

试井与开采

聚合物驱流线数值试井解释模型及其应用

吴明录 姚 军

(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 东营 257061)

摘 要:针对生产和关井两个阶段分别建立了考虑复杂因素影响聚合物驱流线数值试井解释模型,两个阶段均考虑了油藏非均质性、聚合物驱、油水两相流、多井等因素的影响。该流线试井解释模型采用最新的流线方法进行一维求解,具有更高的求解速度和稳定性,同时它比现有模型更加接近于油藏真实环境,具有更高的现场实用性。

关键词:聚合物溶液;试井解释;非均质;多相流动;数学模型

中图分类号: TE353 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2007)02-0055-04

1 生产阶段聚合物驱试井解释模型

1.1 基本假设

为建立生产阶段聚合物驱试井解释物理模型,作以下基本假设^[1-2]:1) 储层非均质;2) 流体由油水两相和三个拟组分组成,油相中只有油组分,水相中含有淡水、聚合物两个组分,油水两相之间不存在质量交换;3) 聚合物驱为等温过程;4) 多相渗流满足广义达西定律,聚合物弥散遵循广义 Fick 定律;5) 忽略聚合物的存在对水溶液质量守恒的影响;6) 油水相对渗透率关系不随水相中组分的变化而变化;7) 聚合物溶液只降低水相渗透率。

1.2 数学模型

1.2.1 渗流控制方程

油组分(油相)渗流方程为:

$$\nabla \left[\frac{K K_{ro}}{B_o \mu_o} \nabla (p_o - \rho_o g D) \right] + q_{vo} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_o}{B_o} \right) \quad (1)$$

淡水组分(水相)渗流方程为:

$$\nabla \left[\frac{K K_{rw}}{B_w R_k \mu_{wp}} \nabla (p_w - \rho_w g D) \right] + q_{vw} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (2)$$

聚合物组分对流扩散方程为:

$$\nabla (d_p \phi S_w \nabla c_p) - \nabla (c_p v_w) + \phi S_w R_p + q_{vw} v_w c_p = \frac{\partial (\phi S_w c_p)}{\partial t} + \frac{\partial [F_p R (1 - \phi) S_w \hat{c}_p]}{\partial t} \quad (3)$$

1.2.2 辅助方程和初始条件

1) 辅助方程为:

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

$$p_{cow} = p_o - p_w \quad (5)$$

2) 初始条件为:

$$p_o|_{t=0} = p_{oi} \quad (6)$$

$$S_w|_{t=0} = S_{wi} \quad (7)$$

1.2.3 边界条件

1) 外边界条件。

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right| = 0 \quad \text{封闭外边界} \quad (8)$$

$$p| = p_c \quad \text{定压外边界} \quad (9)$$

2) 内边界条件。

若为定产条件,则在井点所在网格差分方程中直接加上产量项;若为定压条件,则可由给定的井底流压和井点所在网格节点压力来表示:

$$q_l = J_1 (p_{i,j} - p_{wf}) \quad (10)$$

式(1)~(10)中, K 为绝对渗透率, μm^2 ; K_{ro} 、 K_{rw} 分别为油、水相相对渗透率,无量纲; p_o 、 p_w 、 p_c 、 p_{oi} 分别为油相压力、水相压力、毛管压力和初始油相压力, 10^{-1}MPa ; q_w 为注水(产水)量, cm^3/s ; q_o 为地下产油量, cm^3/s ; S_o 、 S_w 、 S_{wi} 分别为油、水相饱和度和初始水饱和度,无量纲; t 为时间, s ; μ_o 、 μ_w 为油、水的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; ϕ 为地层孔隙度,无量纲; ρ_o 、 ρ_w 为地下条件下油、水的密度, g/cm^3 ; q_l 为生产井地下产液量, cm^3/s ; $p_{i,j}$ 、 p_{wf} 分别为测试井所在网格的压力和井底流动压力, 10^{-1}MPa ; J_1 为采液指数, $\text{cm}^3/(10^{-1}\text{MPa}\cdot\text{s})$; d_p 为聚合物组分的扩散系数,小数;

