

# 异常高压气藏气井三项式产能方程

罗银富<sup>1</sup> 黄炳光<sup>2</sup> 王怒涛<sup>2</sup> 李瑜<sup>3</sup>

[1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室

2. 西南石油大学石油工程学院 3. 中国石油西南油气田公司重庆气矿]

罗银富等. 异常高压气藏气井三项式产能方程. 天然气工业, 2008, 28(12): 81-82.

**摘要** 在异常高压气藏中, 气井非达西流动不能由传统的二项式产能方程表达, 必须采用考虑了气井非达西流动效应和脉动效应的三项式产能方程。对于方程的建立, 陈春艳给出的方法精度较低, 且计算麻烦, 还必须已知地层静压。为此, 提出了一种精度高且计算简便的方法, 不需要已知地层静压, 只通过井底流压与产气量数据, 利用多元线性回归方法, 既可确定气井三项式产能方程, 还可求得气井绝对无阻流量和地层静压。将该方法应用于四川盆地西 35-1 异常高压气井试井资料的整理, 所获得的气井三项式产能方程精度高。实例对比分析结果表明, 所提出的方法准确、可靠。

**关键词** 异常压力 高压 气井 产能评价 方程

## 一、三项式产能方程的建立

Forchheimer 针对传统的二项式渗流规律无法准确描述异常高压气藏中天然气高速渗流的问题, 提出了异常高压气藏中气体渗流三项式规律<sup>[1-4]</sup>, 即在传统二项式产能方程的达西流项和非达西流项的基础上增加了一个三次方项, 即脉动项:

$$\frac{dp}{dx} = -\left(\frac{\mu}{K}v + \beta v^2 + \gamma \rho^2 v^3\right) \quad (1)$$

Ezeudembah 等人运用黏性流体动力学知识从机理上给予了分析, 在井底流压高于 20.7 MPa 的情况下, 将式(1)简化得到三项式产能方程<sup>[1]</sup>:

$$p_R - p_{wf} = Aq + Bq^2 + Cq^3 \quad (2)$$

对于异常高压气藏, 当井底流压高于 20.7 MPa 时, 井底生产压差与产量之间成三次方关系。其中三次方项为脉动项, 由气体在多孔介质中流动的脉动速度引起。

## 二、三项式产能方程的确定

运用试井资料, 只要求出式(2)中的系数 A、B、C, 那么就唯一地确定了该井的流入动态, 进而求得气井的绝对无阻流量。确定系数 A、B、C 的方法很多, 但大都需要地层静压数据, 且求解过程较为繁

琐, 不便使用。笔者在文献[5]的基础上, 提出了不需要地层静压即可确定系数 A、B、C, 同时还能准确求出地层静压的简便方法。

由式(2)可得:

$$p_{wf} = p_R - Aq - Bq^2 - Cq^3 \quad (3)$$

从式(3)可看出:  $p_{wf}$  是产量  $q$  的函数。令  $y = p_{wf}$ ,  $x = q$ ,  $D = p_R$ , 则式(3)可以写成:  $y = D - Ax - Bx^2 - Cx^3$ 。再令  $A' = -A$ ,  $B' = -B$ ,  $C' = -C$ , 回归问题可转化为多元线性回归问题加以解决。正规方程为:

$$nD + A' \sum_{i=1}^n x_i + B' \sum_{i=1}^n x_i^2 + C' \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$$

$$D \sum_{i=1}^n x_i + A' \sum_{i=1}^n x_i^2 + B' \sum_{i=1}^n x_i^3 + C' \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n y_i x_i \quad (5)$$

$$D \sum_{i=1}^n x_i^2 + A' \sum_{i=1}^n x_i^3 + B' \sum_{i=1}^n x_i^4 + C' \sum_{i=1}^n x_i^5 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \quad (6)$$

$$D \sum_{i=1}^n x_i^3 + A' \sum_{i=1}^n x_i^4 + B' \sum_{i=1}^n x_i^5 + C' \sum_{i=1}^n x_i^6 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^3 \quad (7)$$

解联立方程(4)、(5)、(6)、(7), 可求得系数  $A'$ 、

**作者简介:** 罗银富, 1981年生, 博士, 现在中海石油研究中心博士后科研工作站从事海上油田产能评价方面的研究工作。地址: (100027) 北京市东城区东直门外小街6号海油大厦1304室。电话: (010)84522713。E-mail: luoyinfu@126.com

