

天然气开发

# 利用井口压力求井口产能方程及无阻流量

魏 炜<sup>1</sup>, 郭康良<sup>1</sup>, 田 朗<sup>2</sup>, 何 亮<sup>3</sup>, 陈开研<sup>1</sup>

(1. 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100;

2. 江汉石油工程有限公司国际合作公司, 湖北 武汉 430074;

3. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059)

**摘要:**在油气田产能评价中气井的二项式和一点法产能方程经常被用来获取产能信息以及求取无阻流量。对于一些特殊情况的井, 压力计无法下入产层中部, 常规方法是先用井口压力折算出井底流压, 再推导出二项式产能方程以及适合该区的一点法经验公式, 这样做不仅费时费力还增加了不确定性。以 TWT 气藏资料为基础, 尝试不通过折算而是直接利用井口压力推导出该区的井口产能方程, 通过对比以此方程计算的无阻流量与常规方法计算的无阻流量, 发现具有很好的函数关系, 从而验证了利用井口压力资料不经折算直接建立起适合该区的产能方程并通过其求取无阻流量的方法是可行的。

**关键词:**二项式产能方程; 一点法产能方程; 井口压力; 无阻流量

**中图分类号:** TE353

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-1926(2015)02-0391-06

**引用格式:** Wei Wei, Guo Kangliang, Tian Lang, *et al.* Calculation equation of wellhead productivity and absolute open flow capacity via wellhead pressure[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 391-396. [魏炜, 郭康良, 田朗, 等. 利用井口压力求井口产能方程及无阻流量[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 391-396.]

## 0 引言

TWT 气田是即将投入开发的春晓气田群的一部分。气田主要含气层段花港组为海陆交互浅湖—三角洲沉积相, 砂岩埋藏较浅, 分布较稳定, 侧向连续性强, 成岩作用弱, 渗透性高, 储集性能好, 压力系数在 0.99~1.02 之间, 属正常压力系统。利用陈元千<sup>[1]</sup> 根据全国 16 个气田的稳定试井资料分析结果推导获得的一点法经验公式( $\alpha=0.25$ ) 计算该区的无阻流量误差较大, 同时由于施工上的困难很多井的压力计没有下到产层中部, 通常需要把压力折算到井底, 但是这样会因为井筒内复杂的流动状态造成一定误差。因此尝试用该气田某平台数口回压试井的井口压力资料推导出以井口压力和产量表示的井口二项式和一点法产能方程。经过大量的统计发现, 井口压力与产量的函数关系也可以绘制成类似

于井底压力和产量的关系曲线图, 这样就获得了井口产能方程<sup>[2-8]</sup>。

## 1 常规井底一点法产能方程的建立

一点法公式是在二项式产能方程基础上, 通过简化并利用统计规律而得到的经验公式<sup>[9]</sup>。常规气井二项式产能方程可表示为:

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

当  $P_{wf}$  为大气压、 $q_g$  为无阻流量时, 方程可表示为:

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

式(1)~(2)中:  $q_{AOF}$  为天然气无阻流量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $q_g$  为天然气测试产量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $P_R$  为地层压力, MPa;  $P_{wf}$  为产层中部流动压力, MPa;  $P_{sc}$  为大气压, MPa;  $A$ 、 $B$  为二项式产能方程系数。与地层压力比较, 大气压很小, 可以忽略。在忽略  $P_{sc}$  后式(1)除以式(2)可得:

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

(3)

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

(4)

则带入式(3)得:

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

(5)

由式(5)得:

$$q_{\text{AOF}}=\frac{2(1-\alpha)q_g}{\alpha\left[\sqrt{1+4\left(\frac{1-\alpha}{\alpha^2}\right)\frac{p_R^2-p_{wf}^2}{p_R^2}}-1\right]}$$

(6)

式(6)即为校正后的一点法经验公式。可以看出只要流压、地层压力、产量均为已知就可求得无阻流量<sup>[10-11]</sup>。从TWT气田某平台10口气井中选择有详细产能试井资料的6口井进行求产,其中3口井的压力计没有下到产层中部,通过压力梯度折算及凝析油的折算处理后得到产能测试基础数据见表1。

以常规方法计算的二项式产能方程(部分斜率为负值)经过校正后求得无阻流量以及 $\alpha$ 值如表2所示,通过求取 $\alpha$ 平均值从而得到适合该区的一点法产能公式。

