

动态物质平衡在海上凝析气田中的应用

张凤喜 陈 明 马国新 牟哲林

(上海石油天然气有限公司, 上海 200041)

摘 要 气藏储量的确定是安排采气速度、制定合理气藏开发方案的基础。静压法储量计算前提是需关井恢复并获取地层压力,对于凝析气井的关井会造成井底的积液,积液严重者开井后可能不会实现自喷。借助成熟的管流软件建立井筒管流模型,在优选流动相关式的基础上通过井口油压来求取井底流动压力。基于拟稳态条件下油气藏生产特性,应用动态物质平衡法来确定海上某凝析气藏动态储量。该方法不需关井即可获得地层压力,减小了气井产量损失,对于不便经常开展测试作业的海上气井具有十分重要的应用价值。

关键词 气藏 储量计算 动态物质平衡 拟稳态

中图法分类号 TE372; **文献标志码** A

目前对凝析气井的产能研究较多^[1-5],而对凝析气井单井动态储量的研究相对较少。气藏储量计算方法较多,可分为静态法和动态法两大类。静态储量计算方法主要是容积法;动态储量计算目前主要分为物质平衡法、产量递减法、油压法、试井法等^[6-9]。其中物质平衡法是气藏计算动态储量最常用的方法,该方法的要点在于获取地层压力。海上气井压力测试由于条件限制等因素测试费用较高,且关井测压会影响气井的生产扰乱产量计划。气井关井尤其是凝析气井的关井测压,还会引起井底的积液,积液严重的井甚至在开井后必须采取诱喷等方式才能恢复自喷生产。以东海某凝析气田平湖组一口气井为例,通过引入动态物质平衡方法,利用井口压力、产量数据来求取地层压力从而确定气藏动态储量,为气田后续的合理开发提供了思路。

1 拟稳态特性

依靠弹性能量开采的封闭气藏,地层内压力波

的传播过程分为两个阶段:压力波传到边界之前的不稳定流阶段和压力波传到边界之后的边界流阶段。边界流阶段又称为拟稳态阶段,其特性为单位时间内地层内各点压力下降幅度相等^[10]。

2 动态物质平衡

Palacio 和 Blasingame 提出了物质平衡拟时间,从而建立了变产量和定产量生产之间的等效关系。

$$t_c = \frac{N_p}{q} = \frac{1}{q} \int_0^t q dt。$$

考虑气体 PVT 性质变化及岩石压缩性的影响,物质平衡拟时间定义为^[11]

$$t_{ca} = \frac{\mu_{gi} C_{ti}}{q} \int_0^t \frac{q}{\mu_g(p) C_t(p)} dt。$$

气井产能方程为

$$p_{pi} - p_{pwf} = \frac{24 \times 2 \ 348 \ T \ q \ r}{\pi \ \varphi \ \mu_i \ C_g \ r_e^2 \ h} + \frac{1.417 \times 10^6 \ T}{kh} \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_{wa}} - \frac{3}{4} \right) \right] \quad (1)$$

式中: P_p 为拟压力, $P_p = 2 \int \frac{p}{\mu Z} dp$ 气藏物质平衡方程为

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

上式引入物质平衡拟时间后整理得

2011年5月9日收到 上海市科委2009年度东海油气田薄油层

关键技术(09DZ1201100)资助

第一作者简介:张凤喜(1984—),男,油气田开发工程专业,研究方向:油气田开发动态及数值模拟,E-mail:zhangfx@shpc.com.cn。

$$p_{pi} - P_p = \frac{2p_i q t_{ca}}{GZ_i} = \frac{2q t_{ca} p_{st} T}{\varnothing A h T_{st}}$$

两边同乘以 $(kh/1.417\ qT)$ 得

$$\frac{kh}{1.417qT}(p_{pi} - P_p) = 2\pi \frac{2.637 \times 10^{-4} \times 24\ k \times t_{ca}}{\varnothing A}$$

(2)

将式(1)与式(2)联立可得动态物质平衡数学模型简化形式:

$$P_p = p_{pwf} + q b_{pss}$$

式中 $b_{pss} = \frac{1.417 \times 10^6 T}{kh} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_{wa}}\right) - \frac{3}{4} \right]$

将物质平衡拟时间带入式(1)得

$$p_{pi} - p_{pwf} = \frac{24 \times 2\ 348 \times T q t_{ca}}{\pi \mu_i C_g r_e^2 h} + \frac{1.417 \times 10^6 q T}{kh} \times \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_{wa}}\right) - \frac{3}{4} \right]$$

(3)

式(2)中 t_c, t_{ca} 为物质平衡时间, d; q 为天然气产量, $10^4\text{ m}^3/\text{d}$; N_p 为累积产量, $10^4\text{ m}^3/\text{d}$; μ_{gi}, μ_g 为天然气黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; C_g 为天然气压缩系数, MPa^{-1} ; C_{ti}, C_t 为储层综合压缩系数, MPa^{-1} ; Z 为天然气偏差因子; P_p 为拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$; r_e 为控制半径, m ; r_{wa} 为井筒半径, m ; k 为储层渗透率, 10^{-3} ; h 为储层有效厚度, m ; φ 为孔隙度, 小数; G_p 累采气量, 10^8 m^3 ; G_i 为单井控制储量, 10^8 m^3 ; T 为油藏温度, R° ; T_{st} 为标准温度, 519.668 R° 。其中, 下标 i 为原始地层条件下参数。

