

文章编号: 0253-2697(2008)06-0894-05

# 碱-聚合物复合驱油藏流线数值试井解释模型及其应用

姚军 吴明录 胡航

(中国石油大学石油工程学院 山东东营 257061)

**摘要:** 将流线法应用于碱-聚合物复合驱油藏,对生产和测试两个阶段分别建立了碱-聚合物复合驱油藏流线数值试井解释模型,该模型中不仅考虑了油藏非均质性、油水两相流、复杂井网、生产历史等因素的影响,还充分考虑了碱-聚合物复合驱过程中各种重要驱油机理和物化现象。采用流线方法求解该模型并用遗传算法进行试井自动拟合解释,得到了油藏参数,形成了适用于中、高含水期碱-聚合物复合驱油藏试井解释新方法。通过求解反五点井网碱-聚合物复合驱油藏典型模型,研究了复合驱油藏中测试井的压力响应特征。编制了流线数值试井解释软件,油田应用实例证明了软件及模型的实用性。

**关键词:** 碱-聚合物复合驱油藏;流线法;数值试井;解释模型;遗传算法;自动拟合;油藏参数

中图分类号: TE353.1

文献标识码: A

## Streamline numerical well-testing interpretation model for alkaline-polymer combination flooding reservoirs and its application

YAO Jun WU Minglu HU Hang

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** The streamline method was used to study the alkaline-polymer flooding reservoir. The streamline numerical well-testing interpretation models for production phase and testing phase were established respectively in alkaline-polymer combination flooding reservoirs. In the model, the main displacement mechanisms and physicochemical phenomena during alkaline-polymer combination flooding period were taken into consideration as well as the influence of some factors such as reservoir heterogeneity, water-oil two-phase flow, complex well pattern, producing history. The parameters of reservoir were obtained using well-testing auto-matching method based on genetic algorithm. A new well-testing interpretation method was proposed to be suitable for alkaline-polymer combination flooding reservoirs in medium-high water cut stage. The spiracle reservoir model was calculated for an ideal inverted five-spot alkaline-polymer combination flooding reservoir. The pressure response features of well-testing were investigated in alkaline-polymer combination flooding reservoir. Streamline numerical well-testing interpretation software was developed. The practicability of the software and the model was verified by application examples in some oilfields.

**Key words:** alkaline-polymer combination flooding reservoir; streamline method; numerical well-testing; interpretation model; genetic algorithm; automatic matching; reservoir parameter

目前国内外广泛使用的数值试井解释方法和软件都极少考虑化学驱问题,且都是基于对研究区域进行二维或三维网格划分,使用差分法、有限元法、边界元法和 Green 元法作为主要计算手段,其求解的速度和稳定性难以达到数值试井的要求。姚军、吴明录等<sup>[1]</sup>将流线技术应用于数值试井,建立了流线数值试井解释模型,将实际油藏的二维或三维问题转换为一系列沿着流线的一维问题并求解,形成了一套有别于现有的数值试井理论,具有计算速度快、稳定性高的特点。笔者在此基础上,将流线数值试井技术应用于碱-聚合物复合驱油藏,充分考虑了复合驱过程中各种

主要的驱油机理<sup>[2-8]</sup>和物化现象,基于一些假设条件<sup>[2-4]</sup>建立了碱-聚合物复合驱流线数值试井解释模型。

### 1 物理模型

碱-聚合物复合驱试井解释物理模型如下:油藏是等温的,瞬间建立相平衡;岩石和流体均不可压缩,多相渗流满足广义达西定律,弥散遵循广义 Fick 定律;流体由油水两相和 4 个拟组分组成,原油为黑油,油相中只有油组份,水相中含有淡水、碱、聚合物,各组分间不产生化学反应,但考虑各种化学损耗现象,

基金项目:中国石油天然气集团公司重点科技攻关项目(990507-04-03)“试井分析应用基础研究”部分成果。

作者简介:姚军,男,1964年3月生,1984年毕业于华东石油学院采油工程专业,2000年获中国石油大学(华东)油气田开发工程专业博士学位,现为中国石油大学(华东)石油工程学院院长、教授、博士生导师,主要从事油气田开发工程的教学与科研工作。E-mail:youcang@hdpu.edu.cn

