

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.011

水平井油水分层流速度场数值模拟

张宏兵¹,陈露露¹,尚作萍¹,谢荣华²,刘兴斌²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.中国石油大庆油田有限责任公司,黑龙江 大庆 163458)

摘要:依据 N-S 方程和相应的界面耦合条件,构建了牛顿流体-牛顿流体两相流的 2 层和 3 层分离模型;用有限差分法和松弛迭代法离散和求解各种模型的方程,并模拟了水平井油水分层流速度场。模拟结果表明:水平井中由于压差作用,黏度相对较小的流体流速比较快,不同分界面高度流量和各相持率差别比较大;3 层与 2 层分离模型模拟结果,除了分界面局部特征有些差异外,整个速度场绝对数值也有较大的不同。

关键词:水平井;油水分层流;分离模型;速度场;数值模拟

中图分类号: O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)04-0415-04

在石油领域,经常会遇到油和水两相混合流动的现象,即在同一管道的流动中 2 种不同性质的流体具有明确的和稳定的分层界面的层流流动。这种特殊的两相流动在生产实际中大量存在,如钻井液与原油在水平圆管或水平井中的上下分层流动或环状流动^[1-2]。最近几十年,在垂直油井、水平圆管原油输送中两相或多相流动规律等方面的研究较多,并出现了一些实验和数值模拟成果^[3-4]。随着水平井在我国的投入使用,水平井中两相或多相流体流动规律研究也受到了重视。水平井流体流动特征与垂直井及水平圆管的情况有较大差别。因此,开展水平井中油水两相层流的瞬态数值模拟研究,具有重要的实用价值。

关于水平井两相层流的流动规律数值模拟研究成果较少,但在具有相似特征的水平圆管两相层流研究方面,尤其是关于两相都是牛顿流体的上下分层管流问题的研究,成果较多。在国外,最早对油水两相流流动规律的研究,起源于 20 世纪初对稠油减阻输送的研究^[5]。最近 10 年,国内外对油水两相流的研究主要集中在对油水均为层流的分层流动的模拟和解析求解上,并考虑了各种可能的油水界面的形态及界面耦合条件^[6]。油水分离模型又可以分为 2 层、3 层和 4 层模型^[7-10]。

本文首先基于 N-S 方程和相应边界条件,构建了牛顿流体两相流的 2 层和 3 层分离模型,然后通过有限差分法和松弛迭代法(SOR)^[2,6],对各种模型方程进行了离散和求解,并模拟了水平井油水分层流速度场。

1 水力学基本模型

为简化起见,针对油水两相情况,假设圆管内为一维稳态流动,液体是不可压缩的(流体密度 ρ 为常数),流动时温度不变或变化较小(动力黏度 μ 为常数)。在直角坐标系下设流体流动的速度场为 (u_x, u_y, u_z) ,则

$$u_x = u_y = 0 \quad \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

对于牛顿流体,通过简化流体力学的 N-S 方程,得到上下 2 层牛顿流体均满足的方程为

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} - f_z = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho}{\mu} g \sin \alpha \quad (2)$$

式中: $\partial p / \partial z$ ——单位压降或压力梯度, $\partial p / \partial z < 0$; f_z ——单位质量流体的体积力; μ ——动力黏度, $\nu = \mu / \rho$ 是运动黏度; g ——重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; α ——圆管的倾角(输入端低于输出端,倾角为负数)。

收稿日期:2008-07-10

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA06Z231)

作者简介:张宏兵(1968—),男,安徽无为,副教授,博士,主要从事石油物探、测井及工程物探等研究。

2 分离模型

2.1 2层分离模型

2层分离模型是相对简单的模型(图1),广泛应用于油水两相体系的实验数据分析和参数的预测设计.在上下油水介质中,油相和水相都分别满足连续性方程和动量方程,其边界与界面耦合条件为:

- a. 边界条件. (a) 上层和下层流体的流速在管壁 ADB, ACB 上为 0 ;
(b) 在流场对称轴 y 轴上,有对称性条件

$$\left. \frac{\partial u_{zo}}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial u_{zw}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3)$$

式中下标 o 和 w 分别表示油和水.

