

水平井变质量流与油藏渗流的耦合研究

周生田 郭希秀

(中国石油大学(华东) 数学与计算科学学院, 山东 东营 257061)

摘 要:针对目前对水平井生产时井筒内流体流动研究的现状及不足,对裸眼完井水平井微元段进行了流动分析,根据连续性方程、动量方程和能量方程,推导了混合压降计算公式,得到了井筒压降计算模型。该模型考虑了摩擦、加速度和井筒壁面流入的混合干扰等因素。建立了稳态条件下水平井筒流动和油藏渗流的耦合模型。实例计算和分析了一口水平井的变质量流动规律,与无限导流模型进行了分析对比,说明了井筒压降对井产能的影响。该耦合模型为描述水平井流入动态、评价水平井产能提供了理论依据。

关键词:水平井;裸眼完井;变质量流;压力降;耦合

中图分类号:TE312 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2009)02-0085-04

水平井生产时井筒内除了一直沿井筒方向流动的流体外,还有沿程流入的油藏流体,使井筒流体流量不断增大,形成复杂的变质量流动。另外,井筒内的流动和油藏渗流相互影响、制约,构成了完整的水动力学系统,因此有必要建立井筒与油藏的耦合模型来合理模拟水平井生产。目前很多研究者^[1-4]已在有关方面进行了研究,起初仅认为井筒内的压降是摩擦压降,随着研究的深入,进一步将水平井段的压降分为摩擦压降、加速度压降和混合压降^[5-6]。对混合损失的研究多是通过实验数据拟合出混合损失计算公式^[7],但这些公式具有一定的片面性,实用性不强。徐燕东^[8]推导出了单相和气液两相的混合压降计算公式;刘想平^[9]推导出了水平井筒的压降计算公式,建立了油藏渗流与水平井筒内流动的耦合模型,但其管流计算仅限于对普通管流摩阻的简单修正。为此,笔者综合考虑摩擦、加速度和井筒壁面流入的混合干扰等因素,推导出了混合压降计算公式,得到了井筒压降模型,建立了底水驱油藏与裸眼井筒的稳态耦合模型,并对水平井的变质量流特性进行了实例分析。

1 水平井筒压降模型

设井筒内为单相流体,流体作等温、稳态的一维流动,将水平井视作由其长度方向的许多微元段组成,考察水平井上的一小段(如图 1 所示),其长度为 Δx 。

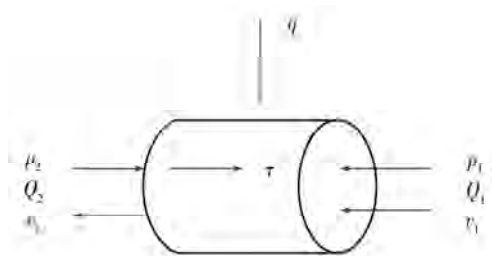


图 1 水平井微元段示意

微元段内流体受到上游端压力 p_1 , 下游端压力 p_2 以及剪切应力 τ 的作用。流体的能量损失由两方面原因导致:一方面是流体间摩擦产生阻力,另一方面是流体流动的混合干扰产生附加阻力^[10]。假设 h_{12} 为单位质量流体混合干扰造成的能量损失,则可以写出该微元段的动量方程、连续性方程和能量方程。动量方程:

$$p_1 A - p_2 A - \tau \pi D \Delta x = \rho Q_2 v_2 - \rho Q_1 v_1 \quad (1)$$

连续性方程:

$$A v_1 + q = A v_2 \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{f v^2}{2Dg} \Delta x + h_{12} \quad (3)$$

式中, A 为井筒横截面面积, m^2 ; D 为井筒直径, m ; ρ

收稿日期:2007-07-03;改回日期:2008-11-24

作者简介:周生田(1965—),男,山东阳谷人,1986年毕业于聊城师范学院数学专业,1988年获广西大学数学专业硕士学位,1997年获石油大学油气田开发工程专业博士学位,副教授,主要从事采油工程、多相流、计算流体力学和应用数学方面的科研与教学工作。

