

致密低渗气藏气井动态分析方法

方全堂 陈伟 段永刚

(西南石油大学)

摘要 针对致密低渗气藏不稳定流动期较长的问题,提出基于不稳定流动理论的渗流模型描述气井的地层流动,并结合 Duhamel 原理求解变流量问题,建立了基于生产过程模拟的动态分析方法,可直接利用井口压力和产量进行单井动态分析。针对压力动态拟合中的参数多解性问题,引入 Blasingame 分析曲线,展现不稳定流动和拟稳态流动特征,提高了参数估算的可靠性。图4参8

关键词 低渗气藏 不稳定渗流 动态分析 生产动态模拟 Blasingame 分析曲线

0 引言

气井动态分析过程是建立在生产数据系统分析基础上的。Fetkovich (1980)^[1]利用双对数典型曲线拟合流量与时间进行气井动态分析,但其产量递减分析部分沿用 Arps 的经验方法,且不稳定流动分析部分假设流压为常数。Mattar (2003)^[2]进一步研究指出,在未达拟稳态流时,Fetkovich 典型曲线的估计单井控制储量的可靠性较差,故这种典型曲线最主要的作用在于进行流动期的诊断。Blasingame (1991)^[3]和 Agarwal - Gardner (1998)^[4]在 Fetkovich 典型曲线基础上,提出了物质平衡拟时间的概念并考虑工作制度的变化,利用流量函数、流量积分以及积分导数,突出各个流动期的特征,从而提高了气井动态分析结果的可靠性。

针对低渗气藏不稳定流动期较长的问题,本文利用不稳定气藏渗流模型描述气藏流动,通过 Duhamel (杜哈美)叠加原理由定流量解计算变流量的井底压力响应,结合井筒流动模型计算井口压力,进而可以直接应用气井的生产数据进行动态分析,通过生产动态模拟,实现井口压力的历史拟合,估计储层的渗透率、表皮系数以及单井控制储量;为了降低参数估计中的多解性,引入 Blasingame 分析曲线,利用其展现各个流动阶段特征,提高参数估算的可靠性。

1 气藏流入模型

利用 Duhamel (杜哈美)原理,可以得出多流量

情况下的井底流压公式为:

$$P_{wf}(t) = P_i - \frac{1.842 \times 10^{-3} B_g \mu_g}{kh} \sum_{j=1}^N (q_j - q_{j-1}) P_D [(t_j - t_{j-1})_D] \quad (1)$$

式中:

$$q_j = q(t_j), q_0 = 0, j = 1, 2, \dots, N;$$

P_D —具体的气藏模型对应(定产量)的无因次压力解。

(1)式作为模拟压力动态的标准解析方法,综合了气藏模型、井类型和外边界条件对井底流压的影响。

无因次压力:

$$P_D = \frac{kh(P_i - P_{wf})}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B} \quad (2)$$

无因次流量:

$$q_D = \frac{1.842 \times 10^{-3} q \mu B}{kh(P_i - P_{wf})} \quad (3)$$

无因次时间:

$$t_D = \frac{3.64kt}{\Phi \mu C_i r_w^2} \quad (4)$$

2 井筒流动模型

气体在井筒中的流动情况可以通过单相气体垂直管流计算公式来描述:

$$\frac{dp}{dz} = \rho_g + \rho v \frac{dv}{dz} + f \frac{\rho}{D} \frac{v^2}{2} \quad (5)$$

式中:

p —井筒压力, Pa;

作者简介 方全堂,男,1980年出生,西南石油大学2006级硕士;主要从事油气藏动态分析和试井方面的研究,地址:(610500)西南石油大学硕士06级7班。电话:(028)83035458,13008153672。E-mail:Fangqt@foxmail.com

假定油管内各点的速度相等^[5],得到井底流压 P_{wf} 与井口油压 P_{wh} 之间的关系:

$$P_{wf} - P_{wh} = 10^{-6} \int_0^H (\rho_g + \rho v^2 + f \frac{\rho}{D} \frac{v^2}{2}) dz \quad (6)$$

将(1)式与(6)式结合,则可直接预测井口油压。

3 Blasingame 诊断曲线

Blasingame 诊断曲线就是将基于生产数据的递减曲线分析方法与理论渗流模型相结合,即将实际的生产数据(日产量数据)与所建立的理论模型进行拟合,并辅助理论模型评估储层的物性参数以及预测气藏的最终控制储量。

