

[文章编号] 1001-246X(2006)04-0425-06

# 聚合物驱两相流试井参数敏感性

张德志<sup>1,2</sup>, 姚 军<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中石化胜利油田 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

[摘 要] 考虑油水两相、生产历史、油藏平面非均质性、井筒储存和表皮效应等因素, 建立了生产历史阶段聚合物驱数学模型和不稳定试井阶段的流线模型, 用流管法对解释模型进行了数值求解. 研究表明: 随着油水粘度比的增大, 压力及压力导数曲线向上平移, 随着生产时间的增加, 储层的有效渗透率降低, 当高渗透条带沿主流线方向分布时, 注水井压降导数曲线反映不出油水前缘的影响, 而随着聚合物注入浓度的增大, 压力导数曲线下凹出现的越来越早.

[关键词] 聚合物驱; 两相流试井; 流线模型; 数值试井

[中图分类号] TE353 [文献标识码] A

## 0 引言

近年来,胜利油田及国内其它主力油田都已进入高含水开发阶段,通过聚合物驱可提高采收率,而目前广泛使用的现代试井方法都是基于单相流问题的解析解. 上世纪90年代以来,有学者进行了数值试井研究. 对多相流试井解释方法,国外有适合油水两相流试井问题的 Perrine-Martin<sup>[1,2]</sup>方法,适合油气两相流试井问题的压力平方法<sup>[3,4]</sup>和 Raghavan 等<sup>[5,6]</sup>的拟压力法. 国内刘立明等<sup>[7]</sup>采用 PEBI 网格构建了油水两相流的数值试井模型,叶继根等<sup>[8]</sup>建立了三维三相部分隐式自隐式修正的组分模型,胡勇<sup>[9]</sup>建立了气水两相井筒—地层组合数学模型并用数值方法进行了求解. 对聚合物驱油藏试井,梁继德、褚英鑫等<sup>[10-13]</sup>研究了非牛顿幂律流体均质、复合等各种油藏模型下的解析解,而聚合物驱多相流试井理论尚未建立.

## 1 生产历史阶段聚合物驱两相流试井解释模型

### 1.1 物理模型

等温驱替过程,多相渗流满足广义达西定律,弥散遵循广义 Fick 定律;流体由油水两相和三个拟组分组成,油相中只有油组分,水相中有淡水、聚合物两个组分;忽略聚合物对水溶液质量守恒的影响,数学方程中直接使用质量浓度;油水相对渗透率关系不随水相中组分的变化而变化,聚合物溶液只降低水相渗透率.

### 1.2 数学模型

油组分(油相)渗流方程

$$\left[ \frac{KK_o}{B_o \mu_o} (p_o - o_g D) \right] + q_{vo} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi S_o}{B_o} \right), \quad (1)$$

淡水组分(水相)渗流方程

$$\left[ \frac{KK_w}{B_w R_k \mu_{wp}} (p_w - w_g D) \right] + q_{vw} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi S_w}{B_w} \right), \quad (2)$$

聚合物组分对流扩散方程

$$(d_p \phi S_w - c_p) - (c_p v_w) + \phi S_w R_p + q_{wv} - w c_p = \frac{\partial (\phi S_w c_p)}{\partial t} + \frac{\partial (L F_p - R (1 - \phi) S_w \hat{c}_p)}{\partial t}, \quad (3)$$

[收稿日期] 2005-10-19; [修回日期] 2006-01-17

[基金项目] 中国石化科技攻关项目(P01043)资助项目

[作者简介] 张德志(1963-),男,山东莱州,高级工程师,博士生,从事试井理论研究和资料解释工作,山东东营聊城路3号胜利油田地科院 257015.

式中,下标  $o, w, p, R$  分别表示油相、水相、聚合物和岩石;  $K$  为绝对渗透率 ( $\mu\text{m}^2$ );  $K_{rj}$  ( $j = o, w$ ) 为相对渗透率;  $\mu_o, \mu_{wp}$  分别为原油和聚合物溶液粘度 ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ );  $p_j$  ( $j = o, w$ ) 为压力 ( $\text{MPa}$ );  $S_j$  ( $j = o, w$ ) 为饱和度 (%);  $B_j$  ( $j = o, w$ ) 为体积系数, 小数;  $R_k$  为渗透率降低系数;  $\rho_j$  ( $j = o, w, R$ ) 为密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $q_{vj}$  ( $j = o, w$ ) 为单位体积的质量流量;  $g$  为重力加速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $D$  为流体质点距海平面标高 ( $\text{m}$ );  $d_p$  为聚合物组分的扩散系数;  $c_p$  为聚合物的体积浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $v_w$  为渗流速度;  $R_p$  为单位岩石体积内聚合物组分生成或消耗的质量速率;  $\epsilon_p$  为聚合物组分的吸附质量分数;  $F_p$  为聚合物组分的可及空隙体积分数.