联系电话:(0546)8392321

为流体密度, kg/m^3 ; q 为从油藏流入该井井筒段的流量, m^3/d ; Q 为井筒截面主流量, m^3/d ; \bar{v} 为微元段内流体的平均流速, $\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$, $v_1 = \frac{Q_1}{A}$, $v_2 = \frac{Q_2}{A}$; τ

$= \frac{1}{8} f \rho \bar{v}^2$; f 为管壁有流体流入时的壁面摩擦系数, 层流时 $f = \frac{64}{Re} (1 + 0.043\,03 Re_w^{0.614\,2})$, 紊流时 $f = f_0 (1 - 0.015\,3 Re_w^{0.397\,8})$; f_0 为无壁面流入的壁面摩擦阻系数, 由 Colebrook-white 摩擦因子关系式 $\frac{1}{\sqrt{f_0}} = -4.01 \ln \left[\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{1.255}{\sqrt{f_0} Re} \right]$ 得到^[11]; Re_w 为

井壁雷诺数, 定义为 $Re_w = \frac{q_s \rho}{\pi \mu}$; q_s 为单位长度管壁面流入的体积流量, $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$; μ 为原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

由式(1)得:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{A} \left(\rho Q_2 v_2 - \rho Q_1 v_1 + \frac{f \rho \bar{v}^2}{8} \pi D \Delta x \right) \quad (4)$$

由式(3)得:

$$h_{12} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} - \frac{f \bar{v}^2}{2Dg} \Delta x \quad (5)$$

由式(4)、(5)得:

$$h_{12} = \frac{q^2 + 2v_1 q A}{2g A^2} \quad (6)$$

式(6)即为井筒单位质量流体在该微元段的混合干扰损失, 可见混合损失与入流量、轴向流体速度及井筒直径等因素有关。由式(4)、(6)可以得到水平井筒内该微元段的压降关系式:

$$\Delta p_w = \rho g h_{12} + \frac{f \rho (2v_1 A + q)^2}{8DA^2} \Delta x + \frac{\rho q^2}{2A^2} + \frac{\rho v_1 q}{A} \quad (7)$$

把水平井分成 N 段, 在已知水平井筒跟端处压力 p_{wf} 的情况下, 井筒内的压力分布表示为:

$$\begin{cases} \Delta p_{w0} = 0 \\ p_{w0} = p_{wf} \\ p_{wj} = p_{w,j-1} + 0.5(\Delta p_{w,j-1} + \Delta p_{wj}) \\ (j = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \quad (8)$$

若把沿井 N 个微元段处的压力和径向流入量看成 N 维向量, 上述方程可以写成函数形式:

$$\mathbf{p}_w = F(\mathbf{q}) \quad (9)$$

式中, $\mathbf{p}_w = [p_{w1}, p_{w2}, \dots, p_{wN}]^T$, $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_N]^T$ 。

2 油藏模型

对于底水驱油藏中长度为 L 的裸眼完井水平

井, 跟端在 $x=0$, 指端在 $x=L$, 假定井筒内为单相不可压缩流体作等温流动。据镜像反映原理, 两边界之间的有限区域可表示成无界空间中两口水平生产井和两口水平注水井交替出现的平行于 x 轴的无穷井排, 其中两排水平生产井 z 坐标分别为 $4nh + z_w$, $4nh + 2h - z_w$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$); 两排水平注水井的 z 坐标为 $4nh - z_w$, $4nh - 2h + z_w$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$)。把水平井看成线汇, 将其分成 N 段, 设从油藏流入井筒第 i 段的流量为 q_i , 第 j 段井壁处的压力为 p_j , 则油藏内渗流方程为^[9]:

$$\sum_{i=1}^N \lambda q_i \varphi_{ij} = p_e - p_j + \rho g(z_e - z_w) \quad (10)$$

