

文章编号:1001-3873(2009)03-0373-03

不规则污染井的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 石油工程学院,山东 东营 257061)

摘要: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,得到了不规则污染井的压力响应特征曲线。对压力响应特征曲线的分析表明,在测试井各方向的污染程度相同和不相同两种情况下,不同的表皮系数下压力导数曲线在径向流阶段有重合和不重合两种特征,而两种情况下的径向流动形态均不改变。编制了流线数值试井解释软件,并结合油田应用实例,证明了软件及模型的实用性。

关键词:污染;表皮系数;试井;流线;压力恢复曲线

中图分类号:TE312

文献标识码:A

以 Horner 为代表的常规试井解释方法和以 Gringarten 为代表的现代试井解释方法以及在数值模拟基础上发展起来的数值试井解释方法,均采用单一的表皮系数 S 或等效井筒半径 $(r_w e^S)$ 来笼统地描述测试井的污染状况。但实际上井筒附近的污染程度是不规则的。姚军等人将流线方法与数值试井概念相结合,提出了各种规则污染井的流线数值试井解释模型^[1-5]。本文在以上研究的基础上提出了不规则污染井的流线数值试井解释模型并研究了其压力响应特征。

1 不规则污染井试井解释模型

(1) 生产阶段的渗流模型 主要用于模拟整个生产过程,求得测试井测试时刻的压力、饱和度和流线分布。该阶段采用黑油模型^[6],考虑油藏非均质性、复杂外边界、多相流、多井、多层干扰以及生产历史等复杂因素的影响,其求解可采用快速、稳定的流线方法^[7-9]。

(2) 测试阶段的流线数学模型 主要考虑每条流线的表皮系数 S ,为了保证自动拟合解释的速度和减少试井解释的多解性,一般情况下,先把井筒周围区域划分为几个区间,再给每个区间内的流线赋一个表皮系数值,所建立的试井模型可以考虑测试井在各个方向上所受不同程度的污染,如果折算成污染半径,便构成了不规则的污染区。

若以下标 j 代表流线的序号,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

$$\frac{1}{l_j} \frac{\partial}{\partial l_j} \left(\alpha l_j \frac{\lambda_j}{\phi_j} \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right) = \alpha c_i \frac{\partial p_i}{\partial t}, \quad (j=1, 2, \dots, N). \quad (1)$$

考虑井筒储存效应和表皮效应。对于井筒储存内

边界,按生产井和注水井 2 种情形考虑,分别为

$$\sum_{j=1}^N \frac{2\pi}{N} r_w \left(\lambda_j h_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right)_{l=r_w} = -q + C \frac{dp_w}{dt}, \quad (j=1, 2, \dots, N); \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^N \frac{2\pi}{N} r_w \left(\lambda_j h_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right)_{l=r_w} = q + C \frac{dp_w}{dt}, \quad (j=1, 2, \dots, N). \quad (3)$$

表皮内边界条件(井底流动压力联立条件)为

$$p_w = p_{wj} - S_j \left(l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right)_{l=r_w}, \quad (j=1, 2, \dots, N). \quad (4)$$

由达西公式,每条流线的流量可用下式计算:

$$q_j = \lambda_j \left(\frac{\partial p_i}{\partial l_j} \frac{2\pi}{N} r_w h_j \right)_{l=r_w}, \quad (j=1, 2, \dots, N). \quad (5)$$

外边界条件与规则污染井相同。初始条件由生产阶段的数学模型求得,包括压力、饱和度以及流线分布。沿流线的饱和度方程由下式确定:

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial f_w}{\partial \tau} = 0. \quad (6)$$

由(1)~(6)式组成了测试阶段不规则污染井的流线试井解释模型,可采用数值方法进行求解^[9],计算出测试阶段的理论压力响应。

2 污染井压力响应特征

为研究不规则污染井的压力响应特征,建立了单层均质油藏九点井网典型模型。其中, P 井为生产井, W1—W8 井为注水井。油藏主要参数为:油藏长度和宽度均为 2 050 m,有效厚度为 10 m,渗透率为 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 0.25。测试前 P 井的产液量为 $100 \text{ m}^3/\text{d}$, W1—W8 井的注水量均为 $40 \text{ m}^3/\text{d}$ 。油和水的粘度和密度等参数取相同的值,这样模型便成为单相流模型。

收稿日期:2008-09-09

修订日期:2008-12-05

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(20080431219)资助

作者简介:吴明录(1978-),男,山东潍坊人,博士,渗流力学,(Tel)13854690263(E-mail)w97612@163.com.

