

文章编号: 1000-4874(2004)04-0540-07

油水分离技术研究之一 ——直管和螺旋管的数值模拟*

周永¹, 吴应湘¹, 郑之初¹, 刘秋生², 李清平³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;

2. 清华大学工程力学系, 北京 100084;

3. 中海石油研究中心, 北京 100027)

摘 要: 本文采用数值模拟的方法研究油水混合物在直管和螺旋管中的流动状况。计算采用 Euler-Euler 法和 Euler 模型; 支配油水分离两相流动的基本方程包括连续方程和动量方程, 湍流模型采用多相流中混合型 k - 模式, 基本方程的离散和求解采用 SIMPLE 算法。利用 Fluent 软件, 以直管和螺旋管为例进行了计算, 获得了初步计算结果。计算表明, 本文所用方法可以较好地模拟直管中油水在重力作用下的分离, 以及螺旋分离器中油水在重力和离心力共同作用下的分离现象。并可为实验研究提供参考。

关 键 词: 数值模拟; 油水分离; 螺旋管; 直管

中图分类号: O359 文献标识码: A

Research on oil-water separation technique I— numerical simulation in both straight and helical pips

ZHOU Yong¹, WU Ying-xiang¹, ZHENG Zhi-chu¹,
LIU Qiu-sheng², LI Qing-ping³

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100080, China

2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University,
Beijing 100084, China

3. Research Center, China National Offshore Oil CORP.,
Beijing 100027, China)

Abstract: Separation of oil-water mixture flow in both straight and helical pipes is studied numerically, in which the Euler-Euler method and Euler model are adopted. The basic control equations for the oil-water two-phase flow separation consist of the continuity equations and the momentum equations. The k - mode is used as the turbulence model and the SIMPLE algorithm is applied for the discretization and solution of the basic control equations. Some numerical results for both straight and helical pipes are obtained with the commercial software Flu-

* 收稿日期: 2004-03-29(2004-04-27 修改稿)

基金项目: 中国科学院与中国海洋石油总公司科技合作项目; 中国科学院“十五”重大项目(K1CX2-SW-L03)

作者简介: 周永(1979~), 男, 北京人, 硕士研究生。

ent. The results indicate that the methods proposed in this paper may simulate the oil-water separation in the straight pipe by gravitational force and that in the helical pipe by both gravitational and centrifugal force, and the results may afford reference to the experiment.

Key words: numerical simulation; oil-water separation; helical pipe; straight pipe

1 引言

随着石油工业的发展,陆上油田油、气、水、砂分离技术和生产工艺日臻完善。但海洋石油的大规模开采,对油、气、水的多相分离技术又提出了新的挑战。这是因为海上油田油气水分离装置安装在生产平台上,要求三相分离器的结构简单、体积小、重量轻、分离效率高、处理量大、容易安装维护、安全可靠,以减少平台造价和维护费用。这些要求使分离器的研制成为海洋油气开采和输送中亟待解决的关键技术问题^[1]。

人们通常采用重力分离(利用各相密度不同产生的浮力)和离心分离(利用物质旋转运动产生的离心力)等原理来实现油、气、水三相介质分离。我们认为要实现海洋石油开采所要求的高效分离,各种分离原理综合使用,取长补短,是行之有效的办法^[2]。为此,我们提出了结合离心、重力、膨胀、振动多种分离原理于一体的高效分离器设计方案(见图1)。此分离器装置主体为一长方体封闭容器,隔板将容器分成两个腔室,用于处理不同比例的油水混合物。容器外环绕T形管装置,油气水混合物由主管入口进入T形管,气体首先经支管聚集到上层管道,并由气体喷嘴射入容器内。油水混合物则进入螺旋管离心分离,在螺旋管外壁适当部位开孔,将螺旋管外侧的水导出到容器中,并在腔室内重力沉降。

为了达到该分离器的性能指标,需要详细研究分离器各部件以及整体设备的分离效果。因此,在进行实验的同时,我们与清华大学流体力学实验室合作进行了数值模拟研究。本文主要介绍采用数值模拟方法研究多相分离器性能的一些初步计算结果,并简单介绍相关的实验研究工作。

2 多相分离实验简介

实验工作在中科院力学所的多相分离实验室进

行。实验设备主管直径50mm,管长15m,管内气体最大流速可到50m/s,液体最大流速可达2m/s。可以模拟多种不同流态的气液两相流动,以及各种配比的油水和油气水混合流动,并可进行稠油实验(如图2)。

