

文章编号: 1000-0747(2009)05-0646-05

# 欠平衡钻井油气藏与井筒耦合模型

汪志明<sup>1</sup>, 平立秋<sup>2</sup>, 王玺<sup>2</sup>, 邹科<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京); 2. 中国石油集团公司钻井工程技术研究院海外所)

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划资助项目”(IRT0411)

**摘要:** 利用流体力学的质量守恒方程、动量守恒方程和地层的渗流力学方程, 建立了欠平衡钻井油气藏与井筒耦合流动模型, 并利用有限差分方法对模型进行了求解。所建立的欠平衡钻井油气藏与井筒耦合模型能模拟主要油气藏类型欠平衡钻井过程中油气藏流体与井筒内流体的耦合流动, 模拟地层油、气的流入对井底压力的影响。欠平衡钻井过程中, 不同类型油气藏和井筒流体耦合流动时地层油/气进入动态不同, 地层油/气的进入对井底压力的影响规律也有很大区别。计算结果表明地层油/气的流入可以使井底压力下降 0.03~2.50 MPa, 因此在欠平衡钻井设计中, 应充分考虑产层段油/气流入对井底压力的影响。图 6 参 15

**关键词:** 欠平衡钻井; 油气藏; 井筒; 井底压力; 欠压值; 流动耦合模型

中图分类号: TE249

文献标识码: A

## Coupled model for reservoir flow and wellbore flow in underbalanced drilling

Wang Zhiming<sup>1</sup>, Ping Liqiu<sup>2</sup>, Wang Xi<sup>2</sup>, Zou Ke<sup>2</sup>

(1. College of Oil and Gas Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100195, China)

**Abstract:** To provide theoretical support in underbalanced drilling design, the mass and momentum conservation equations and filtration theory are used to establish the coupled model of oil and gas reservoir flow and wellbore flow. The coupled model is solved using the finite difference method. The coupled model can simulate the coupled flow in different types of reservoirs in underbalanced drilling and reveal the effect of the inflow of formation oil/gas on bottom hole pressure. Calculation results show that bottom hole pressure can be lowered 0.03-2.50 MPa due to the inflow of formation oil/gas. The effect of formation oil/gas inflow on bottomhole pressure should be considered in the design of underbalanced drilling.

**Key words:** underbalanced drilling; hydrocarbon reservoir; wellbore; bottom wellbore pressure; underpressure; flow coupled model

## 0 引言

由于欠平衡钻井具有减少油层伤害、避免钻井液漏失、减少压差卡钻、增加机械钻速以及延长钻头寿命等优点, 使其在油田开发中越来越受青睐。

成功的欠平衡钻井不仅依赖于对油藏性质的全面了解, 而且取决于对欠平衡钻井复杂多相流系统的适当设计和正确的计算机模拟。当欠平衡钻井钻至产层段时, 产层内的油、气等流体在井底负压差下会流入井筒, 油、气的流入会使井底压力发生变化, 而井底压力的变化将导致井底压差的变化, 进而影响地层流体的流入。因此, 该过程是一个动态过程, 涉及到油气藏与井筒内流体的耦合流动, 而且在不同类型油气藏中其耦合流动的规律也不尽相同。

针对这一问题, 本文对欠平衡钻井中井筒内流体的流动规律进行了研究。结合以往学者的研究成

果<sup>[1-4]</sup>, 建立了欠平衡钻井油气藏与井筒流体耦合模型(虽然是以充气液为基础建立的模型, 但是同样适用于气体钻井、雾化钻井、泡沫钻井以及液相欠平衡钻井, 只是在利用模型时稍作调整。因为所有欠平衡钻井在钻进到产层段时, 由于地层油、气的流入, 井筒内的流动都是气、液、固多相流动。), 并利用有限差分方法对建立的耦合模型进行了求解, 进而揭示了油气藏与井筒内流体的耦合流动规律, 为欠平衡钻井的工程设计提供理论依据。

## 1 耦合模型的建立

在耦合模型建立过程中, 根据欠平衡钻井中流体的实际流动情况作了一些假设, 具体如下:

①初始条件: 地面注入的气、液相已经使井底压力达到了稳定状态; ②气液相之间存在漂移(气液相流速不同); ③忽略注入气体在液体中的溶解, 忽略气液相间的

质量传递；④为沿流动方向的一维模型；⑤沿井筒方向的温度分布为已知的；⑥液相的压缩性忽略不计；⑦岩屑和液相一起流动，相间没有滑移（岩屑和液相流速相同）。

耦合模型包括井筒中流体的控制方程和油气藏中流体的渗流方程。考虑到温度是已知的，所以井筒中流体的控制方程只有质量方程和动量方程，而油气藏中流体的渗流方程因油气藏类型的不同而变化。

### 1.1 井筒中流体的控制方程

#### ①液相质量守恒方程

$$\frac{\partial(A\rho_l H_l)}{\partial t} + \frac{\partial(A\rho_l H_l u_l)}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

#### ②气相质量守恒方程

$$\frac{\partial(A\rho_g(1-H_l))}{\partial t} + \frac{\partial(A\rho_g u_g(1-H_l))}{\partial Z} = 0 \quad (2)$$

#### ③混合动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [A\rho_l H_l u_l + A\rho_g(1-H_l)u_g] + \\ & \frac{\partial}{\partial Z} [A\rho_l H_l u_l^2 + A\rho_g(1-H_l)u_g^2] = \\ & - \frac{\partial p}{\partial Z} - \frac{f_m \rho_m u_m^2}{2dh} - \rho_m g \sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

(1)式至(3)式为漂移流动模型的3个方程，在这3个方程中，有6个未知量，均为时间和空间的函数：压力、持液率、局部气相流速、局部液相流速、气相密度和液相密度。假设液相不可压缩，则液相密度是一常数，则还需要两个方程（持液率方程、局部气相速度方程）来封闭模型系统，使方程的个数和未知数的个数相等。由于持液率、局部气相速度方程都与井筒中气液两相的流动形态有关，因此需要对流型进行判别并计算每种流型状态下持液率、气相局部速度，计算方法详见文献[5-7]。

### 1.2 油气藏中流体的渗流方程

在欠平衡钻井中，当井底压力小于原始地层流体压力时，地层流体就会侵入井筒内。地层流体向井筒内的渗流过程，除与欠平衡压差有关外，还与地层流体性质、地层储集空间特性、地层原始压力等因素密切相关。从理论上讲，井筒与地层流体构成了一个大的连通的多相流动体系。尽管流体在井筒内和地层中的流动规律存在较大差异，但井筒内流体流动状态和压力的任何变化均会在地层流体中得到响应，进而对地层流体向井筒的渗流过程构成影响。显然，在欠平衡钻井研究中，若不考虑地层流体向井筒的渗流过程，则难以进行合理的欠平衡钻井设计和施工优化。

欠平衡钻井过程中，不同类型油气藏中的流体向

井筒渗流的规律是不一样的。相应地，油气藏中流体的渗流方程也有所不同<sup>[8-12]</sup>，在模型的建立过程中借鉴了刘想平等<sup>[13,14]</sup>关于水平井筒与油气藏渗流耦合的思想。

#### 1.2.1 油藏中流体渗流方程

##### ①油藏中流体动态渗流方程

$$q_{osc} = \frac{4\pi Kh[p_r - p_{bh}(t)]}{\mu_o \ln \frac{2.25\eta t}{r_w^2}} \quad (4)$$

##### ②油藏中流体稳态渗流方程

$$q_{osc} = \frac{2\pi Kh(p_r - p_{bh})}{\mu_o \left[ \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} \right]} \quad (5)$$

#### 1.2.2 气藏中流体渗流方程

##### ①气藏中流体动态渗流方程

$$q_{ngsc} = \frac{2\pi KhT_{cr}[p_r^2 - p_{bh}^2(t)]}{\mu_{ng} p_{cr} T \lambda \ln \frac{2.25\eta t}{r_w^2}} \quad (6)$$

