

低渗透气藏气井产能评价新方法^{*}

李治平 万怡姝 张喜亭

(中国地质大学沉积盆地能源地质实验室)

李治平等.低渗透气藏气井产能评价新方法研究.天然气工业,2007,27(4):85-87.

摘要 目前我国发现的气藏大都是低渗透气藏,这类气藏的渗流规律不同于常规气藏渗流规律,如果按常规气藏的产能评价方法对产能测试资料进行分析评价,将得出错误的结果。为此,从渗流基本定律出发,根据低渗透气藏气体渗流过程中存在启动压力梯度的特点,推导出了低渗透气藏气井产能方程的新形式,该新的产能方程有别于传统的二项式方程,是一个三项式渗流方程,这就解释了为什么在低渗透气井中用常数的二项式或指数式方程来整理气井产能测试资料将导致错误解释结果的原因。根据新方程的特点,采用最优化方法进行整理,并将该理论用于西部某气田气井产能的评价,取得了很好的结果。

关键词 低渗透油气藏 生产能力 产能评价 数学模型 方法

低渗透气藏在我国分布广泛,如长庆油田的中部气田、苏里格气田等都是储层渗透率极低的气田,目前已投入开发中,取得了大量的产能测试资料,如果用常规的二项式方程进行测试资料处理,发现存在许多异常现象,如得到结果是二项式方程的系数 A 是负值或 B 是负值,得不出正确的产能方程,无法获得气井的流入动态曲线。为此,笔者对上述现象进行了深入的研究,从低渗透气藏的基本渗流力学理论出发,推导出了低渗透气藏产能方程的新形式,运用该产能方程研究了低渗透气藏产能测试资料处理的新方法,经过西部某气田几十口井资料的处理,取得了良好的效果,为低渗透气田气井产能评价找到了一种新方法。

一、低渗透气藏的渗流规律

低渗透气藏具有孔隙度和渗透率低的特点,气体在低孔低渗的气藏中渗流时,存在启动压差,气体在压差的作用下,必须要克服启动压差后才能运动,如图1所示。

对于低渗透气藏而言,在存在启动压差时,其渗流数学描述如下:

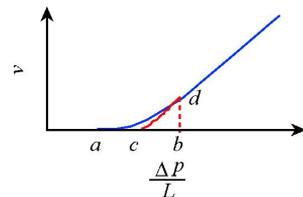


图1 低渗透气藏渗流时存在启动压差图

$$v = \begin{cases} 0 & \frac{\Delta p}{L} < C \\ \frac{K}{\mu} \left(\frac{\Delta p}{L} - C \right) & \frac{\Delta p}{L} \geq C \end{cases} \quad (1)$$

该式的优点是反映了低渗透地层中渗流的启动压力梯度问题,不足之处是对于在低压力梯度时,阻力较小的大孔道中的流动估计值偏低。

中国科学院渗流所黄延章研究表明,起始压力梯度(C)与渗透率、孔隙度的关系为:

$$C = \tau \sqrt{\frac{\varphi}{2K}} \quad (2)$$

式中: τ 为极限剪切应力, N 。

这表明,启动压力梯度与渗透率的平方根成反比,与极限剪切应力成正比。

^{*} 本文受到国家“973”重大基础研究项目(编号:2001-CB-209-108)和国家自然科学基金项目(编号:50574079)资助。

作者简介: 李治平,1963年生,博士后,教授,博士生导师,长期从事油气田开发工程方面的教学和科研工作,先后获得中国科技发展基金孙越琦优秀青年科技奖,教育部优秀高校青年基金,四川省杰出青年学科带头人、优秀博士、优秀专家、青年科技奖和中国青年科技奖,并获得省部级科技一、二等奖5项;出版专著4部,发表论文90余篇。地址:(100083)北京市学院路29号。电话:(010)82320690。E-mail:lzpswp@163.com

二、低渗透气藏气井产能方程推导

为了能分析低渗透气藏气井的产能测试资料,必须首先建立低渗透气藏气井的产能方程。

1. 假设条件

(1)在压力梯度比较小时,压力梯度与速度之间存在启动压力梯度。

(2)在压力梯度比较大时,压力梯度与速度之间的关系用二项式方程描述。

2. 数学模型

根据上述假设条件,可得低渗透气藏径向渗流时的数学描述为:

$$\begin{cases} v = 0 & \frac{dp}{dr} < C_0 \\ \left(\frac{dp}{dr} - C \right) = \frac{\mu}{K} v + \alpha \rho v^2 & \frac{dp}{dr} \geq C_0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)进一步整理得:

$$\begin{cases} v = 0 & \frac{dp}{dr} < C_0 \\ \frac{dp}{dr} = C + \frac{\mu}{K} v + \alpha \rho v^2 & \frac{dp}{dr} \geq C_0 \end{cases} \quad (4)$$

