

三角形油藏中探边测试的研究及应用

刘曰武*

(中国科学院力学研究所)

薛敬利 纪友亮

(石油大学 华东)

摘要 提出了三角形油藏在不同边界条件下的试井理论模型,并用有限元方法对问题进行了求解,得到了不同情况下的试井理论曲线。用这些理论曲线对某油田的实际测试井例进行了分析,得到与地质资料吻合较好的分析结果。为探边测试找到了一条数值求解的新思路。

关键词 探边测试 试井 数值解 不稳定流动

资料吻合较好的分析结果。

前 言

探边测试 (Reservoir Limit Test, Limited Well Test 或 Extended Well Test) 是在 20 世纪 60 年代提出的,近十几年中发展迅速。主要的原因是:这项技术能够通过地层原位测试,在不破坏地层动力场的情况下获得地层的众多信息,如地层的压力能量状况、地层的渗透能力、钻井对地层的污染状况、地层中是否存在边界,以及边界距离是多少、地层的原油储量如何等等。通过对探边测试资料的解释,为油田勘探开发的决策提供可靠的信息。

以前的研究所使用的主要理论是解析解理论和半解析解理论,部分使用了数值计算理论^[1~3]。1998年,Stephen^[4]对砂岩油藏中实际地质断层的试井曲线特征进行了模拟分析。同年,Helmy 和 Wattenbarger^[5]对复杂定压边界油藏试井分析提出了新的试井分析形状因子。2000年,Guo Boyun 和 Westaway^[6]对复杂形状油藏的不稳定试井分析进行了研究。2001年,Zhao Gang 和 Thompson^[7]对封闭混采油藏试井问题进行了研究。2000年 Archer and Roland N. Horne^[8]用 Green 元函数方法研究了复杂边界问题的数值解法。2001年,刘曰武等^[9~10]用数值试井方法研究了圆形油藏不稳定试井问题。

本文在这些研究的基础上,提出了三角形油藏在不同边界条件下的试井理论模型,并用有限元方法对问题进行了求解。用所得到的理论曲线对某油田的一口实际测试井例进行了分析,得到了与地质

基本模型描述

油藏为水平板状的、均质各向同性的三角形油藏;并在三角形油藏中的任意位置,贯穿地层并以一定产量生产;地层中流体为弱可压缩、定常粘度的牛顿流体;流体在地层中的流动为层流状态,遵从达西定律;整个测试过程是一个等温过程,忽略重力作用,不考虑其它物理化学变化的影响。在此描述下的试井数学模型可以表示为以下形式,即

控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial X_D^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial Y_D^2} = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (X_D, Y_D) \quad (1)$$

$$\text{初始条件:} \quad p_D(t_D = 0) = 0 \quad (2)$$

外边界条件:

$$\text{定压边界条件:} \quad p_D|_d = 0 \quad (3)$$

$$\text{封闭边界条件:} \quad \frac{\partial p_D}{\partial n}|_f = 0 \quad (4)$$

$$\text{内边界条件:} \quad \frac{\partial p_D}{\partial n}|_{iD} = -1 + \frac{\partial p_{wD}}{\partial t_D} \quad (5)$$

式中: ——所研究油藏;

d ——定压边界;

f ——封闭边界;

iD ——内边界。

模型求解和理论曲线分析

首先,可以构造计算区域内每个网格单元的有

* 刘曰武,男,博士后,副研究员,从事渗流力学研究工作。地址:北京市海淀区中关村15号中国科学院力学研究所,邮政编码:100080。

限元方程,表达式如下:

$$\iint_{\Delta} \left[\frac{\partial^2 p_D^e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_D^e}{\partial y^2} - \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D^e}{\partial t_D} \right] dA = 0$$

$$i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中: p_i^e ——单元插值函数;

