

◀油藏与开采▶

应用流线数值试井方法研究聚合物驱油藏剩余油分布

吴明录¹ 姚军¹ 黎锡瑜² 赵春旭²

(1. 中国石油大学(华东) 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 河南油田分公司 石油勘探开发研究院, 河南 南阳 473132)

摘要: 针对常规试井解释理论与方法所存在的不足, 将流线数值模拟方法引入试井解释理论, 基于油藏真实地质模型建立了考虑油藏非均质性、多相流、多层次合采、复杂井网以及生产历史等复杂影响因素的多层次油藏聚合物驱流线数值试井解释模型, 采用流线方法求解该模型和遗传算法进行试井参数自动拟合解释得到剩余油分布, 形成了适用于中高含水期聚合物驱油藏应用试井资料研究剩余油分布的新方法。编制了实用的流线数值试井解释软件, 并在双河油田437断块进行了矿场应用, 应用结果表明, 该方法具有可行性, 该软件具有实用性。

关键词: 油藏数值模拟; 聚合物驱; 剩余油; 渗流模型; 数学模型

中图分类号: TE327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2009)03-0095-04

正确评价已开发油藏的剩余油分布是科学、合理制订提高采收率方案的基础, 利用试井资料确定剩余油分布是一种简便、经济、可靠的实用方法。随着国内外大多数油田进入中期和后期开发阶段, 油藏所呈现出的复杂流动特征(储层非均质、多相流、多井相互干扰等)已无法用基于对理想模型(储层均质、单相流、流体均匀分布, 或以测试井为圆心的圆环状分布、油藏等厚等)解析求解的常规试井和现代试井方法进行解释, 导致矿场上大量的测试资料没有充分利用。而在常规油藏数值模拟基础上发展起来的基于二维或三维网格划分的一般数值试井解释方法, 虽然能够考虑多种复杂影响因素, 但由于其网格划分的局限性和复杂性, 求解精度和速度难以同时满足数值试井自动拟合解释的需要。为此, 笔者提出了基于油藏真实地质模型, 能考虑复杂因素影响的聚合物驱流线数值试井解释模型, 形成了利用试井资料确定剩余油分布的新方法。

1 技术路线

数值试井要基于油藏真实地质模型, 考虑更多的地质和开发因素, 包括: 非均质、复杂边界、生产历史、多相流动、多层次合采合注、井网和井型、污染系数、井储系数等。对于聚合物驱, 还有聚合物浓度、段塞等, 如此复杂的渗流模型快速求解是关键, 为此, 采用聚合物驱流线数值试井解释模型。该模型包括生产和测试两个阶段的数学模型: 前者主要用

于模拟生产历史过程, 以求得测试井测试时刻的压力分布、饱和度分布和聚合物浓度分布等, 采用聚合物模型, 采用流线法进行求解; 后者主要用于模拟测试井在测试阶段的压力变化, 以求得测试井的理论压力响应, 结合遗传算法^[1]进行数值试井自动拟合解释, 以求得试井解释参数和剩余油分布。采用流线模型的总体技术路线见图1。

2 生产阶段的渗流数学模型

2.1 数学模型的建立

生产阶段的模型采用多层聚合物驱模型^[2-4], 其建立基于以下基本假设: 1) 流体由油水两相和三个组分组成, 油相中只有油组分, 水相中含有水和聚合物两个组分; 2) 油藏中的岩石和流体均不可压缩; 3) 渗流满足广义达西定律, 弥散遵循广义 Fick 定律; 4) 聚合物溶液只降低水相渗透率; 5) 油水相对渗透率关系不随水相中组分的变化而变化; 6) 忽略聚合物的存在对水溶液质量守恒的影响; 7) 不考虑重力