如吸附、化学降解、离子交换及溶解反应等;忽略气相、微乳相的存在,忽略碱、聚合物的存在对水溶液质量守恒的影响;油水相对渗透率关系不随水相中组分的变化而变化;忽略重力和毛管力的影响;忽略离子交换和溶解反应对孔隙度和渗透率的影响。

## 2 物化参数及其描述

### 2.1 表面活性离子浓度

降低界面张力是碱驱提高采收率的主要机理,这是由于碱在一定条件下与石油中的酸性物质反应生成表面活性剂,降低了油水界面张力。所以,表面活性离子浓度  $c_A$  是表征界面张力的重要参数。其表达式为

$$c_A = \frac{c_{OH}^*}{1 + k/c_{HA_0}} \quad (1)$$

式中:  $c_A$  为表面活性离子的浓度, mol/L;  $c_{OH}^*$  为注入碱液的浓度, mol/L;  $c_{HA_0}$  为油酸组分浓度(对应于一种注入碱液的浓度为定值), mol/L;  $k$  为原油与碱之间的反应系数(对应于 pH 值一定的溶液,  $k$  为常数), mol/L。

### 2.2 残余油饱和度

由于界面张力的降低,使得残余油饱和度有不同程度的降低<sup>[8]</sup>,即

$$S_{or}(c_A) = a_1 + a_2 \cdot \exp\left(-\frac{c_A}{a_3}\right) \quad (2)$$

式中:  $S_{or}(c_A)$  为残余油饱和度;  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  为由实验确定的常数。

### 2.3 相对渗透率

残余油饱和度的变化必会引起相对渗透率曲线的变化,各相相对渗透率的表达式如下

$$K_{rw} = K_{rw}^0 S_w^{e_w} \quad (3)$$

$$K_{ro} = K_{ro}^0 (1 - S)^{e_o} \quad (4)$$

$$S = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{or}(c_A) - S_{wc}} \quad (5)$$

式中:  $K_{rw}^0$  和  $K_{ro}^0$  分别为水相和油相的相对渗透率曲线端点值,无因次;  $e_w$  和  $e_o$  分别为水相和油相相对渗透率的曲线指数,可在不同的残余油饱和度情况下进行修正,多采用线性插值<sup>[3-4]</sup>;  $S$  为归一化后的饱和度,小数;  $S_{wc}$  为束缚水饱和度,小数。

### 2.4 聚合物溶液的黏度

聚合物溶液的黏度由 Meter 和 Bird 方程确定,即

$$\mu_{wp} = \mu_w + \frac{\mu_0 - \mu_w}{1 + (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)^{1/2}} \quad (6)$$

式中:  $\mu_w$  为未加入聚合物时的水的黏度, mPa·s;  $\mu_0$  和  $\mu$  分别为零剪切速率下和无限大剪切速率下聚合物溶液的黏度, mPa·s;  $\dot{\gamma}_0$  为聚合物溶液黏度在零与无限剪切速率间  $1/2$  时对应的剪切速率(对应于一种

浓度,该值为定值),  $s^{-1}$ ;  $P$  为聚合物溶液黏度与剪切速率相关系数,对应于一定浓度的聚合物,  $P$  为常数。

### 2.5 聚合物的吸附

聚合物的吸附规律遵循 Langmuir 吸附等温式,即

$$c_p = \frac{ac_p}{1 + bc_p} \quad (7)$$

其中,  $a$  和  $b$  为由实验确定的常数。

### 2.6 渗透率下降系数

聚合物在多孔介质中渗流时,渗透率下降系数定义为水的有效渗透率与聚合物溶液的有效渗透率之比,其表达式如下

$$R_K = 1 + \frac{(R_{Kmax} - 1)dc_p}{1 + dc_p} \quad (8)$$

式中:  $R_{Kmax}$  为实验测得的渗透率降低的最大值,对应于某种特定的聚合物为常数;  $d$  为渗透率下降系数,对应于某种特定的聚合物为常数。

### 2.7 聚合物的可及孔隙体积分数

聚合物的可及孔隙体积分数计算式近似为

$$F_p = \phi_p / \phi \quad (9)$$

式中:  $\phi_p$  为聚合物可及孔隙度。

### 2.8 其他参数

在碱-聚合物复合驱替过程中,还考虑了以下参数:碱浓度折算和碱耗<sup>[2-3]</sup>;剪切速率的确定;阻力系数;残余阻力系数<sup>[4]</sup>。

