

原油脱水技术数值研究

李朝阳¹ 马贵阳¹ 陈 林² 李 巧³ 郭艳林²

1. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001

2. 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610017

摘要:

为了解决油田后期开发中含水率较高、原油提纯困难等问题,对含水原油进行研究是必要的。通过密度差、沉降分离等方法对原油进行脱水。目前原油脱水的方法主要有重力法、离心法、化学破乳法、电破乳法、升温破乳法、润湿聚结法等,重力分离和离心式分离器被广泛应用于油田开发中。利用 CFD 方法对波形管、螺旋管油水分离进行数值模拟,得到了油水分离规律:波形管中第 10 个波谷处出现明显油水分离,在波峰处出现最大含油率,波谷处出现最大含水率;螺旋管中,在管道外侧偏下方出现最大分离现象。

关键词:

脱水技术;数值研究;螺旋管

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2011)05-0068-04

0 前言

在油田开采后期,为了提高产油量,需要采用水驱、二氧化碳驱等方法开采原油^[1],大量的水及一些杂质同原油一起开采出来,这给油水分离增加了一定难度。原油中所含水分主要以“油包水”状态存在着,降低了原油的脱水效果。经过初步处理后,可以利用油水密度差法、沉降分离法等方法对原油进行处理。目前原油脱水的方法主要有重力沉降分离、离心力分离、化学破乳、电破乳、升温破乳、润湿聚结等。重力分离具有无动力、无污染、运行费用低等优点^[2]。离心式分离器体积小、分离效率高,在油田开发中得到了广泛应用^[3-4]。

目前在实验室中对油水分离进行了一定研究,取得了一些成果。因费用高且管内具体分离特征和流体

流动情况无法确定,而存在不足。随着计算机技术和计算流体力学迅速结合,数值研究方法开始应用于原油脱水的研究^[5-7]。在前人的基础上,利用 CFD 方法采用 VOF 模型对波形管、螺旋管油水分离进行数值模拟,得到了油水分离规律。

1 基本方程

1.1 采用 VOF 模型

由于油水不相容,且水相含率较大,采用 VOF 模型。

体积分数方程:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nu_q \nabla \alpha_q = \frac{s_{\alpha_q}}{\rho_q} + \frac{1}{\rho_q} \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

式中 $\dot{m}_{pq}$ ——p 相到 q 相的质量输送;

收稿日期:

2011-02-08

基金项目:

辽宁省教育厅资助项目(L2010245)

作者简介:

李朝阳(1984-),男,安徽亳州人,在读硕士研究生,主要从事原油脱水方面研究与设计工作。

$\dot{m}_{qp}$ ——q 相到 p 相的质量输送;

μ ——湍流粘度, Pa·s;

v ——速度, m/s;

p、q(下标)——液体相 p、q。

如果相下标用 1、2 表示且第二相的体积分数被跟踪, 每一单元中的密度为:

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (2)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) \\ &= -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \end{aligned} \quad (3)$$

表面张力:

$$F_{vol} = \sigma \vec{\gamma} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{0.5(\rho_i + \rho_j)} \quad (4)$$

式中 σ ——表面张力系数;

F_{vol} ——表面张力, N。

表面法相量:

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos \theta + \hat{t}_w \sin \theta_w \quad (5)$$

式中 $\hat{n}$ ——壁面单位法向量;

$\hat{t}_w$ ——壁面单位切向量;

θ_w ——油水接触角。

1.2 标准 k-ε 模型

对于密度比接近 1 的两相流, 采用目前广泛使用的标准 k-ε 模型。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \mu_i)}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \\ & \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \mu_i)}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (6)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

湍流粘度:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

其中

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right), G_b = \beta_g \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i},$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, Y_M = 2\rho \varepsilon M_i^2, M_i = \sqrt{\frac{k}{\alpha^2}}$$

式中 ρ ——密度, kg/m³;

k ——湍动能, J;

u_i, u_j ——时均速度, m/s;

μ_t ——湍流粘度, Pa·s;

x_i, x_j ——空间坐标;

G_k ——平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项;

G_b ——浮力引起的湍动能 k 的产生项;

Pr_t ——湍动普朗特数, 取 0.85;

Y_M ——可压缩湍流脉动对总耗散率的影响;

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu$ ——经验常数, 取 1.44、1.92、0.09、0.09;

g_i ——重力加速度在第 i 方向的分量;