通过绘制 $(p_{pi} - P_{pwf})/q - t_{ca}$ 图版, 可确定 b_{pss} 值, 进而获得地层平均压力 P_p ^[12], 求取动态储量, 示意图见图 1。

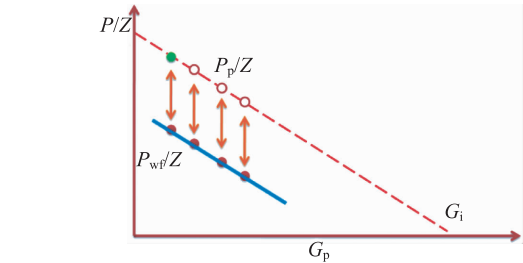


图1 动态物质平衡法示意图

3 气藏动态储量计算方法

井底流压数据是动态物质平衡应用的充分条件之一, 生产过程中流压为间歇的不连续数据, 而井口油压及产气量为连续的实时监测数据。应用井口油压及产量数据借助成熟的管流软件在优选流动相关式的基础上进行压力折算, 可获得对应的流压数据。通过对流压进行回放, 基于动态物质平衡基本原理, 获取当前地层平均压力, 进而获得气藏动态储量。计算步骤如下:

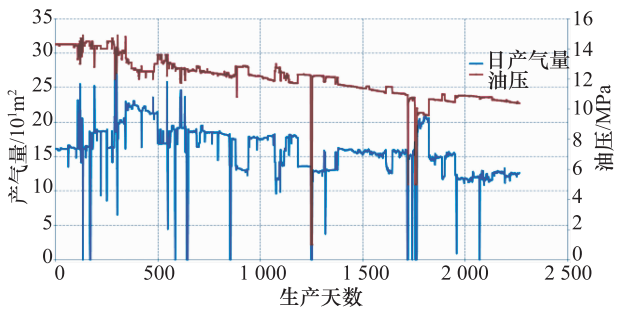


图2 B3井生产历史曲线

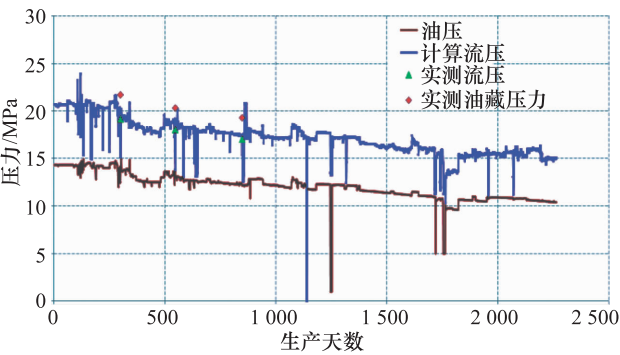


图3 流压拟合与计算

- 1) 基础数据收集 油藏埋深、有效厚度、地层压力、温度数据、单井测试数据、井身结构数据、井口油压、产量数据、流体 PVT 分析资料等;
- 2) 数据质量分析 对井口油压及产量数据进行整理, 确定物质平衡时间 t_{ca} ;
- 3) 流动相关式拟合 通过既有的压力测试数据, 借助管流软件进行流动相关式拟合, 选出合适的流动相关式;

- 4) 绘制 $(P_{pi} - P_{pwf})/q - t_{ca}$ 曲线, 确定 b_{pss} ;
- 5) 计算地层平均压力 P_p ;
- 6) 计算视地层压力 P_p/Z , 绘制 $P_p/Z - G_p$ 曲线, 获得单井动态储量。

4 应用

PH 气田为我国东海陆架盆地中的一个凝析气田, 受构造控制影响较大。气田埋深在 (3 400—3 450) m, 储层孔隙度在 0.15—0.17 左右, 测井解释储层渗透率在 (70—100) mD 之间, 地层压力梯度为 1.01 MPa/100, 产层温度 135.2 ℃。该气藏某气井 B3 井 2000 年投产至今累产气 6.78 亿方, 生产早已进入拟稳定状态, 该井 2005 年以来压力产量历史见图 2, 应用上述介绍的计算方法求取其动态储量。

通过对压力测试资料进行整理发现, 该井自 2005 年以来做过三次流静压测试。通过压力梯度回归, 获得产层对应的流压和地层平均压力。借助斯伦贝谢公司 Pipesim 管流软件对三次流压测试数据进行拟合, 选定了适合该井的流动相关式, 以此为基础计算其它生产时间下的流压, 从而实现了流压的数据回放, 见图 3。

通过绘制 $(P_{pi} - P_{pwf})/q - t_{ca}$ 曲线, 获取 b_{pss} 值, 进而计算拟稳态条件下地层压力 P_p , 依据动态物质平衡原理获取单井动态储量, 如图 4。

