

# 龙岗礁滩气藏气井产能预测新方法

邓 惠<sup>1,2</sup>, 冯 曦<sup>1,2</sup>, 杨学锋<sup>1,2</sup>, 樊怀才<sup>1,3</sup>, 李明秋<sup>1,2</sup>, 王颂夏<sup>1,2</sup>, 刘光耀<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041;

2. 国家能源高含硫气藏开采研发中心, 四川 成都 610051;

3. 中国石油西南油气田公司博士后科研工作站, 四川 成都 610051)

**摘要:**龙岗礁滩气藏具有高温、高压、高含硫、非均质性强和气水关系复杂等特征,其测试成本高、安全风险大,很难全面开展正规产能测试,而常规“一点法”计算的气井产能(无阻流量)误差较大。为此,通过分析 $\alpha$ 值对该气藏气井无阻流量计算结果的敏感性,利用部分气井正规产能测试资料和地层参数,绘制了 $\alpha$ 值与地层有效渗透率和有效储层厚度的关系图版,建立了适合于求取该气藏各气井“一点法”产能公式的新方法。通过实例计算,该方法能够较为准确地预测气井产能,从而实现在气藏产能测试不全面的情况下对气井产能进行准确简便评价的目的。

**关键词:**礁滩气藏;单点测试;地层系数;产能方程;新方法

中图分类号:TE348

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2014)09-1451-04

**引用格式:**Deng Hui, Feng Xi, Yang Xuefeng, *et al.* A new method of predicting gas wells deliverability in Longgang reef gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1451-1454. [邓惠, 冯曦, 杨学锋, 等. 龙岗礁滩气藏气井产能预测新方法[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1451-1454.]

## 0 引言

龙岗礁滩气藏属于典型的超深(6 000 ~ 7 000m)、高温(126 ~ 142℃)、高压(52.33 ~ 61.45MPa)、高含硫(20.40 ~ 128.85g/m<sup>3</sup>)气藏,其产能测试成本高、安全风险大,加之该气藏非均质性强、气水关系复杂,很难对气井逐一开展正规产能测试,目前主要开展单点测试,运用常规“一点法”产能公式计算气井产能(无阻流量)。然而,由于常规“一点法”产能公式中 $\alpha$ 值是一个经验统计值<sup>[1]</sup>,导致该方法计算出的气井产能与正规产能测试的结果相差较大。另外受储层条件、测试工艺、地层应力敏感、气井防水控水等多种条件限制,部分气井难以大压差测试,同样导致采用常规“一点法”产能公式所计算的部分气井无阻流量误差很大。因此,有必要确定出与该气藏各气井相符的 $\alpha$ 值,以准确评价各

气井产能。

## 1 $\alpha$ 值对无阻流量计算敏感性

常规“一点法”产能公式是在二项式产能方程基础上<sup>[2-5]</sup>,通过简化并利用统计规律而得到的经验公式。根据二项式方程,在定产量生产条件和定绝对产能条件下,分别得到以下 2 个关系式,即:

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = Aq_g + Bq_g^2 \quad (1)$$

$$p_R^2 - p_{sc}^2 = Aq_{AOF} + Bq_{AOF}^2 \quad (2)$$

由于大气压远小于地层压力,可以忽略不计。

故式(1)除以式(2)得:

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

若令:

收稿日期:2013-10-16;修回日期:2013-12-17.

基金项目:国家科技重大专项项目“四川龙岗地区大型碳酸盐岩气田开发示范工程”(编号:2011ZX05047);国家科技重大专项课题“复杂碳酸盐岩气藏开发技术研究”(编号:2011ZX05015-003)联合资助。

作者简介:邓惠(1981-),男,四川剑阁人,工程师,硕士,主要从事气田开发动态分析及试井分析研究. E-mail: dhui717@petrochina.com.cn.