求得 $\alpha$ 平均值为0.232,代入式(6)得到该区域一点法计算公式:

$$q_{\text{AOF}}=\frac{6.62q_g}{\sqrt{1+57.07(p_R^2-p_{wf}^2)/p_R^2}-1}$$

(7)

2 井口产能方程的建立

通过研究发现,虽然在理论推导上,无法推导出井口产能方程。但是在前人研究成果基础上通过对TWT气田这6口井的井口数据(表1)进行统计分析并经过校正处理后(以XA井、XE井为例,如图1、图2所示)发现,应用井口流动压力(油压)表示的井口二项式产能方程,与以井底流动压力表示的二项式产能方程有很强的相似性,因此存在类似于式(1)的井口产能方程如下:

表 1 TWT 某平台产能测试基础数据  
Table 1 Production testing base data of Tianwaitian platform

井名	工作制度 (油嘴)/mm	井底流压 /MPa	井口流压 /MPa	天然气产量 /( $\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ )	井口关井恢复 压力/MPa	原始地层 压力/MPa
TWT-XA	5.6	27.93	23.527	8.348 6	24.683	29.73
	6.7	27.63	23.168	12.275 4		
	7.6	27.28	22.697	16.496 6		
	8.6	26.88	22.105	20.857 2		
TWT-XB	3.18	27.01	22.553	5.236 8	23.207	27.25
	4.80	26.79	22.212	9.336 0		
	5.56	26.57	21.952	12.976 2		
	6.63	26.31	21.558	16.680 0		
TWT-XC	4.7	24.19	20.141	5.173 9	21.035	24.89
	7.14	23.83	20.009	7.988 8		
	7.94	23.34	19.537	11.041 9		
	9.13	22.74	18.867	14.041 3		
TWT-XD	7.14	27.16	20.06	10.135 2	21.279	27.58
	8.41	26.80	19.390	15.079 2		
	9.53	26.38	18.467	19.975 2		
	11.11	25.97	17.673	25.173 6		
TWT-XE	5.68	22.30	18.009	3.926 2	19.09	22.38
	8.02	22.19	17.92	8.467 6		
	8.93	22.12	17.732	12.346 7		
	10.10	22.00	17.295	17.594 2		
TWT-XF	6.55	24.07	20.14	6.382 9	21.24	24.42
	7.34	23.90	19.99	9.598 9		
	7.94	23.77	19.89	12.370 5		
	8.69	23.60	19.798	15.316 6		

$$P_{tr}^2 - P_{tf}^2 = Aq_g + Bq_g^2 \tag{8}$$

以 TWT 气田井口数据(表 1)作为基础,从 6 口井的产能试井资料中任选 5 口井的资料,由井口二项式产能方程式(8)计算出二项式产能方程系数 A、B,以及无阻流量和  $\alpha$  值进行统计分析(表 3)。

由表 3 中计算的结果可以看出,井口二项式产能方程式(8)计算的无阻流量比常规二项式计算的无阻流量普遍偏小,但通过仔细比较发现表 3 中的井口二项式方程所得无阻流量和表 2 中的常规二项

式方程所得到的无阻流量其相关性较高(图 3)。删除一个异常点后显示出极好的线性相关性(图 4)。据此得到由常规二项式产能方程和井口二项式产能方程确定的无阻流量的函数关系:

$$q_{\text{AOF}} = 1.214\ 7q'_{\text{AOF}} - 9.795\ 1 \tag{9}$$

式中: $q_{\text{AOF}}$ 为常规二项式产能方程计算所得的无阻流量; $q'_{\text{AOF}}$ 为井口二项式产能方程计算所得的无阻流量。

统计归纳所得的常规二项式产能方程和井口二

表 2 二项式产能方程及  $\alpha$  值  
Table 2 Binomial deliverability equation and  $\alpha$

