

# 应力敏感影响下低渗透气藏水平井产能分析

蒋艳芳<sup>1</sup> 张烈辉<sup>1</sup> 刘启国<sup>1</sup> 王心敏<sup>2</sup>

1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 2.中国石油长庆油田公司第一采气厂

蒋艳芳等.应力敏感影响下低渗透气藏水平井产能分析.天然气工业,2011,31(10):54-56.

**摘 要** 低渗透气藏不但存在启动压力梯度,而且还存在应力敏感。通过大量调研发现,在对低渗透气藏水平井产能研究中,更多的是考虑启动压力梯度的影响,而没有考虑应力敏感。为此,在前人研究的基础上,根据低渗透气藏水平井渗流特征,将其分为远井区和近井区,按照稳定渗流理论,推导出了同时考虑启动压力梯度和应力敏感影响的低渗透气藏水平井稳定渗流产能公式。在此基础上,进一步讨论了启动压力梯度和应力敏感对低渗透气藏水平井产能的影响。研究表明:启动压力梯度、应力敏感对低渗透气藏水平井产能的影响不可忽略;随着启动压力梯度和应力敏感系数的增大,低渗透气藏水平井产能降低,无阻流量减小。

**关键词** 启动压力梯度 应力敏感 低渗透气藏 水平井 生产能力 线性流 平面径向流 球形径向流

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.10.012

低渗透气藏往往具有较高的束缚水饱和度,不但存在渗透率应力敏感,而且气体的流动也存在启动压力梯度<sup>[1]</sup>。许多学者在研究低渗透气藏水平井产能公式只考虑了启动压力梯度的影响<sup>[2-4]</sup>,没有同时考虑应力敏感的影响;郭肖<sup>[5]</sup>虽然提出了同时考虑应力敏感和启动压力梯度的低渗透气藏水平井产能模型,但只是在考虑启动压力梯度后得到的水平井产能公式中直接引入渗透率的变化。陈明强<sup>[6]</sup>分析了低渗透油藏水平井远井区域和近井区域渗流场的多种基本渗流形态,基于稳定渗流理论,给出了考虑启动压力梯度的变形介质在低渗透油藏中 3 种流态并存的水平井产能计算公式。笔者在陈明强的研究基础上,通过分析低渗透气藏水平井远井区和近井区渗流特征,建立了考虑启动压力梯度和应力敏感影响的低渗透气藏水平井稳定渗流模型。

## 1 水平井产能公式的推导

假设一口水平井位于圆形气藏的中心,供给半径为  $r_w$ ,气层厚度为  $h$ ,水平井段长度为  $L$ ,井筒半径为

$r_w$ ,气藏均质各向同性。地层流体从地层向井筒的渗流过程分为两个区域<sup>[6]</sup>:1)远井区域(图 1-a),在该区域内流体从圆形气藏的外边界流到以井筒为圆心, $h/2$ 为半径的近井区域的外表面,在该区域内流体的流动分为两个部分,即平面线性流(编号为①)和平面径向流(编号为②);2)流体在近井区域的流动,该区域流体的流动也由两个部分组成,编号为③的平面径向流和水平井井筒两端编号为④的球形径向流(图 1-b)。

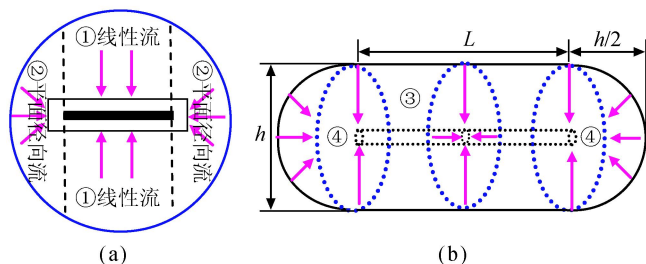


图 1 水平井渗流形态图

从水平井渗流简化模型可知,需要两个衔接条件:1)在近井区和远井区的接触面上压力相等,即  $p_{r近} = p_{r远}$ ;2)近井区和远井区过流量相等。

**基金项目:**教育部博士点基金项目“三维大变化尺度缝洞型碳酸盐岩油藏复杂油水两相流动规律研究”(编号:20105121110006);国家重点基础研究发展计划(973计划)“碳酸盐岩缝洞型油藏注水开发研究”(编号:2011CB201005)。

**作者简介:**蒋艳芳,女,1985年生,硕士研究生;现从事油气藏渗流、油气藏工程及数值模拟等领域的科研工作。地址:(610500)四川省成都市新都区新都大道8号。电话:(028)83032338。E-mail:jyfdyh@126.com