收稿日期: 2008-09-05; **改回日期:** 2009-01-09

基金项目: 中国博士后科学基金项目“水平井压力测试数值解释方法”(编号: 20080431219)资助

作者简介: 吴明录(1978—), 男, 山东潍坊人, 2001年毕业于西安石油学院机械设计与制造专业, 2007年获中国石油大学(华东)油气田开发工程专业博士学位, 主要从事数值试井和油藏数值模拟方面的研究工作。

联系电话: (0546)7878515

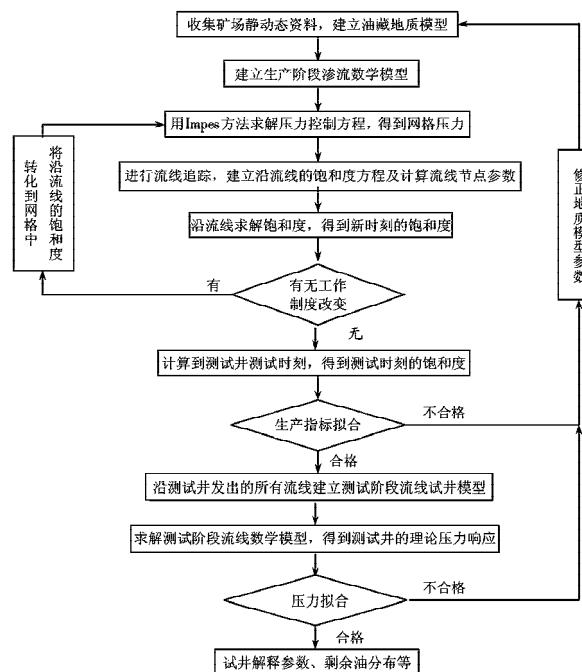


图 1 流线数值试井方法研究剩余油分布技术路线

和毛管力的影响。

则油组分(油相)渗流方程为:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\rho_o K K_{ro}}{\mu_o} \nabla p_o \right) + q_o = \frac{\partial (\phi \rho_o S_o)}{\partial t} \quad (1)$$

淡水组分(水相)渗流方程为:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\rho_w K K_{rw}}{\mu_w} \nabla p_w \right) + q_w = \frac{\partial (\phi \rho_w S_w)}{\partial t} \quad (2)$$

聚合物组分对流扩散方程为:

$$\nabla \cdot (d_p \phi S_w \nabla c_p) - \nabla (c v_w) + \phi S_w R_p + q_w \rho_w c_p =$$

$$\frac{\partial (\phi S_w c_p)}{\partial t} + \frac{\partial [F_p \rho_R (1-\phi) S_w \hat{c}_p]}{\partial t} \quad (3)$$

式中, K 为绝对渗透率, μm^2 ; K_{ro} 、 K_{rw} 分别为油相和水相的相对渗透率, 无因次; p 为油藏压力, 10^{-1} MPa; ρ_o 、 ρ_w 分别为油相和水相压力, 10^{-1} MPa; q_w 为单位时间内单位地层体积的注水(产水)量, $\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$; q_o 为单位时间内单位地层体积的产油量, $\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$; S_o 、 S_w 分别为油相和水相饱和度, 小数; t 为生产时间, s; μ_o 、 μ_w 分别为油相和水相的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; ϕ 为地层孔隙度, %; ρ_o 、 ρ_w 分别为地层条件下油和水的密度, g/cm^3 ; d_p 为聚合物组分的扩散系数, 小数; 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, $\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$; \hat{c}_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), %; F_p 为聚合物组分的可及孔隙体积分数, 小数; ρ_R 为岩石密度,

g/cm^3 。

2.2 数学模型的求解

生产阶段的数学模型复杂, 因而快速求解是关键, 笔者选择流线方法^[5]对其进行求解, 与传统的油藏数值模拟计算方法相比, 该方法具有以下优势:

1) 传统的计算方法采用相同的网格来求解压力与饱和度, 并且流体只能沿着网格方向流动; 而采用流线方法时, 只需沿着流线上的各流动单元将饱和度向前推移, 而不需要沿着整个油藏中求解压力场时用到的所有基础网格块进行计算, 这在很大程度上减小了与网格划分及网格排列有关的各种因素对计算过程和结果的影响, 从而使流线方法得出的计算结果更加准确。

2) 由于在基础网格系统中求解压力场的次数明显减少, 而在沿着流线计算饱和度时可以采用较大的时间步长, 所以流线方法的计算速度要比传统数值模拟方法快。

总之, 采用流线方法可以将复杂的二维或三维渗流问题转化为一系列沿着流线的一维问题进行求解, 大幅度提高了计算速度和求解精度, 为生产阶段的快速历史拟合奠定了基础。

3 测试阶段的流线数学模型

3.1 数学模型的建立

测试阶段的数学模型由测试井周围每条流线的渗流方程组成。

1) 渗流控制方程。对于一个射开层为 M 的油藏, 假设第 m 层内由测试井发出的流线总数为 N_m , 则沿每条流线的渗流控制方程^[6]为:

$$\frac{1}{l_{j,m}} \frac{\partial}{\partial l_{j,m}} \left(l_{j,m} \lambda_{j,m} \frac{\partial p_{j,m}}{\partial l_{j,m}} \right) = C_t \frac{\partial p_{j,m}}{\partial t} \quad (m=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N_m)$$

式中, l 为沿流线的曲线坐标, cm, 曲线坐标系的原点定义为测试井位置; p 为油藏压力, 10^{-1} MPa; t 为从测试时刻算起的时间, s; λ 为油水两相总流量, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$; C_t 为总压缩系数, $(10^{-1} \text{ MPa})^{-1}$; 下标 m 为层序号, j 为流线序号。

2) 内边界条件。包括井筒储存内边界条件和表皮内边界条件。生产井井筒储存内边界条件为:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{N_m} \frac{2\pi}{N_m} r_w h_m \left(\lambda_{j,m} \frac{\partial p_{j,m}}{\partial l_{j,m}} \right)_{l_{j,m}=r_w} = -q + C \frac{dp_{wf}}{dt} \quad (m=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N_m) \quad (5)$$

注水井井筒储存内边界条件为:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{N_m} \frac{2\pi}{N_m} r_w h_m \left(\lambda_{j,m} \frac{\partial p_{j,m}}{\partial l_{j,m}} \right)_{l_{j,m}=r_w} = q + C \frac{dp_{wf}}{dt} \quad (m=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,N_m) \quad (6)$$

表皮内边界条件为:

$$p_{wf} = p_{w(j,m)} - S_m \left(l_{j,m} \frac{\partial p_{j,m}}{\partial l_{j,m}} \right)_{l_{j,m}=r_w} \quad (m=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,N_m) \quad (7)$$

式中, p_w 为每条流线上第一个节点的压力值, 10^{-1} MPa; h 为砂层厚度, cm; C 为井筒储存系数, $\text{cm}^3/(10^{-1} \text{MPa})$; S 为表皮系数, 无因次; r_w 为测试井井眼半径, cm。

3) 初始条件:

$$p(l_j, t)|_{t=0} = p_i \quad (8)$$

$$S_w(l_j, t)|_{t=0} = S_{w,i} \quad (9)$$

式中, p_i 为初始油藏压力, 由生产阶段的渗流数学模型求得, 10^{-1} MPa; $S_{w,i}$ 为初始水饱和度, 由生产阶段的渗流数学模型求得, 小数。

试井解释模型的外边界条件即为流线终止端油(水)井的工作条件, 见文献[2]。

3.2 数学模型的求解

对关井阶段流线数学模型的求解采用差分方法^[2], 求得测试井关井后的理论压力响应后, 利用双种群遗传算法^[7]对该压力响应与实测压力数据进行自动拟合, 可得到研究区域的试井解释参数和其他动态参数分布。

