

文章编号: 0253-2697(2011)04-0683-04

具有补给的气藏物质平衡方程及动态预测

孙贺东^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007; 2. 中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要:传统的物质平衡方法将整个气藏当作一个容器,忽略了地层的非均质性以及渗流阻力,在使用二项式产能方程和物质平衡方程对非均质低渗透气藏进行早期动态预测时,指标总是偏向乐观。针对该问题,假设气藏被一低渗透条带分为两个相互联系的相对均质区块,根据质量守恒原理,利用半透壁模型建立了具有补给的非均质气藏物质平衡方程及动态预测理论模型。该模型不但考虑了气田区域性非均质变化因素以及流动阻力,使物质平衡模型更加接近实际,又可简单快捷地预测气井动态变化趋势,揭示了两区内压力、产量随时间变化规律。实例计算结果表明:该模型能够改善早期动态预测结果,各项指标接近生产实际。

关键词:低渗透气藏;物质平衡;半透壁模型;非均质开采;动态预测

中图分类号:T E332

文献标识码:A

A balance equation of gas materials with recharge capacity and their performance prediction

SUN Hedong^{1,2}

(1. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The traditional method of material balance takes a gas reservoir as a container, while the heterogeneity and seepage flow resistance of strata are commonly neglected. Therefore, the results generally tend to be optimistic when the binomial deliverability and material balance equations are employed to predict the early performance of heterogeneous low permeability gas reservoirs. Aiming at solving this issue, we assumed that a gas reservoir could be divided into two interconnected and relatively homogeneous blocks by a low permeability zone. According to the mass conservation law, a balance equation of gas materials with recharge capacity and a dynamic prediction model for their performance were established using the semi permeable wall model. The proposed model has considered the regional heterogeneity and flow resistance of gas reservoirs, making the material balance model much closer to practical cases and capable of easily and quickly predicting a trend of dynamic variations in gas wells. In addition, varying rules of pressure time and rate time relationships in these two blocks could be revealed in this model. Data calculated from real cases indicated that the proposed model could improve the prediction result of the early performance and various indicators derived from the model were close to the production practice. Therefore, this study is of instructive significance in rational and effective development of similar gas reservoirs.

Key words: low permeability gas reservoir; material balance; semi permeable wall model; unbalance recovery; performance prediction

气藏生产动态预测作为气田开发管理的核心工作,贯穿气田开发的始终。气田早期动态预测通常使用物质平衡法^[1-7]及数值模拟法。传统物质平衡法将气田看作一个均质容器,忽略气藏的非均质性影响,其预测指标总是偏向乐观。数值模拟法要求详尽的地层参数分布,这在气田开发早期是难以得到的。生产迫切需要一种介于二者之间的气藏早期动态研究方法,它既能考虑气藏的区域性非均质变化,又可以简单快捷地计算气藏动态变化趋势。近年来国外^[8-12]开展了有关气藏分块互补物质平衡法的研究工作,将此理论用于实际气藏的动态研究和参数确定,并将其计算结果与数值模拟法对比,研究结果说明了分块互补物质

平衡法的可靠性和实用性。高承泰^[13-16]在传统物质平衡法的基础上发展出全新的分块互补物质平衡法理论,它是对传统物质平衡法的发展和改进,初步解决了区域非均质性的问题,但是区块间补给系数修正参数的取值缺乏理论依据。胡勇等^[17]结合低渗透气藏开发实际,建立了平面非均质储层供气机理物理模拟模型(“串联”模型),开展室内物理模拟实验,阐述了非均质低渗透气藏的产量、压力、采收率等实验现象,但缺乏理论方面的论述。笔者针对非均质气藏建立了一套比较符合实际、能够改善早期动态预测结果的理论方法,它既考虑区域性非均质变化因素,又可简单快捷地预测气井动态变化趋势,从而指导气藏的合理有效开发。

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05013)和石油科技中青年创新基金(2009-A-17-15)项目联合资助。

作者简介: 孙贺东,男,1973年11月生,2004年获西安交通大学工学博士学位,现为中国石油勘探开发研究院廊坊分院开发所高级工程师,中国科学院力学研究所在职博士后,主要从事气井试井及产能评价方面的科研工作。E-mail: sunhed@petrochina.com.cn

