

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2020.04.002

## 导流片型旋流场内油滴聚并影响因素研究\*

顾成曦<sup>1,2</sup>, 刘硕<sup>2</sup>, 侯林彤<sup>1,2</sup>, 许晶禹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn)

**摘要:** 导流片型旋流器具有体积小、重量轻和效率高等优点, 适用于井下以及海上平台等空间有限的场所。该文通过实验和数值模拟研究了导流片型旋流场中流量、油水界面张力、油相含率、油相黏度及油相粒度等因素对于离散相油滴聚并的影响。研究表明: 随着流量增加, 油滴聚并效果先增加后下降, 当流量介于  $14 \text{ m}^3/\text{h}$ - $16 \text{ m}^3/\text{h}$  之间时, 可以使油滴聚并达到最佳的效果; 提高油相含率能够增加大油滴的比例, 同时也增加了小油滴的数量, 因此在进行油水分离时排出的水相中会残留较多的油相; 提高入口油相粒度和降低油相黏度, 可以促进油滴的聚并; 增大油水界面张力可以减小油滴破碎的概率, 提高油水分离效率。这些研究结果对于导流片型旋流器的设计能起到一定的指导作用。

**关键词:** 油水分离; 导流片; 旋流场; 离散相; 数值模拟

**中图分类号:** O359

**文献标志码:** A

## Investigation into influence factors of oil droplet coalescence in swirling flow field of vane-type hydrocyclone

GU Cheng-xi<sup>1,2</sup>, LIU Shuo<sup>2</sup>, HOU Lin-tong<sup>1,2</sup>, XU Jing-yu<sup>1,2</sup>

(1. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The vane-type hydrocyclone has the advantages of small size, light weight and high efficiency so that it is suitable for the scene with limited space, such as underground and offshore platform. In this work, the effects of flow rate, oil-water interfacial tension, oil concentration, oil viscosity and oil particle size on the characteristics of oil droplets coalescence are studied by numerical simulation and experimental test. The results show that with the increase of flow rate, the coalescence effect of oil droplets increases first and then decreases. When the flow rate is between  $14 \text{ m}^3/\text{h}$  and  $16 \text{ m}^3/\text{h}$ , the oil droplets coalescence can achieve the best result under this working condition. Increasing the oil concentration can increase the proportion of large oil drops and also increase the number of small oil drops. Thus, during the oil-water separation, more oil droplets will remain in the discharged water phase. Increasing the inlet oil particle size and reducing the oil viscosity can promote the coalescence of oil droplets. Increasing the oil-water interfacial tension can reduce the probability of oil droplet breakage and improve

\* 收稿日期: 2019-11-13(2020-02-11 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金(51779243)

作者简介: 顾成曦(1995-), 男, 安徽五河人, 硕士研究生。

通讯作者: 许晶禹, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

Received: November 13, 2019 (Revised February 11, 2020)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (517792433)

Biography: GU Cheng-xi (1995-), Male, Master Candidate.

Corresponding author: XU Jing-yu, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

the oil-water separation efficiency. These results can play a guiding role in the design of the vane-type hydrocyclone.

**Key words:** oil and water separator; guide vane; swirling flow field; discrete phase; numerical simulation

## 引言

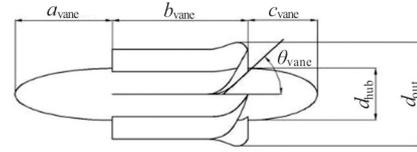
随着石油资源的深度开采, 国内部分油田采出液含水率极高, 水相含率高达98%以上, 因此油相会以离散相的方式存在于混合液中, 不利于原油的后续处理。为了得到较高纯度的原油以便于后续工艺的加工, 因此需要通过物理法和化学法等各类方法对油水混合液进行预分离<sup>[1-4]</sup>。同时, 在对含油污水进行处理时, 同样需要对污水进行预分离, 进而降低处理成本, 提高效率。对油水混合液进行预分离时, 物理法主要有重力沉降法和离心分离法。其中离心分离法主要是通过旋流分离器进行, 其工作原理为利用油水两相密度不同的物理性质, 在离心力的作用下, 密度小的油相在管道中心处形成油核, 密度大的水相被甩向管壁。根据不同的入口方式, 液液旋流分离器可以分为切向旋流器和轴向旋流器。相较于切向旋流器, 导流片式轴向旋流器具有体积小、重量轻、效率高和适用范围广等优点<sup>[5]</sup>, 更适用于海上平台等空间有限的场所。截止到目前, 很多学者对液液旋流器的研究中发现, 在旋流场中流体的物性改变, 离散相液滴的运动规律会发生变化, 进而对旋流器的分离效果产生影响<sup>[6-9]</sup>。本文主要通过实验和数值模拟相结合的方式研究了入口流量、油水界面张力、油相含率、油相黏度以及油相粒度等因素对离散相油滴在导流片型旋流场中聚并的影响, 从而为导流片型分离器的设计提供帮助。