## 3 碱-聚合物复合驱试井解释模型的建立及求解

### 3.1 生产历史阶段数学模型

油组分(油相)渗流方程为

$$\left[ \frac{K_{ro} K_{rw}}{\mu_0} P \right] + q_o = \frac{\partial(\phi_o S_o)}{\partial t} \quad (10)$$

淡水组分(水相)渗流方程为

$$\left[ \frac{K_{rw} K_{ro}}{R_K \mu_{wp}} P \right] + q_w = \frac{\partial(\phi_w S_w)}{\partial t} \quad (11)$$

碱组分传质扩散方程为

$$\begin{aligned} & \cdot (d_{OH} \phi S_w c_{OH}) - (c_{OH} v_w) - \phi_{OH} c_{OH} = \\ & \frac{\partial(\phi S_w c_{OH})}{\partial t} + \frac{K_a}{(1 + K_b c_{OH})^2} \frac{\partial[(1 - \phi) S_w c_{OH}]}{\partial t} \end{aligned} \quad (12)$$

聚合物组分对流扩散方程为

$$\begin{aligned} & \cdot (d_p \phi S_w c_p) - (c_p v_w) + \phi S_w R_p + q_w c_p = \\ & \frac{\partial(\phi S_w c_p)}{\partial t} + \frac{\partial[F_p R (1 - \phi) S_w c_p]}{\partial t} \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $K$  为绝对渗透率,  $\mu m^2$ ;  $K_{ro}$  和  $K_{rw}$  分别为油相和

水相相对渗透率,无因次; $p$ 为油藏压力, $10^{-1}$  MPa; $q_0$ 为以质量计的单位时间内单位地层体积的产油量, $g/(cm^3 \cdot s)$ ; $q_w$ 为以质量计的单位时间内单位地层体积的产(注)水量, $g/(cm^3 \cdot s)$ ; $S_o$ 和 $S_w$ 分别为油相和水相饱和度,小数; $t$ 为生产时间, $s$ ; $\mu_o$ 为油的黏度, $mPa \cdot s$ ; $R_K$ 为由聚合物引起的渗透率下降系数,小数; $\mu_{wp}$ 为聚合物溶液的黏度, $mPa \cdot s$ ; $\phi$ 为地层孔隙度; $\rho_o$ 和 $\rho_w$ 分别为地下原油和水的密度, $g/cm^3$ ; $d_{oH}$ 为碱组分的弥散系数, $cm^2/s$ ; $c_{oH}$ 为注入碱液的质量浓度, $g/g$ ; $v_w$ 为渗流速度, $cm/s$ ; $\alpha_H$ 为碱化学反应系数, $s^{-1}$ ; $K_a$ 为表征离子交换与吸附量的参数,小数; $K_b$ 为碱的吸附常数, $g/g$ ; $d_p$ 为聚合物组分的扩散系数,小数; $c_p$ 为注入聚合物的质量分数, $g/g$ ; $R_p$ 为单位岩石体积内聚合物组分生成或消耗的质量速率, $g/(cm^3 \cdot s)$ ; $c_p$ 为单位质量油砂体吸附的聚合物质量,小数; $F_p$ 为聚合物组分的可及孔隙体积分数,小数; $\rho_r$ 为岩石密度, $g/cm^3$ 。

将以上建立的数学模型加上边界条件、初始条件和碱-聚合物物化参数等,便构成了完整的生产历史阶段碱-聚合物复合驱试井解释模型。对该模型进行差分离散,并采用IMPES方法<sup>[9]</sup>进行求解,得到关井测试时刻网格系统的压力分布和流体饱和度分布。在此基础上采用Pollack提出的流线追踪方法<sup>[10]</sup>进行流线追踪,得到关井时刻测试区域的流线分布。将生产阶段求解得到的关井时刻的网格参数(主要指压力、流体、碱和聚合物浓度)采用传播时间法<sup>[1,4]</sup>转化到流线的每个节点中去,计算出相应各节点的流度值,并以此作为关井测试阶段试井解释模型的初始条件。