$$\alpha = \frac{A}{A + Bq_{\text{AOF}}} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得:

$$\frac{p_{\text{R}}^2 - p_{\text{wf}}^2}{p_{\text{R}}^2} = \alpha \left( \frac{q_{\text{g}}}{q_{\text{AOF}}} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{q_{\text{g}}}{q_{\text{AOF}}} \right)^2 \quad (5)$$

得“一点法”产能公式:

$$q_{\text{AOF}} = \frac{2(1 - \alpha)q_{\text{g}}}{\alpha \left( \sqrt{1 + 4 \left( \frac{1 - \alpha}{\alpha^2} \right) \frac{p_{\text{R}}^2 - p_{\text{wf}}^2}{p_{\text{R}}^2}} - 1 \right)} \quad (6)$$

当  $\alpha = 0.25$  时<sup>[1]</sup>, 式(6)即为常规“一点法”产能公式, 即:

$$q_{\text{AOF}} = \frac{6q_{\text{g}}}{\sqrt{1 + 48 \frac{p_{\text{R}}^2 - p_{\text{wf}}^2}{p_{\text{R}}^2}} - 1} \quad (7)$$

式(1)~(7)中:  $p_{\text{R}}$  为地层压力, MPa;  $p_{\text{wf}}$  为井底流压, MPa;  $q_{\text{g}}$  为日产气量,  $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $p_{\text{sc}}$  为大气压, MPa;  $q_{\text{AOF}}$  为气井无阻流量,  $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $A$  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。

假设地层压力为 60MPa, 测试产量为  $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 利用式(6)作不同  $\alpha$  值下生产压差与无阻流量之间的关系曲线图(图 1)。从图 1 可以看出, 生产压差越小, 不同  $\alpha$  值计算出的无阻流量差异越大, 当生产压差为 2MPa 时,  $\frac{q_{\text{AOF}(\alpha=0.95)}}{q_{\text{AOF}(\alpha=0.05)}} = 3.46$  (表 1), 随着生产压差的增大,  $\alpha$  的取值对无阻流量计算影响逐渐减小, 当生产压差为 15MPa 时,  $\frac{q_{\text{AOF}(\alpha=0.95)}}{q_{\text{AOF}(\alpha=0.05)}}$  值仅为 1.45。由于  $\alpha \in (0, 1)$ , 对于大压差测试的气井,  $\alpha$  取值对无阻流量的计算影响很小。

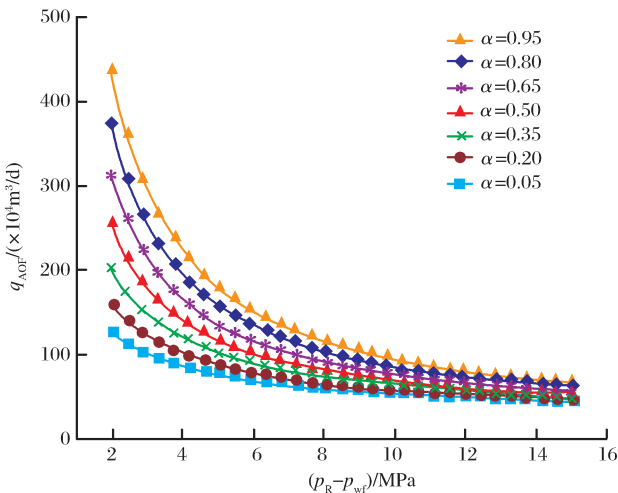


图 1 不同  $\alpha$  值时生产压差与无阻流量之间的关系曲线

Fig. 1 Relationship between  $(p_{\text{R}} - p_{\text{wf}})$  and  $q_{\text{AOF}}$  with different  $\alpha$  value

由于龙岗礁滩气藏气井在测试时, 受储层条件、测试工艺、地面条件和气井防水控水等多种因素影响, 多数气井难以满足大压差测试, 对于小压差测试的气井, 采用常规“一点法”公式计算的无阻流量可能差异很大。此外, 不论是均匀无限大地层的二项式产能方程还是流动进入拟稳态时的二项式产能方程, 系数  $A$ 、 $B$  都跟地层系数相关<sup>[4-7]</sup>, 所以  $\alpha$  值反映气藏的储渗特征<sup>①</sup>, 不同的气藏  $\alpha$  值应存在差异, 对于非均质性强的气藏, 各气井之间的  $\alpha$  值也不同。因此, 可利用该气藏部分气井正规产能测试资料对  $\alpha$  值进行修正, 建立适合于该气藏不同气井的产能计算公式。

