

磨溪区块龙王庙组高压气藏气井产能方程及求解方法

陈春艳,阮基富,吴利华,刘柳君,杨辉,钟礼萍

中国石油西南油气田分公司川中油气矿 四川遂宁 629001

通讯作者:Email: ruanjifu@petrochina.com.cn

项目支持:中国石油西南油气田分公司科技项目“磨溪区块龙王庙组气藏水侵特征及治水对策优化研究”(20200303-04)

引用:陈春艳,阮基富,吴利华,等. 磨溪区块龙王庙组高压气藏气井产能方程及求解方法[J]. 油气井测试,2021,30(2):67-73.

Cite: CHEN Chunyan, RUAN Jifu, WU Lihua, et al. Productivity equation and solution of gas wells in high pressure gas reservoir of Longwangmiao formation, Moxi block [J]. Well Testing, 2021,30(2):67-73.

摘要 高压气藏气体高速流动时属于非线性渗流,求取产能方程式中系数 A 、 B 值较为复杂和困难。通过引用二项式速度 n 次方程,推导出相应产能方程,提出试差法先求取指数 n 及方程系数 A 、 B 值,用交会法求解无阻流量。磨溪区块龙王庙组气藏 9 口气井中,8 口井利用产量 n 次方拟合相关性比产量二次方拟合效果更好,计算结果与气井实际生产动态特征吻合程度高。不同的气井 n 值一般不同,磨溪龙王庙组气藏 n 值范围一般介于 1~3,确切的数值范围需要现场岩芯渗流试验及更多的气井实例求得。引用二项式速度 n 次方渗流方程,对龙王庙组气井产能进行研究,求取气井真实产能,可为后期气井生产方案制定提供支撑。

关键词 高压气藏;非达西渗流;二项式产量; n 次方程;试差法;交会法;产能求解;无阻流量

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.02.013

Productivity equation and solution of gas wells in high pressure gas reservoir of Longwangmiao formation, Moxi block

CHEN Chunyan, RUAN Jifu, WU Lihua, LIU Liujun, YANG Hui, ZHONG Liping

Central Sichuan Oil and Gas District, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Suining, Sichuan 629001, China

Abstract: The high-speed flow of gas in high-pressure gas reservoir belongs to non-linear seepage, so it is more complex and difficult to calculate the coefficients A and B in productivity equation. In this paper, the corresponding productivity equation is derived by using binomial velocity n^{th} equation, and the trial and error method is used to obtain the exponent n and the coefficients A and B of the equation, and then the intersection method is used to solve the open flow. Among the 9 gas wells in Longwangmiao formation gas reservoir of Moxi block, the n^{th} power fitting correlation of production of 8 wells is better than the quadratic fitting correlation of production, and the calculation results are highly consistent with the actual production performance characteristics of gas wells. The n value of different gas wells is generally different. The n value range of Longwangmiao formation gas reservoir in Moxi block is generally between 1 and 3. The exact value range needs to be obtained by field core seepage test and more gas well examples. The binomial velocity n^{th} power seepage equation is used to study the gas well productivity of Longwangmiao formation and obtain the real gas well productivity, which can provide support for later gas well production plan.

Keywords: high pressure gas reservoir; non Darcy flow; binomial production; n^{th} order equation; trial and error method; intersection method; productivity solution; open flow

高压气藏气体高速流动时属于“非线性渗流”,由于高温高压气藏特殊的地质条件,对高温高压气藏渗流机理、产能求解等方面还存在诸多技术瓶颈需要攻关。描述非线性渗流状态一般采用二项式速度平方方程,近年来通过气井生产实际验证,描述非线性渗流状态时通过引用二项式速度 n 次方程,可推导得出相应产能方程,但矿场实际资料分

析处理时,求取方程式中系数 A 、 B 值较为复杂和困难。为此,提出了试差法先求取指数 n 及方程系数 A 、 B 值,最后用交会法求解无阻流量。安岳气田位于四川盆地中部遂宁市、资阳市及重庆市潼南区境内^[1],处在川中加里东古隆起核部,龙王庙组试采启于 2012 年 12 月^[2-3],气藏地层压力系数为 1.64 ~ 1.69,地层温度 138.5 ~ 145.8 °C,为高温、高压气

