

# 可动凝胶体系非线性渗流数学模型

崔英怀<sup>1</sup>, 朱维耀<sup>2</sup>, 孙玉凯<sup>2</sup>, 马庆坤<sup>3</sup>

(1. 吐哈油田研究院, 新疆 哈密 839009; 2. 北京科技大学, 北京 100083; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 为进一步研究油田开发渗流中可动凝胶驱的力学行为特征, 在实验研究基础上, 通过对渗流机理、渗流规律的分析, 研究可动凝胶体系非线性渗流力学行为, 揭示可动凝胶体系的渗流特征。结合实验, 对可动凝胶流动机理和物理化学性质的研究, 根据质量传输流体力学、化学动力学的深入研究, 系统地建立了可动凝胶体系驱油渗流数学模型。从而, 系统的刻画了可动凝胶体系驱油这一复杂渗流流动数学描述难题, 完善可动凝胶体系渗流的理论, 为今后可动凝胶体系驱油数值模拟研究和现场应用提供了理论基础。

**关键词:** 可动凝胶; 非牛顿; 非线性; 渗流特征; 数学模型

中图分类号: TE 312

文献标识码: A

## Mathematical models of nonlinear porous flow for weak gel flooding system

CUI Yinghuai<sup>1</sup>, ZHU Weiyao<sup>2</sup>, SUN Yukai<sup>2</sup>, MA Qingkun<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Tuha oil field of Petroleum Administration Bur of Petroleum, Hami 839009, China; 2. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 3. Institute of Mechanics Academy Sinica, Beijing, 100083, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of understand for porous flow feature of weak gel complex flow that is complicated in the process of production in reservoir. According to the experiment results of porous flow mechanism characteristic, some porous flow nonlinear-feature and regular pattern are promulgated. A series of mathematical models for description of the parameters of weak gel flooding were established on the porous flow mechanism, rheometry behavior, chemical dynamics and fluid mechanics. The theoretical foundation is laid for the porous flow of weak gel.

**Key words:** weak gel; non-Newton flow; nonlinear; porous flow feature; mathematic model

## 0 引言

可动凝胶驱油比聚合物驱油具有更好的驱油效果, 具有不同于聚合物溶液的非牛顿流体特性, 有自己的特殊性。表现为可动凝胶聚合物成胶前粘度随时间变化, 具有触变性流体特征; 成胶后可动凝胶聚合物粘度不随时间变化<sup>[1-3]</sup>。由于可动凝胶体系流变特性和粘度变化比聚合物驱替过程的要复杂, 原有的聚合物驱对流扩散渗流模型方程难于合理有效的刻画这一复杂渗流过程。本文主要是根据大量的室内实验, 通过非牛顿流体流动理论、渗流力学理论研究方法, 将对可动凝胶体系驱油过程进行渗流数学描述, 建立系统的各类数学描述模型方程。从而有效地指导矿场的应用和实施。

## 1 质量传输渗流数学模型

### 1.1 质量守恒方程

根据问题的描述和渗流实验机理研究结果, 建立如下渗流数学模型方程组。其质量守恒方程

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{F}_i + \bar{D}_i) = Q_i \quad (i=1,2,3,\dots,N_c) \quad (1)$$

上述式  $W_i$  为质量项,  $\bar{F}_i$  为对流项,  $\bar{D}_i$  为扩散项,  $Q_i$  为  $i$  组分源汇项。

### 1.2 各相运动方程

各相运动方程采用原有非牛顿流体达西形式表示方法, 但由于粘度、渗透率下降系数随流动和时间发生变化实质为非线性流动, 表达式为

收稿日期: 2008-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772023); 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2007CB209500)

作者简介: 崔英怀(1968-), 陕西长武人, 高工, 硕士, 主要从事油田开发专业方面的研究。E-mail: weiyao@sina.com. 本文编辑: 杨瑞华

$$u_j = -K \frac{k_{rj}}{\mu_j R_j} (\nabla p_j - \rho_j g \nabla D)^{1/n_j} \quad (2)$$

式中,  $p_j$  为  $j$  相压力,  $g$  为重力加速度,  $K$  为绝对渗透率,  $\mu_j$  为  $j$  相粘度,  $R_j$   $j$  相渗透率下降系数,  $k_{rj}$  为  $j$  相的相对渗透率,  $u_j$  为  $j$  相速度,  $D$  为高度,  $n_j$  为非牛顿幂律指数。相流体为水、油时  $n_j$  等于 1, 方程 (2) 就蜕化为牛顿流体达西方程形式。当非牛顿流体相粘度不发生变化时方程 (2) 就蜕化为聚合物的幂律流体表达形式。

