

◀ 试井与开采 ▶

聚合物驱油藏数值试井解释方法研究

张德志^{1,2} 姚 军¹ 王友启³

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061; 2. 胜利油田有限公司地质科学研究院, 山东东营 257015; 3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘要: 在水驱油藏数值试井模型的基础上, 建立了聚合物驱油藏生产历史阶段和不稳定试井阶段的多相流试井解释模型, 采用数值试井方法对模型进行求解, 结合模拟退火优化算法编写了试井解释软件。该软件在孤东油田七区西 Ng5¹ 层注聚区进行了应用, 效果良好, 模拟出了该区块的渗透率分布。

关键词: 聚合物; 多相流动; 干扰试井; 数值试井; 数学模型

中图分类号: TE353 **文献标识码:** A **文章编号:** 1601-0890 (2006) 03-0071-04

引言

目前国内各大油田的主力油区大都已进入了高含水开发阶段, 并大规模实施了三次采油技术。目前广泛使用的现代试井解释方法^[1]都是基于单相流均质油藏的渗流理论, 且多为解析求解, 其理论模型已不能满足这些油田的实际开发需要。关于多相流试井解释理论, 国外有适合于油水两相流问题的 Perrine-Martin^[2-3]方法和适合于油气两相流问题的压力平方法^[4]; 国内秦峰^[5]用单井数值模拟研究多相流试井的问题, 姚军^[6]进行了数值试井的理论研究, 胡勇^[7]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, 刘立明^[8]采用 PEBI 网格构建了油水两相流的数值试井模型。关于聚合物驱油藏试井, 国内梁继德等^[9]分析了聚合物驱油藏实测试井曲线的一些特征, 向开理等^[10-12]研究了非牛顿幂律流体下的解析解。

笔者在水驱油藏数值试井模型的基础上, 建立了生产历史阶段聚合物驱多相流试井解释模型, 对测试井及周围控制区域进行了压力场、饱和度场和聚合物浓度场的计算, 通过建立不稳定试井阶段的流线解释模型, 求得理论压力响应, 再结合数值试井自动拟合技术, 逐步修改测试控制区域的参数, 最终求得该区域的渗透率场分布。

1 多相流数值试井解释模型的建立

1.1 生产历史阶段

假设条件: 1) 聚合物为等温驱替过程; 2) 多相渗流满足广义达西定律, 弥散遵循广义 Fick 定律; 3) 流体由油水两相和三个拟组分组成, 原油为黑油, 油

相中只有油组分, 水相中含有淡水、聚合物两个组分; 4) 忽略聚合物对水溶液质量守恒的影响; 5) 数学方程中不考虑组分的质量分数而直接使用质量浓度; 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。

油组分(油相)渗流方程:

$$\nabla \left[\frac{\rho_o K K_{ro}}{\mu_o} \nabla p \right] = \frac{\partial(\rho_o \phi S_o)}{\partial t} \quad (1)$$

淡水组分(油相)渗流方程:

$$\nabla \left[\frac{\rho_w K K_{rw}}{R_k \mu_{wp}} \nabla p \right] = \frac{\partial(\rho_w \phi S_w)}{\partial t} \quad (2)$$

聚合物组分扩散方程:

$$\nabla \left[\frac{c_p K K_{rw}}{R_k \mu_{wp}} \nabla p \right] - \frac{\partial[F_v p_R (1-\phi) S_w \hat{c}_p]}{\partial t} = \frac{\partial(\phi S_w c_p)}{\partial t} \quad (3)$$

辅助方程:

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

式中, K 为绝对渗透率, μm^2 ; K_{ro} 、 K_{rw} 分别为油相、水相相对渗透率; ρ_o 、 ρ_w 、 ρ_R 分别为油、水、岩石的密度, kg/L ; p 为压力, MPa ; μ_o 为原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; μ_{wp} 为聚合物溶液粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; ϕ 为孔隙度, %;

收稿日期: 2006-01-18

基金项目: 中国石化“十五”科技攻关项目(编号: P01043)部分研究成果

作者简介: 张德志(1963—), 男, 山东莱州人, 1986年毕业于华东石油学院计算数学专业, 2000年获石油大学(华东)油气田开发工程专业硕士学位, 在读博士, 高级工程师。

联系电话: (0546) 8716335

S_o 、 S_w 分别为含油、含水饱和度，%； R_k 为岩石渗透率降低系数，%； c_p 为聚合物的体积分数，%； \hat{c}_p 为聚合物的吸附浓度，%； F_p 为聚合物组分的可及空隙体积分数，%。

