



# 柱型旋流器结构参数对其分离性能的影响

刘海飞, 吴应湘, 许晶禹, 张健, 张军, 郭军

(中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 100190, Email: liuhaifei@imech.ac.cn)

**摘要:** 传统的水力旋流器在工业上已经得到了广泛的应用, 但是对柱型旋流器的研究进行的非常少。影响柱型旋流器分离性能的因素很多, 但结构参数是影响其性能的关键因素之一。本文采用欧拉多相流模型和雷诺应力 (RSM) 湍流模型, 研究了结构参数 (长径比和入口位置) 对柱型旋流器油水分离特性的影响。计算结果表明, 长径比存在一个较优值; 随着入口位置接近溢流口, 分离性能得到较大改善。通过室内实验, 研究了柱型旋流器分流比对油水分离性能的影响。实验表明, 随着旋流器分流比的增大, 底流口液样中含油率逐渐降低, 而溢流口中含油率先增高后降低。这些结果对柱型油水旋流器的结构优化和提高柱型旋流器的油水分离效率有重要指导作用。

**关键词:** 柱型旋流器; 结构参数; 分流比; 含水率

## 1 引言

随着陆上油田的老化和海洋石油的大规模开采, 都对油、气、水的多相混输和分离技术提出了新的挑战。通过对国内几大油田的多相分离装置进行现场调研发现, 大多数油田的分离过程主要靠重力式和电解式的分离器<sup>[1]</sup>, 而这些分离器存在着设备体积庞大、需要多级组合分离、分离时间长等缺点<sup>[2-3]</sup>, 并不符合海上平台, 特别是深海平台上对油水分离设备的体积和重量的严格要求。因此, 发展紧凑型的高效油水分离器成为目前海洋工程研究的热点。

中国科学院力学研究所多相流实验室近期提出了将 T 型多分岔管路装置与柱型旋流器相结合的新型管道式油水分离器<sup>[4]</sup>。该分离器具有结构简单、体积小、重量轻和处理时间短等优点, 在油水处理和污水排放上有着广泛的应用前景。柱型旋流器 (LLCC) 是该新型管道式油水分离器的重要组成部分<sup>[5]</sup>。本文主要从数值模拟方面研究了结构参数 (长径比和入口位置) 对柱型旋流器油水分离特性的影响, 以及从实验上分析了柱型旋流器分流比对油水分离性能的影响。

## 2 数值模拟

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的进展为深入了解多相流动提供了

基础。日前有两种数值计算方法可以用于模拟旋流器内的多相流动：欧拉—拉格朗日方法和欧拉—欧拉方法。欧拉—拉格朗日方法中流体相被处理为连续相，通过直接求解时均纳维—斯托克斯方程，而离散相是通过计算流场中大量的粒子运动得到的。它的一个基本假设是，作为离散的第二相的体积比率应很低，可以忽略其对连续相的影响。然而，在实际情况中，第二相的体积比率通常都很高，相间作用力不能忽略，必须充分考虑。在研究中，第二相的体积率为 10%，因此采用能模拟第二相体积率较高情况下的欧拉—欧拉方法。计算在 CFD 软件 Fluent 6.3.26 中进行，所选择的计算介质的组成成分和相关物性参数为：主相为水，密度  $998.0 \text{ kg/m}^3$ ，黏度  $0.001 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ ；分散相为油，密度  $840 \text{ kg/m}^3$ ，黏度  $0.215 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 。

## 2.1 控制方程

连续方程和动量方程如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu \left( \nabla \mathbf{u} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \rho \bar{\mathbf{u}}^2 \right) \right] + \rho \bar{\mathbf{g}} \quad (2)$$

