

油滴在柱形旋流器中聚并性能研究

史仕荧，郑之初，梁楚楚

(中国科学院力学研究所，北京，100190，Email: shishiying@imech.ac.cn)

摘要：柱形旋流器中分散相油滴粒径的大小直接影响其分离效率，而考虑其中油滴间的相互作用等变化研究较少且比较难以观测。本研究分别采用实验和数值计算研究了柱形旋流器中的油滴聚并规律，得到了油滴聚并的规律及其对分离器分离性能的影响规律，研究结果为柱形旋流器的工业应用提供了指导。

关键词：柱形旋流器；油滴；聚并；分离效率；实验

1 引言

随着我国油田普遍进入了石油开采的中后期，原油含水率逐年增加，含油污水的处理问题已经成为了制约油田发展的关键因素^[1]。柱型旋流器因其体积小、无运动部件、能耗小等优点，在含油污水处理领域具有良好的应用前景。由柱型旋流器的工作原理可知，分散相液滴粒径的大小直接影响着其分离效率的高低^[2]。而前人涉及液滴聚并和破碎现象的研究，多数情况下是为了解决搅拌罐、转盘塔等这类工业萃取设备中分散体系的相间传质及液滴粒径演化问题。只有少量的实验和数值模拟研究在研究水力旋流器的性能时，会考虑液滴间的相互作用及液滴粒径的变化，而关于柱型旋流器在这方面研究更是少之又少^[3-4]。因此本研究基于柱型旋流器里的两相流场理论和群体平衡模型，采用实验和数值模拟相结合的方法，研究柱型旋流器内的油滴粒径分布规律及其对分离性能的影响，为柱型旋流器的设计和工业应用提供指导。

2 柱形旋流器中油滴聚并的实验研究

2.1 实验装置和流程

本实验装置中所用的柱型旋流器结构由透明有机玻璃制成，便于观察实验过程中油水两相的分布。图 1 为柱型旋流器的结构示意图，它主要由水平入口管、柱体部分、上部的

溢流管、下部的底流管等四部分组成；柱型旋流器的主要几何尺寸如下： $D=50.0\text{mm}$ ， $D_i=50.0\text{mm}$ ， $D_o=30.0\text{mm}$ ， $D_u=40.0\text{mm}$ ， $D_b=180.0\text{mm}$ ， $L=938.0\text{mm}$ ， $L_1=1300\text{mm}$ ， $H_o=3.5\text{mm}$ ， $H=80\text{mm}$ ， $H_1=202.0\text{mm}$ ， $H_2=40.0\text{mm}$ ， $H_3=57.5\text{mm}$ 。在这里，水平入口管与柱体部分垂直相交，它们的连接部分采用楔形收缩入口（收缩比为 0.25，即收缩段末端的截面流通面积为收缩段开始前的管路截面面积的 25%）。此设计的目的在于引导流体以较高速度沿切向进入旋流器的柱体部分，从而产生高速的离心旋转流动。

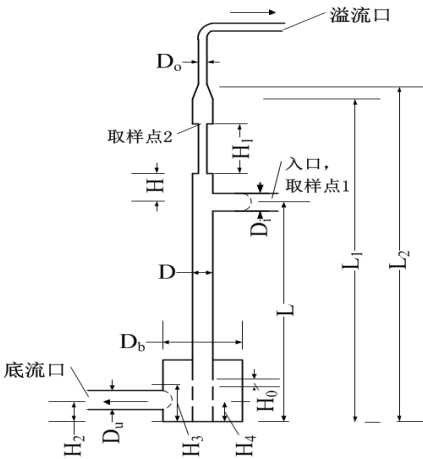


图 1 柱型旋流器结构示意图

本文的实验在中国科学院力学研究所的多相流实验平台上进行，图 2 为本实验的流程图。水相从水箱出发，经泵进入水平实验管路，在旋流器切向入口前约 0.8m 处，和经过注油口流入的少量油相混合后，随即进入前方的掺混器，充分剪切混合转变成分散流，最后经切向入口流进柱型旋流器。经离心分离后，从柱型旋流器溢流管流出的轻相混合物（富含油），经过一中转有机玻璃筒之后和底流管中的重相混合物（富含水），在实验管路的末段共同进入油水循环分离器进行重力沉降分离。静置一段时间后，油水混合物分层，然后经各自的循环系统分别返回至油箱和水箱，实现油水的持续循环利用。

