

# 非线性流下井筒压降影响的水平井产能分析

熊健<sup>1</sup>, 黄亮<sup>2</sup>, 崔玲<sup>2</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, 成都 610500
2. 中国石油新疆油田公司百口泉采油厂, 新疆克拉玛依 834000

**摘要** 大量研究表明, 气体渗流受到启动压力梯度、滑脱效应、应力敏感等因素影响, 针对气藏的特征, 基于稳定渗流理论, 在考虑气体高速非达西渗流的基础上, 通过气藏渗流与井筒流动耦合, 推导建立同时考虑滑脱效应、启动压力梯度、应力敏感等因素共同影响的气藏-水平井井筒耦合模型, 并通过实例分析研究了各因素对井筒流量分布的影响。研究表明: 非线性流特征对井筒流量在井筒跟端分布影响较大; 井筒管径越小, 绝对粗糙度越大, 在靠近水平井的趾端部分井筒流量减小幅度越大, 而在靠近水平井的跟端部分井筒流量上升幅度越大; 非均质性越强, 水平井长度越长, 井筒中流量减小幅度越大。

**关键词** 非线性流; 井筒压降; 水平井; 耦合模型; 井筒流量

**中图分类号** TE348

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.35.004

## Effect of Wellbore Pressure Drop on the Horizontal Well Productivity with Non-linear Seepage

XIONG Jian<sup>1</sup>, HUANG Liang<sup>2</sup>, CUI Ling<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. Baikouquan Oil Production Plant, Karamay Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

**Abstract** A lot of research results indicate that the main factors affecting percolation features of gas flow include the start-up pressure gradient, slippage effect, and stress sensitivity. And the researchers have found that the start-up pressure gradient, slippage effect, and stress sensitivity have an effect on the productivity of the gas well in the low-permeability gas reservoirs. On the other hand, the low-permeability is often applied to the horizontal well technology in order to enhance the production of the gas well. In view of the characteristic of low permeability gas reservoirs, based on the steady seepage theory and the high speed non-Darcy, by using the coupling of formation percolation and wellbore flow of the horizontal well, taking the influence of the start-up pressure gradient, slippage effect, and stress sensitivity into account, a coupling model of formation percolation and wellbore flow is established, and the distribution of the shaft flow for the horizontal well is discussed by analyzing and calculating examples. The results indicate that the non-linear seepage characteristics have a big effect on the distribution of the shaft flow at the heel of horizontal well. The smaller the wellbore diameter is, and the larger the absolute roughness is, the bigger the decreasing extent of the shaft flow at the toe of horizontal well is, while the bigger the obvious increasing extent of the shaft flow at the heel of horizontal well is. The stronger the heterogeneity is, and the longer the length of the horizontal well is, the larger the decreasing extent of the shaft flow of horizontal well is.

**Keywords** non-linear seepage; pressure drop; horizontal well; couple model; shaft flow

收稿日期: 2012-09-05; 修回日期: 2012-10-15

基金项目: 西南石油大学研究生创新基金项目(GIFSS0701)

