

长庆气区低渗透非均质气藏可动储量评价技术

张明禄

中国石油长庆油田公司

张明禄.长庆气区低渗透非均质气藏可动储量评价技术.天然气工业,2010,30(4):50-53.

摘 要 气藏可动储量是指在现有工艺技术和现有井网开采方式不变的条件下,已开发地质储量中投入生产直至天然气产量和波及范围内的地层压力降为零时,可以从气藏中流出的天然气总量。开展气藏可动储量评价,落实开发基础,是气田后期开发调整的重要依据。长庆气区储层渗透率低、非均质性强,加之气井排水采气、冬季用气高峰期提产等因素,导致利用常规方法评价气井可动储量存在地层压力测试点少、气井工作制度不稳定等难点。针对上述问题,充分应用气藏生产动态资料,通过重整压力和流量将气井变压力、变流量生产数据转换为等效恒压力或恒流量数据等途径,在常规压降法评价的基础上,形成了产量不稳定分析法、流动物质平衡法、优化拟合法等气井可动储量评价方法。应用上述方法全面追踪评价了长庆气区靖边、榆林等气田单井可动储量及其变化,为气田加密井部署、工作制度优化、储层二次改造并优选等提供了依据,进一步提高了气田储量动用程度。

关键词 长庆气区 低渗透气田 储量 气井 生产 动态 产量 分析

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.04.011

0 引言

气藏可动储量是指在现有工艺技术和现有井网开采方式不变的条件下,已开发地质储量中投入生产直至天然气产量和波及范围内的地层压力降为零时,可以从气藏中流出的天然气总量^[1]。气藏可动储量是气田开发的基础,是开发方案编制和调整的依据。

评价气藏可动储量常规方法主要有压降法、弹性二相法、压力恢复法、产量累积法等,其中压降法被认为是计算可动储量最准确的方法,该方法适用于渗透性、连通性较好,并能较准确地确定平均地层压力的封闭气藏。长庆靖边、榆林等气田具有低渗透、强非均质特征,关井压力恢复速度慢(3~5个月),同时气田井数多,关井测压也只能针对部分典型井开展。弹性二相法、压力恢复法计算气井可动储量要求气井具有稳定的试井资料,这些数据的测取不仅影响气井生产,而且费用较高。产量累积法是达到一定生产程度的经验估算法,适用范围有限。

1 低渗透非均质气藏可动储量评价方法

笔者在压降法的基础上,立足气井常规生产动态资料,根据气井不同工作制度特征,形成了压降法、流动物质平衡法、产量不稳定分析法等适合长庆低渗透非均质特征的可动储量评价方法^[2-8],为气田可动储量全面评价提供了技术支持。

1.1 压降法

对于定容封闭气藏,压降方程为:

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

令: $a = \frac{p_i}{Z}$, $b = \frac{p_i}{ZG} = \frac{a}{G}$ 。则式(1)变为:

$$p/Z = a - bG_p \quad (2)$$

由此可知,对于定容封闭气藏,视地层压力(p/Z)与累计采气量(G_p)为直线关系。因此,根据不同阶段视地层压力与相应累计采气量的回归直线可求得气井可动储量:

$$G = a/b \quad (3)$$

压降法要求采出程度大于10%,且至少具有两个

关井压力恢复测试点。采出程度过低,压力产量误差对计算结果影响较大,压力数据越多,分析更准确。

长庆气田渗透率低,关井压力恢复速度慢,实际地层压力测试值较少。为此,形成了井口压力折算法、拓展二项式方程法等不关井条件下地层压力评价方法,可根据生产中短期恢复井口压力、二项式产能方程等资料,计算气井地层压力,有效地补充了地层压力数据点。长庆靖边、榆林等气田目前建立气井压降曲线有700余口,跟踪评价历年气井可动储量变化情况,结果表明大部分气井可动储量基本稳定,表现为直线型;有少数气井压降曲线后期上偏,分析主要原因为当生产后期气井井周压力降低到一定程度后,外围低渗高压区对气井初期泄流范围产生了能量补给;另有少数气井压降曲线后期下偏,分析原因主要为井间干扰。