收稿日期: 2006-07-12; 改回日期: 2006-09-24

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

作者简介: 吴明录(1978-), 男, 山东省临朐人, 2004年毕业于西安石油大学油气田开发工程专业, 获工学硕士学位, 在读博士研究生。

联系电话: (0546) 7878515

c_p 为聚合物的质量浓度, g/cm^3 ; 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, $g/(cm^3 \cdot s)$; ϵ_p 为聚合物组分的吸附质量分数(单位质量油砂吸附的聚合物质量), 小数; F_p 为聚合物组分的可及孔隙体积分数, 小数; ρ 为岩石密度, g/cm^3 ; q_{wv} 为井的产出或注入量, cm^3/s 。

1. 2. 4 聚合物物化参数方程

1. 2. 4. 1 聚合物溶液的粘度

聚合物溶液是一种非牛顿流体, 它的粘度是剪切速率的函数, 粘度大小与聚合物溶液的浓度、溶液的矿化度及聚合物溶液所受的剪切有关, 聚合物溶液的粘度与剪切率的关系由 Meter 和 Bird 方程给出:

$$\mu_p = \mu_w + \frac{\mu_0 - \mu}{1 + (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_{1/2})^p} \quad (11)$$

式中, μ_p 为聚合物在某剪切速率下的粘度, $mPa \cdot s$; μ_w 为未加入聚合物时的水的粘度, $mPa \cdot s$; μ_0 为零剪切速率下聚合物溶液的粘度, $mPa \cdot s$; μ 为无限大剪切速率下的粘度, 近似等于水的粘度, $mPa \cdot s$; $\dot{\gamma}_{1/2}$ 为聚合物溶液粘度在零与无限剪切速率间一半时对应的剪切速率, 对应于一种浓度, 该值为定值, s^{-1} ; p 为聚合物溶液粘度与剪切速率相关系数, 对于一定浓度的聚合物, 其为常数。

1. 2. 4. 2 聚合物的吸附

聚合物在通过多孔介质时会吸附在岩石表面, 此处认为其吸附是不可逆的, 并且瞬间达到平衡, 吸附规律遵循 Langmuir 吸附等温式, 即:

$$c_p^* = \frac{ac_p}{1 + bc_p} \quad (12)$$

式中, c_p^* 为聚合物的吸附浓度, g/cm^3 ; c_p 为聚合物质量浓度, g/cm^3 ; a 和 b 为由试验确定的常数。

1. 2. 4. 3 渗透率下降系数

聚合物在多孔介质中渗流时, 渗透率降低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。渗透率降低的通用关系式为:

$$R_K = 1 + \frac{(R_{Kmax} - 1) dc_p}{1 + dc_p} \quad (13)$$

式中, R_K 为由聚合物引起的渗透率下降系数, 小数; R_{Kmax} 为试验测得的渗透率降低的最大值, 对应于一种聚合物, R_{Kmax} 为常数; d 为渗透率下降系数, 对应于一种聚合物, 其为常数。

1. 2. 4. 4 阻力系数和残余阻力系数

阻力系数 R_F 表示水通过多孔介质时的流度与聚合物溶液通过时的流度之比:

$$R_F = \frac{w}{p} = \frac{K_w \mu_p}{K_p \mu_w} = R_K \frac{\mu_p}{\mu_w} \quad (14)$$

