

柱型旋流器油水分离特性的数值模拟研究

刘海飞, 钟兴福, 许晶禹, 吴应湘
(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要

采用雷诺应力 (RSM) 湍流模型和欧拉多相流模型, 对柱型旋流器的内部流场进行了数值模拟, 得到了柱型旋流器内的切向速度、轴向速度和径向速度分布, 以及溢流比和分离加速度对油水二相在柱型旋流器中分离效率的影响。这些结果对柱型油水旋流分离器的结构优化和提高柱型分离器的油水分离效率有指导作用。

关 键 词: 柱型旋流器; 流场; 溢流比; 分离效率

0 引 言

自从旋流分离器问世以来, 由于具有结构简单、占用空间小、重量轻、处理周期短、分离性能好等优点, 被广泛应用在选矿、石油、化工、食品、环保等领域。油田中常用的旋流分离器工作原理为: 油水混合物在压力作用下从入口沿切向高速进入旋流器, 由于混合物中轻重组分的密度不同, 它们所受到的离心力不同, 重组分的水相沿器壁随向下运动的外旋流从底流口排出旋流器, 而轻组分的油相将向旋流器中心轴运动, 随着向上运动的内旋流从溢流口排出, 从而达到油水分离的目的。

旋流分离器虽然结构简单, 但其分离过程相当复杂, 受到了各种因素的影响和制约。上个世纪, 学者们主要用实验的手段研究测试旋流器, 取得了一定的成果^[1,2]。但是这种实验方法具有周期长、成本高, 需要大量人力物力的缺点, 并且由于受实验条件的限制, 试验中不能完整地描述旋流分离过程和其内部旋流场的特性。计算机技术的进步和湍流模型的发展为人们研究旋流分离器提供了新的途径。通过选择合适的湍流模型和合理地确定其边界条件, 可以准确地模拟出旋流器内部流场的分布情况和物质分离过程。鉴于数值模拟方法具有成本低、大大缩短旋流器设计、优化及生产周期等优点, 被越来越多的学者们所采用^[3-5]。以往的研究主要侧重于传统的锥型水力旋流器, 而对柱型旋流器的研究报道则很少。本文利用数值模拟技术, 研究了柱型旋流器内部流场和油水分离的特性。

1 物理模型

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 100mm, 长 L 为 1590mm, 切向入口直径 D_i 为 100mm(采用截面面积为 20%的缩颈), 溢流口直径 D_o 为 30mm, 底流口直径 D_u 为 60mm, 切向入口与柱段顶部的距离 h_1 为 160mm, 底流口与柱段底部的距离 h_2 为 80mm。

按照图 1 所示几何尺寸, 在 GAMBIT 中建立三维几何模型, 并将几何模型划分为切向入口段、直管段、底流出口段, 其中切向入口段和底流出口段采用四面体结构网格, 直管段采用六面体网格, 整个模型的计算网格单元数为 155906 个。

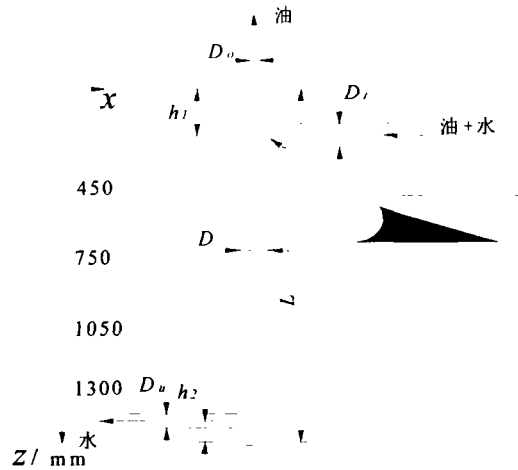


图1 柱型旋流器结构示意图

2 基本方程

控制方程：定常流下的连续方程和动量方程为：

$$\nabla \cdot \rho u = 0 \quad (1)$$

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

湍流模型：旋流器内部流场非常复杂，属于三维强旋流场，所以基于各项同性的 $k-\varepsilon$ 不能准确地描述旋流器内部的强旋流场。雷诺应力模型（Reynolds Stress Model，简称 RSM）完全抛弃基于各项同性涡粘性假设，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，其输运方程为

