

文章编号: 0253-2697(2009)06-0908-04

# 气藏采气速度与稳产期定量关系研究

郭春秋<sup>1</sup> 李方明<sup>1</sup> 刘合年<sup>1</sup> 夏朝辉<sup>1</sup> 刘雄伟<sup>2</sup> 范海亮<sup>1</sup> 刘玲莉<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石化西北油田分公司 新疆库车 842017)

**摘要:** 采气速度和对应的稳产期是气田开发中非常重要的两个指标。提出了利用产能公式和气藏物质平衡方程计算定容气藏稳产期的方法,其计算结果经数值模拟方法验证是可靠的,说明该方法是可行的。从理论上证明了定容气藏采气速度 $q_D$ 与 $(1-R_{\text{pp}})^2$ 近似成直线关系。利用该定量关系可预测气藏稳产期及递减期的产量。

**关键词:** 气藏;采气速度;稳产期;定量关系;采出程度;产量预测;产能公式;物质平衡方程

中图分类号: TE3

文献标识码: A

## Analysis of quantitative relationship between gas offtake and plateau duration of natural gas reservoir

GUO Chunqiu<sup>1</sup> LI Fangming<sup>1</sup> LIU Henian<sup>1</sup> XIA Zhao hui<sup>1</sup>  
LIU Xiongwei<sup>2</sup> FAN Hailiang<sup>1</sup> LIU Lingli<sup>1</sup>

(1. PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China;

2. Sinopac Northwest Branch Company, Kuche 842017, China)

**Abstract:** Gas offtake (the gas recovery per year) and production plateau duration (the period of stabilized production) are the two important development indexes. A method was proposed for calculating the plateau duration corresponding to gas offtake of a constant volume gas reservoir using the deliverability equation and material balance equation. The reservoir simulation proved the calculation result was reliable. It means that the proposed method is available. It is proved theoretically that gas offtake is in linear relationship with  $(1-R_{\text{pp}})^2$ . Here,  $R_{\text{pp}}$  is the recovery percent at the end of production plateau. The quantitative relationship can be used to calculate the production plateau duration and gas production rate of declination period.

**Key words:** gas reservoir; gas offtake; plateau duration; quantitative relationship; recovery percent; production rate prediction; deliverability equation; material balance equation

联立单井产能公式和定容气藏物质平衡方程,笔者提出了求解气藏采气速度对应稳产期的方法,该方法计算结果经数值模拟方法验证是可靠的。

关于气田采气速度及对应稳产期,前人通常只是定性认为采气速度越大,稳产期越短,而缺少定量关系描述<sup>[1]</sup>。笔者研究并证明:对于定容气藏,当总井数和井位一定时,采气速度 $q_D$ 与 $(1-R_{\text{pp}})^2$ 近似成直线关系。

采用上述定量关系还可预测气田递减期的产量,与以前通常采用的递减曲线法和概率分布模型<sup>[2-4]</sup>相比,此方法具有更可靠的理论基础。

### 1 天然气稳产期的计算

假设条件:①正常压力系统的定容气藏;②气藏渗透率不随压力变化。

不考虑表皮系数,根据稳态、达西流条件下气井产

能公式,气井产量与地层压力、井底流压有如下关系<sup>[5]</sup>

$$q_{sc} = 774.6Kh \left[ p_c^2 - p_{wf}^2 \right] \cdot \left[ T \bar{\mu} \bar{Z} \ln \frac{r_c}{r_w} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: $q_{sc}$ 为标准状态下天然气产量,  $m^3/d$ ;  $K$ 为渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $h$ 为气层有效厚度,  $m$ ;  $p_c$ 为地层压力,  $MPa$ ;  $p_{wf}$ 为井底流压,  $MPa$ ;  $T$ 为气层温度,  $K$ ;  $\bar{\mu}$ 为平均气体黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $\bar{Z}$ 为平均天然气偏差系数,无因次;  $r_c$ 为供气半径,  $m$ ;  $r_w$ 为井筒半径,  $m$ 。

将式(1)应用到气田,两端乘以 $d/G$ ,可得到采气速度 $q_D$ 与 $(p_c^2 - p_{wf}^2)$ 关系

$$q_D = 774.6dKh(p_c^2 - p_{wf}^2) \cdot \left[ GT \bar{\mu} \bar{Z} \ln \frac{r_c}{r_w} \right]^{-1} \quad (2)$$