式中, K_w 和 K_p 分别为水和聚合物的渗透率, μm^2 。

残余阻力系数主要是由于聚合物等的吸附造成的, 它表示聚合物溶液通过前后水的流度之比:

$$R_{RF} = \frac{w_i}{w_a} \quad (15)$$

式中, R_{RF} 为残余阻力系数; w_i 为聚合物溶液通过前水的流度; w_a 为聚合物溶液通过后水的流度。

1. 2. 4. 5 聚合物的不可及孔隙体积

由于聚合物不能到达比聚合物更小的孔隙空间, 这种不能到达的孔隙空间就称为不可及孔隙体积。聚合物不能进入的孔隙空间主要有: 孔隙半径小所导致聚合物体系不能进入的孔隙体积; 聚合物堵塞的孔隙体积; 在岩石表面吸附滞留后占有的水动力学体积。不可及孔隙体积的大小受聚合物的分子结构、孔隙的大小、孔喉半径、渗透率、液体流变性、盐的浓度等因素影响, 用公式近似描述为:

$$V_{IP} = (\phi - \phi_p) / \phi \quad (16)$$

式中, V_{IP} 为不可及孔隙体积, 小数; ϕ_p 为岩石对聚合物和凝胶的孔隙度, 小数。

式(1) ~ (16) 联立, 便组成了完整的生产阶段聚合物驱多相流试井解释模型。

2 关井阶段聚合物驱试井解释模型

2.1 基本假设

考虑以下基本假设建立关井阶段聚合物驱试井解释物理模型: 1) 考虑生产阶段开发历史造成的油藏内压力、流体饱和度及聚合物浓度等的非均匀分布影响; 2) 由于在测试井关井之后, 地层内的流体仍在流动, 因此考虑关井后流体饱和度的继续传播和聚合物的弥散, 饱和度的传播遵循广义达西定律, 聚合物的弥散遵循广义 Fick 定律; 3) 考虑测试井的污染和井筒储存效应。其余假设条件与生产阶段相同。

2.2 数学模型

建立关井阶段聚合物驱试井解释模型的主要步骤如下: 首先, 对生产阶段数学模型, 进行差分离散并采用隐式压力显式饱和度方法 (IMPES)^[3] 进行求解, 得到关井时刻网格系统的压力分布和流体饱和度分布。在此压力分布和流体饱和度分布基础上, 采用 Pollock 流线追踪方法^[4] 进行流线追踪, 得到关井时刻渗流区域的流线分布。将生产阶段求解得到的关井时刻的网格参数 (主要指压力、流体和聚合物浓度) 采用传播时间 (time of flight, TOF) 的方法^[5-7] 转化到流线的每个节点中去, 依此作为关井阶



段试井解释数学模型的初始条件,并计算出相对应流线各节点的流度值。最后,沿测试井发出的每条流线建立关井阶段的试井解释模型。

2.2.1 渗流控制方程

设由测试井发出的流线总数为 N ,则沿每条流线的渗流控制方程($j = 1, 2, \dots, N$)为^[6]:

$$\frac{1}{l_j} \frac{\partial}{\partial l_j} \left(l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right) = \frac{\phi C_t}{\tau} \frac{\partial p_i}{\partial t} \quad (17)$$

式中, l_j 为沿第 j 条流线的曲线坐标,曲线坐标系的原点定义为测试井位置,cm; p_i 为第 j 条流线上的压力值, 10^{-1} MPa; C_t 为总压缩系数, $(10^{-1} \text{MPa})^{-1}$; τ 为油水两相总流度。

2.2.2 饱和度传播方程和聚合物浓度扩散方程

饱和度传播方程为^[2,5-7]:

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial f_w}{\partial t} = 0 \quad (18)$$

式中, t 为传播时间,s; f_w 为含水率,小数;

聚合物浓度扩散方程为:

$$\frac{\partial \left[F_i R \frac{(1-\phi)}{\phi} S_w c_i \right]}{\partial t} + \frac{\partial (S_w C)}{\partial t} + \frac{\partial (C f_{wp})}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