### 1.1 应力敏感分析

在低渗透地层中,由于低渗多孔介质的孔喉细小,导致介质的渗流能力对压力具有明显的敏感性<sup>[7-8]</sup>。即随着地层流体的采出,压力发生变化,渗透率也跟着变化。故考虑渗透率随拟压力变化的指数式为:

$$K = K_i e^{\alpha(\psi - \psi_i)} \quad (1)$$

### 1.2 远井区水平井产能公式

远井区的流动由两部分组成,即编号为①的平面线形流和编号为②的平面径向流。设平面线性流的产量为  $Q_{sc1}$ ,考虑启动压力梯度的单向流动方程可写为:

$$\frac{Q_{sc1} p_{sc} Z T}{2 L h p T_{sc}} = \frac{K}{\mu} \left( \frac{d\psi}{dx} - \lambda_m \right) \quad (2)$$

由于是气藏,引入拟压力( $\psi$ )、拟启动压力梯度( $\lambda_m$ ),得到同时考虑应力敏感和启动压力梯度的运动方程为:

$$K_h e^{\alpha(\psi - \psi_i)} \left( \frac{d\psi}{dx} - \lambda_m \right) = \frac{Q_{sc1} p_{sc} T}{L h T_{sc}} \quad (3)$$

对式(3)在 $\left(\frac{h}{2}, r_e\right)$ 上积分,变形后得到平面线性流产量公式为:

$$Q_{sc1} = \frac{8.64 \times 10^{-6} \lambda_m L h K_h T_{sc} \left[ e^{\alpha(\psi_i - \psi)} - e^{-\alpha_m \left( r_e - \frac{h}{2} \right)} \right]}{p_{sc} T \left[ e^{-\alpha_m \left( r_e - \frac{h}{2} \right)} - 1 \right]} \quad (4)$$

对于编号为②的泄油区域,流体的流动形态是在 $\frac{h}{2}$ 为内边界, $\sqrt{r_e \left( r_e - \frac{2L}{\pi} \right)}$ 为外边界的区域内的平面径向流。采用类似的处理方法,故编号为②的泄油区域考虑启动压力梯度和应力敏感的流动方程为:

$$e^{\alpha(\psi - \psi_i)} \left( \frac{d\psi}{dr} - \lambda_m \right) = \frac{Q_{sc2} p_{sc} T}{K_h \pi r h T_{sc}} \quad (5)$$

采用分离变量和变量替换法,解式(5)得到:

$$Q_{sc2} = - \frac{2.713 \times 10^{-5} K_h h T_{sc} \left[ e^{\alpha(\psi_i - \psi)} - e^{-\alpha_m \left[ \sqrt{r_e \left( r_e - \frac{2L}{\pi} \right)} - \frac{h}{2} \right]} \right]}{q p_{sc} T e^{\alpha_m \frac{h}{2}} \left\{ \ln \frac{\sqrt{r_e \left( r_e - \frac{2L}{\pi} \right)}}{h/2} - \lambda_m \alpha \left[ \sqrt{r_e \left( r_e - \frac{2L}{\pi} \right)} - \frac{h}{2} \right] \right\}} \quad (6)$$

### 1.3 近井区水平井产能公式

编号③泄油区域的流动是以井筒为圆心、 $h/2$ 为半径的平面径向流,用远井区编号为②的泄油区域类似的方法,求解得到编号为③的区域的产量公式为:

$$Q_{sc3} = - \frac{2.713 \times 10^{-5} K_e L T_{sc} \left[ e^{\alpha(\psi_w - \psi_i)} - e^{-\alpha_m \left( \frac{h}{2} - r_w \right)} \right]}{q p_{sc} T e^{\alpha_m r_w} \left[ \ln \left( \frac{h}{2 r_w} \right) - \lambda_m \alpha \left( \frac{h}{2} - r_w \right) \right]} \quad (7)$$

在水平井的两端是以井筒为圆心, $h/2$ 为半径的球形径向流,因此对编号为④的泄油区域有:

$$e^{\alpha(\psi - \psi_i)} \left( \frac{d\psi}{dr} - \lambda_m \right) = \frac{Q_{sc4} p_{sc} T}{2 \pi K_e T_{sc} r^2} \quad (8)$$

求解(8)式可得相应的产量公式为:

$$Q_{sc4} = 5.43 \times 10^{-5} K_e T_{sc} \left[ e^{\alpha(\psi_w - \psi_i)} - e^{-\alpha_m \left( \frac{h}{2} - r_w \right)} \right] / \left\{ q p_{sc} T \left[ -\frac{1}{r_w} + \frac{e^{-\alpha_m \left( \frac{h}{2} - r_w \right)}}{h/2} \right] + \alpha \lambda_m e^{\alpha_m r_w} \left[ \ln \left( \frac{h}{2 r_w} \right) - \alpha^2 \lambda_m^2 e^{\alpha_m r_w} \left( \frac{h}{2} - r_w \right) \right] \right\} \quad (9)$$

