

Method for Systematic Well-Test Interpretation in M Gas Field

Tao Zhang¹, Yan Chen², Jun Li³, Peng Chen², Ruozhu Li⁴, Lei Zhang³, Yanqiu Wang⁴, Yu Liu⁴

¹School of Information and Mathematics, Yangtze University, Jingzhou Hubei

²Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan Hubei

³Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield, Korle Xinjiang

⁴Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korle Xinjiang

Email: zt_sx981@126.com.cn

Received: Aug. 1st, 2016; accepted: Oct. 7th, 2016; published: Dec. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Influenced by the starting pressure gradient in low permeability reservoirs, there existed many problems in well test data obtained with conventional productivity equation interpreting system. By taking M Gas Field for example, starting from percolation theory, a productivity equation for fractured vertical wells considering the starting pressure gradient was established. By comparing the difference between the equation and the productivity equation of vertical well in conventional gas reservoir fracturing, a modified equation is obtained for it by modifying the binomial expression productivity equation, the correct equation was used for interpreting the tested data. The results from the modified binomial expression productivity equation and the binomial expression deliverability equation with the exponential productivity equation are compared, and combined with actual production performance, rationality of calculating the open flow capacity with the method is presented. The result provides reference for the development of M Gas Field.

Keywords

M Gas Field, Systematic Well Test, Modified Binomial Productivity, Open Flow Capacity

M气田系统试井解释方法研究

张涛¹, 陈岩², 李君³, 陈鹏², 李若竹⁴, 张磊³, 王彦秋⁴, 刘宇⁴

¹长江大学信息与数学学院, 湖北 荆州

²油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 湖北 武汉

³中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒

⁴中石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒

作者简介: 张涛(1978-), 男, 博士, 副教授, 现主要从事算法设计及试井研究工作。

Email: zt_sx981@126.com.cn

收稿日期: 2016年8月1日; 录用日期: 2016年10月7日; 发布日期: 2016年12月15日

摘要

由于低渗透储层中启动压力梯度的影响, 常规产能方程解释系统试井数据时存在诸多难题。以M气田为例, 首先从渗流理论出发, 建立考虑启动压力梯度影响的压裂直井产能方程, 通过对比该方程与常规气藏压裂直井产能方程的差异, 对二项式产能方程进行修正, 得到了二项式产能方程的修正方程; 然后利用修正的产能方程对测试数据进行了解释; 最后, 对比了修正二项式产能方程法、二项式产能方程法和指数式产能方程法解释的结果, 并结合实际生产动态说明该方法计算无阻流量的合理性。研究结果对M气田的开发具有一定借鉴意义。

关键词

M气田, 系统试井, 修正二项式产能方程, 无阻流量

1. 引言

M气田位于长岭凹陷南部, 属于典型的低孔特低渗凝析气田[1]。由于储层内孔隙和渗透率低, 气体在储层内流动时存在一定的启动压力梯度[2] [3] [4]。系统试井是一种气藏生产时间中广泛采用的产能试井方法, 其测试数据主要采用二项式产能方程法和指数式产能方程法进行解释。采用二项式产能方程法和指数式产能方程法进行解释时, 由于未考虑启动压力梯度的影响, 造成了解释出的无阻流量偏大, 或产能曲线为负值[5] [6]。笔者针对M气田采用直井压裂开发的实际, 推导了考虑启动压力梯度的压裂直井产能方程; 然后利用压裂直井产能方程变形得到了二项式产能方程的修正方程, 并利用得到的产能方程对测试数据进行了解释; 最后将修正二项式产能方程法、二项式产能方程法和指数式产能方程法解释的结果进行了对比, 并结合实际生产动态说明了该方法计算无阻流量的合理性。

2. 压裂直井产能方程

模型假设: 储层为均质等厚储层, 储层中间有一口压裂直井稳定生产, 忽略毛细管力、重力及物理化学作用对气体流动的影响, 气体流动过程中考虑启动压力梯度。

考虑启动压力梯度时, 气体的流动方程可以写为:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} v + \beta \rho v^2 + \lambda \quad (1)$$

式中: v 为气体流动速度, m/s; k 为地层渗透率, mD; μ 为气体黏度, mPa·s; p 为地层压力, MPa; x 为长度, m; β 为紊流系数, m^{-1} ; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; λ 为启动压力梯度, MPa/m。