## 1 数值模拟模型及方法

本研究采用导流片作为启旋装置<sup>[10]</sup>, 导流片形式为6叶片螺旋形导流片, 导流片两侧为椭圆形轴, 几何结构如图1所示, 具体参数如表1所示。研究中使用的计算软件为Fluent16.0, 针对旋流场及离散相的破碎聚并模拟, 通过前期的研究发现RNG  $k-\epsilon$ 湍流模型对旋流场的模拟有较好的效果<sup>[11-13]</sup>, 群体平衡模型(PBM)可以直观地模拟离散相的破碎聚并。因此, 本文数值方法采用Eulerian多相流模型、RNG  $k-\epsilon$ 湍流模型和群体平衡模型(PBM)。

欧拉模型中离散相连续性方程和动量平衡方程表达式如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i v_i) = \sum_{i=1}^n (m_{ij} - m_{ji}) \quad (1)$$



(a) 导流片结构图



(b) 导流片照片

图1 (网上彩图)导流片结构图及照片

Fig.1 (Color online)Guide vane configuration and photo

表1 导流片参数

Table 1 Vane parameters

结构参数	尺寸
外径 $d_{out}$ /mm	100
叶片长度 $b_{vane}$ /mm	121
轴直径 $d_{hub}$ /mm	50
入口轴长度 $a_{vane}$ /mm	82.5
出口轴长度 $c_{vane}$ /mm	67.5
出口切向角 $\theta_{vane}$ /°	45
导流片旋转角 /°	60

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_j \rho_j v_j) + \nabla(\alpha_j \rho_j v_j v_i) = -\alpha_j \nabla p + \nabla \chi_j + \alpha_j \rho_j g +$$

$$\sum_{i=1}^n (R_{ij} + m_{ij} v_{ij} - m_{ji} v_{ji}) + (F_j + F_{l,j} + F_{vm,j}) \quad (2)$$

式中:  $m_{ij}$ 为第*i*相到第*j*相的质量传递;  $\mu_j$ 为第*j*相剪切黏度;  $\lambda_j$ 为第*j*相体积黏度;  $\chi_j$ 为第*j*相的应力应变张量;  $F_j$ 为外部体积力;  $F_{l,j}$ 为升力;  $F_{vm,j}$ 为虚拟质量力;  $R_{ij}$ 为相与相之间作用力。

PBM模型中, 破碎核模型采用Luo模型, 当尺寸为 $\lambda$ 的涡流和直径为 $d$ 的液滴碰撞时, 设一个无量纲尺寸 $\xi = \lambda/d$ , 破碎率可以写成如下形式

$$\Omega_{br}(V, V') = K \int_{\xi_{min}}^1 \frac{(1 + \xi)^2}{\xi^n} e^{-b \xi^m} d\xi \quad (3)$$

聚并核模型同样采用Luo模型, 液滴聚并率表达式如下

$$\Omega_{ag}(V_p, V_q) = \omega_{ag}(V_p, V_q) P_{ag}(V_p, V_q) \quad (4)$$

$$\omega_{ag}(V_p, V_q) = \frac{\pi}{4} (d_p + d_q)^2 n_p n_q u_{pq} \quad (5)$$

$$P_{ag}(V_p, V_q) = \exp \left\{ -c_1 \frac{[0.75(1+x_{pq}^2)(1+x_{pq}^3)]^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 0.5\right)^{\frac{1}{2}}(1+x_{pq})^3} We_{pq}^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (6)$$

式中： $\omega_{ag}$ 为液滴碰撞频率； $P_{ag}$ 为液滴聚并效率； $u_{pq}$ 为液滴碰撞时的特征速度； $x_{pq}=d_p/d_q$ ； $\rho_1$ 为连续相密度， $\rho_2$ 为离散相密度。

模型的边界条件如下：①设置静压为0，湍流强度为5%，设置油相含率及初始粒径分布；设置连续相速度大小及方向；设置离散相速度大小和方向。②设置静压为0，回流湍流强度为5%。③管道壁面及导流片设置为无滑移壁面。

计算方法采用非定常与压力基，压力-速度耦合使用SIMPLE法，动量方程使用一阶迎风格式，瞬态项采用一阶隐格式。根据实验中用的旋流器构建三维模型并划分网格，模型整体网格数为180万，模型及导流片网格如图2所示。