2.2 实验方法

实验所用介质为水和白油。其中，水使用的是自来水；白油为由石油所得精炼液态烃的混合物。在温度为 20℃、压力为 0.1MPa 时，两者的物性参数见下表 1 所示。

表 1 油水两相的物性参数

介质	密度 (kg/m^3)	动力学黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	表面张力 (N/m)
水	998.2	0.001	0.0712
油	863.0	0.059	0.0236

油滴粒径采用英国进口的马尔文在线粒度分析系统 Insitec 进行采集测量, 先利用通过 Insitec 光学头基于激光衍射原理得到混合物中油滴粒径的原始粒径, 然后经 RTSizer 分析应用软件对数据进行分析处理, 最终得到油滴粒径的体积份额分布和索特平均粒径。实验在柱型旋流器的切向入口、溢流管处 (图 1) 等两个部位布置了在线取样口, 用于分散相油滴的取样测量; 每个取样口的粒径测量时间一般不少于 30 s, 以便进行后期实验数据的时间平均化处理。为了定量地描述柱型旋流器里两相混合液的流动分离现象, 还需要测量不同实验工况下的分流比 f (溢流口处的液相混合液的体积流量和入口体积流量的比值)。实验中, 用一取样桶在溢流口处快速接取液相混合物, 并记录相应的取样时间, 然后将混合物倒入量筒读取混合物体积; 最后结合流量计读取的入口流量, 计算得到溢流口处的混合物流量和分流比 f 。

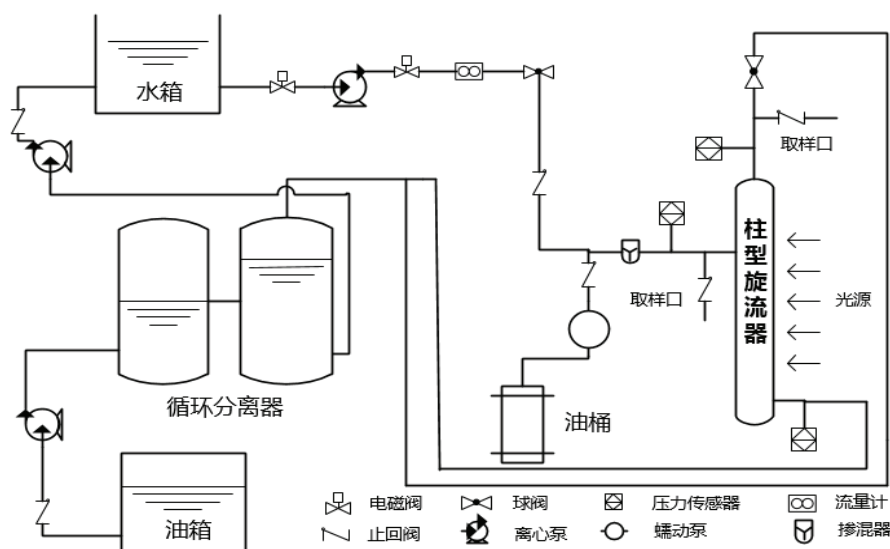


图 2 实验流程

2.3 实验结果

实验测量了入口混合流速分别为 0.84m/s、1.06m/s、1.24m/s 3 组工况下的入口油滴粒径分布, 每组通过调节溢流口处的球阀开启角度来改变分流比, 分别获得大、中、小 3 个分流比。每组子工况下待实验管路中的流动稳定后, 打开口处的取样阀门, 通过马尔文在线粒度分析系统 Insitec 来采集入口处的油滴粒径分布数据。通过分析采集到的数据, 可以看到入口的油滴粒径均呈现“单峰”分布; 经过进一步的非线性拟合处理, 发现其和对数正态分布 (LogNormal) 曲线吻合得较好, 这和 Lehr 等^[5]关于小流体颗粒粒径分布的假定一致。下面选取了 3 组工况下比较有代表性的入口油滴粒径分布, 并给出了相应 LogNormal (对数正态分布) 拟合曲线的数学表达式。

