

# 低渗气藏单井控制储量简易计算方法

## ——以FL页岩气田PQ区块气井为例

唐人选, 梁 珀, 吴公益, 王联果

(中国石化华东油气分公司泰州采油厂 江苏 泰州 225300)

**摘要:**流动物质平衡法计算储量方法简易,前提是产量稳定,但矿场井口产量经常变化,无法形成有效直线段;即使产量保持稳定,使用流动压力计算的储量也偏低。利用物质平衡方程计算储量的关键就是要准确求取地层压力,介绍一种简易计算不同时间气藏压力的方法,利用井口压力计算井底压力,再由气井产能方程计算不同时间的气藏压力,这样无需考虑产量变化及地层压力与流压之差所导致的物性参数变化,求得的物质平衡方程线性相关程度较高,储量误差小。通过PQ区块单井控制储量两种方法计算,流动物质平衡法平均误差34.2%,说明本文计算方法简单、有效、实用。

**关键词:**低渗气藏 物质平衡方程 气藏压力 单井控制储量

中图分类号:TE331.1

文献标志码:A

# A simple calculation method for the single well controlled reserves of low permeability gas reservoir: taking gas wells of PQ block, FL shale gasfield as examples

TANG Renxuan, LIANG Po, WU Gongyi, WANG Lianguo

(Taizhou Oil Production Plant of East China Oil and Gas Company, SINOPEC, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** The method of calculating reserves by flow material balance is simple and easy, on the premise that the production is stable, but the output of wellhead often changes, which can not form an effective straight line segment; even if the production is stable, the reserves calculated by flow pressure are low. The key to calculating reserves by using material balance equation is to accurately calculate the formation pressure. This paper introduces a simple method for calculating gas reservoir pressure at different time, calculating bottom hole pressure by using wellhead pressure, and then calculating gas reservoir pressure at different time by using gas well productivity equation. Thus, it is not necessary to consider the change of physical parameters caused by production change and the difference between formation pressure and flow pressure. The linear correlation degree of mass balance equation is higher and the reserve error is smaller. The average error of the flow material balance method is 34% by calculating the single well controlled reserves in PQ block, FL shale gas field, which shows that the calculation method in this paper is simple, effective and practical.

**Key words:** low permeability gas reservoir; material balance equation; gas reservoir pressure; single well controlled reserves

物质平衡法是最可靠的计算单井储量的方法,而准确求取地层压力是关键。现场由于生产需要不可能定期关井测压,且低渗气藏地层压力恢复较慢,需要较长时间的关井,也会影响矿场正常生产。流动物质平衡法无需关井,根据井口压力和产量便可计算单井储量,有一定的理论依据<sup>[1]</sup>。但实际情况采用井口压力或井底流压绘制的定容封闭气藏压降

方程与真实地层压力压降方程存在较大偏差,主要原因就是产量不稳定。此外,许多文献<sup>[2-5]</sup>发现,即使产量保持稳定,流动物质平衡法计算储量也严重

收稿日期:2018-12-07;改回日期:2019-03-25。

第一作者简介:唐人选(1966—),硕士,高级工程师,现从事油气田开发工作。E-mail: tztrx888@sina.com。

偏低,相对误差最高 40%,文献<sup>[2-5]</sup>对此进行了改进,但方法繁琐。本文根据定容气藏产能方程,较好地解决了气藏压力求取,通过 9 口井储量计算,与流动物质平衡法对比,两者平均相对误差 34.2%,最大相对误差可达 60.3%,为低渗气藏储量计算提供了一种新方法。

## 1 方法研究

### 1.1 井底流压求取

气井若以油管生产,套管关闭,井底没有积液,则可根据井口套压计算井底流压,井口到井底是静止气柱,计算方法较多,文献<sup>[6]</sup>介绍了 3 种计算井底压力的方法,采用计算机均能很快计算出结果。表 1 是 PQ 区块 4 口井计算压力和实测压力对比,误差较小,说明采用井口套压计算井底压力方法可行。

表 1 PQ 区块 4 口井计算压力与实测压力对比

井名	计算压力/MPa	实测压力/MPa	相对误差/%
JY8	45.63	45.75	-0.26
JY10	25.73	25.67	0.23
JY195-3HF	37.95	37.85	0.26
JY200-1HF	25.74	25.76	-0.08