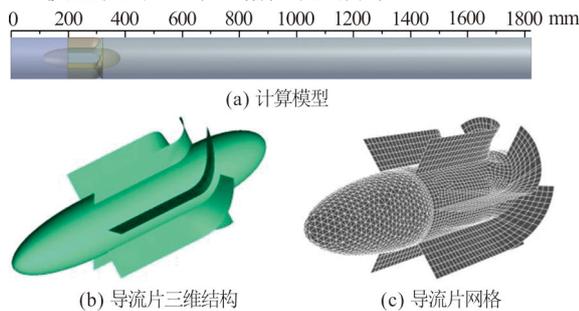


图2 (网上彩图)模型三维结构及部分网格

Fig.2 (Color online)Structure and partial mesh of the model

## 2 实验系统及测试流程

本文的实验工作在中国科学院力学研究所的多相流实验平台完成，如图3所示。供给系统由水罐、供气系统和水循环系统组成，系统中的流量上限为30 m<sup>3</sup>/h，气相流量上限150 m<sup>3</sup>/h。除测试段100 mm内径管路外，其他部分管路内径为50 mm。多相循环系统由水罐、分离罐、油罐、齿轮离心泵、流量计和多相流管路等组成。实验测试中主要用到的设备为导流片型旋流器，其管路的结构参数如图4所示，其中旋流器全长 $L_1$ 为1 820 mm，管径 $L_2$ 为100 mm，其余参数 $L_3=270$  mm， $L_4=50$  mm， $L_5=1 440$  mm。实验介质为自来水和白油，在20℃下白油的物性参数为：密度867.0 kg/m<sup>3</sup>；黏度0.114 Pa·s；油水界面张力系数0.032 N/m。

在实验运行过程中，导流片前后粒径分布通过Malvern Panalytical公司生产的Insitex SX系列喷雾式在线粒度仪进行实时测量。在实验中，取样口分

别安置在导流片前后120 mm和70 mm处，取样口直径为20 mm。实验中在泵的作用下控制水和油分别从储水箱和储油箱中流出并汇聚成油水混合液，混合液经过SMV-5/100型静态掺混器后进入测试管段，经过导流片后形成油核，然后通过一系列测试后流出，进入油水循环分离罐，在分离罐中油水静置一段时间后发生沉降分离，将分离后的油水分别输送回储油箱和储水箱。实验具体测试流程如下：连接组装管路，向旋流器内通纯水，将旋流器内气体排出并观察有无泄露；在取样口连接管道，接入Malvern粒度仪中，使用纯水对粒度仪进行标定；根据设计的工况，确定纯水流量及油的流量，打开水泵及油泵；油水混合液进入旋流器并运行一段时间达到稳定状态，记录质量流量计读数及旋流器进出口处的压力读数，打开Malvern粒度仪，测量启旋流器前后的油滴粒径分布。同时，为剔除偶然误差，Malvern粒度仪先后进行多组测试，流量和压力表多次读数。保证连续相流量不变，调整油相流量，进行下一个工况测试。

## 3 结果及讨论

### 3.1 数值模拟验证

在通过数值模拟研究参数影响因素之前，需要通过实验针对数值模拟的正确性进行验证。验证中，设置入口油水混合流量为18.7 m<sup>3</sup>/h，油相含率为1%。在数值模拟中，旋流器模型入口处位置对应于实验中导流片前取样口处位置。在导流片前，油水混合液看作均匀分散流处理，使用实验测量的油滴粒径分布作为数值模拟时入口处的油滴粒径分布；在导流片后，于数值模型对应位置处取直径为20 mm的截面，计算截面上油滴的粒径分布，并与实验测量的数据进行对比。图5给出了导流片前后油滴粒径分布的对比结果。图中，方块图标代表数值模拟曲线，圆圈图标代表实验测试曲线。从图中可以看出，实验得到的结果相对数模结果要略大且在粒径较小处有一个波动，但整体趋势和出现峰值对应的粒径基本相同，进而也验证了数值模拟模型及计算的可靠性。

### 3.2 流场分布特征

为后续分析离散相液滴的运动规律，首先通过数值模拟对导流片形成的旋流场特征进行研究。图6为入口混合流量为18.7 m<sup>3</sup>/h和油相含率为1%时，测试管道内横截面压力和含率分布图。可以明显看出，在导流片前后的位置压力出现突变，与给出的压力云图相符合。此外，从油相体积分数在横截面上的分布图可以看出，经过导流片之后，由于旋流