1.2 不稳定试井阶段多相流试井流线模型

在试井初期，流动呈现径向且影响范围主要为近井地带，而在测试后期基本按照定型的流线流动且影响范围扩大，因此认为测试过程流线分布不变。从测试井开始沿每条流线建立试井解释模型，将三维的试井问题简化成一维的渗流问题。

在试井解释模型中考虑测试井的井筒储存效应和表皮效应，并忽略重力和毛管压力的影响，考虑井筒储存系数和表皮系数的影响，得到 Perrine-Martin 型的渗流方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(B \frac{\partial p_j}{\partial l} \right) = \left(\frac{\phi C_t}{\lambda_t} \right) \frac{\partial p_j}{\partial t} \quad j=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中， p_j 为第 j 条流线上的压力，MPa； λ_t 为总流度， $\mu\text{m}^2/\text{mPa} \cdot \text{s}$ ； C_t 为总压缩系数， MPa^{-1} ； l 为流线的曲线坐标，曲线坐标系的原点定义测试井位置； B 为流管的截面积， m^2 ； N 为测试井周围的流线数量。

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

对于内边界条件，分为生产井和注入井关井两种情况进行测试。

当测试井为生产井时的内边界条件：

$$\left(B_j \lambda_t \frac{\partial p_j}{\partial l} \right)_{l=r_w} - \frac{24C}{N_j} \frac{dp_{wj}}{dt} = \frac{\theta_j}{2p} \sum q \quad j=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

当测试井为注入井时的内边界条件：

$$-\left(B_j \lambda_w \frac{\partial p_j}{\partial l} \right)_{l=r_w} - \frac{24C}{N_j} \frac{dp_{wj}}{dt} = \frac{\theta_j}{2p} q_w \quad j=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中， $p_{wj} = p_{j1} + S \frac{\theta_j}{2p} \left(l \frac{\partial p_j}{\partial l} \right)_{l=r_w}$ ，为第 j 条流线的井底压力，MPa； $p_w = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{wj}$ 为测试井的井底压力，MPa； θ_j 为第 j 条流线的角度，rad； p_{j1} 表示第 j 条流线在井壁上的压力，MPa； C 为井筒储存系数， m^3/MPa ； S 为表皮系数，无因次。

对于外边界条件，从测试井开始到流线的另一端，分油藏的边界或测试井周围的井（生产井或注水井）两种情况来考虑。

2 试井解释模型数值求解

对于生产历史阶段的聚合物驱多相流试井的数学模型，通过转换得到沿着流线的一维水相饱和度方程和一维聚合物组分的质量守恒方程：

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial f_{wp}}{\partial \tau} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial [F_p \rho_R S_w \hat{c}_p (1-\phi) / \phi]}{\partial t} + \frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial f_{wp}}{\partial \tau} = 0 \quad (9)$$

式中， f_{wp} 是水相分流量，%； τ 是沿着流线运移的传播时间，s。

对式（8）和（9）进行有限差分求解，采用 IMP-ES 方法求解压力和饱和度，显式求解浓度。

对于不稳定试井阶段的试井解释模型，采用流管法^[13, 14]求解。假设沿第 j 条流管有 N_j 个节点，在第 i 个节点处将式（5）及相应的内外边界条件进行离散，得到一三对角型矩阵方程，从而求得该流线上的井底压力。

$$p_{wi}^{n+1} = p_{wi}^{n+1} + S \frac{\theta_j}{2p} \frac{p_i^{n+1} - p_{i-1}^{n+1}}{l_2 - l_1} \quad (10)$$

对所有的流线进行计算就得到该时间步长的井底压力，然后重复计算即可求得井底的理论压力响应。

3 矿场应用

根据以上的试井解释模型和求解方法，将生产历史阶段得到的压力场、饱和度场以及聚合物浓度场等结果作为试井计算的初值，运用模拟退火算法^[15]来对测试区块的渗透率场进行优化，编写了聚合物驱油藏的数值试井解释软件，并成功地应用于胜利油区孤东七区的干扰试井试验。

3.1 测试区块基本情况

孤东油田位于济阳拗陷沾化凹陷东北部，地处黄河入海口北侧，是一个受基岩制约的、被断层复杂化的、具有多层结构的披覆构造油藏。七区西 $\text{Ng}5^1$ 开发层系则是在孤东披覆构造下被断层切割而形成的一个构造简单、地层平缓、构造形态完整的层状油藏。

孤东七区馆上段为河流相沉积，储层岩性以细砂岩为主，岩石颗粒从上到下呈正韵律分布。油层均质系数低、孔隙变异系数大，有效厚度受岩性和构造的控制。原油具有高粘度、低凝固点、低含蜡和低含硫的特点。

