

热—聚合物驱油研究

崔传智* 栾志安

(石油大学 华东)

摘要 对热力驱后的油藏,提出了用热—聚合物驱油的方法来提高其采收率。建立了一个三维三相四组分非等温渗流的数学模型。该模型考虑了溶剂驱替过程中的对流、扩散现象,对该模型中所涉及的主要参数提出了易于应用的数学表达式;采用有限差分法对模型进行了求解。在求解时对浓度和能量方程中的空间项采用了二阶精度的差分格式;对时间导数项中的非线性系数进行了拟线性处理,编制了相应的数值模拟软件。经算例验证,表明对热力驱后的油藏进行热—聚合物驱是可行的,能够取得较好的效果。

主题词 热—聚合物 稠油 数学模型 数值模拟 软件 提高采收率

1 前言

稠油在石油储量中占有较大的比例。对于稠油油藏,在采用热水驱或者蒸汽驱后,较高的油水粘度比使得采出程度较低。因此在热力驱后,仍有大部分的原油留在油藏中,此时若再进行一般的水驱,一般不能取得明显效果。稠油油藏一般埋藏较浅,其油层温度较低。

图1表示出了稠油的粘度随温度的变化曲线^[5],其中小方框内表示的是聚合物仍然可用的温度和粘度区间。该温度在70~110℃之间。在通常大约20℃的油藏温度下一些粘度为 10^4 mPa·s的重油在这个温度区间内其粘度只有(10~100) mPa·s。所以只要重油油藏加热到70~110℃,油的粘度就可以降低到聚合物可能起作用的数值。因此对这种稠油油藏可以采用热—聚合物驱。对热力驱后的油藏,如果油藏温度较低,进行热—聚合物驱是没问题的;如果油藏温度较高,但是在注入冷水段塞以后,经计算其前沿处的温度在80~110℃之间,仍处于聚合物驱可用的温度范围。

热—聚合物驱是一种较新的采油方法,文献中介绍的较少^[1,2,4,5],其数值模拟软件国内外也没有报道。因此本文对热—聚合物驱进行了研究,建立了一个三维三相四组分非等温渗流的数学模型,对数学模型中所涉及的主要参数提出了易于应用的数学表达式,编制了相应的数值模拟软件。经算例验证,表明对热力驱后的油藏进行热—聚合物驱是可行的,能够取得较好的效果。

2 数学模型

数学模型建立的假设条件为:(1)流体为油、水、气三相;水与聚合物溶液混溶,气可溶到油中;(2)水、油、气、聚合物四组份之间没有化学反应产生,各相间的平衡瞬时建立;(3)聚合物在孔隙介质表面上的吸附作用是瞬时完成的;(4)流体流动符合达西定律,流体、岩石均可压缩;(5)流体非等温流动;(6)考虑了扩散、吸附、重力、毛管压力等的影响。模型的建立过程如下。

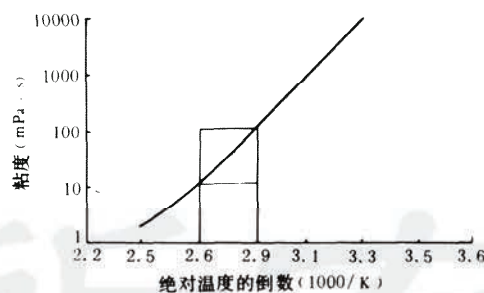


图1 不同温度下的稠油粘度

Fig.1 Oil viscosity at different temperature

* 崔传智,1993年毕业于石油大学(华东),1996年获硕士学位。现任石油大学(华东)石油工程系助教。通讯处:山东省东营市。邮政编码:257062。

2.1 物质平衡方程

对于 m 相 n 组份,其一般的物质平衡方程可表达为^[6,7,15]

$$\nabla \left\{ \sum_{j=1}^m [K_{eij} S_j / B_j \nabla C_{ij} - \vec{v}_j C_{ij} / B_j] \right\} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \left[\phi \sum_{j=1}^m S_j C_{ij} / B_j \right] + \phi \bar{C}_i \right\} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (1)$$