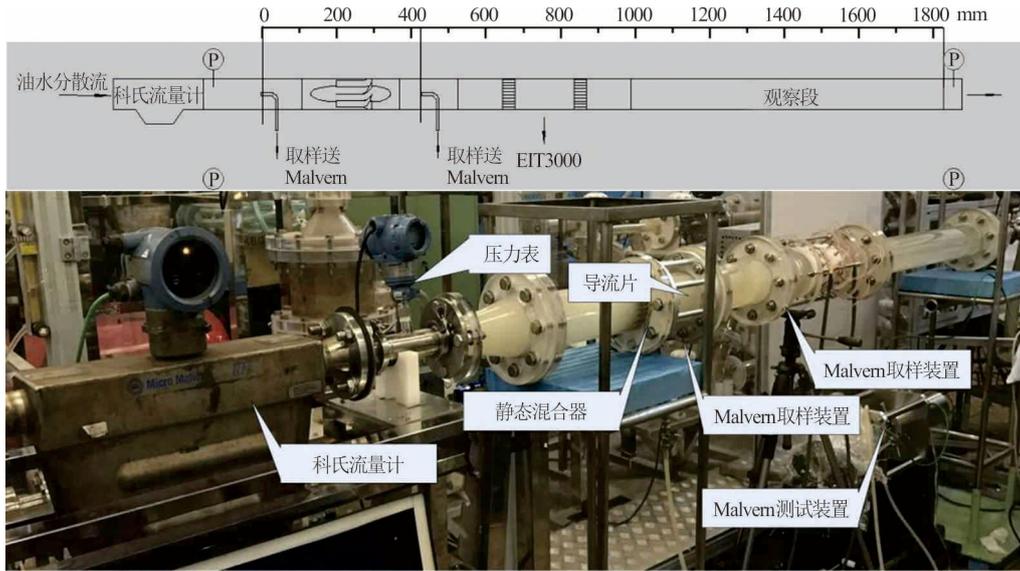


图3 (网上彩图)实验流程

Fig.3 (Color online)Experimental flow loop

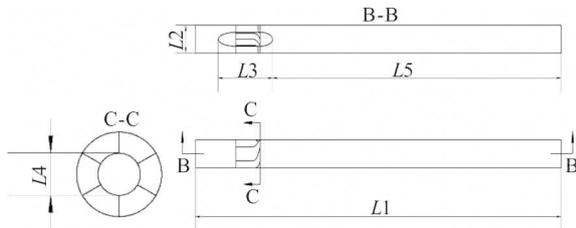
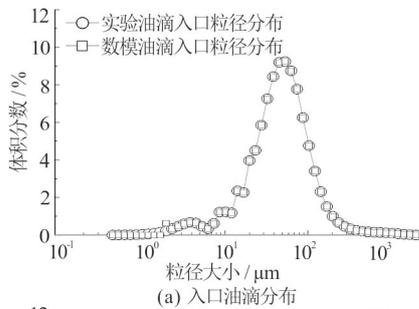
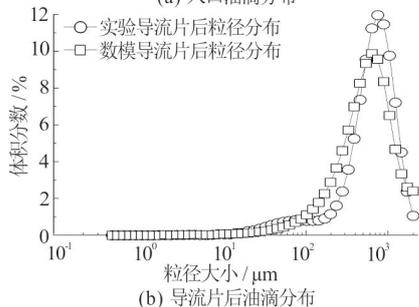


图4 实验测试中旋流器结构参数

Fig.4 Structural parameters of hydrocyclone in experimental test



(a) 入口油滴分布



(b) 导流片后油滴分布

图5 实验和数模结果对照

Fig.5 Comparison of experimental and numerical result

场形成离心力的作用, 离散相油滴向管道中心处聚集形成油核。同时, 在距离入口400 mm、600 mm、1 000 mm和1 400 mm处取截面油相含率分布, 可以看出随着轴向距离的增加, 中心处的含油率呈现为

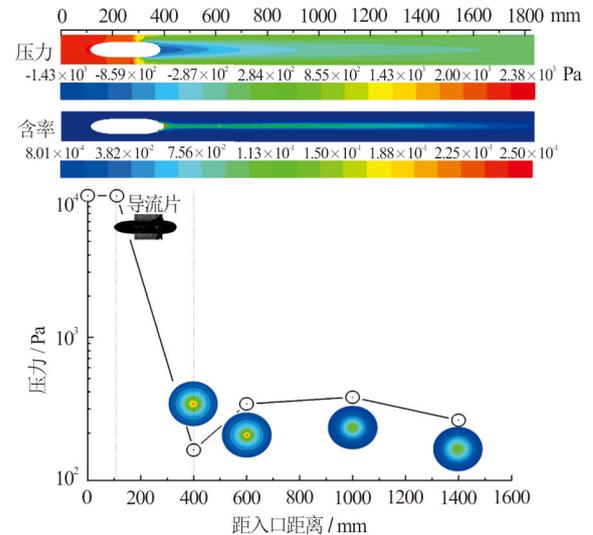


图6 (网上彩图)压力与油相含率分布图

Fig.6 (Color online) Pressure and oil concentration distributions

先增大后减小的规律。

油水混合液在旋流场中产生分离的主要作用力为离心力, 因此, 切向速度对油水分离的性能有着重要影响。图7为不同流量下导流片后距管道中心不同位置处切向速度幅值分布图。从图中可以看出, 不同入口流量下, 均在距离管道中心40 mm处, 切向速度最大。同时, 通过计算可以得到最大切向速度约为入口流速的2.2倍, 这主要和导流片的结构相关。

本文研究中, 由于油滴的数量较多, 无法把油滴粒径全部列举出来, 因此采用特征粒径来反映油滴的破碎聚并规律。特征粒径主要包括 $d_{10}$ 、 $d_{32}$ 、 $d_{50}$ 及 $d_{90}$ 等,  $d_{90}$ 的定义为粒径小于 $d_{90}$ 的颗粒占全部颗粒的90%, 可以用来表征大粒径,  $d_{10}$ 、 $d_{32}$ 和 $d_{50}$ 的定义和 $d_{90}$ 类似。

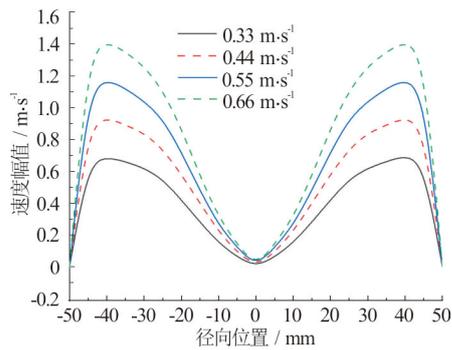


图7 (网上彩图)距管道中心不同位置处切向速度幅值  
Fig.7 (Color online) Tangential velocity amplitude at different positions from the center of the pipeline