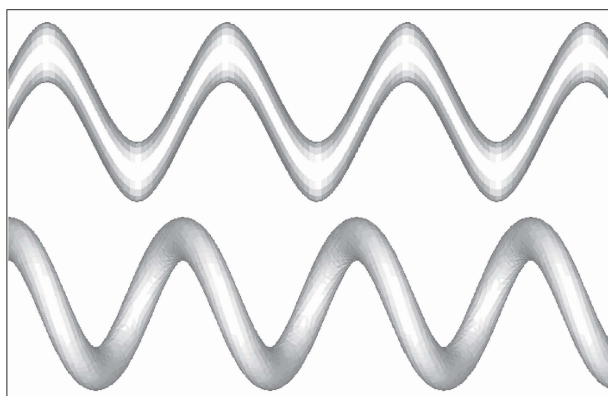
β ——热膨胀系数;

M_i ——湍动马赫数;

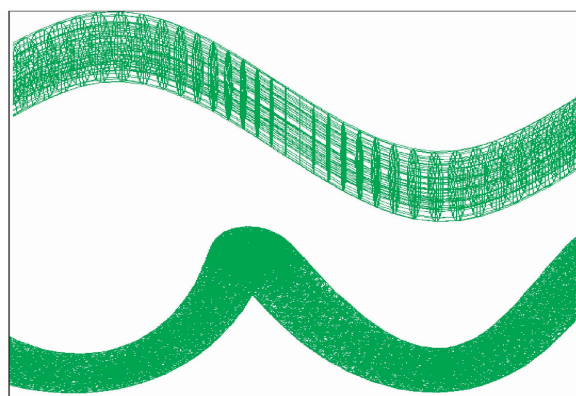
α ——声速, m。

2 模拟结果及分析

波形管进口含水率 20%、采用 2 m/s 速度入口, 出口为自由出流; 螺旋管进口含水率 20%、采用 2 m/s 速度入口, 出口为自由出流。波形管管径、波高均为 0.06 m, 波长 0.3 m, 管长 15 m; 螺旋管管径 0.06 m, 螺



a) 管道局部模型



b) 网格局部放大图

图 1 管道模型

距 0.3 m, 回转半径 0.06 m, 50 圈数。管道模型见图 1a), 采用四面体和六面体结合的网格对计算模型进行网格划分, 局部网格放大图见图 1b)。

2.1 波形管

图 2 为管壁处水相体积分布。由图 2 可知, 原油刚进入波形管时, 油水分离现象不明显, 在第 10 个波长处出现第一个高含水区。稍后在每隔一定波长出现一个高含水区。这是波纹状管使过流断面发生变化, 影响原油速度的大小和方向, 增加了油滴的碰撞率。通过凝结吸附作用, 油滴在运动过程中不断增大, 在波纹管表面形成油膜, 到达一定管长时出现最大油水分离现象。由于流体的不断冲刷, 其沿板面脱落, 加之重力影

响最终波谷处出现最大含水率。由图 3 可以明显看出, 在原油进入管道 10 个波长时才发生明显油水分离, 每间隔一定波长, 在外壁出现高含水区。从图 4 可以看出, 高含水区出现在波谷处。综合图 3~4 可知, 波形管中油水在波谷偏下出现最大油水分离现象。

