

DOI: 10.3969/J. ISSN. 1000-3754. 2010. 02. 016

# 确定低渗致密气藏气井无阻流量的方法

洪舒娜<sup>1</sup> 王 勤<sup>2</sup> 李 闽<sup>1</sup> 郑玲丽<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;  
2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川 成都 610051)

**摘要:** 用稳定回压法或一点法求取低渗致密气藏的无阻流量时, 不仅很难测得稳定的数据点, 而且计算所采用的储层渗透率也偏大。为了解决上述问题, 提出了针对低渗致密气藏的无阻流量确定方法——压裂稳态法。该法是基于稳定状态下的一种方法, 考虑了低渗致密气藏的应力敏感特性, 计算所需的参数都是在稳定状态下获得的, 且地层渗透率采用的是储层裂缝闭合后的稳定地层渗透率。通过应用压裂稳态产能公式, 采用迭代法就能计算出气井的无阻流量。压裂稳态法很好地解决了多点稳定试井耗时长, 以及一点法计算结果偏高的问题。给出了实例计算, 并与一点法计算的结果进行了对比分析。结果表明, 压裂稳态法结果更准确。

**关键词:** 低渗透; 气藏; 无阻流量; 压裂稳态法; 一点法

中图分类号: TE321

文献标识码: B

文章编号: 1000-3754 (2010) 02-0079-03

## A METHOD TO DETERMINE THE AOF POTENTIAL OF GAS WELLS IN LOW PERMEABILITY TIGHT GAS RESERVOIRS

HONG Shu-na<sup>1</sup>, WANG Qin<sup>2</sup>, LI Min<sup>1</sup>, ZHENG Ling-li<sup>1</sup>

(1. State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China)

**Abstract:** When applying the stable back pressure method or one-point method to determine the AOF potential of gas wells in low permeability tight gas reservoirs, it will be difficult to obtain the stable test points and the calculated reservoir permeability is also lower. In order to solve these problems, a new method to determine the AOF potential, fracturing stable state method, is proposed in this paper in view of low permeability tight gas reservoirs. This technique is based on the steady state and the stress sensitivity of low permeability tight gas reservoirs is taken into account. All parameters used for calculation are obtained under the stable state and the value of formation permeability adapted is the stable formation permeability after the closing of reservoirs fractures. The AOF potential of gas wells can be calculated through iteration based on the stable state flow potential equation of fracturing. The stable fracturing method is not as time-consuming as multipoint open flow potential test, and the calculation results are not as higher as those of the one point method. Example calculation is established and the calculated result is compared with that of one point method. The result suggests that the results from the fracturing stable state method is more accurate.

收稿日期: 2009-01-14

作者简介: 洪舒娜, 女, 1985 年生, 在读硕士, 从事油气藏开发研究。

E-mail: hsn8537@126.com

**Key words:** low permeability; gas reservoir; AOF potential; fracturing stable state method; one point method

气井无阻流量是反映气井潜在产能、评估气井,以及气井配产的一个重要参数。目前,多采用多点稳定回压法<sup>[1]</sup>或一点法<sup>[2]</sup>获取无阻流量。但多点稳定回压法测试周期长,受地质条件及设备仪器等多因素的影响,很难得到准确的数据点。陈元千<sup>[2]</sup>提出的一点法虽然工艺简单、应用广泛,但测试时要求储层必须达到拟稳定流动。对于高渗透气层,比较容易达到,但对于低渗致密气藏,压力要在数月甚至数年才会达到稳定。因此,一点法测得的静压偏低,井底流压偏高,计算的无阻流量也偏大。为了计算比较符合实际生产的无阻流量,文章介绍了另一种确定无阻流量的方法——压裂稳态法。

## 1 方法介绍

### 1.1 一点法

一点法试井是通过关井测取稳定地层压力,开井测得一个工作制度的井底拟稳定压力和相应产气量,再根据经验公式求得无阻流量的。陈元千<sup>[2]</sup>推导出的一点法无阻流量计算公式为

$$Q_{\text{AOF}} = \frac{2(1-\alpha)Q_g}{\alpha \sqrt{1+4[(1+\alpha)/\alpha^2]p_D-1}} \quad (1)$$