1 具有补给的物质平衡方程

1.1 物理模型

假设气藏被一低渗透条带分为两个相互联系的对均质区块,依次为生产区、补给区,低渗透条带为过渡区,如图1所示。假设平面流动的阻力集中于区块间的接触面上,区块内流动阻力为零,区块内的压力只与时间有关,这种壁面亦可成为半透壁^[18],流体通过半透壁时压力产生跳跃,半透壁对流动的阻碍可由等效渗流阻力原理计算得到。

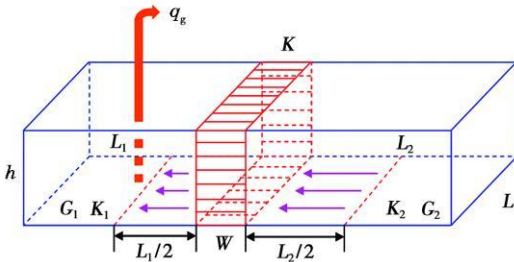


图1 具有补给的两区物质平衡物理模型

Fig. 1 Physical model of gas material balance with recharge capacity

为了研究方便,用半透壁模型代替实际地层。假设条件如下:①生产区、补给区及过渡区长度分别为 L_1 、 L_2 、 W ,宽度为 L ,地层厚度为 h ;②每区内地层均质、等厚,生产区、补给区渗透率分别为 K_1 、 K_2 ,过渡区渗透率为 K ;③生产区、补给区的储量为 G_1 、 G_2 ,忽略过渡区内的储量;④单井产量为 q_g ;⑤天然气在地层中流动满足达西定律,从高压区块向低压区块补给,区块间的补给量正比于两区之间的压力差,补给流动距离为 $W + (L_1 + L_2)/2$;⑥忽略水的影响。

1.2 数学模型及求解

利用半透壁模型可保证任何时刻各区块内的压力平衡,从而每区均满足传统物质平衡的各项条件。根据物质平衡原理,生产区内的流动可以表示为

$$G_1 \frac{d\rho}{dt} = -\rho_c q_g + \frac{K^* L h \rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

补给区内的流动表示为

$$G_2 \frac{d\rho}{dt} = -\frac{K^* L h \rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

式中: μ 为气体黏度,Pa·s; ρ 为平均密度,kg/m³; ρ_c 为标准状况下的密度,kg/m³; K^* 为补给流动距离内的平均渗透率,m²;下标1、2分别代表生产区和补给区,以下同。

根据等效渗流阻力原理,高压区块向低压区块补给的渗流阻力由3部分构成,依次为高压区向条带流

动的阻力、条带内流动的阻力、低压区内流动的阻力。若假设两区内黏度相同, K^* 可以表示为

$$K^* = \frac{W + \frac{L_1 + L_2}{2}}{\frac{L_1}{2K_1} + \frac{W}{K} + \frac{L_2}{2K_2}} \quad (3)$$

初始条件为

$$\rho_1(t=0) = \rho_2(t=0) = \rho_0 \quad (4)$$

式中: ρ_0 为原始条件下的气体密度,kg/m³。

式(1)一式(4)可转化为二阶常系数齐次线性微分方程:

$$\frac{d^2 \rho}{dt^2} + \beta(1 + \alpha) \frac{d\rho}{dt} - \alpha\beta\gamma = 0 \quad (5)$$

其中,参数 α 、 β 、 γ 分别表示为

$$\alpha = \frac{G_1}{G_2}, \beta = \frac{K^* L h}{G_1 \mu C_g W}, \gamma = -\frac{\rho_c q_g}{G_1}$$

式中: C_g 为天然气压缩系数,Pa⁻¹。

由式(5)可得^[8]

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{p}{Z} \right)_1 &= \left(\frac{p}{Z} \right)_i \\ \left\{ 1 - \frac{q_g t}{G_1 + G_2} - \frac{q_g}{G_1 \beta (1 + \alpha)^2} [1 - e^{-\beta(1 + \alpha)t}] \right\} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{p}{Z} \right)_2 &= \left(\frac{p}{Z} \right)_i \\ \left\{ 1 - \frac{q_g t}{G_1 + G_2} + \frac{q_g}{G_2 \beta (1 + \alpha)^2} [1 - e^{-\beta(1 + \alpha)t}] \right\} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