### 1.3 流线模型

不考虑流体和岩石的压缩性,将上面给出的聚合物驱数学模型进行简化,然后进行坐标转换,得到沿流线的一维水相饱和度方程和聚合物组分质量守恒方程

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial f_{wp}}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \left[ F_p R \left( \frac{1 - \phi}{\phi} \right) S_w \epsilon_p \right]}{\partial t} + \frac{\partial (S_w c_p)}{\partial t} + \frac{\partial (c_p f_{wp})}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

式中  $f_{wp}$  为水相分流量;  $t$  为沿流线运移所需的时间.

对以上方程进行离散,在时间上取一阶向前差分,空间上取一阶中心差分,采用 IMPES 方法先在网格系统中隐式求出压力,再沿着流线显式求解饱和度方程和浓度方程.

## 2 不稳定试井阶段两相流试井流线模型的建立及求解

在试井初期由于尚未受到边界等影响,因此流动基本上呈径向流,其影响范围主要为近井地带;在试井后期则基本按照定型的流线流动,影响范围扩大.根据这种变化特征,认为测试过程流线分布不变.

### 2.1 流线模型

忽略重力和毛管压力,测试井的井筒储存系数为  $C$ ,表皮系数为  $S$ ,  $N$  为测试井周围的流线条数,沿流线得到如下数学模型:

渗流方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( B \frac{\partial p_j}{\partial l} \right) = \left( \frac{\phi C_i}{t} \right) \frac{\partial p_j}{\partial t}, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

式中  $t = KK_o/\mu_o + KK_w/\mu_w$  为总流度;  $C_i$  为总压缩系数;  $B$  为流管的截面积,沿流管是变化的;  $l$  为流线的曲线坐标,曲线坐标系的原点定义为测试井位置;  $p_j$  为第  $j$  条流线上的压力值.

初始条件:沿每条流线的饱和度分布和压力分布均已知,由生产历史阶段水驱或聚合物驱两相流试井解释模型求得.

内边界条件:对生产井和注入井进行关井试井可分为两种情况:

生产井的内边界条件

$$\left[ B_j \frac{\partial p_j}{\partial l} \right]_{l=r_w} - \frac{24C}{N_j} \frac{dp_{wi}}{dt} = \frac{q_j}{2}, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

$$p_{wj} = p_{jl} + S \frac{q_j}{2} \left[ l \frac{\partial p_j}{\partial l} \right]_{l=r_w}, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

$$p_w = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{wj}; \quad (9)$$

注水井的内边界条件

$$- \left[ B_j \frac{\partial p_j}{\partial l} \right]_{l=r_w} - \frac{24C}{N_j} \frac{dp_{wi}}{dt} = \frac{q_w}{2}, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

式中  $\theta_j$  为第  $j$  条流线的角度,  $B_j$  为流管的宽度,  $p_{jl}$  表示第  $j$  条流线在井壁上的压力值,  $p_{wj}$  为第  $j$  条流线的井底压力,  $p_w$  为测试井的井底压力.

外边界条件:流线的边界即为流线的终止端.流线的终止存在两种情况,一是流线到达另一口油水井;二是流线到达一个压力平衡区或封闭边界,即压力梯度  $p = 0$ .

饱和度方程和聚合物浓度方程与生产历史阶段相同.

### 2.2 模型求解<sup>[14-16]</sup>

采用流管法求解模型,首先追踪流线,然后判断注入井和产出井周围的流管条数、流管的发出井和终止井,最后追踪每一条流管,求取流管的截面积.

#### 2.2.1 流线追踪方法

对选定区域进行直角网格划分,根据实际油藏资料,将渗流模型进行有限差分离散,采用 IMPES 方法求解得到压力场和饱和度场,进而计算出每个网格界面上的速度分量.

从注入井到生产井跟踪流线的算法基于 Pollock 提出的计算流线在一个网格内路径的解析描述,假设每个坐标方向上的速度场线性变化且与其他方向上的速度无关,该方法的优点在于它是解析的并满足物质平衡方程.