##### ②气藏中流体稳态渗流方程

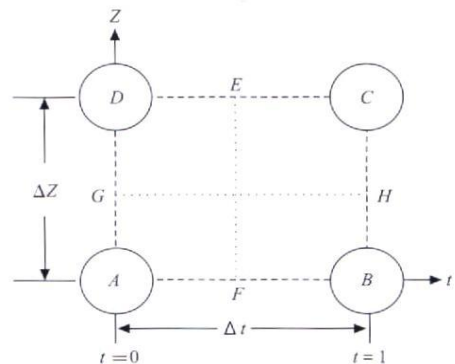
$$p_r^2 - p_{bh}^2 = Mq_{ngsc} + Nq_{ngsc}^2 \quad (7)$$

#### 1.2.3 溶解气驱油藏中流体稳态渗流方程

$$\frac{q_o}{q_{max}} = 1 - 0.2 \frac{p_{bh}}{p_r} - 0.8 \left( \frac{p_{bh}}{p_r} \right)^2 \quad (8)$$

## 2 模型的求解

本研究中模型的求解选用了Wendroff显式有限差分法<sup>[15]</sup>，采取空间和时间追赶法求解有限差分方程组，空间和时间追赶法网格单元如图1所示。



节点A和D代表前一时间步( $t=0$ )在同一轴向增量上、下边界的两个节点  
节点B和C代表当前时间步( $t=1$ )在同一轴向增量上、下边界的两个节点。

节点E和F代表前一时间步和当前时间步的算术平均值处节点，

节点G和H代表前一位置 and 当前位置的算术平均值处节点

图1 空间和时间追赶法的网格单元示意图

井筒控制方程的有限差分表达式如下。

#### ①液相质量守恒方程的有限差分表达式为：

$$\frac{(\rho_1 H_1)_B + (\rho_1 H_1)_C - (\rho_1 H_1)_A - (\rho_1 H_1)_D}{\Delta t} + \frac{(\rho_1 H_1 u_1)_C + (\rho_1 H_1 u_1)_D - (\rho_1 H_1 u_1)_A - (\rho_1 H_1 u_1)_B}{\Delta Z} = 0 \quad (9)$$

②气相质量守恒方程的有限差分表达式为:

$$\frac{[\rho_g(1-H_1)]_B + [\rho_g(1-H_1)]_C - [\rho_g(1-H_1)]_A - [\rho_g(1-H_1)]_D}{\Delta t} + \frac{[\rho_g(1-H_1)u_g]_C + [\rho_g(1-H_1)u_g]_D - [\rho_g(1-H_1)u_g]_A + [\rho_g(1-H_1)u_g]_B}{\Delta Z} = 0 \quad (10)$$

③混合动量方程的有限差分表达式为:

$$\frac{1}{2\Delta t} \left\{ [\rho_1 H_1 u_1 + \rho_g(1-H_1)u_g]_B + [\rho_1 H_1 u_1 + \rho_g(1-H_1)u_g]_C - [\rho_1 H_1 u_1 + \rho_g(1-H_1)u_g]_A - [\rho_1 H_1 u_1 + \rho_g(1-H_1)u_g]_D \right\} + \frac{1}{2\Delta Z} \left\{ [\rho_1 H_1 u_1^2 + \rho_g(1-H_1)u_g^2]_C + [\rho_1 H_1 u_1^2 + \rho_g(1-H_1)u_g^2]_D - [\rho_1 H_1 u_1^2 + \rho_g(1-H_1)u_g^2]_A - [\rho_1 H_1 u_1^2 + \rho_g(1-H_1)u_g^2]_B \right\} + \frac{p_C - p_B}{\Delta Z} + 0.25 \left[ \left( \frac{\Delta p}{\Delta Z} \right)_A + \left( \frac{\Delta p}{\Delta Z} \right)_B + \left( \frac{\Delta p}{\Delta Z} \right)_C + \left( \frac{\Delta p}{\Delta Z} \right)_D \right]_{\text{fix}} + 0.25 \left[ \left( \frac{\Delta p}{\Delta Z} \right)_A + \left( \frac{\Delta p}{\Delta Z} \right)_B + \left( \frac{\Delta p}{\Delta Z} \right)_C + \left( \frac{\Delta p}{\Delta Z} \right)_D \right]_{\text{hy}} = 0 \quad (11)$$