油井的物质平衡关系式如下:

$$\frac{(P_i - P_{wf})}{q_o} = \frac{1}{Nc_i} \bar{t} \quad (7)$$

其中,定义拟时间函数:

$$\frac{N_p}{q_o} = \bar{t} \quad (8)$$

Blasingame 和 Lee(1988)^[6]提出了一种基于修正的拟时间方法,基于该拟时间函数的气体渗流公式可用于分析一般的变产量或是变压降的气井生产情况。

对于气井,利用拟压力和物质平衡拟时间函数,物质平衡关系式可修正为:

$$\frac{(P_{pi} - \bar{P}_p)}{q_g} = \frac{1}{Gc_{ii}} \bar{t}_a \quad (9)$$

Al - Hussainy 和 Ramey(1965)^[7]所定义的单相气体拟稳态流动关系式如下:

$$\frac{\bar{P}_p - P_{pwf}}{q_g} = 1.87 \frac{\mu_{gi} B_{gi}}{k_g h} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{4}{e'} \frac{4}{C_A r_w^2} \right) \right] \quad (10)$$

结合公式(9)和(10)得到不稳定晚期和拟稳定期气体渗流公式(公式11):

$$\frac{\Delta P_p}{q_g} = m_a \bar{t}_a + b_{pss} \quad (11)$$

其中:

$$\Delta P_p = (P_{pi} - P_{pwf}) \quad (12)$$

$$m_a = \frac{1}{Gc_{ii}} \quad (13)$$

$$b_{a,pss} = 1.87 \frac{\mu_{gi} B_{gi}}{k_g h} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{4}{e'} \frac{A}{C_A r_w^2} \right) \right] \quad (14)$$

修正的拟时间,即物质平衡拟时间,定义为:

$$\bar{t}_a = \frac{\mu_{gi} c_{ii}}{q_g} \int_0^t \frac{q_g}{\mu_{g(\bar{p})} c_{i(\bar{p})}} dt \quad (15)$$

其中平均地层压力的确定可以通过干气藏的物质平衡关系式确定:

$$\bar{p} = \frac{P_i \bar{z}}{z_i} \left(1 - \frac{G_p}{G} \right) \quad (16)$$

修正的物质平衡拟压力定义为:

$$\bar{P}_p = \left(\frac{\mu_{gi} z_i}{P_i} \right) \int_0^{\bar{p}} \frac{P}{\mu_{g(z)}} d\bar{p} \quad (17)$$

该公式综合考虑了气体渗流的不稳定晚期和拟稳定流动期,并通过物质平衡方法修正了拟时间函数和拟压力函数,可以满足长期动态分析的要求。由于气藏的无因次压力解(公式1)、井筒流动方程(公式5)以及物质平衡关系式(公式16)均基于单相气体和干气藏,故该方法限于干气藏和边底水不活跃(忽略水体的影响)的有水气藏的分析。

在此基础上,Blasingame 进一步定义出3类流量诊断函数,以便进行气藏流动状态的识别:

(1) 流量函数 Q

$$Q(\bar{t}_a) = (q_g / \Delta P_p) \quad (18)$$

(2) 流量积分函数 Q_i

$$Q_i(\bar{t}_a) = (q_g / \Delta P_p)_i = \frac{1}{\bar{t}_a} \int_0^{\bar{t}_a} (q_g / \Delta P_p) d\bar{t}_a \quad (19)$$

(3) 流量积分导数函数 Q_{id}

$$Q_{id}(\bar{t}_a) = (q_g / \Delta P_p)_{id} = \bar{t}_a \frac{d}{d\bar{t}_a} [(q_g / \Delta P_p)_i] \quad (20)$$

根据 Palacio and T. A. Blasingame (1993)^[4]的研究,使用拟压力和物质平衡拟时间来描述气体的渗流过程,所使用的数据在递减趋势上必须与 Fetkovich 典型曲线图板的调和递减曲线一致(图1)。也就是说,气井生产进入拟稳定流动阶段后,在正确获取的物质平衡时间 \bar{t}_a 的基础上, $[q_g / (p_{pi} - p_{pwf})]$ vs \bar{t}_a 的双对数图版能与 $b=1$ 的 Fetkovich 典型曲线的 q_{Dd} vs \bar{t}_{Da} 的趋势线准确地拟合上(图1)。