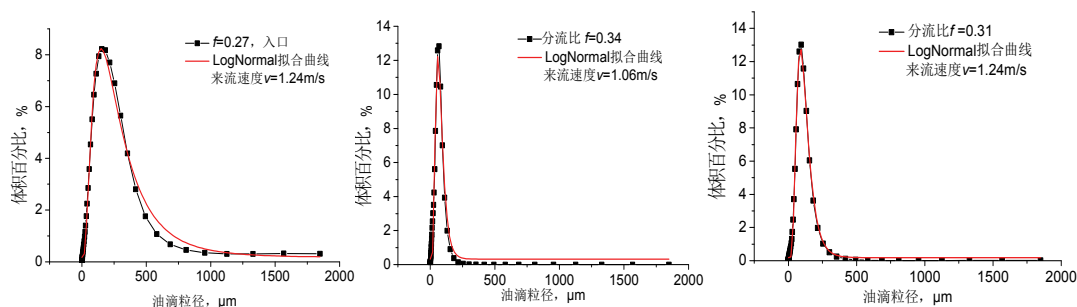


图3 入口油滴粒径分布

图3中黑色点线图为实验测量值，红色曲线为对数正态分布（LogNormal）拟合曲线，可以看出，用LogNormal公式表达柱形旋流器入口油滴粒径分布与实验结果吻合较好，实验结果为数值模拟时入口油滴粒径分布的设置提供了基础数据。

图4分别表示的是入口混合液含油率为0.1%，来流混合速度分别为0.84m/s、1.06m/s、1.24m/s时的入口和溢流口油滴粒径分布，每幅图里包含3个子工况，即大、中、小三个分流比。由图可以看出，经过柱形旋流器后，溢流口的粒径分布峰值相对于入口油滴粒径分布普遍向右移动，即最大油滴粒径增大。

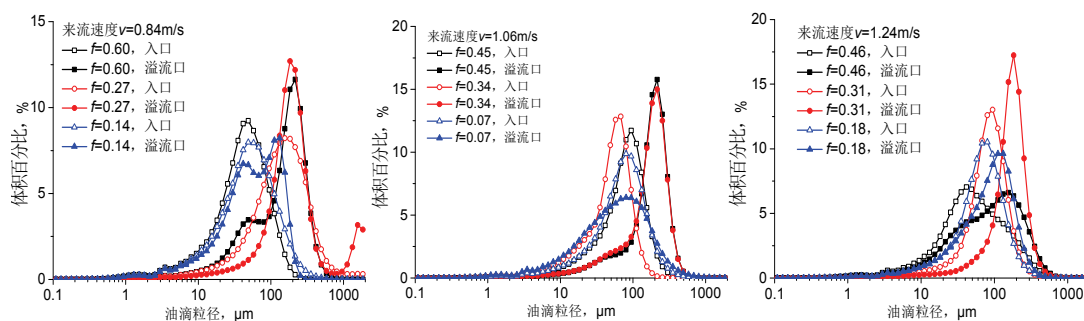


图4 不同分流比下的入口、溢流口油滴粒径分布

图5表示平均粒径变化量 Δd_{32} 随分流比、来流速度的变化规律。从图5中可以看出，在来流速度一定的前提下， Δd_{32} 随着分流比的增大，整体呈现“先增后减”的趋势，即随着分流比的增大，溢流口处的油滴平均粒径先增大后减小， Δd_{32} 的变化对应着一个最佳分流比。这是因为在小分流比时，油水混合液进入柱型旋流器后，大部分油滴会停留在旋流器中的油核中，表现为跟随流体的循环往复转动，只有很少一部分的混合液从溢流管排出，含油率比较低，油滴较难发生碰撞聚并。随着分流比的进一步增大，携带较多油滴的混合液从旋流器的油核处离开经溢流管流出，在流动过程中，油滴充分碰撞、聚并成粒径较大的油滴，表现为平均粒径变化量比较大。因此在实际的应用中，入口流速一定时，要保证在出口处获得较大的油滴粒径，需要寻找到最优的分流比。