### 1.2 目前地层压力求取

压力消耗方式多井气田的开发,气井采气全靠排气范围内气体本身弹性膨胀,没有外部气源供给,由气体等温压缩可推导出气体产能状态方程<sup>[6]</sup>:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = Aq_{sc} + Bq_{sc}^2 \quad (1)$$

式中, $p_e$  为气藏静压,MPa; $p_{wf}$  为井底流压,MPa; $q_{sc}$  为气井标准状态下产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;A 为层流系数,B 为紊流系数,具体物理意义详见文献<sup>[6]</sup>。

气体产能状态方程中系数 A、B 可由系统试井求取,也可由一点法经验公式求取。对于系统试井而言,将式(1)转换成直线方程,易求得系数 A、B。对于低渗气藏,系统试井每个测试点均要求稳定,测试时间较长,浪费气体。一般采用一点法测试,达到稳定后,再关井求取地层压力。这里介绍一点法求取气体产能方程,当采用一点法测试后,可由经验公式求取气井绝对无阻流量  $q_{AOF}$ 。

$$q_{AOF} = \frac{6q_{sc}}{\sqrt{1 + 48\left(1 - \left(\frac{p_{wf}}{p_e}\right)^2\right) - 1}} \quad (2)$$

式中: $q_{AOF}$  为标准状态下气井绝对无阻流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ; $p_{wf}$  为测试时稳定井底流压,MPa; $q_{sc}$  为测试时标准状态下稳定产气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

气体产能方程还可表示为<sup>[7]</sup>:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \alpha \frac{q_g}{q_{AOF}} p_e^2 + (1 - \alpha) \left(\frac{q_g}{q_{AOF}}\right)^2 p_e^2 \quad (3)$$

$$\text{式中 } \alpha = \frac{A}{A + Bq_{AOF}}$$

文献<sup>[7]</sup>在统计 16 个气田系统试井基础上,经过线性回归, $\alpha$  取 0.25,这样式(3)可简化为:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{p_e^2}{4q_{AOF}} q_g + \frac{3p_e^2}{4q_{AOF}^2} q_g^2$$

方程右边第 1 项表示粘滞性引起的压力损失,第 2 项表示惯性引起的压力损失,两项压力损失之和构成气体流入井底的总压降,两项压降均与气体流量有关,气体流量越大,压力损失越大。反之气体从气藏流入井底的总压降与井底流压之和就是目前气藏压力。因此,气体产能方程不仅可用于预测气井产量,更重要的是还可根据气井产量计算气藏压力。只要知道气井产能方程、井底流压和气体流量,根据式(1)便可反求目前气藏压力  $p_e$ :

$$p_e = \sqrt{p_{wf}^2 + Aq_{sc} + Bq_{sc}^2} \quad (4)$$

### 1.3 气藏储量计算

在已知气井流量和井口套压下,可求得井底流压,进而求得气藏目前压力,由不同时期气藏压力和累计产气量,根据封闭气藏压降方程便可求得单井控制储量  $G$ <sup>[8]</sup>。

$$\frac{p}{Z} \frac{p_e}{Z_i} = (1 - \frac{G_p}{G}) = a - bG_p \quad (5)$$

则单井控制储量

$$G = \frac{a}{b} \quad (6)$$

式中, $p$  为对于累计产气量  $G_p$  下的气藏压力,MPa; $Z$  为气藏压力  $p$  下气体偏差系数,无因次; $Z_i$  为气藏原始压力下的气体偏差系数,无因次; $G_p$  为气井累计产气量, $10^4 \text{ m}^3$ ; $G$  为气藏单井控制储量, $10^4 \text{ m}^3$ 。

## 2 实例分析

下面举例说明采用本文方法计算气藏压力代替井底流压,线性相关性更高,而采用流动法计算的储量偏低,甚至在产量变化较大时无法出现直线段。

例 1: JY197-5HF 井,原始地层压力 52.67 MPa,地层温度 106.97 °C,2018 年 2 月投产,每月生产数据见表 2。根据套压计算的井底流压、目前气藏压力、气藏视压力和流动视压力见表 2。由气藏视压力及流动视压力绘制的压降方程见图 1。