以P井为测试井,对其进行压力降模拟(图1)。将P井井筒周围划分为8个区域,在同一区域内每条流线的表皮系数赋相同的值,则只需要8个表皮系数变量($S_1, S_2, \dots, S_8$)就能够描述测试井受污染的不规则程度。对P井周围的所有流线建立流线数学模型并求解,即得到污染井的压力响应特征。

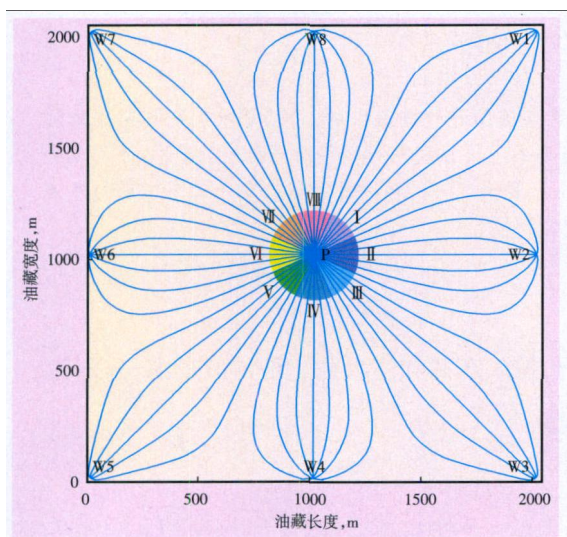


图1 油藏不同区域流线分布

(1) 规则污染井压力响应特征 在规则污染情况下(图2),测试井周围每个区域的受污染程度相同,则污染区是规则(圆形)的,这时在径向流动阶段,压力导数曲线在同一高度,而且随着表皮系数的增大,压力与压力导数曲线间的距离增大。

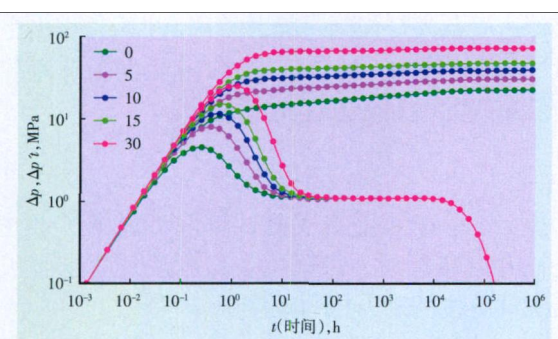


图2 污染井在不同表皮系数下的压力响应

(2) 局部污染井和全部污染井压力响应特征 井筒周围各个区域的表皮系数为0的井称之为“未污染井”,表皮系数均大于0的井称之为“完全污染井”,只有部分区域的表皮系数大于0的井称之为“局部污染井”。“未污染井”属于规则污染井,“局部污染井”属于不规则污染井,“完全污染井”当各个区域的表皮系数相等时为规则污染井,否则为不规则污染井。由图3可看出,全部污染井和无污染井的压力导数曲线在径向流阶段的高度相同,而局部污染井的高度不同。这表明,规则污染井的压力导数曲线在径向流动阶段的高度确定,在无因次压力导数曲线上为0.5线;而不

规则污染井的高度不确定,在无因次压力导数曲线上不再是0.5线。

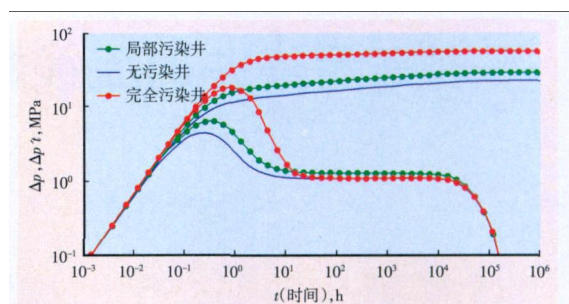


图3 无污染井、局部污染井和全部污染井的压力响应对比

(3) 表皮系数(S)对压力响应的影响 当S非常大时,可以视为井筒被“堵死”。本文用 $S=1010$ 的流线数目与总流线(其他流线的S值为0)数目之比表示井筒的堵塞百分比。随着堵塞百分比的增大,压力和压力导数曲线上移,但压力与压力导数之间的距离变化不大,流动形态(径向流)不会改变(图4)。

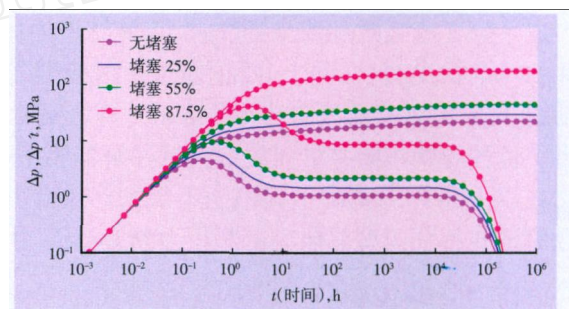


图4 不同堵塞百分比时的压力响应对比

模拟计算发现,不规则污染井流线流量与近井的污染程度密切相关,表皮系数越大,测试井在该方向的压降损失越大,生产压差越小,因而流线的流量越小;不同的表皮系数在近井区域造成了不同程度的压降损失,近井区域压力梯度的分布不再具有规则性,导致压力导数曲线在径向流阶段水平直线段高度的不确定性。