藏^[4]。截止2020年6月,气藏共计投入生产井55口,为中国石油西南油气田分公司川中油气矿重点气藏^[5]。气藏40%气井日产气大于 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$,30%小于 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。部分井生产特征表现是产量与压力较稳定,但有部分井表现出产能递减快。现场处理气藏产能试井资料,求取气井产能时,一般常用二项式产量平方方程^[6],结果则不能反应气井真实产能。由此,将引用二项式速度 n 次方渗流方程,对安岳气田龙王庙组气井产能进行研究,求取气井真实产能,以此为后期气井生产方案制定提供支撑。

1 高压气井渗流方程

实验发现,在气体流动过程中,渗流速度增大到某一值之后,它与压力梯度之间的线性关系被破坏^[7-9]。若在达西渗流实验中不断增加流量,并用以下两个无量纲量作纵、横坐标,即

$$\lambda = \delta \frac{\Delta p}{\rho \Delta L} \left(\frac{\varphi A}{q} \right)^2 \quad (1)$$

$$R_e = \frac{q \rho \delta}{\mu A \varphi} \quad (2)$$

式中: R_e 为雷诺数,无量纲; λ 为水力阻力系数,无量纲; ρ 为流体密度, g/cm^3 ; δ 为表征多孔介质特征的系数,无量纲; Δp 为压差, Pa ; ΔL 为长度, cm ; φ 为孔隙度,小数; A 为横切面积, cm^2 ; q 为渗流速度, cm/s ; μ 为黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

则在双对数坐标上,可将实验结果绘成 $\lambda-R_e$ 关系曲线^[7](图1)。

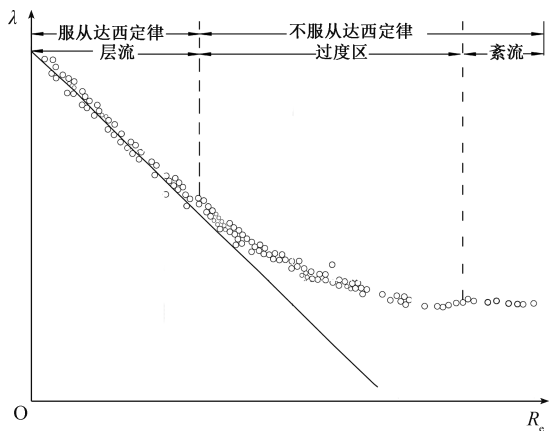


图1 $\lambda-R_e$ 关系曲线图

Fig. 1 The relation curve of $\lambda-R_e$.

由图1可以看出,实验结果曲线分成三段:当速度比较小时,曲线是一条斜率为1的直线;当速度大到某个值以后,相关曲线呈一条水平线;中间为一条过渡曲线。

对于第一段,渗流速度和压力梯度之间成线性关系^[10-11],将这一段称为层流段。描述其渗流速度和压力梯度关系式为

$$v = - \frac{K}{\mu} \frac{\Delta p}{\Delta L} \quad (3)$$

式中: v 为流速, m^3/s ; K 为渗透率,Darcy。

对于第三段,即渗流速度很大时,压力梯度完全消耗在与密度有关的惯性阻力上,此时压力梯度与渗流速度的平方成正比,将这一段称为完全紊流区,描述其渗流速度和压力梯度关系式为

$$\frac{dp}{dL} = - \alpha \rho v^2 \quad (4)$$

对于第二段,即过渡段,在过渡区同时存在两种阻力,即黏滞力和惯性力,从过渡区开始的渗流称为“非线性渗流”^[12-13]。描述该段渗流的一种方法是常用的二项式速度平方法^[14-15],即

$$- \frac{dp}{dL} = \frac{\mu v}{K} + \beta \rho v^2 \quad (5)$$

非线性渗流还可采用另外一种方式表示,即“二项式速度 n 次方”法。早在1969年,Ahmed and Sunada用多种非固结多孔介质进行了研究^[16-17]。当渗流速度很大,超过某一临界速度之后,渗流速度与压力梯度有如下关系^[18],即

$$- \frac{dp}{dL} = \frac{\mu}{K} v + \beta \rho v^n \quad (6)$$

2 高压气井产能方程及求解

依据(5)式可以推导得出二项式产量平方方程,即

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = A q_g + B q_g^2$$

方程推导过程及求解很多文献中都有讲解,这里不再赘述。在此,重点推导(6)式对应的产能方程及求解。

对平面径向流,式(6)表示为

$$- \frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K} v + \beta \rho v^n \quad (7)$$