- b. 界面耦合条件. (a) 流动时上下 2 层流体相互之间无滑移,则在界面上 $u_{zo} = u_{zw}$; (b) 由于上下 2 层流体在稳定的界面处相互作用,并假设流体只沿 z 轴流动而无径向流动,则沿界面处的应力在 z 轴方向的分量应该相等,从而有

$$\mu_o \frac{\partial u_{zo}}{\partial y} = \mu_w \frac{\partial u_{zw}}{\partial y} \quad (4)$$

式中 μ_o 和 μ_w 分别为上层和下层流体的动力黏度.

2.2 3层分离模型

在油水两相水平流动中,多数情况下混合流速处于不高不低水平,并出现几种重要的流型,如不完全分层流、不完全分散流和不完全混合流等.1997年,Vedapuri 等^[9]研究了油水两相分离流型中水层的高度,并且提出了油-混合层-水的 3 层物理模型(图2).此 3 层分离模型,除了上层、下层流体外,混合层流体也满足式(2),其边界与界面耦合条件为:

- a. 边界条件. (a) 上层、中间混合层和下层流体的流速在管壁 AEB, CFD, AC 和 BD 上为 0 ; (b) 在流场对称轴 y 轴上,有对称性条件

$$\left. \frac{\partial u_{zo}}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial u_{zh}}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial u_{zw}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (5)$$

式中下标 h 表示混合层.

- b. 界面耦合条件. (a) 流动时上下 2 层流体相互之间无滑移,则在界面 AB 上 $u_{zo} = u_{zh}$,在界面 CD 上 $u_{zh} = u_{zw}$; (b) 由于上下 2 层流体在稳定界面处相互作用,并假设流体只沿 z 轴流动而无径向流动,则沿界面处应力在 z 轴方向分量应该相等,从而在上下分界面 AB 和 CD 上有式(4)的应力平衡方程.

2.3 有限差分数值解

将圆管沿 x, y 轴上半径 m 等分,圆管划分为若干个网格,取最靠近边界网格为管壁,令

$$\Delta x = \Delta y = R/m$$

$$x_i = i \cdot \Delta x \quad y_j = R - j \cdot \Delta y \quad (i = 1, 2, \dots, m+1; j = 1, 2, \dots, 2m+1) \quad (6)$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ —— x 和 y 方向网格长度; R ——半径; x_i, y_j ——网格的 x 和 y 坐标值.直接求解离散化后得到的 $2m \times m$ 线性方程组是非常困难的,这里采用超松弛迭代法^[2,6].首先给定流速 u_z 的初值,然后开始迭代算法.对于 2 层分离模拟,流速参数迭代计算公式为

$$\begin{cases} u_{zoi,j} = \frac{\omega}{4} (u_{zoi-1,j} + u_{zoi,j-1} + u_{zoi+1,j} + u_{zoi,j+1}) - \frac{\omega}{4} \Delta x^2 \left(\frac{1}{\mu_o} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho_o}{\mu_o} g \sin \alpha \right) + (1-\omega) u_{zoi,j} & \text{(上层流体内网格处)} \\ u_{zoi,j} = u_{zwi,j} = \frac{\omega}{\mu_o + \mu_w} (\mu_o u_{zoi,j-1} + \mu_w u_{zwi,j+1}) + (1-\omega) u_{zoi,j} & \text{(上下流体分界面网格处)} \\ u_{zwi,j} = \frac{\omega}{4} (u_{zwi-1,j} + u_{zwi,j-1} + u_{zwi+1,j} + u_{zwi,j+1}) - \frac{\omega}{4} \Delta x^2 \left(\frac{1}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho_w}{\mu_w} g \sin \alpha \right) + (1-\omega) u_{zwi,j} & \text{(下层流体内网格处)} \\ u_{z0,j} = \frac{-u_{z2,j} + 4u_{z1,j}}{3} & \text{(对称轴网格处)} \end{cases} \quad (7)$$