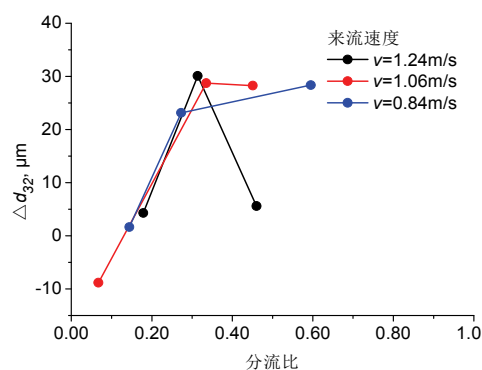


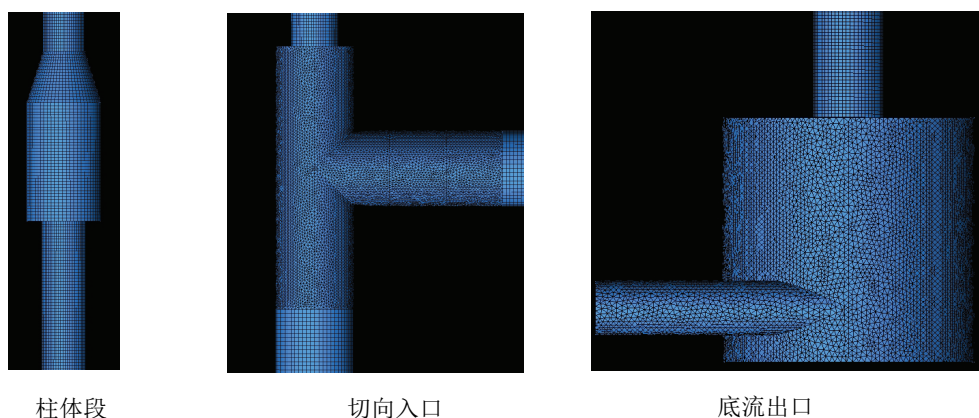
图5 不同来流混合速度下的油滴索特平均粒径随分流比的变化

3 柱形旋流器中油滴聚并的数值模拟研究

3.1 模型建立

3.1.1 物理模型

本文利用 AutoCAD 中建立三维几何模型，并导入 ICEM CFD 中划分网格。结合柱型旋流器自身的结构特点，采用混合网格的形式，即结构网格和非结构网格相结合。由于旋流器的切向入口与柱体连接处的流场结构变化比较剧烈，以及底部结构比较复杂，在这两处采用致密的非结构网格。为了尽可能压缩计算时间，旋流器其他部位，主要包括入口管、旋流器柱体部位、溢流管以及装置二的底流出口均采用结构化网格，具体的划分细节如图 6 所示。



柱体段

切向入口

底流出口

图6 柱形旋流器网格划分

3.1.2 数学模型

旋流分离器中的流动为两相流动^[6]，水为连续相，油相以分散油滴的形式存在，为了研究考虑离散相油滴间的相互作用，群体平衡模型（PBM）是一个有效的用于模拟液滴粒径分布的方法，因此有必要引入 PBM 模型进行数值计算。控制流体颗粒数密度函数的 PBM 模型是基于欧拉—欧拉框架求解的，故在本文采用欧拉-欧拉多相流模型。

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q) = 0 \quad (1)$$

式中， $\vec{u}_q$ 为第 q 相的速度； ρ_q 为第 q 相的密度； α_q 为第 q 相的体积含率。

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{u}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q \vec{u}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{u}_p - \vec{u}_q) \\ & + \alpha_q \rho_q (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) \end{aligned} \quad (2)$$

这里 $\bar{\tau}_q$ 为第 q 相的应力张量， K_{pq} 为相间动量交换系数， $\vec{F}_q$ 、 $\vec{F}_{lift,q}$ 和 $\vec{F}_{vm,q}$ 分别为外部体积力、升力以及附加质量力。

湍流模型

雷诺应力模型（Reynolds stress model，简称 RSM 模型）可以比较准确、有效地模拟旋流器里的速度场分布^[7-9]，所以在这里选择雷诺应力模型作为湍流模型。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \overline{u'_k u'_i u'_j}) = P_{ij} + D_{T,ij} + \phi_{ij} - \epsilon_{ij} + F_{ij} \quad (3)$$