作者简介: 熊健, 博士研究生, 研究方向为油气藏工程, 电子信箱: 361184163@qq.com

0 引言

低渗透气藏储层物性差、开发水平低、开发效果差,而水平井是开发低渗透气藏有效的方法之一<sup>[1]</sup>。另一方面,大量实验结果表明<sup>[2-5]</sup>,在受约束可动水影响下低渗气藏中的气体渗流受到应力敏感、启动压力梯度、滑脱效应等因素影响,造成气体渗流出现非线性流动特征。目前针对低渗气藏的水平井产能研究较多<sup>[1,6-15]</sup>,Borisow<sup>[6]</sup>提出油藏水平井产能计算公式,同时,Joshi<sup>[7]</sup>、Giger<sup>[8]</sup>、Renard<sup>[9]</sup>提出了水平井产能计算公式,李滢等<sup>[10]</sup>利用保角变换和镜像反映方法推导了油藏的水平井产能计算公式,陈志海等<sup>[11]</sup>将用于油藏的水平井产能计算公式<sup>[6-9]</sup>中的方法用于气藏水平井产能计算,熊健等<sup>[11]</sup>引入了启动压力梯度和滑脱效应研究其对水平井产能的影响,高红梅等<sup>[12]</sup>研究了启动压力梯度对气藏的渗流的影响,王树平等<sup>[13]</sup>研究了气藏非均质性对水平井产能的影响;郭平等<sup>[14]</sup>研究考虑了非达西效应对水平井产能计算的影响,这些研究成果中主要基于达西流方程推导且只考虑单一因素或两种因素对气井产能的影响,未考虑井筒中压降的影响;而针对低渗气藏的水平井井筒压降的研究较多<sup>[15-18]</sup>,如 Dikken<sup>[15]</sup>、王树平<sup>[16]</sup>、范子菲<sup>[17]</sup>及陈凤<sup>[18]</sup>基于达西流方程建立了水平井井筒压降与气藏耦合的计算模型,研究了水平井筒内压降对气藏水平井的产能的影响,未考虑到气体在地层中的非线性渗流的特征。因此,根据前人研究成果,基于稳定渗流理论,在考虑气体高速非达西渗流的基础上,通过将气藏渗流与井筒流动耦合,推导建立同时考虑滑脱效应、启动压力梯度、应力敏感等因素共同影响的气藏-水平井井筒的耦合模型,并通过实例分析研究了各因素对气藏水平井井筒流量分布的影响。

1 计算模型

假设顶、底边界封闭,水平方向无限延伸,四周无边界的无限大各向异性气藏,且水平井位于气藏中央,流体为单相、均质的不可压缩流体,渗流过程为等温,无任何特殊的物理化学现象发生。

根据稳定渗流理论的运动方程描述气体运动,同时考虑启动压力梯度,非达西流动压降的二次方程变为<sup>[19]</sup>

$$\frac{dp}{dr} - \lambda = \frac{\mu}{K} \cdot v + \beta_g \rho_g v^2 \quad (1)$$

其中, $p$ 为地层压力,MPa; $r$ 为渗流距离,m; $\lambda$ 为启动压力梯度,MPa/m; $v$ 为渗流速度,m/s; $K$ 为气藏渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ;

$\mu$ 为气体黏度,mPa·s;紊流系数 $\beta_g = \frac{1.15 \times 10^9}{K\phi}$ , $\text{m}^{-1}$ ;气体密度

$\rho_g = \frac{M_{air} \gamma_g p}{ZRT}$ , $\text{kg/m}^3$ ; $\phi$ 为孔隙度; $M_{air}$ 为空气分子质量; $\gamma_g$ 为气体相对密度; $R$ 为气体常数; $Z$ 为气体压缩因子; $T$ 为气藏温度,K。

根据文献[1,21]引入考虑启动压力梯度、滑脱效应和应力敏感的影响有

$$\frac{(p+b)\exp[-a_k(p_i-p)]}{\mu Z} \left( \frac{dp}{dr} - \lambda \right) = \frac{v}{ZK_i} + \frac{1.15 \times 10^9 \rho_g v^2}{K\phi\mu Z} \quad (2)$$

其中, $K_i$ 为气藏原始渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ; $p_i$ 为气藏边界压力,MPa; $b$ 为气体滑脱因子,MPa; $a_k$ 为渗透率变形系数,MPa<sup>-1</sup>。

令

$$f(p) = \frac{(p+b)\exp[-a_k(p_i-p)]}{\mu Z}$$

即引入拟压力  $m(p) = \int f(p) dp$ 。根据 Joshi 水平井渗流理论基础,将水平井的压降可以分为水平面与垂直面两个平面的压降,即

$$\underbrace{m(p) - m(p_w)}_{3D-x3z} = \underbrace{m(p) - m(p_F)}_{2D-xy} + \underbrace{m(p_F) - m(p_w)}_{2D-xz} \quad (3)$$

其中, $p_w$ 为井底压力,MPa; $p_F$ 为中间压力,MPa。

1.1 水平面压降

水平井水平面上泄气面积为一椭圆。假设椭圆长半轴为  $a$ ,短半轴为  $d$ ,焦距为  $c$ ,其等于水平井长度的一半即  $L/2$ 。引入茹科夫斯基函数  $z/c = (\omega+1/\omega)/2$ ,利用保角变换方法,将此椭圆形区域变换成半径为  $r_e = [(a+d)/(a-d)]^{1/2}$  的圆形供给区域内一口半径为 1 的直井情形<sup>[11,10,14]</sup>。

