第 14 卷 第 30 期 2014 年 10 月
1671—1815(2014)30-0028-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 14 No. 30 Oct. 2014
ⓒ 2014 Sci. Tech. Engrg.

致密气藏一点法公式在大牛地气田的应用

赵 钊[1] 李治平[1] 赖枫鹏[1] 陈 奎[2] 任广磊[2]

(中国地质大学(北京)非常规天然气能源地质评价与开发工程北京市重点实验室,能源学院[1],北京 100083;
中国石油化工股份有限公司华北分公司[2],郑州 450006)

摘 要 大牛地气田应用原有一点法计算无阻流量,长期实践证明结果偏大并导致配产不合理、压降过快,同时理论上常规一点法在致密气藏产能评价中存在着误差偏大和适用性差等问题。为了解决以上问题,利用气田已有的一点法试井资料,结合产能公式推导理论和致密气藏渗流特征,对指数式进行修正,得出了不同层位的一点法公式,大大提高了一点法的适用性,并在实际生产中指导合理配产,显著增加了气井的开发效果,证明该方法是切实可行的。

关键词 致密气 一点法 指数式 水平井 压裂 启动压力

中图法分类号 TE373; **文献标志码** A

常规一点法试井公式中的参数 α 只是固定经验值[1],理论上不同气藏所对应的 α 值应当不同,因此用同一 α 值来计算不同气藏的无阻流量是存在误差的[2]。因此,很多气田针对不同类型气藏,利用稳定试井资料,建立了适用于各自气藏的一点法校正公式[3,4]。而上述校正公式在低渗气藏应用中,结果也往往偏差较大,甚至出现了产能方程分析时数据异常的情况。

理论分析认为,之所以产能方程会出现异常情况,是由于低渗气藏具有低孔、低渗的特点,渗流时存在启动压力梯度[5]。针对这一情况,利用系统试井资料,提出了低渗气藏的三项式一点法公式[6],但是由于系统试井测试时间长、成本高,无法大范围使用。同时,在大牛地的实际产生中,由于原有一点法所计算的无阻流量偏大导致不合理配产。

针对以上存在的问题,为了能避免采用系统试井,快速、合理地预测致密气藏压裂水平井的产能,既解决能常规一点法计算结果误差偏大、产能方程异常的问题,同时也能提高一点法公式适用性,有必要对此进行研究。

1 实际生产中遇到的问题

在大牛地气田的实际生产中,一直根据常规一点法公式所计算得出的无阻流量进行配产,常常出现由于配产过高造成压降过快,稳产期过短的现象,被迫降低产量。严重时甚至由于配产过高导致生产压差过大,近井储层岩石发生变形,使储层渗透率降低,最终造成气井产能降低。为此,需要对一点法公式进行修正,得到更为准确的无阻流量从而指导合理配产。

2014 年 6 月 3 日收到 《中西部地区碎屑岩储层预测、保护与改造技术》基金(2011ZX05002—005)资助

第一作者简介:赵 钊(1987—),男,硕士研究生。研究方向:油藏工程及产能测试。E-mail:270449969@qq.com。

2 致密气藏压裂水平井一点法公式的修正

常规气井产能方程[7]可表示为

$$q_g = \frac{774.6Kh\,(P_e^2 - P_{wf}^2)}{T\bar{\mu}\,\bar{Z}\left(\ln\dfrac{0.472r_e}{r_w} + S + Eq_g\right)} \tag{1}$$

式中,P_e 为地层压力(MPa);P_{wf} 为井底流压(MPa);q_g 为测试气产量($10^4m^3/d$);T 为地层温度(K);$\bar{\mu}$ 为流体黏度(MPa·s);$\bar{Z}$ 为地层压力下的气体偏差因子;r_e 为气井泄气半径(m);r_w 为井筒半径(m);S 为表皮因子;K 为地层有效渗透率($10^{-3}\mu m^2$);h 为地层厚度(m);γ_g 为气体的相对密度;E 是与 γ_g、$\bar{Z}$、T 等有关的函数。

