

# 修正的低渗透气藏产能方程

杨凯<sup>1</sup> 郭肖<sup>1</sup> 肖喜庆<sup>1</sup> 陈智<sup>2</sup>

1.西南石油大学 2.中国石油西南油气田公司采气工程研究院

杨凯等.修正的低渗透气藏产能方程.天然气工业,2009,29(4):68-70.

**摘要** 在低渗透气藏开发过程中,由于启动压力梯度、应力敏感的存在,使得气体的渗流不符合经典的达西定律。在考虑启动压力梯度、应力敏感和滑脱效应的综合影响基础上,对气体的流速方程进行了修正,并结合渗流力学基本原理得到修正的低渗透气井产能方程。应用修正产能公式对某气田的实际数据进行了计算,得到如下结论:应力敏感的存在将使气井的产能大幅度下降,最大可下降 14%;启动压力梯度的存在将使气井的产能下降,不过下降幅度较小;由于气体黏度远小于油,故低渗透气井中应力敏感对产能的影响比启动压力梯度的影响要大;黏度越大启动压力梯度对产能的影响越大。建议低渗透气藏开发中必须充分考虑应力敏感的影响。

**关键词** 低渗透油气藏 启动压力 应力 生产能力 方程

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.03.020

## 0 引言

国内外实验研究已经证明在低渗透气藏中普遍存在启动压力梯度和应力敏感的影响,加之气体渗透中本身存在的滑脱效应,使得低渗透气藏中气体的流动规律变的相当复杂。戴强等提出应力敏感、启动压力梯度、滑脱效应最终均引起低渗透气藏渗流的非线性化<sup>[1]</sup>;刘高波等人探讨了启动压力梯度和滑脱效应对低渗透气藏渗流的影响,建立了渗流模型,得到低渗透气藏渗流综合非达西效应随井底流压的变化而变化的结论<sup>[2]</sup>;王彬等人结合分子扩散理论得到了考虑滑脱效应的气体渗流速度方程,为进一步开展低渗透气藏渗流理论研究建立了基础<sup>[3]</sup>。笔者综合前人的认识,并从渗流力学的基础出发,结合实验研究成果对低渗透气藏产能方程进行了修正。

## 1 产能方程的推导

### 1.1 渗流数学模型及其解

假定为一水平均质各向同性圆形等厚地层,其中心有 1 口完善井以定产量生产,供给边界半径为  $r_e$ ,边界压力为  $p_e$ ,气井半径为  $r_w$ ,井底压力为  $p_{wf}$ ,气层厚度为  $h$ 。以拟压力形式表示的气体稳定渗流的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \Psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Psi}{dr} = 0 \\ \Psi|_{r=r_w} = \Psi_{wf} \\ \Psi|_{r=r_e} = \Psi_e \end{cases} \quad (1)$$

上述稳定渗流数学模型的解为:

$$\Psi = \Psi_e - \frac{\Psi_e - \Psi_{wf}}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \ln \frac{r_e}{r} \quad (2)$$

或

$$\Psi = \Psi_{wf} + \frac{\Psi_e - \Psi_{wf}}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \ln \frac{r}{r_w} \quad (3)$$

利用拟压力与压力平方之间的关系可以获得以压力平方形式表示的稳定渗流时压力分布表达式:

$$p^2 = p_e^2 - \frac{p_e^2 - p_{wf}^2}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \ln \frac{r_e}{r} \quad (4)$$

或

$$p^2 = p_{wf}^2 + \frac{p_e^2 - p_{wf}^2}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \ln \frac{r}{r_w} \quad (5)$$

### 1.2 渗流速度的修正

由上面压力分布表达式可以推导出气层中任意一点的压力梯度为:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{p_e^2 - p_{wf}^2}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \frac{1}{2pr} \quad (6)$$