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

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

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

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

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

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

式中， P_{ij} 应力产生项， D_{ij} 扩散项， ϕ_{ij} 压力应变项， ε_{ij} 粘性耗散项， F_{ij} 旋转产生项。

多相流模型：目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即欧拉—拉格朗日方法和欧拉—欧拉方法。前一种方法的基本假设是作为离散的第二相的体积率很低，可以忽略其对连续相的影响。然而，在实际工业中，第二相的体积率通常都很高，相间作用力不能忽略，必须充分考虑。

在本文研究中, 第二相的体积率为 10%, 因此应该采用能模拟第二相体积率较高情况下的欧拉—欧拉方法。模拟介质的组成成分和相关物性参数为: 主相为水, 密度 998.0kg/m^3 , 粘度 $0.001\text{kg/m}\cdot\text{s}$; 分散相为油, 密度 836kg/m^3 , 粘度 $0.031\text{kg/m}\cdot\text{s}$, 分散相颗粒直径为 0.5mm 。

3 模拟结果分析

3.1 流场分析

旋流器内部液体呈三维螺旋流动, 可分为切向速度、轴向速度、径向速度三部分。

3.1.1 切向速度分布

在旋流器分离过程中, 切向速度被认为是三维速度中最重要的一项, 因为切向速度决定了旋流器内部流体的离心加速度和离心力的大小。图 2 所示为旋流器内液流切向速度 V_t 沿半径 R 分布示意图, 沿旋流器柱段方向上选择了 z 为 450、750、1050 和 1300 四个截面沿着半径方向进行分析。从图 2 可以看出, 切向速度在不同轴向截面上的分布规律是一致的, 整体上呈内部似固核的强制涡和外部准自由涡。由于旋流器壁静止不动以及边界层的作用, 器壁附近的切向速度为从零开始增大, 沿着半径向中心, 切向速度先增大后减小, 中心处的速度最小, 接近于零。随着轴向位置远离进口处, 切向速度的幅值随之变小。由图 2 还可以得知, 切向速度并不是完全的轴对称分布的, 这是由于旋流器的进口是单进口, 造成了内部流场的不均匀性。

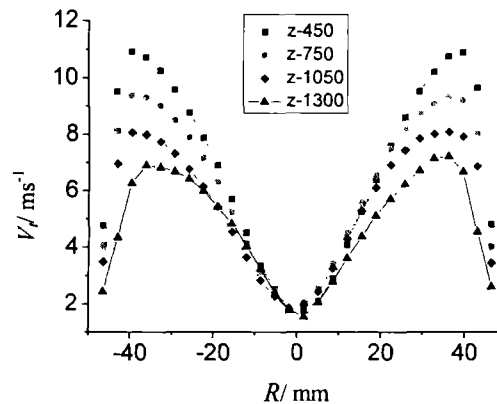


图 2 切向速度分布

3.1.2 轴向速度分布

图 3 所示为旋流器内液流轴向速度 V_a 分布示意图。由图可见, 轴向速度在不同的轴向截面上的变化规律基本相同。从器壁到中心处, 轴向速度先在壁面附近增大, 然后随着半径的减小而减小, 直到为零。再而速度方向发生变化, 由正转负, 在旋流器半径的中部附近通过零点, 将所有轴向速度为零的点连线可组成零轴速包络面。该面外部的液体向下流动, 形成外旋流, 通过底流口排出; 而其内部的液体则向溢流口方向流动, 形成内旋流。由图 3 还可以得知, 内旋流的轴向速度绝对值大于外旋流。

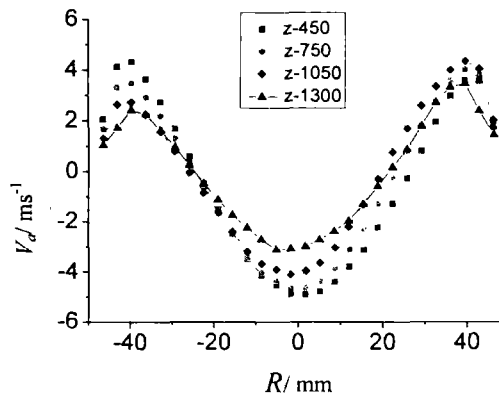


图 3 轴向速度分布

3.1.3 径向速度分布

旋流器分离过程中,液流的径向速度 V_r 沿半径 R 的分布如图 4 所示。由图可见,沿器壁到中心方向,径向速度随之增大,并且方向是由器壁指向轴心;当速度增大到一定程度以后,径向速度急剧减小,在中心处为零,这是由于外旋流中的油滴颗粒在径向速度的牵引下进入了内旋流,并在内旋流中积聚形成了油核。由图还可发现,径向速度幅值比切向速度和轴向速度少一个数量级。在不同的轴向位置上,径向速度的幅值变化有所不同,从进口到底流口方向,径向速度值随之减小,这说明在旋流器的进口附近,油水混合物进行了有效的分离,且分离比较迅速;但是在远离进口处,油滴颗粒进入内旋流比较缓慢,也就是分离进行得比较缓慢,这部分柱段对油水不能进行有效分离。