由于致密气藏具有孔隙度低、渗透率低的特点,气体渗流时存在启动压力梯度[8],致密气井产能方程可表示为

$$q_g = \frac{774.6Kh\,(P_e^2 - P_{wf}^2)}{T\bar{\mu}\,\bar{Z}\left(\ln\dfrac{0.472r_e}{r_w} + S + Eq_g + \dfrac{F}{q_g}\right)} \tag{2}$$

式(2)中,λ_g 为气体启动压力梯度(MPa/m);F 是与 λ_g、r_e、P_e 等有关的函数。

将常规气井产能方程式(1)与指数式 $q_g = C(P_e^2 - P_{wf}^2)^n$ 比较,可以得到指数式中产能系数 C 的表达式

$$C = \frac{Kh\,(P_e^2 - P_{wf}^2)^{1-n}}{1.291\times10^{-3}T\bar{\mu}\bar{Z}\left(\ln\dfrac{0.472r_e}{r_w} + S + Eq_g\right)} \tag{3}$$

式(3)中,C 为产能系数;n 为动态指数。

同理,可以得到致密气井产能系数 C_λ 的表达式

$$C_\lambda = \frac{Kh\,(P_e^2 - P_{wf}^2)^{1-n}}{1.291\times10^{-3}T\bar{\mu}\bar{Z}\left(\ln\dfrac{0.472r_e}{r_w} + S + Eq_g + \dfrac{F}{q_g}\right)} \tag{4}$$

将式(3)和式(4)进行对比,化简可以得到

$$C_\lambda = \frac{Cq_g}{q_g + CX_1} \tag{5}$$

式(5)中,X_1 是与 F 有关的函数。

将式(5)代入指数式 $q_g = C\,(P_e^2 - P_{wf}^2)^n$ 中,可以得到

$$q_g = \frac{Cq_g}{q_g + CX_1}(P_e^2 - P_{wf}^2)^n \tag{6}$$

令 $CX_1 = X$,化简,即可得到致密气井的指数式产能方程

$$q_g + X = C\,(P_e^2 - P_{wf}^2)^n \tag{7}$$

当井底流压 $P_{wf} = 0.101$ MPa 时,$P_e^2 - 0.101^2 \approx P_e^2$,即

$$q_{AOF} + X = C\,(P_e^2)^n \tag{8}$$

式(8)中,q_{AOF} 为无阻流量,10^4 m^3/d。

式(7)除以式(8),可以得到

$$\frac{q_g + X}{q_{AOF} + X} = \left(\frac{P_e^2 - P_{wf}^2}{P_e^2}\right)^n \tag{9}$$

令 $\dfrac{q_g + X}{q_{AOF} + X} = Q_{D\lambda}$,$\dfrac{P_e^2 - P_{wf}^2}{P_e^2} = P_D$,其中 P_D 为无因次压力,$Q_{D\lambda}$ 为修正无因次产量。利用同一层位的多个一点法试井数据,分别计算出 P_D 和 $Q_{D\lambda}$,然后取对数,绘制产能分析曲线,用试凑法得到合理的 X 值,通过直线的斜率和截距可以得出 n 和 C 值。因此,可以写出以下指数式

$$Q_{D\lambda} = CP_D^n \tag{10}$$

进一步可以得出适用于该层位的修正一点法指数式

$$q_{AOF} = \frac{q_g + X}{C\left(\dfrac{P_e^{\,2} - P_{wf}^{\,2}}{P_e^{\,2}}\right)^n} - X \tag{11}$$

