

文章编号:1674-2869(2014)03-0048-05

液-液旋流分离器分离特性数值模拟

郑小涛,徐 成,喻九阳,林 纬,龚 程

(武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205)

摘 要:液-液旋流分离器内部流场复杂,现有实验条件难以得到较为清晰的流场分布和液-液两相分离过程,用马丁·休教授发明的 F 型液-液旋流分离器为研究模型,以取油水作为分离介质,采用计算流体力学技术对液-液旋流分离器进行数值模拟分析.结果表明:液-液旋流分离器内部流场分布特征明显,并在圆柱段、大锥段、小锥段存在不同程度的循环流;其各截面切向速度和轴向速度分布规律与理论分析相一致,切向速度分布中在圆柱段、大锥段和小锥段上端组合涡特征明显,圆柱段和大锥段的轴向速度呈现双 W 形式;采用分散相模型追踪油滴运动轨迹,证明油水分离的关键在于油滴是否能够在分离区域进入内旋流.

关键词:旋流分离器;液-液分离;数值模拟

中图分类号:TE991.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2014.03.010

0 引 言

水力旋流分离器(Hydrocyclone)是一种利用两相或多相之间的密度差,在高速旋转的流体中产生不同的离心力而分离的设备.水力旋流分离技术是一种较为成熟的分离技术,广泛应用于石油、化工、生物制药、煤矿、环保等行业^[1].液-液旋流分离器是水力旋流分离器的一种,其分离介质为两相或多相不相溶的液体.液-液旋流分离器研究起步较晚,并且通常液-液两相的密度差较小,因此分离较固-液或气-液旋流分离器困难.由于液-液旋流分离器复杂的结构和高速旋转的流体运动,其内部流场通常较为复杂,并且现有实验设备难以得到清晰的液-液两相分离过程.本文将采用 CFD(计算流体力学)技术,对液-液旋流分离器进行数值模拟分析,得到其流场分布和液液两相分离过程.

1 分析模型

鉴于目前液-液旋流分离器的应用情况和研究进展,选用实验数据较为权威的 Martin Thew^[2]型液-液旋流分离器.图 1 为液-液旋流分离器的模型图,基本由圆柱段、大锥段、小锥段、底流管、溢流口和入口组成,其入口为对称切向双入口,各部分的结构尺寸如表 1 所示,其基准尺寸 D_s 为 20 mm,底流管长度 L_u 为 235 mm.

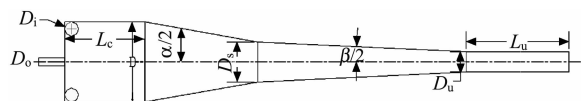


图 1 Martin Thew 型液-液旋流分离器模型

Fig. 1 The model of liquid-liquid Hydrocyclone by Martin Thew

表 1 计算模拟尺寸表

Table 1 The size of model

$D_s /$ mm	$D /$ mm	$D_o /$ mm	$D_i /$ mm	$D_u /$ mm	$L_c /$ mm	$\alpha /$ (°)	$\beta /$ (°)
20	40	4	7	10	40	20	1.5

2 数值模拟方法

2.1 网划分及独立性验证

采用 FLUENT 软件进行数值模拟, Gambit 2.4.6 软件进行建模和网格划分.综合国内外学者对旋流分离的数值模拟的研究,采用六面体非结构网格对模型进行划分,网格划分图如图 2 所示.

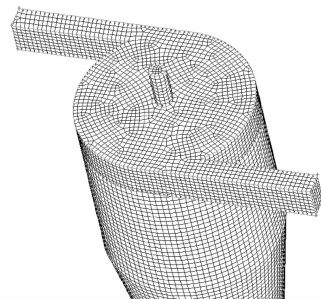


图 2 模型网格划分图

Fig. 2 The grids of model

收稿日期:2014-02-23

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2012FFB04707);武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX201226,CX2013080)

作者简介:郑小涛(1982-),男,湖北武汉人,讲师,博士.研究方向:结构完整性、流体设备以及传热与传质.

为了保证数值模拟计算的准确性,将对网格进行独立性验证,将不同网格密度的分离器计算结果与 Martin Thew^[3] 的实验数据进行对比,对比结果如图 3 所示. 由图 3 可知,当网格数为 58 万时,其计算分离效率与实验数据相差为 10% 以内,而当网格进一步加密到 95 万时,计算结果与网格数为 58 万相差不大,为了提高计算效率,本文将采用网格数为 58 万的模型进行分析.

