

# 泡沫驱等效数学模型建立及机制分析

王国壮<sup>1</sup>, 张琪<sup>2</sup>

1. 中国石化华北分公司镇泾采油厂, 甘肃庆阳 745000
2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580

**摘要** 随着泡沫剂在采油中的广泛应用, 出现了许多泡沫驱的数值模拟方法。本文着重研究了泡沫的聚并机制和驱油机制, 在此基础上建立了一种泡沫驱的等效数学模型, 运用 IMPES 法对模型进行求解, 并计算阻力因子值调整注入量, 模拟泡沫的调剖效果, 同时通过典型算例验证了该等效模型的可行性。对比了水驱、泡沫驱岩心中压力分布、饱和度分布及驱油效率, 结果表明, 泡沫对高渗透率层起到了很好的封堵作用, 使采收率得到一定程度的提高。

**关键词** 泡沫驱; 数学模型; 机制分析

**中图分类号** TE357.4

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.14.008

## Establishment and Mechanism Analysis on an Equivalent Mathematical Model for Foam Flooding

WANG Guozhuang<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>

1. Zhenjing Oil Production Plant, North China Branch, SINOPEC, Qingyang 745000, Gansu Province, China
2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong Province, China

**Abstract** With foam is widely used in the oil extraction, various methods involving the numerical simulation of foam flow in porous media are appeared. Therefore, the research on the characteristics and mechanism of the foam in the oilfield is definitely necessary. Based on the physical properties of foam, coalescence mechanism and oil displacement mechanism of foam flooding, an equivalent mathematical model of the technology is developed. The parameters for the model are corrected by the value of the resistance factor. The solution of the mathematical model is obtained by using IMPES method. Through the typical example, the equivalent mathematical model is proven to be feasible. The calculation conditions for the typical example are given. Double tube core flooding is simulated, and then the displacement effects between foam flooding and non-foam flooding are compared with each other. The core pressures of water flooding and foam flooding, saturation distributions as well as flooding efficiency are compared, the model is proven. The results show that the foam possesses a good plugging capacity to the layer with high permeability and the oil recovery could be efficiently enhanced by the foam flooding.

**Keywords** foam flooding; mathematical model; mechanism analysis

## 0 引言

利用表面活性剂发泡性配制成驱油剂进行采油的方法为泡沫驱, 是一种很有发展前途的提高原油采收率的驱油方法。近年来, 泡沫在油田提高采收率的应用已有很多成功的例子, 并且人们对于泡沫在石油钻采工艺中的应用进行了广泛、深入的研究, 但目前, 泡沫流动特性的理论研究有待发展, 同时泡沫驱的数学模型仍需完善, 因此认识泡沫在油田中起作用的特性和机制, 将机制研究扩展到大规模矿场模拟

非常需要<sup>[1]</sup>。本文根据泡沫的物理性质, 破裂聚并机制及泡沫驱油的动态特征, 建立了泡沫在孔隙介质中流动的等效数学模型, 通过实例验证了该模型的可行性, 并进行了机制分析。

## 1 模型理论基础

### 1.1 泡沫的破裂聚并机制

泡沫由于液膜排液和气体的透过会破灭、聚并, 此现象可以用 DLVO 理论解释<sup>[2]</sup>。毛管压力是使液膜变薄的力, 与其

收稿日期: 2013-01-18; 修回日期: 2013-02-16

作者简介: 王国壮, 高级工程师, 研究方向为油田开发, 电子信箱: dxwang@sohu.com

平衡的力是分离压力,它是范德华力和双电层排斥力作用的结果。液膜达到静平衡时毛管力等于分离压力。流体体系的特性(如表面活性剂和盐浓度)决定了分离压力,分离压力是液膜厚度的函数。当毛管力大于最大分离压力时,液膜变薄、破裂。此外,油相的存在使泡沫不稳定,原因主要是油在气水界面铺展,导致液膜变薄,降低了破裂的临界毛管力。