3　实际应用

表 1 所列数据为大牛地气田某一层位多口压裂水平井的一点法试井数据,如果采用常规指数式分析方法[9,10],令 $\dfrac{q_g}{q_{AOF}} = Q_D$,$\dfrac{P_e^2 - P_{wf}^2}{P_e^2} = P_D$,分别取对数绘制产能分析曲线,可以看出斜率 $n = 1.324 > 1$ 异常,不符合 n 的取值范围 $0.5 \leqslant n \leqslant 1$,说明致密气藏不能采用常规分析方法[11],如图 1(a)所示。

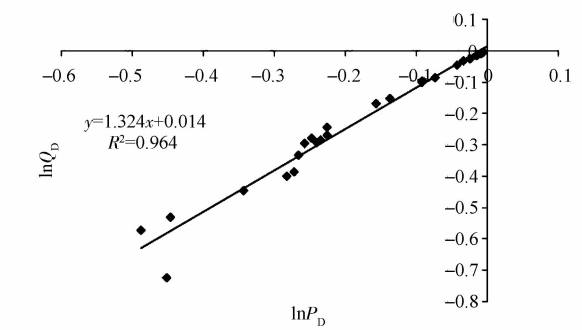
因此,采用致密气藏修正一点法指数式产能公式,过程如式(9)~式(11),用试凑法得出 $X = 10$,$C = 1.059$,$n = 0.763$,动态指数 n 满足取值范围 $0.5 \leqslant n \leqslant 1$,表明修正方法适用,如图 2(b)所示。

通过计算可以得到适用于 A 层位的修正一点法公式:

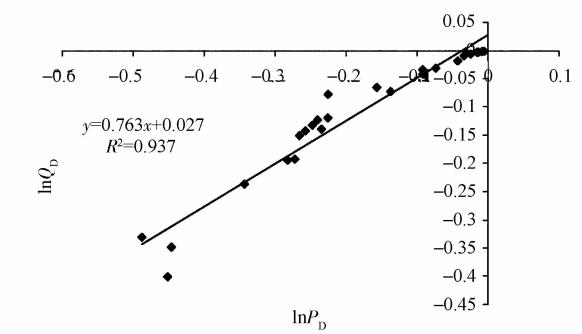
表 1　A 层位一点法试井数据

Table 1　Single point test data of layer A

井号	测试点气产量/(10^4m^3·d^{-1})	测试点流压/MPa
井 A1	1.54	4.80
井 A2	1.74	4.50
井 A3	1.71	8.68
井 A4	2.36	6.01
井 A5	3.29	7.07
井 A6	4.53	11.35
井 A7	4.89	10.23
井 A8	5.68	7.91
井 A9	6.01	11.33
井 A10	6.46	11.29
井 A11	5.12	16.93
井 A12	7.48	13.51
井 A13	5.61	17.58
井 A14	7.19	16.54
井 A15	6.89	16.79
井 A16	5.96	17.97
井 A17	6.36	17.73
井 A18	6.81	19.21
井 A19	7.22	21.35
井 A20	5.52	20.90
井 A21	10.66	20.83



(a)　未修正的异常产能分析曲线



(b)　修正之后的产能分析曲线

图 1　$\ln Q_D$-$\ln P_D$ 曲线图

Fig. 1　$\ln Q_D$-$\ln P_D$ graph

$$q_{AOF} = \frac{q_g + 10}{1.059\left(\frac{P_e^2 - P_{wf}^2}{P_e^2}\right)^{0.763}} - 10 \qquad (12)$$

用同样的方法求出另一 B 层位压裂水平井的的修正一点法公式

$$q_{AOF} = \frac{q_g + 2}{1.102\left(\frac{P_e^2 - P_{wf}^2}{P_e^2}\right)^{0.828}} - 2 。$$

4 应用效果分析

为了验证致密气一点法公式,拟通过下列两种途径进行:一是将修正一点法公式计算结果和原一点法公式计算结果进行对比分析;二是结合大牛地分段压裂水平井的配产经验,应用商用软件 Topaze 进行生产预测检验,并以累计产气量、生产压降和稳产时间作为指标来评价配产合理性,进而验证修正公式在大牛地气田的准确性。