由式(18)~(19)可以得到关井阶段每条流线上各个节点的饱和度和聚合物浓度值,再加上聚合物物化参数方程,即可求得渗流控制方程中各流线上节点的流度值。

2.2.3 内边界条件

生产井内边界条件为($j = 1, 2, \dots, N$):

$$\left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} = - \frac{1}{2 h \tau} (q - C \frac{d p_{wf}}{d t}) \quad (20)$$

$$p_{wf} = p_w - S \left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} \quad (21)$$

式(20)~(21)可合写为:

$$\left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} = - \frac{1}{2 h \tau} \left\{ q - C \left[\frac{d p_w}{d t} - S l_j \frac{d}{d t} \left(\frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right) \right] \right\} \quad (22)$$

注水井内边界条件为($j = 1, 2, \dots, N$):

$$\left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} = - \frac{1}{2 h \tau} (q_w + C \frac{d p_{wf}}{d t}) \quad (23)$$

$$p_{wf} = p_w - S \left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} \quad (24)$$

式中, p_w 为测试井井筒上的压力值,也是每条流线上第一个节点的压力值, 10^{-1} MPa; h 为地层厚度,cm; C 为井筒储存系数, $\text{cm}^3 / (10^{-1} \text{MPa})$; S 为表皮系数,无量纲; 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。

2.2.4 外边界条件和初始条件

流线试井解释模型的外边界,即流线的终止端,其外边界条件分为两种情况:一是流线到达另一口油水井;另一种情况是流线到达油藏的定压边界,这两种情况下的外边界条件与常规试井解释模型的外边界条件类似。

初始条件为:

$$p(l_j, t) |_{t=0} = p_i \quad (25)$$

$$S_w(l_j, t) |_{t=0} = S_{wi} \quad (26)$$

式中, p_i 为初始压力(由求解生产阶段的试井解释模型得到的关井时刻的压力), 10^{-1} MPa。

可采用迭代法或追赶法^[1,3]对式(17)~(26)进行求解得到测试井关井后的理论压力响应,利用遗传算法对该压力响应和实测压力数据进行自动拟合即可得到试井解释结果。

3 应用实例

为了验证模型的正确性和可靠性,取某油田的一个测试实例进行验证。某油田对一口注水井 W9 井关井进行了压力降落测试,同一时期对油井 O7 井进行了压力恢复测试。应用上述试井解释模型对由这两口测试井发出的流线建立联立方程组进行求解得到测试井的理论压力响应,并利用遗传算法^[8-10]通过自动调整测试井控制区域网格块的渗透率值使之与测试井实测数据进行自动拟合,最终得到了解释后测试井控制区域的渗透率分布。

图 1、图 2 分别为由注水井和生产井作为流线的起点追踪得到的测试井关井时刻的流线。表 1 为基本试井解释参数,图 3、图 4 分别为注水井 W9 井和油井 O7 井的试井拟合曲线,图 5 为由 W9 井和 O7 井综合解释得到的整个渗流区域的渗透率分布。

表 1 试井解释结果

井名	渗透率/ μm^2	表皮系数	井储系数/ $\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$	地层系数/ $\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$
W9	0.75	3.03	1.91	12.4
O7	0.80	2.14	5.47	13.6