式中: $q_D$ 为采气速度,%;  $d$ 为气田每年生产天数,  $d$ ;  $G$ 为天然气地质储量,  $m^3$ 。在压力小于 $13.79 MPa$ 时,式(2)中的 $\bar{\mu} \bar{Z}$ (气体黏度与平均天然气偏差系数

基金项目: 中国石油天然气集团公司科技攻关项目(05b60202)资助。

作者简介: 郭春秋,男,1972年11月生,2002年获中国石油勘探开发研究院博士学位,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事油藏工程方面的研究。E-mail: guochq@petrochina.com.cn

乘积)近似为常数<sup>[6]</sup>。

正常压力系统的定容气藏物质平衡方程<sup>[7]</sup>为

$$R_p = \frac{G_p}{G} = \left[ \frac{p_{ci}}{Z_i} - \frac{\bar{p}_c}{Z} \right] \cdot \left[ \frac{p_{ci}}{Z_i} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中:  $R_p$  为气藏采出程度, %;  $G_p$  为累计产量,  $m^3$ ;  $p_{ci}$  为初始地层压力, MPa;  $Z_i$  为初始压力条件下天然气偏差系数, 无因次;  $Z$  为天然气偏差系数, 无因次;  $\bar{p}_c$  为平均地层压力, MPa。

在稳产期末, 式(3)可变形为

$$\bar{p}_{csp} = p_{ci}(1 - R_{psp}) \frac{Z}{Z_i} \quad (4)$$

式中:  $\bar{p}_{csp}$  为稳产期末平均地层压力, MPa;  $R_{psp}$  为气藏稳产期末采出程度, %。

联立式(2)和式(4)求解, 可得到一定采气速度对应的稳产期。求解一定采气速度对应稳产期的步骤如下: ①将采气速度  $q_D$  代入式(2), 求得稳产期末的平均地层压力  $\bar{p}_{csp}$  及该压力下的气体偏差系数  $Z$ ; ②将  $\bar{p}_{csp}$  及该压力下的偏差系数  $Z$  代入式(4), 求得稳产期末的采出程度  $R_{psp}$ ; ③稳产期末的采出程度  $R_{psp}$  除以采气速度  $q_D$  就可得到稳产期  $t$ , 即  $t = \frac{R_{psp}}{q_D}$ 。

## 2 采气速度与稳产期定量关系

对于实际干气藏, 其拟对比温度  $T_{pr}$  通常约为 1.45~2.0。另外, 对于正常压力系统的定容封闭干气藏, 大量生产实践表明, 稳产期末气藏的平均拟对比压力  $\bar{p}_{prsp}$  ( $\bar{p}_{prsp} = \bar{p}_{csp}/p_{pc}$ , 其中  $p_{pc}$  为拟临界压力) 通常小于 2.0。根据 Standing 和 Katz 天然气偏差系数图版<sup>[8]</sup>, 当天然气拟对比压力  $p_{pr} < 2.0$  且  $1.45 < T_{pr} < 2.0$  时,  $Z$  与  $p_{pr}$  近似成直线关系。拟合  $Z$  与  $p_{pr}$  关系的直线方程  $Z = k \cdot p_{pr} + b$  ( $k, b$  分别为直线方程的斜率和截距) 有如下特征: ①  $-0.1 < k < 0$ ; ②  $b \approx 1$ 。第②条特征的物理意义: 当压力趋近于 0 时, 天然气接近理想气体, 偏差系数接近于 1。

将式(4)两边同除以  $p_{pc}$ , 变形得

$$\frac{\bar{p}_{prsp}}{Z} = \frac{p_{pr}}{Z_i} (1 - R_{psp}) \quad (5)$$

式中:  $\bar{p}_{prsp}$  为稳产期末平均拟对比压力, 无因次;  $p_{pr}$  为初始拟对比压力, 无因次。

将直线关系  $Z = k \cdot p_{pr} + b$  代入式(5)得

$$\frac{\bar{p}_{prsp}}{k \cdot p_{pr} + b} = \frac{p_{pr}}{Z_i} (1 - R_{psp}) \quad (6)$$