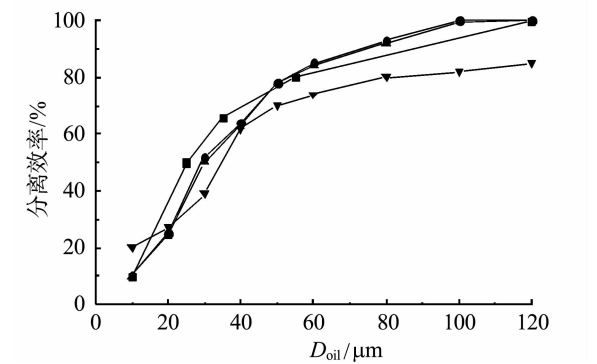


图 3 网格独立性验证

Fig. 3 The independence verify of grids

注: ■— Experiment; ●— mesh density(950778);
▲— mesh density(580876); ▼— mesh density(313848)

2.2 计算模型

由于旋流分离器的非稳态不可压缩流动特征,因此湍流模型采用适于流线强烈弯曲和旋转三维流动的雷诺应力模型(RSM)^[4].

多相流模型选择的是适用于强烈耦合的各向同性多相流模型 Mixture 模型^[5]. 对流项离散格式选择的是在复杂网格条件下具有良好收敛性的二阶迎风格式,压力插补格式采用的是 PRESTO^[6] 格式,压力-速度耦合算法采用的是 Simple 算法^[7].

2.3 介质物性及边界条件

入口采用速度入口,速度为 6 m/s,入口含油率为 5%,油的密度为 850 kg/m³,黏度为 3.32 cP;溢流口和底流口均为充分发展出口边界条件,其流

量比分别为 15% 和 85%;壁面采用无滑移条件^[8].

分离效率: $E=1-\alpha_u/\alpha_{in}$

其中: α_u 为底流口含油率; α_{in} 为入口含油浓度.

3 计算结果分析

将网格导入 FLUENT 软件中,设计边界条件和计算控制模型,得到液-液旋流分离器数值模拟计算结果.

3.1 流场分析

图 4 为圆柱段和大锥段处的流场分布图,从图 4 可以看出:液-液旋流分离器内部流场中向底流口流动的外旋流,向溢流口流动的内旋流分布明显;在圆柱段顶部及器壁处,由于流体的粘性作用存在短路流;在圆柱段,有大量的循环流存在,循环流的存在会影响油滴向中心的迁移,降低分离效率.

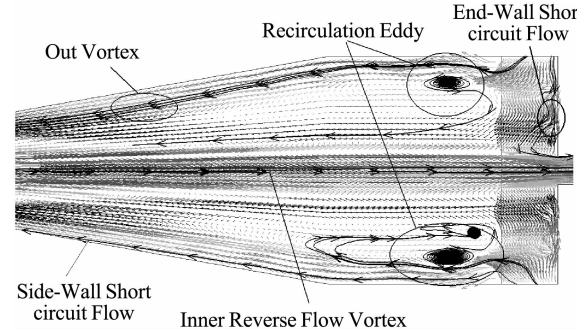


图 4 圆柱段及大锥段处流场分布图

Fig. 4 The flow field distribution of cylindrical section and big cone section

图 5 为大小锥结合处附近的流场分布图,从流体的流线可知,在小锥段上端依然存在明显向上的内旋流,并且由外旋流向内旋流迁移的流线非常明显,证明小锥段上端依然是油水的分离区域,并对油水的分离有一定作用. 在大小锥结合处也存在明显的循环流,说明无论是圆柱段、大锥段还是小锥段,都存在着循环流.

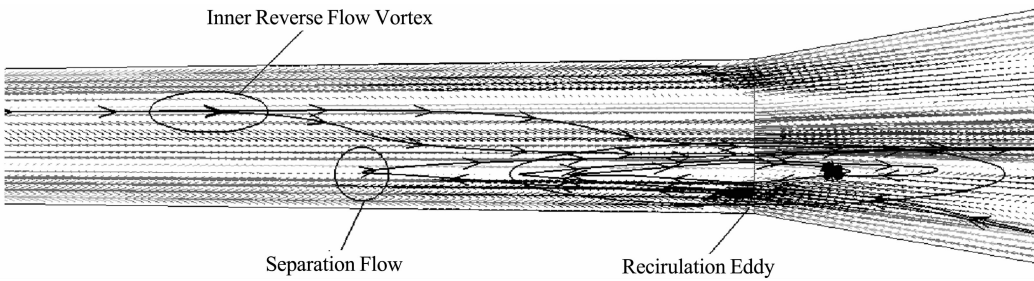


图 5 大小锥结合处流场分布图

Fig. 5 The flow field distribution of the juncture of small cone section with big small cone section

3.2 速度分布分析

为分析液-液旋流分离器内部流场分布,将在分

离器各部分截取截面,从其各截面速度分布角度分析其流场及分离机理,截面截取示意图如图 6 所示.