在图 1 所示的二维网格中,已知真实渗流速度场,并确定了局部坐标系和原点,通过比较  $X, Y$  方向的时间  $t_{e,x}, t_{e,y}$  确定流线出来的方向,流线出口的确切位置

$$x_e = x_0 + \frac{1}{m_x} (V_{x,i} \exp\{m_x t_e\} - V_{x,o}), \quad (11)$$

$$y_e = y_0 + \frac{1}{m_y} (V_{y,i} \exp\{m_y t_e\} - V_{y,o}), \quad (12)$$

$V_x, V_y, m_x, m_y$  分别为  $X, Y$  方向的速度和速度梯度.

#### 2.2.2 流管追踪方法

定义流管为两条流线间的区域,使用流管的优势在于将二维问题转化为一维问题求解.

在流管追踪过程中,读出该时刻注入井的流线数据,判断该注入井到各个生产井的流线;将生产井分为  $M$  组,每组有  $N_i$  条流线,共有  $M(N_i - 1)$  条流管;每组中相邻的两条流线确定一条流管,由流线节点少的那一条流线向另一条流线搜寻流管截面积;按流线节点少的一条流线上的节点开始,搜寻另一条流线上的所有节点与该节点距离最短的为该节点出流管的截面积,追踪完一条流管后,将数据写入数据文件.

#### 2.2.3 数值求解

将上面建立的流线模型沿流管进行离散,同时对不同的内、外边界条件离散,得到一个三对角矩阵方程,对所有的流线进行计算,得到井底压力

$$p_{wj}^{n+1} = p_{wl}^{n+1} + S \frac{i}{2} \frac{p_{il}^{n+1} - p_{il}^{n+1}}{l_2 - l_1}, \quad (13)$$

$$p_w^{n+1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{wj}^{n+1}, \quad (14)$$

得到该时步流管上的压力响应以后,不断重复计算就可以得到理论压力响应.

## 3 参数敏感性分析

### 3.1 油水粘度比对压力响应的影响

图 2 反映了油水两相流动时,不同的油水粘度比对试井压力响应的影响,图中给出了油水粘度比为 5, 10, 20 倍时的双对数曲线.可以很明显的看出,随着油水粘度比的增大,压力和压力导数曲线向上平移,说明储层的有效渗透率减小;而压力导数曲线的下凹,则是周围注水井形成的拟定压边界的影响,但随着油水粘度比的增大,压力导数曲线下凹出现的越来越晚,周围水井形成的拟定压边界离生产井越来越近;之后是外部封闭边界(模拟油藏范围:630 m × 630 m,五点井网)对测试井产生影响,从而导致压力导数曲线上翘.

### 3.2 生产历史对压力响应的影响

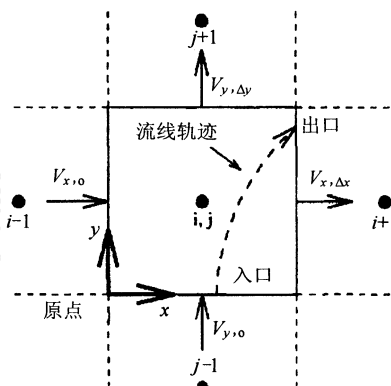


图 1 流线追踪示意图

Fig. 1 Sketch map of streamline tracing

图 3 是油水两相流动时,生产历史对试井压力响应的影响,图中给出了生产时间为 30 天和 60 天时的双对数曲线,随着生产时间的增加储层有效渗透率降低,压力导数曲线后期上翘为边界影响的结果(模拟油藏范围:210 m × 210 m,五点井网).

