

# 旋流场与破乳剂共同作用下油水分离特性

顾成曦<sup>1,2</sup>, 侯林彤<sup>1,2</sup>, 刘硕<sup>1,2</sup>, 张健<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, 100049, 北京;

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

**摘要:** 原油开采中, 油水分离是必不可少的工艺环节, 且为了提升分离效率, 往往采用物理化学复合方法对油水乳状液进行分离。本文通过数值模拟研究破乳剂和旋流场共同作用对油水分离效果的影响。数值模拟中, 采用 Eulerian 多相流模型和群体平衡模型(PBM)对旋流场内油水两相流动的压力分布等情况, 以及分散相粒径的迁移、聚并和破碎规律等进行研究。研究表明, 旋流场对油水有较好的分离效果; 在不改变表面张力系数时, 随着入口速度的增加, 油滴聚并率先增加后下降; 当固定入口速度, 改变表面张力系数时, 旋流场中油滴聚并率随着表面张力系数的降低而增加

**关键词:** 数值模拟; 旋流场; 破乳剂; 油水分离

## 1 引言

油井的采油通常都要经历 3 个阶段。在一、二阶段后的 3 次采油阶段, 地表下层压力的下降导致地下的原油运动性能弱化, 这时会采取一些方法来维持油田的生产并提升原油的采取率。这些方法使产出液中含有很高的水分, 并且包含复杂的化学药剂, 采出液中的化学药剂将使油和水的乳化现象更为严重、更加复杂, 最终会导致形成稳定的油水乳状液<sup>[1]</sup>。在对油水乳状液进行油水分离时, 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液液分离旋流器进行。在对旋流器的研究中, Bennett 等<sup>[2]</sup>测试了改变入口流量, 旋流器分离效率的变化规律, 他们发现随着流量的增加, 旋流器分离效率呈现出先增加后达到一个稳定阶段最后下降的趋势。Kharoua 等<sup>[3]</sup>认为旋流器入口流速越高, 旋流强度则越大, 分离效率会迅速提高。另一方面, 他认为超出最高分离效率的流速后, 旋流场中的剪切效应会对分离产生很大影响, 导致分离效率下降。使用化学法进行油水分离, 主要是通过向油水乳状液添加化学破乳剂达到破乳的目的。乔建江等<sup>[4]</sup>通过固定破乳剂的类型, 以破乳剂含量为变量实验发现, 随着破乳剂含量的增加, 油水界面张力会先下降再上升, 破乳效果出现先上升后下降的趋势。Menon 等<sup>[5]</sup>在工作中研究加了破乳剂的乳状液在不同搅拌速度下破乳效果的变化, 他们研究发现随着搅拌速度的增加, 液滴聚并率先增加后下降, 说明破乳剂和离心力的共同作用并不一定会起到积极作用。

单一的分油方法已经不能满足需求, 为了提升分离效率, 往往采用物理化学复合方法

对油水乳状液进行分离。因此，研究了油水乳状液在不同工况下经过旋流场后，液滴的破碎聚并规律，从而研究旋流场与破乳剂共同作用下油水分离的特性。

## 2 数值模拟方法

### 2.1 模型理论

本研究采用 Eulerian 多相流模型、RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和群体平衡模型 (PBM) 进行数值模拟。

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：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) = \sum_{i=1}^n (\dot{m}_{ij} - \dot{m}_{ji}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_j \rho_j \mathbf{v}_j) + \nabla \cdot (\alpha_j \rho_j \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j) = -\alpha_j \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\boldsymbol{\chi}}_j} + \alpha_j \rho_j \mathbf{g} + \sum_{i=1}^n (R_{ij} + \dot{m}_{ij} \mathbf{v}_{ij} - \dot{m}_{ji} \mathbf{v}_{ji}) + (F_j + F_{L,j} + F_{vm,j}) \quad (2)$$

式中， $\overline{\overline{\boldsymbol{\chi}}_j}$  代表第  $j$  相的应力应变张量：

$$\overline{\overline{\boldsymbol{\chi}}_j} = \alpha_j \mu_j (\nabla \mathbf{v}_j + \nabla \mathbf{v}_j^T) + \alpha_j (\lambda_j - \frac{2}{3} \mu_j) \nabla \cdot \mathbf{v}_j \mathbf{I} \quad (3)$$