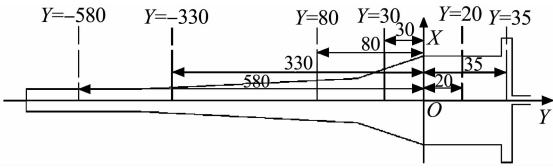


图 6 截面及坐标系定位

Fig. 6 The localization of coordinates and section

图 7 为各截面的切向速度分布图,切向速度是提供离心力的主要动力源.由图 7 可知,各截面切向速度均呈组合涡^[9]特征,在外旋流为自由涡,内旋流为强制涡,并且在圆柱段和大锥段组合涡特征更为明显,与理论分析^[10]相一致.从各截面切向速度数值比较来看,切向速度沿着中心轴向下依次减小,但是在内旋流区域下降梯度相等,这也是液-液旋流分离器结构设计的精妙所在.

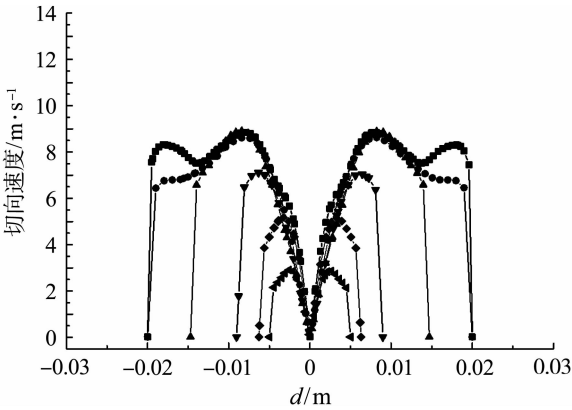


图 7 各截面切向速度分布图

Fig. 7 The tangential velocity of different sections

注: — LineY=35 mm; — LineY=20 mm; — LineY=30 mm
— LineY=80 mm; — LineY=330 mm; — LineY=580 mm

图 8 为各截面轴向速度分布,由于液-液旋流分离有两个出口,轴向速度分布能够反映流体向各个出口的流动情况.由图 8 可知,圆柱段和大锥

段的轴向速度分布呈 3 波峰形式,在外旋流区域存在波峰,此现象是由于圆柱段和大锥段的循环流导致的流体波动所致.从数值比较进行分析,在圆柱段和大锥段内旋流区域向上的轴向速度较大,所以此区域中心处流体向溢流口流动,而在小锥段上端轴向速度依然大于零,说明小锥段上端也为油水分离区域.

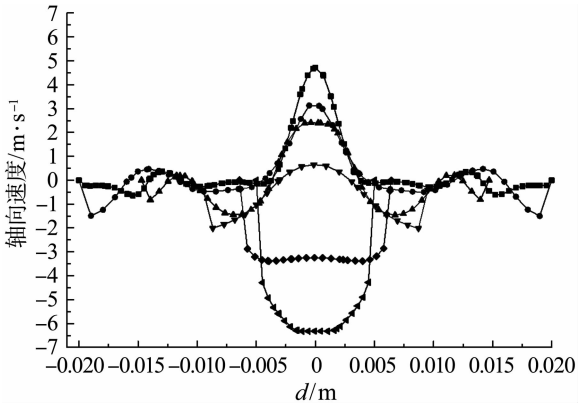


图 8 各截面轴向速度分布

Fig. 8 The axial velocity of different sections

注: — LineY=35 mm; — LineY=20 mm; — LineY=30 mm
— LineY=80 mm; — LineY=330 mm; — LineY=580 mm

3.3 基于 DPM 模型油滴分离轨迹分析

DPM 模型是一种粒子随机轨道模型,即将油滴看作为固体颗粒,由于本文所分析的初始条件中含油率为 5%,因此可以忽略油滴对流场的影响.图 9 为分离成功时油滴的运动轨迹.由图 9 可知油滴进入液-液旋流分离器后,在圆柱段形成稳定的旋流轨迹,并向底流口运动,在外旋流区域随着流体做旋转运动,并且旋转半径不断减小,油滴颗粒到达小锥段上端时,进入沿溢流口流动的内旋流,并随着外旋流做旋转运动最后由溢流口排出.

