文章编号:1000-0747(2007)05-0609-07

多层油藏流线数值试井解释模型

吴明录, 姚军

(中国石油大学(华东)石油工程学院)

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"(990507-04-03)

摘要:基于流线方法和数值试井理论,提出了多层油藏流线数值试井解释模型。该模型主要由生产和测试两个阶段的数学模型组成:生产阶段的数学模型为黑油模型;测试阶段的数学模型为流线模型,由测试井发出的每一条流线建立的数学方程联立组成。所有模型都能够考虑各种复杂因素(多层合采/合注、生产历史、非均质性、多相流、多井影响、层间干扰等)的影响,并采用流线方法进行求解,确保了求解速度快、稳定性好,为数值试井自动拟合解释奠定了基础。通过对多层油藏典型模型的求解及其模型压力响应特征分析,验证了模型的正确性。图 6 参 24

关键词:多层油藏; 数值试井; 流线; 非均质; 两相流

中图分类号:TE353 **文献标识码**:A

Streamline numerical well-testing interpretation model for multilayered reservoirs

WU Ming-lu, YAO Jun

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

Abstract: A streamline numerical well-testing interpretation model for multilayered reservoirs is presented based on the streamline method and the numerical well-testing theory. The model consists mainly of two mathematical models, one for the production period and the other for the testing period. The former is actually a black oil model while the latter is a streamline model composed of all the mathematical equations established for each streamline traced from testing wells. All of the models can consider various influential factors (such as commingled production/injection, producing history, heterogeneity, multi-phase flow, multi-well interference, interlayer interference and so on) and be solved by the streamline method, which ensures the high calculation speed and reliable stability and thus setting a good basis for the auto-matching interpretation of numerical well-testing data. The validity of the model is proved by solving an ideal multi-layered reservoir and analyzing the model features.

Key words: multilayered reservoir; numerical well-testing; streamline; heterogeneity; two-phase flow

0 引言

多层油藏试井一直是试井理论发展的重要方向,自 1961 年 Lefkovits[1] 发表第 1 篇关于多层油藏试井的论文以来,多层油藏试井研究大体经历了以下 3 个主要阶段:①20 世纪 80 年代以前,由于分层测试技术的限制,多层油藏试井研究[1-8]仅局限于对多层合试压力数据的拟合解释。②进入 20 世纪 80 年代中期,随着分层测试技术的发展,试井研究者尝试综合运用井筒压力和分层流量数据对多层油藏的测试资料进行解释[9-11]。以上两个阶段的研究以对多层油藏试井渗流方程的解析求解为基础,以半对数分析和图版拟合为主要手段,其优点是简单易行,对硬件设备的要求不高,解释周期短;缺点是所用的模型考虑因素过于简单,均假设边界形状简单或为无限大外边界、地层渗透率和孔隙度层内均质、地层等厚、流体性质单一且不变化,而对于边界形状复杂、地层非均质、非等厚、多相流、多井干扰、多层层间干扰等复杂的多层油藏试井问题则无法进行求解。③20 世纪 90 年代至今是多层油藏试井研究的第 3 个阶段,以对多层油藏的数值试井研究[12-15]为主。数值试井作为一个完整的体系,其首要问题是要有一套合适的网格,此网格要既能描述测试井开关井后压力响应的细微变化,又能兼顾较高的计算效率。目前多层油藏数值试井理论和软件都基于二维或三维复杂网格划分,存在以下不足:一方面,把井眼作为网格块时,用一个多边形来近似代替真实的井筒,这样就使得井眼网格块和实际井筒之间存在一定的偏差;另外,由于试井问题对解的精度要求很高,在井眼附近,压力梯度变化很大,要想真实地逼近这个压力分布,网格必须高度细化,如果用一个与井眼相差

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不大的网格块去模拟井筒,那么就使得近井地带的网格划分过密,势必会大大降低数值试井解释模型的求解速度,其求解稳定性也难以满足数值试井的要求。

近几年,流线数值模拟技术已广泛应用于油藏数值模拟[16-18],其主要优势在于可实现沿流线的一维求解,因而具有较高的求解速度和精度。姚军、吴明录等[19]将流线方法与数值试井概念相结合,提出了单层油藏流线数值试井解释模型。本文在该模型的基础上,建立了多层油藏流线数值试井解释模型,模型包括2个部分:生产阶段的渗流数学模型,用于模拟生产历史过程,求得测试时刻的压力分布、饱和度分布,该阶段的模型采用简化的黑油模型;测试阶段的流线数学模型,用于模拟测试井在测试阶段的压力变化,求得测试井的理论压力响应,该阶段的模型采用流线模型,由测试井周围每一条流线建立的数学方程联立组成。两个阶段的模型都可以考虑生产历史、储集层非均质性、油水两相流、多井影响、层间干扰等复杂因素的影响,且具有较高的求解速度和精度。