### 1.2 泡沫的驱油机制

泡沫具有驱油作用在于泡沫在多孔介质内的渗流特性。由于泡沫在大孔道中流动时有较高的视黏度,泡沫首先进入流动阻力较小的高渗透大孔道,流动阻力随泡沫注入量的增加而增大,当增加到超过小孔道中的流动阻力后,泡沫便越来越多地流入低渗透小孔道。泡沫在小孔道中流动视黏度低,小孔道中含油饱和度高,泡沫稳定性差。两种因素的存在导致泡沫在高、低渗透层内均匀推进<sup>[9]</sup>。泡沫还具有一定的洗油能力,因而泡沫驱油能力大幅度提高。

实验证明泡沫对原油的敏感性差别很大,这种特性取决于原油渗入泡沫的程度,更重要的是在注水后剩余油饱和度条件下进行岩心驱替实验,发现在实际孔隙介质中,其稳定性转化为泡沫的有效性。

## 2 泡沫驱等效数学模型的建立

### 2.1 假设条件

泡沫驱等效数学模型建立的假设条件为<sup>[4-5]</sup>:(1)符合达西渗流定律;(2)等温渗流;(3)油水两相三组分(表面活性剂溶在水中);(4)一维流动;(5)流体和岩石为不可压缩;(6)油藏岩石性质沿一维非均质;(7)不考虑毛管力和重力;(8)不考虑吸附对表面活性剂的影响;(9)不考虑泡沫在油藏条件下的生成、聚并;(10)不考虑层间窜流。

### 2.2 组分质量守恒方程

泡沫驱油过程产生许多复杂的物理化学现象,泡沫驱等效数学模型为多相多组分模型,所以根据组分质量守恒方程可以得到<sup>[6-8]</sup>。

水组分:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + q_w = \phi \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (1)$$

其中, $P$ 为地层压力,MPa; $\phi$ 为岩心孔隙度; $k_{rw}$ 为水相相对渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $k$ 为岩心绝对渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $\mu_w$ 为水黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ; $q_w$ 为水相注入速度, $\text{cm}^3/\text{s}$ ; $S_w$ 为含水饱和度; $t$ 为驱替时间, $\text{s}$ ;

油组分:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + q_o = \phi \frac{\partial S_o}{\partial t} \quad (2)$$

其中, $k_{ro}$ 为油相相对渗透率; $\mu_o$ 为油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ; $q_o$ 为油相流动速度, $\text{cm}^3/\text{s}$ ; $S_o$ 为含油饱和度。

表面活性剂浓度是泡沫存在的重要标准,并且影响泡沫的聚并速率。泡沫的质量平衡方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k k_m}{\mu_w} C_s \frac{\partial P}{\partial x} \right) + C_s q_w = \frac{\partial}{\partial t} (\phi S_w C_s) \quad (3)$$

其中, $C_s$ 为表面活性剂浓度。

### 2.3 辅助方程

饱和度方程

$$S_w + S_o = 1 \quad (4)$$

### 2.4 求解方法

模型中含有 $P$ 、 $S_w$ 、 $S_o$ 、 $C_s$  4个未知数,3个质量守恒方程和一个饱和度方程。先用隐式方法求解压力,再用显式方法同时求解饱和度。在油井见水之后开始注泡沫,注泡沫过程中根据所求出的压力和饱和度数据用隐式方法求解表面活性剂浓度。然后根据各点的表面活性剂浓度值和实验所测得的阻力因子值插值求得渗管中的阻力因子值。由各管的阻力因子值对各管的注入量进行调整,从而模拟泡沫的调剖效果<sup>[9,10]</sup>。

## 3 典型算例分析

计算参数:岩心长 $L=1\text{m}$ ,横截面积 $A=10\text{cm}^2$ ,孔隙度 $\phi=0.3$ ,渗透率 $k_1=1\mu\text{m}^2$ (高渗管), $k_2=0.1\mu\text{m}^2$ (低渗管),油黏度 $\mu_o=2\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,水黏度 $\mu_w=1\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,原始地层压力 $P_i=0$ 。在岩心另一端见水后,向岩心中注入3%PV(孔隙体积)的表面活性剂溶液,注入速度为 $Q_v=0.2\text{cm}^3/\text{s}$ 。模拟计算<sup>[11]</sup>不考虑油相对泡沫的影响,不考虑吸附对泡沫的影响,只存在油、水两相,初始 $S_{wc}=0.2$ 。图1给出了计算中所用的相对渗透率曲线。模拟计算双管岩心驱替,并将泡沫驱和非泡沫驱的驱替效果做比较。