p_D^e ——计算单元每个结点上的压力。

然后,集成整体矩阵,求得整体矩阵的解,从而得到每个结点上的压力值。单井在三角形混合边界油藏中的理论曲线如图 1 所示。

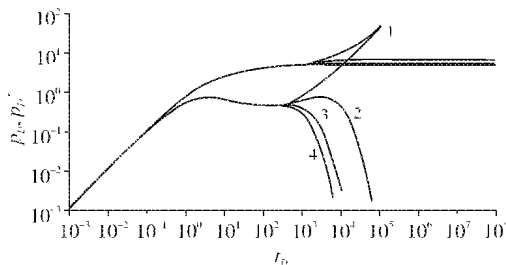


图1 单井在三角形混合边界油藏中的理论曲线

从总的特征看,油藏的边界形状对早期的试井理论曲线并没有多大影响。压力和压力导数曲线的早期仍然是由井筒储存效应和表皮效应控制的阶段。在最早的井筒控制阶段,压力和压力导数曲线都是斜率为 1 的直线段;在曲线的中期,压力导数曲线都是接近于水平的曲线,压力导数的数值接近于 0.5;但对于晚期阶段,由于边界性质不同,曲线的形态发生了巨大的变化。

在图 1 中,曲线 1 代表的是三角形边界全封闭的情况,在压力导数曲线的末端两条曲线合并为一条斜率为 1 的直线段;曲线 2 代表的是三角形边界两边封闭、一边定压的情况。从图中可以看出,压力导数曲线由接近于平行发展到上翘,最后在压力导数曲线的末端完全下掉,此时压力曲线变为水平,说明定压边界起到了决定性的作用;曲线 3 代表的是三角形边界两边定压、一边封闭的情况。从图中可以看出,压力导数曲线由接近于平行发展到压力导数曲线的逐步下掉,在曲线完全下掉时压力曲线变为水平,说明定压边界起到了决定性的作用;曲线 4 代表的是三角形边界三边全定压的情况。从图中可以看出,压力导数曲线由接近于平行发展到压力导数曲线的完全下掉。

对于不同的三角形边界形状,理论曲线会反映出不同的特征。总的规律是封闭边界使理论曲线上翘、定压边界使理论曲线下掉。图 2 给出了另外一

种三角形边界的试井理论曲线的计算情况。

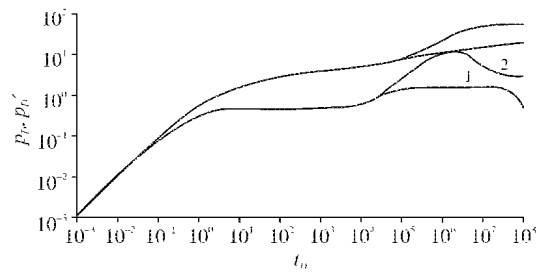


图2 单井在钝角三角形油藏中的理论曲线

图 2 中曲线 1 和 2 分别代表的是钝角三角形区域油藏中有一条定压边界条件下的压力导数曲线的情况,两者的差别在于与定压边界的距离不同。

实际井例分析

为了验证理论算法的正确性,并说明模型的特征,选择了某油田一口探边测试井测试资料进行分析。在测试前,已知这口井打在一个夹角断层上,且产量下降很快。测试的目的主要是确定是否有第三条边界存在,从而确定该小区块的产能。

整理好测试数据,随后对曲线做出定性分析。主要结论如下: 曲线的早期,压力和压力导数曲线相交在一起,呈斜率为 1 的一直线段,说明井筒储存影响明显,并且控制了早期测试资料; 在井筒储存段过后,压力导数曲线上有一个凸峰,说明该井存在一定的污染。根据压力导数早期上凸峰的大小和压力与压力导数两曲线的开口可知污染程度不大; 在凸峰过后,压力导数曲线上存在一条水平直线段,说明径向流已经出现,利用此段可以确定地层的渗透率值。同时,根据水平段的值,以及井的产量可以判断地层性质的好坏; 在压力导数曲线上水平直线段后,压力导数曲线上翘,从上翘的斜率和达到的最大值可以判断,该井位于封闭性夹角断层内; 在压力导数曲线上翘后,又出现了第二个水平直线段,说明系统达到了拟稳定状态; 在测试曲线的最后段,压力变化平稳,压力导数曲线下掉,说明压力波遇到了定压边界或相邻的注水井的影响。