### 3.3 流量对于油滴粒径的影响

流量对于油滴粒径的影响主要通过实验测试来研究。测试中,保持油相含率为1%,通过调整混合流量分别测试了 $9.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $15.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $18.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $21.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 四种不同工况下,在导流片前后的油滴粒径分布。油滴的粒径分布如图8所示,其中空心的点表示导流片前的粒径分布,实心的点表示导流片后的粒径分布。可以看出,在不同流量下,油滴导流片后的粒径均大于油滴导流片前的粒径,说明油水混合液经过导流片后发生了聚并,小油滴聚结成了大油滴。

为了研究不同入口流量下导流片前后油滴粒径变化,定义无量纲参数 $\Omega$ ,即 $\Omega = (d_{后} - d_{前}) / d_{前}$ 。 $\Omega$ 为导流片后的特征粒径减去导流片前特征粒径,然后与导流片前特征粒径进行比值。图9给出了不同流量下无量纲参数 $\Omega_{d90}$ 随流量变化。可以看出,当流量由 $9.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 增大到 $15.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,无量纲参数 $\Omega_{d90}$ 逐渐增加,主要是因为流量增加,流速也相应增加,经过导流片后,产生的离心力变大,小油滴更易于聚并成大油滴。同时,从图中可以看出,当流量由 $15.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 继续增加到 $18.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,无量纲参数 $\Omega_{d90}$ 逐渐减少,这主要是因为增加流量不仅会使离心力增加,同样会使油滴受到的剪切力变强,在剪切力的作用下,大油滴破碎成小油滴。因此,针对固定结构导流片型旋流器都存在一个最佳的流量范围,在该工况下可以使油滴聚并达到最佳的效果,本文所用旋流器最佳流量介于 $14 \text{ m}^3/\text{h}$ - $16 \text{ m}^3/\text{h}$ 之间。

### 3.4 油相含率及粒度对于油滴聚并的影响

通过实验和数值模拟相结合研究了油相含率对油滴聚并的影响。在实验中,固定入口流量为 $12.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,控制油相含率分别为1%、2.4%、4.2%和6.2%,通过Malvern粒度仪测量导流片前后油滴的粒径分布,如图10所示。从图中可以看出,当含油率由1%增加到6.2%,由于含油率增加导致混合液中油滴的数量增多,油滴发生碰撞聚结的概率增大,

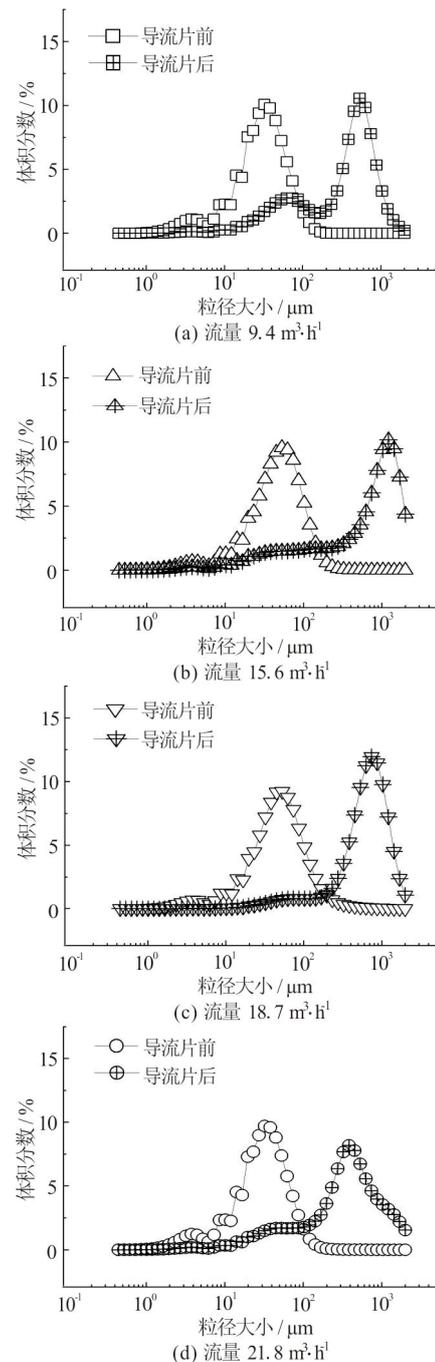


图8 不同流量下导流片前后粒径分布  
Fig.8 Particle size distribution through the guide vane under different flow rate

因此在导流片前,油滴的粒径分布整体向右(粒径变大的方向)发生偏移。在导流片后,油滴粒径分布曲线整体大幅度向右偏移,且随着油相含率增加,大油滴(粒径大于 $1000 \mu\text{m}$ )所占体积分数增加,说明通过导流片后在离心力的作用下,大量小油滴发生碰撞聚并成大油滴,且油相含率越大,大油滴所占比例越多。同时,从图中可以看出,当油相含率较大时,油滴粒径分布曲线在粒径较小处出现了波动,说明增加油相含率不仅增加大油滴的比例同时