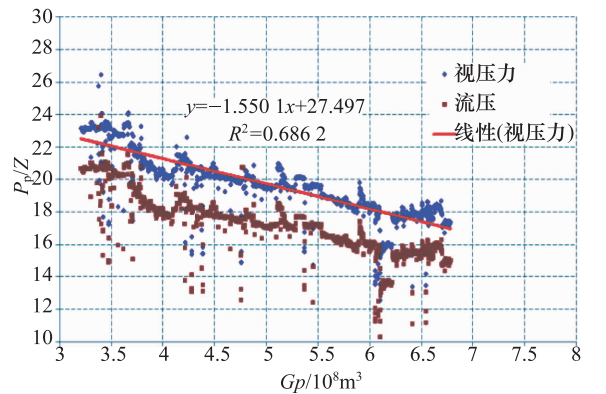


图 4 单井动态物质平衡曲线

表 1 动态储量计算结果对比

计算方法	递减法	油压法	静压法	动态物质平衡法
动态储量/ 10 ⁸ m ³	18.02	17.79	18.81	17.74

动态物质平衡法计算的动态储量与其它气井常规动态储量计算方法相比(表 1), 相差不大; 与产量递减法相比, 用本法计算的单井动态储量略小, 这主要是由于递减法未考虑压力递减的影响所致^[13]; 与静压法相比也略小, 这主要是由于静压法计算过程中压力点数据较少而引起的偏差。

5 结论

(1) 将动态物质平衡方法应用到海上凝析气井中, 可以在无需关井的前提下充分利用油压、产量数据来获取地层平均压力, 进而求取动态处理, 减少了海上油气井测试的作业费用, 同时, 可保证正常的生产运行计划不被测试作业扰乱, 减少了产量损失, 提高了开井时率, 同时, 对不便开展静压测试作业的陆上气井的储量计算, 具有较强的借鉴作用。

(2) 动态物质平衡法能同时综合考虑产量、压力两方面的影响因素, 能够处理天然气物性随压力的变化情况, 在动态储量计算中更具有科学性和合理性。

参 考 文 献

1 严 涛, 李久娣. 东海凝析气井合理产能的确定. 海洋石油, 2007; 27(3): 70—76

2 黄全华, 孙 雷, 李士伦, 等. 低渗透凝析气藏气井产能的正确预测. 天然气工业, 2005; 25(11): 82—84

3 朱绍鹏, 李文红. 反凝析对凝析气井产能的影响研究. 油气井测试, 2007; 16(3): 26—27

4 康志江, 邱立伟, 李 彤, 等. 凝析气井合理产能的研究及应用. 石油实验地质, 1998; 20(2): 192—195

5 马新仿, 郎兆新, 李星民. 凝析气井最低允许产量公式及其应用. 新疆石油地质, 2005; 26(5): 549—551

6 李士伦, 孙 雷, 汤 勇. 物质平衡法在异常高压气藏储量估算中的应用. 新疆石油地质, 2002; 23(3): 219—223

7 卢小敏. 气藏动态预测物质平衡法研究. 天然气勘探与开发, 1999;22(3):29—38

8 李 骞,郭 平,黄全华. 气井动态储量方法研究. 重庆科技学院学报,2008;10(6):34—36

9 程时清,李菊花,李相方,等. 用物质平衡—二项式产能方程计算气井动态储量. 新疆石油地质,2005;26(2):181—182

10 张建国,雷光伦,张艳玉. 油气层渗流力学. 石油大学出版社,山东东营,1997:94—95

11 Palacio J C, Blasingame T A. Decline-curve analysis using type curves-analysis of gas well production data. SPE 25909;11—13

12 Mattar L, Anderson D. Dynamic material balance(Oil or gas in place without shut-ins). Petroleum Society's 6th Canadian International Petroleum Conference (56 th Annual Technical Meeting) , Calgary, Alberta, Canada, 2005;6:5—6

13 陈海龙,关文均,赵 伟,等. 物质平衡拟时间在低渗透气藏动态分析中的应用. 天然气技术,2007;1(6):53—56

Application of Dynamic Material Balance in Offshore Gas Condensate Field

ZHANG Feng-xi, CHEN Ming, MA Guo-xin, MU Zhe-lin
(Shanghai Petroleum Co. , LTD, Shanghai 200041 , P. R. China)

[**Abstract**] The definition of reserves to gas reservoir is the basis to the arrangement of gas production rate and the reasonable development plan. The prerequisite of the static pressure method in the calculation of reserves is to obtain the reservoir pressure by shutting wells, which may cause liquid loading to gas condensate wells. With serious liquid loading, the gas may not flow from the bottomhole to the surface by nature. With the help of mature conduit flow software, the conduit flow model in wellbores was set up. On the basis of optimization of flow correlation equation, the bottomhole pressure can be acquired from tubing pressure. According to the production characteristic of reservoir in pseudosteady state, the dynamic reserve of some offshore gas condensate well was calculated by the dynamic material balance theory. The method can obtain the reservoir pressure without shut – ins, which reduced the production loss. Furthur more, there is an important application value to offshore gas wells which is inconvenient to carry out testing operations.

[**Key words**] gas reservoir evaluation of dynamic reserves dynamic material balance pseudosteady state