$B'$ 、 $C'$ 和 $D$ ,也即得到 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 和 $D$ 。而 $D=p_R$ ,也就求得了地层静压。因此,本方法不需要地层静压数据即可求得系数 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 和地层静压。该方法手工计算较为繁琐,若使用计算机编程求解则十分简便。

从理论上讲,测点数 $n$ 越多,计算结果越准确,但由于受诸多因素限制,实际作业中的次数不可能太多,多点回压法试井现场通常的做法是求取4~6个测试点的资料数据,实践证明这样就可满足计算要求。需要指出的是,实测点数据越可靠,则所确定的三项式产能方程越准确。采用本方法所得计算结果在相关系数大于0.95时即可认为可靠。

### 三、实例分析及对比

西35-1井是一口位于四川盆地南充构造共兴潜伏高东端的须家河组气藏开发井,产层为上三叠统须家河组二段,气藏中部深度2 610.0 m。开井前测得地层静压为42.27 MPa,压力系数为1.65,属于异常高压气藏。该井进行了修正等时试井,测试数据见表1<sup>[1]</sup>。

表1 西35-1井修正等时试井测试数据表

测试制度	测试时间	测试产气量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d)	气藏中部压力 (MPa)
压力恢复	15 min	0	41.781
一开	24 h	3.01	40.520
关井	24 h	0	41.683
二开	24 h	3.94	39.733
关井	24 h	0	41.582
三开	24 h	5.59	37.805
关井	24 h	0	41.631
四开	24 h	6.13	36.357
延长测试稳定点	240 h	4.41	38.580

对该井的测试资料进行处理可知,井底流压全部大于20.7 MPa,故采用上述多元回归方法可确定三项式产能方程的系数为: $A=0.2031$ , $B=0.0063$ , $C=0.0165$ , $D=41.639$ 。因此,该气井三项式产能方程为:

$$41.639 - p_{wf} = 0.2031q + 0.0063q^2 + 0.0165q^3 \quad (8)$$

为了证明其准确性,运用式(8)计算的井底压力与实测井底压力进行对比,其结果见表2。

从表2可以看出,笔者提出的方法所得压力值与实测值非常吻合。同时,所得平均地层静压为41.639 MPa,与实测地层静压42.27 MPa非常接近,相对误差小于1%。该方法的准确性得到了验证。

表2 西35-1井计算压力与实测压力对比表

测试点	测试产气量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d)	实测压力 (MPa)	计算压力 (MPa)	绝对误差 (MPa)	相对误差 (%)
1	3	40.520	40.527	0.007	0.017
2	3.94	39.733	39.732	0.001	0.003
3	5.59	37.805	37.425	0.380	1.015

同时与文献[1]所述方法相比,无需使用繁琐的试凑法,求解过程简便,且结果与实测数据吻合程度更高、更为准确。于是,计算气井绝对无阻流量为 $13.20 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d。

### 四、结 论

(1)对于异常高压气藏中的气体渗流规律,传统的二项式产能方程已不再适用,只有三项式产能方程才能真实描述。

(2)利用可靠的多点试井资料,采用本方法可准确、方便地确定异常高压气藏气井三项式产能方程并计算出气井的绝对无阻流量。

(3)对于不便进行长时间压力恢复试井无法获得地层静压数据的情况,利用本方法仍可确定异常高压气藏气井三项式产能方程,给出准确的气井绝对无阻流量,同时还能求得地层静压。这对于现场测试分析具有重要的现实意义。

#### 符 号 说 明

$p$ 为压力,MPa; $p_{wf}$ 为井底流压,MPa; $p_R$ 为地层静压,MPa; $q$ 为产气量,10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d; $K$ 为渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $\mu$ 为黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; $v$ 为流速,m/s; $\beta$ 为紊流系数,1/m; $\rho$ 为密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\gamma$ 为脉动系数, $\text{m} \cdot \text{s}/\text{kg}$ ; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 和 $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 分别为三项式产能方程系数,常数。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 葛家理.油气层渗流力学[M].北京:石油工业出版社,1982.
- [3] 陈元千.油藏工程计算方法[M].北京:石油工业出版社,1989.
- [4] 林平一.油藏工程[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [5] 罗银富,王怒涛,黄炳光.一种确定油井二项式产能方程的简单方法[J].新疆石油地质,2005,26(2):194-195.
- [6] 刘能强.实用现代试井解释方法[M].2版.北京:石油工业出版社,1992:175-179.

(修改回稿日期 2008-11-06 编辑 韩晓渝)