3.2 测试情况

孤东 7 区于 1986 年 7 月投产，1987 年 5 月起进行

注水开发。自投入开发以来，先后经历了无水采油期、低含水期、中含水期、高含水期和特高含水期五个开发阶段，采出程度 34.5%。2003 年 9 月开始实施二元复合驱第一段塞的注入，注入聚合物溶液的质量浓度为 1 800 mg/L，测试前各生产井均未见到聚合物。

为确定井间连通性、储层物性并计算方向性渗透率，并为下一步油藏数值模拟提供动态数据，2003 年 12 月对以 7-34-155 井为激动井的 5 个井对进行了干扰试井（图 1），图中除左下角的 8-33-12 井外，井号均省略了区号 7。试井期间在激动井和观察井均下入了高精度电子压力计，在各井至少进行了 24 h 的地层趋势压力测试后，激动井 7-34-155 的注入量由原来的 150 m³/d 减为 30 m³/d 开始正向激动；48 h 后再增大到 160 m³/d 进行反向激动，测得了 5 口观察井完整的干扰试井曲线，图 2 为 8-33-12 井的实测曲线。

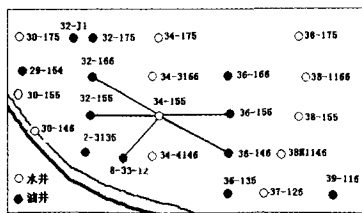


图 1 孤东七区西 Ng₅⁴ 层二元驱井位示意

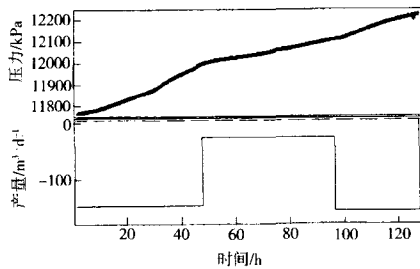


图 2 8-33-12 井实测干扰试井曲线

3.3 多相流试井资料解释

首先用二维二相水驱模型进行历史模拟，然后用聚合物驱模型模拟到测试前的 2003 年 12 月 15 日，得到了此时的压力分布场、饱和度分布场和聚合物质量浓度场的分布，作为干扰试井计算的初值。

为完成本次干扰试井，测试前 4 口观察井都已作业完井 2~4 d，因此在试井解释过程中没有考虑井筒储存的影响。图 3 为用流管法求解的 7-32-166 井的压力及压力导数双对数拟合，通过对各测试井进行拟合，得到测试区域的最终渗透率场分布如图 4 所示，该结果与解释前仅用井点数据离散得到的渗透率场有较大的区别。

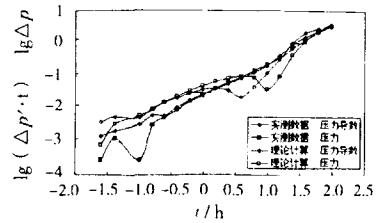


图 3 7-32-166 井双对数曲线拟合

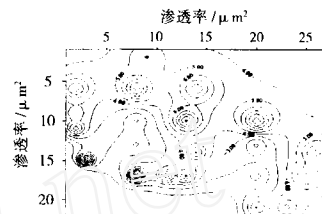


图 4 测试区域解释后的渗透率分布

4 结束语

建立了聚合物驱油藏多相流试井解释模型，运用数值试井解释方法解决了聚合物驱开采方式下油藏平面渗透率场分布的描述问题，并将研究成果在孤东油田七区西 Ng₅⁴ 注聚区进行了实际应用。目前该研究成果只能研究单层的情况，需进一步研究以适应聚合物驱油藏的开发。

参 考 文 献

- [1] 刘能强. 实用现代试井解释方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [2] Perrine R L. Analysis of pressure build-up curve [J]. Drill and Prod Prac, API, 1956, 2.
- [3] 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.
- [4] Al-Khalifa A J, Saudi Aramco, Horne R N, et al. Multiphase pressure and pressure squared methods [R]. SPE 18803, 1989.
- [5] 秦峰. 用数值模拟方法研究多相流的试井方法——单井试井模拟器的研制 [D]. 北京: 石油大学(北京)石油天然气工程学院, 1998.
- [6] 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.
- [7] 胡勇, 钟兵, 杨雅和, 等. 气水两相井筒/地层组合数值试井模型的建立和求解 [J]. 天然气工业, 2000, 20 (6): 66-69.
- [8] 刘立明, 陈钦雷, 王光辉. 油水两相渗流降数数值试井模型的建立 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25 (2): 42-45.
- [9] 梁继德, 孙晓军, 闫木, 等. 聚合物驱油藏的实测试井曲线分析 [J]. 油气井测试, 1999, 8 (1): 26-30.
- [10] 向开理, 李允, 何国良. 分形油藏非牛顿幂律流体低速非达西不稳定渗流的组合数学模型 [J]. 计算物理, 2002, 19 (3):