井号	二项式产能方程	A	B	试井所得无阻流量 /( $\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ )	$\alpha$ 计算值
TWT-XA	$P_{\text{R}}^2 - P_{\text{wf}}^2 = 2.213\ 5q + 0.082\ 9q^2$	2.213 5	0.082 9	90.75	0.227 336 334
TWT-XB	$P_{\text{R}}^2 - P_{\text{wf}}^2 = 2.237\ 1q + 0.046\ 1q^2$	2.237 1	0.046 1	104.93	0.0316 225 90
TWT-XC	$P_{\text{R}}^2 - P_{\text{wf}}^2 = 6.054\ 3q + 0.077\ 2q^2$	6.051 3	0.077 2	58.59	0.572 378 138
TWT-XD	$P_{\text{R}}^2 - P_{\text{wf}}^2 = 1.569\ 7q + 0.077\ 7q^2$	1.569 7	0.077 7	89.34	0.184 422 854
TWT-XE	$P_{\text{R}}^2 - P_{\text{wf}}^2 = 0.384\ 1q + 0.029\ 6q^2$	0.384 1	0.029 6	123.76	0.094 900 523
TWT-XF	$P_{\text{R}}^2 - P_{\text{wf}}^2 = 1.625\ 3q + 0.040\ 6q^2$	1.625 3	0.040 6	102.83	0.280 214 571

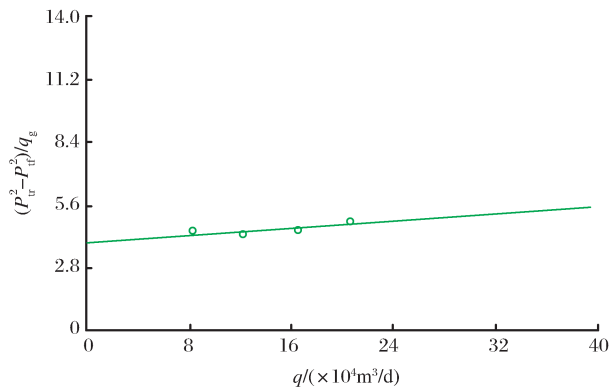


图 1 XA 井口二项式产能方程

项式产能方程确定的无阻流量的函数关系式(9)可以作为井口二项式方程求取无阻流量时用来校正的经验公式。

3 井口一点法产能方程的建立

通过类比认为井口一点法和常规二项式产能方程所求无阻流量也应具有一定的线性关系。以常规二项式产能方程求取常规一点法经验公式为基础,由井口二项式产能方程式(8)经过类似的推导过程可以得到井口一点法产能公式:

$$q'_{\text{AOF}} = \frac{2(1-\alpha)q_g}{\alpha \left[ \sqrt{1 + 4 \left( \frac{1-\alpha}{a^2} \right) \frac{P_{\text{tr}}^2 - P_{\text{tf}}^2}{P_{\text{tr}}^2}} - 1 \right]} \tag{10}$$

式中: $P_{\text{tr}}$ 为井口关井恢复压力,MPa; $P_{\text{tf}}$ 为  $\alpha$  井口流压,MPa。

把由井口二项式产能方程(表 3)计算所得 5 个  $\alpha$  值去掉一个异常点后求平均值为 0.382。则 TWT 气田井口一点法产能公式可表示为:

$$q'_{\text{AOF}} = \frac{3.236q_g}{\sqrt{(1 + 16.93(p_{\text{R}}^2 - p_{\text{wf}}^2)/p_{\text{R}}^2)} - 1} \tag{11}$$

由常规二项式产能方程所求无阻流量和井口一点法产能方程所算得的无阻流量进行对比(表 4),可发现两者之间相对误差不大且也有一定线性相关性(图 5)。据此得到由井口一点法产能公式和常规

