

# 水平气井无阻流量的计算方法及应用

杨作明<sup>1</sup> 王 彬<sup>1</sup> 刘兰芹<sup>2</sup> 潘前樱<sup>1</sup> 李道清<sup>1</sup> 庞 晶<sup>1</sup>

(1. 新疆油田公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 胜利油田分公司 胜利采油厂, 山东 东营 257041)

**摘 要:** 针对目前对水平气井产能和无阻流量研究较少的现状, 通过分析水平气井产能公式, 研究了在没有系统试井资料的情况下, 根据地层参数预测水平气井无阻流量的方法, 给出了在系统试井后水平井无阻流量的具体计算公式。并根据新疆油田水平气井的实际试气情况, 对预测值和实际结果进行了对比分析, 发现两者比较接近, 说明该方法可以用于水平气井的产能预测。

**关键词:** 水平井; 产能预测; 无阻流量; 二项式; 指数式

**中图分类号:** TE373 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2009)02-0082-03

随着气藏开发技术的不断发展, 水平井在气藏开发中的适用范围不断扩大。在气藏采用水平井进行开发时, 要对水平井产量进行预测, 判断水平井开发有无经济效益, 因此产量预测的准确与否直接影响着水平井开发的成败。

## 1 水平气井产能方程

水平气井产量公式可以利用保角变换方法推导出来<sup>[1-3]</sup>。经过理论推导, 以压力平方形式表示的水平气井产量公式为:

$$q_g = \frac{774.6 K_h h (p_e^2 - p_{wf}^2)}{\mu Z T \ln(r_{eh}/r'_w)} \quad (1)$$

式(1)与垂直气井产量公式有相似之处, 不同在于水平气井要考虑各向异性, 水平气井的泄气半径及有效井半径与垂直气井不同, 即在式(1)中:

$$r'_w = \frac{r_{eh} L}{2a [1 + \sqrt{1 - (L/2a)^2}] [\beta h / 2\pi r_w]^{(\beta h/L)}} \quad (2)$$

$$a = (L/2) [0.5 + \sqrt{0.25 + (2r_{eh}/L)^4}]^{0.5} \quad (3)$$

$$r_{eh} = L/2 + r_e \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt{K_h/K_v} \quad (5)$$

在水平井设计时, 利用式(1)就可以对水平井产能进行预测, 当  $p_{wf} = 0.101$  MPa 时, 其无阻流量为:

$$q_{AOF} = \frac{774.6 K_h h (p_e^2 - 0.101^2)}{\mu Z T \ln(r_{eh}/r'_w)} \quad (6)$$

若考虑水平气井的损害及非达西流动效应的影响, 则式(1)可表示为:

$$q_g = \frac{774.6 K_h h (p_e^2 - p_{wf}^2)}{\mu Z T [\ln(r_{eh}/r'_w) + S_h + Dq_g]} \quad (7)$$

## 2 水平气井无阻流量

### 2.1 二项式方程

对式(7)进行转换, 可以得到:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{\mu Z T [\ln(r_{eh}/r'_w) + S_h]}{774.6 K_h h} q_g + \frac{\mu Z T D}{774.6 K_h h} q_g^2 \quad (8)$$

水平气井二项式产能方程与垂直气井二项式产能方程有相似之处, 由式(8)可以得到水平气井二项式产能方程为<sup>[4-5]</sup>:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = A q_g + B q_g^2 \quad (9)$$

$$A = \frac{\mu Z T [\ln(r_{eh}/r'_w) + S_h]}{774.6 K_h h} \quad (10)$$

$$B = \frac{\mu Z T D}{774.6 K_h h} \quad (11)$$

$$D = 2.191 \times 10^{-18} \frac{\beta r_g \sqrt{K_h K_v}}{\mu h r_w} \quad (12)$$

对式(9)进一步整理得:

$$\frac{p_e^2 - p_{wf}^2}{q_g} = A + B q_g \quad (13)$$

由式(13)可知,  $\frac{p_e^2 - p_{wf}^2}{q_g}$  与  $q_g$  之间满足线性关系, 其直线的斜率为系数  $B$ , 直线的截距为  $A$ 。因