我们使用白油和自来水,现已对两种螺旋管(1号管回转半径400mm,管径40mm;2号管回转半径150mm,管径25mm)进行了油水分离的模拟实验。实验用油为LP-14白油(20℃下密度836kg/m³;粘性系数0.025kg/m·s)和PS白油(20℃下密度874kg/m³;粘性系数0.08kg/m·s),水中掺入高锰酸钾以区别白油和水。实验中的油水混合物含水率10%~90%。主管内混合液流速最大为1.5m/s。

3 油-水两相流的基本方程

对于油水分离问题,目前,要精确地模拟这种极为复杂的多相流动几乎是不可能的。鉴于本问题的特点,采用Euler-Euler法和Euler模型进行数值模拟,并采用分相流模型来描述分离器中的油-水两相流动^[3~7]。

3.1 连续方程

连续方程体现为各相的组分方程。油、水两相的体积组分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_q q) + \nabla \cdot (\rho_q \vec{v}_q) = \dot{m}_{pq} \quad (1)$$

式中,下标 q 代表第 q 相物质, p 代表第 p 相物质, q 代表 q 相的含率, ρ_q 代表 q 相的密度, \vec{v}_q 代表 q 相的速度, \dot{m}_{pq} 代表 p 相到 q 相的质量传递,即 q 相物质的生成率。 $\sum_q q = 1, \dot{m}_{pq} = -\dot{m}_{qp}, \dot{m}_{pp} = 0, \dot{m}_{pq} = 0$ 。

3.2 动量方程

考虑重力作用的任一相 q 的动量守恒方程为:

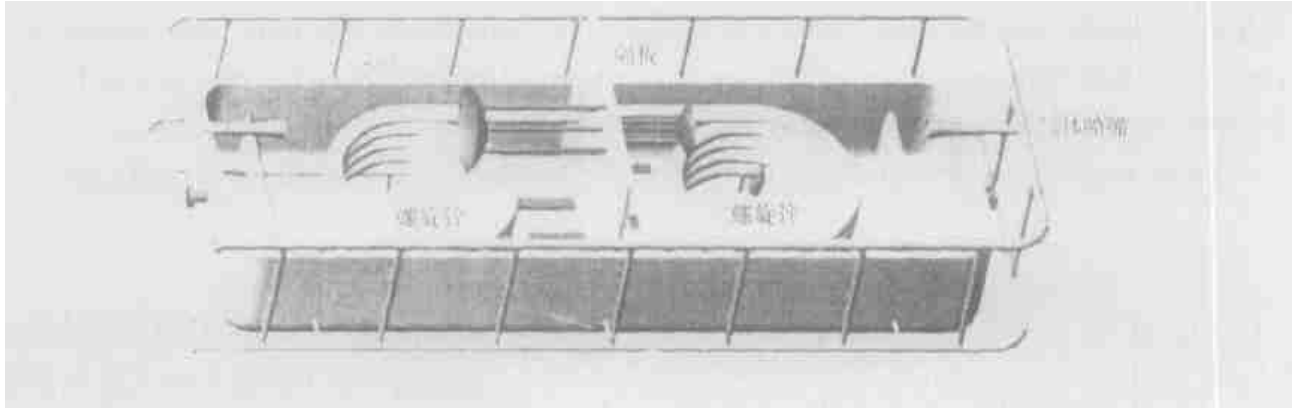


图1 分离器模型

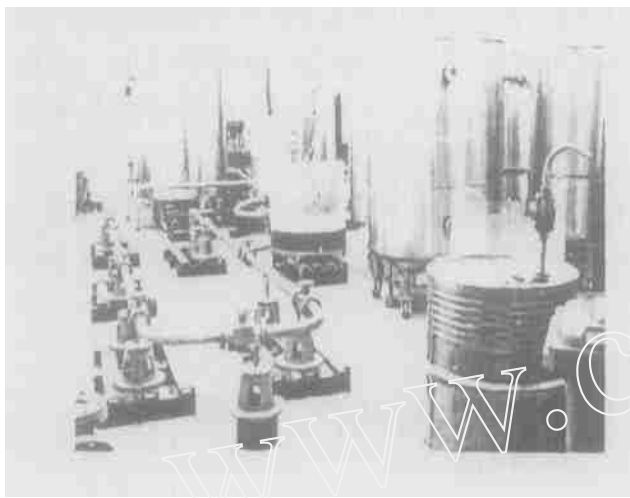


图2 多相分离实验系统

式中,描述油泡或水滴迟豫时间的参数 τ_{pq} 定义为:

$$\tau_{pq} = \frac{(\rho_p + \rho_q) ((d_p + d_q)/2)^2}{18(\mu_p + \mu_q)} \quad (4)$$