4 矿场应用

在以上研究的基础上编制了流线数值试井解释软件, 该软件在河南双河油田 437 断块进行了矿场应用。

双河油田地处河南省桐柏县, 构造位置位于秦岭褶皱带南襄盆地泌阳凹陷双河鼻状构造带上, 437 断块位于双河鼻状构造带南部鼻状构造倾伏端, 夹在两断层之间, 是受构造控制的断鼻油藏, 自 1977 年底投产以来, 分 3^1 、 3^2 、 3^3 、 3^4 层系进行开发, 先后经历了合注合采、细分调整、井网一、二次加密调整、井网局部完善调整及三次采油(聚合物驱)6 个开发阶段。应用流线数值试井解释软件对该区块测试井的资料进行了自动拟合解释(测试井拟合曲线见图 2), 得到了该区块测试时刻的剩余油分布(见图 3)和流线分布(见图 4)。

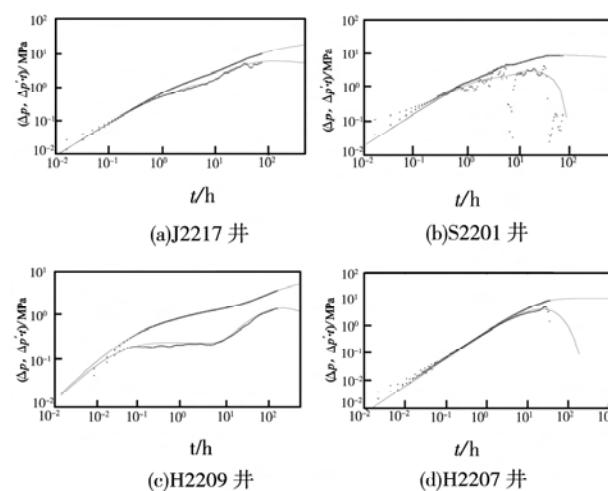


图 2 测试井拟合曲线

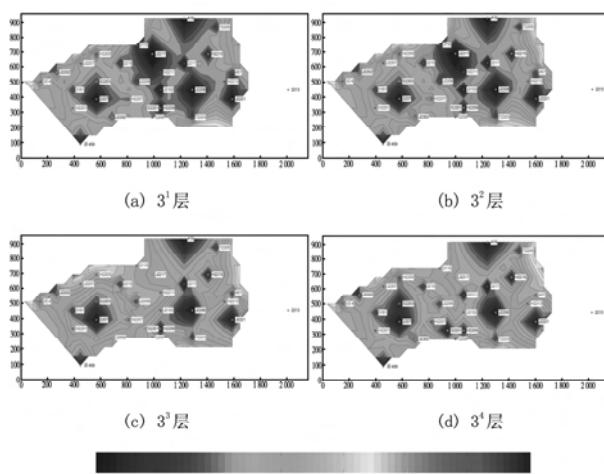


图 3 各层测试时刻的含油饱和度分布

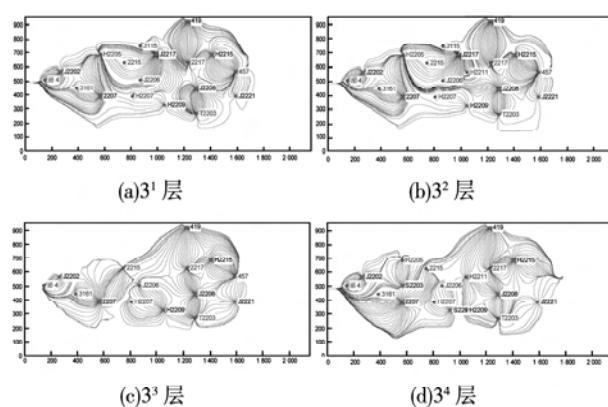


图 4 各层测试时刻的流线分布

5 结 论

1) 将流线数值模拟方法和数值试井理论相结合, 基于油藏真实地质模型, 建立了聚合物驱流线数值试井解释模型, 该模型不但考虑全面, 而且采用流

线方法求解,求解速度快,稳定性高。

2)形成了应用多种资料综合研究聚合物驱油藏剩余油分布的新方法,油藏数值模拟方法和试井解释方法相互结合、相互验证,使解释后的剩余油分布结果更可靠、更合理。

3)编制了实用的流线数值试井解释软件,并进行了矿场应用,对生产动态历史数据和测压数据进行了自动拟合解释,得到了研究区块的剩余油分布,矿场应用实例证明了软件的可行性。

参 考 文 献

- [1] 吴晓东,师俊峰,竺彪.循环热流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.
- [2] 吴明录.多层油藏流线数值试井解释方法[D].山东东营:中国

石油大学(华东)石油工程学院,2007.

- [3] 吴明录,姚军.聚合物驱流线数值试井解释模型及应用[J].石油钻探技术,2007,35(2):55-58.
- [4] 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.
- [5] Batycky R P. A three-dimensional two-phase scale streamline simulator[D]. Stanford: Department of Petroleum Engineering and the Committee on Graduate Studies, Stanford University, 1997.
- [6] 吴明录,姚军.多层油藏流线数值试井解释模型[J].石油勘探与开发,2007,34(5):609-615.
- [7] 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.

[审稿 陈月明]

Research on Remaining Oil Distribution Using Streamline Numerical Well Testing Method

Wu Minglu¹ Yao Jun¹ Li Xiyu² Zhao Chunxu²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Petroleum Exploration & Development Research Institute, Henan Oilfield, Nanyang, Henan, 473132, China)