### 1.3 特性方程

可动凝胶体系和聚合物溶液渗透率降低, 其变化与体系浓度和体系性质有关

$$R_k = (1.0 + \frac{(R_{k,max} - 1.0)b_k C_p}{1.0 + c_k C_p}) \quad (3)$$

式中,  $C_p$  为体系聚合物质量浓度,  $b_k$ 、 $c_k$  为方程中的系数,  $R_{k,max}$  为渗透率降低最大系数。

残余阻力系数: 残余阻力系数为注可动凝胶体系前后水的流度的比值。水的流度除受多孔介质的渗透率、孔隙结构及孔隙表面性质的影响外还受多孔介质中共存的油水两相的影响。驱油是在具有流动油饱和度的油藏中进行, 含油饱和度大小对岩心阻力系数和残余阻力系数产生影响。在无油存在的岩心中阻力系数和残余阻力系数比有油存在的岩心中阻力系数和残余阻力系数高。岩心中油的存在一方面影响水的流度。另一方面也影响可动凝胶体系和聚合物溶液在多孔介质中的流动行为及滞留情况。残余阻力系数受岩心渗透率和含油饱和度的影响, 根据实验和分析可用如下公式表示

$$R_{rf} = (1 + \frac{a_k}{K})(1 + a_{s1} S_w + a_{s2} S_w^2) \quad (4)$$

式中,  $S_w$  为水相饱和度,  $a_k$ 、 $a_{s1}$ 、 $a_{s2}$  为方程中的系数。

一般滞留量随渗透率的增加而减小。采用渗透率相同, 孔隙结构不同滞留量也不同, 天然岩心比人造岩心捕集滞留量也大。

吸附方程为

$$\hat{C}_{s1} = \frac{a_{s1} C_p}{1 + b_{s1} C_p} \quad (5)$$

机械捕集、流体动力学捕集滞留方程为

$$\hat{C}_{s2} = a_{s2} (1 + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp(X - x_c)) \times (\frac{\alpha_{sk}}{K} + 1)^\beta \quad (6)$$

式中,  $X$  为交联体系交联剂与聚合物浓度之比,  $x_c$  为最佳交联体系交联剂与聚合物质量浓度之比,

$a_{s1}$ 、 $b_{s1}$  为吸附方程参数,  $a_{sk}$  为孔隙结构参数,  $a_{s2}$ 、 $\beta$  为与交联体系有关的方程系数。

总滞留量为  $\hat{C}_s = \hat{C}_{s1} + \hat{C}_{s2}$ 。

上述方程由此可以系统的刻画了可动凝胶体系驱油这一复杂渗流流动过程。

## 2 可动凝胶体系非线性渗流特征

### 2.1 多孔介质对可动凝胶体系渗流特性的影响

系列研究结果表明渗透率大小对可动凝胶体系渗流特性产生影响, 渗透率越低流动压力越高, 即流动阻力越大。渗透率大时多孔介质对可动凝胶的剪切作用和滞留作用明显减小。可动凝胶体系的压降与流速关系为非达西式, 随着流速的增加, 压力上翘, 可动凝胶体系上翘幅度较大; 随着成胶时间的增加, 压力上翘幅度变大, 具有明显的非牛顿特性, 表现为变型非牛顿流体流动特性和渗流规律。

### 2.2 相对渗透率

实验结果表明, 聚合物和可动凝胶体系水溶液相对渗透率比水相相对渗透率大幅度降低, 而油相相对渗透率相对影响不大。可动凝胶体系驱的油相相对渗透率比聚合物驱的油相相对渗透率影响要大。可动凝胶体系和聚合物溶液驱油相对渗透率公式分别表示如下。

可动凝胶体系水溶液、油相对渗透率为

$$k_{rp} = k_{rw}^0 / (1 + a_{k1} X + a_{k2} X^2) \left( \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{or}} \right)^{ep1} \quad (7)$$

$$k_{ro} = k_{ro}^0 / (1 + a_{k1} X) \left( \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{or}} \right)^{ep2} \quad (8)$$

式中,  $k_{ro}^0$ 、 $k_{rw}^0$  分别为水驱时油、水相的相对渗透率方程系数,  $S_w$  为水饱和度,  $S_{wr}$  为束缚水饱和度,  $S_{or}$  为残余油饱和度,  $k_{ro}$ 、 $k_{rw}$  分别为油相和水相相对渗透率,  $a_{k1}$ 、 $a_{k2}$  为可动凝胶相对渗透率方程中的参数,  $ep1$ 、 $ep2$  为可动凝胶驱相对渗透率方程的指数。

## 3 可动凝胶体系流变特征

非牛顿流体一般可分为纯粘性的和粘弹性的两大类。对于可动凝胶体系, 初始一段时期粘度随时间的增加而变大, 一般可在几小时到数天, 表现为粘度是时间的函数, 流变实验结果表明此时流体

具有触变性。但形成交联以后其粘度不再受时间影响触变性消失,流变特性与聚合物溶液类似。

### 3.1 粘性流变特性表征

可动凝胶体系粘度随时间而变化。可动凝胶体系在初交联成胶之前的溶液粘度变化不大,仍遵循拟塑性非牛顿流体特征。可动凝胶体系整个流变特征有别于聚合物溶液流变特征,如果采用幂律流体模型不能描述整个曲线变化过程,至少分两段。如果采用 Ellis 模型方程可以较好地描述粘性特性<sup>[1]</sup>。