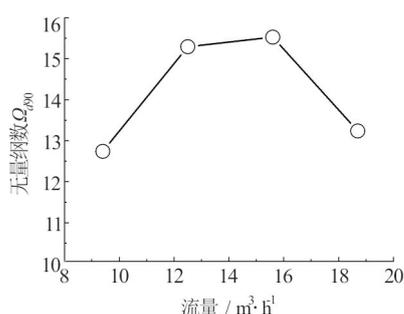


图9 不同流量下无量纲数  $\Omega_{d90}$  变化趋势  
Fig.9 Change trend of dimensionless number  $\Omega_{d90}$  under different flow rates

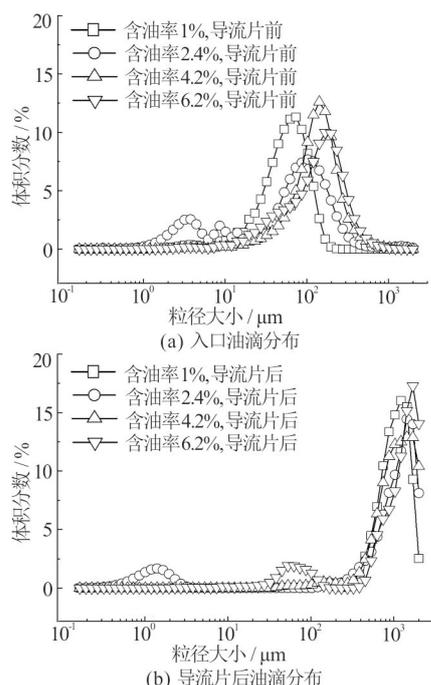
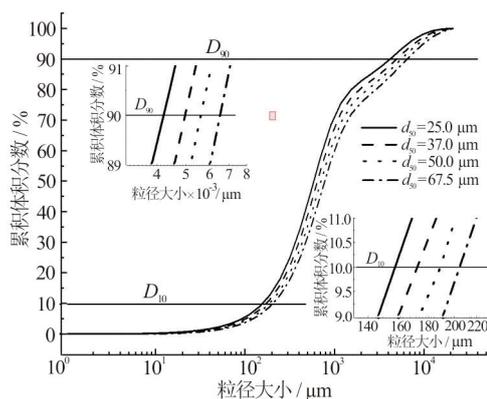


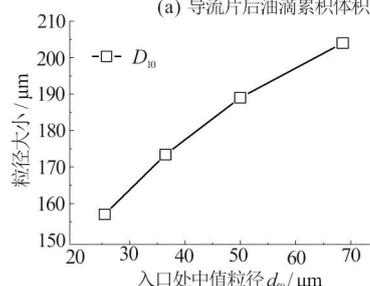
图10 不同油相含率下导流片前后油滴粒径分布  
Fig.10 Particle size distribution of oil drops before and after the guide vane under different oil concentration

还会增加小油滴的比例, 会使部分油滴发生乳化, 形成乳状液, 增加油水分离难度, 且油相含率增加会导致油滴跟随性变差, 产生速度滑移。

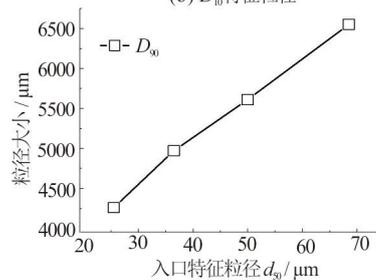
采用数值模拟研究不同入口油相粒度对于油滴聚并的影响。设置入口流量为  $15.6 \text{ m}^3/\text{h}$ , 油相含率为1%, 分别设置4组入口粒度, 4组粒度的中值粒径( $d_{50}$ )分别为  $25 \mu\text{m}$ 、 $37 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 和 $67.5 \mu\text{m}$ 。不同油相粒度下, 导流片后油滴粒径累积体积分数及特征粒径分布如图11所示。从图中可以看出,  $d_{10}$ 和 $d_{90}$ 都随着粒度的增大而增加, 说明增大油相粒度更容易使离散相油滴聚并, 主要因为粒度增加, 油滴质量增加, 受到的离心力增大, 更易于和水相发生分离, 在管道中心处聚结成更大的油滴。在油水混合液进入旋流器前, 可以通过增加化学药剂等方式来增大油滴的粒径, 油相粒径增加, 经过导流片后油滴聚并效果更好。