式中 d_p 是 p 相粒子的直径, 参数 f 定义为: $f = C_D Re/24$, 阻力系数 C_D 取为^[8]:

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15 Re^{0.687})/Re & Re < 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (5)$$

若连续相为 q , 离散相为 p , 则相对 Reynolds 数的定义为:

$$Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_p}{\mu_q} \quad (6)$$

本文计算方法中可以考虑作用在离散相小滴上的升力。对于大粒子而言, 这种升力是重要的。连续相 q 作用在离散相 p 的升力按下式计算^[9]:

$$F_{lift} = -0.5 \rho_p |\vec{v}_q - \vec{v}_p| \times (\nabla \times \vec{v}_q) \quad (7)$$

动量守恒方程中的附加质量力的计算公式为:

$$F_{vm} = \frac{1}{2} \rho_p \left(\frac{d\vec{v}_q}{dt} - \frac{d\vec{v}_p}{dt} \right) \quad (8)$$

上式中下标 q 表示对 q 相的质点导数。

3.3 湍流模型

混合湍流模型是单相流 $k-\epsilon$ 模型的最先推广, 可用于多相的分离、分层流以及相间密度比接近于 1 的情况。这些情况下, 利用混合物特性和混合速度足以

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\rho_q \vec{v}_q^2) = -\nabla(\rho q p) -$$

$$\nabla \cdot \vec{\tau}_q + \rho_q \vec{g} + \rho_q (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift, q} + \vec{F}_{vm, q}) + K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} \quad (2)$$

其中, g 是重力加速度, τ_p 是 q 相剪应力张量, \vec{F}_q 是 q 相体积力, $\vec{F}_{lift, q}$ 是升力, $\vec{F}_{vm, q}$ 是附加质量力, K_{pq} 是相间动量交换系数, p 是各相共享的压力。 \vec{v}_{pq} 是相间速度, 定义为: 如果 $\dot{m}_{pq} > 0$ (即 p 相的质量被传递到 q 相), 则 $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p$, 否则 $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_q$ 。相间动量交换系数 K_{pq} 依赖于磨擦、压力、内聚力和其他的影响。对油水两相流, 每个二次相都假定为油泡或水滴, 相间交换系数可以写成如下形式^[8]:

$$K_{pq} = \rho_p (\rho_p + \rho_q) f / \tau_{pq} \quad (3)$$

捕捉到湍流的重要特性^[10]。本文采用比较简单的混合 k - ϵ 模型是最合适的。

描述混合模型中的 k 和 ϵ 的方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \epsilon_m \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_m \epsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\epsilon} \nabla \epsilon \right) + \frac{\rho}{k} (C_1 G_{k,m} - C_2 \epsilon_m) \quad (10)$$

其中混合密度和速度, ρ_m 和 \vec{v}_m 按下式计算:

$$\rho_m = \sum_i \rho_i v_i$$

$$\vec{v}_m = \sum_i v_i \vec{v}_i / \sum_i v_i \quad (11)$$

i 取 p 相和 q 相, 湍流粘性系数 $\mu_{t,m}$ 的计算公式是:

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu k^2 / \epsilon \quad (12)$$

湍动能生成率 $G_{k,m}$ 为:

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} [\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T] : \nabla \vec{v}_m \quad (13)$$

这些方程中的常数与单相流 k - ϵ 模型中的相同^[11]。

3.4 边界条件

计算的边界条件包括进口、出口和固壁面边界条件:进口给定所有物理量,且均匀分布;出口设为充分发展条件,即所有物理量沿流向的方向导数为零;固壁上给定粘附条件,即速度和湍流度均为零。