式中， $\dot{m}_{ij}$  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； $F_j$  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  $\xi$ ， $\xi = \lambda/d$ ，破碎率可以写成如下形式：

$$\Omega_{br}(V, V') = K \int_{\xi_{min}}^1 \frac{(1+\xi)^2}{\xi^n} e^{-b\xi^m} d\xi \quad (4)$$

聚并核模型同样采用 Luo 模型，液滴聚并率表达式如下：

$$\Omega_{ag}(V_p, V_q) = \omega_{ag}(V_p, V_q) P_{ag}(V_p, V_q) \quad (5)$$

式中， $\omega_{ag}(V_p, V_q)$  代表液滴碰撞频率， $P_{ag}(V_p, V_q)$  代表液滴聚并效率。

$$\omega_{ag}(V_p, V_q) = \frac{\pi}{4} (d_p + d_q)^2 n_p n_q u_{pq} \quad (6)$$

$$P_{ag}(V_p, V_q) = \exp \left\{ -c_1 \frac{[0.75(1+x_{pq}^2)(1+x_{pq}^3)]^{\frac{1}{2}}}{(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 0.5)^{\frac{1}{2}} (1+x_{pq})^3} We_{pq}^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (7)$$

式中， $u_{pq}$  表示液滴碰撞时的特征速度； $x_{pq} = d_p/d_q$ ； $\rho_1$  是连续相密度； $\rho_2$  是离散相密度。

## 2.2 物理模型及网格

根据实验中所用的管道式旋流器建立模型,模型使用 ANSYS Workbench 19.0 中的 DM 模块建立。模型总长 1820 mm,管道直径为 100 mm(图 1 和图 2)。模型网格划分使用 ICEM CFD,采用非结构网格,模型一共存在 1880682 个网格数。导流片区域网格划分情况如图 3 所示。

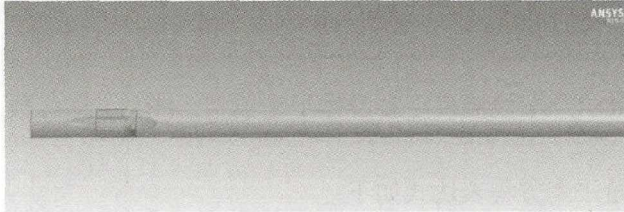


图 1 模型整体

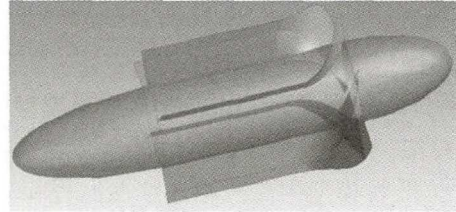


图 2 导流片

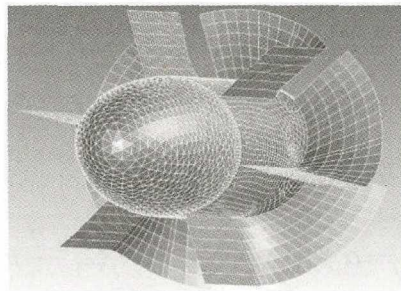


图 3 导流片区域网格

## 2.3 边界条件及计算方法

在设置边界条件前,需先对 PBM 模型进行设置:使用离散模型,创建 9 组油滴尺寸,破碎及聚并核都使用 Luo 模型。

模型的边界条件如下:①速度入口:导流片前 200mm,设置静压为 0,湍流强度为 5%;设置连续相速度大小及方向;设置离散相速度大小和方向;设置离散相相含率以及各组油滴所占的体积分数,入口油滴尺寸分布如图 4 所示。②压力出口:导流片后 1620mm,设置静压为 0,回流湍流强度为 5%。③壁面: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、压力基,压力-速度耦合使用 SIMPLE 法,动量方程、动量方程使用一阶迎风格式,瞬态项采用一阶隐格式。

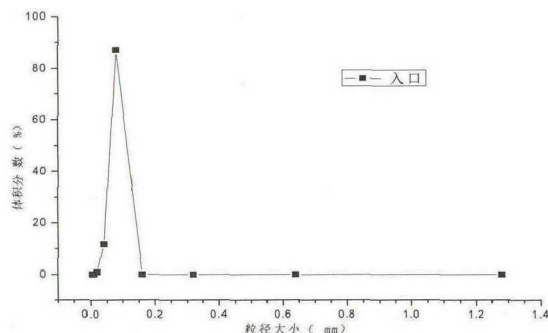


图 4 入口油滴粒径分布

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 流场特征

研究中,为后续分析分散相液滴的运动规律和油水两相的分离特性,首先对导流片形成的旋流场特征进行分析。图5为不同入口速度下旋流场轴向截面的压力分布,红色代表最大值,蓝色代表最小值。从图5中可以看出,导流片之前的压力远高于导流片之后的压力值,在导流片处会出现突变,即流动中的压降主要集中在导流片处。