统计分析出  $\alpha$  的平均值为 0.254 1。

$$Q_{\text{AOF}} = \frac{6Q_g}{\sqrt{1+48p_D}-1} \quad (2)$$

### 1.2 压裂稳态法

低渗致密气藏储层渗透率低,所有气井必须通过压裂才能获得产能。根据微元体流动分析,应用物质守恒原理和压力耦合原理,考虑气体非达西流动,得到气井压裂后稳态产能(有限导流能力)公式<sup>[3,4]</sup>

$$Q_g = 86.4 \times 10^{-6} \frac{K_f W_f h \lambda}{\mu_g} \frac{T_a}{Z p_a T_r} \times (p_r^2 - p_{wf}^2) \frac{(e^{\pi\lambda} - 1)}{(e^{\pi\lambda} + 1)} \quad (3)$$

其中

$$\lambda = \sqrt{2000K_f \left( \delta K_f W_f \ln \frac{2R_e}{L_f} \right)^{-1}} \quad (4)$$

$\delta$  为非达西渗流修正系数,表达式为

$$\delta = \left( 1 + \frac{\beta \gamma K_f Q_g}{2\mu_g W_f h} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\beta = b/K_f' \quad (6)$$

要获得无阻流量,需应用上述压裂稳态产能公式,采用迭代法进行计算。具体计算步骤如下:

根据实际情况假设一个气产量  $Q_g$ , 代入式(5)、(6)计算出非达西渗流系数  $\delta$ , 并将其代入式(4), 得到  $\lambda$ 。再将上述计算结果代入到式(3)求解一新的  $Q_g$ 。然后比较前后两个  $Q_g$  值。若相差较大, 需要将新计算出的  $Q_g$  再次代入式(5), 重复上述计算步骤, 直至相邻两次求解的  $Q_g$  相差较小或在一定误差范围内为止。井底流压为零时的产气量, 即得到无阻流量。

## 2 方法剖析

低渗致密气藏压力恢复慢,井底流动状态很难达到一点法要求的拟稳定状态。根据公式(7)可计算出不稳定流动时间,与一点法的求产时间相比较,能定量说明在进行一点法测试时,井底流动还没有达到拟稳定。不稳定渗流时间计算公式为

$$t_s = 27.78 \frac{\phi \mu_g C_f A}{K_r} \quad (7)$$

由于低渗致密气藏存在应力敏感性,储层的物性在生产过程中会发生变化。根据李闽等人<sup>[5-10]</sup>关于储层岩石有效应力定律的研究结果发现,随着流体的不断采出,储层孔隙流体压力不断下降,有效应力增大,储层中的微裂缝将从最初的张开状态逐渐闭合,相应的储层渗透率大幅度地降低。当裂缝完全闭合后,储层压力继续下降,岩石骨架颗粒受到压缩,储层渗透率的变化相对裂缝闭合阶段很小,这一阶段可以不考虑渗透率变化对产能的影响。他们的实验结果还指出,裂缝完全闭合后,储层渗透率会降低到原始地层渗透率的 17%~20%。由于裂缝闭合后储层的渗透率基本上不发生变化,这时储层条件下得到的产能才是稳定的。因此,用这一产能进行配产更为合理。

## 3 实例分析

对某低渗致密气藏 3 口压裂气井,分别用一点法和压裂稳态法计算无阻流量。用公式(7)计算出井的不稳定流动时间,并与一点法求产时间相比较,列于表 1。一点法的求产时间远远小于达到稳定流动的时间,说明此时的井底流动并未达到拟稳

定，不满足一点法拟稳定流动的要求。

表1 不稳定渗流时间与一点法求产时间对比

Table 1 Comparison between the unstable filtering flow time and the time obtained from one point method

| 井号  | 不稳定渗流时间<br>/h | 一点法求产时间<br>/h |
|-----|---------------|---------------|
| DK2 | 3 259.7       | 121.47        |
| DK3 | 16 014.1      | 110           |
| DK4 | 8 904.6       | 143           |

然后，分别用一点法公式（1）和压裂稳态法公式（3）~（6）计算出了这3口井的无阻流量，结果列于表2。表中显示，两种方法的结果差异较大。一点法比压裂稳态法的结果高出很多，平均百分比达到了62.63%。

表2 气井压裂稳态法和一点法计算的无阻流量

Table 2 The AOF potential calculated through fracturing stable state method and one point method for gas wells

| 井号                                           | DK2   | DK3   | DK4   |
|----------------------------------------------|-------|-------|-------|
| 压裂稳态法/ $(10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ | 18.18 | 5.91  | 11.59 |
| 一点法/ $(10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1})$   | 31.91 | 7.52  | 22.15 |
| 压裂稳态法与一点法之比/%                                | 56.97 | 78.59 | 52.33 |