4 数值求解方法

本文利用 Fluent 软件进行油水分离计算。该程序中使用的是基于有限体积剖分的 SIMPLE 类算法^[12]。鉴于大家对此方法都很熟悉,通用部分不再

赘述。下面仅就本文中特有的部分加以说明。

4.1 有限体积单元划分

本文采用 Gambit 软件自动生成所需的体积单元。无论直管还是螺旋管,都首先在垂直管轴线(Z 方向)、相距 Z 的剖面(圆)内生成三角形网格,并从圆心至壁面逐步加密,以保证捕捉边界层特征。然后将各剖面的对应点相连,形成三棱柱单元。

4.2 基本方程的离散形式

控制方程组的每一个守恒方程都可写成相同的方程形式,即:对流项 = 扩散项 + 源项,按照 SIMPLE 类算法,它们可以写成统一的标量形式,而后按体积单元进行离散。对任一单元,计算点 P 上的任一物理量 ϕ_P 的方程的一般离散形式为:

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S +$$

$$a_T \phi_T + a_B \phi_B + b$$

其中, b 为系数,下标 P 表示计算点, E, W, N, S, T, B 分别为其相邻的东、西、北、南、上、下点。

4.3 数值计算方法

离散方程的求解采用 P - V 修正的分离求解算法^[13]。

5 计算结果及分析

计算是在 CPU 主频为 1.9G,内存 1G,硬盘 40G 的 P4 微机上进行的。计算中所取参数按照调研结果选定为:油的密度 889kg/m^3 ,粘性系数 $1.06\text{kg/m}\cdot\text{s}$;水的密度 998.2kg/m^3 ,粘性系数 $0.001003\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 。重力加速度 9.81m/s^2 。

5.1 直圆管中的油水分离

直管水平放置,为和实验室模拟实验结果比较,计算中管径 $D = 0.05\text{m}$,管长 $Z = 13\text{m}$ (Z 方向) ($Z/D = 260$)。本文给出平均水滴直径 $d = 0.1\text{mm}$,进口流速 $v = 1\text{m/s}$,含水率 30% 时的结果。计算结果如图 3~图 5 所示。图 3 给出了管轴线正下方,与轴线平行且距管壁 0.05mm 的直线上,油的体积组分沿管长方向的变化。由图可见,油水混合物进入管道后,由于重力的作用,油、水开始分离。沿管长方向开始一段,水的体积组分快速线性增加,而后减慢,约 4m 后又慢速线性增加,至约 10m 处,水的体积组分约为 95%。此值表明,此处基本为水,油的含量已经很少,基本完成分离。

图4和图5给出了沿管长不同截面上油的体积组分分布。由图可见,在 $z = 4\text{ m}$ 、 12 m 处,截面下部分别约有 1.3 mm 厚的高含水(近 90%)层。比较同一截面上的上下部,不难发现,上部的分离速度要比下部的分离速度更快些。