根据杜哈美原理,在稳产期结束后的产量递减阶段,生产区和补给区平均地层压力为

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{p}{Z} \right)_{1,j} &= \left(\frac{p}{Z} \right)_i \\ \left\{ 1 - \frac{1}{G_1 + G_2} \sum_{k=1}^j (q_k - q_{k-1}) \cdot (t_j - t_{k-1}) - \frac{1}{G_1 (1 + \alpha)^2} \sum_{k=1}^j \frac{(q_k - q_{k-1})}{\beta_k} [1 - e^{-\beta_k (1 + \alpha)(t_j - t_k)}] \right\} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{p}{Z} \right)_{2,j} &= \left(\frac{p}{Z} \right)_i \\ \left\{ 1 - \frac{1}{G_1 + G_2} \sum_{k=1}^j (q_k - q_{k-1}) \cdot (t_j - t_{k-1}) + \frac{1}{G_2 (1 + \alpha)^2} \sum_{k=1}^j \frac{(q_k - q_{k-1})}{\beta_k} [1 - e^{-\beta_k (1 + \alpha)(t_j - t_k)}] \right\} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

1.3 动态预测参数的确定

假设区块内只有1口井,经产能测试得到二项式产能方程为

$$\Delta p^2 = p_1^2 - p_{wf}^2 = A q_g + B q_g^2 \quad (10)$$

式中: p_{wf} 为井底流压,MPa; A 、 B 分别为二项式产能方程系数。

区块间的补给量 q_c 正比于两区之间的压力差, 可表示为

$$q_c = \frac{\mu \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{h \left[\frac{L_1/2}{K_1} + \frac{L_2/2}{K_2} + \frac{W}{K} \right]} \right)}{\quad} \quad (11)$$

联立式(6)一式(11), 即可预测气井长期生产动态。

2 实例与讨论

2.1 计算实例

气藏厚度为 10 m, 孔隙度为 0.1, 地层温度为 80 °C, 原始地层压力为 30 MPa, 天然气相对密度为 0.6, 生产区渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 补给区渗透率为 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 中间低渗透区的渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。井位于生产区中间部位, 如图 2 所示。

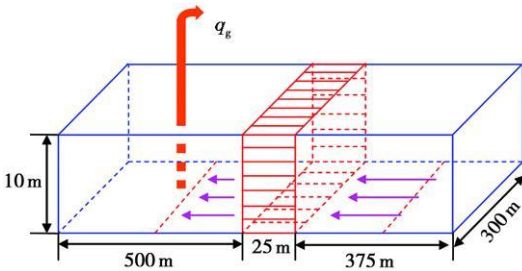


图 2 实际气藏参数示意图

Fig. 2 Gas reservoir schematic diagram

经测试, 单井无阻流量为 $59 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 二项式产能方程为

$$\Delta p^2 = 7.74344 q_g + 0.127014 q_g^2 \quad (12)$$

2.2 p/Z 曲线的特点

假设该井以 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的产量进行生产, 生产区的视地层压力 $(p/Z)_1$ 与采出量 G_p 的关系如图 3 所示, 曲线表现出明显的两段式特征。

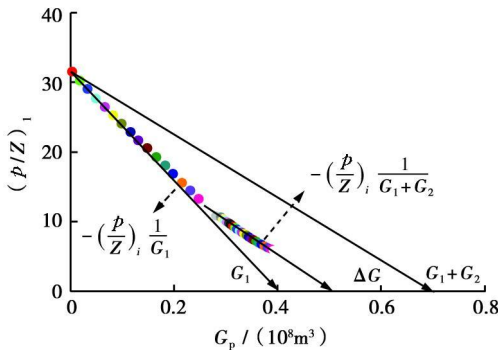


图 3 具有补给的两区物质平衡 p/Z 曲线

Fig. 3 p/Z curves of gas material balance with recharge capacity

根据式(6), 由于低渗透条带的存在及渗流阻力的影响, 分区 $(p/Z)_1$ 曲线与传统的 (p/Z) 曲线计算的储量偏小 ΔG ;

$$\Delta G = \frac{\mu C_g W}{K^* L h} \left(\frac{G_2^2}{G_1 + G_2} \right) q_g \quad (13)$$