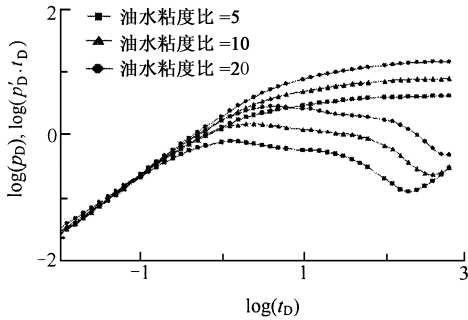


图 2 不同油水粘度比双对数曲线

Fig. 2 The log-log curves with different water/oil viscosity ratio

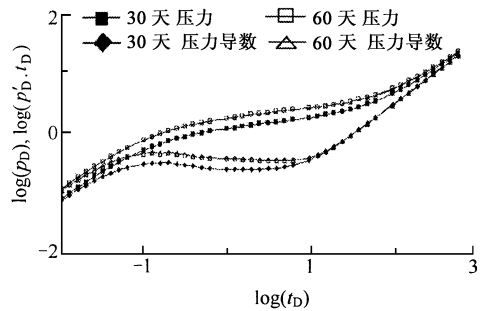


图 3 不同生产历史双对数曲线

Fig. 3 The log-log curves with different production history

### 3.3 不同井网形式

分别研究了油水两相流时反九点井网系统、反四点井网系统、反五点井网系统和九点井网系统、四点井网系统、五点井网系统以及排状井网系统开采情况下,试井压力响应的特征曲线.不同井网形式下的压力响应特征曲线差别很大,但规律基本一致:对于水井随着含油饱和度的上升导数曲线上翘(图 4),上翘的最高点为油水前缘;对于油井随着含水饱和度的上升导数曲线下滑(图 5),下凹的最低点为油水前缘.后期曲线的上翘都是外边界的影响.

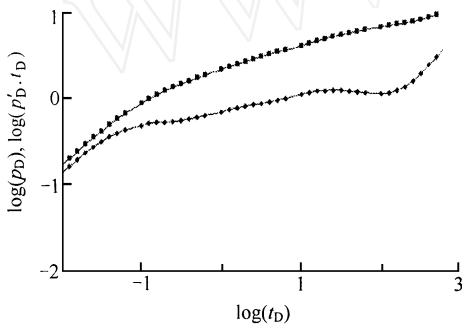


图 4 反九点井网水并压降双对数图

Fig. 4 Drawdown log-log curves of inverted nine-spot pattern

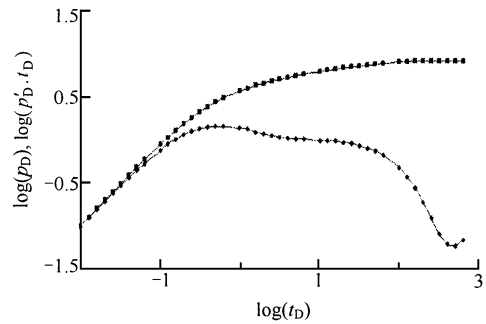


图 5 九点井网油并压降双对数图

Fig. 5 Drawdown log-log curves of nine-spot pattern

### 3.4 高渗透条带对压力响应的影响

在油水井两点 and 五点式井网情况下,分别研究了高渗透条带(高低渗透率比值大于 10)沿油水井主流线方向、在油水井间呈 S 型区域、垂直于油水井主流线方向三种方式对压力响应的影响.

当油水井之间沿主流线方向有一个高渗透条带,则油井试井的压力响应如图 6 所示,与均质油藏压力响应不同,压力与压力导数曲线均呈上扬趋势.原因是高渗透条带的存在使得压力波沿着高渗透条带传播比其他区域更快,压力降落更快.在高渗透条带影响区域(时间在 1 ~ 2 对数周期),压力导数曲线呈现上升趋势,在油水两相区域(时间在 2.4 ~ 2.9 对数周期),压力导数曲线呈现下凹.

当大孔道沿油水井主流线方向呈 S 型分布时,在大孔道影响区域压力导数曲线呈现凸起,在油水两相区域压力导数曲线呈现下凹.当大孔道沿垂直于油水井主流线方向分布时,压力导数曲线与不存在大孔道情况下基本一致,其流线形式也没有发生很大的变化.

### 3.5 聚合物驱对压力响应的影响

在五点式井网系统,分别考虑了聚合物初始注入浓度、注聚结束后注水时间以及聚合物驱高渗透条带对压力响应的影响.