### 3.2 关井测试阶段数学模型

渗流控制方程:设由测试井发出的流线总数为 $N$ ,沿每条流线的渗流控制方程为<sup>[11]</sup>

$$\frac{1}{l_j} \frac{\partial}{\partial l_j} \left( l_j \frac{\partial p_j}{\partial l_j} \right) = \frac{\phi C_t}{t} \frac{\partial p_j}{\partial t} \quad (14)$$

式中: $l_j$ 为以测试井为起点沿第 $j$ 条流线的曲线距离, $cm$ ; $p_j$ 为第 $j$ 条流线上的压力值, $10^{-1}$  MPa; $\phi$ 为油藏的孔隙度,小数; $C_t$ 为总压缩系数, $10^{-1}$  MPa $^{-1}$ ; $t$ 为油水两相总流度, $\mu m^2/(mPa \cdot s)$ ; $j=1,2,\dots,N$ 。

初始条件为

$$p(l_j, t) |_{t=0} = p_i \quad (15)$$

$$S_w(l_j, t) |_{t=0} = S_{wi} \quad (16)$$

式中: $p_i$ 为初始压力(由生产历史阶段试井解释模型得到的关井时刻的压力), $10^{-1}$  MPa; $S_{wi}$ 为初始含水饱和度,小数。

内边界条件:模型内边界条件分生产井内边界条

件和注入井内边界条件两种情况,分别为

$$\left( l_j \frac{\partial p_j}{\partial l_j} \right)_{l_j=r_w} = - \frac{1}{2 h t} \left\{ q \cdot C \left[ \frac{dp_w}{dt} - S l_j \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial p_j}{\partial l_j} \right) \right] \right\} \quad (17)$$

$$\left( l_j \frac{\partial p_j}{\partial l_j} \right)_{l_j=r_w} = - \frac{1}{2 h t} \left\{ q + C \left[ \frac{dp_w}{dt} - S l_j \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial p_j}{\partial l_j} \right) \right] \right\} \quad (18)$$

式中: $p_w$ 为测试井井筒上的压力值, $10^{-1}$  MPa; $q$ 为测试井开井测试时的稳定产(注)量或关井测试前的稳定产(注)量, $cm^3/s$ ; $h$ 为测试井井点处的有效厚度, $cm$ ; $C$ 为井筒储集系数, $cm^3/(0.1 MPa)$ ; $S$ 为表皮系数,无因次; $r_w$ 为测试井井眼半径, $cm$ ; $r_w$ 为流线的终止端油(水)井井眼半径, $cm$ 。

外边界条件:流线试井解释模型的外边界即为流线的终止端,分流线到达另一口油水井和流线到达一个压力平衡区或封闭边界两种情况。

饱和度方程为<sup>[1,4]</sup>

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial f_w}{\partial} = 0 \quad (19)$$

式中: $t$ 为传播时间, $s$ ; $f_w$ 为含水率,小数。

碱浓度对流质扩散方程为

$$\frac{\partial \left[ \frac{K_a (1 - \phi) \phi^1 S_w c_{oH}}{(1 + K_b \cdot c_{oH})^2} \right]}{\partial t} + \frac{\partial (S_w c_{oH})}{\partial t} + \frac{\partial (c_{oH} f_w)}{\partial} = 0 \quad (20)$$

聚合物浓度扩散方程为<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial \left[ \frac{K_p R (1 - \phi) \phi^1 S_w c_p}{\partial t} \right]}{\partial t} + \frac{\partial (S_w c_p)}{\partial t} + \frac{\partial (c_p f_w)}{\partial} = 0 \quad (21)$$

由式(19) — 式(21)可以得到关井阶段每条流线上各个节点的饱和度和碱、聚合物浓度值,再加上碱-聚合物物化参数方程,即可求得渗流控制方程中各流线节点的流度值,同时对式(14) — 式(21)进行差分离散,得到下列形式的三对角方程

$$b_{j,i} p_{j,i+1}^{n+1} + c_{j,i} p_{j,i}^{n+1} + d_{j,i} p_{j,i-1}^{n+1} = g_{j,i} \quad (22)$$