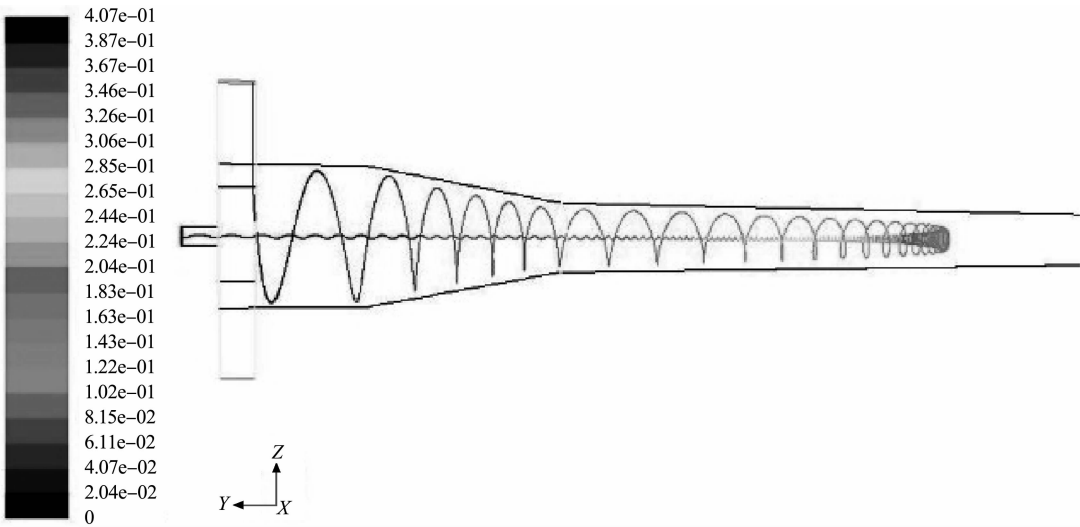


图 9 分离成功油滴运动轨迹

Fig. 9 The trail of the successfully separated oil droplets

图 10 为分离失败时油滴的运动轨迹,与图 9 相比,其不同在于油滴在达到小锥段上端后并没

有进入向溢流口流动的内旋流,而是随着流体向底流口排出。

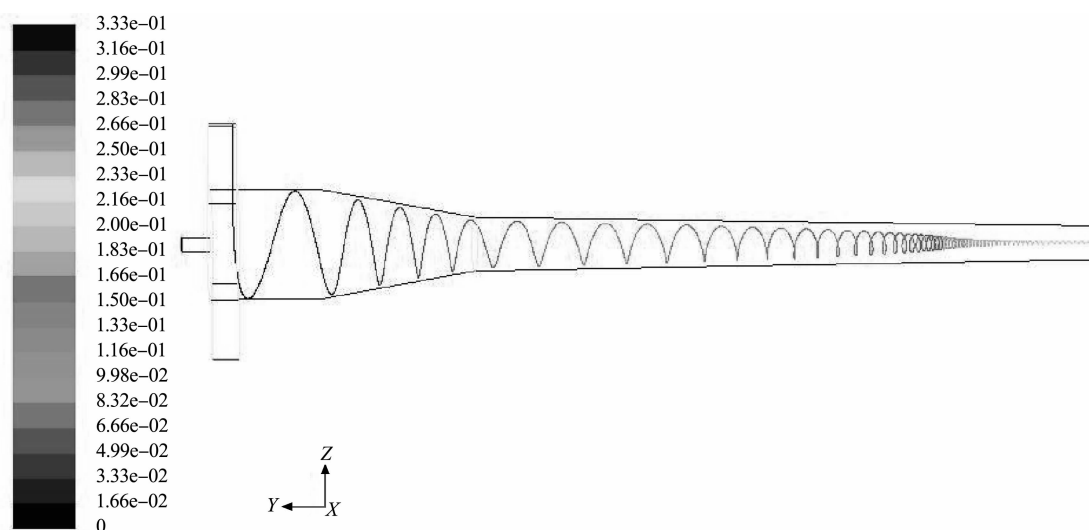


图 10 分离失败油滴运动轨迹

Fig. 10 The trail of the unsuccessfully separated oil droplets

4 结 语

a. 液-液旋流分离器内部流场分布特征明显,在圆柱段、大锥段和小锥段处存在大量的由循环流导致的漩涡。

b. 针对旋流分离器各截面的速度分布研究,发现其切向速度和轴向速度分布规律明显,并与理论分析相一致。切向速度分布中在圆柱段、大锥段和小锥段上端组合涡特征明显,轴向速度在圆柱段和大锥段由于循环流的存在呈现双 W 形式。