#### 3.5.1 初始注入浓度影响

图 7 是聚合物浓度分别为 500, 1 250, 2 000 mg L<sup>-1</sup> 时生产井压降试井的压力与压力导数曲线.图中压力

导数曲线的明显下凹是周围注水井形成的拟定压边界影响,随着聚合物注入浓度的增大,意味着周围水井形成的拟定压边界离生产井越来越近(推进速度越快),导致压力导数曲线下凹出现的越来越早。

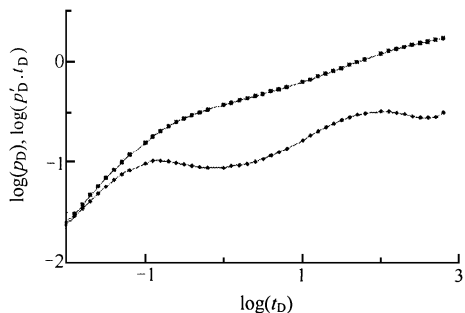


图 6 高渗透条带沿主流线方向的双对数图

Fig. 6 Effect of high permeable zone along main streamline

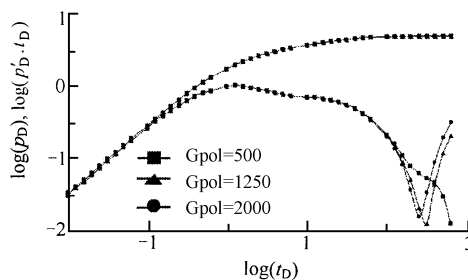


图 7 不同聚合物初始注入浓度的双对数图

Fig. 7 Effect of early polymer inject concentration

### 3.5.2 注聚结束后注水时间的影响

研究了聚合物初始浓度为  $1500 \text{ mg L}^{-1}$ ,持续注入 30 天后,又进行水驱 30 天、60 天、90 天、120 天的注水井压降试井的压力响应特征.从图 8 中可以看出,与单相流注水井试井曲线相比,在聚合物段塞区域(时间在  $0 \sim 1$  对数周期)导数曲线有明显的上升趋势,这是由于在该区域聚合物溶液提高了水相粘度,导致油水粘度比降低,使得压力降低变化更大,导数曲线呈现上升趋势;而接近于油水前缘时,导数曲线达到上翘的最高点,也就是水井形成拟定压边界的影响;随着水驱时间的增加,压力和压力导数曲线平行下移,但随着水驱时间逐渐变长其变化越来越不明显,说明此时聚合物的影响越来越小。

### 3.5.3 聚合物驱高渗透条带的影响

对五点井网系统下高渗透条带的三种分布形式进行了研究.当高渗透条带沿主流线方向分布时,与单相流水井压降试井曲线相比,聚合物驱试井的压力导数曲线一直呈上升趋势(图 9).曲线早期的上升是聚合物溶液粘度提高的影响,随后的导数曲线上升,则是由于聚合物沿着主流线方向上的高渗透条带发生聚窜,油水前缘所形成的拟定压边界影响消失,最后导数曲线呈上升趋势是由于封闭外边界造成的结果。

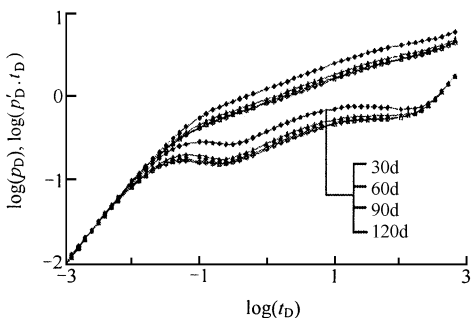


图 8 注聚结束后不同时间的双对数曲线

Fig. 8 Effect of the time after injection polymer

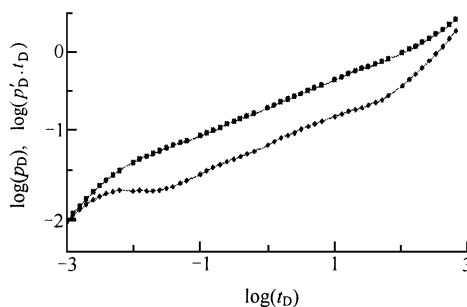


图 9 高渗透条带对聚合物驱的影响

Fig. 9 Effect of high permeable zone to polymer flooding

## 4 结束语

提出了聚合物驱两相流的试井解释模型,给出了模型的流管数值求解方法.随着油水粘度比的增大,压力导数曲线下凹出现的越来越晚,周围水井形成的拟定压边界离生产井越来越近;随着聚合物注入浓度的增大,压力导数曲线下凹出现的越来越早,而随着注水时间的增长,聚合物的影响逐渐变小;不同的生产历史、不同的井网形式以及不同的高渗透条带分布都对测试井的压力响应有明显的影响。