式中, z_w 为井距油层底部的距离, m ; $\lambda = \frac{\mu}{4\pi K}$; p_e 为油藏压力; K 为油藏渗透率。

$$\begin{aligned} \varphi_{ij} = \frac{1}{L_i} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} [\xi_i(4nh + z_w, x_j, r_w, z_w) + \right. \\ \xi_i(4nh + 2h - z_w, x_j, r_w, z_w) - \\ \xi_i(4nh - z_w, x_j, r_w, z_w) - \\ \left. \xi_i(4nh - 2h + z_w, x_j, r_w, z_w)] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, L_i 为第 i 段线汇的长度; h 为油层厚度; ξ_i 定义如下:

$$\xi_i(\eta_n, x, y, z) = \ln \frac{r_{n1} + r_{n2} + L_i}{r_{n1} + r_{n2} - L_i} \quad (12)$$

式中, $r_{n1} = \sqrt{(x_{1i} - x)^2 + y^2 + (\eta_n - z)^2}$; $r_{n2} = \sqrt{(x_{2i} - x)^2 + y^2 + (\eta_n - z)^2}$; x_{1i}, x_{2i} 分别为第 i 段的起始、终点横坐标; η_n 为与 n 有关的变量。

利用压力向量和径向流入向量, 式(10)可以写成:

$$\mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{B} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_N]^T$;

$$\begin{aligned} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1N} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \varphi_{N1} & \varphi_{N2} & \cdots & \varphi_{NN} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} p_e - p_1 - \rho g(z_e - z_w) \\ p_e - p_2 - \rho g(z_e - z_w) \\ \vdots \\ p_e - p_N - \rho g(z_e - z_w) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

若假定水平井各井段的压力相等, 即水平井具有无限导流能力, 则令 $p_1 = p_2 = \dots = p_N = p_{wf}$, 由式(13)可求得无限导流模型的压力和流量分布。

3 井筒-油藏的耦合模型

油藏和井筒的耦合条件为: 1) 从油藏流入水平

井的流量和水平井筒内的流量平衡;2)井筒内压降和油藏中的压降在井壁处相等。利用该条件,把井筒模型方程式(9)和油藏模型方程式(13)结合起来得到井筒/油藏的耦合模型。该模型是由 $2N$ 个方程和 $2N$ 个未知数组成的方程组。用迭代法对耦合模型进行求解,迭代格式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{q}^{n+1} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}(\mathbf{p}^n) \\ \mathbf{p}^{n+1} = \mathbf{F}(\mathbf{q}^{n+1}) \end{cases} \quad (14)$$

由初始值 $\mathbf{p}^0 = [p_{wf}, p_{wf}, \dots, p_{wf}]$ 开始,应用迭代格式依次产生新的压力向量和径向流入向量,直到 \mathbf{p} 、 \mathbf{q} 的改变量小于一定的误差值。

4 计算实例

计算所用油藏、水平井参数为:油藏压力 $p_e = 41.6$ MPa;渗透率 $K = 0.165 \mu\text{m}^2$;原油黏度 $\mu = 0.29$ mPa·s;原油密度 $\rho = 840$ kg/m³;原油体积系数 $B_o = 1.165$;油层厚度 $h = 33.5$ m;井距油层底部的距离 $z_w = 22$ m;井筒直径 $D = 0.103$ m;水平井段长度 $L = 600$ m;井筒相对粗糙度 $\varepsilon/D = 0.0001$;井筒跟端压力 $p_{wf} = 41.35$ MPa。

图 2 为耦合模型和无限导流模型的流量分布剖面对比结果,其井筒截面轴向主流量分布剖面对比见图 3。由图 2 可以看出,由油藏径向流入水平井筒的流量沿井长分布是不均匀的,总体上呈现“U”形,反映出水平井筒不同位置的供给范围不同,这主要是由于稳态流时水平井段相互干扰增强,端部供给范围大、中部范围小,导致端部呈拟半球形流、中部呈拟线性流形态。若忽略井筒内的压降,即假定水平井具有无限导流能力,得到的流量分布明显估计过高。另外,水平井井筒内的流动是变质量的,表现为井筒流量从指端到跟端呈不断增加的趋势(见图 3)。