根据公式(11),在拟合点求取方程的斜率(m_a)。

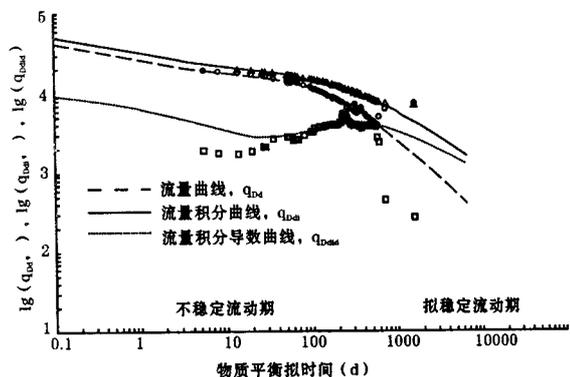


图1 气井 Blasingame 诊断曲线辅助识别图版

和截距($b_{a,ps}$)的基础上,进而通过下述公式可以合理地评估气井控制储量和地层参数^[8]。

$$b_{a,ps} = \frac{(q_{Dd})_{MP}}{\left[\frac{q_g}{(P_{pi} - P_{pwf})_{MP}} \right]} \quad (21)$$

$$m_a = \frac{1}{Gc_i} = b_{a,ps} \frac{(t_{Dd})_{MP}}{(\bar{t}_a)_{MP}} \quad (22)$$

$$G = \frac{1}{c_{ii}} \frac{(\bar{t})_{MP}}{(t_{Dd})_{MP}} \frac{\left(\frac{q_g}{(P_{pi} - P_{pwf})_{MP}} \right)}{(q_{Dd})_{MP}} \quad (23)$$

$$k = 1.87 \frac{B_g \mu_{gi}}{h} \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{1}{2} \right] \frac{\left(\frac{q_g}{(P_{pi} - P_{pwf})_{MP}} \right)}{(q_{Dd})_{MP}} \quad (24)$$

其中,MP表示拟合点。

4 应用实例

以某致密砂岩气藏气井为例,区块平均渗透率均小于0.1mD,平均孔隙度小于0.1%。该气井于2000年8月投产,投产前通过水力压裂进行了储层改造,现有的主要动态数据为井口油压和日产气量。该井原始气藏压力为43.32MPa,结合该井的井史资料,选取无限导流、均质、圆形封闭系统作为气藏渗流模型。

通过 Blasingame 诊断曲线进行渗流特征的辅助识别(图1),确定气藏参数为:渗透率 7.28×10^{-2} mD,裂缝半长 36.07m,裂缝表皮 1.27,泄油半径 145.29m,可以很好地拟合生产历史(图2),并计算出该井控制储量为 $6285.83 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

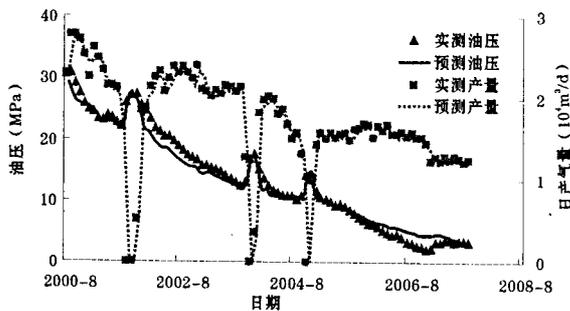


图2 气井生产动态历史拟合

由于没有逐年进行稳定试井测试,故通过模拟的方式计算出无阻流量(图3),进而根据经验,取无阻流量1/3~1/4,制定出气井配产方案。但对于致密气藏,其不稳定流动期较长,根据无阻流量配产的方法在投产初期具有一定的参考作用,在生产后期,无阻流量变化比较大(图3),不能反映真实的气井

动态。

利用生产模拟的方式,根据实际配产方案的需要,将产量分别调整为 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设定废弃的油压为1MPa,对该井的生产动态做出预测(图4)。