式中 K_{eij} 为组分 i 在 j 相中的扩散系数; C_{ij} 为组分 i 在 j 相中的浓度; \bar{C}_i 为组分 i 在岩石上的吸附浓度; B_j 为相 j 的体积系数; S_j 为相 j 的饱和度; \vec{v}_j 为相 j 的渗流速度; ϕ 为孔隙率。

由于聚合物只溶于水中,由方程(1)可得到聚合物组分的物质平衡方程

$$\nabla \{ K_p S_w / B_w \nabla C_p - \vec{v}_w C_p / B_w \} = \frac{\partial}{\partial t} [\bar{\Phi} (S_w C_p / B_w + \bar{C}_p)] \quad (2)$$

式中 K_p 为聚合物的扩散系数; C_p 为聚合物的浓度; \bar{C}_p 为聚合物的吸附浓度; $\bar{\Phi}$ 为聚合物可及孔隙度。

对于各相的物质平衡方程,对该相中各组分的物质平衡方程求和,即可获得

$$\text{油相、水相} \quad - \nabla (\vec{v}_j / B_j) = \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\Phi} S_j / B_j) \quad (j = o, w) \quad (3)$$

$$\text{气相} \quad - \nabla (\vec{v}_g / B_g + R_{so} \vec{v}_o / B_o) = \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\Phi} S_g / B_g + \bar{\Phi} R_{so} S_o / B_o) \quad (4)$$

式中 R_{so} 为溶解气油比。

2.2 能量守恒方程

对于注入的冷溶液或者热溶液,考虑顶底层的热损失,其能量守恒方程可以表达为^[4,16,17]

$$\begin{aligned} & \nabla \lambda_T \nabla T - \nabla \{ [C_w \rho_w \vec{v}_w + C_o \rho_o \vec{v}_o + C_g \rho_g \vec{v}_g] T \} - q_h - q_l \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \{ [\phi (C_w \rho_w S_w + C_o \rho_o S_o + C_g \rho_g S_g) + (1 - \phi) \rho_R C_R] T \} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 λ_T 为热传导系数; C_w, C_o, C_g, C_R 分别为水、油、气、岩石的比热; $\rho_w, \rho_o, \rho_g, \rho_R$ 分别为水、油、气、岩石的密度; q_h 为注入和采出的能量; q_l 为顶底层的热损失能量; T 为温度。

2.3 各相渗流速度

各相渗流速度由重力作用下的达西方程求得。

2.4 辅助方程

$$\text{饱和度方程} \quad S_o + S_w + S_g = 1.0 \quad (6)$$

$$\text{毛管压力方程} \quad p_{cow} = p_o - p_w, \quad p_{cgo} = p_g - p_o \quad (7)$$

以上所列出的就是要求解的数学模型,在该模型中要求解的未知数共有 $p_j, S_j (j = o, w, g), C_p, T$ 共八个;同时也有方程(2)~(7)共八个方程,因此,以上所建立的模型是封闭的,是可以求解的。

3 基本参数模型

3.1 水相粘度

提高水相的粘度是聚合物驱油的主要机理之一。水相粘度同时受到剪切速率,地层水矿化度等因素的影响^[8,9],其表达式可写为

$$\mu_p = \mu_w \left[1 + \alpha \left(\frac{r}{r_{\min}} \right)^{n-1} \left(\frac{C}{C_{\min}} \right)^m (a_1 C_p + a_2 C_p^2 + \dots) \right]$$

式中 μ_p 为聚合物水溶液粘度; μ_w 为纯水溶液的粘度; α 为包括生物降解, 化学降解等其它对聚合物溶液粘度的影响系数; r_{\min} 为最小剪切速率; C_{\min} 为最低矿化度; C_p 为聚合物溶液浓度; a_1, a_2 为方程系数; m 为矿化度指数; n 为剪切速率指数。 m, n 的求得及渗流速度和剪切速率之间的关系计算见文献 8。