### 3 油气藏与井筒耦合模型研究

利用油气藏与井筒的耦合模型,模拟各种油气藏条件下欠平衡钻井时油气藏与井筒的耦合流动,揭示欠平衡钻井油气藏与井筒的耦合流动规律,为欠平衡钻井的工程设计以及现场操作提供设计和实践的依据。

模拟中输入的数据包括:

①钻井数据:模拟井深 1 768 m,套管内径为 0.219 m,钻柱外径为 0.107 m,氮气注入量为 0.43 m<sup>3</sup>/s,钻井液注入量为 0.009 m<sup>3</sup>/s,钻井液密度为 1 120 kg/m<sup>3</sup>,钻井液黏度为 0.024 Pa·s,井口温度为 285 K,地热梯度为 0.017 K/m,井口回压为 1.586 MPa。

②地层参数:油气藏渗透率为 0.5×10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>,油藏平均压力为 20.0 MPa,原油黏度为 0.002 Pa·s,油层、气层厚度分别为 10.0 m,原油密度为 805.6 kg/m<sup>3</sup>,泄油半径为 500 m。溶解气驱油藏拟稳态渗流,井底压力为 0 时的最大产油量为 0.014 76 m<sup>3</sup>/s,溶解气油比为 287.3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,天然气的相对密度为 0.65,天然气的相对分子质量为 18.83。

图 2—图 6 为在不同类型油气藏中进行欠平衡钻井时,油气藏与井筒的耦合模拟结果。

图 2 为无限大油藏非稳态渗流与井筒耦合模拟结果。由图可见,在其他参数不变的情况下,随着时间的延续,油井的产量是自然递减的。最初 2 min 内,在较大欠压值下,地层产油量急剧增加,随着地层油进入井筒,井底压力大幅度下降(与无地层油进入时的井底压

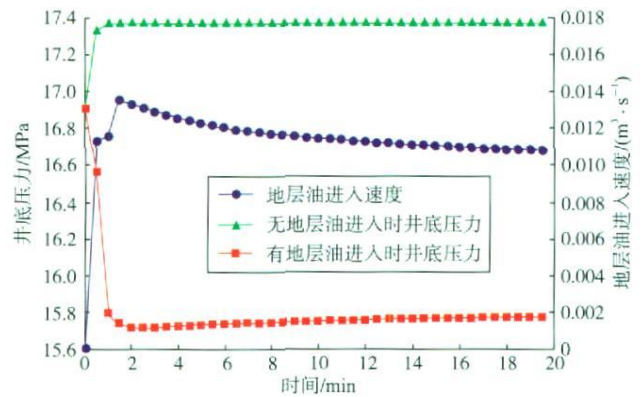


图 2 无限大油藏非稳态渗流与井筒耦合结果

力相比);随着时间的延长,地层油进入井筒的速度即产油量降低,使井底压力继续逐渐上升,随着欠压值的减小,地层油进入井筒的速度仍缓慢下降并趋于稳定,使井底压力也趋于稳定,此时,井底压力与地层压力之间的欠压值处于一种动平衡状态。从无限大油藏非稳态渗流与井筒耦合的结果中可以得到启示:可以利用地层油的进入降低井底压力,维持欠压值,来代替井口部分氮气的注入,以减少氮气的注入量,从而降低欠平衡钻井注氮气的成本。

图 3 为圆形封闭油藏拟稳态渗流与井筒耦合模拟结果。由图可见,地层油进入井筒的速度与时间无关,在其他地层参数不变的情况下,当生产压差确定后,油井的产油量保持不变。随着地层油的流入,井底压力大幅降低,当地层油进入速度稳定后,井底压力也随之