方程右边五项每一项的具体物理含义分别为： P_{ij} 为湍流应力产生项， $D_{T,ij}$ 为湍流扩散项， ϕ_{ij} 为压力应变项； ϵ_{ij} 为粘性耗散项； F_{ij} 为系统旋转产生项。

PBM 模型

$$\frac{\partial f_1(V, \vec{r}, t)}{\partial t} + \nabla_{\vec{r}} \cdot (\vec{v}_{\vec{r}}(V, \vec{r}, t) f_1(V, \vec{r}, t)) = S_B^+(V, \vec{r}, t) - S_B^-(V, \vec{r}, t) + S_C^+(V, \vec{r}, t) - S_C^-(V, \vec{r}, t) \quad (4)$$

其中， $S_B^+ + S_C^+$ 为液滴破碎或聚并生成体积为 V 的液滴的生成项，在本文选取 Luo-Svendsen 破碎模型. Prince -Blanch 模型聚并模型。

边界条件和求解

柱型旋流器的入口处采用速度入口条件，需要给定油水两相的速度、分散相的体积分数以及分散相每个粒径区间所占的体积百分数；溢流口和底流口处的边界条件设置为充分发展的管流；旋流器壁面处采用无滑移边界条件，即边壁处的流体速度为零。求解时，采用一阶迎风格式，对压力-速度耦合使用 PC-SIMPLE（Phase Coupled SIMPLE）算法。

PC-SIMPLE 算法是 SIMPLE 算法在多相流中的扩展，速度的求解被相耦合，压力修正方程的建立基于总的体积连续而不是质量连续。计算残差控制在 1.0×10^{-4} 之内，并且控制旋流器的入口和出口的质量流量相对误差在 0.1% 以内。

3.2 结果分析

图 8 显示的分别是 4 种不同入口油滴粒径分布（如图 7）对应的柱型旋流器轴向截面上的油滴索特平均粒径分布云图。可以看到，随着入口处油滴索特平均粒径的增大，柱型旋流器内的油滴逐渐从“两头黄中间蓝”的粒径分布规律向仅“一头黄”的分布规律转变。说明随着入口油滴粒径的增大，底流管中的油滴平均粒径相对于溢流管中的油滴粒径变小了。这是因为随着入口粒径的增大，油滴的跟随性变差，而且更多的油滴通过碰撞、聚并能较快达到分离粒度从溢流口排出，在两种因素的共同作用下，底流管中的油滴浓度大大减少，油滴间的碰撞、聚并机会也相应变小了。