在式(7)中,总的压力梯度(dp/dr)由两部分组成,方程右端第一项代表达西流部分,第二项代表非达西流部分^[19-21]。将(7)式整理后得

$$- dp = \frac{\mu}{K} v dr + \beta \rho v^n dr \quad (8)$$

式中: n 为与多孔介质特性有关的值; β 为湍流系数; p 为压力, Pa ; v 为渗流速度, m/s ; K 为渗透率, μm^2 ; r 为径向渗流半径, m ; ρ 为流体黏度, kg/m^3 , μ

为流体黏度,Pa·s。

将(5)式中压力单位 Pa 换为 MPa,并定义:

$$v = \frac{q}{2\pi rh}, \quad q = B_g q_g, \quad \rho = \gamma_g \rho_{\text{air}}$$

式中: q 为地层条件下产气量, $10^4\text{m}^3/\text{d}$; h 为产层厚度,m; q_g 为地面产气量, $10^4\text{m}^3/\text{d}$; γ_g 为天然气比重,无量纲; ρ_{air} 为空气密度, kg/m^3 。

将上述三个定义式代入(8)式中,则

$$-dp = \frac{\mu}{K} \frac{B_g q_g}{2\pi rh} dr + \beta r_g \rho_{\text{air}} \left(\frac{B_g q_g}{2\pi rh} \right)^n dr \tag{9}$$

对(9)式两边积分($p_{\text{wf}} \rightarrow p_e, r_w \rightarrow r_e$)^[22],由于 $r_e \gg r_w, 1/r_e$ 与 $1/r_w$ 相比,可以忽略 $1/r_e$,则(9)式可以表示为

$$p_e - p_{\text{wf}} = \frac{\mu}{K} \frac{B_g q_g}{2\pi h} \left(\frac{1}{r_w^2} - \frac{1}{r_e^2} \right) + \beta r_g \rho_{\text{air}} \left(\frac{B_g q_g}{2\pi h} \right)^n \frac{1}{n-1} \left(\frac{1}{r_w^{n-1}} - \frac{1}{r_e^{n-1}} \right) \tag{10}$$

令
$$A = \frac{\mu}{K} \frac{4.573 \times 10^{-4} ZT}{2\pi h} \frac{1}{r_w^2}$$
$$B = \beta r_g \rho_{\text{air}} \left(\frac{4.573 \times 10^{-4} ZT}{2\pi h} \right)^n \frac{1}{n-1} \left(\frac{1}{r_w^{n-1}} \right)$$

那么,式(10)就可以简化为

$$p_e - p_{\text{wf}} = A q_g + B q_g^n \tag{11}$$

此式即为二项式产量 n 次方程。

求解方程式(11),有三个未知数 A 、 B 及 n ,常规解法较为复杂。下面介绍较为简单的求取方法。

将式(11)变为

$$(p_e - p_{\text{wf}})/q_g = A + B q_g^{n-1} \tag{12}$$

由式(12)可知,以 $(p_e - p_{\text{wf}})/q_g$ 作为纵坐标,以 q_g^{n-1} 作为横坐标,理论上应得一条直线。将气井产能试井测试数据代入,采用试差法(可用程序实现),不断调整 n 值,每调整一次 n 值,便进行一次回归,求得相应的 A 、 B 值和回归的相关系数,在保证 A 、 B 值为正的情况下,寻求最大的相关系数所对应的 A 、 B 、 n 之值。

获得气井产能方程中的参数后,令 $p_{\text{wf}} = 0.101\text{MPa}$,此时对应的气井产量即是无阻流量。此时,有

$$p_e - 0.101 = A q_g + B q_g^n \tag{13}$$

求解 n 次方根,数学方法很多,较简单的可采用交会法计算^[23]。

将(13)式写成

$$p_e - 0.101 - A q_g = B q_g^n \tag{14}$$

令 $y_1 = p_e - 0.101 - A q_g, \quad y_2 = B q_g^n$

设定一系列的 q_{AOF} 值,计算出相应的函数值 y_1 和 y_2 ,以 q_{AOF} 为横坐标,以 y_1 和 y_2 值作为纵坐标,则得到相交曲线,两条曲线的交点所对应的横坐标值,即是该气井无阻流量。

3 实例分析应用

四川盆地安岳气田磨溪区块龙王庙组气藏有 9 口井产能试井测试资料可用。分析处理这 9 口井的产能试井资料^[24],有 8 口井产量 n 次方拟合相关性比产量二次方拟合效果更好,相关性更高,说明这些气井产能方程更符合二项式产量 n 次方程(表 1)。