**湍流模型：**选择合适的湍流模型对于模拟流体在柱型旋流器内部的流动非常重要，其选择往往决定了模拟结果的可靠性。在液-液水力旋流器的数值模拟中，主要采用的湍流模型有标准  $\kappa\text{-}\epsilon$  模型<sup>[6]</sup>、RNG  $\kappa\text{-}\epsilon$  模型<sup>[7]</sup>、代数应力模型<sup>[8]</sup>以及雷诺应力模型<sup>[9-10]</sup>。通过对模拟结果与实验结果比较，得出了采用雷诺应力模型较优的结论<sup>[11]</sup>。雷诺应力模型（Reynolds Stress Model, RSM）完全抛弃基于各项同性涡黏性假设，直接模化湍流雷诺应力输运微分方程，并与连续方程和动量方程联立求解，能够较好地模拟旋流器内部流场，其输运方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u_k u_i u_j}) = P_{ij} + D_{ij} + \phi_{ij} - \epsilon_{ij} + F_{ij} \quad (3)$$

$$P_{ij} = -\rho \left( \overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \rho \overline{u_i u_j u_k} + p (\delta_{ki} \overline{u_j} + \delta_{jk} \overline{u_i}) \right] \quad (5)$$

$$\phi_{ij} = \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$\epsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} \quad (7)$$

$$F_{ij} = -2\rho \Omega_k \left( \overline{u_j u_m} \epsilon_{ikm} + \overline{u_i u_m} \epsilon_{jkm} \right) \quad (8)$$

式中： $P_{ij}$  为应力产生项； $D_{ij}$  为扩散项； $\phi_{ij}$  为压力应变项； $\epsilon_{ij}$  为黏性耗散项； $F_{ij}$  为旋转产生

项。

柱型旋流器的结构示意图如图 1 所示, 旋流器柱段直径  $D$  为 50mm, 切向入口直径  $D_i$  为 50mm (采用截面面积为 20% 的缩颈), 溢流口直径  $D_o$  为 25mm, 底流口直径  $D_u$  为 40mm。

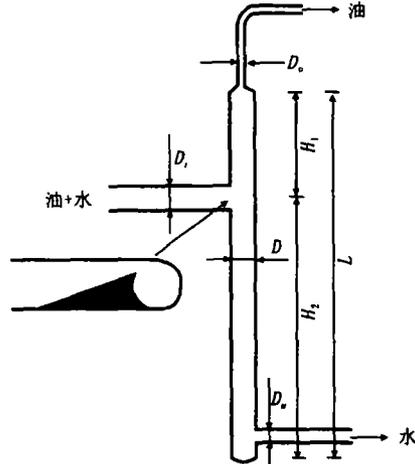


图 1 柱型旋流器结构

在数值模拟中, 柱型旋流器的柱段长度  $L$  分别取为  $10D$ 、 $15D$  和  $20D$ , 对应的  $H_1=2D$  和  $5D$  两种情况。针对每种结构分别进行编号, 为 NO1a~NO3b 六种不同的结构, 以研究入口管路位置和柱段长度对油水分离性能的影响 (表 1)。

表 1 LLCC 的结构尺寸

	NO1a	NO1b	NO2a	NO2b	NO3a	NO3b
$\tilde{L} = L/D$	10	10	15	15	20	20
$\tilde{H}_1 = H_1/D$	5	2	5	2	5	2
$\tilde{H}_2 = H_2/D$	5	8	10	13	15	18

按照图 1 所示几何结构, 采用 GAMBIT 软件建立三维模型并划分网格, 其中网格单元数控制在  $2.5 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$  个。计算中, 入口条件为  $v_m=1\text{m/s}$ ,  $\alpha_{oi}=0.1$ 。溢流口和底流口为充分发展条件, 压力—速度耦合采用 SIMPLEC 算法, 计算残差控制在  $1.0 \times 10^{-6}$ , 出、入口质量流量相对误差的绝对值小于 0.1%。针对所采用的计算模型, 根据已有的实验数据进行了模型验证。所得结果表明, 计算结果与实验结论相吻合的较好<sup>[12]</sup>。

## 2.2 模拟结果分析

根据给定的初始条件, 设定柱型旋流器上部溢流口处的分流比为 35%, 经过计算得到了如图 2(a)所示的六种不同结构 LLCC 内的截面含油率云图。从图 2 中可以看出, 油水混合物以切线方式进入旋流器后, 形成了高速旋转流场。由于密度差的不同, 在离心力作用下重质相水流向旋流器边壁, 并从底流口排出, 而轻质相油迅速聚集在旋流器中心部位, 形成了油核, 从上部的溢流口流出。当旋流器的柱体部分长度一定时, 通过改变进口段与溢流口处的距离,