3.2 油相粘度

油相粘度主要受温度的影响较大。在一般情况下油相粘度 μ_o 的对数与温度 T 基本上成一直线关系即 $\log \mu_o = \alpha T + \beta$, 其中 α, β 为方程系数。

在以上分析的液体粘度中, 都未考虑压力的影响。考虑到压力, 在实际计算时可根据实验测得的一组压力与粘度之间的关系数据回归成一条曲线, 或者直接进行插值求得在某一压力下的粘度值。

3.3 渗透率降低系数

聚合物溶液在驱油过程中通过滞留在孔隙中来降低渗透率。渗透率降低系数 R_k 一般与聚合物在多孔介质中的吸附量 C_{ad} 成线性关系, 在实际计算过程中可采用关系式^[8]

$$R_k = 1 + (R_{k\max} - 1) \frac{C_{ad}}{C_{adm}}$$

式中 $R_{k\max}, C_{adm}$ 分别为最大的渗透率降低系数和聚合物最大吸附量。

3.4 相对渗透率

图 2 表示了在不同温度下的相对渗透率曲线^[4], 其中 K_{ro1}, K_{rw1} 是在 27℃ 下测得的相对渗透率曲线, K_{ro2}, K_{rw2} 是在 90℃ 下测得的。由图中可看出, 温度上升时束缚水饱和度增加, 而残余油饱和度减少; 而且温度对油相的相对渗透率影响较大, 而对水相的相对渗透率影响较小。温度对相对渗透率曲线的影响在计算过程中可通过在不同温度下作出的相对渗透率曲线插值求得。

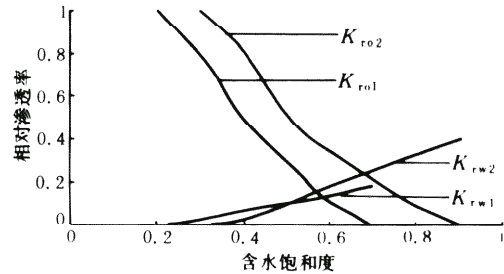


图 2 温度对油水相对渗透率曲线的影响

Fig. 2 The effect of temperature to relative permeability

3.5 不可及孔隙体积

不可及孔隙体积是指由于聚合物分子过粗, 无法进入的孔隙半径较小的那部分孔隙体积。由于不可及孔隙体积的存在, 加速了聚合物的流动。不可及孔隙体积受聚合物的分子量、介质的渗透率、孔隙度和孔隙大小分布情况等的影 响, 其大小可通过实验测得。不可及孔隙体积在极端情况下可达到总孔隙体积的 30%。由于不可及孔隙体积中往往被束缚水所填充, 所以不可及孔隙体积的存在对聚合物驱并无害处。

3.6 扩散系数

扩散系数与压力, 温度, 浓度, 岩石性质等有关。其表达式为^[14]

$$K_c = \frac{D_o}{F\phi} + 0.5u\sigma\delta_p, \left(\frac{u\sigma\delta_p}{d_o} < 50 \right) \quad (8)$$

式中 D_o 为分子扩散系数; F 为地层电阻率; u 为渗流速度; δ_p 为岩石颗粒直径; σ 为非均质系数, $\sigma > 1$, 对于典型的随机分布的岩石, $\sigma = 3.5$ 。

注意到式(8)右边第一项为分子扩散项, 第二项为对流扩散项。

3.7 吸附浓度

模型中的吸附项一般用吸附等温线来表示。本文采用了 Langmuir 型吸附等温线, 即 $C_a = \frac{a \cdot c}{1 + b \cdot c}$ 。式中 C_a 为吸附浓度, a, b 为系数, c 为聚合物的浓度。