表 1 n 次方程与平方方程处理产能试井结果对比表
Table 1 Comparison of productivity well test results processed by n^{th} order equation and square equation

| 井号 | n 次方程 | | 平方方程 | | |
|----|---------|---------|---|---|---------|
| | n 值 | 相关系数 | 无阻流量/ ($10^4 \cdot \text{d}^{-1}$) | 无阻流量/ ($10^4 \cdot \text{d}^{-1}$) | 相关系数 |
| M1 | 1.999 | 0.994 6 | 306.03 | / | / |
| M2 | 1.394 | 0.994 3 | 1 106.94 | 497.09 | 0.976 6 |
| M3 | 1.400 | 0.938 9 | 1 240.52 | 518.86 | 0.905 8 |
| M4 | 1.719 | 1.000 0 | 299.60 | 194.79 | 0.998 2 |
| M5 | 1.535 | 0.999 9 | 1 121.30 | 524.36 | 0.996 4 |
| M6 | 1.642 | 0.987 5 | 1 458.90 | 730.46 | 0.983 9 |
| M7 | 2.596 | 0.999 9 | 158.51 | 132.82 | 0.999 6 |
| M8 | 2.270 | 0.996 1 | 559.68 | 473.65 | 0.995 8 |
| M9 | 2.675 | 0.999 8 | 702.47 | 911.63 | 0.986 1 |

下面以该气藏 3 口井为例,详细进行高压气井产能方程应用与验证。

实例 1 为 M1 井,2016 年 10 月 4-8 日进行产能试井,测试结果见表 2,地层压力为 $p_e = 61.84\text{MPa}$ 。

表 2 M1 井产能试井数据表
Table 2 Productivity test data of Well M1

| 产能测试 | 产气量/($10^4 \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | 井底压力/MPa |
|------|---|----------|
| 测点 1 | 50 | 61.02 |
| 测点 2 | 60 | 60.61 |
| 测点 3 | 70 | 60.21 |
| 测点 4 | 80 | 59.69 |

分别运用二项式产量平方与二项式产量 n 次方程将试井资料进行处理,求得二项式产量平方方法更适合该井。如 $n = 1.999$, B 值为负值,不合理(图 2a)。因此,该井渗流更符合二项式产量平方方程。求得无阻流量 $Q_{\text{AOF}} = 306.03 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。该井 2016 年 10 月 6 日开始投产至今(图 3),配产高时达到 $100 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,约为无阻流量的 $1/3$,但是压力递减快,说明该井配产偏高。

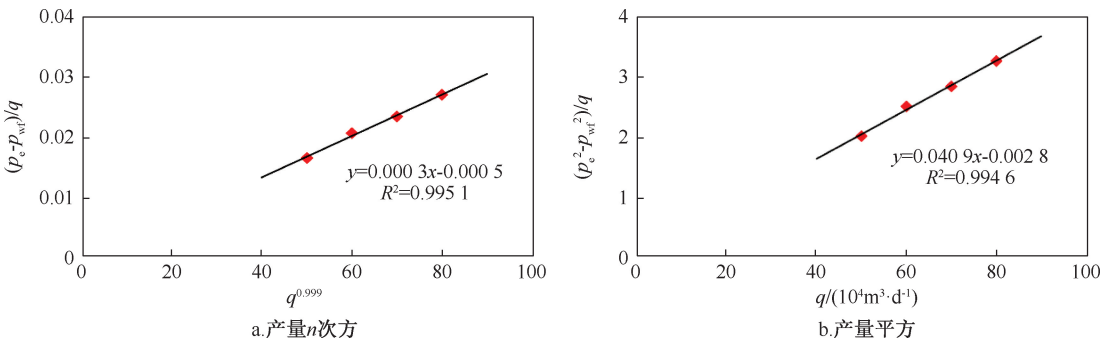


图 2 M1 井二项式产量 n 次与二项式产量平方分析结果图

Fig. 2 Analysis results of binomial production n^{th} equation and binomial production square equation in Well M1