1 生产阶段数学模型及其流线求解方法

1.1 数学模型的建立

数学模型基于以下假设条件:①多层油藏合采/合注;②油藏岩石具有非均质性;③油藏岩石和流体微可压缩;④油藏中存在油水两相流体,渗流符合达西定律;⑤考虑毛管压力的影响;⑥不考虑重力的影响。建立生产阶段的数学模型为:

油相压力控制方程

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

水相压力控制方程

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

$$p_c = p_o - p_w \tag{3}$$

$$S_o + S_w = 1 \tag{4}$$

初始条件:

$$p_o \big|_{t=0} = p_{oi} \tag{5}$$

$$S_w \big|_{t=0} = S_{wi} \tag{6}$$

外边界条件:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0 \quad \text{(封闭外边界)} \tag{7}$$

$$p \big|_{\Gamma} = p_e \quad \text{(定压外边界)} \tag{8}$$

内边界条件即为井的处理问题,如果在某一个网格处有井存在,则把它作为点源或点汇来处理,在对网格建立的差分方程中增加一个产量项;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[20,21]。

1.2 数学模型的求解

对生产阶段的数学模型采用流线法求解。此方法求解可将复杂的二维或三维问题转化为一系列沿着流线的一维问题,再将所有流线上的解综合起来就可以得出整个研究区域的解。与传统的油藏数值模拟计算方法相比,它具有许多优势:传统的油藏数值模拟计算方法采用相同的网格求解压力与饱和度,并且流体只能沿着网格方向流动,而采用流线方法只需沿着流线上的各流动单元将饱和度向前推移,而不需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,从而使得出的计算结果更加准确;同时,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。采用流线法的求解步骤如下:首先,采用隐式压力显式饱和度(IMPES)方法求解压力方程得到网格系统的压力分布[20,21],并根据达西定律计算每个网格界面上的速度分量:

$$v_{x(i\pm\frac{1}{2},j)} = -\lambda_{i\pm\frac{1}{2},j}(p_{i\pm1,j} - p_{i,j})/(x_{i\pm1} - x_i) \tag{9}$$

$$v_{y(i,j\pm\frac{1}{2})} = -\lambda_{i,j\pm\frac{1}{2}}(p_{i,j\pm1} - p_{i,j})/(y_{i\pm1} - y_i) \tag{10}$$

然后,采用 Pollock 方法进行流线追踪[16]。如图1所示,假设每个坐标方向上的速度场线性变化且与其他方向上的速度无关,由(9)式和(10)式求得渗流速度场之后,x 方向的速度定义为:

$$v_x = v_{x,0} + m_x(x - x_0) \tag{11}$$

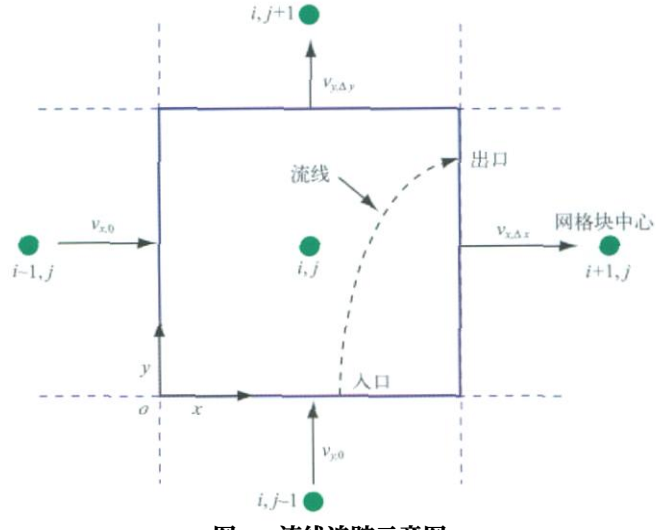

图1 流线追踪示意图

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中穿过网格块的速度梯度为：

$$m_x = \frac{v_{x,\Delta x} - v_{x,0}}{\Delta x} \tag{12}$$

速度的定义为：

$$v_x = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t \tag{13}$$

对(13)式进行积分，可得到到达 x 方向出口界面所需的时间：

$$\Delta t_{e,x} = \frac{1}{m_x}\ln\left[\frac{v_{x,0} + m_x(\Delta x - x_i + x_0)}{v_{x,0} + m_x(x_i - x_0)}\right] \tag{14}$$