式中: $b_{j,i}$ ,  $d_{j,i}$ ,  $c_{j,i}$ 和 $g_{j,i}$ 为离散系数; $i=1,2,\dots,N_{j,i}$ 。

对线性方程组(22)采用迭代法或追赶法<sup>[9]</sup>进行求解,可得到测试井关井后的理论压力响应;利用双种群遗传算法<sup>[11]</sup>对该压力响应和实测压力数据进行自动拟合,即可得到测试井控制区域的试井解释参数。

## 4 典型模型压力响应特征

根据聚合物的注入浓度对聚合物驱油藏流线数值试井解释模型压力响应的的影响特征<sup>[12]</sup>,建立了单层油

藏反五点井网典型模型,研究了碱的注入浓度对该模型压力响应的影响,比较了不同驱替类型(碱驱,聚合物驱,碱-聚合物复合驱)下的压力响应特征。

油藏及井的基础参数:油藏长度为 2 000 m,宽度为 1 500 m;油层有效厚度为 2 m;孔隙度为 0.2;渗透率为  $0.8 \mu\text{m}^2$ ;初始压力为 13.5 MPa;初始含油饱和度为 0.35;油和水的黏度分别为 45 mPa·s 和 0.45 mPa·s;油和水的密度分别为  $0.9 \text{ g/cm}^3$  和  $1 \text{ g/cm}^3$ ;生产井产量均为  $60 \text{ m}^3/\text{d}$ ;注入井注入量为  $300 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

碱和聚合物的主要物性参数:  $K_a = 0.3$ ;  $K_b = 50 \text{ g/g}$ ;  $F_p = 0.75$ ;  $R = 2.63 \text{ g/cm}^3$ ;  $k = 5$ ;  $a_1 = 0.05 \text{ mol/L}$ ;  $a_2 = 0.13 \text{ mol/L}$ ;  $a_3 = 1.18 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ ;  $P = 1$ ;  $P_{kmax} = 3$ 。

分别以注入碱浓度为 0、3 000 mg/L、6 000 mg/L、9 000 mg/L、12 000 mg/L 和 15 000 mg/L 进行碱驱 300 d 后对注入井关井,进行压力降落模拟,计算得到了压力和压力导数双对数曲线(图 1)。

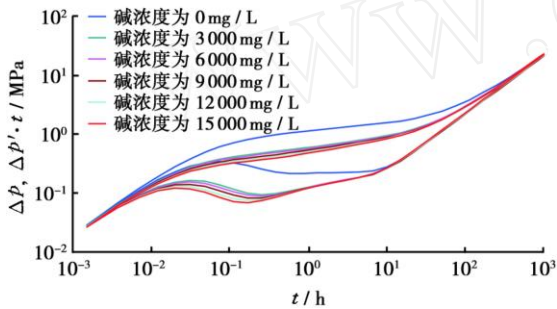


图 1 不同注入碱浓度下压力响应

Fig. 1 Pressure response at different injection alkali concentration

由图 1 可以发现:在不同的注入碱浓度下,注入碱浓度越大,压力导数曲线在中期段的高度越低。这是由于碱驱过程中,降低了油水界面张力,改变了残余油饱和度。在一定范围内注入碱浓度越大,流体的总流量越大。

分别以相同的工作制度进行碱驱(注入浓度为 6 000 mg/L)、聚合物驱(注入浓度为 1 500 mg/L)和复合驱(碱的注入浓度为 6 000 mg/L,聚合物的注入浓度为 1 500 mg/L)300 d 后,对注入井关井进行压力降落模拟计算,得到了不同驱替情况下的压力和压力导数双对数曲线(图 2)。

由图 2 可看出:在碱驱情况下,注入井附近,含油饱和度低,流体的总流量最大,因而压力导数曲线的高度最小;逐渐远离测试井,流体的总流量逐渐减小,压力导数曲线逐渐上扬。在聚合物驱情况下,压力导数曲线在径向流阶段以后开始出现下落,这是由于