由式(13)可知, 在分区储量一定的情况下, ΔG 不仅取决于气藏的特征参数, 还与生产区的初期配产相关^[8]。气藏的渗透率、区块间接触面积越大、两区间条带宽度越小, 残余储量越小; 初期配产越大, 残余储量越大, 与实验结果一致^[17]。

2.3 单井动态预测

假设该井以 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的产量进行生产, 采用传统的物质平衡预测方法与本文方法对比结果如图 4 所示。利用本文方法计算得到稳产期为 0.85 年, 传统方法稳产期为 1.32 年, 两者差距较大。

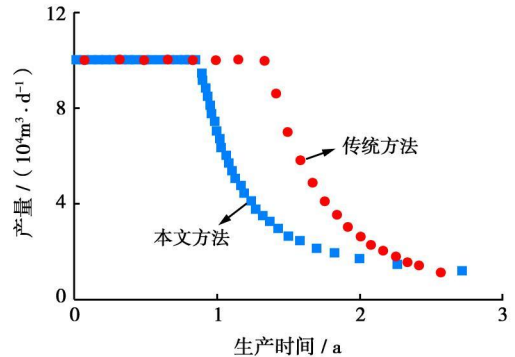


图 4 两种方法计算结果的比较

Fig. 4 Comparison of two methods

将本文模型数值化, 采用数值试井的方法进行模拟计算, 若以 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的产量进行生产, 稳产期为 0.90 年, 与本文计算结果较接近。这是由于传统的物质平衡方法将单井所波及的范围当成一个均质的大容器, 完全忽略了储层非均质性的变化, 在生产过程中, 压力均衡下降, 因此指标乐观。从图 5 可以看出, 由于低渗透层的存在, 生产区与补给区的压力有较大的差异, 造成非均衡开采现象的发生。笔者考虑了储层非均质性以及流动阻力等因素, 与实际情况接近, 因此数模结果与本文计算结果相差较小。

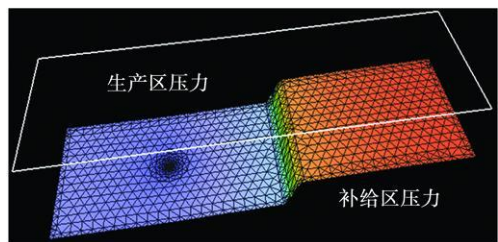


图 5 稳产期末数值试井模拟压力场变化

Fig. 5 Pressure field of numerical well test analysis at the end of period of stabilized production

假设该井以 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的产量进行生产, 生产区、补给区平均地层压力与产量的变化规律如图 6 所示。

随着生产的进行,补给区逐渐发挥作用,尤其是进入递减阶段后,补给区产量占总产量的比例更是举足轻重^[13]。

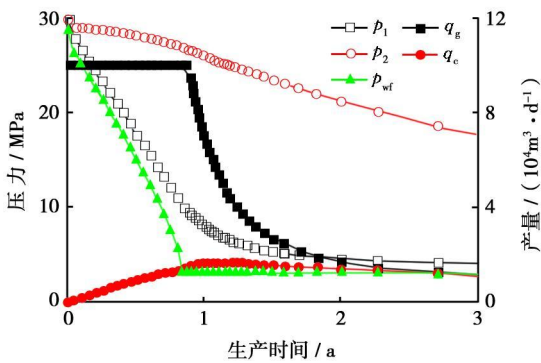


图6 具有补给的两区物质平衡动态预测曲线

Fig. 6 Performance prediction of gas material balance with recharge capacity

3 结论

(1) 建立了考虑区域性非均质变化因素以及流动阻力的物质平衡方程,模型更加接近实际,计算结果更加准确。

(2) 该模型可以方便地扩展到N区模型,可用来模拟多井或整个区块的生产动态。

(3) 动态预测是建立在单井具有准确产能方程基础上的,传统意义上的气井产能方程在气井生产进入拟稳态条件下才具有代表性。低渗透气藏气井生产达到拟稳态常常需要数月、几年甚至更长的时间。因此,对于低渗透致密气藏,气井现场产能测试通常很难达到拟稳态,利用此方法进行动态预测结果会出现偏差。

