

石油技术

低渗透气藏动态储量计算新方法

申颖浩 何顺利 王少军¹ 栾国华 丁志川²

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249; 中国石油勘探开发研究院¹,北京 100083;
渤海钻探工程公司²,任丘 062552)

摘要 由于低渗透气藏的特殊性,传统的压降法、弹性二相法等动态储量的计算方法在低渗透气藏中不适用,或者适用条件苛刻,需要经过复杂的修正,应用复杂。提出了一种计算低渗透气藏动态储量的新方法——产量不稳定法,该方法基于Blasingame等人的物质平衡方程与拟稳态方程相结合的理论,利用单井生产历史数据(产量和油、套压),计算动态储量。给出了低渗透气井的应用实例,综合分析表明该方法比传统方法更适合低渗透气藏的动态储量评估。

关键词 低渗透气藏 物质平衡 动态储量 压降法 弹性二相法 产量不稳定法

中图分类号 TE122.12;

文献标志码 A

我国现在探明未动用的地质储量中大部分为低渗透油气田储量,投入开发的低渗透油气田的储量占总动用储量的比例越来越大。动态储量的大小是确定气井合理产能和井网密度的重要依据,是编制整体开发方案的物质基础,因此在气田开发中具有重要的意义。

目前计算动态储量的常规方法有多种,其中应用较广的是压降法和弹性二相法。实践证明,这些常规方法在低渗透气藏中的应用有较大的局限性,需要适应较为苛刻的条件,或者需要经过复杂的修正,这给现场应用带来了不少麻烦。本文提出了一种计算低渗透气藏地质储量的新方法,该方法有严格的理论基础,且应用简单。

1 传统计算方法简述

计算气藏动态储量的方法较多,主要有^[1]:物质平衡法(压降法)、弹性第二相法、压力恢复法、压差曲线法、产量累计法、产量递减法等,其中主要应用的是前两种物质平衡法(压降法)、弹性第二相法,在此对这两种方法进行简要的介绍,并分析二者的主要适用条件。

1.1 压降法

压降法又称物质平衡法,是建立在物质平衡方程式的基础之上的动态储量计算方法。压降法所需参数简单,仅需气井原始及目前地层压力、累计采气量,故在气井控制储量计算中运用广泛。压降法计算公式见式(1)。

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

式(1)中: $p_i, \bar{p}$ —原始、目前地层压力,MPa; G, G_p —天然气动态储量、累计产气量, 10^8m^3 ; $z_i, \bar{z}$ —原始、目前地层压力对应的天然气压缩因子。

压降法计算储量看起来比较简单和实用,但如果资料取得不准,将会造成较大的误差,所以在取准资料方面应满足以下要求^[2]:

- 1) 压力的测取应采用高精度电子压力计,以保证所测压力的准确性。
- 2) 如果进行全气藏关井录取地层压力,采出量达到3%—5%时就有可能算准储量。
- 3) 当含气面积较大或因生产需要,不可能全气藏关井时,采取单井关井或分片轮流关井,在采出程度达到10%—15%时,计算的压降储量才具有规定的精度。

1.2 弹性二相法

弹性二相法是计算动态储量的主要方法之一,

2010年7月16日收到

第一作者简介:申颖浩(1986—),男,博士生,研究方向:油气藏工程。E-mail:shenyinhao@126.com。

目前已被广泛应用。对于由一口井控制的小型定容封闭气藏,当气井以恒定产量生产至拟稳态时,井底流压与生产时间的关系为:

$$p_{wf}^2 = \alpha_g - \beta_g t \quad (2)$$

式(2)中: α_g, β_g —压降曲线截距、斜率; t —生产时间 1d。

可以根据下式来计算气井动态储量:

$$G_d = \frac{2 \times 10^{-4} q_g \bar{p}_R}{\beta_g C_{ig}} + G_p \quad (3)$$

式(3)中 $C_{ig} = C_g + \frac{C_w S_{wi} + C_f}{1 - S_{wi}}$ 。

式(3)中: q_g —日产气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; C_w, C_g, C_f, C_{ig} —地层水压缩系数、天然气压缩系数、岩石有效压缩系数和总压缩系数, $1/\text{MPa}$; S_{wi} —束缚水饱和度, 小数。