对油水分离能起到明显的效果。在  $H_1=5D$  时，油相聚集成油核后，停留在旋流器内部，且大部分的油相从底流口排出，这阻碍了油水的有效分离；在  $H_1=2D$  时，形成的油核上旋至溢流口附近，更多的油相能够从溢流口排出，而相应地底流口的含油率比较低。当固定  $H_1$ ，改变  $H_2$  时，可以从图中得知，随着  $H_2$  的增加，柱型旋流器底流口处的含水率随之增加，也就是底流口中的含油逐渐减小，旋流器的分离性能得到了改善；但是当  $H_2$  增大到一定值后，继续增大反而对分离产生了不利的影响，也即在一定的条件下，柱型旋流器的柱段长度存在着一个较优的值。在本文模拟计算中， $H_2$  值在  $13D$  时为最有利于油水分离。图 2(b) 给出了旋流器底流口中含水率的关系，从中也能很明显地看出，当适当减小  $H_1$  时，柱型旋流器的分离性能得到了改善，且  $H_2$  存在着一个较优的值。

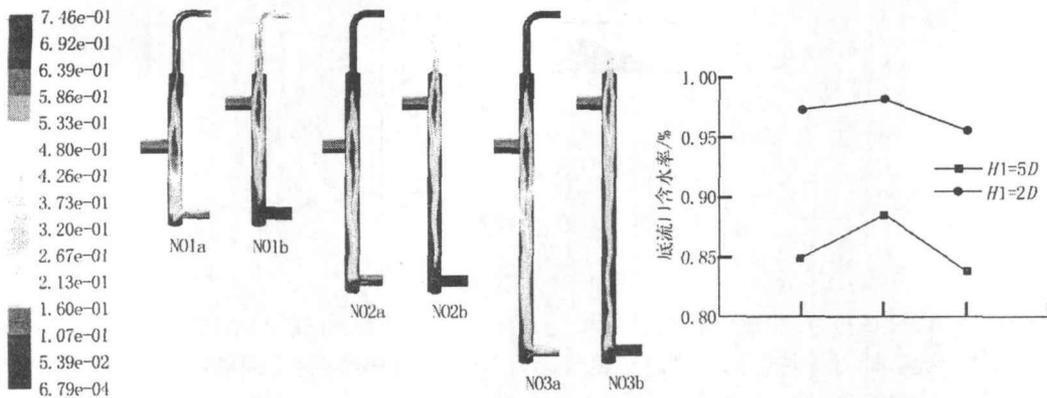


图 2 不同结构 LLCC 的截面含油率云图和底流口含水率曲线

### 3 室内实验

#### 3.1 实验装置

本部分的实验工作是在中国科学院力学研究所多相流实验平台上进行的，其运行流程如图 3 所示。实验装置主要由供给系统、柱型旋流器和数据采集系统等组成。实验所使用的柱型旋流器具体结构如图 1 所示，旋流器的材料为有机玻璃，其中柱段长度  $L$  选择为 900mm，其他尺寸不变。水相流量计采用电磁流量计，油相的计量为涡轮流量计。实验过程中对旋流器的两个出口分别进行接样，测试出口含油率。在测试含油率时，针对较高含油率样品选用量筒静置读数的方法；而在低含油率时，接样后采用 2m 长直径为 10mm 的细管静置，然后测量油层厚度进行含油率计算。实验介质为白米水和白油，其中，白油为无色透明的矿物油，物性参数有：密度为  $840 \text{ kg/m}^3$ ，室温下的黏度为  $0.215 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ 。