令  $a = p_{pr}/Z_i$ ,  $a$  为常数, 式(6)写为

$$\frac{\bar{p}_{prsp}}{k \cdot p_{pr} + b} = a \cdot (1 - R_{psp}) \quad (7)$$

由式(7)可知: 当  $-0.1 < k < 0$ ,  $p_{pr} < 2.0$  时,  $\bar{p}_{prsp}$

与  $(1 - R_{psp})$  近似成正比关系, 可用式(8)描述

$$\bar{p}_{prsp} = k_2 (1 - R_{psp}) \quad (8)$$

式中:  $k_2$  为比例系数。当  $R_{psp}$  趋近于 1, 即地下所有的天然气被采出, 平均地层压力趋近于 0。

由式(2)可知, 采气速度与  $(p_c^2 - p_{wf}^2)$  成正比, 可简化为

$$q_D = \beta (p_c^2 - p_{wf}^2) \quad (9)$$

式中:  $\beta$  为比例系数。在定容气藏稳产期末, 井底流压等于最低井底流压  $p_{wfmin}$ 。用  $\bar{p}_{csp}$  近似代替  $p_c$ <sup>[9]</sup>, 式(8)代入式(9)得

$$q_D = \beta p_{pc}^2 k_2^2 (1 - R_{psp})^2 - \beta p_{wfmin}^2 \quad (10)$$

由式(10)可发现, 采气速度  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  近似成直线关系。

上述结论是基于气井产能达西流公式得到的, 如果存在非达西流, 可采用指数式描述气井产能, 此时:  $q_D^n$  与  $(1 - R_{psp})^2$  近似成直线关系, 其中  $n$  为产能方程的指数。

## 3 采用 $q_D$ 与 $(1 - R_{psp})^2$ 近似直线关系预测稳产期及递减期产量

对于实际真实气藏, 采用气藏工程方法计算稳产期时, 由于平均渗透率等物性参数难以取准, 难以直接计算得到稳产期。此时, 可利用  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  近似成直线关系计算气藏稳产期: ①采用数值模拟方法预测出两个采气速度对应的稳产期; ②根据上面计算得到的两个采气速度对应的稳产期确定  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  直线方程的系数; ③其他采气速度对应的稳产期可以直接采用直线方程求得。

气藏进入递减期后, 采气量(采气速度)预测是气藏开发的另一个难题。式(10)另一个重要应用价值是预测递减期天然气产量, 其计算思路见后面实例。

## 4 应用实例

### 4.1 稳产期计算

一水平均质等厚圆形气藏, 半径为 500 m, 有效厚度为 10 m, 渗透率为  $8 \times 10^{-3} \mu m^2$ , 孔隙度为 0.15, 气藏初始含气饱和度为 0.8, 气藏温度为 333 K, 气藏初始压力为 20 MPa。压力小于 13.79 MPa 时, 天然气黏度与偏差系数乘积  $(\mu Z)_r$  近似等于常数 0.0127 mPa·s; 天然气偏差系数与压力关系: 当压力分别为 2.76 MPa、5.52 MPa、8.27 MPa、11.03 MPa、13.79 MPa、16.55 MPa、19.31 MPa、22.06 MPa、24.82 MPa、27.58 MPa 和 30.34 MPa 时, 偏差系数分别为 0.937、0.882、0.832、0.794、0.770、0.763、0.775、0.797、

0.827、0.860、0.896。井眼直径为 0.15 m, 气井最低井底流压为 3 MPa。求采气速度分别为 2% ~ 10% 时的稳产期, 并与数值模拟方法进行对比(见表 1)。

表 1 两种方法预测的稳产期对比

Table 1 Comparison of plateau duration predicted by two methods under kinds of gas offtake

采气速度/%	稳产期/年		相对误差/%
	数值模拟	笔者方法	
2	41.6	41.4	-0.48
3	27.1	27.0	-0.37
4	19.9	19.8	-0.50
5	15.6	15.5	-0.64
6	12.8	12.6	-1.56
7	10.7	10.6	-0.93
8	9.3	9.1	-2.15
9	8.1	7.9	-2.47
10	7.1	7.0	-1.41

数值模拟计算结果表明: 当采气速度为 2% ~ 10% 时, 笔者的方法计算结果与数值模拟计算结果相对误差小于 2.5%, 这说明笔者提出的方法预测气藏稳产期是可靠的。