(a) 导流片后油滴累积体积分数



(b)  $D_{10}$ 特征粒径



(c)  $D_{90}$ 特征粒径

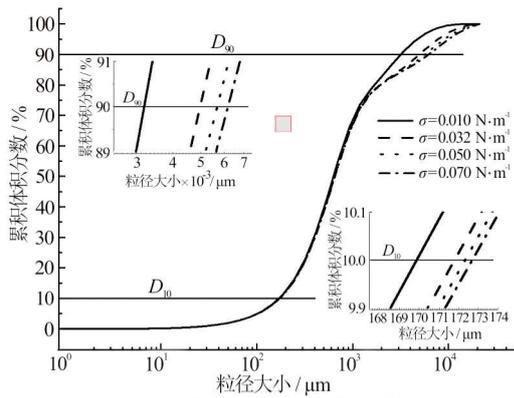
图11 不同粒度下导流片后油滴累积体积分数及特征粒径分布

Fig.11 Cumulative volume fraction and characteristic particle size distribution of oil droplets behind the vane under different particle sizes

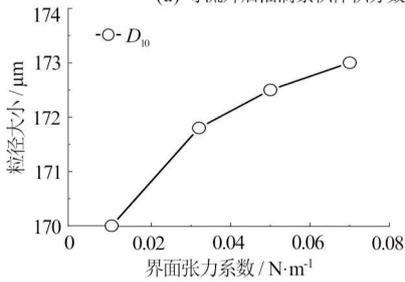
### 3.5 界面张力及黏度对于油滴聚并的影响

界面张力的影响主要采用数值模拟进行研究。设置入口流量为  $15.6 \text{ m}^3/\text{h}$ , 入口油相含率为1%, 油相黏度为  $0.114 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 油相入口粒度中值粒径( $d_{50}$ )为  $37 \mu\text{m}$ , 分别设置界面张力系数为  $0.01 \text{ N/m}$ 、 $0.032 \text{ N/m}$ 、 $0.05 \text{ N/m}$ 和 $0.07 \text{ N/m}$ , 得到导流片后的油滴粒径变化如图12所示。可以看出, 随着油水界面张力系数增加, 导流片后油滴特征粒径 $d_{10}$ 和 $d_{90}$ 都呈现上升的趋势, 说明增大界面张力系数有利于离散相油滴在旋流场中的聚并。原因主要在于增加界面张力系数, 油滴的抗剪切能力增强, 在相同的流速下, 由于剪切而产生的破碎会减少。

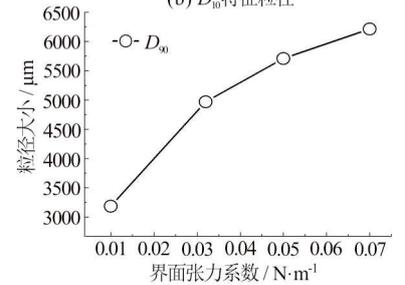
油相黏度对油滴聚并的影响研究中, 设置入口流量为  $15.6 \text{ m}^3/\text{h}$ , 入口油相含率为1%, 油水界面张力系数为  $0.032 \text{ N/m}$ , 油相入口粒度中值粒径( $d_{50}$ )为  $37 \mu\text{m}$ , 分别设置油相黏度为  $0.01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、



(a) 导流片后油滴累积体积分数



(b)  $D_{10}$ 特征粒径



(c)  $D_{90}$ 特征粒径

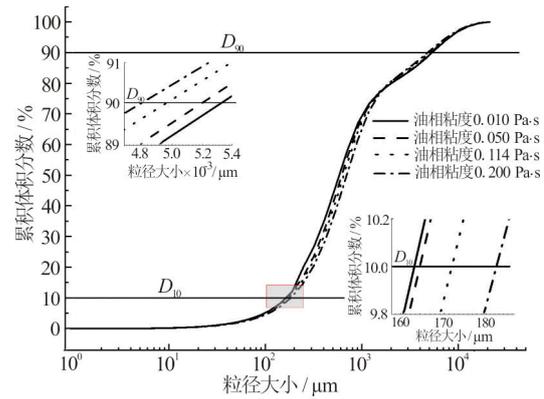
图 12 不同界面张力下导流片后油滴累积体积分数及特征粒径分布

Fig.12 Cumulative volume fraction and characteristic particle size distribution of oil droplets behind the vane under different interfacial tension

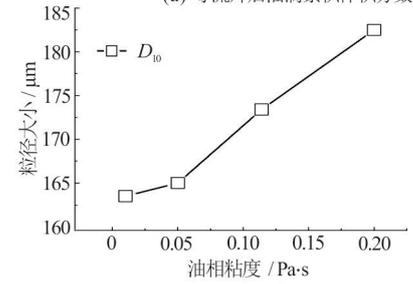
0.114 Pa·s和0.2 Pa·s, 导流片后油滴粒径变化如图13所示。从图中可以看出, 随着油相黏度增加, 导流片后油滴特征粒径 $d_{10}$ 呈现升高的趋势, 而特征粒径 $d_{90}$ 呈现下降的趋势, 说明油相黏度增加, 不利于油滴发生聚并。出现上述现象主要是因为黏性力和离心力方向相反, 会减弱离心力对油滴的聚并作用, 同时, 表征小油滴的 $d_{10}$ 随着油相黏度升高而升高, 主要是因为黏性力同样会降低剪切力对油滴产生的剪切破碎, 因此为了得到更好的分离效果, 可以采取加温等措施降低油相黏度。