同时考虑启动压力梯度、应力敏感、滑脱效应的

影响,将  $\lambda = \frac{b\mu_k}{K_g} = b \left( \frac{K_g}{\mu_k} \right)^{-1[4]}$ 、 $K'_g = K_g e^{-\alpha(p_i - p)[5]}$   
和  $K_{gt} = K'_g \left( 1 + \frac{a}{p} \right)^{[6]}$  代入到考虑启动压力梯度的低渗透流体渗流速度方程中,得到的渗流速度为:

$$v = -\frac{K_{gt}}{\mu_k} \left( \frac{dp}{dr} - \lambda \right) = -\frac{K_g e^{-\alpha(p_i - p)} \left( 1 + \frac{a}{p} \right)}{\mu_k} \times \left[ \frac{p_e^2 - p_{wf}^2}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \frac{1}{2pr} - b \left( \frac{K_g}{\mu_k} \right)^{-1} \right] \quad (7)$$

其中:  $\bar{p} = (p_e - p_w) / 2$

### 1.3 产能方程

将流速用产量和面积来表示,并结合状态方程后进行移项就可以得到下面不同形式的平面径向流气井产能公式。

#### 1.3.1 压力平方形式

压力平方公式为:

$$Q_{sc} = 0.0864 \left( \pi h \frac{T_{sc}}{p_{sc} T} \frac{K_g e^{-\alpha(p_i - p)} \left( 1 + \frac{a}{p} \right)}{Z \mu_k} \times \left[ \frac{p_e^2 - p_{wf}^2}{\ln \frac{r_e}{r_w}} - 2\pi r \bar{h} \frac{\bar{p} T_{sc}}{p_{sc} T} \frac{e^{-\alpha(p_i - p)} \left( 1 + \frac{a}{p} \right)}{Z} b \right] \right) \quad (8)$$

其中:  $\bar{r} = (r_e - r_w) / 2$

式(8)就是考虑了启动压力梯度、应力敏感和滑脱效应的低渗透气藏直井的压力平方形式的产能方程。

#### 1.3.2 拟压力形式

根据拟压力和压力平方的关系将压力平方形式的产能方程转换为以下的拟压力形式的产能方程:

$$Q_{sc} = 0.0864 \left( \pi h T_{sc} \frac{K_g e^{-\alpha(p_i - p)} \left( 1 + \frac{a}{p} \right)}{p_{sc} T} \times \left[ \frac{\Psi_e - \Psi_{wf}}{\ln \frac{r_e}{r_w}} - 2\pi r \bar{h} \frac{\bar{p} T_{sc}}{p_{sc} T} \frac{e^{-\alpha(p_i - p)} \left( 1 + \frac{a}{p} \right)}{Z} b \right] \right) \quad (9)$$

#### 1.3.3 标准拟压力形式

引入标准化拟压力的概念:

$$m = \frac{\mu_k Z_{sc}}{p_{sc}} \Psi \quad (10)$$

则标准拟压力形式的产能方程可以变换为:

$$Q_{sc} = 0.0864 \left( \pi h T_{sc} \frac{K_g e^{-\alpha(p_i - p)} \left( 1 + \frac{a}{p} \right)}{T} \frac{m_e^2 - m_{wf}^2}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \right)$$

$$\frac{p_{sc}}{(\mu_k Z_{sc})^2} - 2\pi r \bar{h} \frac{\bar{p} T_{sc}}{p_{sc} T} \frac{e^{-\alpha(p_i - p)} \left( 1 + \frac{a}{p} \right) b}{Z} \quad (11)$$

式(11)便是标准拟压力形式的产能方程。

## 2 实例分析

以某气田为例,  $a = 0.1768 K_g^{-0.9583}$ ,  $r_e = 400$  m,  $p_e = 40$  MPa,  $r_w = 0.12$  m,  $h = 10$  m,  $K_g = 5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,  $\mu_k = 0.015$  mPa·s, 应力敏感系数分别取 0.03、0.06、0.09、0.12、0.15 MPa<sup>-1</sup>, 启动压力梯度分别取 0.0005、0.001、0.0015、0.002、0.0025 MPa/m。通过计算得到以下的结果:

1)在考虑应力敏感和启动压力梯度时,气井的产量均不同程度的减小,但是从图1、图2可以看出,应力敏感对气井产能的影响要强于启动压力梯度,这进一步说明启动压力梯度对低渗透油气藏的影响不仅与渗透率有关,还与流体的黏度有很大的关系。

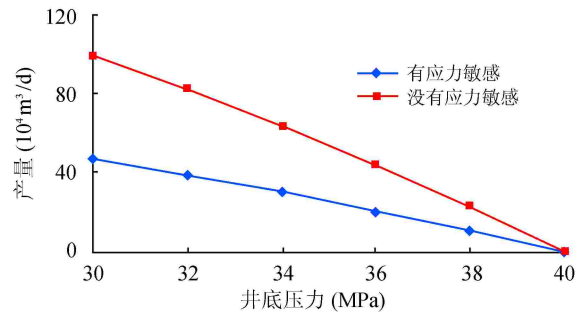


图1 应力敏感对产能影响的对比图

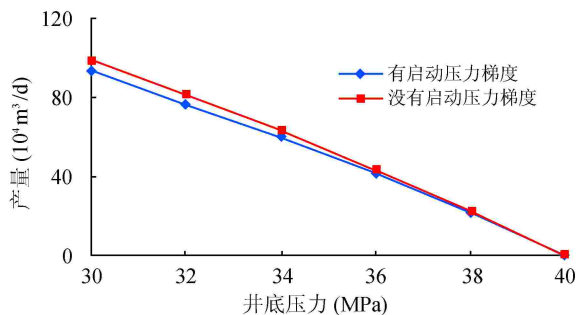


图2 启动压力梯度对产能影响的对比图

2)通过对不同应力敏感系数的敏感性分析(见图3)可以发现,随着应力敏感系数的增加气井的产量将不断下降。应力敏感系数每增加0.03,在相同井底压力下气井的产量下降13.93%;随着井底压力的减小,对于指定的一个应力敏感系数值,产量下降的幅度不变。但是在相同应力敏感系数下,产量下降的百分比随着井底压力的降低而逐渐变大,井底

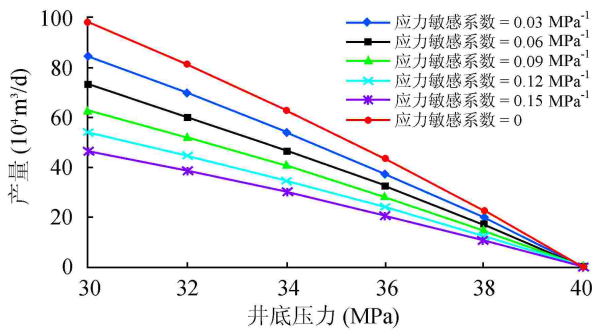


图 3 不同应力敏感条件下产量随井底压力的变化图

压力最小时下降为 10.996%，而井底压力最大时下降为 11.502%。

3) 同样对启动压力梯度做敏感性分析(见图 4)可以看出:不同启动压力梯度下,产量下降的幅度比较小;在同一井底流压下,随着启动压力梯度的增加产量下降的幅度逐渐增加,平均增加 1.05%;不同井底流压下增加的幅度也不一样,随着井底流压的减小,产量下降的幅度也逐渐增加,平均为 1.05%。

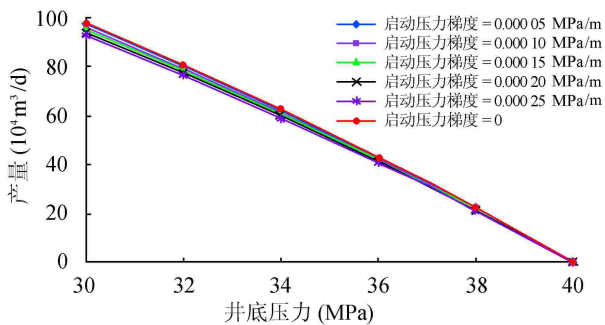


图 4 不同启动压力梯度下产量随井底压力的变化图

### 3 结论

1) 在气体稳定渗流的基础上,考虑启动压力梯度、应力敏感以及滑脱效应的影响对低渗透气井的产能方程进行了修正,得到了比较全面的低渗透气藏产能方程。

2) 理论结合实例证明应力敏感的存在将使气井的产能大幅度下降,最大可下降 14%。同时说明启动压力梯度的存在也将使气井的产能下降,不过下降幅度较小。

3) 低渗透气井中应力敏感作用对产能的影响比启动压力梯度的影响要大,这主要是由于气体黏度远比油小的原因。一般,黏度越大启动压力梯度对产能的影响就越大<sup>[7-10]</sup>。