4.2  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  近似直线关系验证

根据上述结果, 当采气速度分别为 2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9% 和 10% 时, 稳产期末对应的  $(1 - R_{psp})^2$  分别为 0.029、0.036、0.044、0.051、0.058、0.066、0.074、0.082 和 0.090。采气速度  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  近似成直线关系(图 1), 采用直线方程

$$q_D = 1.3539(1 - R_{psp})^2 - 0.0199$$

拟合二者关系,  $R^2$  高达 0.9993, 说明用直线关系来描述采气速度  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  完全能够满足气藏工程的要求。

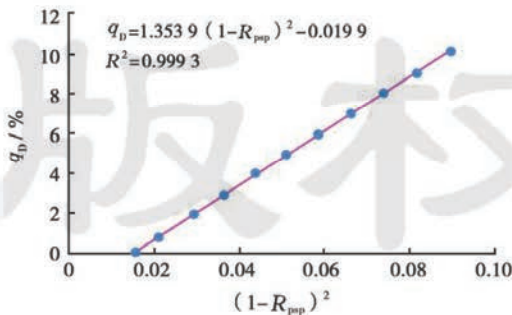


图 1 采气速度与  $(1 - R_{psp})^2$  关系曲线

Fig. 1 Relation curve between gas offtake and  $(1 - R_{psp})^2$

4.3 采用  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  近似直线关系预测稳产期

采气速度分别为 2% 和 10% 时, 气藏稳产期为 41.6 年、7.1 年, 确定  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  关系式为

$$q_D = 0.7625(1 - R_{psp})^2 + 0.0138 \quad (11)$$

采用式(11)预测采气速度分别为 3% ~ 9% 时对应的稳产期见表 2。由表 2 可见, 根据直线方程(11)预测的结果与数值模拟结果相比, 误差最大只有 6.17%。这说明, 虽然只采用 2 个点(采气速度分别为 2% 和 10%)的计算结果, 但式(11)预测结果仍是可靠的。

表 2 直线方程(11)与数值模拟预测的稳产期对比

Table 2 Comparison of plateau duration predicted by Equ. (11) and numerical simulation

采气速度/%	稳产期/年		相对误差/%
	方程预测	数值模拟	
3	28.5	27.1	5.17
4	20.4	19.9	2.51
5	15.6	15.6	0.00
6	12.6	12.8	-1.56
7	10.4	10.7	-2.80
8	8.8	9.3	-5.38
9	7.6	8.1	-6.17

4.4 采用  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  近似直线关系预测递减期产量

用方程  $q_D = 1.3539(1 - R_{psp})^2 - 0.00199$  描述  $q_D$  与  $(1 - R_{psp})^2$  关系, 假设气藏以 5% 采气速度生产, 预测进入递减期后 9 年的采气速度。计算思路: ①采用上述方程计算得到气藏以 5% 速度生产时, 稳产期末采出程度为 0.773, 稳产期为 15.5 年; ②假设递减期后第 1 年(即第 16.5 年)平均采气速度为  $q_{1D}$ , 则该年末累计采出程度  $R_{psp}$  为  $0.773 + q_{1D}$ , 将  $q_{1D}$  和  $R_{psp} = 0.773 + q_{1D}$  代入方程中, 求解得  $q_{1D} = 3.18\%$ 、 $R_{psp} = 0.805$ ; ③假设递减期后第 2 年(即第 17.5 年)平均采气速度为  $q_{2D}$ , 则该年末累计采出程度  $R_{psp}$  为  $0.805 + q_{2D}$ , 将  $q_{2D}$  和  $R_{psp} = 0.805 + q_{2D}$  代入方程中, 求解得  $q_{2D} = 2.12\%$ 、 $R_{psp} = 0.826$ ; ④重复上述步骤, 最后求得结果, 并与数模计算结果对比(图 2)。由图 2 可见, 采

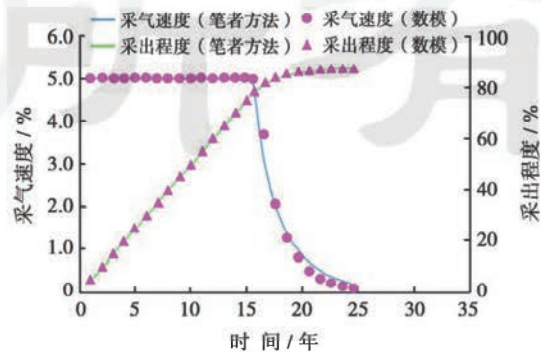


图 2 采用近似直线关系预测递减期生产动态

Fig. 2 Production performance of decline period predicted by approximate linear relationship