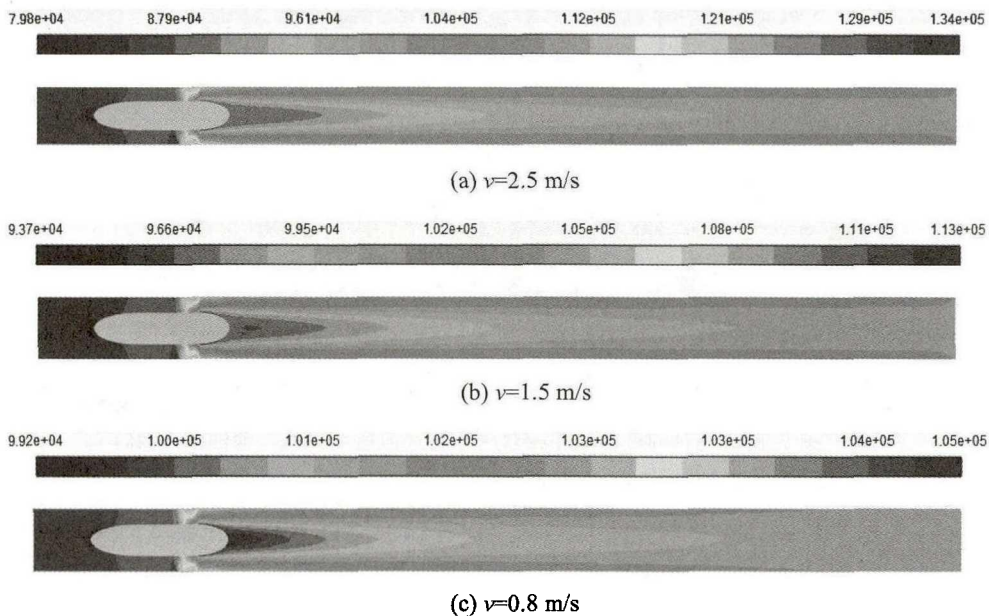


图5 不同入口流速下旋流场轴向截面压力分布

图6给出了3种不同混合流速情况下,导流片形成的旋流场轴向的压力变化规律。从图6中可以看出,随着速度的增加,导流片之前的压力明显增大,且流经导流片的压降逐渐增加。同时,可以明显看出,在导流片前后的位置,压力出现突变,与上述给出的压力分布图相同,混合液入口流速为0.8 m/s、1.5 m/s、2.5 m/s时,导流片前后的压降分别为3092 Pa、10803 Pa、19425 Pa。

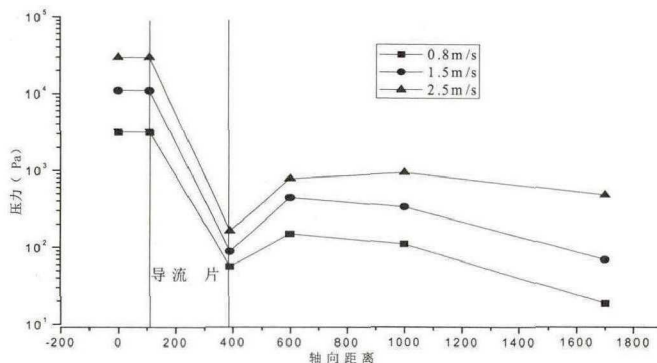


图6 不同入口流速下压力沿轴向分布情况

为进一步分析旋流场的特征，对油水两相的相分布规律进行了分析，选取入口油相相含率为 0.1%，分别在距离入口 400 mm、600 mm、1000 mm、1400 mm 处取 4 个截面，给出油水两相的分布情况（图 7）。从图 7 中可以看出，经过导流片之后，由于旋流场形成离心力的作用，分散相油滴逐渐向管道中心处聚集。同时，随着轴向距离的增加，中心处的含油率呈现为先增大后减小的规律，在距离入口为 700 mm 时，管道核心处的含油率达到峰值。也就是说在给出的入口流速和含油率条件下，油水两相的分离效果在 700 mm 处达到最佳，后续流动中，由于形成的旋流场减弱，轴心处聚集的油核消散，得出的研究结果，为后续油水旋流分离器的结构设计提供可靠的理论和数据基础。

