文章编号:1000-0747(2009)04-0513-06

部分射开井流线数值试井解释模型及压力响应

姚军,吴明录

(中国石油大学(华东)石油工程学院)

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(20080431219)

摘要:建立了部分射开井的流线数值试井解释模型,模型包括生产阶段的渗流数学模型和测试阶段的流线数学模型,采用 流线方法和有限差分方法分别对生产和测试阶段的数学模型进行数值求解,得到了部分射开井的压力响应特征曲线。对 流线分布和压力响应特征曲线的综合分析表明,部分射开井的压力导数曲线出现两条水平直线段。研究了渗透率比、射 开厚度比、射孔部位对压力响应特征的影响,结果表明,渗透率比越大,第2条径向流水平直线段出现的时间越早;射开厚 度比越小,两条水平直线段的高度差越大;射开部位对压力响应的影响不大。认为渗透率比和射开厚度比对压力响应有 较大的影响,是试井解释必须考虑的重要影响因素。图 11 参 18 关键词:部分射开;数值试井;解释模型;流线分布;压力响应

中图分类号:TE353 **文献标识码**:A

Streamline numerical well-testing interpretation model and pressure response for partially perforated wells

Yao Jun, Wu Minglu

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

Abstract : A streamline numerical well-testing interpretation model for partially perforated wells was established that includes a filtration mathematical model of production period and a streamline mathematical model of testing period. Pressure response characteristic curves for partial perforated wells were obtained by solving the models of the two periods using streamline method and finite difference method, respectively. Pressure response characteristics for partially perforated wells were obtained by analyzing synthetically the streamline distribution and the pressure response characteristic curves. Two horizontal straight line segments will emerge in the derivative curve. The influence of permeability ratio, perforation thickness ratio and perforation location on pressure response was investigated. The larger the permeability ratio is, the earlier the second horizontal straight line segment will emerge. The less the perforation thickness ratio is, the greater the distance between the two horizontal straight line segments will be. The impact of perforation location on pressure response is little. Permeability ratio and perforation thickness ratio have significant effects on the pressure response and they must be taken into account in well-testing interpretation for partially perforated wells.

Key words: partial perforation; numerical well-testing; interpretation model; streamline distribution; pressure response

0 引言

在以 Horner 方法为代表的常规试井解释方法、以 Gringarten 为代表的现代试井解释方法和在数值模拟 基础上发展起来的数值试井解释方法中,均是采用视 表皮系数考虑部分射开井的压力响应特征^[1-6],而没有 从流动形态的角度去研究分析。实质上,部分射开会 导致测试井周围流动形态的变化,其导数曲线水平直 线段将发生变化。最近,姚军等将流线方法与数值试 井概念相结合,提出了各种完全射开井的流线数值试 井解释模型^[7-10],本文在这些研究的基础上建立能够描 述部分射开井流动形态的流线数值试井解释模型并研 究了部分射开井的压力响应特征。

1 部分射开井流线数值试井解释模型

部分射开井的流线数值试井解释模型包括生产阶 段的渗流数学模型和测试阶段的流线数学模型。

1.1 生产阶段的渗流数学模型

该模型主要用于模拟生产历史过程,求得测试井 测试时刻油藏压力分布、饱和度分布和流线分布。该 阶段的模型采用黑油模型^[11-15],计算时要考虑部分射 开的影响,采用流线方法进行求解^[16-18]。

1.2 测试阶段的流线数学模型

部分射开井测试阶段的流线数学模型与完全射开 井略有不同,即:部分射开井流线数学模型中的节点厚 度不是整个产层厚度,而是射开产层厚度(井筒处)或

流线所波及到的最大产层厚度。

压力控制方程

514

以 *j* 代表流线序号,假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为:

$$\frac{1}{l_j} \frac{\partial}{\partial l_j} \left[l_j \frac{1}{\phi_j} \frac{\partial p_j}{\partial l_j} \right] = h_{p,j} c_t \frac{\partial p_j}{\partial t} \quad (j = 1, 2, ..., N)$$
(1)

内边界条件

考虑井筒储存效应和表皮效应,按测试井为生产 井和注水井两种情形考虑,内边界条件表示为:

$$\sum_{j=1}^{N} \frac{2}{N} r \left[\begin{array}{c} 1, j h_{p,j} \frac{\partial p_{j}}{\partial l_{j}} \\ t_{j} = r \end{array} \right]^{l_{j} = r} = -q + \left[\left[\frac{d p_{wh}}{dt} - S l_{j} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial p_{j}}{\partial l_{j}} \right]_{l_{j} = r} \right] \\ (j = 1, 2, ..., N)$$

$$(2)$$

$$\sum_{j=1}^{N} \frac{2}{N} r \left[\begin{array}{c} 1, j h_{p,j} \frac{\partial p_{j}}{\partial l_{j}} \\ l_{j} = r \end{array} \right] = q + \left[\left(\frac{d p_{wb}}{dt} - S l_{j} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial p_{j}}{\partial l_{j}} \right) \\ l_{j} = r \end{array} \right]$$
(j = 1, 2, ..., N) (3)

