

天然气开发

利用生产动态资料确定气井产能方程新方法

胡俊坤¹, 李晓平², 肖强³, 敬伟⁴

- (1. 中国石油西南油气田公司天然气经济研究所, 四川 成都 610501;
2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;
3. 中国石油青海油田冷湖油田管理处, 甘肃 敦煌 736200;
4. 中国石油青海油田井下工艺研发中心, 甘肃 敦煌 736200)

摘要:利用生产动态资料确定气井产能方程主要包括2个方面内容:一是利用气井井口油压及相关参数,确定对应的井底流压;二是在井底流压确定的基础之上,确定储层的地层压力及气井产能方程。根据垂直管流中流体的质量守恒与动量守恒原理确定井底流压;而依据不关井试井理论确定地层压力。利用气井实际的生产动态资料,在井底流压与地层压力确定的基础之上,即可确定气井的产能方程。通过实例分析,验证了该方法的可行性及可靠性。

关键词:气井;动态资料;垂直管流;不关井试井;产能方程

中图分类号:TE332 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2013)05-1027-05

引用格式:Hu Junkun, Li Xiaoping, Xiao Qiang, *et al.* A new method of using dynamic data to determine deliverability equation of gas well[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5):1027-1031. [胡俊坤, 李晓平, 肖强, 等. 利用生产动态资料确定气井产能方程新方法[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5):1027-1031.]

0 引言

气井产能方程是确定气井无阻流量的重要方程,同时是气井生产系统分析及生产动态预测的基础^[1-2]。国内外不少学者^[3-7]对气井的产能方程进行了研究,目前确定气井产能方程的方法大致分为两大类:

(1)产能试井^[8-9]:主要包括回压试井、等时试井、修正等时试井、一点法试井及不关井试井。

(2)理论计算法:根据气井稳定渗流理论确定的二项式产能方程,结合相关参数资料,计算出二项式产能系数,从而确定出气井的二项式产能方程。李晓平^[10]建立了利用压力恢复资料求产能方程和排泄半径的方法;唐洪俊^[11]建立了采用可变系数数值确定气井产能方程的分析方法;张虎俊等^[12]对气井产能方程的建立与地层压力的计算进行了研究;狄伟等^[13]提出了通过井底流压与产量数据,利用线性

回归的方法,确定气井的二项式产能方程;李跃刚等^[14]提出了利用单点测试资料建立气井产能方程的方法。以上方法均要求气井有压力测试资料(井底流压或地层静压)或相关参数资料,对于没有测试资料的生产历史不长的气井而言,气井产能方程的确定存在困难。针对上述情况,利用气井的生产动态资料确定气井的产能方程具有较强的实用性。

1 井底流压的确定

根据气井的生产情况,可将气井的垂直管流分为两大类:单相流与气液两相流。

1.1 单相流模型

依据垂直管流中气体的质量守恒与动量守恒原理可得井底流压的计算公式为^[15]:

$$P_{wf} = \sqrt{P_{wh}^2 e^{2S} + 1.32 \times 10^{-18} f(q_{sc} T Z)^2 (e^{2S} - 1) / D^5} \quad (1)$$

其中

$$S = \frac{0.034 18 \gamma_g H}{T \bar{Z}} \quad (2)$$

$$f = \left[\frac{1}{1.14 - 2 \text{Lg} \left(\frac{e}{D} + \frac{21.25}{Re^{0.9}} \right)} \right]^2 \quad (3)$$

式(1)–(3)中: P_{wf} 为井底流压, MPa; P_{wh} 为井口油压, MPa; S 为指数; f 为摩阻系数; q_{sc} 为标准状态下的天然气体积流量, m^3/d ; \bar{T} 为平均温度, K; \bar{Z} 为平均偏差系数; e 为自然底数, 2.718 28; D 为油管内径, m; γ_g 为天然气相对密度; H 为井口到气层中部深度, m; Re 为雷诺数。

1.2 气液两相流模型

相对于单一气相来说, 气液两相流要复杂的多。用 Hagedorn-Brown 模型来计算气液两相流的井底流压优于其他模型^[16-17]。与单相流动相同, 根据垂直管流中流体的质量守恒与动量守恒原理, 可以导出多相流的能量方程为:

$$\frac{dp}{dz} = \rho_m \times u_m \times \frac{du_m}{dz} + g \times \rho_m + \frac{f_m \times \rho_m \times u_m^2}{2 \times D} \quad (4)$$