4) 建议在低渗透气藏开发中必须充分考虑应力敏感的影响。

### 符号说明

$\Psi$  为气藏  $r$  处拟压力,  $\text{MPa}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $\Psi_{\text{wf}}$  为气藏井底拟压力,  $\text{MPa}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $\Psi_{\text{e}}$  为气藏供给边界处拟压力,  $\text{MPa}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $r_{\text{w}}$  为气藏井底半径,  $\text{m}$ ;  $r_{\text{e}}$  为气藏供给边界,  $\text{m}$ ;  $p$  为气藏  $r$  处压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_{\text{wf}}$  为气藏井底压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_{\text{e}}$  为气藏供给边界处压力,  $\text{MPa}$ ;  $v$  为气体流动的速度,  $\text{m/s}$ ;  $\mu_{\text{g}}$  为气体的黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\lambda$  为启动压力梯度,  $\text{MPa/m}$ ;  $a$  为滑脱因子,  $\text{MPa}$ ;  $b$  为启动压力梯度实验拟合数据,  $\mu\text{m/s}$ ;  $\alpha$  为应力敏感系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $K_{\text{gt}}$  为气体的实际渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{\text{g}}$  为气体的渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $p_{\text{i}}$  为上覆岩层压力,  $\text{MPa}$ ;  $h$  为气藏储层的厚度,  $\text{m}$ ;  $T_{\text{sc}}$  为标准状况下的温度,  $\text{K}$ ;  $T$  为油藏的温度,  $\text{K}$ ;  $\mu_{\text{sc}}$  为标准状况下气体黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $Z_{\text{sc}}$  为标准状况下气体的偏差因子, 无因次;  $Z$  为油藏条件下气体的偏差因子, 无因次;  $p_{\text{sc}}$  为标准状况下的压力,  $\text{MPa}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] 戴强,段永刚,陈伟,等.低渗透气藏渗流研究现状[J].特种油气藏,2007,14(1):11-14.
- [2] 刘高波,刘荣和,冯文光,等.低渗透气藏非达西渗流研究[J].大庆石油地质与开发,2007,26(1):65-67.
- [3] 王彬,梅海燕,张茂林,等.低渗透气藏气体渗流速度修正公式[J].西南石油学院学报,2004,26(1):32-34.
- [4] 孙黎娟,吴凡.油藏启动压力的规律研究及应用[J].断块油气藏,1998,5(5):30-33.
- [5] FARQUHAR R A, SMAR B G D, TODD A C, et al. Stress sensitivity of low-permeability sandstones from the Rotliegendes sandstone[C].SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 3-6 October 1993, Houston, Texas. SPE 26501.
- [6] KIKANI J, PETROSA JR. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoir [J]. Soc Pet Eng Form Eval, 1991, 6(3):379-386.
- [7] 冯曦,钟兵,刘晓旭,等.气体非线性渗流效应诊断分析技术[J].天然气工业,2008,28(4):127-129.
- [8] 李中锋,何顺利.低渗透储层非达西渗流机理探讨[J].特种油气藏,2005,12(2):35-38.
- [9] 胡其华,周昌斌.低渗透非达西渗流边界模型解存在唯一性[J].西南石油大学学报,2007,29(5):172-176.
- [10] 刘晓旭,钟兵,胡勇,等.低渗透气藏气体渗流机理实验[J].天然气工业,2008,28(4):130-132.

(修改回稿日期 2009-01-23 编辑 韩晓渝)