如果气井工作制度不合理,产量过大使天然气流速过快,造成气藏供气能力不足,会导致压降曲线呈“假拟稳态”^[3]。因此其应用条件主要是:

- 1) 气井生产到达拟稳态;
- 2) 气井以恒定产量生产;
- 3) 气井以合理或较合理的工作制度生产,使产量与气藏供气能力相匹配,得到真正拟稳态的压力动态曲线。

可以看出,其应用条件相对也较为苛刻。

2 新方法提出

2.1 理论基础

产量不稳定法基于 Blasingame 等人的理论基础。Blasingame 等提出了物质平衡方程与拟稳定流方程联立求解的方法^[4-8]。定容气藏物质平衡方程:

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

引入气体拟压力和压缩系数定义式:

$$\psi = 2 \int_{p_i}^p \frac{p}{\mu z} dp \quad (4)$$

$$c_g = - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \quad (5)$$

式中: μ —天然气粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; V —天然气体积, 10^4 m^3 ; z —天然气压缩因子。

通过数学变换得

$$\frac{\psi(p_i) - \psi(\bar{p})}{q_g} = \frac{2p_i}{(\mu c_g z)_i G} t_{ca} \quad (6)$$

另外,单项气体拟稳定状态时,有

$$\frac{\psi(\bar{p}) - \psi(p_{wf})}{q_g} = \frac{1.417 \times 10^6 T}{kh} \ln \left(\frac{4}{e^\gamma C_A r_{wa}^2} \right) \quad (7)$$

式(7)中: k —地层渗透率, μm^2 ; h —地层有效厚度, m ; T —地层原始温度, K ; A —泄流面积, m^2 ; r_{wa} —井的折算半径, m ; γ —Euler 常数, 0.577 216; C_A —地层形状因子; p_{wf} —井底流动压力, MPa 。

将式(4)、式(5)相加,消去 $\psi(\bar{p})$,可得

$$\frac{\Delta\psi}{q_g} = m_a t_{ca} + b_{a,ps} \quad (8)$$

式(8)中:

$$\Delta\psi = \psi(p_i) - \psi(p_{wf});$$

$$t_{ca} = \frac{\mu_i c_{gi}}{q_g} \int_0^t \frac{q dt}{\mu c_g};$$

$$m_a = \frac{2p_i}{(\mu c_g z)_i G};$$

$$b_{a,ps} = \frac{1.417 \times 10^6 T}{kh} \ln \left(\frac{4}{e^\gamma C_A r_{wa}^2} \right)。$$

式中: $\mu_i, \bar{\mu}$ —原始、目前地层压力下的天然气粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; $c_{gi}, \bar{c}_g$ —原始、目前地层压力下天然气压缩系数, $1/\text{MPa}$;

从式(8)可以看出, $\frac{\Delta\psi}{q}$ 与 t_{ca} 呈线性关系。只要

求出 $\frac{\Delta\psi}{q} \sim t_{ca}$ 曲线的斜率 m_a ,再由式(9)可求得该气井的动态储量:

$$G = \frac{2p_i}{(\mu c_g z)_i m_a} \quad (9)$$

该方法引入了物质平衡时间的概念,可以计算产量和压力变化情况下的动态储量,因此称之为产量不稳定法。

2.2 分析流程

该方法要求使用单井每天记录的井底压力数据和产量数据,目前气田的日常生产数据基本上包含了油压、套压、日产量等数据,其具体计算步骤为:

- 1) 把油套压数据折算成气层中深压力;
- 2) 对经过处理的数据运用产量不稳定法,计算储层的渗透率、表皮系数以及单井控制动态储量;
- 3) 在以上基础之上,建立气藏地质和数学模型,计算单井生产历史数据(给定产量,计算井底压力);
- 4) 调整渗透率、表皮系数和控制动储量等参数,使计算的生产史与单井实际生产史相吻合,这时的参数基本上反映了地层的实际情况,此时计算的动态储量较为符合油藏的实际状况。