从(4)式出发, 考虑到现场实际单位的换算, 可以得到:

$$10^6 \frac{dp}{dz} = \rho_m \times g + \frac{f_m \times q_t^2 \times M_t^2}{9.21 \times 10^9 \times \rho_m \times D^5} + \frac{\rho_m d \frac{u_m^2}{2}}{dz} \quad (5)$$

其中

$$M_t = 1\,000 \times \gamma_o \times f_o + 1\,000 \times \gamma_w \times f_w + 1.205 \times GLR \times \gamma_g \quad (6)$$

$$\rho_m = \rho_l H_1 + \rho_g (1 - H_1) \quad (7)$$

$$\rho_l = \left(\frac{1\,000 \times \gamma_o + 1.205 \times R_s \times \gamma_g}{B_o} \right) \left(\frac{1}{1 + WOR} \right) + \left(\frac{1\,000 \times \gamma_w}{B_w} \right) \left(\frac{WOR}{1 + WOR} \right) \quad (8)$$

$$\rho_g = 1.205 \times \gamma_g \left(\frac{p}{0.101\,325} \right) \left(\frac{293.15}{T} \right) \left(\frac{1}{Z} \right) \quad (9)$$

对于不产油的产水气井而言, 式(6)、式(8)可分别简化为:

$$M_t = 1\,000 \times \gamma_w \times f_w + 1.205 \times GLR \times \gamma_g \quad (10)$$

$$\rho_l = \frac{1\,000 \times \gamma_w}{B_w} = \rho_w \quad (11)$$

式(4)–(11)中: p 为井筒中任意点的压力, MPa; ρ_w 为气液混合物的密度, kg/m^3 ; u_m 为气液混合物的流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; f_m 为两相摩阻系数; q_t 为地面产液量, m^3/d ; M_t 为标准状况下每生产 1m^3 液体伴生油、气、水的总质量, kg/m^3 ; H_1 为持液率; ρ_l 为液体密度, kg/m^3 ; γ_o 为油的相对密度; γ_w 为水的相对密度; R_s 为溶解气油比; B_o 为油的体积系数; B_w 为水的体积系数; WOR 为生产水油比; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_g 为气的密度, kg/m^3 ; f_w 为含水率; f_o 为含油率; GLR 为气液比。

在选用此模型进行计算的过程中主要采用迭代的方法。首先选定井筒长度增量, 然后根据公式(12):

$$\Delta p = 10^{-6} \left[\Delta z \left(\rho_m \times g + \frac{f_m \times q_t^2 \times M_t^2}{9.21 \times 10^9 \times \rho_m \times D^5} \right) + \rho_m \Delta \left(\frac{u_m^2}{2} \right) \right] \quad (12)$$

在相应变化的长度区间内假设一个 Δp , 计算出在此长度和压力区间内的物性参数, 利用式(12), 计算出 Δp_1 。将 Δp_1 与假设的 Δp 进行比较, 如果满足精度要求则进行下一个长度区间的计算, 否则令 $\Delta p = \Delta p_1$, 再次进行计算, 如此反复, 直到满足要求为止。

2 地层压力的确定

在井底流压确定的基础之上, 利用气井生产动态资料(日产气量), 结合气井二项式产能方程, 通过不关井试井的思想确定地层压力^[5]。由气井的二项式产能方程变形可得:

$$(p_R^2 - p_{wf}^2)/q_{sc} - Bq_{sc} = A \quad (13)$$

式(13)中: p_R 为地层压力, MPa; A 为二项式产能方程层流项系数; B 为二项式产能方程湍流项系数。

在较短的生产时间范围内, 可近似认为二项式系数 A 为常数, 由式(13), 对于任意 2 个生产数据点则有:

$$\begin{aligned} (p_R^2 - p_{wf1}^2)/q_{sc1} - Bq_{sc1} &= \\ (p_R^2 - p_{wf2}^2)/q_{sc2} - Bq_{sc2} & \end{aligned} \quad (14)$$

整理式(14)可得:

$$\frac{p_R^2}{q_{sc1}} - \frac{p_R^2}{q_{sc2}} - \left(\frac{p_{wf1}^2}{q_{sc1}} - \frac{p_{wf2}^2}{q_{sc2}} \right) = B(q_{sc1} - q_{sc2}) \quad (15)$$

同理可得:

$$\frac{p_R^2}{q_{sc2}} - \frac{p_R^2}{q_{sc3}} - \left(\frac{p_{wf2}^2}{q_{sc2}} - \frac{p_{wf3}^2}{q_{sc3}} \right) = B(q_{sc2} - q_{sc3}) \quad (16)$$