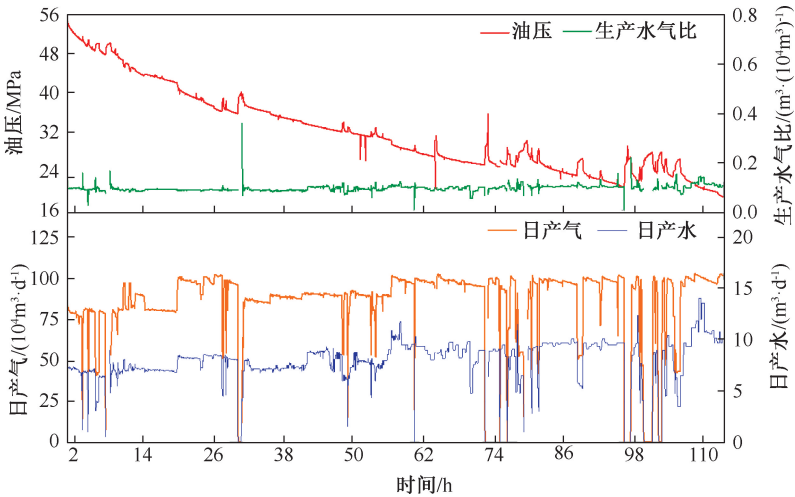


图 3 M1 井采气曲线

Fig. 3 Gas production curve of Well M1

实例 2 为 M9 井,2013 年 1 月 4-8 日进行产能试井。测试数据见表 3,地层压力 $p_e=75.977$ MPa。

表 3 M9 井产能试井数据表

Table 3 Productivity test data of Well M9

| 产能测试 | 产气量/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | 井底压力/MPa |
|------|--|----------|
| 测点 1 | 25.75 | 75.921 |
| 测点 2 | 48.36 | 75.836 |
| 测点 3 | 62.69 | 75.751 |
| 测点 4 | 83.79 | 75.580 |

分别运用二项式产量平方法与二项式产量 n 次方程将试井资料进行处理。二项式产量 n 次方拟合不同的 n 值,求得当 $n=2.703$ 时,相关性最好,相关系数 R 为 0.999 7,且 A 、 B 为正,满足理论值;二项式产量平方法求得相关系数为 0.985,低于二项式产量 n 次方求得的 R 值(图 4)。

运用交会法(图 5),求得无阻流量 $Q_{\text{AOF}}=691.02 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;按照二项式产量平方法求得无阻流量为 $911.63 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该井 2012 年 12 月 6 日投产(图 6),初期以 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右的产量稳定生产,如产量再提高,气井则不能稳定生产。

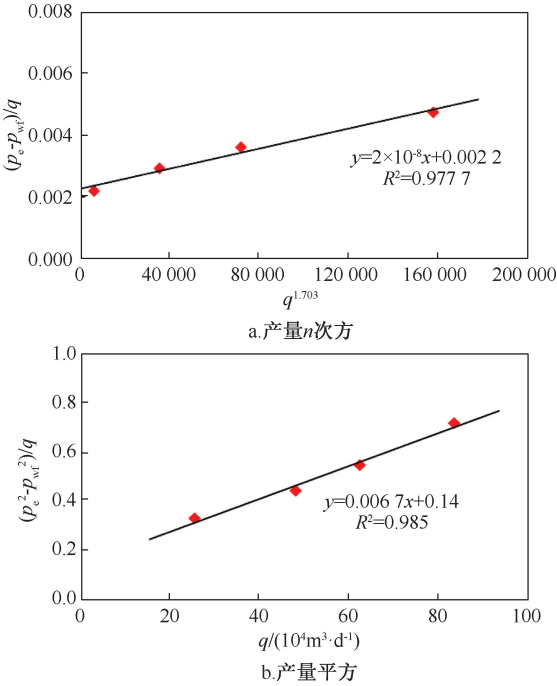


图 4 M9 井二项式产量 n 次与二项式产量平方分析结果图
Fig. 4 Analysis results of binomial production n^{th} equation and binomial production square equation in Well M9

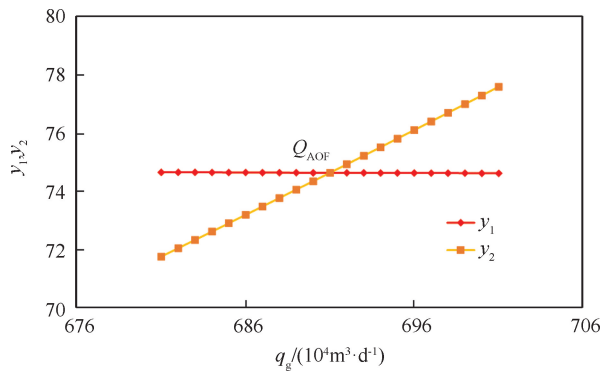


图 5 M9 井交会法求无阻流量曲线图
Fig. 5 Curve of open flow by intersection method of Well M9

如 2013 年 11 月 3 日,产量由 $66.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ 提高到 $96 \times 10^4 \text{ m}^3$,油压由 62.18 MPa 下降到 56.12 MPa,生产 15 d,产量下降到 $62.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。这充分证明,按产量 n 次产能方程计算的无阻流量 $702.47 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 更符合实际。按常规二项式产量平方法计算的无阻流量偏大于真实值,不符合气井生产实际。此外,该井测试静压 75.976 5 MPa,在试井测试前四天,日产气 $26.99 \times 10^4 \text{ m}^3$,测得流压 75.92 MPa,用二项式产量 n 次产能方程求得静压为 75.979 4 MPa,与测试值相差 0.002 9 MPa,几乎接近真实值。因此,应该用二项式产量 n 次方程处理此次的产能试井资料。