压力响应经过聚合物区进入油区后总流量变大的缘故。

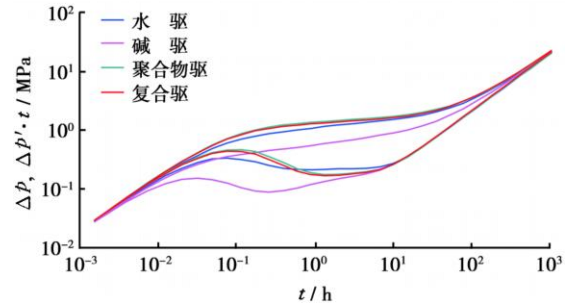


图 2 不同驱动方式下的压力响应对比

Fig. 2 Pressure response at different drive mode

由碱驱、聚合物驱和碱-聚合物复合驱时的压力响应曲线对比可以看出:碱-聚合物复合驱与聚合物驱相比在压力响应曲线上没有太大的差别,这是由于聚合物对流体流量的影响程度远大于碱,从而使聚合物掩盖了碱对压力响应的影响特征。

## 5 应用实例

根据以上研究,编制了流线数值试井解释软件,该软件在多个油田进行了矿场实际应用。在其中一个油田某区块应用的实例基础参数如下:油藏长为 800 m,宽为 600 m;油层有效厚度为 10 m;平均孔隙度为 0.3;初始地层压力为 21.5 MPa;初始含油饱和度为 0.35;地下原油和水的黏度分别为 9.7 mPa·s 和 0.4 mPa·s;地下原油和水的密度分别为  $0.86 \text{ g/cm}^3$  和  $1 \text{ g/cm}^3$ ;原油和水的体积系数分别为  $1.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$  和  $1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ;综合压缩系数为  $4.5 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。I9 和 I13 井为测试井,自 1999 年 3 月开始注入聚合物,2004 年 1 月开始注入碱溶液并继续注入聚合物。2006 年 7 月对这 2 口井关井进行压力降落测试,测试前的稳定注入量分别为  $91 \text{ m}^3/\text{d}$  和  $76 \text{ m}^3/\text{d}$ ,井眼半径均为 69.85 mm。

应用编制的流线数值试井解释软件,对该区块的生产历史进行了模拟计算,得到测试井关井前的压力分布(图 3)和饱和度分布。在此基础上进行了流线追踪,得到了测试时刻的流线分布(图 4),图中不同的颜色代表流线由不同的井发出。为了使流线形态趋于平滑,可以在原来的每个压力和饱和度网格内设加密的小网格,通过插值的方法得到小网格的压力和饱和度值,然后在小网格系统内进行流线追踪即可。沿着由测试井(I9、I13)发出的每条流线建立流线数值试井解释模型,求解该模型得到测试井的理论压力响应。应用双种群遗传算法对该理论压力响应与实测压力数据进行自动拟合(图 5),最终便得到试井解释参数和研究区块的渗透率分布(图 6)。