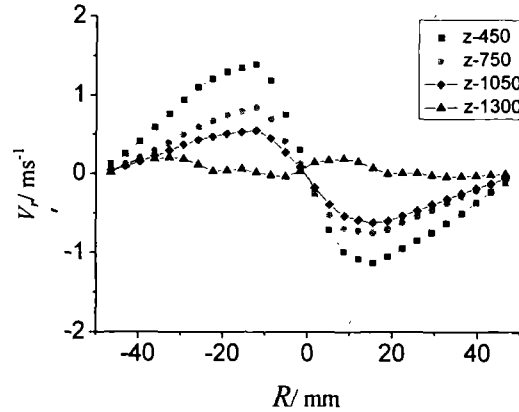


图 4 径向速度分布

3.2 操作参数对油水分离效率的影响

旋流器虽然结构简单,但是影响其分离性能的因素非常复杂,包括了操作参数、结构参数和物性参数。本文选择了操作参数中的溢流比和分离加速度比,研究不同的溢流比和离心加速度对旋流器分离特性的影响。

3.2.1 溢流比

溢流比 f_s 是指旋流器溢流口流量 Q_o 与进口流量 Q_i 之间的比值,即:

$$f_s = \frac{Q_o}{Q_i} \quad (9)$$

溢流比是影响旋流器性能的一个重要的操作参数,它直接影响着旋流器的处理能力和分离效率。此处的分离效率 η 定义为

$$\eta = 1 - \frac{C_o}{C_i} \quad (10)$$

式中, C_i 为旋流器入口处的含油体积率, C_o 为溢流口处的含油体积率。

图 5、图 6 给出了溢流比 f_s 从 0.2 变化到 0.5 时,旋流器内部油核形状和位置以及分离效率的变化情况。从图 5 可以看出,随着溢流比的增大,旋流器内部油核逐渐变短,油核尾部越靠近溢流口。当溢流比为 0.2 时,油核接近底流口,部分油滴从底流口流出;当溢流比增大到 0.4 时,油核得到了向上提升,大部分的油滴能够聚集到中心油核处,随着油核从溢流管流出,油水得到了较好的分离。这也可以从图 6 的分离效率与溢流比关系上得到验证。当溢流比从 0.2 增大到 0.4 时,分离效率迅速上升,而再继续增大溢流比,分离效率上升得比较缓慢。

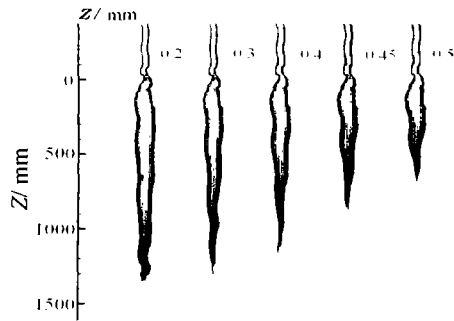


图5 油核位置与溢流比关系图

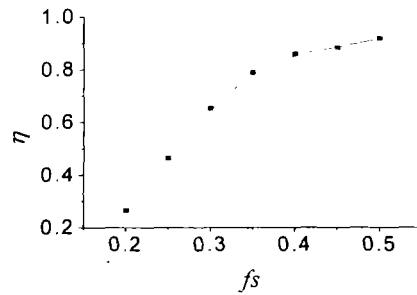


图6 分离效率与溢流比关系

3.2.2 分离加速度比

分离加速度比 G_f 用来衡量混合液体在旋流器中旋转强度的大小, 其定义为液体旋转的离心加速度与重力加速度的比值, 即:

$$G_f = \frac{a_c}{g} \quad (11)$$

式中, a_c 为离心加速度, g 为重力加速度。

图7表示旋流器分离效率随分离加速度比的变化关系, 文中选择了四种不同的分离加速度比, 分别为 51、204、459 和 816。由图可见, 旋流器的分离效率随着分离加速度比的增加而增高。当分离加速度比从 51 增加到 204 时, 分离效率迅速增高, 而当分离加速度比从 459 增加到 816 时, 分离效率增高得比较缓慢。这是因为油水混合液属于液-液二相流, 当油水混合液以极高速切向进入旋流器后, 由于受到很强的旋流剪切作用, 油滴颗粒会发生破碎、乳化现象, 从而恶化油水分离。在数值模拟中, 由于没有考虑到油滴颗粒的破碎、乳化等现象, 所以得到的分离效率曲线随着加速度的增加而增加, 并没有出现下降现象, 这一问题有待改善。