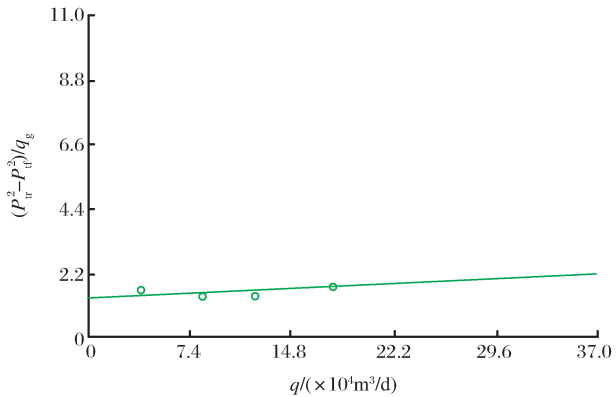


图 2 XE 井口二项式产能方程

Fig. 2 XE well head binomial equation deliverability

表 3 井口二项式产能方程及  $\alpha$  值

Table 3 Wellhead binomial deliverability equation and  $\alpha$

井号	井口二项式产能方程	A	B	试井所得无阻流量 /( $\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ )	$\alpha$ 计算值
TWT-XA	$P_{\text{tr}}^2 - P_{\text{if}}^2 = 4.1384q + 0.0334q^2$	3.9794	0.0391	90.75	0.547987
TWT-XC	$P_{\text{tr}}^2 - P_{\text{if}}^2 = 3.8459q + 0.0759q^2$	3.8459	0.0759	55.10	0.479061
TWT-XD	$P_{\text{tr}}^2 - P_{\text{wf}}^2 = 4.4954q + 0.0463q^2$	4.4954	0.0463	62.62	0.607921
TWT-XE	$P_{\text{tr}}^2 - P_{\text{if}}^2 = 1.2137q + 0.0206q^2$	1.2137	0.0206	106.67	0.355809
TWT-XF	$P_{\text{tr}}^2 - P_{\text{if}}^2 = 1.6253q + 0.0406q^2$	0.6875	0.0418	96.03	0.146228

二项式产能方程确定的无阻流量函数关系：

$$q_{\text{AOF}} = 0.6122q'_{\text{AOF}} + 32.931 \tag{12}$$

式中： $q_{\text{AOF}}$ 为常规二项式产能方程计算所得的无阻流量； $q'_{\text{AOF}}$ 为井口一点法产能方程计算所得的无阻流量。

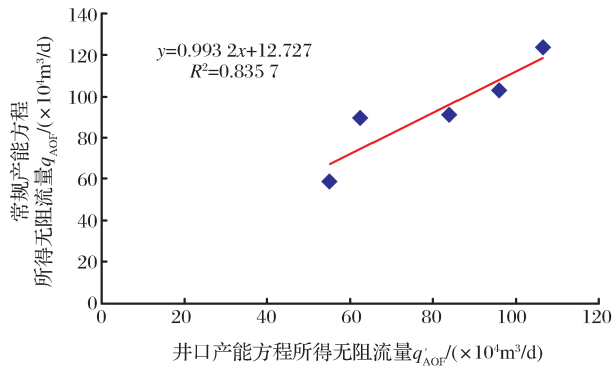


图 3 无阻流量关系

Fig. 3 The diagram of open flow capacity

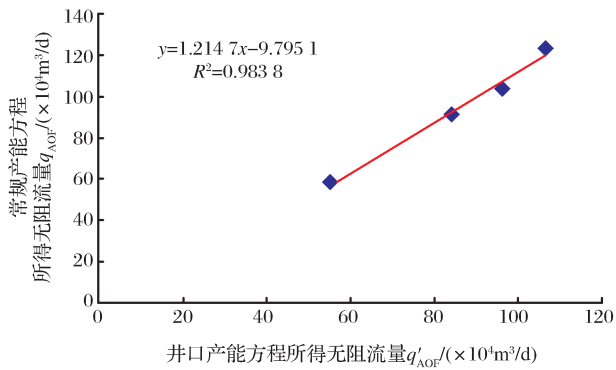


图 4 去除异常点后无阻流量关系

Fig. 4 The diagram of open flow capacity after removing exception value

4 应用实例检验分析

通过 TWT 气田 XB 井详细的产能测试资料 (表 1), 求出其井口二项式产能方程及井口一点法产能公式和其各自对应的无阻流量, 并在通过校正式(9)、式(12)后与表 2 中已列出的常规二项式产能

方程和一点法产能公式(7)求出的无阻流量进行对比, 结果如表 5 所示。

表 4 无阻流量对比

Table 4 Comparison of open flow capacity

井名	井口一点法所求 无阻流量 /( $\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ )	常规二项式方程 所求无阻流量 /( $\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ )	相对误差/%
TWT-XA	75.9	89.29	17
TWT-XC	49.58	55.10	11
TWT-XE	129.45	106.67	16
TWT-XF	96.86	96.03	1