### 1.4 水平井产能的求解方法<sup>[6]</sup>

由简化的渗流模型可知,水平井的产量为:

$$Q_{sc} = Q_{sc1} + Q_{sc2} = Q_{sc3} + Q_{sc4} \quad (10)$$

将式(4)、(6)、(7)、(9)代入式(10),得到一个关于 $\psi$ 的方程,令 $t = \psi$ ,要想求解 $\psi$ 就是求解下方方程的实根。即

$$F(t) = Q_{sc1}(t) + Q_{sc2}(t) - Q_{sc3}(t) - Q_{sc4}(t) \quad (11)$$

利用牛顿迭代方法求解式(11):令 $t_{n+1} = t_n - \frac{2 F(t_n) \Delta t}{F(t_n + \Delta t) - F(t_n - \Delta t)}$ ,取初值 $t_0 = (\psi_i + \psi_w)/2$ ,依次计算 $t_1, t_2, \dots, t_n, t_{n+1}$ ,当 $|t_{n+1} - t_n| \leq \epsilon$ 时, $t_{n+1}$ 为待求值 $\psi$ ,然后将 $\psi$ 的值代入式(11)就可以计算水平井产量( $Q_{sc}$ )。

## 2 算例分析

某低渗透气藏的基本参数如下: $p_{sc} = 0.101325$  MPa; $T_{sc} = 293.15$  K; $T = 353$  K; $h = 10$  m; $K_h = K_v = 3.5$  mD; $r_w = 0.06$  m; $\mu = 0.032$  mPa·s; $Z = 1.03$ ;  $L = 531.6$  m; $p_e = 35$  MPa; $p_w = 25$  MPa; $\lambda = 0.002$  MPa/m; $\alpha = 0.5 \times 10^{-4}$  mPa·s/MPa<sup>2</sup>;  $r_e = 1000$  m。