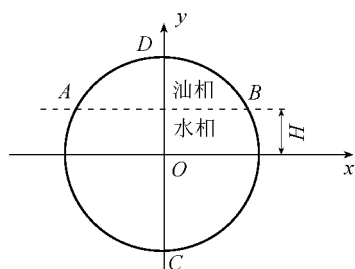


图1 2层分离模型

Fig. 1 Two-layer segregated model

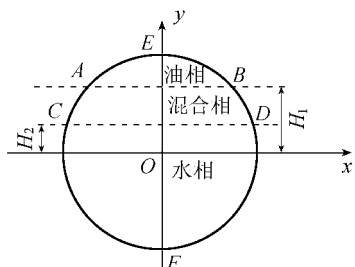


图2 3层分离模型

Fig. 2 Three-layer segregated model

式中 ω 是松弛因子,且 $1 < \omega < 2$. 反复迭代计算,直到满足终止迭代条件,即

$$\max_{i,j} |u_{zi,j}^{k+1} - u_{zi,j}^k| < \varepsilon \quad (k = 0, 1, 2, \cdots)$$

(8)

这里 ε 为迭代控制精度,可以为任意小的正数. 该参数取值偏大则达不到精度要求,取值偏小则收敛太慢,一般取 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 为宜. 对于 3 层分离模拟,除了上述 2 层分离模拟流速参数迭代计算公式,还需要在中间层内和各界面上增加迭代计算公式.

3 速度场模拟结果

本文油水 2 层分层流数值模拟所采用的参数为 $R = 0.062 \text{ m}$, $H = 0.02 \text{ m}$ 和 -0.02 m , $\mu_w = 0.005 \text{ Pa/s}$, $\mu_o = 0.05 \text{ Pa/s}$, $\partial p / \partial z = -100 \text{ Pa/m}$. 2 层分离模型的模拟结果如图 3 所示,图中水平 x 方向和垂直 y 方向的数值范围都是 $(-0.062, 0.062)$.