4 数值求解

对聚合物驱油的数学模型,有差分法和有限元法两种解法^[7,10,15]。对上述的数学模型,采用了隐式求解压力,显式求解饱和度及浓度和温度的方法。具体求解方法和步骤如下。

(1)计算各相压力 由油、水、气三相的物质平衡方程求和消去饱和度项后得到关于油、水、气三相的压力方程,再由毛管压力方程可得到只含有油相压力的方程。对该压力方程采用有限差分法进行数值求解得到一线性代数方程组,对该方程组采用线性松弛迭代法进行求解得到各网格点的油相压力。由求得的油相压力及毛管压力可得出水相和气相的压力。

(2)计算各相饱和度 求得各相压力后,由油相和水相的物质平衡方程进行显示差分计算求得含油饱和度和含水饱和度。再由下式可得到含气饱和度

$$S_g = 1.0 - S_o - S_w$$

(3)计算各相渗流速度 渗流速度是一个很重要的参数,无论是在浓度方程还是在能量方程中都用到。此时所计算的是通过相邻两网格块之间的渗流量。

(4)浓度及温度计算 浓度方程和能量方程属于对流—扩散型方程,该类型方程在用有限差分法求解时产生较大的数值弥散^[3]。为减小弥散,本文应用了一种空间项为二阶精度的差分格式^[11~13],对时间导数项中的非线性系数进行了拟线性处理。

(5)各种参数计算 由求得的压力,饱和度,浓度及温度分布值重新计算各参数值。

(6)回到步骤(1),进行下一时间步计算。

5 实例分析

5.1 计算所用数据

在该算例中,模拟了稠油油藏一个五点法井组(一口注水井,四口生产井)在热力驱后再应用热—聚合物驱进行开采的例子。该油藏目前平均地层温度为50℃,在该温度下的平均粘度为200mPa·s,残余油饱和度为0.4。在这种情况下进行一般的水驱或者聚合物驱,原油几乎不可能采出来。本文利用热—聚合物驱进行了计算,计算中所用的粘温关系曲线见图1,相对渗透率曲线见图2,其它数据见表1。

表1 计算所用数据

Table 1 The data used in calculation

数 据 名 称	数 值	数 据 名 称	数 值
网格块数(横向 纵向)	11 11	聚合物性质:	
油藏长度 宽度 厚度(m)	220 220 6	水粘度方程系数	180 0 0
孔隙度(小数)	0.30	吸附等温线系数	0.12 0
渗透率(mda)	900	最大吸附量	0.1
残余油饱和度(小数)	0.40	剪切速率系数	1.0
油粘度(cp)	200	矿化度指数	0
水粘度(cp)	0.423	最大渗透率降低系数	4.0
平均地层温度(℃)	50	热力参数	
注入热水温度(℃)	90	油的比热[KCal/(kg·℃)]	0.45
日注量(t/d)	60	水的比热[KCal/(kg·℃)]	1.00

续表

数据名称	数值	数据名称	数值
第一段塞注入量(PV)	0.06	岩石比热[KCal/(kg·°C)]	0.20
第二段塞注入量(PV)	0.10	岩石密度(kg/m ³)	2.5
第三段塞注入量(PV)	0.04	传导系数[KCal/(m·d·°C)]	2.6

注: PV 为孔隙体积。

5.2 计算结果及分析

在计算过程中采用三级段塞的方式注入热—聚合物溶液:

第一段塞:注入量为 0.06PV,浓度为 0.2%,该段塞为前缘段塞;

第二段塞:注入量为 0.10PV,浓度为 0.15%,该段塞为主体段塞;

第三段塞:注入量为 0.04PV,浓度为 0.075%,该段塞为后置保护段塞;