在定性分析结论的基础上,利用试井软件对该井进行了解释,压力恢复双对数压力及压力导数拟合图如图 3 所示,无因次叠加图如图 4 所示。所得

到的解释结果分别为:井筒储集系数 $C = 0.629 \text{ m}^3/\text{MPa}$, 表皮系数 $S = 0.6$, 渗透率 $k = 93 \text{ md}$, 地层压力 $p = 15.68 \text{ MPa}$; 第一不渗透边界距离 $L_1 = 72 \text{ m}$, 第二不渗透边界距离 $L_2 = 95 \text{ m}$, 定压边界距离 $L_3 = 190 \text{ m}$, 两不渗透边界的夹角 $\alpha = 105^\circ$ 。该井解释采用均质油藏具有井筒储存和表皮效应的三角形混合边界模型。通过地质调查发现, 该油井周围存在两条封闭断层, 另一井位于该井西偏北 300 m 处, 钻遇水层, 说明该井附近存在一个水体边界也是完全可能的。因此, 选用三角形混合边界模型从地质上也是完全符合的。

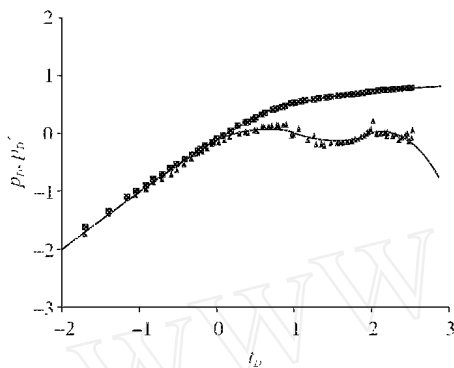


图3 双对数压力及压力导数拟合图

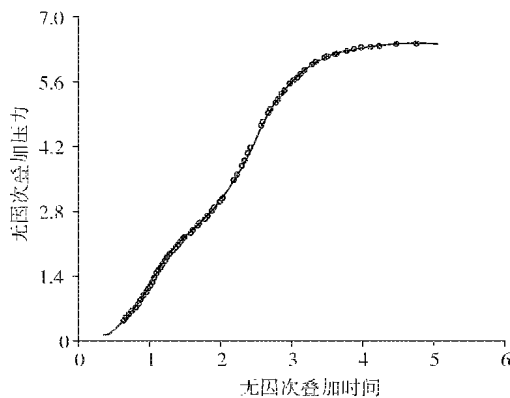


图4 无因次叠加拟合图

结 论

1. 本文提出了三角形油藏在不同边界条件下的试井理论模型, 并用有限元方法对问题进行了求解, 得到了不同情况下的试井理论曲线。

2. 用这些理论曲线, 对某油田的一口实际测试井例进行了分析, 得到了与地质资料吻合较好的分析结果。

参 考 文 献

1. 《中国油气井测试资料解释范例》编写组:《中国油气井测试资料解释范例》, 石油工业出版社(北京), 1994。
2. M. A. Sabet: Well Test Analysis, 1991, ISBN 0 - 87201 - 584 - X.
3. Ditzs, D. N.: Determination of Average Reservoir Pressure from Build Up Surveys, J. Pet. Tech. (Aug, 1965) 955 - 959.
4. Stephen, K. M.: Simulation of Transient Well - Test Signature for Geologically Realistic Faults in Sandstone Reservoirs, SPEJ March 1998, or SPE 38442.
5. Helmy, M. W., Wattenbarger, R. A.: New Shape Factors for Well Produced at Constant Pressure, SPE 39970, presented at the 1998 SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Canada, March, 1998.
6. Guo Boyun, Westaway, Peter and Jacquemont, Jerome: Field Case Studies of Pressure Transient Data from Complex Reservoirs, SPE 63308, presented at the 2000 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 2000.
7. Zhao Gang and Thompson, Leslie G.: Transient Pressure Analysis of Bounded Communicating Reservoirs, SPE 71032, presented at the SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, Keystone, Colorado, May 2001.
8. Rosalind A. Archer and Roland N. Horne: The Green Element Method for Numerical Test Analysis, October 2000, SPE 62916.
9. 周蓉, 刘曰武: 均质圆形定压油藏不稳定渗流的数值解, 油气井测试, 2001(6) 10:1~4。
10. Zhou Rong, Liu Yuewu, Zhou Fuxin: Numerical Solutions for the Transient Flow in the Homogeneous Closed Circle Reservoirs, Acta Mechanica Sinica. 2003, 19:4045.