设气井产量为 Q_g , 那径向各点的渗流速度为:

$$v = \frac{Q_g}{2\pi hr} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)的第二个表达式,并两边积分得:

$$\int_{p_e}^{p_{wf}} p dp = \int_{r_e}^{r_w} C_0 + \frac{\mu}{K} \frac{Q_g}{2\pi hr} + \alpha \rho \frac{Q_g^2}{(2\pi hr)^2} \quad (6)$$

$$p_{wf}^2 - p_e^2 = C_0 (r_w - r_e) + \frac{\mu}{K} \frac{Q_g}{2\pi h} \ln \frac{r_w}{r_e} + \alpha \rho \frac{Q_g^2}{4\pi h^2} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) \quad (7)$$

$$\text{令} \quad A = \frac{\mu}{K} \frac{1}{2\pi h} \ln \frac{r_w}{r_e} \quad (8)$$

$$B = \frac{\alpha \rho}{4\pi h^2} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) \quad (9)$$

$$D = C_0 (r_e - r_w) \quad (10)$$

那么,式(7)可变成:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = D + A Q_g + B Q_g^2 \quad (11)$$

式(11)即为低渗透气藏气井的产能方程, D 代表由于启动压力梯度引起的系数, A 为达西项系数, B 为非达西项系数。

三、低渗透气藏产能试井测试资料处理方法

方程式(11)较二项式方程多了一个常数项,因

此,无法采用常规二项式方程的处理方法,为此,这里提出采用最优化方法进行处理。主要以系统试井资料为例来研究处理方法。

若系统试井资料测点数为 N ,那么,最优化问题的提法是:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N [p_{wfi} - \sqrt{p_e^2 - (A Q_i + B Q_i^2)}]^2 \\ p_e > 0 \\ A, B, D \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)如果不加约束条件,则可采用一般的多元回归方法处理,这样处理会得到不切合理论的结果。

式(12)无法手工完成,这里采用计算机自动处理。

计算出 A, B, D 值后,用下式可计算气井的无阻流量:

$$Q_{AOF} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B(p_e^2 - 0.101^2 - D)}}{2B} \quad (13)$$

四、应用实例分析

已知某井为低孔低渗的气藏,在该气井上进行了系统试井,系统试井测试资料如表1所示。

表1 某低渗透气井产能测试数据表

序号	测试产量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	井底流压 (MPa)	$(p_e^2 - p_{wf}^2)/Q$
0	0	27.34	
1	1.529	21	35.3581
2	2.537	20.3	32.80096
3	3.965	18.9	32.36823
4	5.728	18.3	32.35029

运用传统的二项式处理时,得到的指示曲线呈反向二项式系数的 B 值为负值,分析结果为: $A = 35.3377$; $B = -0.6158217$; $Q_{AOF} = 24.29696 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。显然其结果不正确。

运用笔者提出的低渗透气藏气井的产能测试资料处理方法,其结果为: $D = 11.91$; $A = 26.53811$; $B = 0.6656116$; $Q_{AOF} = 13.581 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。显然是符合实际的。

五、结论

根据笔者的研究,可以得出如下结论。

(1)低渗透气藏气井的产能方程不同于常规气

井的产能方程,其产能方程形式为三项式形式,每一项都有明确的含义。

(2)采用最优比处理低渗透气井产能测试资料是一种行之有效的方法。

(3)经过大量的资料分析表明,低渗透气藏产能方程及相应的资料处理方法是能够很好描述低渗透气藏特性及很好处理资料的方法,解决了用常规方法处理低渗透气藏测试资料常为异常的问题。

符号说明

Δp 为生产压差,MPa; L 为流动的距离,m; K 为储层渗透率, μm^2 ; μ 为流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; v 为渗流速度, m/s ; φ 为储层孔隙度,小数; a 为常数; b 为常数; C 为启动压力梯度,MPa/m; C_0 为临界压力梯度,MPa/m; α 为常数; r 为距井轴的任意半径,m; r_w 为井半径,m; r_e 为泄油半径,m; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; Q_g 为标准状态下的气体流量, m^3/d ; h 为气层

有效厚度,m; p_{wf} 为井底流动压力,MPa; p_e 为地层压力,MPa; p 为压力,MPa。

参考文献

- [1] 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,2001.
- [2] 葛家理.油气层渗流力学[M].北京:石油工业出版社,1982.
- [3] 黄秉光,等.实用气藏工程方法与动态分析[M].北京:石油工业出版社,1994.
- [4] 李治平.用压力恢复曲线计算气井的产能研究[J].天然气工业,1998,18(6).
- [5] 刘能强.实用现代试井分析[M].北京:石油工业出版社.

(修改回稿日期 2006-12-18 编辑 韩晓渝)