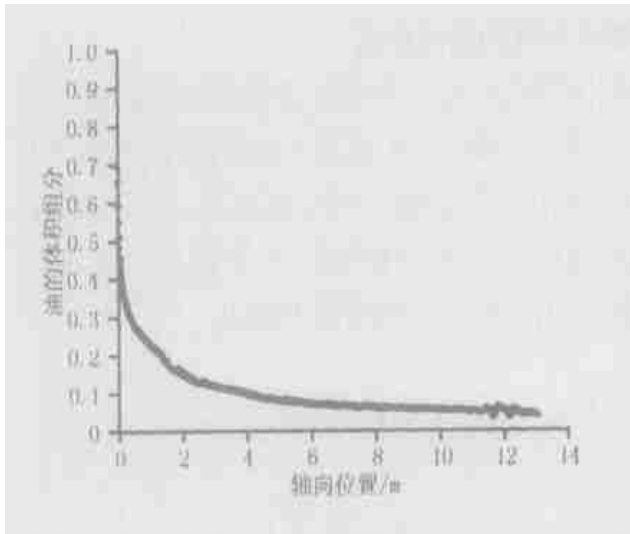


图3 近管下壁面油的体积组分沿轴向的变化

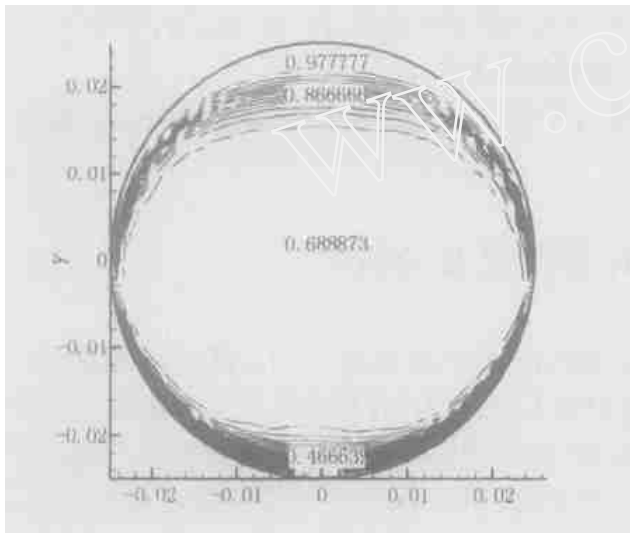


图4 $z = 4\text{ m}$ 截面上油的体积组分

我们在实验管路上安装了有机玻璃管可以观察油水的重力分离现象。图6所示为油水在直管中距离混和段 13 m 处有机玻璃管中油水分离流动的照片。可见在重力作用下,油水在管中分层是较快的,计算也基本反映了这种分层的过程。根据这种现象,我们设计了分流器装置,利用设置在其中的隔板将油水直接分层。我们也可利用此方法提高分离器的分离效率。

5.2 螺旋圆管中的油水分离

螺旋管分离器中的油水分离是在重力和离心力的共同作用下完成的。重力加速度和离心加速度的

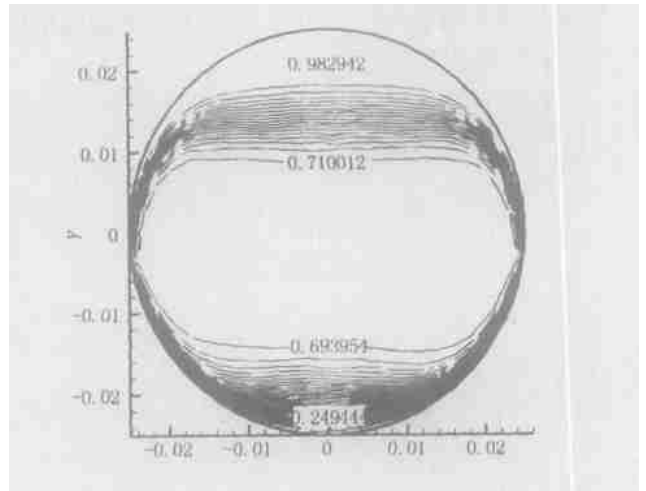


图5 $z = 12\text{ m}$ 截面上油的体积组分



图6 直管中油水在重力作用下的分离矢量和决定了分离效果。因此,离心加速度越大,分离效果越好。

已经设计制造的1号螺旋管分离器的几何形状如图7所示:为使螺旋管中流速大于主管中流速,因此设计的管径 $D = 40\text{ mm}$,螺旋半径 $R = 400\text{ mm}$,螺距 $t = 100\text{ mm}$,螺旋管根据需要可以设计多圈。给定含水率 30% ,油水混合物以 $v = 1\text{ m/s}$ 的平均流速从下方管口流入,从上方管口流出。沉积在一侧的水可以从管壁的开孔中引出,螺旋管上开孔的大小、数量及方向可自由控制。

为了研究平均水滴粒径对分离效果的影响,本文分别对平均粒径 $d = 0.1\text{ mm}$, 2 mm , 5 mm 进行了计算。由于计算量非常大,采用逐圈计算的方法。下面给出了第一圈中以进口截面为起点,沿螺旋方向 $= 90^\circ, 270^\circ$ 截面上的油的体积组分分布。 $d = 2\text{ mm}$ 和 $d = 5\text{ mm}$ 计算结果示于图8~图11。

比较不同平均粒径的计算结果,不难发现,平均水滴直径的影响是非常明显的。液滴直径越大,分离越快。当 $d = 5\text{ mm}$ 时,油水混合物运动不到一圈,管下部就出现了较大面积几乎全部为水的区域。而 $d = 0.1\text{ mm}$ 的情况下,分离效果则较差。