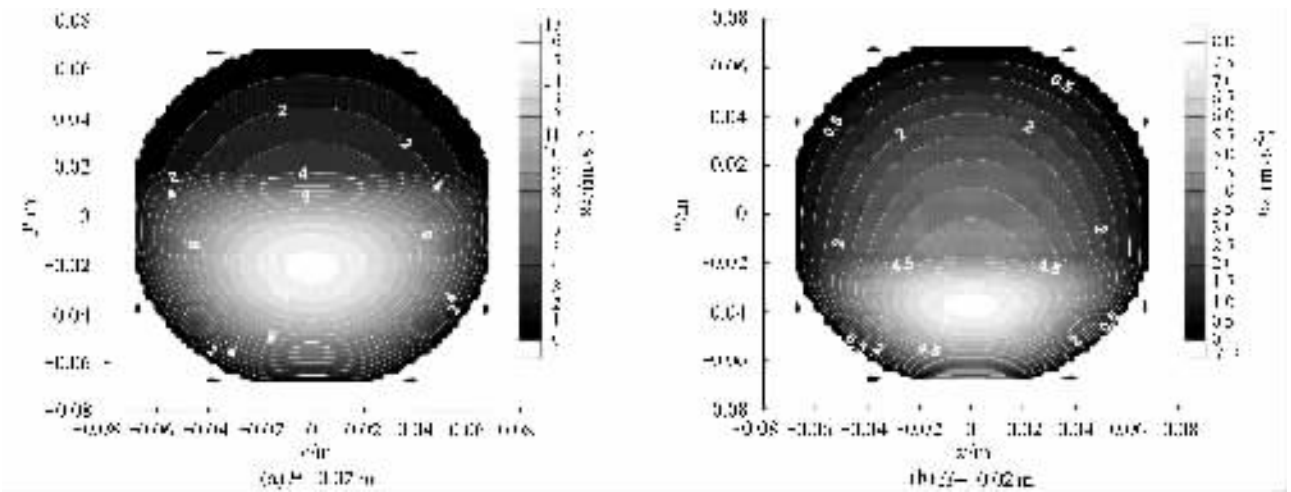


图 3 2 层分离模型的模拟结果

Fig. 3 Simulated results for two-layer segregated model

由图 3 可知,由于分界面高度不同,两者的速度绝对值差别比较大. 通过计算可知:图 3(a)中油和水的流量分别为 $0.010 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.067 \text{ m}^3/\text{s}$,总流量为 $0.076 \text{ m}^3/\text{s}$,持水率为 86.5% . 图 3(b)中油和水的流量分别为 $0.020 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$,总流量为 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$,持水率为 52.4% . 从式(2)可以看出,影响分层流速度场的主要因素是压降、黏度和水平井倾角等,表 1 为不同压降情况下的分层流流动参数模拟结果.

表 1 不同压降情况下的分层流流动参数模拟结果

Table 1 Simulated results of parameters for stratified flows under various pressure drop values

压降/ ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	持水率/ %	持油率/ %	水相平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	油相平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
-60	0.0362	92.815	7.185	3.961	0.721
-80	0.0481	92.830	7.170	5.268	0.957
-100	0.0762	86.472	13.528	7.772	2.861
-120	0.0872	84.481	15.519	8.689	3.755
-140	0.0861	92.117	7.883	9.359	1.884
-160	0.0964	92.568	7.432	10.534	1.990
-180	0.1076	92.765	7.235	11.776	2.161
-200	0.1191	92.847	7.153	13.052	2.366

采用 3 层分离模型时, $H_1 = 0.02 \text{ m}$, $H_2 = 0.01 \text{ m}$ 和 -0.01 m ,混合层黏度 $\mu_h = 0.015 \text{ Pa/s}$,其他参数与 2 层分离模型使用的相同,模拟结果如图 4 所示.

从图 4 可以看出,在上下流体层中间出现一层中等速度的混合层,上部流体层流速与图 3(a)2 层模型的基本相等,而下部流体层流速小于图 3(a)2 层模型的流速. 当中间混合层厚度增大时,这种特点更加明显(图 4(b)).

4 结 论

- a. 通过有限差分 and 超松弛迭代法求解水平井油水两相分层流的 N-S 方程及界面耦合条件,可以获得稳定的油水两相的速度场. 同时,油水两相分界面的位置决定于水平井内压降、液相黏度和水平井倾角等参数的大小,尤其是压降. 压降会对圆井截面上流量大小产生影响.
- b. 2 层和 3 层分离模型的模拟结果有一些差别,主要反映在中间混合层和下部流体层的流速上. 上部流