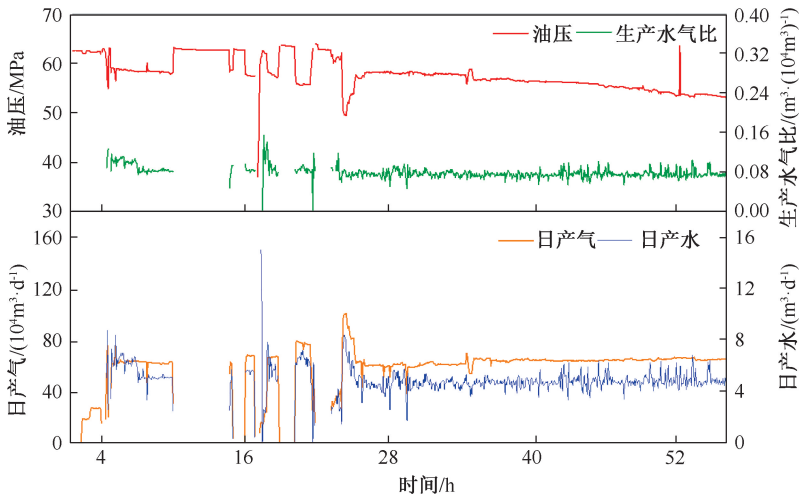


图 6 M9 井采气曲线
Fig. 6 Gas production curve of Well M9

实例 3 为 M5 井,2014 年 6 月 17–21 日进行了 1 次产能试井,测试结果见表 4,地层压力 $p_e = 74.653 \text{ MPa}$ 。分别运用二项式产量平方与二项式产量 n 次方程将试井资料进行处理。二项式产量 n 次方,拟合不同的 n 值,求得当 $n = 1.535$ 时,相关性最好,相关系数 R 为 0.999 9,且 A, B 为正,满足理论值。二项式产量平方法求得相关系数为 0.996 4,低

于二项式产量 n 次方求得的 R 值(图 7)。

表 4 M5 井产能试井数据表
Table 4 Productivity test data of Well M5

| 产能测试 | 产气量/ $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ | 井底压力/MPa |
|------|---|----------|
| 测点 1 | 35.80 | 74.204 |
| 测点 2 | 49.87 | 73.931 |
| 测点 3 | 65.26 | 73.582 |
| 测点 4 | 80.25 | 73.208 |

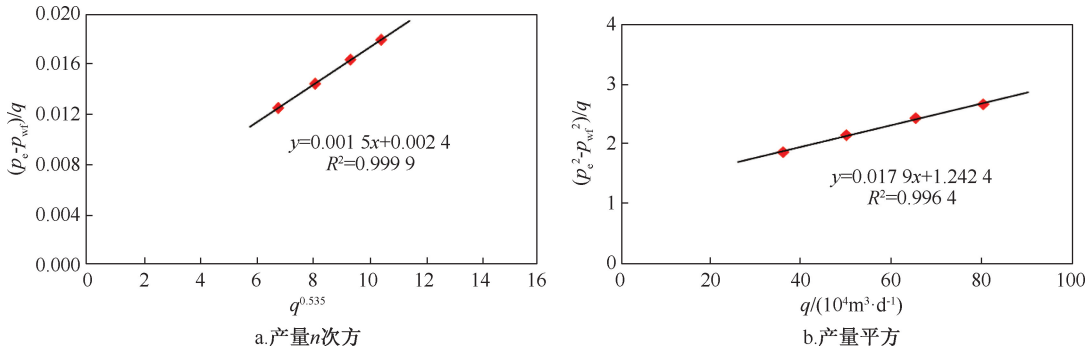


图 7 M5 井二项式产量 n 次方与二项式产量平方分析结果图

Fig. 7 Analysis results of binomial production n^{th} equation and binomial production square equation in Well M5