1.2 流动物质平衡法

根据渗流力学理论,对于封闭气藏中定产生产井,当处于拟稳定流动时,在任意一点处有:

$$p = p_i - \frac{4.242 \times 10^{-3} q_{sc} \mu B_g}{Kh} \left(\lg \frac{r_e}{r} - 0.326 \right) - \frac{1.327 \times 10^{-2} q_{sc} B_g t}{\phi h C_i r_e^2} \quad (4)$$

若考虑流体物性不随时间 t 变化,则上式对 t 求导可得:

$$\frac{dp}{dt} = - \frac{1.327 \times 10^{-2} q_{sc} B_g}{\phi h C_i r_e^2} = \text{constant} \quad (5)$$

由式(5)可知,当气井进入拟稳定渗流状态时,地层各点压降速率相同,即在不同时刻压降漏斗是一系列平行曲线,近似认为视井口压力与视地层压力变化特征相同,则根据视井口压力与累计产气量的关系曲线可确定直线段斜率,然后平移至视原始地层压力点,该直线与横轴的交点即为气井可动储量。

流动物质平衡法最大的优点是不需要生产后期关井测压资料,但其难点是判断气井是否进入拟稳态及选择合适的平稳压力段。该方法适合生产时间较长且工作制度稳定的中高产井。

在实际应用中,在井口压降曲线中加入采气曲线,辅助选取压力段,并选取多个不同工作制度下稳定流动段进行评价,以便减小误差。即便如此,气井工作制度的频繁改变对该方法评价结果准确性影响仍然较大,为此,通过编程将流动物质平衡法进一步用于区块整体可动储量评价,将各井视井口压力产量加权平均作为区块视井口压力,解决了地层压力资料录取困难、单井制度不稳定导致计算误差大的问题。

榆林气田 XX 井区(井数 14 口,采出程度 11%)于

2006 年 4~7 月进行整体关井测压,测试期末压力恢复速度远小于 0.01 MPa/d。单井压降法合计评价动制储量 $42.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,区块整体流动物质平衡法评价可动储量 $43.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,评价精度较高。

1.3 优化拟合法

优化拟合法是根据产能方程和物质平衡方程描述气井可动储量与不同时刻气井产量和井底流压的关系,通过对气井生产动态历史进行拟合来评价气井可动储量的一种方法。

假设稳定试井产能方程:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = Aq + Bq^2 \quad (6)$$

结合式(1),可以导出有限封闭气藏的储量计算方程:

$$[p_i(1 - G_p/G)]^2 - p_{wf}^2 = Aq + Bq^2 \quad (7)$$

由式(7)可知,若给定可动储量初值(G),则可根据不同时刻的实际产量(q)和累计产量(G_p)计算对应的井底流压(p_{wf}),若计算的井底流压曲线与实际井底流压很接近,说明 G 即为所求的气井可动储量,若计算井底流压高于实际井底流压则说明 G 偏大,反之则说明偏小,重新调整初值 G 重复计算则可得到所求的气井可动储量。

优化拟合法要求气井具有准确的二项式产能方程系数,适用于具有稳定试井和长期生产资料的气井。

1.4 产量不稳定分析法

产量不稳定分析法是在引入拟等效时间将变压力(或变产量)生产数据等效为恒压力(或恒流量)数据基础上,利用气井生产历史数据与典型图版进行拟合,进而计算可动储量的方法。目前常用的产量不稳定分析法包括 Fetkovich 法、Blasingame 法、Transient 法等。其中 Blasingame 法应用范围较广,适用于径向流,裂缝,水平井,拟稳态水驱和多井模型,可用于分析不稳定径向流变井底流压生产的情形。因此,笔者本文以 Blasingame 法为例,介绍产量不稳定分析法的原理。

对于定容封闭气藏,有

$$\frac{\bar{p}}{Z} = \frac{p_i}{Z} \left(1 - \frac{G_p}{G} \right) \quad (8)$$

式(8)对时间(t)求导可得:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\bar{p}}{Z} \right) = - \frac{p_i q}{Z_i G} \quad (9)$$

引入拟压力 $p_p = 2 \int_{p_p}^{\bar{p}} \frac{p}{\mu Z} dp$ 和拟等效时间 $t_{ca} =$

$\frac{\mu C_{gi}}{q} \int_0^t \frac{q}{\mu C_g} dt$, 式(9)变形为:

$$\frac{d\bar{p}_p}{dt} = -\frac{\bar{p}_i q \frac{2\bar{p}}{Z_i G u Z}}{\frac{\bar{p}}{Z} C_g} = -\frac{2\bar{p}_i q}{Z_i u C_g G} \quad (10)$$