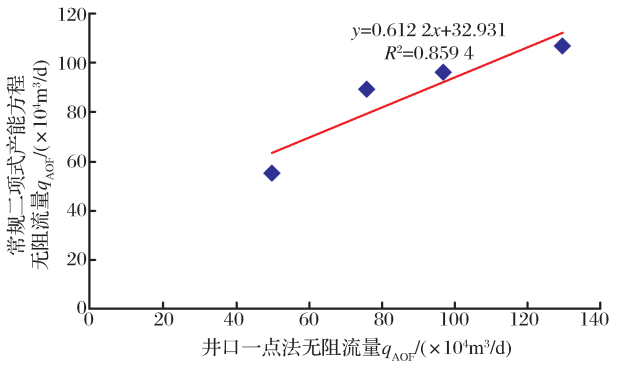


图 5 无阻流量关系

Fig. 5 The diagram of open flow capacity

把井口二项式产能方程计算的无阻流量  $96.07 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$  带入校正公式(9)求得无阻流量为  $106.9 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ , 而表 5 中用常规二项式计算的无阻流量为  $104.93 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ , 通过对比发现两者误差很小, 由此认为井口二项式产能方程及校正公式是合理的。把井口一点法产能公式计算的无阻流量  $81.63 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$  带入校正公式(12)求得无阻流量为  $82.9 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ , 与表 5 中的常规二项式所求无阻流量  $104.93 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$  对比认为有一定的误差。通过检验发现经过推导出的井口二项式产能方程所求无阻流量经过校正后能保证很高的准确度, 井口一点法

表 5 产能方程及无阻流量对比

Table 5 Deliverability equation and comparison of open flow capacity

TWT-XB 井	方程	无阻流量 /( $\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ )	井口产能方程所得无阻流量校正后值 /( $\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ )
常规二项式	$P_{\text{R}}^2 - P_{\text{wf}}^2 = 2.237\ 1q + 0.046\ 1q^2$	104.93	—
井口二项式	$P_{\text{fr}}^2 - P_{\text{fr}}^2 = 3.200\ 7q + 0.025\ 0q^2$	96.07	106.9
常规一点法	$q_{\text{AOF}} = \frac{6.62q_{\text{g}}}{\sqrt{1+57.07(p_{\text{R}}^2 - p_{\text{wf}}^2)/p_{\text{R}}^2}} - 1$	98.436	—
井口一点法	$q'_{\text{AOF}} = \frac{3.236q_{\text{g}}}{\sqrt{1+16.93(p_{\text{R}}^2 - p_{\text{wf}}^2)/p_{\text{R}}^2}} - 1$	81.63	82.9

产能方程由于公式推导过程中本身的局限性而造成所求无阻流量误差相对较大。由此认为经过推导出的井口产能方程和校正公式是普遍适合该地区的,直接根据井口资料求出井口产能方程和其对应的无阻流量再进行校正从而求得真实的绝对无阻流量是完全可行的。

5 结论

(1)以井口压力和相关产量数据为基础直接建立起了TWT气田的井口二项式产能方程及由其推导出的井口一点法产能公式。

(2)井口二项式产能方程与常规二项式产能方程所得出的无阻流量存在很好的线性函数关系,因此可以直接利用该气田的井口产能测试资料求出井口无阻流量再通过线性关系进行一次函数的运算得到真实的绝对无阻流量并进行相关产能的分析评价。

(3)井口一点法产能公式的建立大大缩短了测试时间,为该区单井和整个油藏的产能评价提供了便利。但是相比二项式产能方程,一点法产能公式本身相对误差较大,在没有系统试井资料时可以作为产能评价的一种手段,在有详细的产能测试资料时可以作为井口二项式产能方程进行产能评价的很好补充。

(4)TWT气田的实测资料表明利用建立的该气田井口产能方程进行产能评价取得了很好的效果,同时也为其他油气田进行产能分析评价提供了新的方法和思路。

参考文献(References):

[1] Chen Yuanqian. Gas Reservoir Description Petroleum Reservoir Engineering Calculation Methods[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2004: 90-92. [陈元千. 油气藏工程计算方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1990: 60-92. ]

[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] Li Yuegang, Wang Xiaodong. Building productivity equation of gas well based on singlepoint test data[J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(2): 45-51. [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): 45-51. ]

[4] Fu Chunmei, Wang Nutao, Zou Yifeng, et al. Influence on well-bottom pressure for abnormally high pressure well[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(11): 50-52. [傅春梅, 王怒涛, 邹一锋, 等. 异常高压气井井底压力影响因素分析[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(11): 50-52. ]

[5] Canada National Energy Conservation Commission Wrote. Gas Well Testing Theory and Practice[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988: 62-70. [加拿大国家能源保护委员会著. 气井试井理论与实践[M]. 北京:石油工业出版社, 1988: 62-70. ]