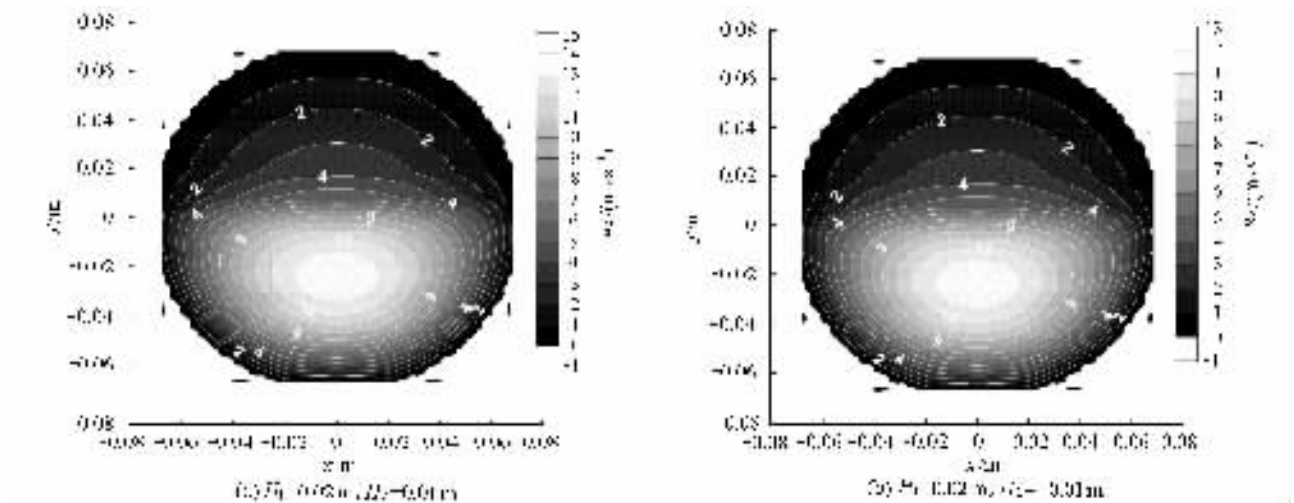


图4 3层分离模型的模拟结果

Fig. 4 Simulated results for three-layer segregated model

体层的流速基本没有变化,而下部流体层的流速变小.中间混合层和下部流体层的流速主要受混合层厚度与混合层黏度的影响.因此,建立解释模型需要考虑不同分离模型的流速场分布特征.

参考文献:

- [1] 徐孝轩,宫敬.水平管中油水两相流动研究进展[J].化工机械,2006,33(1):59-64.
- [2] 黄卫星,陈文梅.工程流体力学[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [3] 金宁德,吴伟,田树祥,等.基于运动波理论辨识垂直上升管中油水两相流流型[J].大庆石油学院学报,2001,25(3):41-45.
- [4] 陈杰,于达,严大凡.油-水两相流流型转换研究[J].水动力学研究与进展,2003,18(3):355-364.
- [5] BRAUNER N, MOALEM D. Two phase liquid-liquid stratified flow[J]. Phys Chem Hydrodynamics, 1989,11:487-506.
- [6] 贺成才.圆管分层流的数值模拟[J].油气储运,2002,21(6):18-19.
- [7] 康万利,刘忠和,刘国权.国外水平管内油水两相流压降模型研究进展[J].大庆石油学院学报,2006,30(5):20-23.
- [8] TAITTEL Y. A theoretical approach to the Lockhart-Martinelli correlation for stratified flow[J]. Int J Multiphase Flow,1976,2:591-599.
- [9] VEDAPURI D, BESSETTE D, JEPSON W P. A segregated flow model to predict water layer thickness in oil-water flows in horizontal and slightly inclined pipes[J]. Multiphase 97,1997,33:75-105.
- [10] LOVICK J, ANGELI P. Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil-water flows[J]. Int J Multiphase Flow,2004,30:139-157.

Numerical simulation of velocity fields of oil-water stratified flows in horizontal wells

ZHANG Hong-bing¹, CHEN Lu-lu¹, SHANG Zuo-ping¹, XIE Rong-hua², LIU Xing-bin²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Daqing Oilfield Co., Ltd. of CNPC, Daqing 163458, China)

Abstract: Two-layer and three-layer segregated models were established for two-phase Newtonian fluid-Newtonian fluid flows based on the N-S equations and the coupling interface conditions. The finite-difference and successive over-relaxation methods were employed to disperse and solve the equations of the two models. The velocity fields of two-phase oil-water stratified flows in horizontal wells were simulated. The simulated results show that the velocity of the fluid with smaller viscosity is quicker because of the pressure gradient in the horizontal wells, and the differences of the flows and the phase holdups are larger at different heights along the interface. In regard to the simulated results of the two-layer and three-layer segregated models, there are some differences between the local characteristics of the interface, and the absolute values of the whole velocity fields are different.

Key words: horizontal well; oil-water stratified flow; segregated model; velocity field; numerical simulation