图2为注入时间 $t=800\text{s}$ 时水驱、泡沫驱高、低渗透率岩

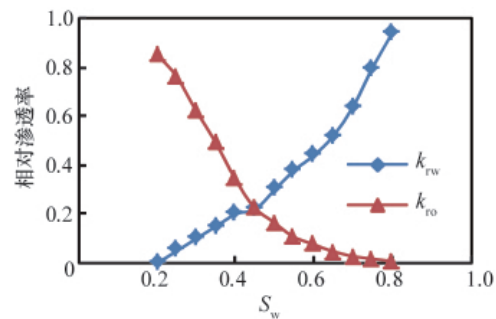


图1 油水两相的相对渗透率曲线

Fig. 1 Curve of oil-water phases relative permeability

心地层压力分布图。可以看出,泡沫驱岩心的地层压力大于水驱的压力,并且,利用泡沫驱时低渗透岩心的地层压力增大的幅度要大于高渗透岩心的值,表明在保持同样渗流速度的情况下,泡沫驱时由于增大了渗流阻力,造成了外部驱替压差的增大。同时,泡沫驱时低渗透岩心中渗流阻力的增大对于外部驱替压差的影响尤为突出。

图3为注入时间 $t=800\text{s}$ 时水驱、泡沫驱高、低渗透率岩心含水饱和度分布图,从图中可以看出,泡沫驱低渗透岩心含水饱和度分布曲线前端值高于水驱时的值,说明由于泡沫对高渗透层选择性封堵,使更多的驱替液进入低渗透层,有效提高了驱油效率。