对式(10)分离变量求积分得:

$$\frac{\bar{p}_i - \bar{p}_p}{q} = \frac{2\bar{p}_i}{(\mu C_g Z)_i G} t_{ca} \quad (11)$$

同时,对于圆形封闭边界中心一口单相拟稳定流动气井,有

$$\frac{\bar{p}_p - p_{pwf}}{q} = \frac{1.291 \times 10^{-3} T}{Kh} \frac{1}{2} \ln \left(\frac{r_e}{r_{wa}} - \frac{3}{4} \right) \quad (12)$$

式(11)和式(12)联立求解得:

$$\frac{\Delta p_p}{q} = \frac{2\bar{p}_i}{(\mu C_g Z)_i G} t_{ca} + \frac{1.291 \times 10^{-3} T}{Kh} \frac{1}{2} \ln \left(\frac{r_e}{r_{wa}} - \frac{3}{4} \right) \quad (13)$$

$$\text{令: } m_a = \frac{2\bar{p}_i}{(\mu C_g Z)_i G} \\ b_{a,pps} = \frac{1.291 \times 10^{-3} T}{Kh} \times \frac{1}{2} \ln \left(\frac{r_e}{r_{wa}} - \frac{3}{4} \right)$$

$$\text{则 } \Delta p_p / q = m_a t_{ca} + b_{a,pps} \quad (14)$$

由式(14)可知, $\Delta p_p / q$ 与 t_{ca} 在直角坐标系中呈直线关系。因此,根据重整压力 ($\Delta p_p / q$) 与拟等效时间 (t_{ca}) 关系曲线的直线段斜率 (m_a) 可反求气井可动储量 (G), 其表达式如下:

$$G = \frac{2\bar{p}_i}{(\mu C_g Z)_i m_a} \quad (15)$$

该方法建立在常规的生产动态资料之上(井口产量、压力), 在很大程度上能够适应气井工作制度不稳定的情况, 对地层压力测试点的依赖程度也相对较低, 对于低渗非均质气藏具有较大优势。

2 可动储量评价在气田开发中的应用

根据单井具体资料情况及生产特征, 综合应用降压法、产量不稳定分析法等方法, 开展可动储量评价, 为气田加密井部署、工作制度优化、储层二次改造井优选等提供了重要依据, 进一步提高了气田储量动用程度。

2.1 为气田加密井部署提供指导

由容积法气井可动储量计算公式: $N = \pi r^2 h \phi S_g / B_g$, 可得气井泄流半径计算公式:

$$r = \sqrt{NB_g / (\pi h \phi S_g)} \quad (16)$$

靖边气田 XX 井区初期井网部署选取正南正北向不规则面积井网, 以适应气藏平面非均质变化特征, 初期井距 1.5~2.5 km, 平均 2 km。2005 年对该井区进行可动储量评价, 井均可动储量为 $1.83 \times 10^8 \text{ m}^3$, 气井控制范围有限, 平均控制半径仅为 0.76 km, 部分地区

井网不完善, 根据评价结果对该区进行加密, 加密井地层压力接近区块平均原始压力, 获得较好效果。

2.2 为气田生产制度优化提供依据

长庆气田 XX 井区, 2004 年根据气井可动储量评价结果计算泄流半径, 井区基本连通, 其中 X-1 和 X-2 井控制范围覆盖了储层物性较差的 X-3 井, 2005 年 5 月将 X-3 井关闭, 在不影响区块产气量的情况下, 设为观察井, 对区块生产制度进行优化, 减少了操作成本。

2.3 为重复改造井优选提供依据

根据气井可动储量评价结果, 为重复改造井优选提供依据, 取得了较好效果。

选取可动储量较大, 产气量偏低的气井重复改造。X-4 井通过评价可动储量为 $1.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产气量仅 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 2004 年 11 月对该井进行二次酸压改造, 产气量提高到 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (图 1)。