[6] Wang Minghua. Gas Reservoir Engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 330-370. [王鸣华. 气藏工程[M]. 北京:石油工业出版社, 1997: 330-370. ]

[7] Wang Nutao, Huang Bingguang. Study on the analysis method of gas deliverability[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(1): 33-34. [王怒涛, 黄炳光. 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. ]

[8] Li Ruyong. Sensitivity analysis on effect parameters of gas deliverability[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(2): 34-36. [李汝勇. 气井产能的影响参数敏感性分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(2): 34-36. ]

[9] Feng Xi, Zhong Fuxun, Wang Hao, et al. Modified single point method to evaluate productivity of gas wells with big production for Feixianguan Group gas reservoirs in northeast Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 107-109. [冯曦, 钟阜勋, 王浩, 等. 评价川东北飞仙关组气藏大产量气井产能的改进“一点法”[J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 107-109. ]

[10] Zhang Jing, Mu Xiaoqing, Qiu Ling. Correction for well testing formula of “one point” production testing in Chuanxi deep layer[J]. Well Testing, 2011, 20(5): 19-20. [张晶, 牟小清, 邱玲. 川西深层“一点法”产能试井公式的校正[J]. 油气井

测试,2011,20(5):19-20.]

[11] 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.]

Calculation Equation of Wellhead Productivity  
and Absolute Open Flow Capacity via Wellhead Pressure

WEI Wei<sup>1</sup>,GUO Kang-liang<sup>1</sup>,TIAN Lang<sup>2</sup>,HE Liang<sup>3</sup>,CHEN Kai-yan<sup>1</sup>  
(1. School of Geosciences,Yangtze Univercity,Wuhan 430100,China;  
2. Sinopec Oilfield Service Jiangnan Corporation International,Wuhan 430074,China;  
3. Chengdu University of Technology Energy Institute,Chengdu 610059,China)

**Abstract:** In deliverability evaluation of oil and gas field,the single point deliverability equation and binomial deliverability equation are often used to obtain the productivity to strike open flow capacity. For some special cases of the well,presure gauge can not be put into the middle layer,conventional methods require the wellhead pressure converted into bottom-hole pressure,then find the binomial deliverability equation and single point deliverability equation suitable for the area,this is not only time consuming but also increases the uncertainty. In this paper,based on the data of TWT Gasfield,we try to directly use wellhead pressure to obtain the wellhead productivity equation but not through convert wellhead pressure. Compared to the open flow capacity derived from wellhead productivity equation and conventional deliverability equation,it is found to have the function very well,thus verify the feasibility of the method that does not convert well-head pressure but directly calculate wellhead productivity equation and absolute open flow capacity by well-head pressure.

**Key words:** Binomial deliverability equation;Single point deliverability equation;Wellhead pressure;Absolute open flow capacity

《天然气地球科学》2013 年高被引 Top 10 论文(据 CNKI 统计)

题名	作者	发表时间	被引	下载
页岩气与煤层气吸附特征对比实验研究	赵金,张遂安,曹立虎	2013,24(1):176-181	15	1296
非常规油气资源评价进展与未来展望	邱振,邹才能,李建忠,郭秋麟,吴晓智,侯连华	2013,24(2):238-246	15	1206
高压压汞法和氮气吸附法分析页岩孔隙结构	杨峰,宁正福,孔德涛,刘慧卿	2013,24(3):450-455	15	956
复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例	郭彤楼,刘若冰	2013,24(4):643-651	10	544
四川盆地须家河组大气区形成条件	易士威,林世国,杨威,施振生,李君	2013, 24(1):1-8	7	222
苏里格气田致密气藏特征与开发技术	王少飞,安文宏,陈鹏,刘道天,梁鸿军	2013,24(1):138-145	7	724
鄂尔多斯盆地延长组长 8 储层量化成岩作用及成岩相分析	楚美娟,郭正权,齐亚林,程党性	2013,24(3):477-484	7	226
页岩有机碳含量测井评价方法及其应用	李延钧,张烈辉,冯媛媛,刘欢,罗迪,刘家霞,贾学成	2013,24(1):169-175	6	809
泥页岩埋藏过程孔隙度演化与预测模型探讨	郭秋麟,陈晓明,宋焕琪,郑曼,黄金亮,陈宁生,高日丽	2013,24(3):439-449	6	558
腐泥煤孔隙结构特征研究	唐书恒,张静平,吴敏杰	2013,24(2):247-251	6	232