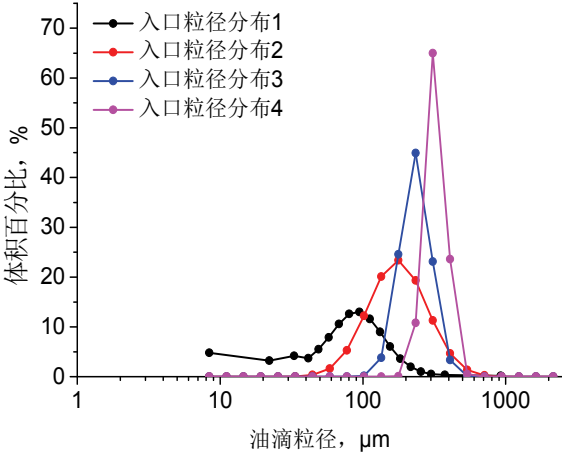


图 7 四种入口油滴粒径分布曲线

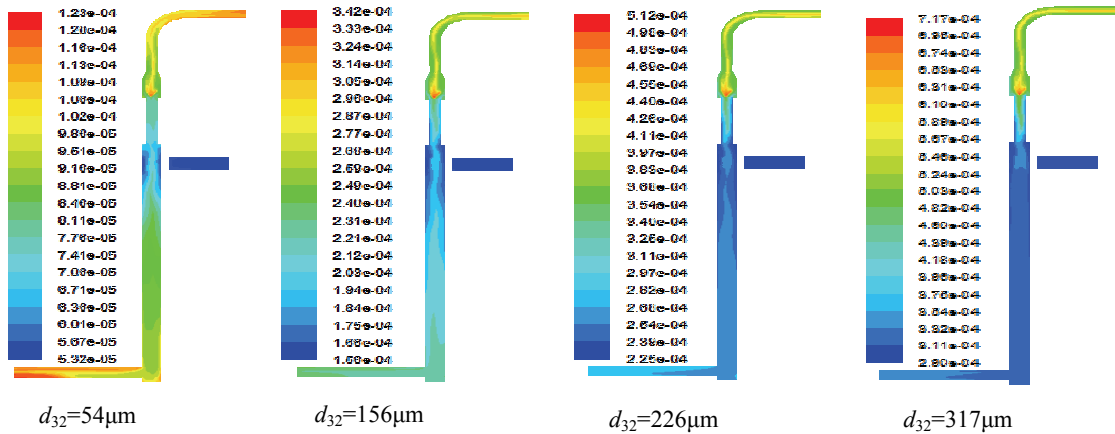


图 8 四种入口油滴粒径分布下的油滴索特平均粒径分布

图 9 和图 10 分别表示的是两组不同的入口油滴粒径分布下,溢流口、底流口含油率以及除油率随离心加速度的变化规律。两组油滴对应的溢流口、底流口的含油率随着离心加速度的增加,曲线变化幅度不大。其中,入口索特平均粒径 $d_{32}=226\ \mu\text{m}$ 对应的大粒径油滴组在溢流口的含油率随着离心加速度的增加先增大后减小,并且值始终大于入口索特平均粒径为 $d_{32}=54\ \mu\text{m}$ 的油滴组;其对应的底流口的含油率随着离心加速度的增加先减小后增大,并且值始终小于入口索特平均粒径为 $d_{32}=54\ \mu\text{m}$ 的油滴组。这说明除油型柱型旋流器用来分离大粒径油滴时,存在一个最佳的离心加速度(该工况下为 $500g$),这在图 4.21 中给出的入口索特平均粒径为 $d_{32}=226\ \mu\text{m}$ 的大粒径油滴组的除油率随离心加速度变化规律也可以看出。出现这种现象主要是因为当离心加速度适当增加时,旋流器内仍然以聚并效应占主导,旋流器里的油滴粒径较大,径向迁移运动也比较剧烈,故旋流器的分离效率也会微幅增大;当离心加速度大于某一临界值时($1500g$),旋流器内以油滴的破碎现象为主,液滴粒径相应变小,径向迁移运动变弱,导致旋流器分离效率的下降。而对于入口索特平均粒径 $d_{32}=54\ \mu\text{m}$ 对应的小粒径油滴组来说,溢流口含油率和旋流器的除油率随着离心加速度的增加微幅上升,底流口含油率随着离心加速度的增加微幅下降。这是因为小油滴由于粒径小,跟随性好,径向迁移运动不明显,一旦离心加速度增大,油滴所受到的向心加速度会增大,在一定程度上促进了油滴的径向迁移运动,故会引起除油率的相应增加。