本文收稿日期: 2003 - 01 - 18 编辑: 刘振庆

WELL TESTING (YOUQING CESHI)

Vol. 12 No. 2 (Serial No. 76) 2003

Abstracts**·Research of Theory & Method ·****A New Method to Determine Open Flow Potential of Gas-wells under Deferent Formation Pressure.** 2003 (2) 12 : 1 ~ 2*Hao Yuhong (Exploration and Development Research Institute , Changqing Oilfield Company , Ltd.) , Zhang Yun (Hole-down Technique Operation Department , Changqing Petroleum Exploration Bureau)*

In order to gain the open flow potential of gas-wells under deferent formation pressure ,based on the general gas-wells productivity equation ,the relation formula between formation pressure and open flow potential deduced. If we have known the open flow potential under some formation pressure when gas-wells productivity testing ,gas viscosity in deferent performance pressure and the variation led to by its deviation are thought over ,the present open flow potential will be gained by the formula. The examples indicate that the method is very simple in operate and the result is reliable.

Subject heading : gas well ,formation pressure ,open flow capacity ,binomial ,viscosity ,deviation factor**Study and Application for the Reservoir Limit Test in the Triangular Reservoir.** 2003 (2) 12 : 3 ~ 5*Liu Yewu (Institute of Mechanic , Chinese Academy Sciences) , Xue Jingli , Ji Youliang (Petroleum University ·Shang-dong)*

A new well test model for the triangular reservoir with different boundary conditions is developed in this paper. The typical curves for the new model are calculated by the FEM method. One well test data in some oilfield is analyzed by using the type curves calculated in this paper and suitable results are reached ,which are agreed with the geological character of the reservoir. This research apply anew tool for the reservoir limit test.

Subject heading : reservoir limit test ,well test ,numerical solution ,transient flow**A Study on Gas Well Production Rate Forecasting.** 2003 (2) 12 : 6 ~ 8*Wang Jiang (China Geology University ·Beijing) , Wang Yuying (Daqing Petroleum Institute)*

By using the production test dynamic data from exploratory wells ,both coefficients and its influencing factors in the gas well potential model are studied. A reasonable algorithm of flow capacity is established by the statistics method. However , the equation of the gas well potential is better applied in the early exploration period. A theoretical basis for the gas well production test design is presented.

Subject heading : gas well ,productivity coefficient ,prediction ,statistical analysis ,effective thickness**A Method Study for Predicting Oil Well Steady-State Deliverability by Applying Formation Testing Flow Period Data.** 2003 (2) 12 : 9 ~ 11*Yu Bijun , Mao Wei , Wang Chunrui (Exploration and Development Research Institute , Daqing Oilfield Company , Ltd.)*

The paper presents a new method for predicting oil well steady-state deliverability based on flow period data. Specific productivity index is used as comparative parameter. The calculation of specific productivity index for testing is derived. The correlation between specific productivity index for testing and specific productivity index for production has been established by using regression analysis. The steady-state deliverability of other wells has been predicted by applying the established correlation. Error analysis indicates that the predicting results are correct.

Subject heading : formation testing ,oil well productivity ,specific productivity index ,regression analysis**A New Method for Processing Gas Well Testing Data with the Change of Formation Pressure.** 2003 (2) 12 : 12 ~ 13*Li Yongming , Zhao Jinzhou , Guo Jianchun (Southwest Petroleum Institute) , Li Lianming , Yu Haojie (No. 2 Gas Production Company of Changqing Oilfield)*

The absolute open flow predicting from testing is the basis of gas well producing. When treating well testing data ,we found that the absolute open flow from the Two-Coefficient Equation was smaller than that from producing and that the practical productivity of some wells was nearly equal to or greater than the absolute open flow. Shown from research ,the main reason for smaller absolute open flow is the decrease of average formation pressure during well testing. A new method for processing gas well testing data was studied with considering the change of formation pressure. The results from case study