由椭圆性质  $d = \sqrt{a^2 - L^2/4}$ , 导出

$$m(p) - m(p_F) = \frac{Qp_{sc} T \ln\left(\frac{a+d}{0.5L}\right)}{\pi K_h h Z_{sc} T_{sc}} + \frac{1.15 \times 10^9 Q^2 \gamma_g T p_{sc}^2}{2K_h R \mu \phi \pi^2 h^2 (Z_{sc} T_{sc})^2} \cdot \left(1 - \frac{0.5L}{a+d}\right) + \lambda \frac{r_e - 0.5L}{(a+d)/0.5L - 1} \int_1^{\frac{a+d}{0.5L}} f(p) dr \quad (4)$$

其中, $Q$ 为水平井的产量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $r_e$ 为泄气半径,m; $K_h$ 为气藏水平方向的渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ; $a = L \sqrt{0.5 + \sqrt{0.25 + (2r_e/L)^4}} / 2$ ; $p_{sc}$ 为标准状态下压力,MPa; $h$ 为气藏厚度,m; $Z_{sc}$ 为标准状态下压缩因子; $T_{sc}$ 为标准状态下温度,K。

1.2 垂直面压降

水平井在垂直面的流动相当于顶、底供给边界气藏中的一个汇点。引入保角变换  $\omega = (1 - e^{-\pi z/h})(1 + e^{\pi z/h})$ ,将  $z$  平面上带形区域变换成  $\omega$  平面上的一个单位圆域,井半径相应变换为  $2\pi r_w/h$ 。利用保角变换方法,将单位圆形封闭区域内有一口半径为  $2\pi r_w/h$  的直井情形<sup>[11,10,14]</sup>

$$m(p_F) - m(p_w) = \frac{Qp_{sc} T}{\pi K_v L Z_{sc} T_{sc}} \cdot \ln \frac{h}{2\pi r_w} + \frac{1.15 \times 10^9 Q^2 \gamma_g T p_{sc}^2}{2K_v R \mu \phi \pi^2 L^2 (Z_{sc} T_{sc})^2} \cdot \left(\frac{h}{2\pi r_w} - 1\right) + \lambda \frac{0.5h - r_w}{1 - 2\pi r_w/h} \int_{2\pi r_w/h}^1 f(p) dr \quad (5)$$

其中, $r_w$ 为井筒的半径,m; $K_v$ 为气藏垂直方向的渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。为使计算公式简化,引入非均质校正系数  $\eta = \sqrt{K/K_h}$ ,由等值渗流阻力法有

$$m(p) - m(p_w) = \frac{Qp_{sc} T \left[ \ln\left(\frac{a+d}{0.5L}\right) + \frac{h}{\eta^2 L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right]}{\pi K_h h Z_{sc} T_{sc}} + \frac{1.15 \times 10^9 Q^2 \gamma_g T p_{sc}^2}{2K_h R \mu \phi \pi^2 h^2 (Z_{sc} T_{sc})^2} \left( \frac{h^3}{2\pi \eta^2 L^2 r_w} - \frac{0.5L}{a+d} - \frac{\eta^2 L^2 - h^2}{\eta^2 L^2} \right) + \lambda A \quad (6)$$

$$A = \frac{r_e - 0.5L}{(a+d)/0.5L - 1} \int_1^{\frac{a+d}{0.5L}} f(p) dr + \frac{0.5h - r_w}{1 - 2\pi r_w/h} \int_{2\pi r_w/h}^1 f(p) dr \quad (7)$$

将式(6)简化为

$$m(p) - m(p_w) = \frac{1.291 \times 10^{-3} Q_s T}{hK} \left[ \ln \left( \frac{a+d}{0.5L} \right) + \frac{h}{\eta^2 L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right] + \frac{3.255 \times 10^{-12} Q_s^2 \gamma_g T}{\phi h^2 \mu K} \left[ \frac{h^3}{2\pi \eta^2 L^2 r_w} - \frac{0.5L}{a+d} + \frac{\eta^2 L^2 - h^2}{\eta^2 L^2} \right] + \lambda A \quad (8)$$

其中,  $\lambda A$  为启动压力梯度引起的压降;  $Q_s$  为气井产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