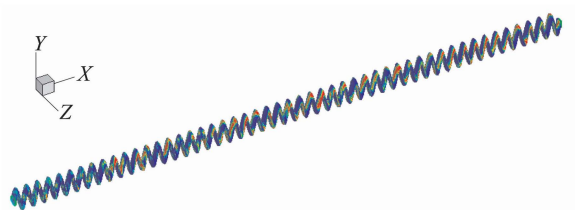


图 2 波形管管壁水相体积分数

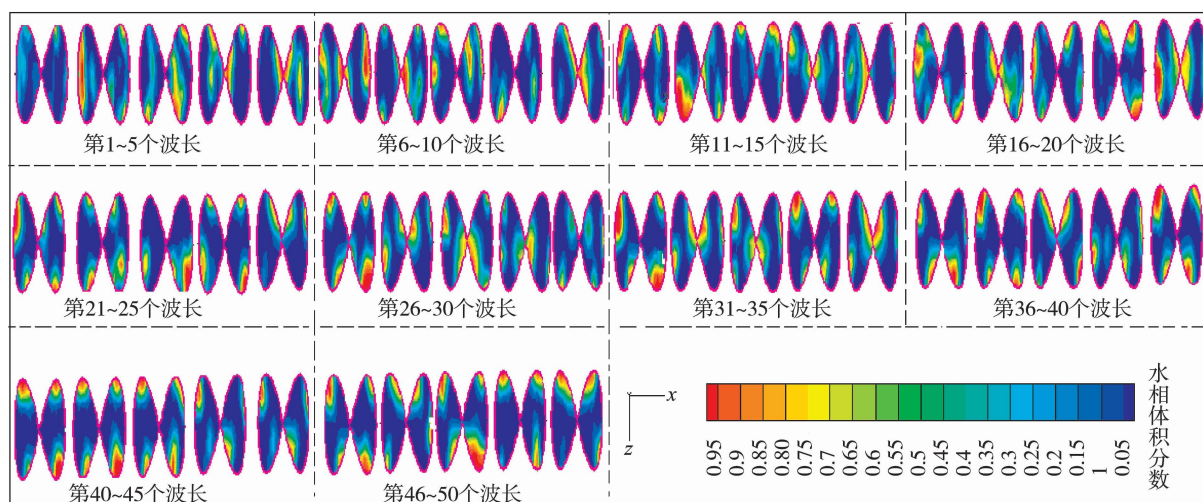


图 3 $Y=0$ 切面水的体积分布

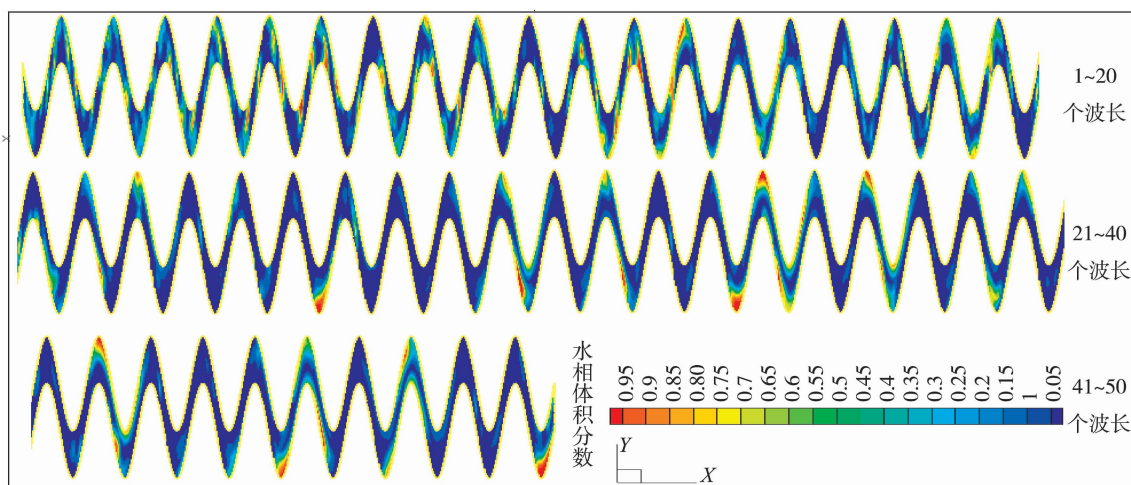


图 4 $Z=0$ 切面水的体积分布

2.2 螺旋管

图 5 为螺旋管壁水相体积分布, 原油进入螺旋管后, 在离心力及重力作用下, 开始出现油水分离。由于重力和离心力共同作用, 出现油水分离的距离比波形管要短, 分离效果要好。在沿轴向内侧偏下方出现最