联立式(15)与式(16)可得:

$$p_R = \left[\frac{\left(\frac{p_{wf1}^2}{q_{sc1}} - \frac{p_{wf2}^2}{q_{sc2}} \right) - \left(\frac{p_{wf2}^2}{q_{sc2}} - \frac{p_{wf3}^2}{q_{sc3}} \right) \left(\frac{q_{sc1} - q_{sc2}}{q_{sc2} - q_{sc3}} \right)}{\left(\frac{1}{q_{sc1}} - \frac{1}{q_{sc2}} \right) - \left(\frac{1}{q_{sc1}} - \frac{1}{q_{sc2}} \right) \left(\frac{q_{sc1} - q_{sc2}}{q_{sc2} - q_{sc3}} \right)} \right]^{0.5} \quad (17)$$

实际应用时,可采用3个点为1组,计算出相应的 p_R ;取不同的组合后可获得多个 p_R ,求其平均值作为目前的地层压力 p_R 。求出地层压力 p_R 后,结合确定的井底流压与日产气量,即可求取气井的二项式产能系数 A 、 B 。确定二项式产能系数 A 、 B 的方法如下。

由气井的二项式产能方程变形可得:

$$(p_R^2 - p_{wf}^2)/q_{sc} = A + Bq_{sc} \quad (18)$$

在直角坐标系中,作出 $(p_R^2 - p_{wf}^2)/q_{sc}$ 与 q_{sc} 的关系曲线,将数据点回归成一条直线,直线的截距即为二项式产能系数 A ,直线的斜率即为二项式产能系数 B 。在确定出二项式产能系数 A 、 B 的基础之上,最终可确定气井的二项式产能方程与无阻流量。

3 实例计算

某气井的产层中部深度 H 为 852.40m、地层温度 T 为 45.19℃、气体相对密度 γ_g 为 0.55、油管直径 D 为 0.159m、地层水密度 ρ_w 为 1.115g/cm³、气井的生产动态资料、计算所得井底流压与地层压力如表 1 所示;该井采用修正等时试井所得测试资料如表 2 所示。

表 1 气井井底流压与地层压力计算成果

Table 1 The calculation results of bottom hole flowing pressure and formation pressure

日产气量 /($\times 10^4$ m ³ /d)	日产水量 /(m ³ /d)	井口油压 /MPa	计算所得	
			井底流压 /MPa	地层压力 /MPa
1.81	2.05	7.86	8.42	8.59
2.07	2.08	7.78	8.38	8.59
2.20	2.32	7.65	8.33	8.59
2.38	2.00	7.49	8.31	8.59

根据表 1、表 2 中日产气量、井底流压及地层压力数据,分别作出气井的二项式产能曲线,如图 1、图 2 所示。

根据动态资料计算所得二项式产能曲线(图 1)可得气井的二项式产能方程为:

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = 0.207 1q_{sc} + 0.765 8q_{sc}^2 \quad (19)$$

根据修正等时试井所得二项式产能曲线(图 2)可得气井的二项式产能方程为:

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = 0.348 9q_{sc} + 0.693 5q_{sc}^2 \quad (20)$$

表 2 气井修正等时试井所得测试资料

Table 2 The test data of gas well modified isochronal test

日产气量 /($\times 10^4$ m ³ /d)	井口油压 /MPa	井底温度 /K	井底流压 /MPa	地层压力 /MPa
2.77	7.4	318.19	8.305	8.647
2.43	7.7	318.19	8.322	8.573
2.40	7.7	318.19	8.364	8.585
1.79	7.9	318.19	8.448	8.592
2.72	7.5	318.19	8.288	8.647

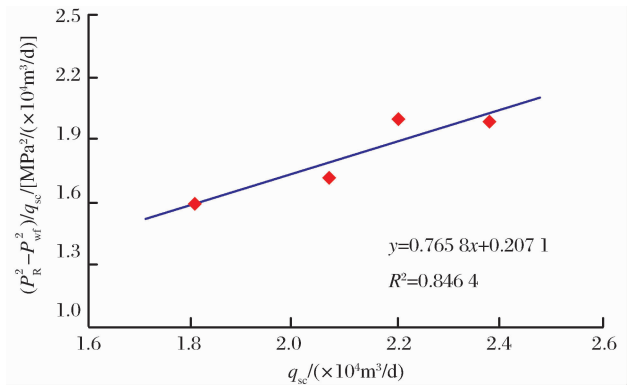


图 1 动态资料计算所得二项式产能曲线
Figure 1 The binomial deliverability curve determined by dynamic data