同样方法可求得到达 y 方向出口界面所需的时间：

$$\Delta t_{e,y} = \frac{1}{m_y}\ln\left[\frac{v_{y,0} + m_y(\Delta y - y_i + y_0)}{v_{y,0} + m_y(y_i - y_0)}\right] \tag{15}$$

比较 x、y 方向的时间 $\Delta t_{e,x}$ 和 $\Delta t_{e,y}$，二者之中值小者即为流线到达出口界面所需的时间，即：

$$\Delta t_e = \min(\Delta t_{e,x}, \Delta t_{e,y}) \tag{16}$$

其所代表的方向即为流线出口的方向。在得到了流线出口方向后，出口的确切位置由下式确定：

$$x_e = x_0 + \frac{1}{m_x}[v_{x,i}\exp(m_x\Delta t_e) - v_{x,0}] \tag{17}$$

$$y_e = y_0 + \frac{1}{m_y}[v_{y,i}\exp(m_y\Delta t_e) - v_{y,0}] \tag{18}$$

重复前面的追踪过程可得到流线从注入井到生产井的完整路径。将网格参数转化到流线节点上，并对饱和度方程进行坐标变换[16]：

$$\phi\frac{\partial S_w}{\partial t} + \vec{u}_t \cdot \nabla f_w = 0 \tag{19}$$

$$\vec{u}_t \cdot \nabla = \phi\frac{\partial}{\partial \tau} \tag{20}$$

$$\tau = \int_{沿流线}\frac{\phi(\zeta)}{\|\vec{u}_t\|}\mathrm{d}\zeta \tag{21}$$

将(20)式代入(19)式，可实现对(19)式的坐标变换，将饱和度方程由网格坐标转换为流线坐标的形式：

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial f_w}{\partial \tau} = 0 \tag{22}$$

以上便完成了饱和度方程由网格坐标向流线坐标的转化，对(22)式可以进行差分求解，由于对(22)式的求解是一维的，因而数值弥散小、误差易于控制，具有较好的稳定性。在整个求解过程中，如果增加新井或关井则流线发生变化，此时需将流线上参数转化为网格上的参数，采用上述计算步骤重新更新流线和计算饱和度。

2 测试阶段流线数学模型的建立及求解

2.1 流线数学模型的建立

测试阶段流线数学模型的建立考虑测试井的井筒存储效应和表皮效应、岩石和流体的压缩性，忽略重力和毛管压力的影响。

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为：

$$\frac{1}{l_{n,m}}\frac{\partial}{\partial l_{n,m}}\left(\alpha l_{n,m}\frac{\lambda_{n,m}}{\phi_{n,m}}\frac{\partial p_{n,m}}{\partial l_{n,m}}\right) = \alpha C_t\frac{\partial p_{n,m}}{\partial t}$$
$$(m = 1,2,\cdots,M;\ n = 1,2,\cdots,N_m) \tag{23}$$

内边界条件：考虑井筒储存效应和表皮效应。对于井筒储存内边界，按测试井为生产井和注水井两种情形分别进行考虑。

生产井井筒储存内边界条件：

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N_m}\frac{2\pi}{N_m}r_w h_m\left(\lambda_{n,m}\frac{\partial p_{n,m}}{\partial l_{n,m}}\right)_{l_{n,m}=r_w} = q + C\frac{\mathrm{d}p_{wf}}{\mathrm{d}t} \tag{24}$$

注水井井筒储存内边界条件：

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N_m}\frac{2\pi}{N_m}r_w h_m\left(\lambda_{n,m}\frac{\partial p_{n,m}}{\partial l_{n,m}}\right)_{l_{n,m}=r_w} = -q + C\frac{\mathrm{d}p_{wf}}{\mathrm{d}t} \tag{25}$$

表皮内边界条件(井底流动压力联立条件)为：

$$p_{wf} = p_{w(n,m)} - r_w S_m\left(\frac{\partial p_{n,m}}{\partial l_{n,m}}\right)_{l_{n,m}=r_w}$$
$$(m = 1,2,\cdots,M;\ n = 1,2,\cdots,N_m) \tag{26}$$

地下流量计算式为：

$$q_m = \sum_{n=1}^{N_m}\frac{2\pi}{N_m}r_w h_m\left(\lambda_{n,m}\frac{\partial p_{n,m}}{\partial l_{n,m}}\right)_{l_{n,m}=r_w}$$
$$(m = 1,2,\cdots,M) \tag{27}$$