考虑到地层条件与地面条件的差异, 气体的状态方程可以写为:

$$\rho = \frac{p}{ZT} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{p_{sc}} \rho_{sc} \quad (2)$$

式中: Z 为气体偏差因子, 1; T 为温度, K; 下标 sc 为标准状况下的相关参数。

利用保角变换, 将压裂直井开采过程中储层中的椭圆流动转化为 w 平面中的一维带状流动。定义拟压力表达式为 $\varphi = \int_{p_0}^p \frac{2kp}{\mu Z} dp$, 将其代入流动方程, 并对流动方程进行积分, 可得到:

$$\varphi_e - \varphi_{wf} = \frac{q_{sc} p_{sc} T}{\pi h T_{sc}} x_e + \frac{aMT}{2R\bar{\mu}k^{0.5}} \left(\frac{q_{sc} p_{sc}}{\pi h T_{sc}} \right)^2 x_e + \lambda \int_0^L \frac{2kp}{\mu Z} dx \quad (3)$$

式中: φ_e 和 φ_{wf} 分别为气藏外边界和井底的拟压力, $MPa \cdot m^3/d$; q_{sc} 为压裂井日产气量, m^3/d ; h 为地层厚度, m; $\bar{\mu}$ 为平均黏度, mPa·s; x_e 为 w 平面边界到井线段的距离, m; M 为气体的摩尔质量, g/mol; R 为气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$ 。

将 w 平面内的拟压力方程转换到实空间平面, 并对相关项进行积分, 可以得到考虑启动压力梯度时压裂井的产能方程:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{\bar{\mu} Z p_{sc} T}{\pi k h T_{sc}} \ln \frac{2r_e}{L_f} Q_{sc} + \frac{Z \beta M p_{sc}^2 T}{2R\pi^2 h^2 T_{sc}^2} \ln \frac{2r_e}{L_f} Q_{sc}^2 + \frac{\lambda^3 (r_e^2 - r_w^2)}{p_e - p_{wf}} \ln \frac{2r_e}{L_f} \quad (4)$$

式中: p_e 和 p_{wf} 分别为地层边界压力和井底压力, MPa; L_f 为裂缝长度, m; Q 为产量, m^3/d ; r_e 为边界半径, m; r_w 为井筒半径, m。

3. 修正二项式产能方程

在常规气藏中, 在径向流条件下压裂井的产能方程为:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{\bar{\mu} Z p_{sc} T}{\pi k h T_{sc}} \ln \frac{2r_e}{L_f} Q_{sc} + \frac{Z \beta M p_{sc}^2 T}{2R\pi^2 h^2 T_{sc}^2} \ln \frac{2r_e}{L_f} Q_{sc}^2 \quad (5)$$

对方程进行化简, 可以得到常规气藏中二项式产能方程[7]:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = A Q_{sc} + B Q_{sc}^2 \quad (6)$$

式中: $A = \frac{\bar{\mu} Z p_{sc} T}{\pi k h T_{sc}} \ln \frac{2r_e}{L_f}$; $B = \frac{Z \beta M p_{sc}^2 T}{2R\pi^2 h^2 T_{sc}^2} \ln \frac{2r_e}{L_f}$ 。

对比常规气藏压裂井产能方程和低渗透气藏压裂井产能方程, 发现由于考虑了启动压力梯度对产量的影响, 方程(4)比方程(5)在等式右边明显多了一项, 这一项与气井产量无关。因此, 用二项式产能方程对低渗透储层系统试井资料进行解释时, 需考虑启动压力梯度对产能的影响, 对二项式产能方程进行修正。修正后的产能方程可写为:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = A Q_{sc} + B Q_{sc}^2 + C \quad (7)$$

式中: $A = \frac{\bar{\mu} Z p_{sc} T}{\pi k h T_{sc}} \ln \frac{2r_e}{L_f}$; $B = \frac{Z \beta M p_{sc}^2 T}{2R\pi^2 h^2 T_{sc}^2} \ln \frac{2r_e}{L_f}$; $C = \frac{\lambda^3 (r_e^2 - r_w^2)}{p_e - p_{wf}} \ln \frac{2r_e}{L_f}$ 。