表 2 JY197-5HF 井生产数据地层压力及流动压力

日期	套压/MPa	井底流压/MPa	目前压力/MPa	地层温度/℃	气藏压力偏差系数	流动压力偏差系数	累计产气量/ $10^4\text{ m}^3$	气藏视压力 $p_e/Z$	流动视压力 $p_{wf}/Z$
			52.67	106.97	1.20		0	43.94	
2018-02	24.31	29.90	50.75	106.97	1.19	0.96	208.69	42.57	30.99
2018-03	25.95	31.86	46.44	106.97	1.14	0.98	442.57	40.63	32.37
2018-04	23.97	29.58	42.54	106.97	1.10	0.96	637.53	38.57	30.79
2018-05	22.39	27.69	40.53	106.97	1.08	0.94	836.22	37.53	29.42
2018-06	21.20	26.21	37.65	106.97	1.05	0.93	1 007.75	35.86	28.30
2018-07	21.01	25.97	38.18	106.97	1.06	0.92	1 157.57	36.12	28.12
2018-08	19.60	24.21	35.73	106.97	1.03	0.97	1 328.54	34.69	24.96
2018-09	18.65	23.05	33.99	106.97	1.02	0.97	1 483.61	33.49	23.80
2018-10	17.86	22.09	32.52	106.97	0.97	0.97	1 634.61	33.62	22.84

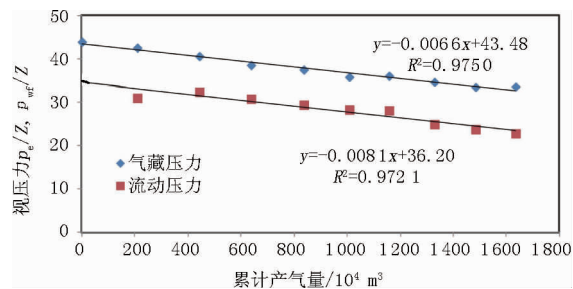


图 1 Y197-5HF 井视地层压力及视流动压力压降方程

从图 1 可以看出,流动压力直线斜率明显小于气藏压力直线斜率,采用气藏压力压降方程求得的

单井控制储量为  $0.6587 \times 10^8\text{ m}^3$ ,流动压力压降方程求得的单井控制储量为  $0.4469 \times 10^8\text{ m}^3$ ,明显低于气藏压力压降方程求得的储量,两者相对误差 32.2%。

例 2: JY197-1HF 井,原始气藏压力 45.35 MPa,地层温度 95.32℃。

2018 年 1 月投产,每月生产数据见表 3,根据套压计算的井底流压、目前气藏压力、气藏视压力和流动视压力见表 3。由气藏视压力及流动视压力绘制的压降方程见图 2。

表 3 JY197-1HF 井生产数据地层压力及流动压力

日期	套压/MPa	井底流压/MPa	地层压力/MPa	地层温度/℃	视气藏压力偏差系数	视流动压力偏差系数	累计产气量/ $10^4\text{ m}^3$	气藏视压力 $p_e/Z$	流动视压力 $p_{wf}/Z$
			45.35	95.32	1.12		0	40.53	
2018-01	14.83	18.02	40.86	95.32	1.08	0.94	48.69	37.83	19.17
2018-02	21.27	25.74	38.62	95.32	1.06	0.91	220.85	36.58	28.32
2018-03	22.82	27.61	33.95	95.32	1.00	0.93	448.38	33.95	29.69
2018-05	22.36	27.06	32.40	95.32	0.98	0.92	816.84	32.91	29.32
2018-06	21.68	26.24	31.07	95.32	0.97	0.91	991.81	32.01	28.69
2018-07	21.54	26.07	31.16	95.32	0.97	0.91	1 151.83	32.09	28.56
2018-08	20.50	24.79	29.75	95.32	0.96	0.95	1 329.74	31.12	26.06
2018-09	19.69	23.98	28.87	95.32	0.95	0.95	1 502.67	30.50	25.24
2018-10	18.98	23.17	28.01	95.32	0.95	0.95	1 669.99	29.52	24.43