稳定。从图中可以看出,地层油的进入使井底压力下降了1.5 MPa左右。这一点在欠平衡钻井设计时应予以充分考虑。

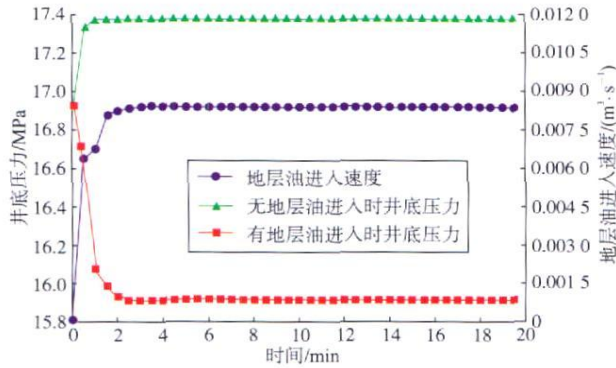


图3 圆形封闭油藏拟稳态渗流与井筒耦合结果

图4为溶解气驱油藏拟稳态渗流与井筒耦合模拟结果。由图可见,在其他参数不变的情况下,随着井底压力的降低,地层油进入井筒的速度将随之增大,同样,地层气进入井筒的速度也随之增大。地层油气的进入导致井底压力的进一步降低,地层油/气进入速度也逐渐增大。当井底压力趋于稳定时,地层油气进入井筒的速度也随之逐渐稳定下来。地层油/气的进入使井底压力降低了2.5 MPa左右。因此认为,当欠平衡钻井进入到产层段时,利用产层油、气的进入降低井底压力,维持欠压值,可代替井口部分氮气的注入,无疑可以减少氮气的注入成本。

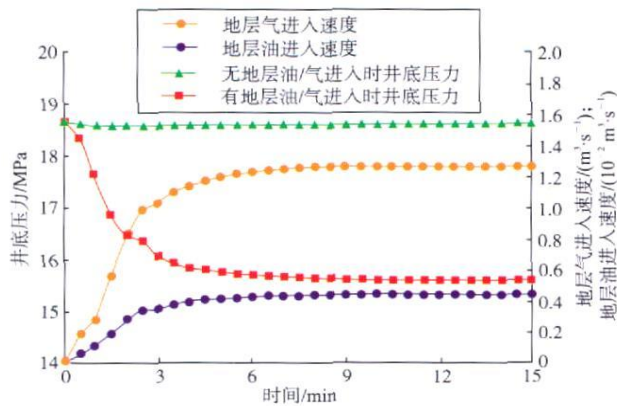


图4 溶解气驱油藏拟稳态渗流与井筒耦合结果

图5为无限大气藏非稳态渗流与井筒耦合模拟结果。由图可见,初期,随着地层气进入井筒,井底压力急剧下降。但随着地层气进入井筒速度降低,井底压力也逐渐增加,直到地层气进入速度趋于稳定时,井底压力也趋于稳定。地层气的进入使井底压力下降了0.7 MPa。

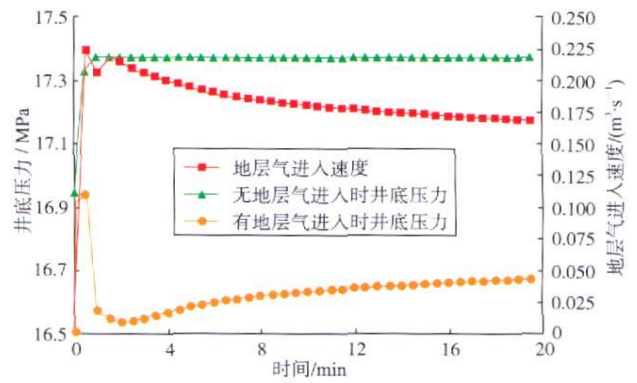


图5 无限大气藏非稳态渗流与井筒耦合结果

图6为无限大气藏拟稳态渗流与井筒耦合模拟结果。由图可见,地层气向井筒内的渗流处于拟稳态流动,地层气进入速度不随时间发生变化。随着地层气的进入,井底压力有所下降,由于地层气进入速度不变,因此井底压力也不随时间发生变化。