4. 实例应用

以 M 气田 C1 井为例, 采用“有限导流 + 均质气藏 + 无限大”模型对其压力恢复资料进行了解释(图 1)。其结果如下: 储层有效厚度为 22.2 m, 孔隙度为 9.35%, 井筒半径为 6.99 cm, 储层中部压力为 31.08 MPa, 地层渗透率为 0.32 mD, 裂缝长度为 52.6 m, 流、静压测试成果显示, 井筒内流体基本为单相气, 未见明显的凝析油析出现象。

对该井进行系统试井时采用 4 个流量以由小到大的顺序连续生产, 生产数据见表 1。直径 3、4、5 mm 满足稳定试井分析条件, 而第 4 个流量在生产过程中, 未求取稳定流压, 故在产能分析中不予考虑。系统试井测试数据显示: 随着油嘴的放大, 产气量增大的同时, 井底流压、井口油压下降, 产油量及含水率也有所增加, 而 $\varnothing 3$ mm 油嘴生产时, 未见水产出, 说明 $\varnothing 3$ mm 油嘴生产时, 携液能力较差。直径 4、5、6 mm 油嘴生产时, 地面有水产出, 随着油嘴的增大, 含水率也有所增加, 但当 $\varnothing 6$ mm 油嘴生产时, 产气量增加, 含水率及油产量增幅变小, 气油比升高。系统试井曲线提示在生产过程中不易采用 $\varnothing 3$ mm 油嘴生产, 应考虑选用 $\varnothing 4$ mm 以上油嘴生产, 从而保证井底的积液在生产过程中被带出。

利用系统试井测试数据, 分别采用修正二项式产能方程法、二项式产能方程法和指数式产能方程法对测试数据进行解释。利用测试数据, 分别绘制了修正二项式产能曲线、二项式产能曲线和指数式产能曲线(图 2~4), 采用不同试井解释方法, 对系统测试数据进行解释, 结果见表 2。

从修正二项式产能方程法、二项式产能方程法和指数式产能方程法得出的绝对无阻流量看, 三者差别较大。由于修正二项式产能方程是在考虑低渗透渗流特征的基础上, 从渗流力学方程推导而来, 它对不同的地层适用性及准确程度要高一些; 而指数式产能方程只是一种经验公式, 准确程度相对较差。从该井的生产动态曲线可以看出该井的合理产量在 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右(图 5), 无阻流量为 $14.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 比较合适。

Table 1. Systematical test result data in Well C1

表 1. C1 井系统试井成果数据表

开关井 顺序	油嘴直径 /mm	压力 /MPa	油压 /(MPa)	日产量/ m^3				含水率/%	气油比 / $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$
				油	水	气	总气量		
开井	5	27.224	19.7	35.84	0.91	59112.4	64265.23	2.48	1649.34
关井恢复	0	30.80	22.0	0	0	0	0	0	0
流量 1	3	29.825	20.6	8.32	0	23340	24536.19	0	2805.29
流量 2	4	28.545	19.8	21.70	0.13	41374	44493.88	0.60	1906.64
流量 3	5	27.011	19.4	34.44	0.91	62866	67817.55	2.57	1825.38
流量 4	6	26.152	18.7	37.94	1.04	83633	89087.76	2.67	2204.35

Table 2. C1 Well system test interpretation result data sheet

表 2. C1 井系统试井解释结果表

方法	产能方程	绝对无阻流量/ $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$
修正二项式产能方程法	$p_c^2 - p_{wf}^2 = 4.8114q_g^2 + 0.3308q_c + 36.344$	14.40
二项式产能方程法	$p_c^2 - p_{wf}^2 = 2.3686q_g^2 + 20.765q_c$	16.17
指数式产能方程法	$q_g = 0.108(p_c^2 - p_{wf}^2)^{0.7508}$	18.55

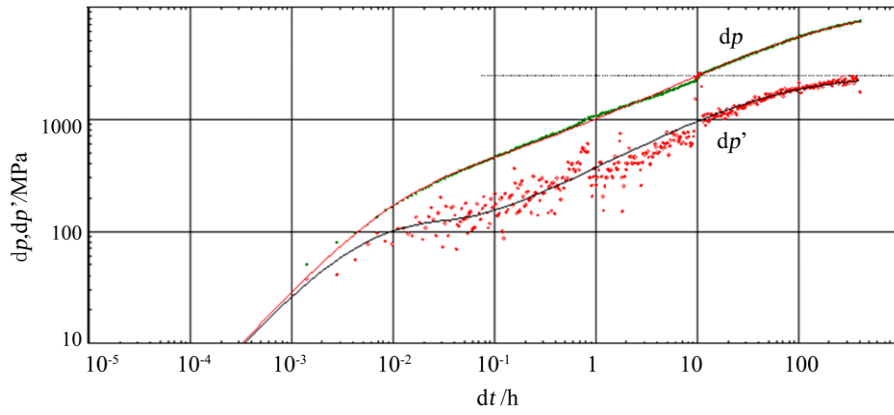


Figure 1. Log-log curve of well pressure recovery in Well C1
 图 1. C1 井压力恢复双对数曲线图