表 1 不同生产压差和  $\alpha$  值时无阻流量计算

Table 1  $q_{\text{AOF}}$  with different  $\alpha$  value and  $(p_{\text{R}} - p_{\text{wf}})$

生产压差 /MPa	$q_{\text{AOF}} / (\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d})$			$\frac{q_{\text{AOF}(\alpha=0.95)}}{q_{\text{AOF}(\alpha=0.05)}}$
	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.50$	$\alpha=0.95$	
2.00	126.22	255.66	436.32	3.46
8.50	59.91	78.70	109.81	1.83
15.00	45.95	53.51	66.69	1.45

## 2 产能预测新方法的建立与分析

根据龙岗礁滩气藏 5 口气井的正规产能测试资料, 计算得到各气井的二项式产能方程的系数  $A$  值、系数  $B$  值, 以及相应  $\alpha$  值、地层系数和无阻流量<sup>[8-9]</sup> (表 2)。其中 4 口气井的  $\alpha$  值与 0.25 均存在明显差异, 若采用常规“一点法”产能公式计算无阻流量可能会导致较大误差(表 3)。

表 2 产能试井分析结果及修正  $\alpha$  值结果

Table 2 Results of deliverability test and modified  $\alpha$  value

井号	二项式—压力平方法			$\alpha$ 值	地层系数
	A	B	$q_{\text{AOF}} / (\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d})$		
LG1	1.073 1	0.024 8	365.0 5	0.106	493.284
LG1-8-1	0.840 7	0.103 1	172.02	0.045	484.880
LG001-2	5.049 1	0.082 7	182.93	0.250	316.069
LG28	14.734	0.027 8	179.95	0.747	36.432
LG001-3	76.301	0.425 8	39.49	0.819	1.554

表 2 中气井的地层系数(KH)与  $\alpha$  值总体呈负相关关系, 通过非线性回归得到两者之间的关系(图

① 杨洪志, 余军, 卢晓敏, 等. 四川盆地气井产能快速评价方法研究. 中国石油西南油气田公司. 内部报告, 2007.

表 3 各气井无阻流量计算结果

Table 3  $q_{AOF}$  of each gas well

井号	生产压差 /MPa	修正 $\alpha$ 值	修正“一点法”无阻流量/( $\times 10^4 m^3/d$ )	常规“一点法”无阻流量/( $\times 10^4 m^3/d$ )	产能试井无阻流量/( $\times 10^4 m^3/d$ )	修正“一点法”相对误差/%	常规“一点法”相对误差/%
LG1	0.97	0.101	377.18	537.73	365.05	3.32	47.30
LG001-3	15.05	0.841	41.18	31.89	39.49	4.28	19.25
LG001-8-1	2.83	0.105	181.27	217.42	172.02	5.38	26.39
LG001-2	1.44	0.217	176.78	188.29	182.93	3.36	2.93
LG28	4.45	0.724	176.10	108.27	179.95	2.14	39.83
平均值	4.95	0.40	190.50	216.72	187.89	3.69	27.14

2),在此基础上建立  $\alpha$  值与储层有效渗透率( $K$ )和储层有效厚度( $H$ )的关系图版(图 3),利用该图版,根据龙岗礁滩气藏其他气井的有效渗透率和有效储层厚度,就能确定出各气井的  $\alpha$  值,再将  $\alpha$  值代入式(6)就可以建立各气井的修正“一点法”产能公式。