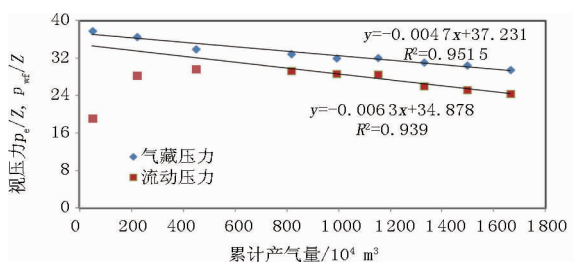


图 2 JY197-1HF 井视地层压力及视流动压力压降方程

从图 2 可以看出,采用流动压力求得的数据,早期因为产量变化较大,流动压力没有反映出不同流量引起的压力损失,数据线性程度较差,后期产量相对平稳,数据线性程度较高;而采用气藏压力求得的压降直线方程,不论产量如何变化,线性程度均较高。此外,两种压力求得的单井控制储量也不同,流动压力求得的单井控制储量为  $0.5528 \times 10^8\text{ m}^3$ ,气

藏压力求得的单井控制储量为  $0.7919 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 两者相差 30.2%。

表4是对PQ区块9口井采用两种方法计算的储量对比,流动压力计算结果普遍偏低,最小相差17.0%,最大相差60.3%,9口井平均相差34.2%。因此,使用流动压力计算储量不可靠,且受产量变化影响线性相关程度低。本文采用产能方程计算气藏压力,再据此计算气藏储量,线性相关程度较高,结果更准确。

表4 PQ区块两种方法计算储量的对比

井名	流动压力计算 储量/ $10^8 \text{ m}^3$	地层压力计算 储量/ $10^8 \text{ m}^3$	相对误差/%
JY194-1HF	0.5111	0.6159	17.0
JY194-2HF	0.5750	1.1670	50.7
JY194-3HF	1.1956	1.6597	28.0
JY195-1HF	0.9679	1.3957	30.7
JY195-4HF	1.6260	2.2050	26.3
JY197-1HF	0.5528	0.7919	30.2
JY197-2HF	0.7687	1.1110	30.8
JY197-3HF	0.4994	1.2586	60.3
JY197-5HF	0.4469	0.6587	32.2
平均值	0.7937	1.2071	34.2

### 3 结论

(1)流动压降方程没有考虑产量变化引起的压

力损失,当产量变化较大时,数据线性化程度较低,无法求得单井控制储量。气藏压力压降方程考虑了产量变化引起的压力损失,数据线性化程度较高,结果较为准确。

(2)采用流动压力求得的单井控制储量明显低于气藏压力求得的单井控制储量,建议使用气藏压力求单井控制储量。

#### 参考文献:

- [1] 黄金华,陈冲,皮建,等. “流动”物质平衡法理论依据研究[J]. 油气藏评价与开发,2015,5(5):30-33.
- [2] 李靖,李相方,胡素明,等. 流动物质平衡法误差分析及改进[J]. 大庆石油地质与开发,2015,34(6):57-61.
- [3] 申颖浩,何顺利,王少军,等. 改进压降法确定气藏动态储量[J]. 油气井测试,2011,20(6):1-3.
- [4] 李骞,郭平,黄全华. 气井动态储量方法研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2008,10(6):34-36.
- [5] 刘尧文,张茂林,刘常旭,等. 流动物质平衡确定低渗气藏单井控制储量[J]. 天然气勘探与开发,2013,36(2):41-43.
- [6] 杨继盛. 采气工艺基础[M]. 北京:石油工业出版社,1992:99-109.
- [7] 陈元千. 油气藏工程计算方法[M]. 北京:石油工业出版社,1990:21-25.
- [8] 黄炳光,冉新权,李晓平. 气藏工程分析方法[M]. 北京:石油工业出版社,2004:146-147.

(编辑 谢 葵)

(上接第58页)

- [15] 刘锦成. 聚合物凝胶降低水相渗透率大于油相的机理研究[J]. 国外油田工程,1996(10):10-12.
- [16] 石京平,杨清彦,刘成芬,等. 聚合物溶液吸附对油层物性影响的试验研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2005,27(1):224-227.
- [17] 吕凯,戴彩丽,张若然. 疏水缔合聚合物在地层多孔介质吸附特性研究[J]. 油田化学,2010,27(4):391-393.

- [18] 熊启勇,陈国锦,韩晓强. 部分水解聚丙烯酰胺在地层多孔介质吸附特性研究[J]. 新疆石油科技,2005,15(1):37-40.
- [19] 李华斌,尚育秋. 疏水缔合聚合物在孔隙介质上的静态吸附特征[J]. 大庆石油地质与开发,2006,25(5):93-95.
- [20] 孟中华,刘平礼,吴媛媛. 聚合物的静态吸附机理研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2010,32(6):315-318.

(编辑 谢 葵)