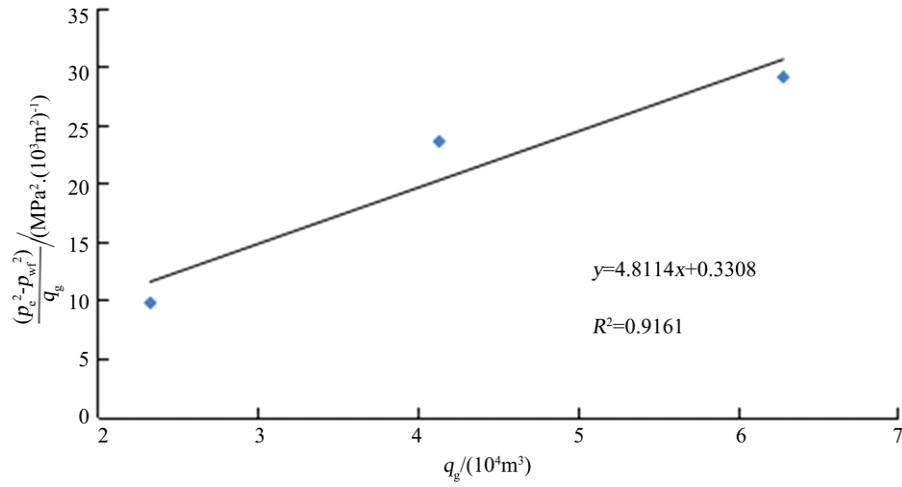


Figure 2. Modified binomial productivity equation curve
 图 2. 修正二项式产能方程曲线图

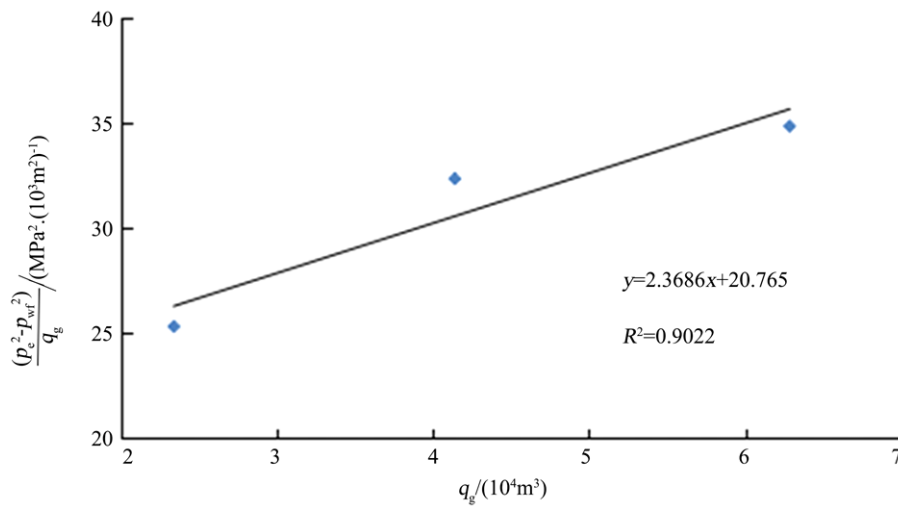


Figure 3. The binomial productivity equation curve
 图 3. 二项式产能方程曲线图

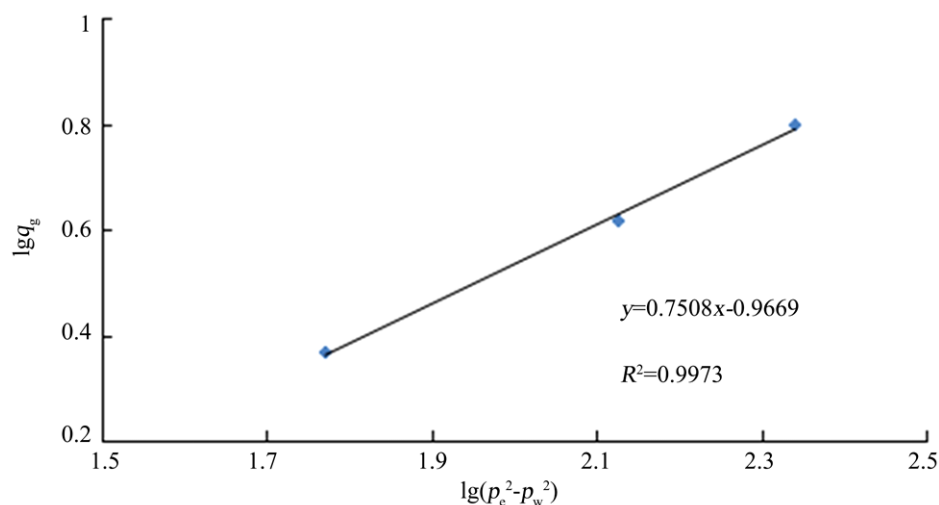


Figure 4. Exponential productivity equation curve
图 4. 指数式产能方程曲线图

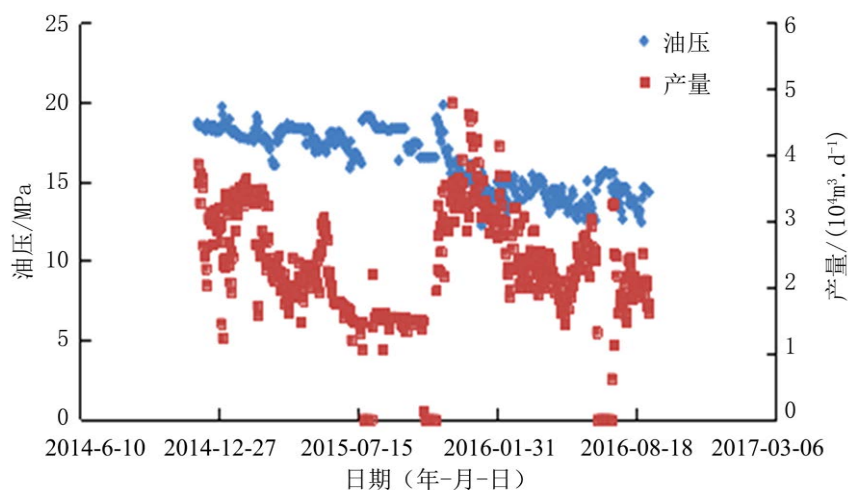


Figure 5. Production performance curve in Well C1
图 5. C1 井生产动态曲线图

5. 结论

- 1) 从渗流理论出发, 推导了考虑启动压力梯度时低渗透储层压裂气井的产能方程, 并建立了修正二项式产能方程。
- 2) 利用比修正二项式产能方程法、二项式产能方程法和指数式产能方程法对 C1 井进行了试井解释, 发现利用二项式产能方程法和指数式产能方程法解释结果偏高。
- 3) 根据系统试井解释结果和实际生产动态特征, 修正二项式产能方程计算的该井无阻流量结果比较合适, 其大小为 $14.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

基金项目

国家自然科学基金项目(61673006); 国家科技重大专项(2011ZX05015, 2011ZX05013); 湖北省教育厅优秀中青年项目(Q201141304)。

参考文献 (References)

- [1] 张东清. 龙凤山气田北 209 井钻井提速技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(4): 22-26.
- [2] 冯文光. 非达西低速渗流的研究现状与进展[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(4): 76-80.
- [3] 郭肖, 伍勇. 启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透气藏水平井产能的影响[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 539-543.
- [4] 刘启国, 王瑞, 李邢, 等. 考虑启动压力梯度和高速非达西效应的低渗透气藏水平井产能[J]. 油气田地质与采收率, 2010, 17(5): 53-56.
- [5] 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[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(6): 651-533.
- [6] 王卫红, 沈平平, 马新华, 等. 低渗透气藏气井产能试井资料分析方法研究[J]. 天然气业, 2005, 25(11): 76-78.
- [7] 刘方玉, 马华丽, 蒋凯军, 等. 压裂后气井的产能评价方法分析[J]. 油气井测试, 2010, 19(5): 35-38.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jogt@hanspub.org