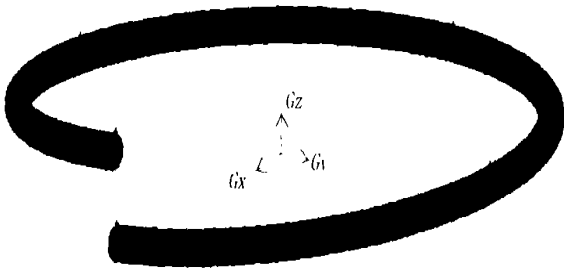
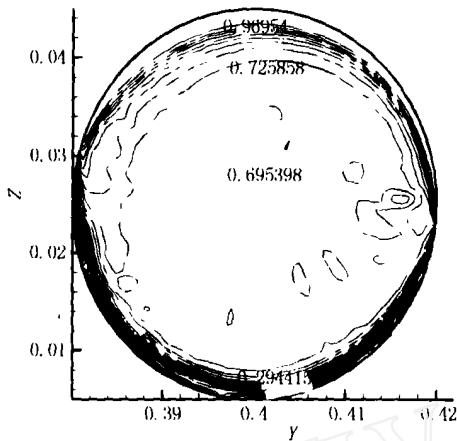
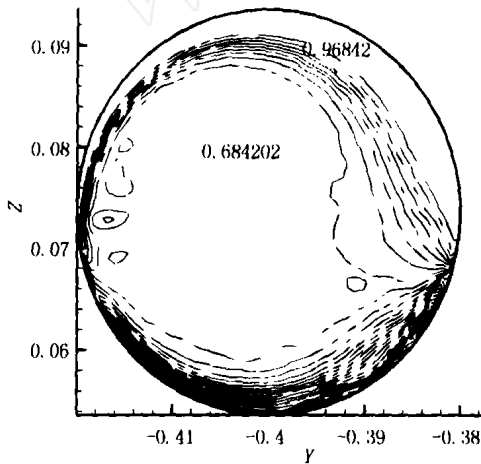
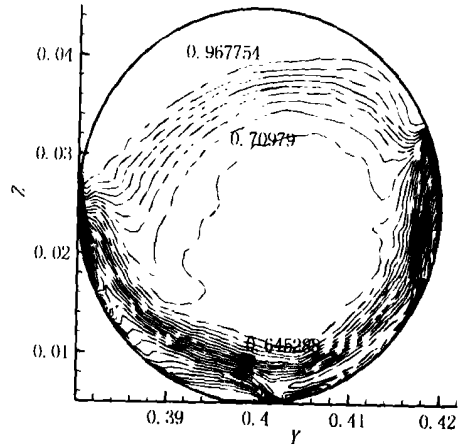
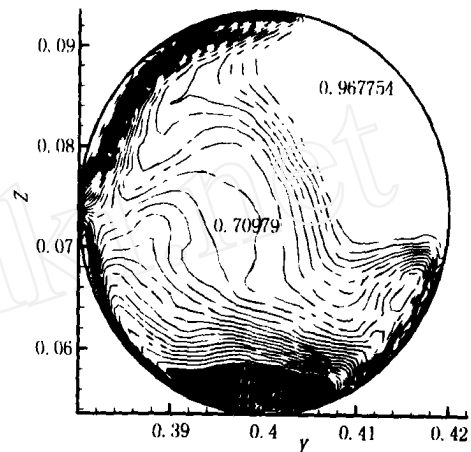


图7 螺旋管几何形状

图8 $d = 2 \text{ mm}$, $= 90^\circ$ 截面上油的体积组分图9 $d = 2 \text{ mm}$, $= 270^\circ$ 截面上油的体积组分

我们的螺旋管实验中,开孔的第一方案是在管壁外侧正中开孔(图12),将分离出来的水导出,使大部分的油留在管道中。从图8~图11中不难看出,由于在管道中油水分离是由重力和离心力共同决定的,因此管内的高含水层在管壁外侧偏下的地方;而且离心力越大,高含水层越靠近管壁外侧正中的位置。根据螺旋管的结构尺寸及管内流速不难推算,1号管可

图10 $d = 5 \text{ mm}$, $= 90^\circ$ 截面上油的体积组分图11 $d = 5 \text{ mm}$, $= 270^\circ$ 截面上油的体积组分

产生 $1g$ (1倍重力加速度),2号管可产生 $10g$ 的离心加速度。对于在“外侧正中”这种开孔方式来说,2号管的分离效果会好一些。实验结果显示,1号管分离后含水率降低不到 10% ,而2号管分离后含水率降低可超过 30% ;并且由于开孔位置在管壁外侧正中,使得不少油随水流出管外。因此,合理布置螺旋管的开孔位置是提高油水分离效率的一个重要的研究内容。根据现有的实验和计算结果,我们修正了螺旋管的设计参数。更多的实验的结果及分析将另文给出。