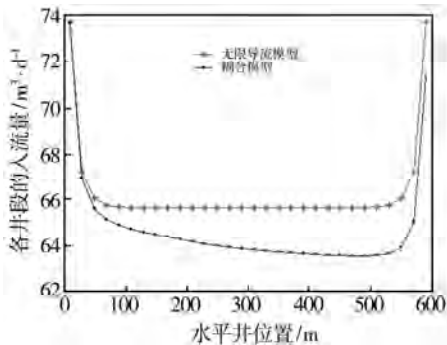


图 2 壁面入流量沿井筒的分布

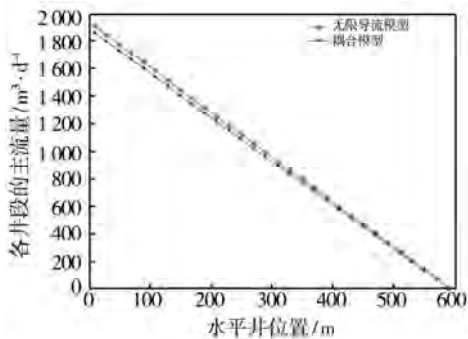


图 3 井筒截面主流量沿井筒的分布

筒内各压降的分布。从图 4 可以看出,总的压降损失呈现从指端($x = 600$)到跟端($x = 0$)逐渐增加的趋势;在该实例的计算中,摩擦压降在井筒总压降中占有较大的分量,加速度压降和混合压降的影响较小。

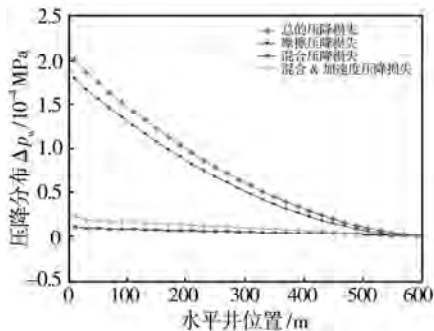


图 4 水平井筒内不同压降的分布

图 5 为耦合模型和无限导流模型的井筒内压力分布剖面对比。从图 5 可以看出,水平井筒中压力从指端到跟端呈下降趋势,靠近指端($x = 600$),压力变化较小;靠近跟端($x = 0$),压力变化越大。这主要是因为井筒中总压降从指端到跟端逐渐增加,越靠近跟端主流流量越大,摩擦引起的压力损失和径向流入引起的压力损失越大。

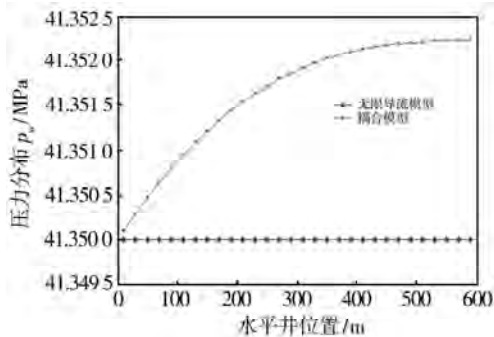


图 5 水平井筒内的压力分布

对水平井产量随水平段长度变化的关系问题,耦合模型和无限导流模型计算出了不同的结果(见图 6)。从图 6 可以看出,水平井水平段长度较短

水平井生产时井筒内存在压降损失,图 4 为井

时,两种模型计算的结果相差不大;水平井水平段长度越长,无限导流模型计算的水平井产量越高,而耦合模型计算显示产量增加逐渐缓慢,水平段达到一定长度后,产量将不再增加。实际上由于井筒中压降的存在,产量不能随水平段长度的增加而无限制的增加。因此预测水平井产量尤其是大位移井的产量时应该考虑井筒内的压降,耦合模型计算的结果更合理。