用笔者的方法计算的递减期生产动态与数值模拟预测结果比较接近,说明笔者的方法是可靠的。

## 5 结 论

(1) 提出利用气藏物质平衡方程和气井产能公式计算天然气稳产期的方法,该方法计算结果经数值模拟验证是可靠的。

(2) 定容气藏采气速度  $q_D$  与  $(1-R_{psp})^2$  二者之间近似成直线关系。

(3) 对于实际非均质气藏,可先采用数值模拟方法预测稳产期,回归得到  $q_D$  与  $(1-R_{psp})^2$  直线关系的系数,然后采用该直线方程预测其他采气速度对应的稳产期及递减期产量。

(4) 气藏采气速度  $q_D$  与  $(1-R_{psp})^2$  的直线关系对带水体的气藏、中低凝析油含量的凝析气藏也有一定的适用性,其理论和使用范围、使用方法有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] 王晓东,王东旭,赵宏民.气井稳产条件影响因素分析[J].低渗透油气田,2000,5(2):42-45.  
Wang Xiaodong, Wang Dongxu, Zhao Hongmin. Analysis of factors influencing the conditions of stable production of gas wells [J]. Low Permeability Reservoirs, 2000, 5(2): 42-45.
- [2] 胡建国,陈元千,张盛宗.预测油气田产量的新模型[J].石油学报,1995,16(1):79-87.  
Hu Jianguo, Chen Yuanqian, Zhang Shengzong. A new model to predict to production rate of oil and gas fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(1): 79-87.
- [3] 陈元千,袁自学.预测油气田产量和可采储量的新模型[J].石油学报,1997,18(2):84-88.  
Chen Yuanqian, Yuan Zixue. A new model for predicting production and reserves of oil and gas fields [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2): 84-88.
- [4] 闵琪,胡建国.预测油气田产量的  $\Gamma$  模型[J].石油学报,1997,18(1):63-69.  
Min Qi, Hu Jianguo. A model for predicting the production of oil and gas fields [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(1): 63-69.
- [5] 杨继盛.采气工艺基础[M].北京:石油工业出版社,1992:47.  
Yang Jisheng. Gas recovery craft basis [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 47.
- [6] 艾哈迈德.油藏工程手册[M].冉新权,何江川译.北京:石油工业出版社,2002:39-339.  
Ahmed Tarek. Reservoir engineering handbook [M]. Translated by Ran Xinquan, He Jiangchuan. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 39-339.
- [7] 陈元千,李璠.现代油藏工程[M].北京:石油工业出版社,2001:114.  
Chen Yuanqian, Li Dang. Modern petroleum reservoir engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 114.
- [8] Standing M B, Katz D L. Density of natural[M]. York, Pennsylvania: The Maple Press Company, 1942: 140-149.
- [9] 李璠,陈军斌,叶继根,等.油气渗流力学基础[M].西安:陕西科学技术出版社,2001:23-23.  
Li Dang, Chen Junbin, Ye Jigen, et al. Basis of dynamic of fluids through porous media of oil and gas [M]. Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi, 2001: 23-23.

(收稿日期 2009-02-04 改回日期 2009-07-15 编辑 张 怡)

## 《石油学报》2010 年第 1 期部分文章预告( I )

准噶尔盆地石炭系油气成藏组合特征及勘探前景 .....	何登发等
论河流与油气的共生关系 .....	邓运华
油气藏研究的发展趋势预测 .....	张厚福等
四川盆地石炭系大型岩性地层气藏形成条件与勘探方向 .....	邹才能等
海相烃源岩发育环境与岩石的沉积序列——以鄂尔多斯盆地为例 .....	许化政等
柴达木盆地花土沟油田新近系油藏成藏特征 .....	许浩等
致密砂岩气藏成藏过程中的地质门限及其控气机理 .....	姜福杰等
湖相泥质烃源岩的定量评价——以辽河西部凹陷清水洼陷为例 .....	母国妍等
煤成气轻烃组分和碳同位素分布特征及应用 .....	胡国艺等
塔北西部隆起复式油气区原油成因与油气成藏 .....	张斌等
中国东北地区幔源-岩浆 CO <sub>2</sub> 赋存的地质记录 .....	曲希玉等
基于多尺度数据融合 Markov 链模型的岩性随机模拟 .....	李军等
地应力与构造裂缝参数间的定量关系 .....	季宗镇等