### 1.3 井筒内流动模型

假设水平井的整个水平段打开, 气体流入井筒后, 与井筒中的气体一起流向井筒跟端, 将产生一定的压降。将水平段分成  $n$  段, 并假设水平井的趾部第一段记为 1, 跟部第一段记为  $n$ , 取任意一段记为  $i$  进行分析, 根据文献[18]有水平井水平段内的压降方程是

$$p_w^2(i) = p_w^2(i-1) - \frac{9.05 \times 10^{-20} \gamma_g Q_{isc}^2(i) T Z f x(i)}{D^5} \quad (9)$$

其中,  $Q_{isc}(i)$  为第 1 段到第  $i$  段的井筒流量总和,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $D$  为水平井筒管径,  $\text{m}$ ;  $x(i)$  为第 1 段到第  $i$  段的井筒总长度,  $\text{m}$ ;  $f$  为 Moody 摩阻系数<sup>[18]</sup>。

根据管道的不同特征及其内部流体流态,  $f$  有不同的表达式<sup>[21]</sup>。

$$\begin{aligned} \text{层流:} & \quad f = 64/Re \\ \text{紊流:} & \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - \lg \left( \frac{e}{D} + \frac{21.25}{Re^{0.9}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $Re$  为管内流量的雷诺数;  $e$  为井筒内壁绝对粗糙度,  $\text{m}$ 。当  $Re < 2300$  时为层流, 当  $2300 < Re < 4000$  时为过渡流, 当  $Re \geq 4000$  时为紊流。

推导的水平井产能方程式(8)和井筒压降方程式(9)组成了气藏-水平井井筒的耦合模型。在上述耦合模型中  $Q$  和  $p$  均为未知数, 可采取迭代法求解。求解中由启动压力梯度引起的压降采用定积分近似方法计算。

## 2 实例分析

假设某气藏基本参数: 厚度 10m, 温度 386.8K, 原始渗透率  $0.95 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 泄气半径 400m, 井筒管径 0.05m, 孔隙度 0.12, 相对密度 0.65, 地层压力 30MPa, 水平井跟端压力 10MPa, 含气饱和度 0.7, 气藏非均质性系数 0.8, 水平段长度 200m, 气体平均黏度  $0.0198 \text{mPa} \cdot \text{s}$ , 气体平均压缩因子 0.926, 绝对粗糙度 0.01m, 启动压力梯度  $0.002 \text{MPa}/\text{m}$ , 渗透率变形系数  $0.02 \text{MPa}^{-1}$ , 滑脱因子 2MPa。

图 1 为启动压力梯度对水平井井筒流量分布的影响。从图中可看出, 流入井筒流量沿井筒变化先平缓增加后呈“凸型”上升趋势。这是由于管内摩阻的影响导致水平井沿井筒压力呈降低的趋势, 引起生产压差沿井筒逐渐增大, 导致流入井筒流量逐渐增大。同时, 启动压力梯度不同, 水平井井筒流量沿井筒分布呈现差异化变化, 在靠近水平井的趾端部分时, 流入井筒流量的差异较小, 在逐渐远离趾端靠近跟端部分时, 流入井筒流量的差异较明显, 其中启动压力梯度越大,

流入井筒流量越小。这是由于在生产压差较小时, 推导的产能计算模型中启动压力梯度引起的附加压降较小, 随着生产压差的增大, 启动压力梯度引起的附加压降逐渐增大, 其中启动压力梯度越大, 其在总压降损失中的比重越大, 导致流入井筒中的流量减小幅度越大。

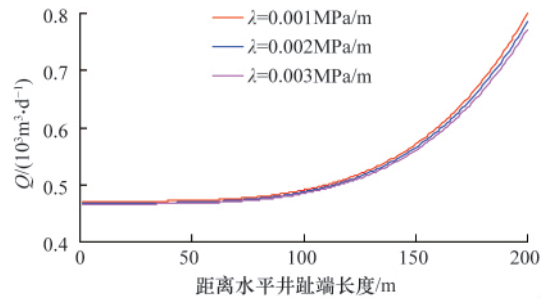


图 1 启动压力梯度对水平井井筒流量分布影响

Fig. 1 Effect of start-up pressure gradient on the flow distribution of horizontal well wellbore