3 应用实例

现以靖边气田 dsqj1 井为例(注:由于保密原因,实际井号用代号表示,下同),通过三种方法的计算来对比说明文中所提出新计算方法的特点。

3.1 压降法

dsqj1 于 2003 年 8 月 18 号投产,共进行了 4 次压力恢复测压(表 1),经过计算(图 1),压降储量为 $1.76 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

实际上,由于该井渗透率较低,4 次测压结束时油压仍有上升趋势,故压降储量的计算值仍然偏小。

表 1 dsqj1 井压降数据表

压力/MPa	累计产量/ 10^8 m^3
30.760	0
24.950	0.25
19.470	0.558
16.240	0.756
13.950	0.886

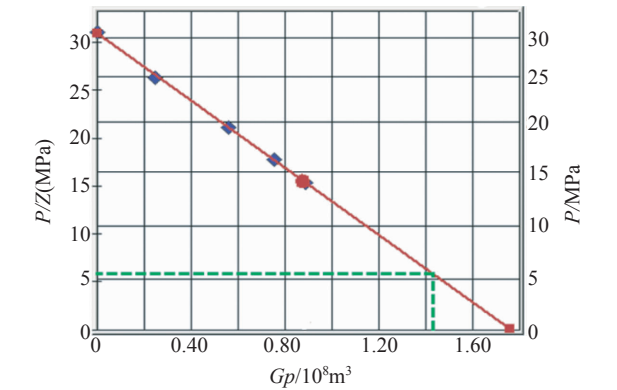


图 1 dsqj1 井压降曲线图

3.2 弹性二相法

由于 dsqj1 井的产量波动比较严重(图 2),所以不符合弹性二相法的条件,因此无法应用其求解出结果。

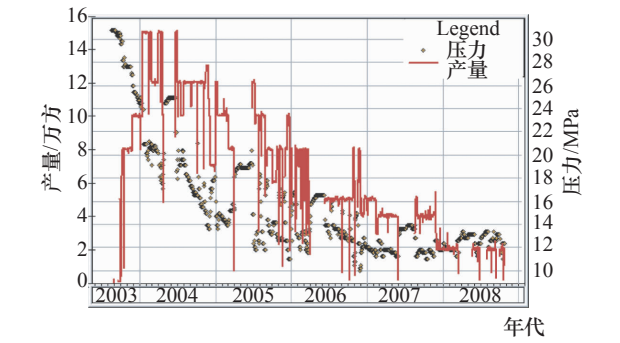


图 2 G18-5 井生产历史

3.3 产量不稳定法

dsqj1 井的生产数据(2003 年 8 月 18 日—2008 年 10 月 25 日的油压以及产气量)经过处理后,采用产量不稳定法进行图版拟合(图 3),初步解释出地层参数,建立模型后,进行历史拟合(图 4),最后得到动储量为 $1.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

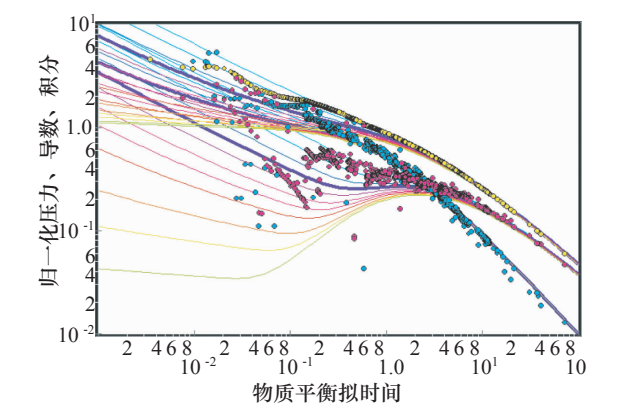


图 3 产量不稳定法图版拟合图

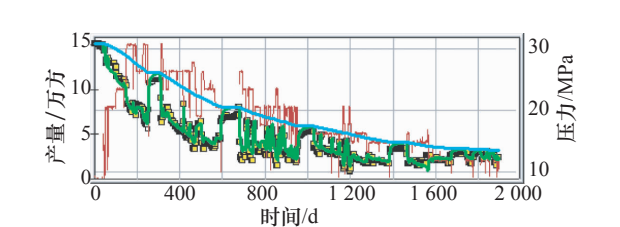


图 4 产量不稳定法历史拟合图

3.4 结果对比分析

从表 4 中可以看出,压降法的结果比产量不稳定法小的多。这是由于低渗透气藏的渗透性差,供气能力低,地层压力恢复缓慢,而测试时间相对较短,测试结束时,地层压力仍然处在恢复过程中。压降法采用井底关井测压的最高点作为目前地层压力,比真实的地层压力低,造成计算结果偏小。