试井解释模型的外边界(即流线的终止端)按流线终点的位置分为油(水)井外边界和油藏外边界两类：对于油(水)井外边界情形，指流线从测试井出发在另外的油(水)井停止，此时的外边界条件即为流线终止端油(水)井的工作条件；对于油藏外边界情形，指流线在油藏边界处停止，包括定压边界和封闭边界，与常规试井解释模型相同。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 流线数值试井解释模型的求解

测试阶段流线数学模型的求解需要把与测试井有关的所有层上的所有流线数学方程联立起来一起求解。对于一个总层数为 M 的油藏,假设每层内由测试井发出的流线条数为 $N_m(m = 1,2,\cdots,M)$,每条流线的节点数为 $J_n(n = 1,2,\cdots,N_m)$,则试井模型中节点压力未知数的个数为 $N_t = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N_m} J_n$,若每层的表皮系数不相等,则未知表皮系数的个数为 M,再加上 1 个未知井筒储存系数,总的未知数个数为 $N_t + M + 1$。

以上流线数值试井解释模型有解且解唯一的条件是:方程的个数等于未知数的个数,即需要 $N_t + M + 1$ 个方程。由(23)式可得到 N_t 个方程,由(24)式或(25)式可得到 1 个方程,由(26)式可得到 M 个方程,则总的方程个数为 $N_t + M + 1$,等于未知数的个数,即满足解的存在性条件,则对(23)式至(26)式求解可得到测试井测试阶段唯一确定的理论压力响应,对该压力响应和实测压力数据进行自动拟合即可得到测试井控制区域的试井参数[22-24]。

3 典型模型压力响应特征分析

文献[19]通过求解均质无限大油藏典型模型验证了单层油藏流线试井解释模型的正确性。为了验证本文模型的正确性,建立了 3 层油藏典型模型,油藏及井的基础参数为:油藏长为 840m,宽为 600m,油藏外边界为定压边界,初始含水饱和度为 30 %,初始压力为 14.5MPa,自上而下各层的渗透率分别为 0.2D、0.3D、0.4D,孔隙度均为 20 %,砂层厚度均为 5m;I1 井、I2 井、I3 井、I4 井为注水井,3 层合注,总注入量均为 100m^3/d;P1 井、P2 井、P3 井、P4 井、P5 井为生产井,多层合采或单层开采,总产液量均为 60m^3/d,P1 井的生产层位为第 1、第 2、第 3 层,P2 井的生产层位为第 2、第 3 层,P3 井的生产层位为第 1、第 3 层,P4 井的生产层位为第 1、第 2 层,P5 井的生产层位为第 2 层。

本文以 P1 井、I1 井为例,通过对流线试井解释模型的压力响应特征分析验证其正确性。

利用本文方法对上述典型模型进行求解,得到了测试时刻研究区域的流线分布和各井的压力响应曲线。

图 2 至图 4 为各层内含油饱和度在流线上的分布情况。每条流线上含油饱和度的变化规律反映了注入井从各个方向对原油的驱替效果:第 3 层的渗透率最大,驱替效果最好,在经过相同的开采时间后,含油饱和度最低;在每层内位于注入井之间的区域(压力平衡区),压力梯度小,流体流动缓慢,因而驱替效果差,含油饱和度高。

图 5 为 P1 井的压差和压差导数双对数曲线。可见,P1 井的压差导数曲线表现为 4 个阶段:早期,受井筒储存效应的影响,压差和压差导数曲线呈单位斜率直线段;中期为径向流阶段,压差导数曲线为水平直线段,在早期和中期,未出现层间干扰和边界影响,压力响应与单层油藏情形相同;中、后期,压差导数出现凹陷,这是由于油水两相流以及多层合采造成的层间干