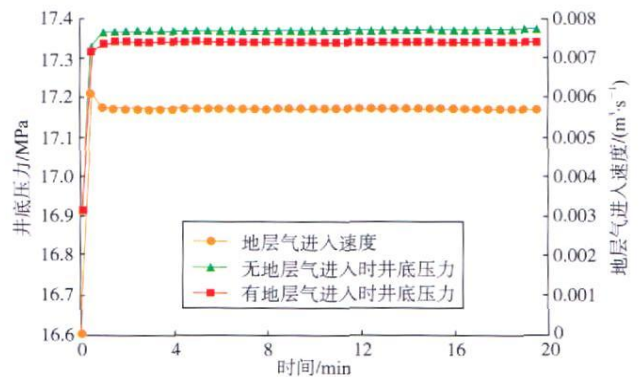


图6 无限大气藏拟稳态渗流与井筒耦合结果

综上所述,在不同类型的油气藏中进行欠平衡钻井时,油气藏流体与井筒流体的耦合流动有很大的差别,地层油气的进入对井筒内压降的影响规律也不尽相同。所以要区别对待,针对不同的油气藏类型建立相应的油气渗流与井筒耦合模型,才能为不同类型油气藏的欠平衡钻井提供准确的设计依据。

## 4 结论

油气藏与井筒流体耦合流动研究表明,不同类型油气藏和井筒流体耦合流动时,其地层油/气进入动态是有区别的,地层油/气的进入对井底压力的影响规律也有很大的不同。以往的欠平衡钻井中只笼统地给出一个产能公式,不能满足多种类型油气藏欠平衡钻井的设计要求。

不同类型油气藏与井筒流体耦合流动模拟结果表明,非稳态油气藏流体与井筒流体耦合流动时,井底压力随时间的延续而变化;而稳态油气藏流体与井筒

流体耦合流动时,井底压力经过短时间的波动后趋于稳定。

当欠平衡钻井进入产层段时,地层油/气的流入对井底压力的影响非常显著,可以使井底压力下降 0.03~2.5 MPa。因此认为,在欠平衡钻井设计中,要充分考虑产层段油/气流入对井底压力的影响,可利用产层油/气的流入代替井口部分氮气的注入,进而减少氮气的注入成本,提高欠平衡钻井的经济效益。

#### 符号注释:

$A$ ——井筒截面积,  $m^2$ ;  $\rho_l$ ——液相密度,  $kg/m^3$ ;  $H_1$ ——持液率, 无因次;  $u_l$ ——液相流速,  $m/s$ ;  $t$ ——时间,  $s$ ;  $Z$ ——井筒长度,  $m$ ;  $\rho_g$ ——气相密度,  $kg/m^3$ ;  $u_g$ ——气相流速,  $m/s$ ;  $p$ ——压力,  $Pa$ ;  $f_m$ ——气液混合物摩擦系数, 无因次;  $\rho_m$ ——气液混合物密度,  $kg/m^3$ ;  $u_m$ ——气液混合物流速,  $m/s$ ;  $d_h$ ——流道水力直径,  $m$ ;  $g$ ——重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\theta$ ——流道与水平方向夹角,  $^\circ$ ;  $q_{osc}$ ——标准状况下产油量,  $m^3/s$ ;  $K$ ——地层渗透率,  $m^2$ ;  $h$ ——油层有效厚度,  $m$ ;  $p_r$ ——供给边界处地层压力,  $Pa$ ;  $p_{bh}$ ——井底压力,  $Pa$ ;  $\mu_o$ ——原油黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $\eta$ ——导压系数, 无因次;  $r_w$ ——井筒半径,  $m$ ;  $r_e$ ——泄油半径,  $m$ ;  $q_{ngsc}$ ——标准状况下产气量,  $m^3/s$ ;  $T_{cr}$ ——临界温度,  $K$ ;  $\mu_{ng}$ ——天然气黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $p_{cr}$ ——临界压力,  $Pa$ ;  $\lambda$ ——压缩因子, 无因次;  $T$ ——井筒温度,  $K$ ;  $M$ ——层流系数, 无因次;  $N$ ——紊流系数, 无因次;  $q_o$ ——井底条件下产油量,  $m^3/s$ ;  $q_{o,max}$ ——井底条件下最大无阻流量,  $m^3/s$ ;  $\Delta p/\Delta Z$ ——压力梯度,  $Pa/m$ ;  $(\Delta p/\Delta Z)_{fric}$ ——摩擦压力梯度,  $Pa/m$ ;  $(\Delta p/\Delta Z)_{hy}$ ——重力压力梯度,  $Pa/m$ 。