## [参 考 文 献]

- [ 1 ] Perrine R L. Analysis of pressure build-up curve[M]. Drill and Prod Prac ,1956.
- [ 2 ] Martin J C. Simplified equation of flow in gas drive reservoirs and the theoretical foundation of multiphase pressure and buildup analysis [J]. Trans AIME , 1959 ,**216** :309 - 311.
- [ 3 ] Al-Khalifa A J , Aziz K, Horne R N. A new approach to multiphase well test analysis[R]. Paper SPE16743 , Presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition ,27 - 30 Septeber ,Dallas ,Texas ,1987.
- [ 4 ] Al-Khalifa A J , Saudi Aramco , Horne R N ,et al. Multiphase pressure and pressure squared methods [ R ]. Paper SPE 18803 , Presented at SPE California Regional Meeting ,5 - 7 April , Bakersfield , California , 1989
- [ 5 ] Raghavan R. Well test analysis: wells producing by solution gas drive[J]. SPE Journal , SPE5588 , 1976 ,**16**(8) :196 - 208.
- [ 6 ] Raghavan R. Well-test analysis for multiphase flow[J]. Journal SPE Formation Evaluation , 1989 ,**4**(4) :585 - 594.
- [ 7 ] Liu Liming ,Chen Qinlei ,Wang Guanghui. Construction of numerical pressure drop models for oilwater flow [J]. Journal of the University of Petroleum , China (Edition of Natural Science) ,2001 ,**25**(2) :42 - 45.
- [ 8 ] Ye Jigen ,Wu Xianghong. Software development and application of compositional model with three phase and 3D for oil/gas reservoir[J]. Chinese J Comput Phys ,2000 ,**17**(5) :548 - 552.
- [ 9 ] Hu Yong ,Zhong Bing ,Yang Yahe ,et al. Establishment and solution of well test numerical model for gaswater two-phase wellbore/formation combination[J]. Chinese J Natural Gas Industry , 2000 ,**20**(6) :66 - 69.
- [ 10 ] Liang Jide ,Sun Xiaojun ,Yan Shu ,et al. Analysis of practical transient testing curves for a well in a polymer flooding reservoir [J]. Chinese J Well Testing ,1999 ,**8**(1) :26 - 30.
- [ 11 ] Liu Zejun ,Sun Zhi ,Song Kaoping. Interpretive models for non-Newtonian seepage flow well testing in bounded formations[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing ,China , 1996 ,**15**(3) :63 - 66.
- [ 12 ] Song Kaoping ,Zhu Junfeng ,Liu Zejun. Well test analysis for a compound reservoir with non-Newtonian power law fluids flow[J]. Chinese J ACTA PETROLEI SINICA ,1997 ,**18**(2) :78 - 83.
- [ 13 ] Zhu Yingxin ,Song Kaoping ,Yang Erlong ,et al. Formation pressure computing method under non-Newtonian fluids flow[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute , China , 2002 ,**26**(4) :39 - 42.
- [ 14 ] Martin J C ,Wegner R E. Numerical solution of multiphase ,two dimensional incompressible flow using streamtube relationships[J]. SPE Journal , SPE7410 ,1979 ,**19**(10) :313 - 323.
- [ 15 ] Batycky R P. A three-dimensional two-phase scale streamline simulator [D]. The Department of Petroleum Engineering And The Committee on Graduate Studies ,Stanford University ,1997.
- [ 16 ] Emanuel A S , Milliken W J. The application of streamtube techniques to full field waterflood simulation[J]. Journal SPE Reservoir Engineering. SPE30758 , 1997 ,**12**(3) :211 - 218.

## Sensitivity of Testing Parameters of a Two Phase Well with Polymer Flooding

ZHANG De-zhi<sup>1,2</sup> , YAO Jun<sup>1</sup>

(1. China University of Petroleum , Dongying 257061 , China ; 2. Shengli Oilfield of SINOPEC , Dongying 257015 , China)

**Abstract:** Considering factors as two-phase of oil and water , production history , areal heterogeneity of the reservoir , wellbore storativity and skin , we establish a mathematical well testing model with polymer flooding in producing period and a streamline model for unsteady well testing. Numerical solutions are gained by a streamtube method. It shows that the pressure derivative curve moves upward with the increase of the ratio of oil/water viscosity. The effective permeability of formation decreases with an increase of production time. The effect of wateroil front cannot be reflected from the derivative curve in the water well drawdown log-log plot when a high permeable zone is distributed along the main streamline. The concave in derivative curve appears earlier with the increase of concentration of polymer injected.

**Key words:** polymer flooding ; two phase well testing ; streamline model ; numerical well test