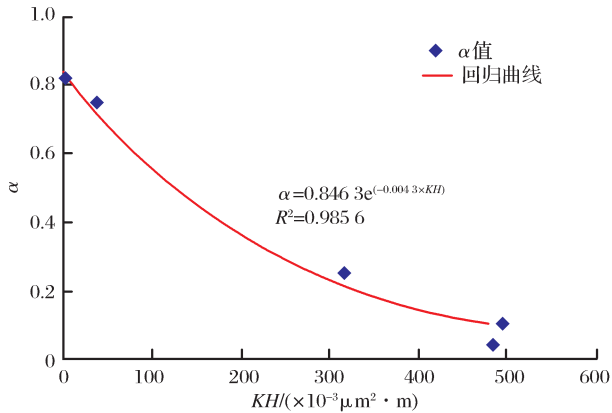


图 2  $\alpha$  值和  $KH$  之间的关系曲线

Fig. 2 Relationship between  $\alpha$  value and  $KH$

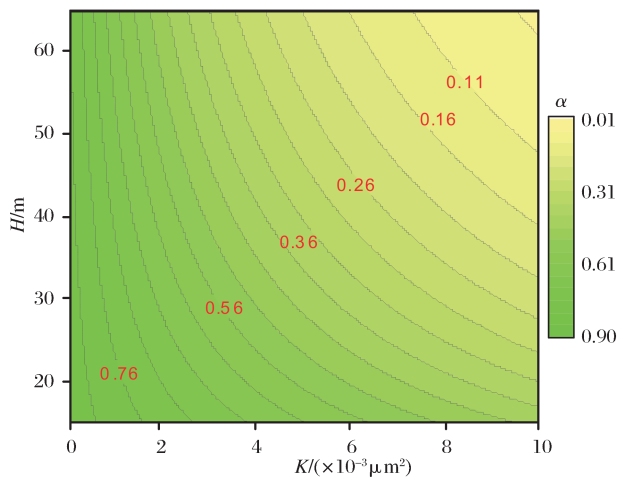


图 3  $\alpha$  值与  $K$  和  $H$  的关系图版

Fig. 3 Relation chart of  $\alpha$  value versus  $K$  and  $H$

利用该方法对上述 5 口气井的  $\alpha$  值进行修正,计算出各气井修正“一点法”无阻流量(表 3),与正

规产能测试进行比较,平均相对误差仅为 3.69%,而常规“一点法”产能公式平均相对误差则高达 27.14%,因此,该新方法计算的各气井无阻流量明显优于常规“一点法”。

此外,从表 3 可以看出,LG1 井的生产压差仅为 0.97MPa, $\alpha$  值与 0.25 相差仅为 0.149,常规“一点法”计算的无阻流量相对误差高达 47.3%(图 4),而 LG001-3 井生产压差为 15.05MPa, $\alpha$  值与 0.25 相差达 0.591,但该井常规“一点法”计算的无阻流量相对误差仅为 19.25%,因此,进一步证实小压差测试气井无阻流量的计算结果对  $\alpha$  取值敏感性强。