c. 采用 DPM 模型对油滴分离轨迹进行追踪,进一步验证小锥段上端也为分离区域,油滴是否更够分离出来,其关键在于油滴是否能够在分离区域内进入向上的内旋流。

致 谢

本文研究工作得到湖北省自然科学基金项目(2012FFB04707)、武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX201226,CX2013080)的资助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 赵庆国,张明贤. 水力旋流器分离技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003:33-34.
ZHAO Qing-guo, ZHANG Ming-xian. Separation technology of hydrocyclone[M]. BeiJin:Chemical Industry Press,2003:33-34. (in Chinese)

[2] COLMAN D A, THEW M T. Correlation of separation results from light dispersion hydrocyclone[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1983,

61(4):233-240.

[3] BELAIDI A, THEW M T. The effect of oil and gas content on the controllability and separation in a de-oiling hydrocyclone[J]. Chem Eng Res Des., 2003, 81(3):305-314.

[4] 赵立新,朱宝军. 不同湍流模型在旋流器数值模拟中的应用[J]. 石油机械,2008,36(5):56-60.
ZHAO Li-xin, ZHU Bao-jun. The application of different turbulence model in the numerical simulation for hydrocyclone [J]. China Petroleum Machinery, 2008,36(5):56-60. (in Chinese)

[5] GRADY S A, WESSON G D, ABDULLAH M. Kalu EE Prediction of 10-mm hydrocyclone separation efficiency using computational fluid dynamics[J]. Filtr., 2003,40(9):41-46.

[6] 徐建民,李智勇,雷斌,等. 搅拌器内二维流场数值模拟[J]. 武汉工程大学学报,2014,36(2):56-61.
XU Jian-min, LI Zhi-yong, LEI Bin, et al. Numerical simulation research of agitator inside two-dimensional flow field [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014,36(2):56-61. (in Chinese)

[7] 许妍霞. 水力旋流分离过程数值模拟与分析[D]. 上海:华东理工大学,2012.
XU Yan-xia. Numerical simulation and analysis of the separation process in the hydrocyclone [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.

[8] 喻九阳,聂思皓,郑小涛,等. 波纹管内层流脉动传热和阻力特性的数值研究[J]. 武汉工程大学学报, 2013,35(2):60-64.
YU Jiu-yang, NIE Si-hao, ZHENG Xiao-tao, et al. Numerical analysis on heat transfer characteristic

and pressure drop of pulsating flow in corrugated bube. Journal of Wuhan institute of technology, 2013,35(2):60-64. (in Chinese)

[9] 据选择. 除油水力旋流器三维数值模拟研究[D]. 北京:中国石油大学,2008:17-21.
JU Xuan-zhe. Research on three dimensional numeri-

cal simulation of deoiling hydrocyclone[D]. Beijing: China University of Petroleum,2008:17-21. (in Chinese)

[10] HSIEH K T,RAJAMANI R K. Mathematical-model of the hydrocyclone based on physics of fluid-flow [J]. AICHE Journal,1991,37(5):735-746.

Numerical simulation of separation character in liquid-liquid hydrocyclone

ZHENG Xiao-tao ,XU Cheng ,YU Jiuyang ,LIN Wei ,GONG Chen

(School of Mechanical and Electrical Engineering,Wuhan Institute of Technology,Wuhan 430205,China)

Abstract: To solve the problems of the complex flow field in liquid-liquid hydrocyclone and the process of liquid-liquid separation not acquired under the existing experimental condition, numerical simulation was performed using the F style liquid-liquid hydrocyclone of Martin Thew with the water and oil as medium . The results show that the distribution characteristics of flow field are clear,the different cyclic flows existing in cylindrical section ,big cone section and small cone section. The tangential velocity and the axial velocity of each section are obvious and consistent with theoretical analysis; the combination vortex characteristics of tangential velocity in cylindrical section and big cone section and small cone section are obvious, and the axial velocity of cylindrical section and big cone section presents double W form. Tracing the trails of oil droplets by dispersed phase model indicates that whether the oil droplets enter into the inner vortex at separation region decides the separation of oil-water.

Key words: hydrocyclone; liquid-liquid separation; numerical simulation

本文编辑:陈小平