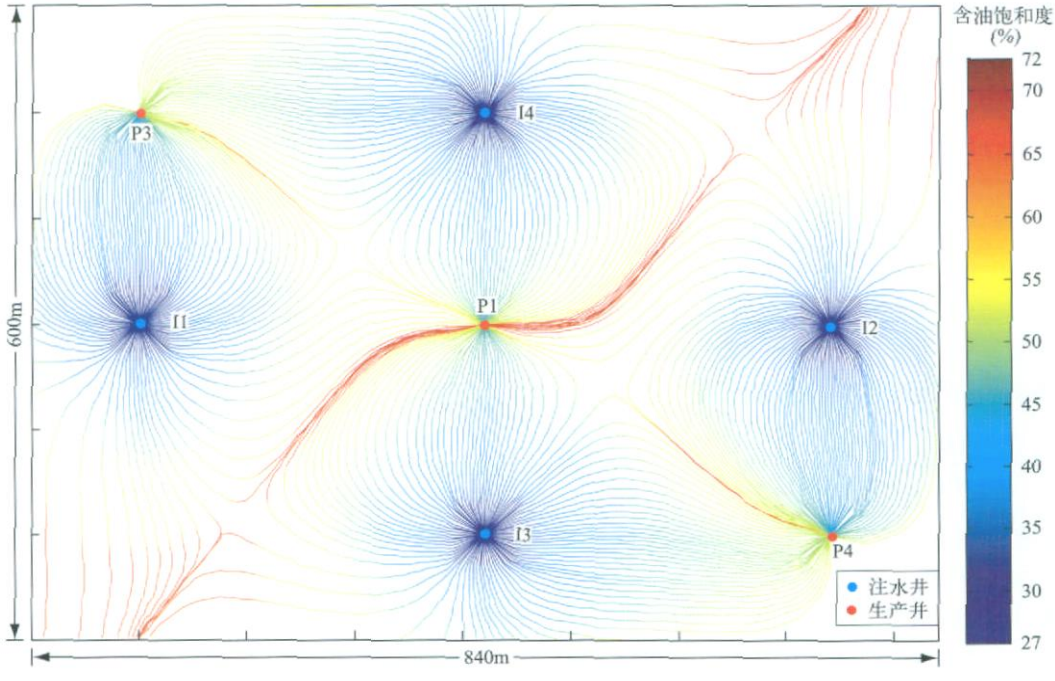

图 2 含油饱和度在第 1 层流线上的分布图

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

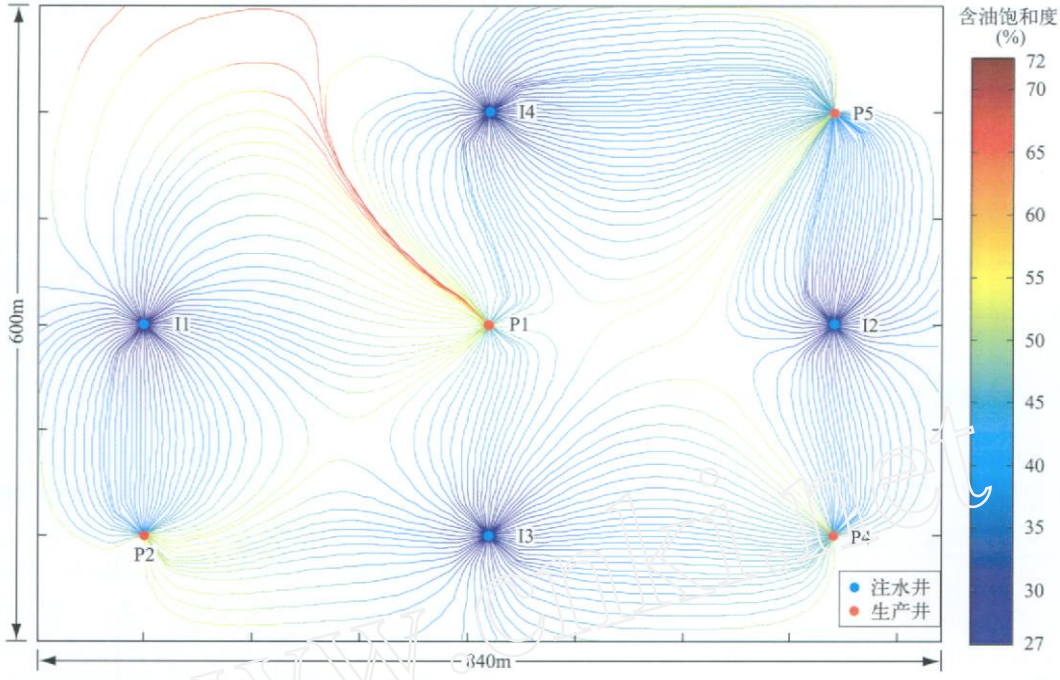

图 3　含油饱和度在第 2 层流线上的分布图

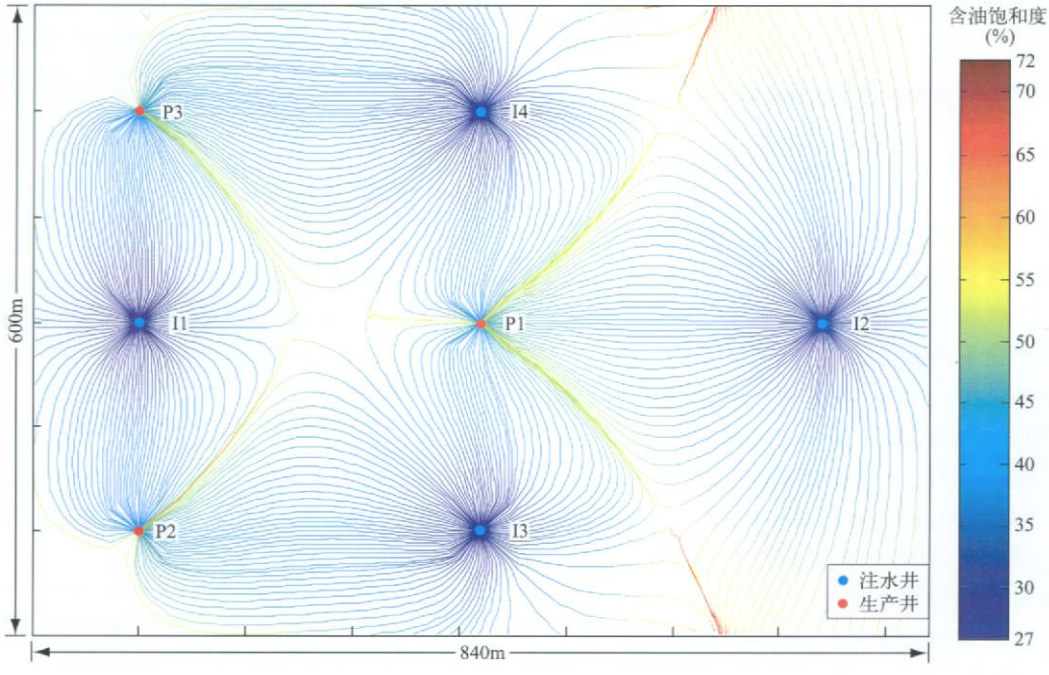

图 4　含油饱和度在第 3 层流线上的分布图

扰的影响;晚期,压差导数跌落,表现为定压外边界特征,因为该井完全被其周围的注水井控制,流线不能到达油藏边界,油藏定压边界对其无影响,因而这是注水井所形成的拟定压边界对其造成的影响。

图 6 为 I1 井的压差和压差导数双对数曲线。