图 2 为滑脱效应对水平井井筒流量分布的影响。从图 2 可看出, 流入井筒流量沿井筒变化先呈平缓的增加后呈“凸型”上升趋势。这是由于管内摩阻的影响导致水平井沿井筒压力呈降低的趋势, 引起生产压差沿井筒逐渐增大, 导致流入井筒流量逐渐增大。同时, 滑脱因子不同, 水平井井筒流量沿井筒分布呈现差异化变化, 在靠近水平井的趾端部分时, 流入井筒流量的差异较小, 在逐渐远离趾端靠近跟端部分时, 流入井筒流量的差异较明显, 其中滑脱因子越大, 流入井筒流量越大。这是由于在生产压差较小时, 推导的产能计算模型中滑脱效应引起的滑脱动力较小, 随着生产压差的增大, 滑脱效应引起的滑脱动力逐渐增大, 其能克服渗流阻力产生的压降损失, 其中滑脱因子越大, 引起其能克服的压降损失越大, 导致流入井筒中的流量增加幅度越大。

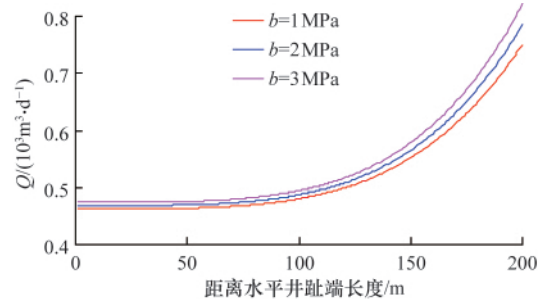


图 2 滑脱效应对水平井井筒流量分布影响

Fig. 2 Effect of slippage on the flow distribution of horizontal well wellbore

图 3 为应力敏感对水平井井筒流量分布的影响。从图中可看出, 流入井筒流量沿井筒变化先平缓增加后呈“凸型”上升趋势。这是由于管内摩阻的影响导致水平井沿井筒压力呈降低趋势, 引起生产压差沿井筒逐渐增大, 导致流入井筒流

量逐渐增大。同时,渗透率变形系数不同,水平井井筒流量沿井筒分布呈现差异化的变化,在靠近水平井的趾端部分时,流入井筒流量的差异较小,在逐渐远离趾端靠近跟端部分时,流入井筒流量的差异较明显,其中渗透率变形系数越大,流入井筒流量越小。这是由于在生产压差较小时,在推导的产能计算模型中应力敏感引起“应力污染”较小,随着生产压差的增大,应力敏感引起的“应力污染”增大,引起地层中的渗透率下降幅度增大,导致渗流阻力增大,其中渗透率变形系数越大,引起“应力污染”现象越严重,导致流入井筒中的流量减小幅度越大。

图4为高速非达西效应对水平井井筒流量分布的影响。从图中可看出,流入井筒流量沿井筒变化先呈平缓的增加后

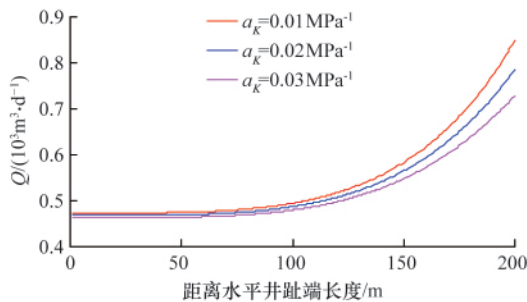


图3 应力敏感对水平井井筒流量分布影响

Fig. 3 Effect of stress sensitivity on the flow distribution of horizontal well wellbore

呈“凸型”上升趋势。这是由于管内摩阻的影响导致水平井沿井筒压力呈降低的趋势,引起生产压差沿井筒逐渐增大,导致流入井筒流量逐渐增大。同时,在考虑高速非达西效应和不考虑高速非达西效应的两种情况下,水平井井筒流量沿井筒分布差异较小,其中前者情况下流入的井筒流量略小于后者的情况。说明高速非达西效应引起的惯性阻力损失较小,其对水平井井筒流量分布影响较小。