3 应用实例

笔者在以上研究的基础上编制了实用的流线数值试井解释软件并应用于多个油田,以下为在某油田一区块应用的实例。油藏的基础参数为:油藏长1025 m,宽650 m,平均有效厚度10.3 m,平均孔隙度0.27,初始地层压力21.3 MPa,初始含油饱和度0.33,地下原油和水的粘度分别为8.7 mPa·s和0.4 mPa·s,地下原油和水的密度分别为0.86 g/cm³和1 g/cm³,原油和水的体积系数分别为1.06 m³/m³和1 m³/m³,综合压缩系数为4.5×10⁻⁴ MPa⁻¹,井眼半径为0.069 85 m。测试前该井的产液量为67 m³/d。

应用流线数值试井解释软件,对该区块的生产历

史进行模拟计算,可得到P44井测试时的压力、饱和度和流线分布(图5);沿由P44井周围的每条流线建立试井解释模型,由图5可知,P44井的流线来自于W45、W63、W43和W42等4口井,因此在模型中可设来自W45、W63、W43和W42这4口井的流线的表皮系数分别为 S_1, S_2, S_3, S_4 ;求解该数学模型并结合试井最优化算法^[10]进行自动拟合解释,最终可得到如下的试井解释参数:平均渗透率 $K=0.82 \mu\text{m}^2$, $C=0.112 \text{ m}^3/\text{MPa}$, $S_1=-1.1$, $S_2=-2.3$, $S_3=2.4$, $S_4=4.2$ 。由解释结果可知,P44井在各个方向上的污染是不同的:在W45和W63井方向未受污染,在W42井和W43井方向受污染,而以W43井方向上的污染最严重。

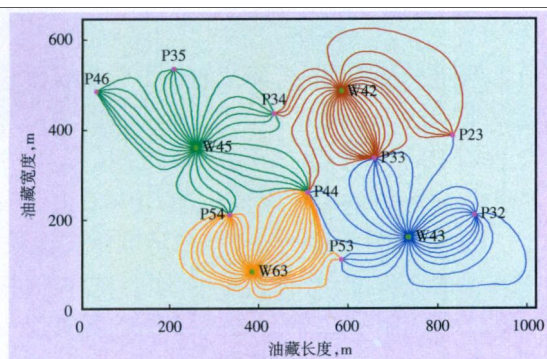


图5 测试时刻的流线分布

综上所述,目前已有的试井解释软件在解释近井地带污染时,都只能用一个表皮系数来表征,这样解释得到的污染区都是圆形的,而采用不规则污染的流线数值试井解释模型所得到的污染区的形状是不规则的,解释结果更符合实际,且更具有实用性。

通过对典型模型中测试井的压力响应特征分析,可得到:①当测试井各方向的污染相同时,不同表皮系数下的压力导数曲线在径向流阶段重合;②当测试井各方向的污染不同时,不同表皮系数下的压力导数曲线在径向流阶段不重合;③无论是规则污染区还是不规则污染区,不会改变径向流动形态。

符号注释

c_i ——总压缩系数, $10^{-1}/\text{MPa}$;

C ——井筒储存系数, $\text{cm}^3/(10^{-1}\text{MPa})$;

f_w ——含水率,小数;

h_j ——第 j 条流线所经过油藏的砂层厚度, cm ;

l_j ——以测试井为起始点的沿第 j 条流线的曲线距离, cm ;

p_j ——第 j 条流线上的压力值, 10^{-1}MPa ;

p_w, p_{wf} ——分别为井筒压力和井底流动压力, 10^{-1}MPa ;

q ——开井测试时的稳定产(注)量 cm^3/s ;

r_w ——井眼半径, cm ;

S_w ——水相饱和度,小数;

S_j ——第 j 条流线上的表皮系数,无因次;

t ——从测试时刻起算的时间, s ;

α ——系数;

ϕ_j ——第 j 条流线所经过油藏的孔隙度, f ;

λ_j ——第 j 条流线所经过油藏的总流量, $\text{m}^3/(\text{mPa} \cdot \text{s})$;

τ ——流体质点沿流线的传播时间, s 。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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] 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] 姚军. 数值试井理论研究[D]. 中国石油大学(华东)博士学位论文, 2000.
- [5] 吴明录. 多层油藏流线数值试井解释方法[D]. 中国石油大学(华东)博士学位论文, 2007.
- [6] 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.
- [7] Thiele M R, Batycky R P, Blunt M J. A streamline-based 3D field-scale compositional reservoir simulator [A]. SPE 38889, 1997.
- [8] Portella R C M, Hewett T A. Fast 3-D reservoir simulation and applications using streamlines [A]. SPE 39061, 1997.
- [9] 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.
- [10] 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.

Streamline Numerical Well-Testing Interpretation Model for Irregularly Contaminated Wells with Application

WU Ming-lu, YAO Jun

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

Abstract: The pressure response characteristic curves for irregularly contaminated wells are obtained by solving the models of the two stages using streamline method and finite difference method, respectively. It is indicated from analysis of pressure response characteristic curves that in radial flow period, the pressure derivative curves will coincide in condition of different skin factors, when the contaminated degrees of testing well in different directions are the same, otherwise, they will not coincide, and radial flow forms under the two circumstances do not change. Also, the streamline numerical well-testing interpretation software is worked out. The case study indicates the feasibility of the software and the models in field application.

Key Words: contamination; skin factor; well test; streamline; pressure build-up curve