应用式(11)绘制不同启动压力梯度和应力敏感系数下的水平气井产量变化曲线及IPR曲线如图2~5所示。

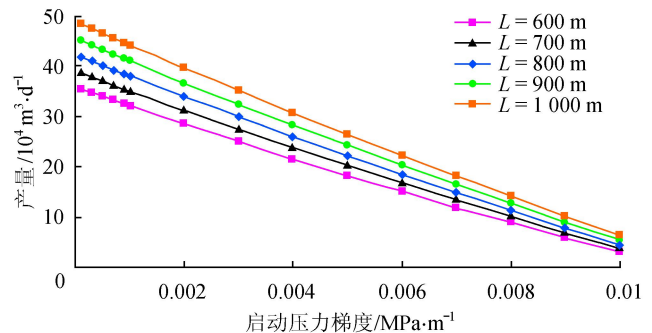


图2 启动压力梯度对低渗透气藏水平井产能的影响图

由图2可知,在相同的水平井长度下,随着启动压力梯度的增加,水平井产量近似呈线性下降。水平井

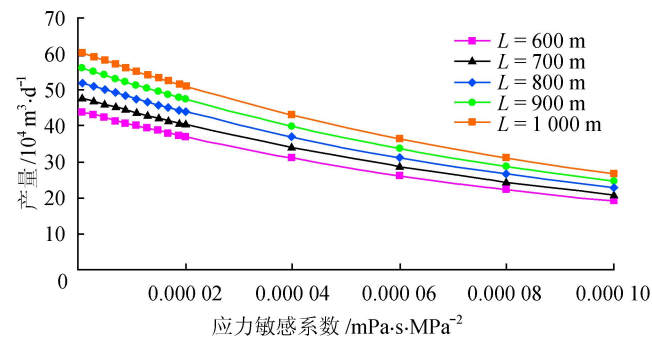


图3 应力敏感对低渗透气藏水平井产能的影响图

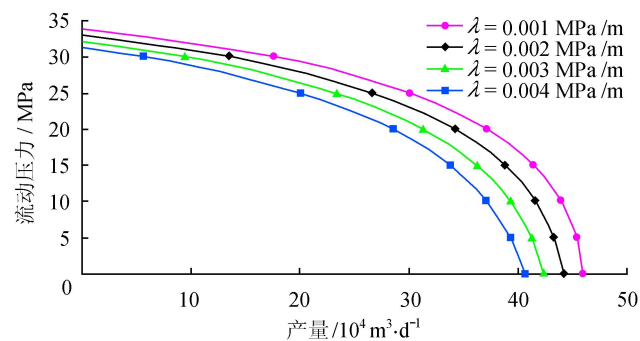


图4 不同启动压力梯度下的 IPR 曲线图

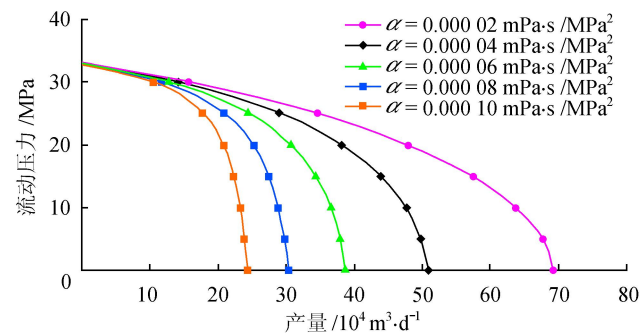


图5 不同应力敏感效应下的 IPR 曲线图

长度不同时,产量不同。当其他因素相同时,水平井越长,泄油面积就越大,水平井产量也越大。以  $L=600$  m 为例,考虑启动压力梯度 ( $\lambda=0.002$  MPa/m) 时的产量比不考虑启动压力梯度 ( $\lambda=0$  MPa/m) 时的产量降低了 19.7%,可见启动压力梯度对水平井产量的影响是不可忽略的。由图 3 看出,在同一水平井长度下,应力敏感系数越大,水平井产量越小。以  $L=600$  m 为例,应力敏感系数为 0.000 02 时的产量比不考虑应力敏感时的产量降低了 15.66%。因此,在低渗透气藏水平井产能分析中,应力敏感的影响也不容忽略。由图 4 可知,在同一井底流压下,启动压力梯度越大,水平井产量越小,井的无阻流量也越小。由图 5 看出,随着井底流压的降低,应力敏感对产能的影响程度增

加。当井底流压相同时,应力敏感系数越大,产能越小,无阻流量越小。

### 3 结论

1) 针对低渗透气藏的特征,推导出了同时考虑启动压力梯度和应力敏感的低渗透气藏水平井稳态产量公式,绘制并分析了产能曲线。

2) 通过算例分析可知,启动压力梯度和应力敏感将对水平气井产能产生影响。启动压力梯度和应力敏感系数越大,水平气井的产量越小,气井的无阻流量也越小。因此,在低渗透气藏水平井产能研究中,启动压力梯度和应力敏感的影响不可忽略。

3) 在其他因素相同的条件下,随着水平井长度的增加,泄油面积增加,水平气井产量将增加。

#### 符号说明

$K$  为储层渗透率, mD;  $K_i$  为储层原始渗透率, mD;  $K_h$  为水平方向渗透率, mD;  $K_e$  为有效渗透率, mD;  $\alpha$  为储层渗透率应力敏感系数, mPa·s/MPa<sup>2</sup>;  $\psi$  为拟压力,  $\psi = 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp$ , MPa<sup>2</sup>/(mPa·s);  $\psi_0$  为原始地层压力对应的拟压力, MPa<sup>2</sup>/(mPa·s);  $\lambda_0$  为拟启动压力梯度,  $\lambda_0 = \frac{2p}{\mu Z} \lambda$ , MPa<sup>2</sup>/(m·mPa·s);  $L$  为水平井长度, m;  $h$  为气层厚度, m;  $T_{sc}$  为标准状态下温度, K;  $r_e$  为供给半径, m;  $p_{sc}$  为标准状态下压力, MPa;  $T$  为气藏温度, K;  $Q_{sc}$  为水平气井产量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d;  $r_w$  为井筒半径, m。

#### 参考文献

- [1] 杨学云, 张学婧, 蒋国斌, 等. 启动压力梯度影响下低渗透气藏水平井产能模型的建立[J]. 特种油气藏, 2010, 17(1): 85-87.
- [2] 张烈辉, 张苏, 熊燕莉, 等. 低渗透气藏水平井产能分析[J]. 天然气工业, 2010, 30(1): 49-51.
- [3] 刘启国, 王瑞, 李邗, 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]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 53-56.
- [4] 高海红, 程林松, 冯儒勇. 考虑启动压力梯度的渗透气藏水平井产能计算[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 75-77.
- [5] 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.
- [6] 陈明强, 张明禄, 蒲春生, 等. 变形介质低渗透油藏水平井产能特征[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 107-110.
- [7] 阮敏, 王连刚. 低渗透油田开发与压敏效应[J]. 石油学报, 2002, 23(5): 73-76.
- [8] 邓江明, 张茂林, 梅海燕, 等. 低渗透气藏压敏性对合理产能影响研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(4): 107-109.