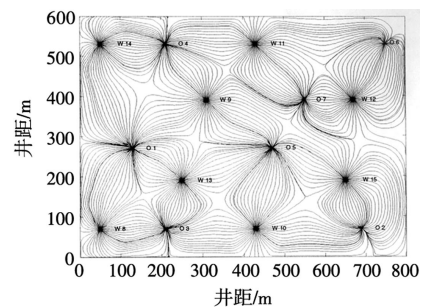


图 1 由注水井追踪得到的流线

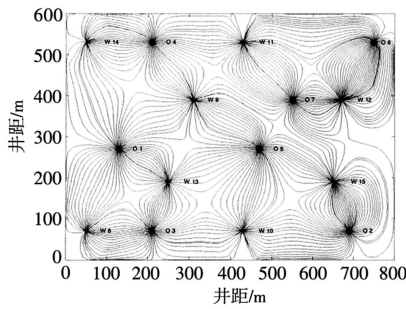


图2 由油井追踪得到的流线

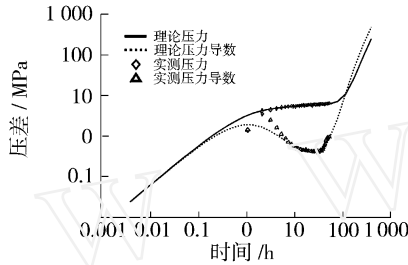


图3 注水井 W9 井自动拟合曲线

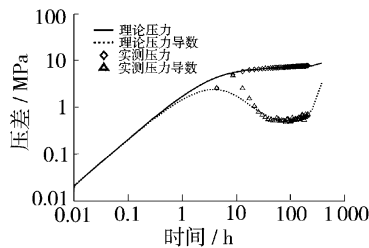


图4 油井 O7 井自动拟合曲线

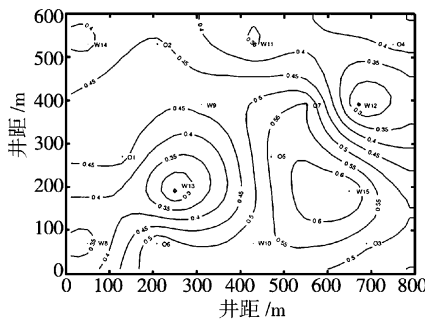


图5 试井解释后的渗透率分布

4 结论

1) 考虑生产历史、油藏非均质性、聚合物驱、油水两相流、多井干扰等因素的影响,建立了聚合物驱流线数值试井解释模型,比现有模型更接近于油藏开发实际。

2) 通过对流线数值试井解释模型的应用发现,由于对该模型的求解是一维的,因而求解速度快、稳定性好。

3) 油田应用实例说明了流线数值试井解释模型的可行性。

参考文献

- [1] 刘慧卿. 油藏数值模拟方法专题[M]. 山东东营:石油大学出版社,2001:80-102.
- [2] 朱玉国. 具有高渗透条带的水驱和聚合物驱油藏试井解释方法研究[D]. 山东东营:石油大学(华东)石油工程学院,2004.
- [3] 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.
- [4] Batycky R P. A three-dimensional two-phase scale streamline simulator[D]. USA: Department of Petroleum Engineering, Stanford University,1997.
- [5] Pollock D W. Semianalytical computation of path lines for finite-difference models[J]. Ground Water, 1988,26(6):743-750.
- [6] 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.
- [7] 姚军. 数值试井理论研究[D]. 山东东营:石油大学(华东)石油工程学院,2000.
- [8] 刘铮. 利用遗传算法推断渗透率分布[D]. 山东东营:石油大学(华东)石油工程学院,2001.
- [9] 吴晓东,师俊峰,竺彪. 循环热体开采稠油优化设计方法研究[J]. 石油钻探技术,2006,34(6):1-3.
- [10] 张德志,姚军,王友启. 聚合物驱油藏数值试井解释方法研究[J]. 石油钻探技术,2006,34(3):71-74.

[审稿 吴晓东]

A Streamline-Based Polymer Flooding Numerical Well Testing Interpretation Model and Applications

Wu Minglu Yao Jun

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

Abstract: Considering influence of complex factors, two streamline-based polymer flooding numerical well test interpretation models for production and shut-in periods were established. Reservoir heterogeneity, polymer flooding, oil/water two phase flow, and multi-well were all considered in two models. The streamline-based numerical well test interpretation models, using the updated streamline method to solve the one-dimensional problem, have higher speed in solving the problem and stability. These models are close to the actual reservoir condition than current models and better in filed application.

Key words: polymer solution; well test interpretation; heterogeneity; multiphase flow; mathematical model