Abstract: A streamline numerical well testing interpretation model for multilayer polymer flooding which considers reservoir heterogeneity, multiple phase fluid flow, multi-layer exploitation, complex well pattern, exploitation history and other complex factors based on real reservoir model is. Remaining oil distribution can be obtained by solving the model using streamline and automatic matching of well test parameter using genetic algorithm. A new method of investigating remaining oil distribution using testing data is developed suitable for medium-high water cut stage polymer flooding reservoirs. The streamline numerical well testing interpretation software was developed. The application in block 437 of Shuanghe Oilfield indicates that this method and the software is reliable.

Key words: oil reservoir numerical simulation; polymer flooding; remaining oil; percolation model; mathematical model

SPE112859, 2008

First Application of New Expandable Liner Hanger Technology in Deepwater HP/HT Well of Egypt

新型膨胀式尾管悬挂器在埃及深海高温高压井的首次应用

介绍了新型膨胀式尾管悬挂器系统 2007 年 4 月初在埃及地中海深海高温高压井的首次应用情况,这也是在埃及及石油行业中的首次应用,Φ193.7 mm 尾管悬挂器的最大坐封井深 4 870 m。在该地区作业者下入的大部分尾管都是为了在地层关键点能用套管隔开,以便安全钻至设计井深。该井设计用尾管封隔同一井段的低压(漏失)层和高压井涌(盐水)层。上个井段在坐封常规 Φ250.8 mm(9 7/8 in)尾管悬挂器时出现了问题,造成 2.1 d 非生产时间,因此,尾管悬挂器作业特别关键。在理想位置适当隔离地层和形成尾管重叠段,并在需要的位置布置尾管以避免继续钻进发生问题至关重要。与常规尾管悬挂器相比,可膨胀尾管悬挂器(ELH)在设计上存在一个重大区别。ELH 的结构避免了其提前坐封的可能,而且,也避免了常规尾管固井需要大量时间和资金完成的一些正常作业程序,例如对尾管顶部进行常规试压、修整尾管顶部残余的水泥等。

该论文详细讨论了该可膨胀尾管系统的结构设计、操作程序,以及在复杂井眼条件下的优越性。

[闫循彪 译]