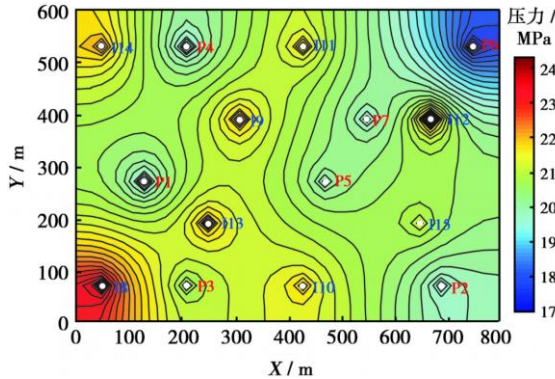


图3 测试时刻的压力分布

Fig. 3 Pressure distribution at the time of testing

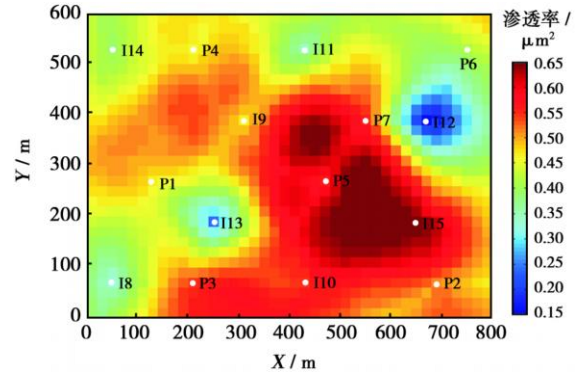


图6 渗透率分布解释结果

Fig. 6 Interpreted permeability distribution

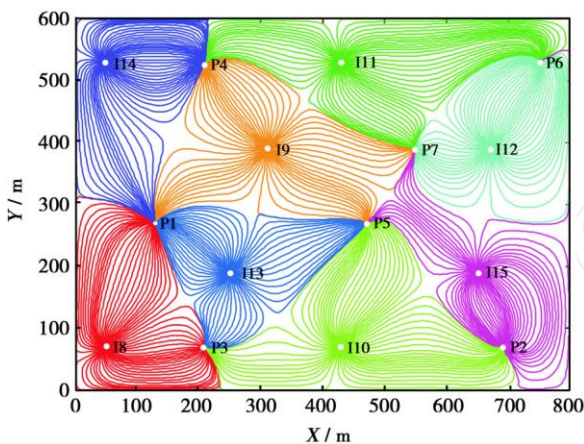
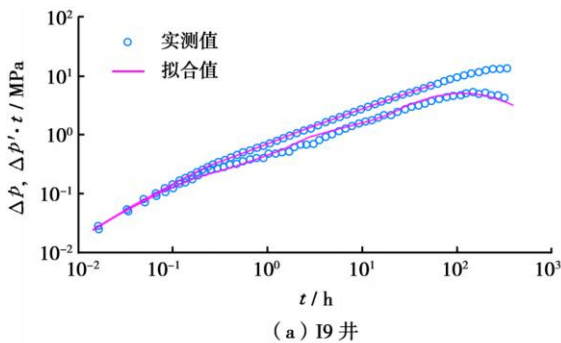
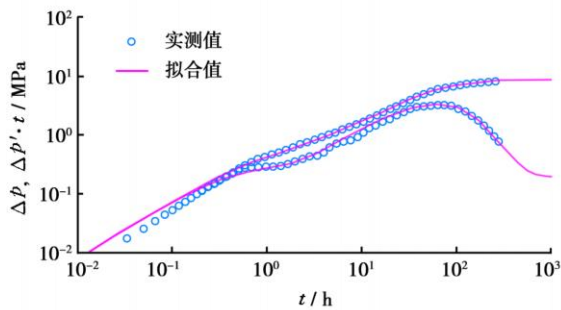


图4 测试时刻的流线分布

Fig. 4 Streamline distribution at the time of testing



(a) I9井



(b) I13井

图5 测试井自动拟合曲线

Fig. 5 Automatic matching curves of tested wells

## 6 结论

(1) 碱-聚合物复合驱流线数值试井解释模型中充分考虑了复合驱过程中各种主要的驱油机理和物化现象,能够反映生产历史、非均质性、油水两相流、复杂井网等因素的影响,采用流线方法对模型进行求解,具有较快的求解速度和较好的稳定性。

(2) 采用反五点井网研究了不同驱替类型的压力响应特征,得到了碱-聚合物二元复合驱油藏中测试井的压力响应特征:碱-聚合物二元复合驱与聚合物一元驱相比在压力响应曲线上没有太大的差别,这主要是由于聚合物对水溶液的影响程度大于碱,因而聚合物对压力响应的影响特征部分地掩盖了碱对压力响应的影响;对于其他形式井网中的测试井具有类似压力响应特征。

(3) 本研究均基于单重介质油藏类型,目前尚不能应用于天然裂缝性油藏类型。

(4) 编制了流线数值试井解释软件,并通过油田应用实例进一步验证了该方法及软件的实用性。

## 参考文献

[1] 姚军,吴明录,戴卫华,等. 流线数值试井解释模型[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 96-99.  
Yao Jun, Wu Minglu, Dai Weihua, et al. Streamline numerical well test interpretation model [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 96-99.

[2] 袁士义,杨普华. 碱复合驱数学模型[J]. 石油学报, 1994, 15(2): 76-87.  
Yuan Shiyi, Yang Puhua. A mathematical model of alkali combination flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(2): 76-87.

[3] Dezabala E F, Visloeky J M, Rubin E, et al. A chemical theory for linear alkaline flooding [J]. SPEJ, 1982, 22(2): 245-258.