图5为非均质性对水平井井筒流量分布的影响。从图中可看出,流入井筒流量从趾端到跟端的变化是先平缓增加后

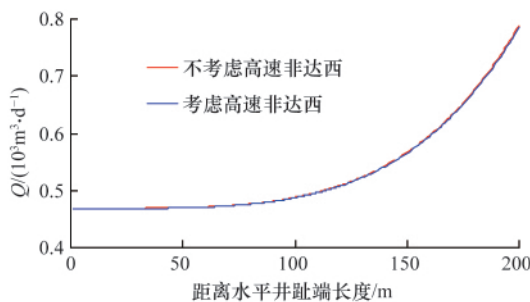


图4 高速非达西对水平井井筒流量分布影响

Fig. 4 Effect of high speed non-Darcy on the flow distribution of horizontal well wellbore

呈“凸型”上升趋势。这是由于管内摩阻的影响导致水平井从

趾端到跟端压力呈降低的趋势,引起生产压差从趾端到跟端逐渐增大,导致流入井筒流量逐渐增大。同时,储层的非均质性不同,其对水平井井筒流量影响不同,非均质性越弱,对水平井井筒流量分布影响差异越小,其中非均质性越强,流入井筒流量越小,在靠近跟端部分时,流入井筒流量的上升幅度越小。这是由于非均质性越强,气藏中的水平渗透率和垂向渗透率的差异越大,引起气体在地层中流动阻力增加,导致渗流阻力增加而引起流入井筒中的流量减小。

图6为绝对粗糙度对水平井井筒流量分布的影响。从图中可看出,流入井筒流量沿井筒变化先平缓增加后呈“凸型”

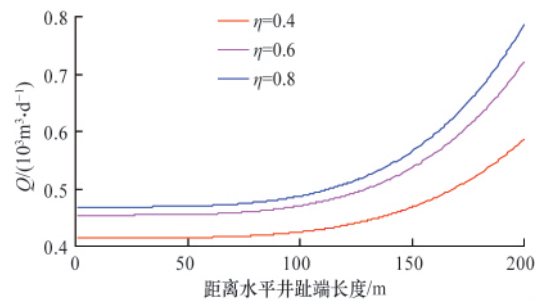


图5 非均质性对水平井井筒流量分布影响

Fig. 5 Effect of heterogeneity on the flow distribution of horizontal well wellbore

上升趋势。这是由于管内摩阻的影响导致水平井沿井筒压力呈降低的趋势,引起生产压差沿井筒逐渐增大,导致流入井筒流量逐渐增大。同时,粗糙度不同,水平井井筒流量沿井筒分布呈现差异化的变化,在靠近水平井的趾端部分时,流入井筒流量的差异较大,在逐渐远离趾端靠近跟端部分时,流入井筒流量的差异由大逐渐变小,其中粗糙度越大,在靠近水平井的趾端部分时,流入井筒流量越小。这是由于井筒的绝对粗糙度增加,引起 Mondy 摩阻系数增加,将导致井筒中压降增大,由于是定水平井跟端压力模拟计算,整个生产压差从趾端到跟端的分布差异较小,因而导致流入井筒流量的减小,其中绝对粗糙度越大,在靠近水平井的趾端部分流入井筒流量的减小幅度越大,而在靠近水平井的跟端部分流入井筒流量的上升幅度越大。

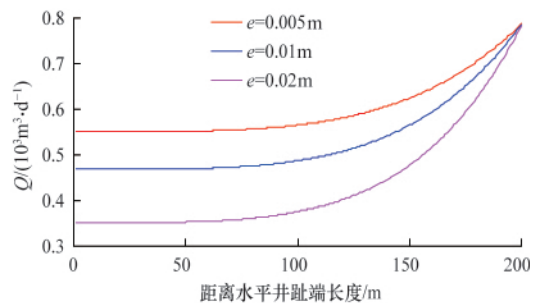


图6 绝对粗糙度对水平井井筒流量分布影响

Fig. 6 Effect of absolute roughness on the flow distribution of horizontal well wellbore