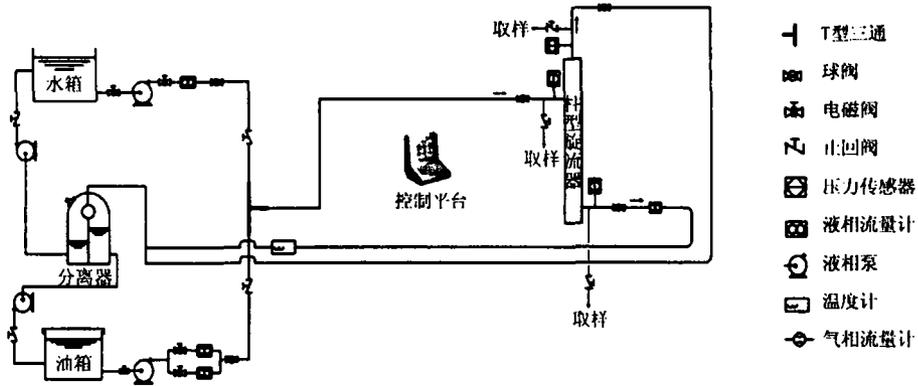


图3 实验流程示意图

### 3.2 实验结果分析

在实验过程中，通过调节水相泵给定水的流量，然后调整入口油相流量，以达到一定的入口含油率。柱型旋流器来液的进口管道直径为 50mm，将水相表观流速固定在 0.991m/s，油相表观流速为 0.057m/s、0.121 m/s、0.191 m/s 和 0.340m/s，此时对应的入口含油率分别为 5.44%、10.88%、16.16%以及 25.54%。实验时在一定的油相和水相表观流速下，通过控制柱型旋流器溢流口的调节阀，改变旋流器的分流比，以此来研究分流比对分离性能的影响。在每组油相和水相表观流速下，选取 5~6 种分流比，并在每种分流比时，通过对旋流器的底流口和溢流口接样，分析底流口液样含水率和溢流口液样的含油率(图 4 和图 5)。

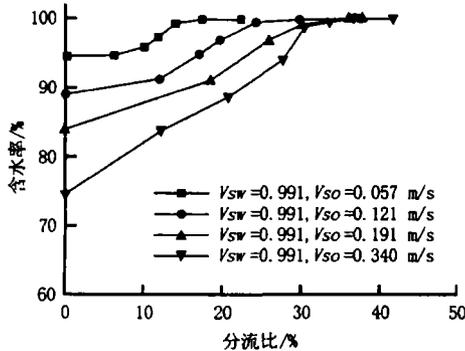


图4 柱型旋流器底流口含水率

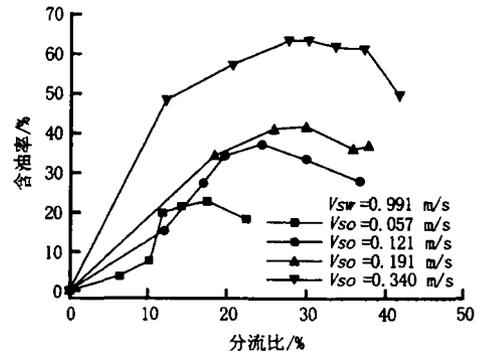


图5 柱型旋流器溢流口含油率

图 4 给出了不同情况下柱型旋流器底流口含水率随着分流比的变化关系。可以看出，当入口含油率一定时，增大旋流器溢流口的分流比，能够有效地改善旋流器的分离性能。从曲线变化中可以得到，柱型旋流器存在着一个较优的分流比值，超过这个值以后，底流口中含水率基本趋于稳定值。随着入口含油率的增加，底流口含水率与分流比之间曲线关系基本保持不变，但是较优的分流比值随着入口含油率的不同而不同。在实验的四种含油率下，这个较优的分流比值分别为 15%、24%、33%和 34%。从实验中还可得到，在室内条件下油水混合液经柱型旋流器分离后，底流口中液样的含油率可降到  $1000 \times 10^{-6}$  以下。图 5 所示的是柱型旋流器溢流口含油率与分流比的变化关系。当柱型旋流器入口含油率一定时，随着分流比的增

加,溢流口处的含油率先逐渐增大而后又呈现减小的趋势。这是由于当溢流口处的分流比较小时,旋流器内部的油核不能较好地从上排出;当分流比增加后,更多的液体从溢流口流出,于是带动了旋流器内部的油核一起从上面的溢流口流出,从而使溢流口排出的液样含油率增加。而当到达一定值后,继续增大分流比值,并不能很明显地将内部油核全部排出溢流口,反而将旋流器内部的水相相混到油核中,一起从溢流口排出,从而降低了溢流口液样中的含油率。并且从曲线图中也能够看出,对于溢流口液样中的含油率,存在着较优的分流比值。对比底流口含水率和溢流口含油率曲线图,可以发现这个较优的分流比值是相接近的。