I1 井的压力响应曲线也表现为 4 个阶段:早期,受井筒储存效应的影响,压差和压差导数曲线呈单位斜率直线段;中期为径向流阶段,压差导数曲线呈水平直线段;在早期和中期,未出现层间干扰,压差导数曲线特征与单层油藏情形相同;中、后期,由于生产井的影响,压差导数曲线上翘;晚期,由于油藏定压外边界的影响,当压力传播到边界以后,井筒(内边界)与外边界之间形成恒定的压力差,油藏中出现"拟稳态流动",压力不随时间变化,因而导致压差导数曲线下落。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

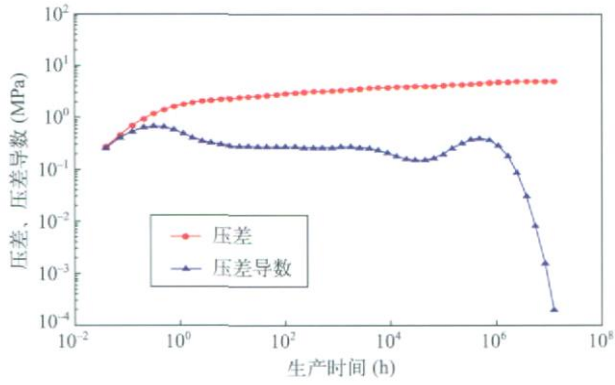

图 5 P1 井压差与压差导数双对数图

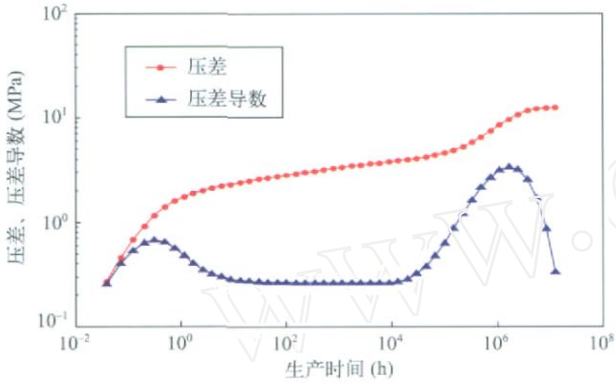

图 6 I1 井压差与压差导数双对数图

4 结论

研究了多层油藏流线数值试井解释模型,该模型能够考虑多层合采(合注)、生产历史、非均质性、油水两相流、多井干扰、分层表皮系数等因素影响,比现有试井解释模型更接近油藏真实渗流环境。