图7为井筒管径对水平井井筒流量分布的影响。从图中可看出,流入井筒流量沿井筒变化先平缓增加后呈“凸型”上升趋势。这是由于管内摩阻的影响导致水平井沿井筒压力呈降低的趋势,引起生产压差沿井筒逐渐增大,导致流入井筒流量逐渐增大。同时,井筒管径不同,水平井井筒流量沿井筒分布呈现差异化的变化,在靠近水平井的趾端部分时,流入井筒流量的差异较大,在逐渐远离趾端靠近跟端部分时,流入井筒流量的差异由大逐渐变小,其中管径越大,在靠近水平井的趾端部分时,流入井筒流量越大。这是由于 $e/D$ 为相对粗糙度,管径和绝对粗糙度作用相反,井筒的管径增加,引起Mondy摩阻系数减小,使井筒中压降减小,由于是定水平井跟端压力模拟计算,整个生产压差从趾端到跟端的分布差异较小,因而导致流入井筒流量的增加,其中管径越小,在靠近水平井的趾端部分流入井筒流量的减小幅度越大,而在靠近水平井的跟端部分流入井筒流量的上升幅度越大。

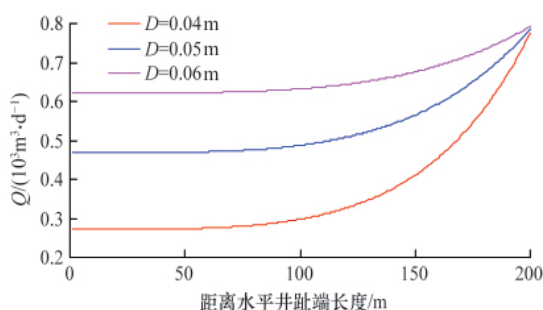


图7 井筒管径对水平井井筒流量分布影响

Fig. 7 Effect of wellbore diameter on the flow distribution of horizontal well wellbore

图8是水平井长度对水平井井筒流量分布的影响。从图中可看出,流入井筒流量沿井筒变化先平缓增加后呈“凸型”上升趋势。这是由于管内摩阻的影响导致水平井沿井筒压力呈降低的趋势,引起生产压差沿井筒逐渐增大,导致流入井筒流量逐渐增大。同时,水平井长度不同,其对水平井井筒流量影响不同,水平井长度越长,在水平井的趾端部分流入井筒流量越小,在水平井的跟端部分流入井筒流量的上升幅度

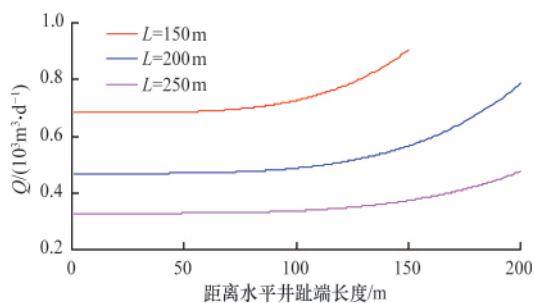


图8 水平井长度对水平井井筒流量分布影响

Fig. 8 Effect of horizontal well length on the flow distribution of horizontal well wellbore

越小。这是由于水平井长度越长,虽在相同的泄流面积下,气体在地层中渗流阻力越小,但在井筒中的摩阻压降越大,后者起到了更大作用而引起流入井筒中的流量减小幅度越大。

### 3 结论

(1)基于稳定渗流理论,在考虑气体高速非达西渗流的基础上,通过将气藏渗流与井筒流动耦合,推导建立同时考虑滑脱效应、启动压力梯度、应力敏感等因素共同影响的气藏-水平井井筒的耦合模型。

(2)通过对气藏-水平井井筒的耦合模型的求解,得到了地层流入井筒流量沿水平井井筒分布剖面,在此基础上,分析了启动压力梯度、应力敏感效应、滑脱效应、高速非达西效应、非均质性、水平井长度、绝对粗糙度和井筒管径等因素对流入井筒流量研究井筒分布的影响。