后继续热水驱,至含水达到 98%时结束。

图 3 表示出了含水随时间的关系曲线。由图中可看出,热—聚合物溶液注入后在 100d 左右开始见效,含水开始下降。180d 时为见效的最佳时间,含水下降到 70%。此后含水开始上升,到 380d 左右含水达到 98%。在 100d 天与 380d 之间含水曲线形成了一个漏斗,这正是少采水多采油的见效时期。

图 4 和图 5 表示在注入完第一段塞和第二段塞后的含油饱和度分布情况,图中 p1,p2,p3,p4 表示四口生产井,p5 表示一口注水井。由图中可看出,在第二段塞注入完后,在注入井周围已经形成了一个富油带,在等值图 4 上表现值为 0.46 两条等值线。随注入量的增加,富油带不断向生产井移动,由等值图 5 中可看出,在注入完第二段塞后富油带的前缘已经到达生产井的附近,在热—聚合物驱后的油藏中可看出含油饱和度下降到了 0.2。由以上分析可看出,对该油藏采用热—聚合物驱是可行的,而且取得了较好的效果。

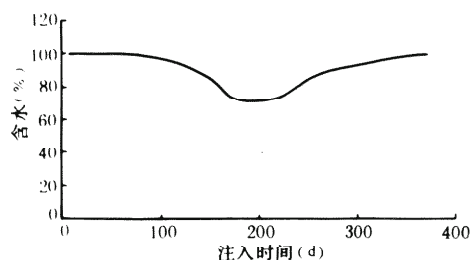


图 3 含水与时间关系曲线

Fig. 3 The relations between water cut and time

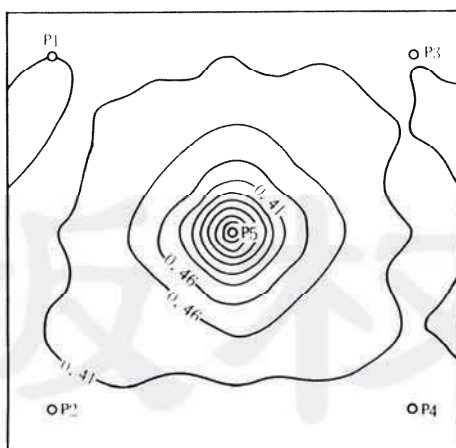


图 4 含油饱和度分布图(第一段塞完毕)

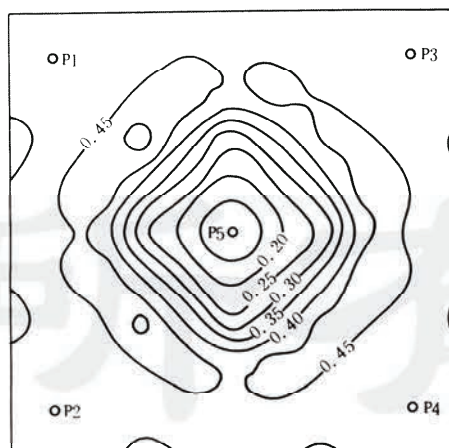
Fig. 4 The contour map of oil saturation
(after the first slug)

图 5 含油饱和度分布图(第二段塞完毕)

Fig. 5 The contour map of oil saturation
(after the second slug)

6 结 论

1. 建立了一个三维三相四组分非等温渗流的数学模型。该模型考虑了扩散, 吸附现象及各相粘度, 渗透率等在驱替过程中的变化。在用有限差分法求解中对浓度和能量方程中的空间项采用了二阶精度的差分格式, 对时间导数项中的非线性系数进行了拟线性化处理。编制了相应的数值模拟软件, 该软件适用于冷、热聚合物驱及一般的黑油水驱计算。