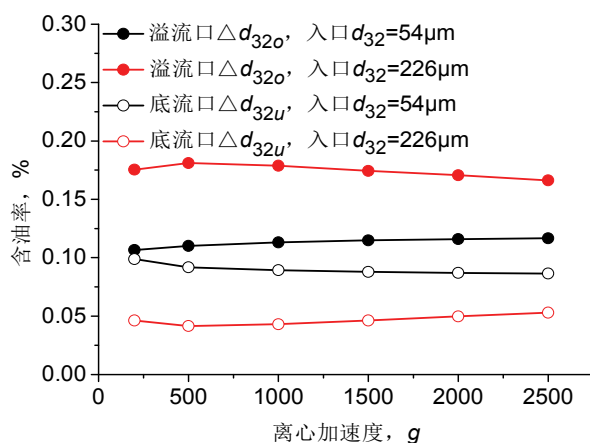


图 9 两组入口粒径分布下溢流口、底流口混合液含油率随离心加速度的变化

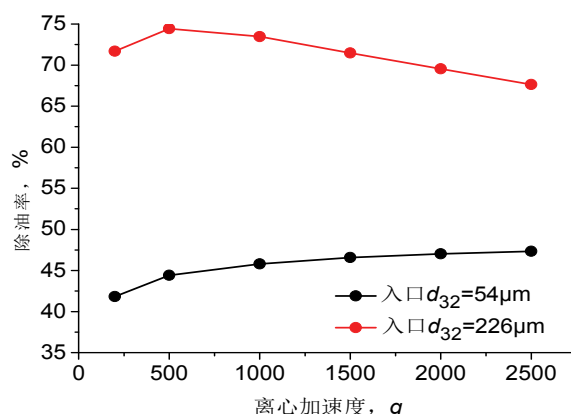


图 10 两组入口粒径分布下除油率随离心加速度的变化

4 结论

(1) 通过实验得到柱形旋流器入口、溢流口的粒径分布,发现经过柱形旋流器后,溢流口的粒径分布峰值普遍向右移动,即油滴粒径普遍增大。

(2) 当来流速度一定, Δd_{32} 随着分流比的增大,整体呈现“先增后减”的趋势,即随着分流比的增大,溢流口处的油滴平均粒径先增大后减小, Δd_{32} 的变化对应着一个最佳分流比。在小分流比时,大部分油滴会停留在旋流器中的油核中,表现为跟随流体的循环往复转动,油滴较难发生碰撞聚并。随着分流比的进一步增大,携带较多油滴的混合液从旋流器的油核处离开经溢流管流出,在流动过程中,油滴充分碰撞、聚并成粒径较大的油滴,平均粒径增大。

(3) 随着入口处油滴索特平均粒径的增大,柱型旋流器内入口油滴粒径的增大,底流管中的油滴平均粒径相对于溢流管中的油滴粒径变小。随着入口粒径的增大,油滴的跟随性变差,而且更多的油滴通过碰撞、聚并能较快达到分离粒度从溢流口排出,在两种因素的共同作用下,底流管中的油滴浓度大大减少,油滴间的碰撞、聚并机会也相应变小了。

(4) 油滴在除油型柱型旋流器中运动时存在一个最佳的离心加速度,当离心加速度适当增加时,旋流器内以聚并效应占主导,旋流器里的油滴粒径较大,径向迁移运动也比较剧烈,故旋流器的分离效率也会微幅增大;当离心加速度大于某一临界值时,旋流器内以油滴的破碎现象为主,液滴粒径相应变小,径向迁移运动变弱,导致旋流器分离效率的下降。

参 考 文 献

- 1 刘朝全, 姜学峰. 2017年国内外油气行业发展报告[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018:59-62.

- 2 张思梅, 张漂清. 水处理工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- 3 Cao Y, Jin Y, Li J, et al. Demulsification of the phosphoric acid-tributyl phosphate (W/O) emulsion by hydrocyclone[J]. Separation & Purification Technology, 2016, 158:387-395.
- 4 Liu S, Zhang D, Yang L L, et al. Breakup and coalescence regularity of non-dilute oil drops in a vane-type swirling flow field[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2018, 129:35-54.
- 5 Lehr F, Millies M, Mewes D. Bubble-Size distributions and flow fields in bubble columns[J]. Aiche Journal, 2002, 48(11):2426-2443.
- 6 陆忠韩, 魏丛达, 吴奇霖, 等. 不同结构旋流器油水分离特性研究[C]// 全国水动力学研讨会. 2014.
- 7 Schütz S, Hashemabadi S H, Chamkha A J. Numerical analysis of drops coalescence and breakage effects on de-oiling hydrocyclone performance[J]. Separation Science & Technology, 2013, 48(7):991-1002.
- 8 刘海飞. 柱型旋流器油水分离特性研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2012.
- 9 梁楚楚. 油滴在油水两相强旋流场中的聚并性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.

Study on coalescence performance of oil droplets in cylindrical cyclone

SHI Shi-ying, ZHENG Zhi-chu, LIANG Chu-chu

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190.

Email: shishishiyi@imech.ac.cn)

Abstract: The size of oil droplets in the dispersed phase of a cylindrical hydrocyclone directly affects its separation efficiency. However, there are few studies considering the interaction between oil droplets and this phenomenon is difficult to observe. In this study, the law of oil droplet coalescence in cylindrical cyclone was studied by experiment and numerical calculation. The law of oil droplet coalescence and its influence on separator performance were obtained. The research results provide guidance for the industrial application of cylindrical cyclone.

Key words: Cylindrical cyclone; Oil droplets; Coalescence; Separation efficiency; Experiments.