4.1 无阻流量

将修正一点法结果与原来一点法结果进行对比,如表 2、表 3 所示。

表 2 A 层位无阻流量计算结果

Table 2 Open flow capacity data of layer A

井号	无阻流量/($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	
	原一点法	修正一点法
井 A1	1.59	1.19
井 A2	1.80	1.35
井 A3	1.94	2.10
井 A4	2.51	2.18
井 A5	3.54	3.31
井 A6	5.68	6.13
井 A7	5.97	5.99
井 A8	6.32	5.95
井 A9	7.59	7.76
井 A10	8.09	8.24
井 A11	10.04	11.76
井 A12	10.62	10.99
井 A13	12.07	13.50
井 A14	12.60	14.12
井 A15	13.26	14.08
井 A16	14.96	14.74
井 A17	15.48	14.92
井 A18	19.01	19.01
井 A19	26.92	28.28
井 A20	29.13	22.37
井 A21	36.14	32.71
	平均误差	-1.77%

表 3 B 层位无阻流量计算结果

Table 3 Open flow capacity data of layer B

井号	无阻流量/($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	
	原一点法	修正一点法
井 B1	3.59	3.84
井 B2	3.93	3.57
井 B3	4.52	4.29
井 B4	4.81	4.72
井 B5	5.11	4.75
井 B6	7.69	3.84
井 B7	7.70	8.94
井 B8	8.27	7.76
井 B9	8.82	8.42
井 B10	9.34	8.75
井 B12	9.80	9.13
井 B13	11.24	10.83
井 B14	11.29	10.80
井 B15	11.87	11.87
井 B16	11.89	10.87
井 B17	14.12	14.04
井 B18	14.72	15.20
井 B19	15.19	14.59
井 B20	19.74	17.31
井 B21	19.78	17.04
	平均误差	-5.64%

通过表中结果可以看出,修正无阻流量与原无阻流量相比,分别平均偏小 1.77%、5.64%,一定程度上减小了以往一点法计算无阻流量偏大的误差。

4.2 累计产气量

用一点法修正公式计算得到的无阻流量,在等配产比情况下得到修正配产,应用 Topaze 软件分别在原配产和修正配产情况下进行生产预测,在压力衰竭前的生产时间内计算各井的累计产气量,并进行前后对比,如表 4、表 5 所示。

表 4 A 层位累计产气量数据表

Table 4 Cumulative gas data of layer A

井号	初期配产下累计产气量/($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	等配产比的修正配产下累计产气量/($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	增幅/%
井 A1	325	632.5	94.62
井 A2	481.6	675.8	40.32
井 A3	1 350	2 201.9	63.10
井 A4	4 259.4	4 950.3	16.22
平均值			53.57%

表 5 B 层位累计产气量数据表

Table 5 Cumulative gas data of layer B

井号	初期配产下累计产气量/($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	等配产比的修正配产下累计产气量/($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	增幅/%
井 B1	1 934.4	2 511	29.81
井 B2	2 349.6	2 732.3	16.29
井 B3	1 742.5	2 512.5	44.19
井 B4	1 848	3 246.76	75.69
平均值			41.49%

从表 4 可以看出,A 层位各井的单井累计产气量平均提高了 53.57%,该层总的累计产气量提高了 31.87%,B 层位各井的单井累计产气量平均提高了 41.49%,该层总的累计产气量提高了 39.72%。

综合上述数据及气田生产经验可以得出,按照一点法修正公式计算出的无阻流量进行配产生产,虽然单井的配产量稍有降低,但在整个生产期内来说,大大提升了累计产气量,推广到整个气区可以大大提高气藏的采出程度,在基本没有提高生产成本的情况下大大增加了气田的收益[12]。