[4] 吴明录,姚军. 聚合物驱流线数值试井解释模型及其应用[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(2): 55-58.

(下转第 902 页)

- [4] 唐金星,陈铁龙,何劲松,等. 聚合物驱相对渗透率曲线实验研究[J]. 石油学报, 1997, 18(1): 81-84.  
Tang Jinxing, Chen Tielong, He Jinsong, et al. An experimental study on relative permeability curves of polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(1): 81-84.
- [5] Sorbie K S, Parker A, Clifford P J. Experimental and theoretical study of polymer flow in porous media[R]. SPE 14231, 1987.
- [6] 徐建平,王连泽,朱克勤. 聚合物驱油藏浓度分布与变化[J]. 清华大学学报, 2002, 45(4): 455-457.  
Xu Jianping, Wang Lianze, Zhu Keqin. Concentration distribution and variation in a polymer-flooding reservoir[J]. Journal of Tsinghua University, 2002, 45(4): 455-457.
- [7] 朱怀江,罗健辉,隋新光,等. 新型聚合物溶液的微观结构研究[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 79-83.  
Zhu Huaijiang, Luo Jianhui, Sui Xinguang, et al. Microstructure of novel polymer solution used for oil displacement[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 79-83.
- [8] 张继成,宋考平,邓庆军. 聚驱开发指标计算数学模型的建立与应用[J]. 钻采工艺, 2003, 26(1): 27-29.  
Zhang Jicheng, Song Kaoping, Deng Qingjun. Mathematical model for calculating production indexes of polymer flooding and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2003, 26(1): 27-29.
- [9] Han D K, Yang C Z, Zhang Z Q. Recent development of enhanced oil recovery in China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, 22(1/3): 181-188.
- [10] Zaitoun A, Kohler N. Two-phase flow through porous media: effect of an adsorbed polymer solution[R]. SPE 18085, 1988.

(收稿日期 2008-01-15 改回日期 2008-05-12 编辑 黄小娟)

### (上接第 898 页)

- Wu Minglu, Yao Jun. A streamline-based polymer flooding numerical well testing interpretation model and applications[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(2): 55-58.
- [5] 侯健. 用流线方法模拟碱/表面活性剂/聚合物三元复合驱[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(1): 58-62.  
Hou Jian. Simulation of alkaline-surfactant-polymer flooding with streamline method[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2004, 28(1): 58-62.
- [6] 王德民,程杰成,吴军政,等. 聚合物驱油技术在大庆油田的应用[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 74-78.  
Wang Demin, Cheng Jiecheng, Wu Junzheng, et al. Application of polymer flooding technology in Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 74-78.
- [7] 王刚,王德民,夏惠芬,等. 聚合物驱后用甜菜碱型表面活性剂提高驱油效率机理研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 86-90.  
Wang Gang, Wang Demin, Xia Huifen, et al. Mechanism for enhancing oil-displacement efficiency by betaine surfactant after polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 86-90.
- [8] Delshad M, Delshad M, Bhuyan D, et al. Effect of capillary number on the residual saturation of a three-phase micellar solution [R]. SPE 14911, 1986.
- [9] 韩大匡,陈钦雷,闫存章. 油藏数值模拟基础[M]. 北京:石油工业出版社, 1993: 91-104.  
Han Dakuang, Chen Qinlei, Yan Cunzhang. Reservoir simulation basis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 91-104.
- [10] Pollock D W. Semianalytical computation of path lines for finite-difference models[J]. Ground Water, 1988, 26(6): 743-750.
- [11] 吴明录,姚军,王子胜,等. 利用双种群遗传算法进行数值试井自动拟合[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(2): 81-83.  
Wu Minglu, Yao Jun, Wang Zisheng, et al. Numerical well testing auto-matching applying double population genetic algorithm[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(2): 81-83.
- [12] 张德志,姚军. 聚合物驱两相流试井参数敏感性[J]. 计算物理, 2006, 23(4): 425-430.  
Zhang Dezhi, Yao Jun. Sensitivity of testing parameters of a two phase well with polymer flooding[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2006, 23(4): 425-430.

(收稿日期 2008-01-14 改回日期 2008-06-05 编辑 黄小娟)