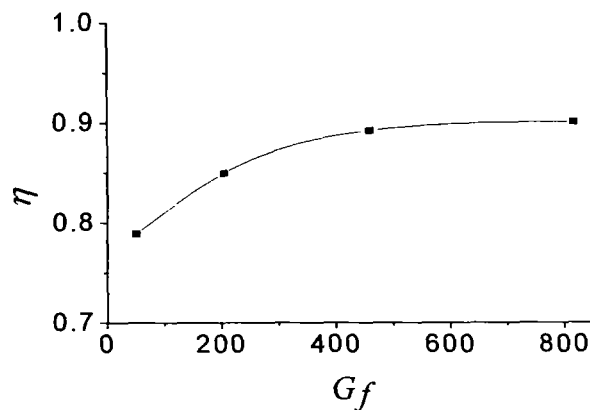


图7 分离效率与分离加速度比关系

4 结语

对柱型旋流器进行了数值模拟, 分析了旋流器内部流场分布特性, 加深了对油水分离机理的认识。通过对溢流比的研究, 发现旋流器的分离效率随着溢流比的增加而增加。对于这一结构给定的柱型旋流器, 最佳的溢流比为 0.4。当溢流比小于这值时, 油水混合液不能够得到有效的分离, 而当溢流比大于这值时, 虽然能够增大分离效率, 但是却减小了旋流器的处理能力。随着分离加速度比的增加, 分离效率先出现迅速增大, 而后缓慢上升, 说明适当地增大分离加速度比能够有效地提升分离效率。

通过对柱型旋流器的溢流比和分离加速度的研究分析,为生产实际中对旋流器操作参数的有效控制提供了参考。

参考文献:

- [1] BERGSTRÖM J, VOMHOFF H. Experimental hydrocyclone flow field studies [J]. Separation and Purification Technology, 2007, 53(1): 8-20.
- [2] OROPEZA-VAZQUEZ C, AFANADOR E, et al. Oil-water separation in a novel liquid-liquid cylindrical cyclone (LLCC) compact separator-experiments and modeling [J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126: 553-564.
- [3] OLSON T J, VAN OMMEN R. Optimizing hydrocyclone design using advanced CFD model [J]. Minerals Engineering, 2004, 17: 713-720.
- [4] A REYES M, PACHECO J E, et al. Numerical simulation and experiments of the multiphase flow in a liquid-liquid cylindrical cyclone separator [A]. Proceedings of European Fluids Engineering Summer Meeting [C], Miami, Florida, 2006, 1-7.
- [5] CULLIVAN J C, WILLIAMS R A and CROSS C R. Understanding the hydrocyclone separator through computational fluid dynamics [J]. Institution of Chemical Engineers, 2003, 81: 455-466.

Numerical Study of the Characteristic of Oil-Water Separation in Clindrical Hydrocyclone

LIU Hai-fei, ZHONG Xing-fu, XU Jing-yu, WU Ying-xiang
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract

In this paper Reynolds stress turbulence model (RSM) and eulerian multiphase model were applied to simulate the inner flow field and the effect of oil-water separation efficiency of cylindrical hydrocyclone with different split-ratio and separation acceleration. The simulation results present the distribution of tangential velocity, axial velocity and radial velocity. These results could improve the structural design as well as the separation performance of oil-water cylindrical hydrocyclone.

Key words: Cylindrical hydrocyclone; Flow field; Split ratio; Separation efficiency

作者简介

刘海飞 男, 1982年生, 硕士研究生。主要从事多相流应用技术研究。

钟兴福 男, 1967年生, 副研究员。主要从事多相流理论和应用技术研究。

许晶禹 男, 1975年生, 助理研究员。主要从事多相流体力学、流变学研究。

吴应湘 男, 1956年生, 研究员。主要从事流体力学、海洋工程力学、水动力学、多相流体力学研究。