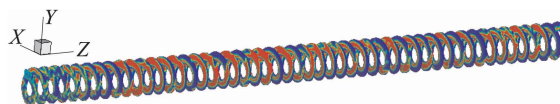
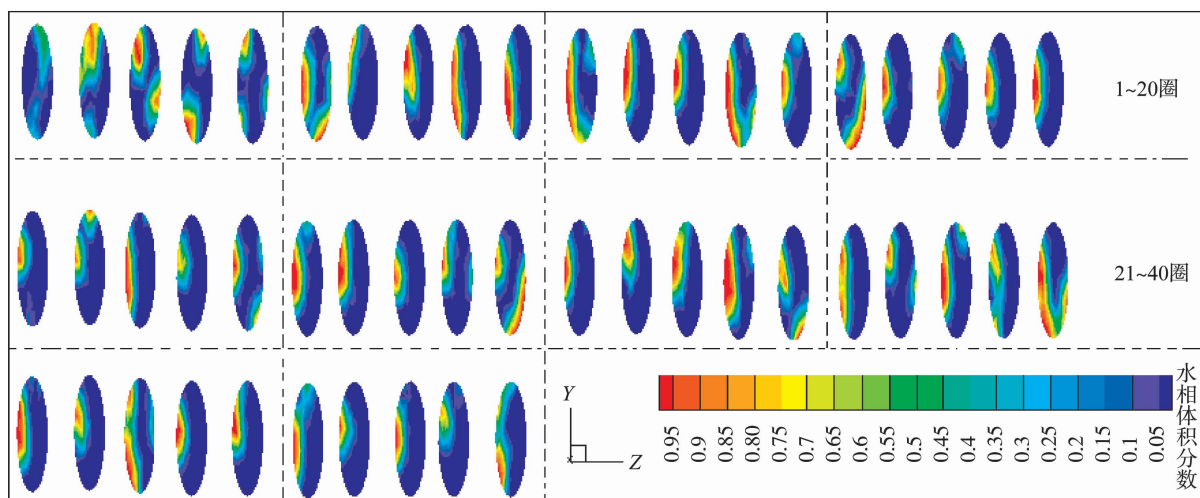
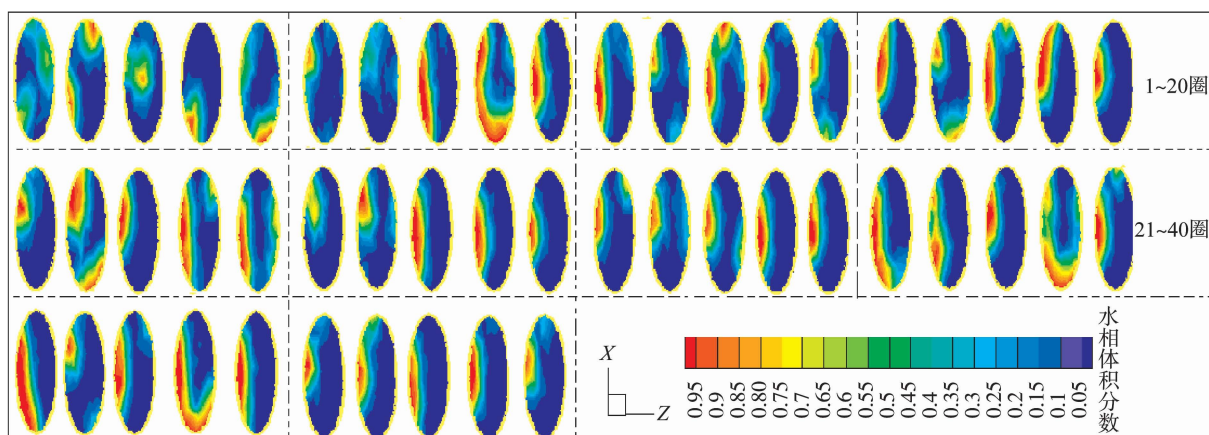


图 5 螺旋管壁水相体积分布图

图6 $X=0$ 切面上水相体积分布图图7 $Y=0$ 切面上水相体积分布图

大含水率。图6~7给出了管道各个截面的水相体积分布。由图6~7可知管道形状变化,使已分离的油水出现了再混合的情况。为了避免该情况,需要在螺旋管上一定距离处开设出流口。综合图6~7可知,第9、24、36、41圈处油水分离现象比较明显且稳定,在此位置附近开设出流口比较合理。

3 结论

a)波形管中,在第10个波谷处出现明显油水分离,在波峰处出现最大含油率,波谷处出现最大含水率。

b)螺旋管中,由于重力和离心力共同作用,在管道外侧偏下方出现最大分离现象。为了避免油水再混合的现象,第9、24、36、41圈附近开设出流口较合理。

本文未考虑出流口的情况下对管道内的原油脱水现象进行了数值模拟,这将与实际情况有一定差别,但也能反映了管道内的油水分离趋势,为原油脱

水技术的改进提供了一定的理论基础。

参考文献:

- [1] 王晓强,景军军.三相分离器在天然气处理厂的应用[J].天然气与石油,2009,27(2):26-29,68.
- [2] 孙治谦,王振波,吴存仙,等.油水重力分离过程油滴浮升规律的实验研究[J].过程工程学报.2009,9(1):23-27.
- [3] 孙莉英.含油废水处理技术进展[J].华中科技大学学报,2002,19(2):87-90.
- [4] 曹建树,李卫清.新型波纹板油水分离器的应用研究[J].流体机械,2005,33(9):1-3.
- [5] 王国栋,何利民,吕宇玲,等.重力式分离器的分离特性研究[J].石油学报,2006,27(6):112-115.
- [6] 王福军.计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 陈国谦,李行伟.热泡数值研究[J].水动力学研究与进展(A辑)2000,15(4):411-423.