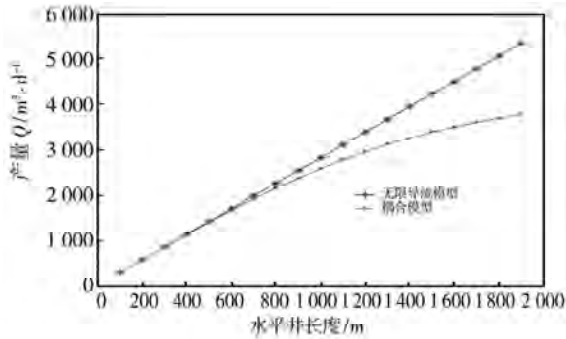


图 6 水平井产量随长度的变化

5 结 论

1) 推导出了裸眼水平井筒内的混合压降计算公式,得到了井筒内流动的压降模型,利用耦合模型计算分析了水平井的变质量流动特性。

2) 井筒压降对水平井生产动态有影响,预测水平井产量尤其是大位移井的产量时应该考虑井筒内的压降。

3) 水平井水平段长度存在最优值,当水平段长度超过一定值后,水平井的产量并不随着水平段长度的增加持续增加。

参 考 文 献

- [1] Joshi S D. A laboratory study of thermal oil recovery using horizontal wells[R]. SPE 14916, 1986.
- [2] Dikken B J. Pressure drop in horizontal wells and its effect on their production performance[J]. Journal of Petroleum Technology, 1990, 42(11): 1 426-1 433.
- [3] Novy R A. Pressure drop in horizontal wells: when can they be ignored? [J]. SPE Reservoir Engineering, 1995, 10(1): 29-35.
- [4] Ozkan E, Sarica C, Raghavan R. Effect of conductivity on horizontal well pressure behavior[J]. SPE Advanced Technology Series, 1995, 3(1): 85-94.
- [5] 周生田, 张琪. 水平井水平段压降的一个分析模型[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(3): 49-52.
- [6] 周生田. 水平井水平段长度计算及影响因素分析[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(5): 78-80.
- [7] Su Z, Gudmendsson J S. Pressure drop in perforated pipes: experiments and analysis[R]. SPE 28800, 1994.
- [8] 徐燕东, 李春兰, 魏惠琴, 等. 考虑入流角的水平井筒混合损失模型[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(5): 44-46.
- [9] 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.
- [10] 周生田, 张琪, 李明忠, 等. 水平井筒变质量流体流动实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(5): 53-55.
- [11] Ouyang Liangbiao, Arbabi S, Aziz K. General wellbore flow model for horizontal, vertical and slanted well completions [J]. SPE Journal, 1998, 3(2): 124-133.

[审稿 陈月明]

Study of Coupling Horizontal Well's Variable-Mass-Rate Flow with Flow in Reservoir

Zhou Shengtian Guo Xixiu

(College of Mathematics and Computational Science, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong, 257061, China)

Abstract: Considering the lack of researches on wellbore flow in production stage, the flow in the segment of open-hole completion horizontal well is analyzed. Based on the continuity equation, momentum equation and energy equation, an equation to calculate the mixture pressure drop and the pressure drop along the horizontal wellbore were obtained. This model considers friction, acceleration, and the mixing impact due to fluid inflow into the well. Based on the relation between fluid flow in wellbore and reservoir, a steady state wellbore/reservoir coupling model is developed. An example is presented to calculate and analyze the variable-mass-rate flow in wellbore. Compared with the infinite-conductivity well model, the impact of wellbore pressure drop on well productivity is illustrated. This model can provide reference for describing the inflow performance of horizontal well and evaluating production capacity of horizontal well.

Key words: horizontal well; open hole completion; variable-mass-rate flow; pressure drop; coupling