- 239-244.
- [11] 宋考平, 祝俊峰, 刘泽俊. 多区复合油藏非牛顿幂律流体试井解释 [J]. 石油学报, 1997, 18 (2): 78-82.
- [12] 张传宝, 任力成, 张德志, 等. 非牛顿乘幂律流体试井解释方法研究 [J]. 油气地质与采收率, 2002, 9 (3): 21-23.
- [13] Martin J C, Wegner R E. Numerical solution of multiphase, two-dimensional incompressible flow using stream-tube relationships [R]. SPE7410, 1979.
- [14] Emanuel A S, Milliken W J. The application of stream-tube techniques to full field water flood simulation [R]. SPE30758, 1997.
- [15] 李鸿英, 廖新维, 陈钦雷. 用模拟退火方法和试井资料确定渗透率分布状况 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2001, 25 (2): 34-37.

Study on Numerical Well Testing Interpretation in Polymer Flooding Reservoirs

Zhang Dezhi^{1,2} Yao Jun¹ Wang Youqi³

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Geoscience Research Institute, Shengli Oilfield Co. Ltd., Dongying, Shandong, 257015, China; 3. College of Energy, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China)

Abstract: On the basis of numerical well testing model in a water-driven reservoir, this paper established multiphase well testing models of polymer flooding reservoirs in the producing period and the unsteady well testing period. The solutions for these models were given by numerical well testing technique. A well testing interpretation software combined with the simulated annealing optimized arithmetic has been applied successfully in the 7th region of Gudong Oilfield, and the permeability distribution in the block was simulated.

Key words: polymer; multiphase flow; interference well test; numerical well testing; mathematical model

欢迎订阅 2006 年《石油钻探技术》

《石油钻探技术》创刊于 1973 年, 经国家科委批准, 1979 年在全国发行, 1988 年对国内外公开发行人。她是我国石油天然气钻井方面历史悠久的综合技术性刊物, 深得国内外读者的厚爱和钻井界的好评, 曾被授予“首次北京地区科技期刊全优奖”称号。她是中文核心期刊和历年中国科技论文统计源刊, 被美国《石油文摘》、《中国石油文摘》和《中国地质文摘》等大量摘录, 同时进入国际最大联机检索系统 DIALOG、国际第二大联机检索系统 ORBIT 以及 Ulrich 国际期刊指南数据库。1996 年加入《中国学术期刊 (光盘版)》全文数据库系统, 1999 年加入 ChinaInfo 网络信息资源系统《电子期刊》, 从而为中文钻井论文进入世界信息高速公路架起一座无形的桥梁。2001 年, 入选《中国核心期刊 (遴选) 数据库》, 成为评价国内期刊技术、学术水平的主要源刊之一。

本刊选题注重指导性、先进性和适用性, 坚持理论与实践相结合, 以多刊快刊应用性文章为特色。主要报道国内石油钻探工程 (包括钻井、泥浆、固井、完井、开采等专业) 以及钻探机械设备与自动化方面的科技进展和现场经验, 适当介绍国外石油钻探技术发展的水平和动向。栏目众多, 内容丰富, 版面紧凑。适合于石油、海洋、地矿行业广大钻井工程技术人员、高等院校师生和经营管理者阅读。本刊自 1991 年试办、1993 年开办彩色广告以来, 成效显著, 已成为石油、海洋、地矿、机电、化工、轻工、冶金、煤炭、军工、建材、信息等行业科技人员联系的纽带, 是石油天然气行业走向市场的桥梁和迎接 21 世纪的使者, 是科研人员交流信息的园地和高校师生了解现场的益友。本刊广告刊出及时, 收费合理, 采用彩色桌面系统制作高精度彩页与插页。欢迎随时联系广告业务。

本刊逢单月月末出版, 2006 年每期定价 11 元, 全年 6 期共 66 元 (含挂号邮费)。自办发行, 邮汇与信汇均可。欢迎有关单位和个人及时订阅。订阅办法:

1. 认真填写订阅单及汇款单, 切勿潦草, 以免因地址不详而无法邮寄。可破季订阅。
2. 银行汇款请寄: 山东省德州市建行交通支行, 帐号: 37001842901050002128, 户名“中国石油化工股份有限公司德州石油钻井研究所”, 并注明“期刊”字样。
3. 邮局汇款请寄: 山东省德州市东风东路 35 号石油钻井研究所编辑部 (邮编: 253005, 电话: 0534-2670163, 2670121, 传真: 0534-2622468, E-mail: syzt@vip.163.com, http://syzt.chinajournal.net.cn)。