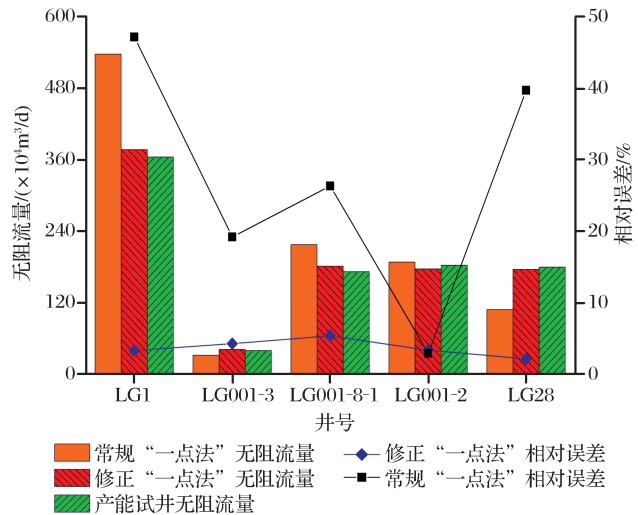


图 4 气井无阻流量计算结果比较

Fig. 4 Comparison of gas well with  $q_{AOF}$

### 3 结论

(1)“一点法”产能公式计算的气井产能既受反映气藏储渗特征的  $\alpha$  值影响,又受气井测试生产压差的影响。

(2)气井在单点测试时,应需要综合考虑储层条件、测试工艺以及地面条件等因素,尽可能在大压差条件下开展测试。

(3) 龙岗礁滩气藏非均质性强,部分气井产能计算结果受 $\alpha$ 取值影响明显,通过回归得到该气藏 $\alpha$ 值与 $K$ 、 $H$ 值之间的关系图版,并建立了各气井修正“一点法”产能公式,形成了一套快速准确评价该气藏气井产能的新方法。

#### 参考文献(References):

- [1] Chen Yuanqian. A simple method for determining absolute open flow rate of gas well[J]. Natural Gas Industry, 1987, 7(1): 59-63. [陈元千. 确定气井绝对无阻流量的简单方法[J]. 天然气工业, 1987, 7(1): 59-63.]
- [2] 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.]
- [3] Jing Yan, Zhang Shicheng, Jing Ning, *et al.* Application of single point method for productivity forecast in Puguang Gas Field and its improvement[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 264-266. [景艳, 张士诚, 景宁, 等. “一点法”在普光气田产能预测中的应用与改进[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 264-266.]
- [4] Zhong Jiajun, Tang Hai, Lü Dongliang, *et al.* Study on a single point deliverability formula of horizontal wells in Sulige Gas Field[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(2): 107-111. [钟家

- 峻, 唐海, 吕栋梁, 等. 苏里格气田水平井一点法产能公式研究[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(2): 107-111.]
- [5] Zheng Likun. Establishment of trinomial productivity equation for non-Darcy effect low permeability gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 146-149. [郑丽坤. 低渗透气藏非达西渗流三项式产能方程的建立[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 146-149.]
- [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] Zhuang Huinong. The Dynamic Description and Well Test for Gas Reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 66-69. [庄惠农. 气藏动态描述和试井[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 66-69.]
- [8] Xie Xingli, Luo Kai, Song Wenjie. A novel equation for modeling gas condensate well deliverability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(3): 36-42. [谢兴礼, 罗凯, 宋文杰. 凝析气新的产能方程研究[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 36-42.]
- [9] Li Xiaoping, Zhang Liehui, Liu Qiguo. The Well Test Analysis Method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 16-24. [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: 16-24.]

## A New Method of Predicting Gas Wells Deliverability in Longgang Reef Gas Reservoir

DENG Hui<sup>1,2</sup>, FENG Xi<sup>1,2</sup>, YANG Xue-feng<sup>1,2</sup>, FAN Huai-cai<sup>1,3</sup>,  
LI Ming-qiu<sup>1,2</sup>, WANG Song-xia<sup>1,2</sup>, LIU Guang-yao<sup>1,2</sup>

(1. Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610041, China;

2. National Energy R & D Center of High Sulfur Gas Exploitation, Chengdu 610051, China;

3. The Center for Post-doctoral Studies of Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610051, China)

**Abstract:** Longgang reef gas reservoir is characterized by high temperature, high pressure, high sulfur content, great heterogeneity and complicated gas-water relation, which is hard to carry out standard deliverability testing for the whole reservoir in virtue of high cost and security risk. The deliverability (absolute open flow capacity) of gas well which is usually calculated by conventional one-point deliverability formula may have remarkable great errors in calculation. Therefore, by analyzing the sensitivity of the absolute open flow capacity against  $\alpha$  value, the test data and formation parameters of gas wells, which have taken standard productivity testing, are used to draw the chart of  $\alpha$  value versus formation effective permeability and effective thickness. Meanwhile a new method of one-point deliverability formula is established to calculate the absolute open flow capacity of gas wells. This method is reliable via calculation of concrete examples, and can be used to evaluate gas well productivity without carrying out normal productivity testing on a large scale.

**Key words:** Reef reservoir; Single point test; Formation conductivity; Productivity equation; New method