对模型采用流线方法进行求解,一方面因为求解是一维的,因而具有较高的求解速度和稳定性,便于实现计算机自动拟合,降低多层油藏试井解释的多解性;另一方面,从含油饱和度在各条流线上的分布情况,可以发现驱替过程中油藏内沿各流线方向的驱替规律,为水驱优化及井网调整提供依据。

建立了多层油藏典型模型,通过对其求解并分析压力响应特征,验证了本文模型的正确性。

符号注释:

K——绝对渗透率,D; K_{ro}, K_{rw}——油、水相对渗透率,无因次; p_o, p_w, p_c, p_{oi}, p_e——油相压力、水相压力、毛管压力、初始油相压力、定压外边界的恒定压力,10^{-1} MPa; q_w——以质量计的单位时间内单位地层体积的注水(产水)量,g/(cm^3 ·s); p——油藏压力,10^{-1} MPa; n——法线方向; q_o——以质量计的单位时间内单位地层体积的产油量,g/(cm^3 ·s); q——测试井测试时的稳定产液(注水)量,g/s; S_o, S_w, S_{wi}——油、水相饱和度和初始含水饱和度,%; ϕ——地层孔隙度,%; ρ_o, ρ_w——地层条件下油、水的密度,g/cm^3; t——生产时间,s; Δt_e——到达网格出口界面所需时间,s; $\Delta t_{e,x}$, $\Delta t_{e,y}$——到达 x、y 方向出口界面所需的时间,s; μ_o, μ_w——油、水的黏度,mPa ·s; v_x, v_y——x 和 y 方向的渗流速度分量,cm/s; m_x, m_y——x 和 y 方向的渗流速度梯度,s^{-1}; x_i, x_e——x 方向的入口和出口横坐标,cm; y_i, y_e——y 方向的入口和出口纵坐标,cm; $\bar{\mu}$——油水两相总渗流速度,cm/s; ζ——沿流线的曲线坐标,cm; τ——沿流线的传播时间,s; f_w——含水率,%; C_t——总压缩系数,(10^{-1} MPa)$^{-1}$; r_w——测试井井眼半径,cm; C——井筒储存系数,cm^3/(10^{-1} MPa); $l_{n,m}$——m 层内沿第 n 条流线的曲线坐标,cm,曲线坐标系的原点定义为测试井位置; $p_{n,m}$——m 层内第 n 条流线上的压力值,10^{-1} MPa; $\phi_{n,m}$——第 m 层内第 n 条流线上的孔隙度,%; $\lambda_{n,m}$——第 m 层内第 n 条流线上的油水两相总流度,D/(mPa ·s); p_{wf}——井底流动压力,10^{-1} MPa; $p_{w(n,m)}$——m 层内沿第 n 条流线上第一个节点的压力值,10^{-1} MPa; h_m——第 m 层内测试井井点处的砂层厚度,cm; S_m——第 m 层表皮系数,f; M——油藏的总层数; N_m——第 m 层油藏内的总流线数; J_n——第 m 层油藏内第 n 条流线的总节点数; N_t——所有层内所有流线的总节点数; α——系数,对于非等厚地层其值等于地层的砂层厚度,对于等厚地层其值等于 1; Δx, Δy——x 和 y 方向的网格步长。下标: m——层序号, n——流线序号; 0——入口界面。

参考文献:

[1] Lefkovits H C, Hazebroek P, Allen E E, et al. A study of the behavior of bounded reservoirs composed of stratified layers[A]. SPE 1329, 1961.

[2] Tariq S M, Ramey H J. Drawdown behavior of a well with storage and skin effect communicating with layers of different radii and other characteristics[A]. SPE 7453, 1978.

[3] Gringarten A C. Interpretation of tests in fissured and multilayered reservoirs with double-porosity behavior theory and practice [A]. SPE 10044, 1984.

[4] Prijambodo R, Raghavan R, Reynolds A C. Well test analysis for wells producing layered reservoirs with crossflow [A]. SPE 10262, 1985.

[5] GAO C T. The crossflow behavior and the determination of reservoir parameters by drawdown tests in multilayer reservoirs [A]. SPE 12580, 1983.

[6] GAO C T. Determination of parameters for individual layers in multilayer reservoirs by transient well tests [A]. SPE 13952, 1987.

[7] 张望明,韩大匡,连淇祥,等. 多层油藏试井分析[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(3): 63-66.