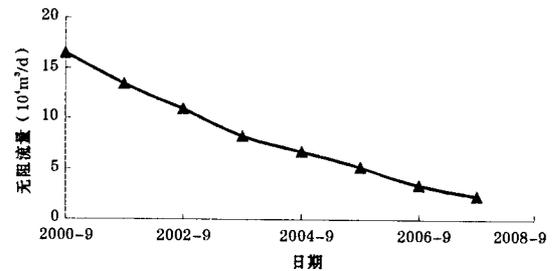


图3 气井无阻流量

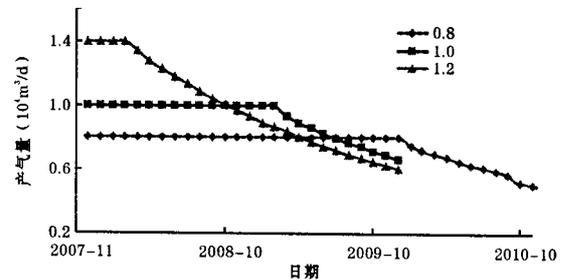


图4 气井动态预测

5 结论

(1)针对致密低渗气藏不稳定流动期较长的问题,提出了基于不稳定流动理论的气井动态分析方法,通过生产过程模拟,证明该方法可以直接利用生产数据进行历史拟合确定地层参数,进而实现单井产能预测,并在矿场应用中取得了较好的效果。

(2)对于压力动态拟合中的参数多解性问题,引入 Blasingame 曲线,展现不稳定流动和拟稳态流动特征,提高参数估算的可靠性。

(3)气井生产必须进入拟稳态流动阶段,才能较好地利用 Blasingame 诊断曲线确定储层参数。

(4)与投产初期采用稳定试井获取的无阻流量指导生产配产的传统模式相比,利用生产过程模拟进行气井动态分析的方法,为气井生产中后期的管理提供了有力的补充。

(5)所研究的致密低渗气藏气井动态分析方法适用于定容封闭干气藏,对于边底水活跃的气藏,则存在较大的偏差,还需作进一步的改进研究。

符号说明

B_i —参考压力下的气体体积系数, m^3/m^3 ;

B_{gi} —原始气藏压力下的气体压缩系数, 1/MPa;
 C_A —气藏形状因子;
 p_i —原始气(油)藏压力, MPa;
 p_{wf} —井底流动压力, MPa;
 D —管柱内径, m;
 f —摩阻系数, 与管壁粗糙度有关;
 g —重力加速度, 9.8m/s^2 ;
 G —气井单井控制储量, m^3 ;
 $q(t_i)$ —时间 t_i 时刻的流量, m^3/d ;
 h —地层厚度, m;
 H —气层中深, m;
 k_g —储层渗透率, mD;
 N —油井单井控制储量, m^3 ;
 q_g —气井产量, m^3/d ;
 q_o —油井产量, m^3/d ;
 r_w —有效井筒半径(考虑了地层污染), m;
 t —时间, 天(d);
 Z —真实气体偏差因子;
 μ_{gi} —原始气藏压力下的气体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;
 v —管柱内气体流速, m/s ;
 μ_g —参考压力下的气体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;
 ρ —气体密度, 单位 kg/m^3 ;
 γ —欧拉常数, 取 0.577216。

参考文献

- 1 Fetkovich M J. Decline Curve Analysis using TypeCurves [C]. SPE 4629, Presented at the SPE 48th Fall Meeting, held in Las Vegas, 1973.
- 2 Blasingame T A, McCray T L, Lee W J. Decline Curve Analysis for Variable Pressure Drop/Variable Flowrate Systems[C]. SPE 21513, Presented at the SPE Gas Technology Symposium held in Houston, Texas, 1991.
- 3 L Mattar and D M Anderson. A Systematic and Comprehensive Methodology for Advanced Analysis of Production Data [C]. SPE 84472, Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, U. S. A, 2003.
- 4 Agarwal R G, Gardner D C, Kleinsteiber S W, and Fussell D D. Analyzing Well Production Data Using Combined Type Curve and Decline Curve Concepts[C]. SPE 57916, Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 1998.
- 5 陈坚, 陈伟. 井筒油藏耦合作用下的非稳态产能预测[J]. 油气井测试, 2002, 11(2).
- 6 Blasingame T A, Lee W J. The Variable - Rate Reservoir Limits Testing of Gas Wells[J]. SPE 17708, Presented at the SPE Gas Technology Symposium, held in Dallas, TX, 1988.
- 7 R Al - Hussainy, H J Ramey. The Flow of Real Gases Through Porous Media [C]. SPE 1243, Presented at the SPE Annual Fall Meeting held in Denver, Colo, 1965
- 8 J C Palacio, T A Blasingame. Decline - Curve Analysis Using Type Curves—Analysis of Gas Well Production Data [C]. SPE 25909, Presented at the SPE Joint Rocky Mountain Regional and Low Permeability Reservoir Symposium, Denver, CO, 1993.

(修改回稿日期 2009-03-25 编辑 景岷霏)