外边界条件与完全射开井的相同^[8]。

其他方程

7

初始条件由生产阶段的数学模型求得,包括压力、饱 和度及流线分布。沿流线的饱和度方程由下式确定:

$$\frac{\partial S_{w}}{\partial t} + \frac{\partial f_{w}}{\partial} = 0 \tag{4}$$

(1)—(4)式组成了测试阶段部分射开井的流线试 井解释模型,该模型可采用数值方法进行求解^[18],计算 可得到测试阶段的理论压力响应。

2 部分射开井的压力响应

为了研究部分射开井的压力响应动态特征,建立 了单层均质等厚油藏反五点井网的典型模型(见图 1), 其中, 井为注水井,P1、P2、P3、P4 井为生产井。油藏 主要参数为:孔隙度为 0.2,产层厚度为 200 m,水平渗 透率为 10 ×10⁻³ µm²。 井部分射开,射开部位为产 层中部,射开厚度为 40 m,P1、P2、P3、P4 井全部射开。 井的注水量为 100 m³/d;P1、P2、P3 井的产液量为

80 m³/d, P4 井的产液量为 60 m³/d。



利用该模型研究了渗透率比(*K_v/ K_h*)、射开厚度 比(*h_v/ h*)和射开部位对部分射开井压力响应动态特征 的影响。

2.1 渗透率比的影响

图 2、图 3 和图 4 为不同渗透率比时的流线分布 图。可以看出,渗透率比不同,部分射开井井筒附近的 流线形态也不同,随着渗透率比的增大,部分射开井井 筒附近的流线与垂直方向的夹角变小;渗透率比不同,





图 4 渗透率比为 1 时的流线分布图

流线在纵向上的波及范围达到最大值时距井筒的水平 距离也不同,渗透率比越大,流线在纵向上的波及范围 达到最大值时距井筒的水平距离越小。

由图 5 可见,无因次压力导数曲线从第 1 个水平 直线段(靠近井筒射开厚度范围内的径向流)过渡到第 2 个水平直线段(远离井筒整个产层厚度范围内的径向 流),且第 2 个水平直线段的高度比第 1 个水平直线段 低。流线分布和无因次压力响应曲线的综合对比结果表 明,相同地层条件下,渗透率比越大,井筒附近径向流阶 段的维持时间越短;流线在纵向上发生窜流的时间越早, 无因次压力导数曲线下落的时间越早;流线在纵向上的 波及范围达到最大值时离测试井井筒的水平距离越小, 进入整个产层厚度范围内径向流阶段的时间越早。

2



流线在纵向上的最大波及范围也不同。图 6 和图 7 分别

为射开厚度比为 0.05、0.1 时的流线分布图。可以看出,



图 7 射开厚度比为 0.1 时的流线分布图

射开厚度越大,流线在纵向上的最大波及范围也越大。 图 8 为不同射开厚度比时的无因次压力响应对比 图。可以看出,在不同射开厚度比条件下,第 1 个径向 流水平直线段的高度相同,而第 2 个径向流水平直线 段的高度不同;随着射开厚度比的增大,第 2 个径向流 水平直线段不断升高,当射开厚度比达到最大值 1 (部 分射开井模型蜕变为全部射开井模型)时,第 2 个径向 流水平直线段消失,只有 1 个径向流水平直线段。

2.3 射开部位的影响

7

图 9、图 10 分别为射开产层顶部和产层中部时的 流线分布图(射开厚度为 40 m)。可以看出,虽然流线 的分布形态在两种情况下有所不同,但其在纵向上的







上的最大波及范围略小于射开产层中部。图 11 为射 开不同部位时的压力响应对比图。由图可见,在该生 产和地层条件下,射开产层顶部和中部时的压力响应





2

曲线形态没有太大的差别,仅在第2个径向流水平直 线段的高度上稍有差别,即产层顶部射开时第2个径 向流水平直线段比中部射开时稍高,这是由于产层顶 部射开时流线所能波及到的最大产层厚度范围比中部 射开时小造成的。

3 结论

本文建立了描述部分射开井的流线试井解释模型,并采用数值方法进行了求解,结合流线分布直观分析了由于部分射开引起的测试井周围的流线形态的变化,得到如下结论:部分射开导致测试井无因次压力导数曲线出现不同高度的两条水平直线段,这是在以往的试井解释中没有认识到的。通常认为这一现象是具

有不同地层特性参数的多重复合油藏或双重介质油藏 介质间的窜流所引起的。研究表明,射开厚度比越小, 两条水平直线段的高度差越大,当射开厚度比为1(全 部射开)时,两个径向流水平直线段变为1个水平直线 段;渗透率比越大,第2条水平直线段出现的时间越 早;射开位置对压力响应的影响不大。