参考文献

- [1] Moghadam S, Jeje O, Mattar L. Advanced gas material balance in simplified format[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2010, 50(1): 90-98.
- [2] Mattar L, Anderson D. Dynamic material balance oil or gas in place without shut-ins[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2006, 45(11): 7-10.
- [3] Engler T W, Kelly M. New approach to gas material balance in tight gas reservoirs[R]. SPE 62883, 2000.
- [4] 胡建国, 陈元千, 张盛宗. 预测油气田产量的新模型[J]. 石油学报, 1995, 16(1): 79-87.
Hu Jianguo, Chen Yuanqian, Zhang Shengzong. A new model to predict to production rate of oil and gas fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(1): 79-87.
- [5] 陈元千, 袁自学. 预测油气田产量和可采储量的新模型[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 84-88.
Chen Yuanqian, Yuan Zixue. A new model for predicting production and reserves of oil and gas fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2): 84-88.
- [6] 闵琪, 胡建国. 预测油气田产量的Γ模型[J]. 石油学报, 1997, 18(1): 63-69.
Min Qi, Hu Jianguo. A model for predicting the production of oil and gas fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(1): 63-69.
- [7] 郭春秋, 李方明, 刘合年, 等. 气藏采气速度与稳产期定量关系研究[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 908-911.
Guo Chunqiu, Li Fangming, Liu Hengan, et al. Analysis of quantitative relationship between gas offtake and plateau duration of natural gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 908-911.
- [8] Hower T L, Collins R E. Detecting compartmentalization in gas reservoirs through production performance[R]. SPE 19790, 1989.
- [9] Lord M E, Collins R E, Koerber S. Compartmented simulation system for gas reservoir evaluation with application to fluvial deposits in the Frio Formation, South Texas[R]. SPE 24308, 1992.
- [10] Payne D A. Material balance calculations in tight gas reservoirs: the pitfalls of p/z plots and a more accurate technique[J]. SPE Reservoir Engineering, 1996, 11(4): 260-267.
- [11] Hagoort J, Hoogstra R. Numerical solution of the material balance equations of compartmented gas reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1999, 2(4): 385-392.
- [12] Vega L, Barrufet M A. Analysis of a non volumetric gas condensate reservoir using a generalized material balance equation with fluid properties from an equation of state[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 48(1): 105-119.
- [13] 高承泰. 具有补给区的物质平衡法及其对定容气藏的应用[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(2): 53-61.
Gao Chengtai. The material balance equation with a supplying region and its use in gas reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(2): 53-61.
- [14] 高承泰, 张敏渝, 杨玲. 定容气藏非均衡开采研究[J]. 石油学报, 1997, 18(1): 76-76.
Gao Chengtai, Zhang Minyu, Yang Ling. A study of unbalanced development for closed gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(1): 76-76.
- [15] 杨玲, 高承泰, 高炜欣. 非均衡开采在陕甘宁盆地中部气田的应用[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 1999, 14(2): 13-15.
Yang Ling, Gao Chengtai, Gao Weixin. Application of unbalance recovery to the gas field in central Shaanganning[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 1999, 14(2): 13-15.
- [16] 高承泰, 卢涛, 高炜欣, 等. 分区物质平衡法在边水气藏动态预测与优化布井中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 103-106.
Gao Chengtai, Lu Tao, Gao Weixin, et al. Multi-region material balance method and its use in the performance prediction and optimal well pattern design of edge water reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 103-106.
- [17] 胡勇, 朱华银, 陈建军, 等. 高、低渗“串联”气层供气机理物理模拟研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 469-472.
Hu Yong, Zhu Huayin, Chen Jianjun, et al. Physical simulated study on the gas supplying mechanism of high low permeable serial connection formations[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 469-472.
- [18] 孙贺东, 高承泰, 周芳德. 具有越流的多层气藏的压力曲线特征[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2001, 16(6): 25-30.
Sun Hedong, Gao Chengtai, Zhou Fangde. Pressure behavior of the stratified gas reservoir with formation crossflow[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2001, 16(6): 25-30.

(收稿日期 2010-09-11, 改回日期 2011-02-11, 责任编辑 黄小娟)