#### 4 结语

本文对柱型旋流器进行了数值模拟,分析了长径比和入口位置对油水分离性能的影响。从模拟结果中可得,柱型旋流器的柱段长度存在着一个较优值,且提升入口位置,有利于油水在旋流器内部的分离。通过室内实验,研究了柱型旋流器分流比对油水分离性能的影响。实验表明,随着溢流口分流比的增大,底流口含水率逐渐增加,也即底流口水中含油率逐渐降低,且在实验条件下最低含油率可降到  $1000 \times 10^{-6}$  以下;溢流口液样中含油率随着分流比的增加,出现先增高后降低的趋势;针对底流口含水率和溢流口含油率,均存在着一个较优的分流比值,且这两个值是相接近的。这些结果对柱型油水旋流器的结构优化和提高柱型旋流器的油水分离性能有重要的指导作用。

### 参 考 文 献

- 1 郑之初,周永,郭军,等.海上油气混输中的分离技术//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,香港,2004:830-837.
- 2 Vazquez C O, Afanador E, Gomez L, et al. Oil-water separation in a novel liquid-liquid cylindrical cyclone (LLCC) compact separator-experiments and modeling. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126: 553-564.
- 3 周永,吴应湘,郑之初,等.油水分离技术研究之一——直管和螺旋管的数值模拟. *水动力学研究与进展, A辑*, 2004, 19(4): 540-546.
- 4 王立洋.分岔管路内的油水两相流动研究.中国科学院研究生院博士论文,2009.
- 5 刘海飞,邓晓辉,罗东红,等.柱型旋流器内单相流场压降的实验研究. *水动力学研究与进展, A辑*, 2010, 25(6): 851-856.
- 6 陆耀军,周力行,沈熊.液-液旋流分离管中强旋湍流的  $\kappa$ - $\epsilon$  数值模拟. *计算力学学报*, 2000, 17(3): 267-272.
- 7 李玉星,冯叔初.油水分离用水力旋流器理论模型及数值模拟. *石油机械*, 2000, 28(11): 26-29.
- 8 褚良银,陈文梅,李晓钟,等.水力旋流器湍流数值模拟及湍流结构. *高校化学工程学报*, 1999, 13(2): 107-113.
- 9 邹宽,杨荣,曹玮,等.水力旋流器湍流流动的数值模拟. *工程热物理学报*, 2004, 25(1): 127-129.
- 10 Cullivan J C, Williams R A, Cross C R. Understanding the hydrocyclone separator through computational fluid dynamics. *Institution of Chemical Engineers*, 2003, 81:455-466.

- 11 K. Udaya Bhaskar, Y. Rama Murthy. CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone. *Minerals Engineering*, 2007, 20: 60-71.
- 12 Liu Haifei, Xu Jingyu, Wu Yingxiang, et al. Numerical study on oil and water two-phase flow in a cylindrical cyclon. *Journal of Hydrodynamics*. Ser. B, 2010, 22(5): Supplement 1, 832-837.

## **Effect of structure parameter on water-oil separation efficiency in cylindrical cyclone**

LIU Hai-fei, WU Ying-xiang, XU Jing-yu, ZHANG Jian, ZHANG Jun, GUO Jun

(Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190.

Email: liuhaifei@imech.ac.cn)

**Abstract:** Traditional hydrocyclones are widely used in industries, but there are few studies on cylindrical cyclone. Many factors have effect on cylindrical cyclone's separation performance; however, structure parameter of cylindrical cyclone is one of the key factors to separation performance. In this paper Reynolds stress turbulence model (RSM) and Eulerian multiphase model were applied to study the effect of structure parameters (length-diameter ratio and inlet location) on oil-water separating characteristic in cylindrical cyclone. The simulation results present that the length-diameter ratio has an optimal value; with the distance between inlet and overflow tube decreasing, the improvement of separation efficiency is obvious. The flow split-ratio on oil-water separation performance in cylindrical cyclone was studied experimentally. The results show that with the flow split-ratio increasing, the oil volume fraction in underflow decreases, but the oil volume fraction in overflow increases firstly and then decreases. These results will improve the structural design as well as the separation performance of oil-water cylindrical cyclone.

**Key words:** Cylindrical cyclone; Structure parameter; Flow split-ratio; Water cut.