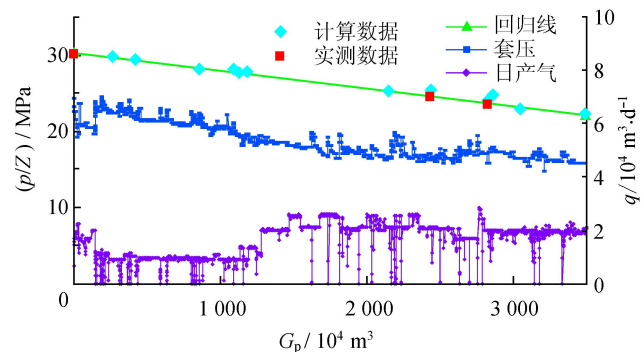


图1 X-4井降压及生产动态曲线图

选取储层物性好, 可动储量偏低的气井重复改造, 提高储量动用程度。X-5 井测井解释储层物性相对较好, 有效厚度 7 m, 渗透率 $0.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙度 5.8%, 初期产气 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 只能间歇生产, 评价可动储量仅 $1.13 \times 10^8 \text{ m}^3$; 2004 年 10 月对该井进行二次酸压改造, 产气提高到 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 评价该井可动储量为 $2.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 2)。

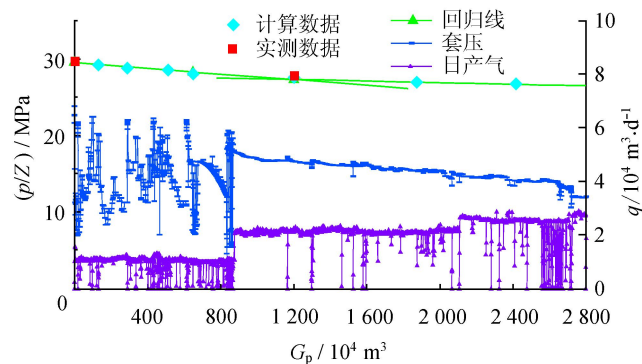


图2 X-5井降压及生产动态曲线图

3 结论

1) 针对长庆气田气井可动储量评价面临测试压力点少、气井工作制度不稳定等难点,立足气藏生产动态资料,在压降法的基础上,形成了产量不稳定分析法、流动物质平衡法、优化拟合法等适合长庆气田低渗非均质特征的气井可动储量评价方法,为长庆气田气井可动储量全面评价提供了技术支持。

2) 利用气田可动储量评价成果,开展气田加密井部署、优化气田工作制度、优选储层二次改造井等工作,取得了较好效果,进一步提高了气田储量动用程度。

符 号 说 明

p_i 、 p 分别为原始地层压力和气井生产到某一时刻时的压力,MPa; Z_i 、 Z 分别为气体原始偏差系数和生产某一时刻时的气体偏差系数; G 为地质储量, m^3 ; G_p 为累计产气量, m^3 ; p_p 为拟压力; K 为有效渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; h 为有效厚度,m; C_t 为综合压缩系数, $1/MPa$; C_g 为气体压缩系数, $1/MPa$; $q(t)$ 为流体速度; q_s 为气井的稳定产量, $10^4 m^3/d$; T_{sc} 为地面标准温度,K; p_{sc} 为地面标准压力,MPa; μ 为地层气体黏度, $mPa \cdot s$; T 为地

层温度,K; p_{wf} 为井底流压,MPa; r_e 为供给半径,m。

参 考 文 献

- [1] 张伦友.关于可动储量的概念及确定经济可采储量的方法[J].天然气勘探与开发,1996,19(4):75-76.
- [2] 王鸣华.一种计算气井控制储量的新方法[J].天然气工业,1996,16(4):50-53.
- [3] 李士伦.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [4] 黄炳光.气藏工程与动态分析方法[M].北京:石油工业出版社,2004.
- [5] 张啸枫,唐俊伟,位云生,等.苏里格气田单井生产动态分析与管理[J].西南石油大学学报,2009,31(3):110-114.
- [6] 阿普斯.生产动态分析理论与实践[M].雷群,译.北京:石油工业出版社,2008.
- [7] 陈伟,段永刚,严小勇,等.低渗气藏单井非稳态产能分析及控制储量评价[J].西南石油大学学报,2007,29(2):34-36.
- [8] 李欣.应用瞬态物质平衡法计算气藏储量[J].天然气工业,2002,22(4):71-72.

(修改回稿日期 2010-01-18 编辑 韩晓渝)