现场的低渗透气田开发井中,大部分井的生产特征和 dsqj1 特征相似,即产量波动严重,无法直接用弹性二相法。若采用压力恢复测试数据,则需要长时间的压力恢复测试才能达到拟稳定状态,因此该方法条件苛刻,现场使用性不强。

而产量不稳定法通过计算储层参数,建立渗流模型,拟合生产历史数据,进而得出动储量,其结果更符合实际情况。且由于只需要日常的单井生产历史数据(产量和油、套压),应用简单方便,有更强的现场实用性。

表 2 三种方法结果对比表

井号	压降法/ 10^8 m^3	弹性二相法	产量不稳定法/ 10^8 m^3
dsqj1	1.76	—	1.92

4 结论

(1) 由于低渗透气藏渗透性差,压力恢复缓慢,通常的测试时间内无法恢复到地层压力,使计算出来的动态储量偏小,而弹性二相法适用条件苛刻,

实用性不强;

(2) 产量不稳定法通过建立渗流模型拟合气井生产历史数据,计算的动储量更加接近真实情况。因此产量不稳定法比压降法和弹性二相法等传统方法更加适用于低渗透气藏。

(3) 该方法可以采用气井日常生产数据进行动态分析,简单方便,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

1 冈秦麟. 气藏和气井动态分析. 北京:石油工业出版社,1996

2 卢晓敏,何晓东. 气藏动态预测物质平衡方法研究. 天然气勘探与开发,1999;22(3):29—39

3 郝玉鸿,许敏,徐小蓉. 正确计算低渗透气藏的动态储量. 石油勘探与开发,2002;29(5):66—68

4 Agarwal R. G, Gardner D. C, Kleinstieber S. W, *et al.* Analyzing Well Production Data Using Combined Type Curve and Decline Curve Analysis Concepts SPE 57916,1998;(9):27—30

5 Doublet L. E, Pandie P. K, McCollum T J, *et al.* Decline curve analysis using type curves analysis of oil well production data using material balance application to field cases SPE 28688,1994;(10):10—13

6 Blasingame T A, Lee W J. Variable-rate reservoir limits Testing. SPE 15028,13—14 March,1986

7 Palacio J C, Blasingame T A. Decline curve analysis using type curves analysis of gas well production data. SPE 25909,1993;(4):26—28

8 Blasingame T A, McCray T L, Lee W J. Decline curve analysis for variable pressure drop/variable flowrate systems. SPE 21513,1991;(1):23—24

A New Method to Calculate Dynamic Reserves of Low-permeability Gas Reservoir

SHEN Ying-hao, HE Shun-li, WANG Shao-jun¹, LUAN Guo-hua, DING Zhi-chuan²

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, P. R. China; PetroChina Exploration and Development Research Institute, ¹Beijing 100083, P. R. China; CNPC Bohai Drilling Engineering CO. ², Renqui 062552, P. R. China)

[Abstract] Because of the particularity of low-permeability gas reservoir, the traditional methods to calculate the dynamic reserves, such as pressure drawdown method and elastic 2-phase method, don't fit to the low-permeability gas reservoir properly, or need harsh requirements, Which is hard to use. This article presents a new method to calculate dynamic reserves of low-permeability gas reservoir, which is so-called rate transient method. Basing on the combination of material balance equation and pseudo-steady flow equation, the method can be used to calculate dynamic reserves only taking advantage of the daily production data (rate, tubing pressure and casing pressure). The article also presents the applied example, and the comprehensive analysis shows that the new rate transient method is better than the traditional methods for calculating dynamic reserves of low-permeability gas reservoir.

[Key words] low-permeability gas reservoir material balance pressure drawdown method pressure drawdown method elastic 2-phase method rate transient method