;111—114

The Numerical Calculation of the Unsteady Flow of the Polymer Aqueous Solution-base Foam through Porous Media

YANG Li-guo^{1,2}, XUAN Yang¹, CUI Hai-qing¹, ZHANG Shu-yun¹, TIAN Zi-peng¹

(Enhanced Oil and Gas Recovery Key Laboratory of Ministry of Education, Northeast Petroleum University¹, Daqing 163318, P. R. China;
Department of Science and Technology of PetroChina Jilin Oilfield Company², Songyuan 138000, P. R. China)

[Abstract] Based on the rheological behavior of the liquid phase of the polymer aqueous solution-base foam which was described by the power-law model, the model of one-dimensional unsteady flow of the polymer aqueous solution-base foam through porous media was established, the method of the numerical calculated of one-dimensional unsteady flow of the polymer aqueous solution-base foam through porous media was given, and taking the polyacrylamide aqueous solution-base foam as an example, pressure drop, fluid saturationthe, the average bubble density distribution and the relationship between pressure drop and dimensionless injection time of one-dimensional unsteady folw in Boise core are calculated and analyzed.

[Key words] polymer aqueous solution-base foam unsteady flow porous media numerical calculation