### 参考文献 (References)

- [1] 熊健, 郭平, 李凌峰. 滑脱效应和启动压力梯度对低渗透气藏水平井产能的影响[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(2): 78-81.  
Xiong Jian, Guo Ping, Li Lingfeng. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2011, 35(2): 78-81.
- [2] 刘建军, 刘先贵. 低渗透岩石非线性渗流规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 556-56.  
Liu Jianjun, Liu Xiangui. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 556-556.
- [3] Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquids and gases [J]. *API Drilling and Production Practice*, 1941(2): 200-213.
- [4] George D V. Application of stress-dependent rock properties in reservoir studies [C]. SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and Western Regional Meeting, Bakersfield, California, March 16-18, 2004.
- [5] 王道成, 李闽, 谭建为, 等. 气体低速非线性渗流研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(6): 74-77.  
Wang Daocheng, Li Min, Tan Jianwei, et al. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(6): 74-77.
- [6] Borisov J P. Oil production using horizontal and multiple deviation wells [M]. Nedra: Moscow, 1964.
- [7] Joshi S D. Augmentation of well productivity using slant and horizontal wells[J]. *JPT*, 1988, 40(6): 729-739.
- [8] Giger F M. Low permeability reservoirs development using horizontal wells[C]. Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, May 18-19, 1987.
- [9] Renard G L, Dupuy J M. Formation damage effects on horizontal well flow efficiency[J]. *JPT*, 1991, 43(7): 786-789.
- [10] 李璽, 王卫红, 王爱华. 水平井产量公式分析 [J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(5): 76-79.  
Li Dang, Wang Weihong, Wang Aihua. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(5): 76-79.
- [11] 陈志海, 马新仿, 郎兆新. 气藏水平井产能预测方法 [J]. 天然气工业, 2006(2): 98-99.  
Chen Zhihai, Ma Xinfang, Lang Zhaoxin. *Natural Gas Industry*, 2006(2): 98-99.
- [12] 高海红, 程林松, 冯儒勇. 考虑启动压力梯度的低渗透气藏水平井产能计算[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 75-77.

- Gao Haihong, Cheng Linsong, Feng Ruyong. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(7): 75-77.
- [13] 王树平, 袁向春, 刘传喜, 等. 平面非均质储层水平井产能计算[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(2): 63-67.  
Wang Shuping, Yuan Xiangchun, Liu Chuanxi, et al. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34(2): 63-67.
- [14] 郭平, 任俊杰, 汪周华. 非达西渗流效应对低渗透气藏水平井产能的影响[J]. 天然气工业, 2011, 31(1): 1-4.  
Guo Ping, Ren Junjie, Wang Zhouhua. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(1): 1-4.
- [15] Dikken B J. Pressure drop in horizontal wells and its effect on production performance[J]. *JPT*, 1990, 42(11): 1426-1433.
- [16] 王树平, 袁向春, 刘传喜, 等. 气藏水平井产能计算新方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(2): 118-122.  
Wang Shuping, Yuan Xiangchun, Liu Chuanxi, et al. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2010, 32(2): 118-122.
- [17] 范子菲, 李云娟, 纪淑红. 气藏水平井长度优化设计方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(6): 28-30.  
Fan Zifei, Li Yunjuan, Ji Shuhong. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2000, 19(6): 28-30.
- [18] 陈凤, 李晓平, 王子天, 等. 非均匀污染下水平气井产能新模型[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(1): 121-124.  
Chen Feng, Li Xiaoping, Wang Zitian, et al. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(1): 121-124.
- [19] Forchheimer A, Katz D L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media[J]. *JPT*, 1979, 31(2): 211-216.
- [20] Li D. Modeling and simulation of the water Non-Darcy flow experiments [C]. SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, March 26-30, 2001.
- [21] 熊健, 邱桃, 郭平, 等. 非线性渗流下低渗气藏压裂井产能评价[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 92-96.  
Xiong Jian, Qiu Tao, Guo Ping, et al. *Drilling Petroleum Techniques*, 2012, 40(3): 92-96.
- [22] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 238-240.  
Li Shilun. *Gas engineering*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 238-240.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



## “中国力学大会 -2013”征文

中国力学大会是中国力学界每两年一次的综合性学术盛会,是广大力学科技工作者学术交流的重要平台。“中国力学大会-2013”将于2013年8月21日在西安举行。会议由中国力学学会、西安交通大学联合主办,现征集相关学术论文。

联系电话:010-82543903,62559209。

电子邮箱:liuyang@cstam.org.cn。

大会网站: [www.cstam.org.cn/templates/lxxh\\_1/index.aspx?nodeid=94&page=ContentPage&contentid=171131](http://www.cstam.org.cn/templates/lxxh_1/index.aspx?nodeid=94&page=ContentPage&contentid=171131)。



### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿: [www.kjdb.org](http://www.kjdb.org)。