[8] 孙贺东, 周芳德. 单层开采的圆形定压边界两层油藏压力动态分析[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 92-94.

[9] Kuchuk F J, Shah P C, Ayestaran L, et al. Application of multilayer testing and analysis: A field case [A]. SPE 15419, 1986.

[10] Ehlig-Economides C A, Joseph J. A new test for determination of

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

individual layer properties in a multilayered reservoir [A]. SPE 14167 ,1987.

[11] Pascal Bidaux, Whittle T M, Coveney P J, et al. Analysis of pressure and rate transient data from wells in multilayered reservoirs theory and application[A]. SPE 24679, 1992.

[12] Jackson R R, Banerjee R. Advances in multilayer reservoir testing and analysis using numerical well testing and reservoir simulation [A]. SPE 62917, 2000.

[13] 廖新维,沈平平. 现代试井分析[M]. 北京:石油工业出版社,2002.

[14] 刘立明,陈钦雷. 三维两相流数值试井模型[J]. 石油大学学报(自然科学版),2003,27(6):42-45.

[15] 吴洪彪,佟斯琴,兰丽凤. 考虑层间窜流的多层多相数值试井方法研究[J]. 大庆石油地质与开发,2003,22(6):40-44.

[16] 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] Thiele M R,Batycky R P,Blunt M J. A streamline-based 3D field-scale compositional reservoir simulator[A]. SPE 38889, 1997.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 刘慧卿. 油藏数值模拟方法专题[M]. 东营:石油大学出版社,2001. 80-102.

[22] 班书昊,杨慧珠. 小生境遗传算法在孔隙介质反演中的应用研究[J]. 石油勘探与开发,2005,32(2):78-81.

[23] 王西文,刘全新,吕焕通,等. 储集层预测技术在岩性油气藏勘探开发中的应用[J]. 石油勘探与开发,2006,33(2):189-193.

[24] 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.

第一作者简介:吴明录(1978-),男,山东潍坊人,现为中国石油大学(华东)油气田开发工程专业博士研究生,主要从事数值试井和油藏数值模拟方面的研究工作。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:w97612 @163.com

收稿日期:2006-06-21　　**修回日期**:2007-05-31

(编辑　郭海莉　　绘图　李秀贤)

书　讯

《能源:历史回顾与 21 世纪展望》出版发行

Amos Salvador 先生所著,赵政璋、胡素云、李小弟翻译的《能源:历史回顾与 21 世纪展望》一书由石油工业出版社出版发行。

该书综合了非常宝贵的、详细的世界人口、能源消费方面的历史统计数据,以及目前所掌握的现在和未来能源方面的信息,建立并描述了未来能源消费的变化趋势,提供了 21 世纪能源消费方式、数量以及哪些主要能源能满足这些消费需求的宏观预测。

近年来,随着中国国民经济的持续、快速发展,中国能源供应不足的矛盾日益凸显。

2003 年中国石油消费量首次超过日本,成为世界第二大石油消费国;2004 年更是在国际油价屡创历史新高的情况下,石油净进口量达到了 1.437 亿吨,不仅石油进口量突破了 1 亿吨大关,而且占到了当年中国石油消费总量的 45 %左右。与此同时,国内部分地区的煤炭、电力也相继出现供应短缺。一时间,煤、电、油的短缺问题见诸于各类报端,国际上也开始出现"中国能源威胁论",并把国际油价的持续走高归因于中国大量进口石油所致,国内一些并不熟悉情况的专家、学者又在不同场合发表了一些过于夸大的言论,加上部分媒体的炒作,使得中国的能源问题一度成为大家普遍关注的热点话题。

该书通过对大量历史数据的统计分析,客观描述了世界主要能源消费国的能源消费历史,展望了世界未来能源发展趋势。该书中文版的出版,不仅有助于国内学者和研究人员了解世界能源的消费历史和未来发展趋势,而且书中涉及的内容对研究中国能源发展方向,建立适合中国基本国情的能源发展模式,具有非常有益的借鉴意义。

本书主要内容共分五部分。第一部分,绪论;第二部分,讨论自 20 世纪中叶以来,人口规模和人口增长率、能源消费和能源消费总量的变化趋势;第三部分,将人口和能源消费历史趋势外推至 21 世纪,展望 21 世纪世界能源的变化趋势;第四部分,重点论述世界过去供给的能源资源和未来最有可能供应的能源资源;第五部分,讨论世界电力的生产和消费历史,预测未来电力资源的发展趋势;第六部分,探讨 21 世纪世界能源消费的 5 种情景以及未来可能的能源来源。

(王大锐　供稿)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net