收稿日期: 2008-02-01; 改回日期: 2009-01-09

作者简介: 杨作明(1978—), 甘肃会宁人, 2002年毕业于石油大学(华东)石油工程专业, 工程师, 主要从事天然气气藏工程方面的研究。

联系电话: (0990)6884024

此,将系统试井实测数据按 $\frac{p_e^2-p_{wf}^2}{q_g}$ 和 $q_g$ 整理,在直角坐标中做成直线,利用最小二乘法求出直线的斜率及截距即可求出系数 $B$ 和 $A$ ,然后,利用式(9)可得气井无阻流量的计算公式为:

$$q_{AOF}=\frac{\sqrt{A^2+4B(p_e^2-0.101^2)}-A}{2B} \tag{14}$$

2.2 指数式方程

根据试井理论,指数式产能方程为:

$$q_g=C(p_e^2-p_{wf}^2)^n \tag{15}$$

对式(15)两边取常用对数得:

$$\lg q_g=\lg C+n\lg(p_e^2-p_{wf}^2) \tag{16}$$

由式(16)可知, $\lg q_g$ 与 $\lg(p_e^2-p_{wf}^2)$ 之间存在直线关系,直线的截距为 $\lg C$ ,直线的斜率为指数 $n$ 。

将系统试井实际测资料按 $\lg q_g$ 和 $\lg(p_e^2-p_{wf}^2)$ 整理,应得到一条直线。根据直线的截距和斜率求得方程系数 $C$ 和 $n$ 之值,然后由下式计算出气井的绝对无阻流量。

$$q_{AOF}=C(p_e^2-0.101^2)^n \tag{17}$$

3 应用实例

3.1 水平井产量预测

以新疆油田 A 井区气藏为例论证气藏水平段长度和产能。已知气藏各水平段长度的水平渗透率均为 $0.68\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,垂向渗透率均为 $0.11\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,气层厚度均为 $8.0\text{ m}$ ,直井半径均为 $0.07\text{ m}$ ,地层压力均为 $24.88\text{ MPa}$ ,气体黏度均为 $0.013\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,气层偏差系数均为 $0.77$ ,地层温度均为 $345.1\text{ K}$ 。

利用式(1)就可以计算出不同水平段长度所对应的水平气井无阻流量(见表 1),气井产量按无阻流量的 20%计算。

从表 1 可看出,随着水平井长度的增加,产量增量出现明显下降时的水平井段长度和对应的产量为水平井设计长度和产量。当水平段长度大于 $800\text{ m}$ 时,水平井产量增加幅度趋于稳定。考虑目前水平井的钻井技术、气藏地质和井网井距等因素,A 井区气藏水平井的水平段长度设计为 $800\text{ m}$ 。当水平井的水平段长度为 $800\text{ m}$ 时,A 井区水平井单井日产气为 $8.19\times10^4\text{ m}^3$ ,设计水平井单井产能为 $8.00\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

表 1 A 井区不同水平段长度的产能

水平段 长度/m	无阻流量/ $10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	水平气井产量/ $10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	产量差值/ $10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$
100	17.86	3.57	
200	23.49	4.70	1.13
300	27.57	5.51	0.82
400	30.92	6.18	0.67
500	33.83	6.77	0.58
600	36.42	7.28	0.52
700	38.77	7.75	0.47
800	40.93	8.19	0.43
900	42.92	8.58	0.40
1 000	44.78	8.96	0.37

3.2 系统试井资料分析

2007 年 A 井区水平井 A1 井完钻,水平段长度按照设计为 $800\text{ m}$ ,地层压力 $24.8\text{ MPa}$ ,完钻后进行了 5 个工作制度的系统试气,试气实测数据见表 2。采用二项式法和指数式法对试气数据进行了分析,结果见图 2、3。

表 2 A1 井系统试井解释成果

工作 制度	日产气/ $10^4\text{ m}^3$	井底流压/ MPa	井口油压/ MPa	采气指数/ $10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-2}$
1	5.08	22.85	18.19	0.052 3
2	12.57	21.07	17.00	0.071 8
3	15.32	19.93	15.67	0.069 0
4	21.16	18.12	13.46	0.072 7
5	25.52	16.47	12.16	0.073 3

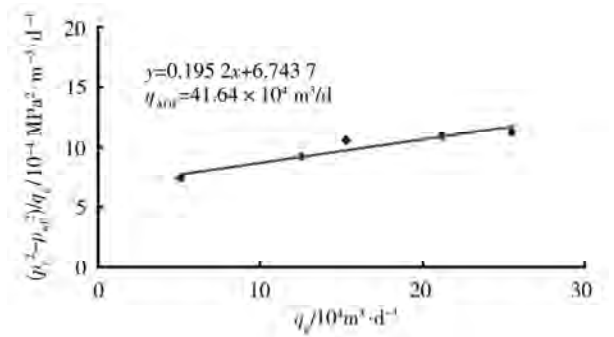


图 2 A1 井二项式曲线

A1 井采用无阻流量法配产时,产量按二项式法和指数式法绝对无阻流量平均值的 20%考虑。采用二项式法配产时,单井产量为 $8.54\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