2. 对模型中所涉及的基本参数随压力, 温度和聚合物浓度的变化提出了较详细的数学表达式, 容易应用到数值模型中去。

3. 通过实例计算表明, 对热力驱后的油藏进行热—聚合物驱是可行的, 能够取得较好的效果。

参 考 文 献

- 1 L. W. 莱克. 提高石油采收率的科学基础. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- 2 日尔托夫著, 郭美云, 栾志安译. 油田开发. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- 3 D. W. 皮斯曼. 油藏数值模拟基础. 北京: 石油工业出版社, 1982.
- 4 J. 布尔热等. 热力法提高石油采收率. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- 5 洪世铎主编. 油藏物理基础. 北京: 石油工业出版社, 1982.
- 6 袁士义, Van Quy. N. 注化学剂驱油数值模拟(理论部分). 石油学报, 1988, (1).
- 7 袁士义. 聚合物地下交联调剖数学模型. 石油学报, 1991, (1).
- 8 王新海. 聚合物驱数值模拟主要参数的确定. 石油勘探与开发, 1990, (3).
- 9 汪新英. 孔隙介质聚合物溶液的粘弹性及流变性. 江汉石油学院学报, 1994, (4).
- 10 胡靖邦, 张子香等. 聚合物驱油数值模拟的有限元方法. 石油学报, 1991, (4).
- 11 Price H S, Cavendish J C. Numerical methods of high order accuracy for diffusion-convection equations. SPEJ, Sep., 1968, 293~302.
- 12 Laumbach D D. A higher-accuracy finite-difference technique for treating convection-diffusion equations. SPEJ, Dec., 1975, 517~531.
- 13 Narayan M. Chaudhair. An improved numerical technique for solving multidimensional miscible displacement equations. SPEJ, Sep., 1971, 277~284.
- 14 Perkins T K. A review of diffusion and dispersion in porous media. SPEJ, Mar., 1963, 70~85.
- 15 Hwi W. Bang, Ben H. Caudle. Modeling of a micellar/polymer process. SPEJ, Dec., 1984, 617~627.
- 16 Coats, K H. Simulation of steamflooding with distillation and solution gas. SPEJ Oct., 1976, 235~247.
- 17 Vinsome, P K W. A numerical description of hot-water and steam drives by finite-difference method. SPE 5248, 1974.

(本文收到日期 1996-05-27)

(修改稿收到日期 1996-12-30)

(编辑 杨 苗)

版权所有

A STUDY ON THERMAL-POLYMER DISPLACEMENT

Cui Chuazhi Luan Zhian

(Petroleum University, Huadong)

Abstract

A thermal-polymer displacement method is presented to used in the heavy-oil reservoirs which had been displaced by thermal method. A three-dimentional, three phases, four components, non-isothermal flow model has been formulated to simulate thermal-polymer process. The model incorporates process variables which include diffusion, adsorption, viscosity, relative permeability and so on. In solving this model with finite-different method, the space derivatives in concentration and energy equations are treated with a second-order approximation, and the non-linear coefficients are pseudo-linearized. The software is made to simulate the thermal-polymer process. This model was tested by an example and the results are satisfied. It is feasible to use thermal-polymer displacement in reservoirs which had been displaced by thermal method.

Key words thermal polymer heavy oil mathematical model numerical simulation software
EOR

《石油学报》获第二届中国科协 优秀科技期刊奖

经中国科协优秀科技期刊评选组评审,已正式公布最终结果,《石油学报》被评为中国科协优秀科技期刊,获得二等奖。

1997年4月28日下午,在中国科技馆隆重召开中国科协优秀科技期刊表彰会。国家科委、中国科协等主管部门领导出席了大会,作了重要讲话,并对获奖期刊单位颁发了“中国科协优秀科技期刊奖牌和荣誉证书”。

这次优秀科协期刊评比,是经评选组对科协主管的200多种科技期刊较长时间、多方面内容标准进行严格评审的结果,每四年举行一次。《石油学报》获得此荣誉来之不易的,是单位领导和编辑部同仁共同努力获得的成绩。在新的形势和要求下,对科技期刊要求更高,更需要提高刊物质量,增强精品意识和竞争意识。《石油学报》编辑部还需进一步总结经验,找出差距,争取获得更大的成绩。

(本刊编辑部)