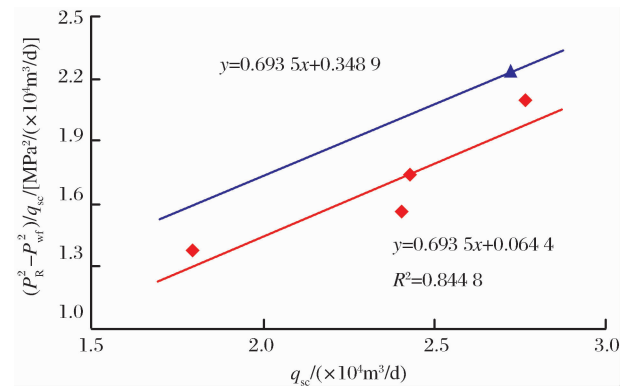


图 2 修正等时试井所得二项式产能曲线
Figure 2 The binomial deliverability curve determined by modified isochronal test

根据动态资料计算所得二项式产能方程式(19)与修正等时试井所得二项式产能方程式(20),可作出该气井的流入动态曲线对比图(图 3)。从气井的流入动态曲线对比(图 3)可知,利用动态资料计算

所得无阻流量($9.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)与产能试井分析所得无阻流量($10.13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)存在一定的差异,但二者相差微小,相对误差仅为 4.47%,满足现场的要求,同时验证了利用生产动态资料确定气井产能方程的可行性与可靠性。

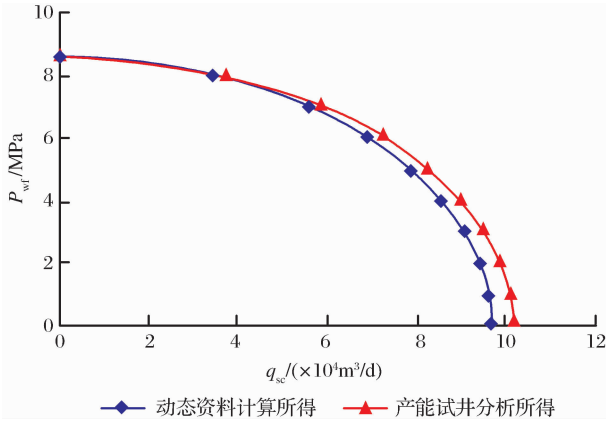


图3 气井流入动态曲线对比

Figure 3 Gas well inflow performance relationship curve comparison chart

4 结论

(1)通过理论推导与实例计算表明,利用生产动态资料(日产气量、日产水量、井口油压及井口温度)及相关参数(气层中部深度、地层温度、油管内径、气体相对密度及地层水密度)确定气井产能方程是可行的,同时也是可靠的。

(2)利用生产动态资料确定气井产能方程所需资料易获取,产能方程确定的准确性主要取决于井底流压与地层压力计算的准确性。

(3)对于储层物性较好,生产受地层水影响较弱的气井,利用生产动态资料确定气井的产能方程可取得较好的效果;对于储层物性较差,生产受地层水影响较强的气井,考虑到低渗储层气体的渗流受启动压力梯度及应力敏感的影响,而气水两相渗流过程复杂,从而使得准确地确定地层压力存在一定困难,因此,利用生产动态资料确定气井的产能方程可能会产生较大的误差。

参考文献 (References):

[1] Zhuang Huinong. Dynamic Description and Well Test of Gas Reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 52-54. [庄惠农. 气藏动态描述和试井[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 52-54.]

[2] Xie Xingli, Zhu Yuxin, Ji Guang, *et al.* Evaluation methodology and application of well deliverability in gas reservoir[J].

Natural Gas Geoscience, 2004, 15(3): 276-279. [谢兴礼, 朱玉新, 冀光, 等. 气藏产能评价方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3): 276-279.]