根据现场经验配产法，取1/3的无阻流量进行配产，如表3所示。整体上，按压裂稳态法计算的无阻流量的1/3配产与井的实际平均产气量更接近，更符合实际气井的生产情况。从另一方面证实了压裂稳态法确定的无阻流量的合理性。

表3 经验法配产结果

Table 3 The allocation results of the empirical method

| 井名  | $(1/3) Q_{\text{AOF}}$ 配产                        |                                                | 实际平均<br>产气量<br>/ $(10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ |
|-----|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|     | 压裂稳态法<br>/ $(10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ | 一点法<br>/ $(10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ |                                                        |
| DK2 | 6.06                                             | 10.64                                          | 3.5                                                    |
| DK3 | 1.97                                             | 2.51                                           | 1.67                                                   |
| DK4 | 3.86                                             | 7.38                                           | 2.69                                                   |

4 结 论

（1）低渗致密气藏存在应力敏感性。最初储层渗透率会随着储层压力的下降而下降。但当储层中的裂缝完全闭合后，储层压力的继续下降对储层渗透率的影响很小。

（2）采用一点法对低渗致密气藏求取的无阻流量时，没有考虑储层渗透率的变化，且测试点也

不在拟稳定状态下。因此，计算得的无阻流量偏大。

（3）压裂稳态法是基于稳定流态的计算无阻流量的方法。所采用的地层渗透率是在储层裂缝完全闭合后的稳定渗透率，因此应用压裂稳态产能公式迭代计算出气井的无阻流量计算结果比一点法要小。

符号注释：

$Q_{\text{AOF}}$ ——无阻流量， $10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ； $Q_{\text{g}}$ ——产气量， $10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ； $\alpha$ ——反映储层和气体特征以及气体渗流规律的综合特征参数， $\alpha = A / (A + BQ_{\text{AOF}})$ ； $p_{\text{D}}$ ——无因次压力； $p_{\text{r}}$ ——储层压力，MPa； $p_{\text{wf}}$ ——井底流压，MPa； $\delta$ ——非达西渗流系数； $p_{\text{a}}$ ——标准状况下的压力，MPa； $\mu_{\text{g}}$ ——气体黏度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ； $K_{\text{r}}$ ——储层渗透率， $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ； $K_{\text{f}}$ ——裂缝渗透率， $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ； $L_{\text{f}}$ ——裂缝半长，m； $W_{\text{f}}$ ——裂缝缝宽，m； $Z$ ——气体偏差系数； $h$ ——地层厚度，m； $T_{\text{r}}$ ——气藏温度，K； $T_{\text{a}}$ ——标准状况下的温度，K； $t_{\text{s}}$ ——不稳定渗流时间，h； $\varphi$ ——地层孔隙度，小数； $C_{\text{f}}$ ——地层综合压缩系数， $\text{MPa}^{-1}$ ； $A$ ——单井控制面积， $\text{m}^2$ 。

参考文献：

[1] 李仕伦. 天然气工程 [M]. 北京：石油工业出版社，2000：117-134.

[2] 陈元千. 确定气井绝对无阻流量的简单方法 [J]. 天然气工业，1987，7（1）：59-63.

[3] 陈元千. 油气藏工程计算方法 [M]. 北京：石油工业出版社，1990：21-27.

[4] 蒋廷学. 垂直裂缝井稳态产能的计算 [J]. 石油勘探与开发，2001，28（2）：61-63.

[5] 汪永利. 气井压裂后稳态产能的计算 [J]. 石油学报，2003，24（4）：65-68.

[6] 李闯，肖文联. 低渗砂岩储层渗透率有效应力定律试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2008，27（2）：3535-3540.

[7] 宋传真，郑荣臣. 致密低渗气藏储层应力敏感性及其对单井产能的影响 [J]. 大庆石油地质与开发，2006，25（6）：47-49.

[8] 任玉林，王营彬，夏海容. 用不稳定流动压力和流量解释致密低渗气藏的地层参数 [J]. 大庆石油地质与开发，2004，23（6）：36-38.

[9] 王红，王玉英. 异常高压、特低渗油藏储层压力敏感性研究 [J]. 大庆石油地质与开发，2003，22（5）：28-31.

[10] 冯其红，陈朝辉，李春芹. 特低渗透压敏油藏产量递减规律数值模拟 [J]. 大庆石油地质与开发，2008，27（4）：45-49.