符号注释:

l——以测试井为起始点的沿流线的曲线距离,cm; t 油水两相总流度, μ m²/(mPa · s); h_p ——射开产层厚度(井筒 处)或流线所波及到的最大产层厚度,m; ϕ ——孔隙度,%; p——油藏压力,10⁻¹ MPa; c_1 ——总压缩系数,(10⁻¹ MPa)⁻¹; t——从测试时刻算起的时间,s; r——测试井井眼半径,cm; q——测试井开井测试时的产液(注入)量或关井测试前的产液 (注入)量,g/s; C——井筒储存系数,cm³/(10⁻¹ MPa); p_{wb} —— 测试井井底压力,10⁻¹ MPa; S——表皮系数,无因次; S_w ——水 相饱和度(含水饱和度),f; ——以测试井为起点流体质点沿流 线的传播时间,s; f_w ——含水率,%; K_v ——垂向渗透率, μ m²; K_h ——水平渗透率, μ m²; h——总产层厚度,m。

参考文献:

- [1] Puchyr PJ. A numerical well test model[A]. SPE 21815, 1991.
- [2] Archer R A, Horne R N. The green element method for numerical well test analysis[A]. SPE 62916, 2000.
- [3] Jackson R R, Banerjee R, Thambynayagam R K M T. An integrated approach to interval pressure transient test analysis using analytical and numerical methods[A]. SPE 81515, 2003.
- [4] Kamal M M, Pan Y, Landa J L, et al. Numerical well testing: A method to use transient testing results in reservoir simulation [A]. SPE 95905, 2005.
- [5] 刘立明,陈钦雷,王光辉.油水两相渗流压降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.
 Liu Liming, Chen Qinlei, Wang Guanghui. Construction of numerical pressure drop models for oil water flow[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001,25(2):42-45.
- [6] 杨永智,廖新维,沈平平.用改进的 ISA 方法消除井筒存储效应影响[J].石油勘探与开发,2006,33(4):511-514.
 Yang Yongzhi, Liao Xinwei, Shen Pingping. Eliminating wellbore-storage effects by improving ISA technique [J].
 Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(4):511-514.
- [7] 姚军.数值试井理论研究[D].东营:石油大学(华东),2000.
 Yao Jun. Study on theory of numerical well test[D]. Dongying: University of Petroleum (East China), 2000.
- [8] 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
- [9] 吴明录,姚军.多层油藏流线数值试井[J].石油勘探与开发, 2007,34(5):609-615.

(3): 96-99.

Wu Minglu, Yao Jun. Streamline numerical well-testing

interpretation model for multilayered reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development , 2007 , 34(5) : 609-615.

- [10] 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.
 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.
- [11] 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.
 Han Dakuang, Chen Qinlei, Yan Cunzhang. Reservoir simulation

han Dakuang, Chen Qiniei, Yan Cunzhang. Reservoir simulation basis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.

- [12] 高慧梅,姜汉桥,陈民峰,等.储集层微观参数对油水相对渗透率影响的微观模拟研究[J].石油勘探与开发,2006,33(6):734-737.
 Gao Huimei, Jiang Hanqiao, Chen Minfeng, et al. Microscopic simulation of the effect of microscopic reservoir parameters on oilwater relative permeability [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6):734-737.
- [13] 李阳,张凯,王亚洲,等. 稠油油井幂律流体流动视黏度模型[J]. 石油勘探与开发,2007,34(5):616-621.
 Li Yang, Zhang Kai, Wang Yazhou, et al. Apparent viscosity model of power law fluid flow in heavy oil wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5):616-621.
- [14] 任殿星,李凡华,李保柱.多条件约束油藏地质建模技术[J].石油勘探与开发,2008,35(2):205-214.
 Ren Dianxing, Li Fanhua, Li Baozhu. Geomodeling technology under multifactor control [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2):205-214.
- [15] 朱焱,谢进庄,杨为华,等.提高油藏数值模拟历史拟合精度的方法[J].石油勘探与开发,2008,35(2):225-229.
 Zhu Yan, Xie Jinzhuang, Yang Weihua, et al. Method for improving history matching precision of reservoir numerical simulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2):225-229.
- Thiele M R, Batycky R P, Blunt M J. Simulating flow in heterogeneous systems using streamtubes and streamlines [J].
 SPERE, 1996, 10(1): 5-12.
- [17] 王洪宝,苏振阁,陈忠云.油藏水驱开发三维流线模型[J].石油勘 探与开发,2003,30(6):92-94.
 Wang Hongbao, Su Zhen 'ge, Chen Zhongyun. A 3-D streamline model in waterflooding reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6):92-94.
- [18] 吴明录. 多层油藏流线数值试井解释方法[D]. 东营:中国石油大
 学(华东),2007.
 We Mashing Streamling automatical multipations intermetation

Wu Minglu. Streamline numerical welltesting interpretation method for layered reservoirs[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2007.

第一作者简介:姚军(1964-),男,山东平邑人,中国石油大学(华东) 石油工程学院教授,博士生导师,现从事油气田开发工程方面的教学与 科研工作。地址:山东省东营市北二路271号,中国石油大学(华东)石 油工程学院,邮政编码:257061。E-mail:youcang @hdpu.edu.cn

联系作者:吴明录。地址:山东省东营市北二路 271 号,中国石油大 学(华东)石油工程学院,邮政编码:257061。E-mail: w97612 @163.com 收稿日期:2007-12-06 修回日期:2009-05-13

(编辑 唐金华 绘图 付改荣)