- [3] Wang Nutao, Huang Bingguang, Liang Shangbin, *et al.* Analysis method for gas well deliverability[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(1): 33-34. [王努涛, 黄炳光, 梁尚斌, 等. 气井产能分析方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(1): 33-34.]
- [4] Tang Hongjun, Zhong Shuiqing, Xiong Jiyou, *et al.* The research and application of high-pressure and low-permeability gas well productivity prediction method[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(4): 540-542. [唐洪俊, 钟水清, 熊继有, 等. 高压低渗气井产能预测方法研究与应用[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 540-542.]
- [5] Li Xiaoping, Zhang Liehui, Liu Qiguo. Well Test Analysis Methods[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 15-26. [李晓平, 张烈辉, 刘启国. 试井分析方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 15-26.]
- [6] Zhu Weiyao, Song Hongqing, He Dongbo, *et al.* Low-velocity non-Darcy gas seepage model and productivity equations of low-permeability water-bearing gas reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(5): 685-689. [朱维耀, 宋洪庆, 何东博, 等. 含水低渗气藏低速非达西渗流数学模型及产能方程研究[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(5): 685-689.]
- [7] Peng Chaoyang. Discussion on equation application of deliverability with different form for gas well[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1): 172-174. [彭朝阳. 气井不同形式产能方程应用探讨[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(1): 172-174.]
- [8] Tang Junwei, Ma Xinhua, Jiao Chuangyun, *et al.* A new testing method of gas well potential; Backpressure isochronal test[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(5): 540-544. [唐俊伟, 马新华, 焦创赞, 等. 气井产能测试新方法——回压等时试井[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(5): 540-544.]
- [9] He Shumei, Yang Bo, Wang Zhe, *et al.* Deliverability testing method of gas condensate wells with high condensate content and its application[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(6): 894-901. [何书梅, 杨波, 王哲, 等. 高凝析油含量凝析气井产能试井方法及应用[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 894-901.]
- [10] Li Xiaoping. Determining deliverability equation and drainage radius using pressure buildup data of gas well[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2001, 8(1): 24-26. [李晓平. 利用气井压力恢复资料求产能方程和排泄半径[J]. 断块油气田, 2001, 8(1): 24-26.]
- [11] Tang Hongjun. The analysis of using variable coefficient to determine gas well deliverability equation[J]. Drilling & Production Technology, 1997, 20(2): 27-29. [唐洪俊. 采用可变系数值确定气井产能方程分析[J]. 钻采工艺, 1997, 20(2): 27-29.]
- [12] Zhang Hujun, Yan Bing. New method of establishment of gas well productivity equation and reservoir pressure calculation [J]. Drilling & Production Technology, 1998, 21(1): 33-37.

- [张虎俊, 鄢斌. 建立气井产能方程及计算地层压力的新方法[J]. 钻采工艺, 1998, 21(1): 33-37.]
- [13] Di Wei, Yang Anlin. A simple method for establishing binomial deliverability equation of gas well[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(supplement): 109-110. [狄伟, 杨安林. 建立气井二项式产能方程的一种简单方法[J]. 天然气工业, 2001, 21(增刊): 109-110.]
- [14] Li Yaogang, Wang Xiaodong. Building productivity equation of gas well based on singlepoint test data[J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(2): 49-51. [李跃刚, 王晓东. 利用单点测试资料建立气井产能方程的新方法[J]. 天然气工业, 1996, 16(2): 49-51.]
- [15] Li Shilun. Gas Engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 113-115. [李士伦. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 113-115.]
- [16] Hagedorn A R, Brown K E. Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small-diameter vertical conduits [J]. Journal of Petroleum Technology, 1965, 17(4): 475-484.
- [17] Orkiszewski J. Predicting two-phase pressure drop in vertical pipe[J]. Journal of Petroleum Technology, 1967, 19(6): 829-838.

A New Method of Using Dynamic Data to Determine Deliverability Equation of Gas Well

HU Jun-kun¹, LI Xiao-ping², XIAO Qiang³, JING Wei⁴

(1. Natural Gas Economic Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China;

2. State Key Laboratory of Oil Gas Geology and Exploration Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Cold Lake Management Office of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736200, China;

4. Borehole Technology Research and Development Center of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736200, China)

Abstract: Using dynamic data to determine deliverability equation of gas well mainly includes two aspects: On the one hand is to use tubing head pressure and correlating parameters of gas well to determine corresponding bottom hole flowing pressure, on the other hand is to determine formation pressure and deliverability equation of gas well on the basis of determinate bottom hole flowing pressure. Bottom hole flowing pressure is determined by mass conservation law and principle of conservation of momentum of fluid in vertical pipe; Formation pressure is determined by well test theory of well without shut-in. Using dynamic data of gas well, on the basis of determinate bottom hole flowing pressure and determinate formation pressure, the deliverability equation of gas well can be determined finally. The case study indicates that the method is practical and accurate.

Key words: Gas well; Dynamic data; Fluid flowing in vertical pipe; Well test of well without shut-in; Deliverability equation

公告

2014年《天然气地球科学》杂志改为月刊出版

应广大读者、作者要求以及出于缩短论文发表周期的目的,经报相关管理部门批准,《天然气地球科学》杂志自2014年起改为月刊出版,出版日期为每月10日。欢迎各位科研人员踊跃赐稿,我们将竭诚做好服务工作。

特此公告。