### 3.2 粘弹—触变性表征

对图 2 用双对数整理可以看出双对数曲线不是线性的,曲线可以归纳采用多参数的粘弹—触变性表征方法对可动凝胶体系进行描述<sup>[3]</sup>。模型如下

$$\sigma_s = \mu \dot{\gamma} + \frac{G \dot{\gamma}^2}{2k} + A_1 B \dot{\gamma}^n e^{-\frac{A_1 \dot{\gamma}^{n+1}}{k(n+1)}} \quad (9)$$

式中,含有  $G$ 、 $\mu$ 、 $A_1$ 、 $B$  和  $n$  共 5 个参数。方程 (9) 刻画了可动凝胶体系的全程流变特征。当处于不同时间段时方程三项作用大小自动得以显示,部分自动弱化。 $k$  为剪切速率随上升时间变化率;

$t_1$  为剪切速率由 0 上升到最大剪切速率  $\dot{\gamma}_{\max}$  时所需时间。模型方程右侧第一项表示为粘性项,第二项为弹性项,第三项为触变性项。当可动凝胶体系初交联前,触变性项弱化消失,弹性项弱化消失,表现为方程中的第一项即粘性项起主导作用。随着交联时间的增加弹性和触变性增大,方程的第二、三项数值增大。由此式 (9) 可以全程描述可动凝胶体系粘弹—触变性流变特征。

## 4 算例

下面利用剖面模型进行模拟研究。我们选择正韵律剖面模型,该模型分二层,渗透率从上到下分别为  $0.18 \mu\text{m}^2$ ,  $2.66 \mu\text{m}^2$ 。即高渗层在下面,较低渗层在上面,含水  $S_w=34\%$ ,孔隙度为  $35\%$ ,采用的网格为  $10 \times 1 \times 2$ ,网格步长  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  分别为  $30 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m}$ 、 $5 \text{ m}$ ,原油物性相对渗透率曲线都取自华北蒙古林油田,开采时间从 2000 年 1 月 1 日开始。

进行可动凝胶驱时,开始时注入的可动凝胶体系主要进入高渗透层,进入低渗透层的较少。随着驱替的进行高渗透层可动凝胶体积增加渗流阻力也增大,流动速度减慢。低渗透层驱动力增强可动凝胶驱油调驱效应增大,大量的原油被驱走。驱替波及体积和驱油效率均比聚合物驱和水驱增大。从

结果可以看出,当水驱 1 600 天后含水率达  $80.7\%$  再进行可动凝胶驱油或聚合物驱油,可动凝胶、聚合物均可以比水驱提高采收率。对比结果表明采用可动凝胶驱最终采收率可比水驱提高  $13.39\%$ ,聚合物驱比水驱最终采收率也可比水驱提高  $7.41\%$ 。

## 5 结论

(1) 系统地建立了可动凝胶体系驱油渗流数学模型。充分反映了可动凝胶驱油过程中水、油、可动凝胶体系等相互作用与传输,质量的相互转换,以及水、油、可动凝胶流体流动、流体性质改变特点。

(2) 可动凝胶聚合物成胶前粘度随时间变化,具有触变性流体特征;成胶后可动凝胶聚合物粘度不随时间变化,表现为与聚合物相同的非牛顿流体特性。

(3) 可动凝胶体系从开始注入起,滞留量迅速增加,呈线性上升趋势。可动凝胶粘度随交联时间的增大粘度逐渐增大,在某一时间段内增加较快,当到达某一时间后粘度不再增加。表现为粘弹—触变性流变特征。

(4) 多孔介质对可动凝胶体系渗流特性产生影响,渗透率越低流动压力越高,流动阻力越大。在初始交联时间内可动凝胶由于交联粘度的增加和产生部分滞留,表现为随着时间的增加流动压力也增加,随后由于多孔介质的剪切作用和可动凝胶体系结构的稳定形成,可动凝胶体系粘度比粘度最大点降低,流动压力也开始回落。之后随流动的进行体系稳定压力趋于平稳。

### 参考文献:

- [1] 李彩虹,张玉亮,韩成林. 聚合物溶液流变模式研究[J]. 大庆石油地质与开发,1994,13(4):48-52.
- [2] 韩大匡 韩冬 杨普华,等. 胶态分散凝胶驱油技术的研究与进展[J]. 油田化学,1996,13(3): 273-276.
- [3] 卢拥军,方波,江体乾,等.CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液粘弹性与触变性的表征研究[J]. 天然气工业,25(7):78-8
- [4] 宋付权,刘慈群,张盛宗. 低渗透油藏中水平井的产能公式分析[J]. 大庆石油地质与开发,1999,18(3):33-35.
- [5] 苗和平,王鸿勋. 水平井压后产量预测及裂缝数优选[J]. 石油钻采工艺,1992,14(6):51-56.
- [6] 徐严波,齐桃,杨凤波,等. 压裂后水平井产能预测新模型[J]. 石油学报,2006,27(1):89-96.