4.3 生产压降

同上,应用 Topaze 软件分别在原配产和修正配产情况下进行生产预测,得到两种情况下的生产压降数据,并进行前后对比,如表 6、表 7 所示。

从上表可以看出,A 层位各井在修正配产下的年压降比在初期配产下的年压降平均下降了 34.20%,B 层位各井在修正配产下的年压降比在初期配产下的年压降平均下降了 25.70%。

表 6　A 层位生产压降数据表

Table 6　Producing pressure drop data of layer A

井号	初始地层中部流压/MPa	1 年后井底流压/MPa		年压降/MPa		年压降降幅/%
		初期配产下	等配产比的修正配产下	初期配产下	等配产比的修正配产下	
井 A1	24.23	329 d 降至 0.10	9.36	24.13	14.87	38.38
井 A2	16.08	9.08	12.28	7	3.8	45.71
井 A3	16.43	6.20	8.83	10.23	7.6	25.71
井 A4	15.86	8.12	10.21	7.74	5.65	27.00%
平均值						34.20

表 7　B 层位生产压降数据表

Table 7　Producing pressure drop data of layer B

井号	初始地层中部流压/MPa	1 年后井底流压/MPa		年压降/MPa		年压降降幅/%
		初期配产下	等配产比的修正配产下	初期配产下	等配产比的修正配产下	
井 B1	19.95	9.91	11.78	10.04	8.17	18.63
井 B2	21.31	9.68	10.69	11.63	10.62	8.68
井 B3	17.83	5.36	9.51	12.47	8.32	33.28
井 B4	20.46	307 d 降至 0.10	8.69	20.36	11.77	42.19
平均值						25.70%

综合上述数据及气田生产经验可以得出,上述针对致密气藏的修正一点法公式能有效的指导配产,降低压降率,是符合油气田实际生产情况的,有助于油气田的长期稳定的高效开发。

4.4　稳产时间

应用 Topaze 软件分别在原配产和修正配产情况下进行生产预测,得到两种情况下的稳产时间,并进行前后对比,如表 8、表 9 所示。

表 8　A 层位稳产时间数据表

Table 8　Stable production period data of layer A

井号	初期配产下稳产时间/d	等配产比的修正配产下稳产时间/d
井 A1	325	851
井 A2	602	977
井 A3	540	941
井 A4	687	1 040

表 9　B 层位稳产时间数据表

Table 9　Stable production period data of layer B

井号	初期配产下稳产时间/d	等配产比的修正配产下稳产时间/d
井 B1	624	1 620
井 B2	712	890
井 B3	425	670
井 B4	308	628

从稳产时间表可以看出,等配产比的修正配产下稳产时间要显著长于初期配产下的稳产时间,这说明修正后的无阻流量要优于试气报告中的原无阻流量,因此,该两个层位的修正一点法公式是有效的。

5　结论

1)常规一点法修正方法是对二项式产能方程进行修正,而本方法是在指数式的基础上进行修正,同时考虑了致密气藏的渗流特征;

2)本方法可以快速得到适用于不同层位的产能方程,进而推导出不同层位的一点法公式,相较于以往针对整个气藏的一点法公式来说,充分考虑了各个层位不同的特点,提高了精度,具有很强的实用性;

3)常规一点法修正方法是建立在系统试井资料基础上的,而本方法是建立在一点法试井资料的基础上,大大节约了时间和生产成本;

4)利用本文方法修正之后的一点法公式所计算出的无阻流量,降低了以往一点法计算无阻流量的误差。同时,在实际生产中指导合理配产,显著增加了气井的累计产气量和稳产期,降低了生产压降,修正结果更符合实际情况,证明该修正方法的可靠性高。

参　考　文　献

1　陈元千. 确定气井绝对无阻流量的简单方法. 天然气工业, 1987;7(1):59—63
Chen Y Q. A simple method for determining absolute open flow of gas well. Natural Gas Industry,1987;7(1):59—63