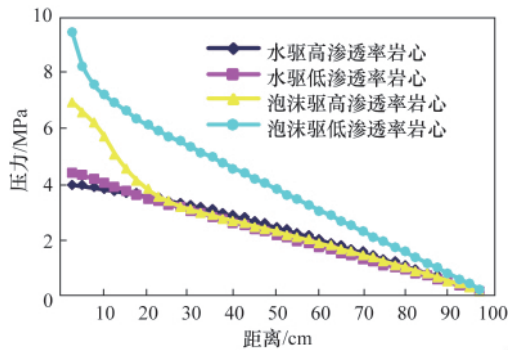


图2 水驱、泡沫驱岩心中压力分布

Fig. 2 Water flooding, the pressure distribution of foam flooding core

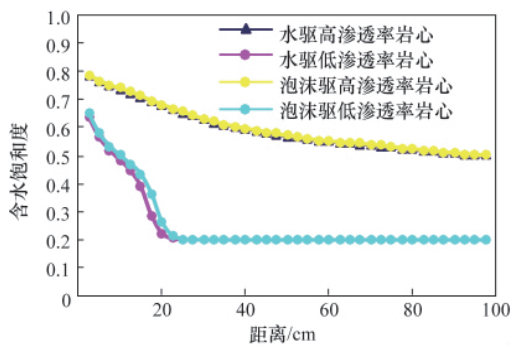


图3 水驱、泡沫驱岩心中含水饱和度分布

Fig. 3 Water flooding, the saturation distribution of foam flooding core

图4为高渗透率岩心见水后水驱和泡沫驱驱油效率对比图。从图中可以看出,泡沫驱能够提高原油的采收率。

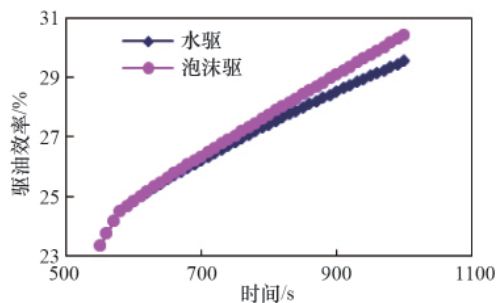


图4 水驱和泡沫驱驱油效率对比

Fig. 4 Efficiency comparison between water flooding and foam flooding

## 4 结论

(1) 研究了泡沫在多孔介质中的产生、破灭和聚并机制,从而明确了泡沫是如何封堵高渗层、调剖。泡沫体系对高渗透率层具有较好的封堵特性,而对低渗透层封堵能力较弱。

(2) 根据泡沫的破裂聚并机理和在多孔介质中的流动机制,建立了泡沫在孔隙介质中流动的等效数学模型。泡沫存在时根据阻力因子值对各项参数作相应的修正。

(3) 通过模拟双管岩心中泡沫驱的驱替效果,验证了所建立的数学模型能够正确模拟泡沫在多孔介质中的流动过程。

(4) 泡沫在孔隙介质中渗流时具有非常独特的渗流特性,对地层具有选择性封堵,能够一定程度上提高原油采收率。不同渗透率的岩心进行泡沫试验,渗透率增大,泡沫流动因子增大,封堵能力增强,说明泡沫对高渗透层有更好的封堵能力。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈国, 廖广志, 牛金刚. 多孔介质中泡沫流动等效数学模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 72-74.  
Chen Guo, Liao Guangzhi, Niu Jingang. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 72-74.
- [2] 程浩, 张文亮, 贺艳梅. 泡沫驱数值模拟进展[J]. 断块油气田, 2000, 7(5): 26-30.  
Cheng Hao, Zhang Wenliang, He Yanmei. Fault-block Oil & Gas Field, 2000, 7(5): 26-30.
- [3] 孙灵辉, 萧汉敏, 刘卫东, 等. 泡沫复合驱微观驱油机理实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(S1): 32-34.  
Sun Linghui, Xiao Hanmin, Liu Weidong, et al. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2009, 28(S1): 32-34.
- [4] 李和全, 郎兆新, 胡靖邦, 等. 泡沫复合驱数学模型[J]. 大庆石油学院学报, 1997, 21(3): 20-24.  
Li Hequan, Lang Zhaoxin, Hu Jingbang, et al. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1997, 21(3): 20-24.
- [5] 张烈辉, 胡勇, 涂中, 等. 泡沫驱经验模型及其应用 [J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(3): 50-52.  
Zhang Liehui, Hu Yong, Tu Zhong, et al. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(3): 50-52.
- [6] 李和全, 李淑红, 吴波, 等. 一个气液两相泡沫驱模型 [J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(3): 15-18.  
Li Hequan, Li Shuhong, Wu Bo, et al. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(3): 15-18.
- [7] 鹿腾, 李兆敏, 李敬, 等. 基于泡沫微观渗流特征的泡沫驱数学模型[J]. 计算物理, 2012, 29(4): 519-524.  
Lu Teng, Li Zhaoxin, Li Jing, et al. Chinese Journal of Computational Physics, 2012, 29(4): 519-524.
- [8] Schramm L L, 程细蓉. 有油存在的情况下泡沫的有效性 [J]. 国外油田工程, 1997(4): 11.  
Schramm L L, Cheng Xiangrong. Foreign Oilfield Engineering, 1997(4): 11.
- [9] 杜庆军, 侯健, 李振泉, 等. 聚合物强化泡沫驱数学模型及其应用[J]. 计算物理, 2009, 26(6): 872-878.  
Du Qingjun, Hou Jian, Li Zhenquan, et al. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(6): 872-878.
- [10] 廖广志, 李立众, 孔繁华, 等. 常规泡沫驱油技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.  
Liao Guangzhi, Li Lizhong, Kong Fanhua, et al. Conventional foam flooding technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [11] Friedmann F, Chen W H, Gauglitz P A. Experimental and simulation study of high-temperature foam displacement in porous media [J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 6(1): 37-45.

(责任编辑 刘志远)