#### 参考文献:

- [1] 龙芝辉, 汪志明, 范军. 欠平衡钻井多相流动理论与计算分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 749-753.  
Long Zhihui, Wang Zhiming, Fan Jun. A dynamic modeling of underbalanced drilling multiphase flow and numerical calculation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 749-753.
- [2] 方义生, 刘合年, 罗凯. 关于气井产能、气田稳产特征和气区开采潜力的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(4): 399-405.  
Fang Yisheng, Liu Henian, Luo Kai. Discussion on gas well productivity, gas field plateau and gas area development potential [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(4): 399-405.
- [3] 汪志明, 魏建光, 王小秋. 水平井射孔参数分段组合优化模型[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 725-730.  
Wang Zhiming, Wei Jianguang, Wang Xiaoqiu, et al. Sectional combination optimization model of horizontal well perforating parameters [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 725-730.
- [4] 王晓冬, 于国栋, 李治平. 复杂分支水平井产能研究[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 729-733.  
Wang Xiaodong, Yu Guodong, Li Zhiping. Productivity of horizontal wells with complex branches [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 729-733.
- [5] Wang Zhiming, Ping Liqiu, Zou Ke. Prediction of dynamic

wellbore pressure in gasified fluid drilling [J]. Petroleum Science, 2007, 4(4): 66-73.

- [6] 平立秋. 欠平衡钻井全井段井底压力预测模型研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2007.  
Ping Liqiu. The study of bottomhole pressure prediction model for the full hole in underbalanced drilling [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2007.
- [7] 平立秋, 汪志明, 魏建光. 欠平衡钻井多相流模型评价分析[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(1): 75-78.  
Ping Liqiu, Wang Zhiming, Wei Jianguang. The evaluation study of pressure prediction models in underbalanced drilling [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(1): 75-78.
- [8] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998.  
Zhang Jianguo, Lei Guanglun, Zhang Yanyu. Fluid mechanics in porous medium [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1998.
- [9] Jones L G, Blount E M, Glaze O H. Use of short term multiple rate flow tests to predict performance of wells having turbulence [A]. SPE 6133, 1976.
- [10] 陈元千, 赵庆飞. 油井二项式的推导及新的 IPR 方程[J]. 油气井测试, 2002, 11(1): 1-3.  
Chen Yuanqian, Zhao Qingfei. Derivation of quadric form for oil well and new IPR equation [J]. Well Testing, 2002, 11(1): 1-3.
- [11] 曾庆恒. 采气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. 27-30.  
Zeng Qingheng. Gas production engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. 27-30.
- [12] Vogel J V. Inflow performance relationships for solution-gas drive wells [J]. JPT, 1968, 20(1): 83-92.
- [13] 刘想平, 张兆顺, 刘翔鹏, 等. 水平井筒内与渗流耦合的流动降压计算模型[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(2): 36-39.  
Liu Xiangping, Zhang Zhaoshun, Liu Xiang'e, et al. A model to calculate pressure drops of horizontal wellbore variable mass flow coupled with flow in a reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(2): 36-39.
- [14] 刘想平, 郭呈柱, 蒋志祥, 等. 油层中渗流与水平井筒内流动的耦合模型[J]. 石油学报, 1999, 20(3): 82-86.  
Liu Xiangping, Guo Chengzhu, Jiang Zhixiang, et al. The model coupling fluid flow in the reservoir with flow in the horizontal wellbore [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(3): 82-86.
- [15] 陆金甫, 关治. 偏微分方程数值解法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987. 56-60.  
Lu Jinfu, Guan Zhi. Numerical solution technique for partial differential equation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987. 56-60.

第一作者简介: 汪志明(1964-), 男, 安徽黄山人, 博士, 中国石油大学(北京)教授, 从事井筒流动与控制方向的教学与研究工作。地址: 北京市昌平区, 中国石油大学(北京)石油天然气工程学院, 邮政编码: 102249. E-mail: wangzm@cup.edu.cn

收稿日期: 2007-08-21 修回日期: 2009-06-22

(编辑 唐金华 绘图 付改荣)