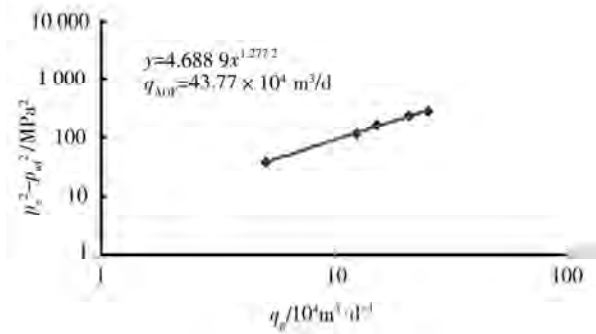


图3 A1井指数式曲线

采用指数式法配产时,根据系统试井指示曲线,合理生产压力平方差取  $120 \text{ MPa}^2$ ,即生产压差为  $2.50 \text{ MPa}$ ,A1井单井产量为  $8.14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。两种方法配产结果比较接近,平均值为  $8.34 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,A1井最终配产  $8.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 3.3 预测产量与系统试井结果对比

对A1水平井应用经验公式预测的产能和系统试气后计算的产能进行对比,发现其结果基本一致,均为  $8.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  左右。

## 4 结论

1)采用水平井开发气藏,在方案设计时须对产量进行预测,从而判断水平井开发有无经济效益。

2)在对水平气井进行产能预测时,必须考虑储层各向异性以及水平气井的泄气半径和有效半径与垂直气井不同。

3)系统试气后计算的产能与经验公式预测的产

能基本一致,说明笔者所提供的计算公式可以用于水平气井的产能预测。

### 符号说明

$q_g$  为水平气井产量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $p_e$  为地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_{wf}$  为水平井井底流压,  $\text{MPa}$ ;  $K_h$ 、 $K_v$  分别为储层的水平和垂向渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $L$  为水平气井水平井段长度,  $\text{m}$ ;  $h$  为气层厚度,  $\text{m}$ ;  $r_w$ 、 $r_e$  为分别为垂直气井的半径和泄气半径,  $\text{m}$ ;  $r'_w$ 、 $r_{eh}$  为分别为水平气井的有效半径和泄气半径,  $\text{m}$ ;  $\beta$  为各向异性比;  $T$  为地层温度,  $\text{K}$ ;  $\mu$  为气体粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $Z$  为气体偏差系数;  $S_h$  为水平气井表皮系数;  $A$  为二项式产能方程层流项系数,  $(\text{MPa}^2/\text{mPa} \cdot \text{s})/(10^4 \text{ m}^3/\text{d})$ ;  $B$  为二项式产能方程湍流项系数,  $(\text{MPa}^2/\text{mPa} \cdot \text{s})/(10^4 \text{ m}^3/\text{d})$ ;  $C$  为系数,不同的井,该系数值不同;  $n$  为系数,不同的井该系数值不同;  $q_{AOF}$  为无阻流量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 参考文献

- [1] 李允,李治平. 气井及凝析气井产能试井与产能评价[M]. 北京:石油工业出版社,2000.
- [2] 陈元千. 油气藏工程计算方法[M]. 北京:石油工业出版社,1990.
- [3] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- [4] 杨继盛,刘建仪. 采气实用计算[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
- [5] 黄秉光,刘蜀知. 实用气藏工程与动态分析方法[M]. 北京:石油工业出版社,1998.

[审稿 陈月明]

## Calculation and Application of Absolute Open Flow of Horizontal Gas Wells

Yang Zuoming<sup>1</sup> Wang Bin<sup>1</sup> Liu Lanqin<sup>2</sup> Pan Qianying<sup>1</sup> Li Daoqing<sup>1</sup> Pang Jing<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 2. Shengli Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong, 257041, China)

**Abstract:** At present there are few studies on deliverability and absolute open flow of horizontal gas well. Through the analysis of the deliverability equation of horizontal gas well, the absolute open flow of gas well was predicted using formation data without multi-point testing data. The absolute open flow equation of gas well after multi-point testing was provided. The filed application in Xinjiang Oilfield indicates that the predicted valued is close to actual one and shows that this method is useful in predicting deliverability horizontal gas well

**Key words:** horizontal well; production forecast; open flow capacity; binomial; exponential