6 结论

综上所述,我们得出以下结论:

- (1) 计算结果表明,本文所用方法可以成功地模拟油水两相输运过程中在重力作用下的分离,以及螺旋分离器中在重力与离心力同时作用下的分离现象。
- (2) 数值模拟及实验结果表明,业已设计的直管

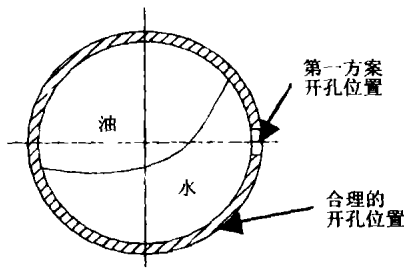


图 12 管壁开孔位置示意图

和螺旋管分离器均有一定的分离效果。比较实验和数值模拟结果,不仅可以得到原油中水相粒径分布平均值的定量结果,还可利用数值模拟方法完成分离器结构尺寸及流动参数的优化,最后获得高性能的分离装置。

(3) 就螺旋管分离器而言,由于离心加速度与管内流速的平方成正比,与螺旋半径成反比,提高分离效果的有效措施是增加管内流速,减小螺旋半径。但是,这两方面均受到一定的工程实际限制。流速过大,管内停留的时间大大缩短,管道压降也会增大,同时管内的湍流作用加强,会对分离产生相反的破坏作用。合理选择分离器的结构尺寸和流动参数,完成优化设计,是下一步需要深入研究的工作。

带孔螺旋管是本文中新型三相分离器的重要部件,油水混合物分离后将由螺旋管侧壁的开孔导出。侧壁孔口射流的流量及含水率直接反映了带孔螺旋管的分离效率。为此,在数值模拟确定流场的基础上,我们拟进行孔口射流的计算,并结合实验结果选择适当的计算模型,以此来确定螺旋管上开孔的位置、方向和孔径。因此我们将进一步开展带孔螺旋管的实验和计算研究工作,为部件的设计定型提供决策方案。

参 考 文 献:

- [1] 郑之初,周永,郭军,张军. 海上油气混输中的分离技术[A]. 第十七届全国水动力学研讨会暨第六届全国水动力学学术会议文集[C]. 2004. 830-837.
- [2] 苗承武. 高效油气集输与处理技术[M]. 北京:石油工业出版社,1997. 57-80.

- [3] ANDERSON T B, JACKSON R. A fluid mechanical description of fluidized beds[J]. I & EC Fundam, 1967, (6): 527-534.
- [4] BOWEN R M. Theory of Mixtures. Continuum Physics[M]. New York: Academic Press, 1976. 1-127.
- [5] 李然,李洪,李嘉,李克锋. 气液两相流理论在明渠水气界面计算中的应用[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2002, 17(1): 77-83.
- [6] DIAO Ming-jun, YANG Yong-quan, XU Wei-lin, WANG Wei, LIU Shar-jun. Numerical simulation on 2-D water-air two-phase flow over top outlet[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2002, 14(3): 60-63.
- [7] FAIRUZOV Y V. Numerical simulation of transient flow of two immiscible liquids in pipeline[J]. AIChE Journal, 2000, 46(7): 1332-1339.
- [8] SCHILLER L, NAUMANN Z. Z. Ver. Deutsch. Ing. [M]. 1935, (77): 318-325.
- [9] DREW D A, LAHEY R T. Particulate Two-Phase Flow[M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 1993. 509-566.
- [10] 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.
- [11] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[R]. London: Academic Press, 1972.
- [12] VANDOORMALL J P, RAITHBY G D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows[J]. Heat Transfer, 1984, (7): 147-163.
- [13] FERZIEGER J L, PERIC M. Computational Methods for Fluid Dynamics[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [14] 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 A 辑, 2003, 18(3): 355-364.
- [15] RACHID C. Viscous-gravity spreading of oil on water[J]. AIChE Journal, 2001, 47(2): 288-294.
- [16] BONIZZI M, ISSA R I. On The simulation of three-phase slug flow in nearly horizontal pipes using the multi-fluid model[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29: 1719-1747.
- [17] GAO H, GU H Y, GUO L J. Numerical study of stratified oil-water two-phase turbulent flow in a horizontal tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 749-754.