2　许进进, 李治平. 利用现场生产资料确定低产气井合理产量. 油气井测试, 2008;17(4):8—10
Xu J J,Li Z P. For determining the rational production of low yield wells with production data. Well Testing, 2008;17(4):8—10

3　张　晶, 牟小清, 邱　玲. 川西深层"一点法"产能试井公式的校正. 油气井测试, 2011;20(5):19—21
Zhang J,Mou X Q,Qiu L. Correction of single point deliverability testing formula in western Sichuan. Well Testing, 2011;20(5):19—21

4　曹继华, 刘俊丰,李　伟. 一点法试井在台南气田的应用及校正. 岩性油气藏, 2010;22:104—106
Cao J H,Liu J F,Li W. Application and correction of single point test in Tainan gas field. Lithologic Reservoirs,2010;22:104—106

5　李　闽, 薛国庆, 罗碧华等. 低渗透气藏拟稳态三项式产能方程及应用. 新疆石油地质, 2009;30(5):593—505
Li M,Xue G Q,Luo B H , *et al*. Application of pseudo-steady trinomial in low permeability gas reservoirs. Xinjiang Petroleum Geology, 2009;30(5):593—595

6　王富平, 黄全华,孙　雷,等. 低渗透气藏气井一点法产能预测公式. 新疆石油地质, 2010;31(6):651—653
Wang F P,Huang Q H,Sun L, *et al*. Single point formula for the prediction of low permeability gas reservoirs. Xinjiang Petroleum Geology,2010;31(6):651—653

7　李士伦. 天然气工程. 北京:石油工业出版社, 2000
Li S L. Natural gas engineering. Beijing:Petroleum Industry Press,2000

8　李治平, 万怡姣,张喜亭. 低渗透气藏气井产能评价新方法. 天然气工业, 2007; 27(4):85—89

Li Z P, Wan Y J, Zhang X T. A new method for productivity evaluation of low permeability gas reservoirs. Natural Gas Industry, 2007; 27(4): 85—89

9 陈元千. 预测气井绝对无阻流量的一个新方法. 油气井测试, 1998; 7(1): 1—7
Chen Y Q. A new method for forecasting absolute open flow of gas well. Well Testing, 1998; 7(1): 1—7

10 陈元千. 确定气井绝对无阻流量和产能的一个简易方法. 天然气工业, 1987; 7(4): 38—45
Chen Y Q. A simple method to determine absolute open flow of gas well and production capacity. Natural Gas Industry, 1987; 7(4): 38—45

11 马世英. 一种新的水平井产能方程研究. 特种油气藏, 2013; 20(2): 93—97
Ma S Y. Research on a new deliverability equation of horizontal well. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013; 20(2): 93—97

12 Ikoku C U. Natural gas reservoir engineering. New York: John Wiley & Sons, 1984

Single Point Method of Tight Gas Reservoir Applied in Daniudi Gas Field

ZHAO Zhao[1], LI Zhi-ping[1], LAI Feng-peng[1], CHEN Kui[2], REN Guang-lei[2]

(Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development Engineering, China University of Geosciences, School of Energy Resources[1], Beijing 100083;
The China Petroleum Chemical Co of North China branch[2], Zhengzhou 450006, P. R. China)

[**Abstract**] Daniudi gas field calculate the open flow with single point test applied. Long-term results proved too large, lead to proration unreasonable and excessive pressure drop. Routine single point test formula commonly is measured by multi-point well testing with long test time and high costs. On the other hand, it exists too large error and is not very adaptable in productivity evaluation in site of tight gas reservoirs. To solve above problems, the common exponential function on the basis of tri-item equation to obtain new productivity formulas of different layers was revised, and then to obtain new single point test formulas of different layers from the existing gas well data of single point test, considering actuating pressure gradient and combining with theoretical derivation of productivity formula and tight gas reservoirs gas flow characteristics. Finally the contrast analysis of examples shows that the method is feasible.

[**Key words**] tight gas single point test exponential function horizontal wells fracturing actuating pressure