同样,利用交会法求得无阻流量 $Q_{AOF} = 1\,121.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该井 2013 年 11 月 17 日投产至今,稳产 4 年,产量高时达到 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,且仍然能以

$80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 稳定生产(图 8)。利用常规二项式产量平方法计算无阻流量仅为 $524.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,气井产能偏低,与实际生产动态不吻合。

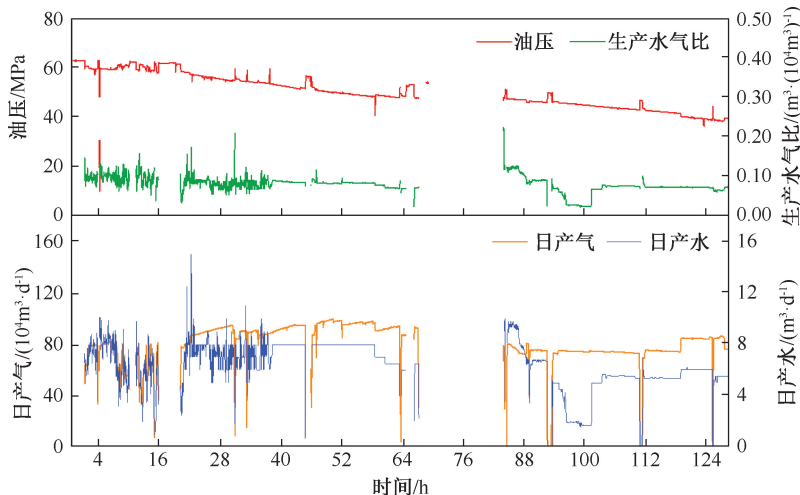


图 8 M5 井采气曲线
Fig. 8 Gas production curve of Well M5

综上所述,利用常规二项式产量平方法计算的无阻流量较真实产能偏低,不符合气井生产实际情况。因此,该井气体渗流更符合二项式产量 n 次方程,应该用二项式产量 n 次方程处理此次的产能试井资料。

4 结论

(1) 利用试差法先求取指数 n 及方程系数 A 、 B 值,最后用交会法求解二项式产量 n 次方程无阻流量,方法简易,对快速准确评价高压气藏气井产能具有重要意义。

(2) 针对高压气藏气井渗流,部分井符合二项式产量平方方程,而另外一些井符合二项式产量 n 次方程,需根据实际情况选择最合适的方法。

(3) 磨溪龙王庙组气藏不同的气井 n 不同,一般大于 1 小于 3,更确切的数值范围需要现场岩芯渗流试验及更多的气井实例方能求得。

致谢:本文研究工作的开展始终得到川中油气矿副矿长刘路、副总工程师胡世强的悉心指导,论文写作过程中,得到川中油气矿地质研究所领导及开发研究组全体同事的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献

[1] 余忠仁,杨雨,肖尧,等. 安岳气田龙王庙组气藏高产井模式研究与生产实践[J]. 天然气工业,2016,36(9):69-79.
YU Zhongren, YANG Yu, XIAO Yao, et al. High-yield well modes and production practices in the Longwangmiao Fm gas reservoirs, Anyue Gas Field, central Sichuan basin

[J]. Natural Gas Industry, 2016,36(9):69-79.
[2] 谢军. 安岳特大型气田高效开发关键技术创新与实践[J]. 天然气工业,2020,40(1):1-10.
XIE Jun. Innovation and practice of the key technologies for the efficient development of the supergiant Anyue gas field [J]. Natural Gas Industry, 2020,40(1):1-10.
[3] 邓乐,黄船,潘登. 安岳气田高温酸性气藏完井技术[J]. 油气井测试,2019,28(1):52-59.
DENG Le, HUANG Chuan, PAN Deng. Completion technology for high temperature sour gas reservoir in Anyue gas field [J]. Well Testing, 2019,28(1):52-59.
[4] 欧家强,王小蓉,袁权,等. 安岳气田磨溪区块龙王庙组气藏产水类型识别[J]. 天然气勘探与开发,2017,40(1):58-62.
OU Jiaqiang, WANG Xiaorong, YUAN Quan, et al. Type identification of water produced from Longwangmiao Fm gas reservoirs in Moxi block of Anyue gasfield [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017,40(1):58-62.
[5] 刘辉,韩嵩,叶茂,等. 四川盆地大中型气田分布特征及勘探前景[J]. 天然气勘探与开发,2018,41(2):55-62.
LIU Hui, HAN Song, YE Mao, et al. Medium to large gas fields in Sichuan basin: Distribution characteristics and exploration prospects [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018,41(2):55-62.
[6] 张建业,牛丛丛,孙雄伟,等. 高温高压气井产能测试资料分析方法选择及实际应用[J]. 油气井测试,2016,25(4):17-20.
ZHANG Jianye, NIU Congcong, SUN Xiongwei, et al. Method selection and practical application of deliverability test data analysis to high temperature and high pressure gas well [J]. Well Testing, 2016,25(4):17-20.