### 4 结论

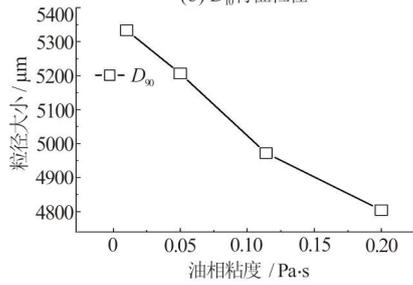
导流片型旋流器具有体积小、重量轻和效率高等优点, 适用于井下以及海上平台等空间有限的场



(a) 导流片后油滴累积体积分数



(b)  $D_{10}$ 特征粒径



(c)  $D_{90}$ 特征粒径

图 13 不同油相黏度下导流片后油滴累积体积分数及特征粒径分布

Fig.13 Cumulative volume fraction and characteristic particle size distribution of oil droplets behind the vane under different oil viscosity

所。本文通过实验和数值模拟相结合研究了该类型旋流场中不同因素对离散相油滴聚并的影响, 得到了以下结果。

导流片型旋流场在导流片前后有明显的压降, 随着远离导流片, 管道中心处的含油率呈现为先增大后减小的规律, 导流片后最大的切向速度在距管道中心40 mm处, 且最大切向速度约为入口速度的2.2倍。增加流量有利于油滴间形成聚并, 但随着流量的增加, 油滴聚并效果会出现下降的趋势, 同时增加流量会增加功耗。在本文研究的结构中, 当流量介于14 m<sup>3</sup>/h-16 m<sup>3</sup>/h之间时, 在较小功耗下油滴有较好的聚并效果。

增大混合液中油相的含率可以增加油滴的数量, 在离心力的作用下离散相油滴更容易聚并成大油滴; 增大油水界面张力可以提高油滴的抗剪切能力, 使油滴在旋流场的作用下不容易破碎从而形成大油滴, 但是当界面张力增大到一定数值时, 界面

张力对离散相油滴聚并的增益效果是有限的; 离散相油滴在旋流场中产生聚并的主要动力是离心力, 而油相黏度会削减离心力的作用, 因此减小油相黏度导致离散相油滴更容易聚并; 提高旋流器入口处油相粒度可以明显增加导流片后油相特征粒度的尺度。这些研究结果对于导流片型旋流器的设计能起到一定的指导作用。

## 参 考 文 献:

- [1] 吴应湘, 许晶禹. 油水分离技术[J]. 力学进展, 2015, 45: 201506.  
WU Ying-xiang, XU Jing-yu. Oil and water separation technology[J]. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 201506.
- [2] YIN K, CHU D K, DONG X R, et al. Femtosecond laser induced robust periodic nanoripple structured mesh for highly efficient oil-water separation[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(37): 14229-14235.
- [3] SINGH B P, PANDEY B P. Ultrasonication for breaking water-in-oil emulsions[J]. *Proceedings Indian National Science Academy*, 1992, 58(3): 181-194.
- [4] 孙中雪. 生物可降解材料 PLA 在油水分离方面的研究与应用[D]. 东北师范大学, 长春, 中国, 2013.  
SUN Zhong-xue. Research and application for oil/water separation based on biodegradable material PLA[D]. Northeast Normal University, Changchun, China, 2013.
- [5] 吴应湘, 许晶禹. 管道式油气水高效分离技术[J]. 科技促进发展, 2015(03): 374-379.  
WU Ying-xiang, XU Jing-yu. Pipeline-type high efficient separation technology on oil-gas-water mixture[J]. *Science & Technology for Development*, 2015(03): 374-379.
- [6] 陈颂阳, 魏从达, 吴奇霖, 等. 管道式油水分离系统分离特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2013, 28(06): 637-643.  
CHEN Song-yang, WEI Cong-da, WU Qi-lin, et al. Investigation on the separation performance for pipeline oil-water separation system[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2013, 28(06): 637-643.
- [7] 蔡亮, 翟加钢, 张栋, 等. 旋流分离器在去除航空煤油固相杂质中的应用研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2018, 33(01): 73-80.  
CAI Liang, ZHAI Jia-gang, ZHANG Dong, et al. Application study of cyclone separator to remove solid impurities from aviation kerosene[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2018, 33(01): 73-80.
- [8] BENNETT M, WILLIAMS R. Monitoring the operation of an oil/water separator using impedance tomography[J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(5): 605-614.
- [9] LIU H F, XU J Y, ZHANG J, et al. Oil/water separation in a liquid-liquid cylindrical cyclone[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2012, 24(1): 116-123.
- [10] LIU S, ZHANG D, YANG L L. Breakup and coalescence regularity of non-dilute oil drops in a vane-type swirling flow field[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 129: 35-54.
- [11] LUO H. Coalescence, breakup and liquid circulation in bubble column reactors[D]. The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 1993.
- [12] GAO S, WEI D, LIU W, et al. CFD numerical simulation of flow velocity characteristics of hydrocyclone[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(12): 2783-2789.
- [13] IM I T, GWAK G D, KIM S M, et al. A numerical study of the flow characteristics and separation efficiency of a hydrocyclone[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(11): 4272-4281.