- [7] 李晓平. 地下油气渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社,2008: 25-30.
- [8] XU R, WOJTANOWICZ A K. Pressure buildup test analysis in wells with sustained casing pressure [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017,38(12):608-620.
- [9] 刘志强,杨婧. 低渗透气藏压裂井气水两相产能计算方法[J]. 油气井测试,2019,28(3):67-73.
LIU Zhiqiang, YANG Jing. Calculating method of gas-water two-phase productivity in fractured wells of low permeability gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019, 28(3):67-73.
- [10] 葛家理. 油气层渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社,1982:49-96.
- [11] 何世明,罗德明,虞海生,等. 判别液体流态的层流稳定性理论[J]. 天然气工业,2000,20(5):67-69.
HE Shiming, Luo Deming, Yu Haisheng, et al. Laminar flow stability theory for distinguishing liquid flow regime [J]. Natural Gas Industry, 2000,20(5):67-69.
- [12] 李传亮. 油藏工程原理[M]. 北京:石油工业出版社,2005:62-97.
- [13] 李士伦. 天然气工程[M]. 第2版. 北京:石油工业出版社,2008: 18-56.
- [14] FORCHHEIMER P H. Wasserbewegung durch boden [J]. Zeitsch-rift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1901,45(3):1736-1749.
- [15] 陈春艳. 异常高压气藏气井产能方程求解的简易方法[J]. 天然气工业,2007,27(4):88-89.
CHEN Chunyan. A simple method to solve the deliverability equation of a gas well in abnormally high-pressure gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(4): 88-89.
- [16] 科林斯(著). 陈钟祥(译). 流体通过多孔材料的流动[M]. 北京:石油工业出版社,1984: 48-86.
- [17] J·贝尔(著). 李竞生,陈崇希(译). 多孔介质流体动力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1983: 18-46.
- [18] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999: 58-79.
- [19] 郭肖,杨开睿,杨宇睿,等. 孔隙网络模拟渗流速度对页岩气开采的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(6):19-27.
GUO Xiao, YANG Kairui, YANG Yurui, et al. Influence of seepage velocity on shale gas exploration by pore network simulation [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019, 41(6):19-27.
- [20] 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: 26-59.
- [21] 郑爱维,李继庆,卢文涛,等. 涪陵页岩气田分段压裂水平井非稳态产能评价方法[J]. 油气井测试,2018,27(1):22-30.
ZHENG Aiwei, LI Jiqing, LU Wentao, et al. Unsteady productivity evaluation method of multi-stage fractured horizontal well for shale gas in Fuling shale gas field [J]. Well Testing, 2018,27(1):22-30.
- [22] 郭树起. 应用边界积分法求圆形夹杂问题的解析解1[J]. 力学学报,2020,52(1):73-81.
GUO Shuqi. Exact solution of circular inclusion problems by a boundary integral method [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(1): 73-81.
- [23] 彭小东,李华,李浩,等. 拟压力稳定点法在海上高温高压气井产能评价中的应用[J]. 天然气勘探与开发,2019,42(2):107-112.
PENG Xiaodong, LI Hua, LI Hao, et al. Application of pseudo pressure stability point method to evaluating productivity of offshore gas wells with high pressure and high temperature [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019,42(2):107-112.
- [24] 李乐忠,李相方,何东博,等. 测试流量不合理对修正等时试井产能曲线的影响[J]. 天然气工业,2010,30(4):67-69.
LI Lezhong, LI Xiangfang, HE Dongbo, et al. Impact of irrational tested flow rate on the deliverability curve of the modified isochronal test [J]. Natural Gas Industry, 2010,30(4):67-69.

编辑 王 军

第一作者简介:陈春艳,女,1979年出生,高级工程师,2002年毕业于西南石油大学石油工程专业,主要从事油气藏工程、采油工程研究工作。电话:0825-2516269,13508211286; Email:chunyanzi120837@sohu.com。通信地址:四川省遂宁市河东新区香林南路178号,邮政编码:629001。