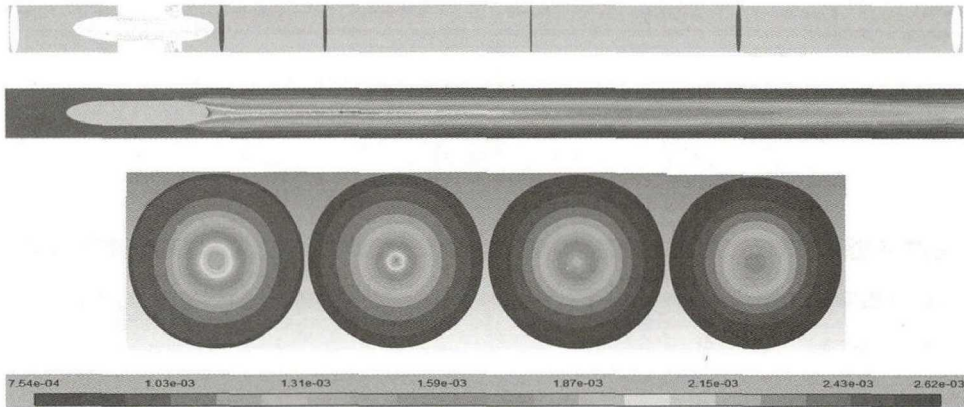


图 7 旋流场轴向截面油相相含率分布（流速 1.5m/s；含油率 0.1%）

### 3.2 入口流速及破乳剂对油滴破碎聚并的影响

在不改变其他变量，只改变油水乳状液入口速度的情况下，在导流片后 1000mm 处取一个横截面 C，计算不同入口速度下油滴粒径分布（图 8）。对比图 8 和图 4，可以看出导流片后大油滴所占比例显著增加，说明聚并效果明显。从图 8 中还可以看出，当入口速度由 0.4m/s 增加到 0.8m/s 后，大油滴体积分数增加；入口速度从 0.8m/s 增加到 1.5m/s，大油滴体积分数基本不变，达到一个稳定阶段；入口速度由 1.5m/s 继续增加后，大油滴体积分数出现下降，说明速度增大带来的剪切效应会导致油滴破碎，在一定程度上减少了大油滴的体积分数。

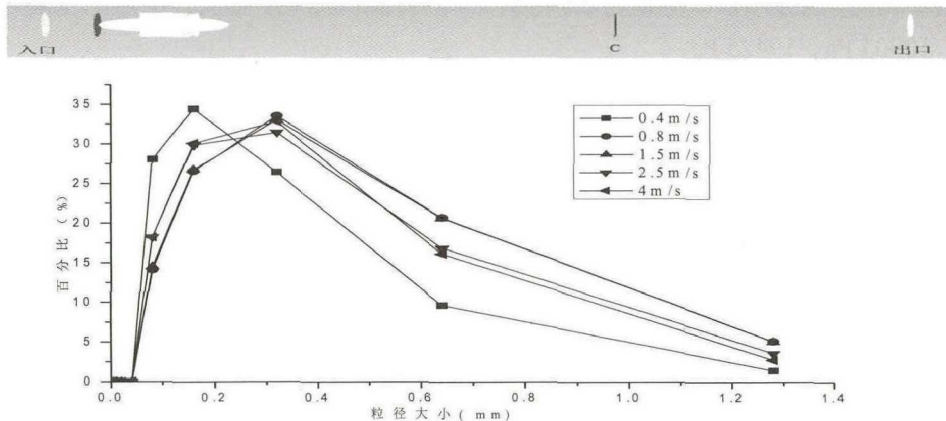


图 8.截面 C 处不同入口速度下油滴粒径分布



固定油水乳状液入口速度为 1.5m/s，改变表面张力系数  $\sigma$ ，计算导流片后 1000 mm 处截面 C 的油滴分布（图 9）。从图 9 中可以看出，表面张力系数减小，大液滴所占体积分数增加，说明表面张力系数越小，油滴聚并效果越好。

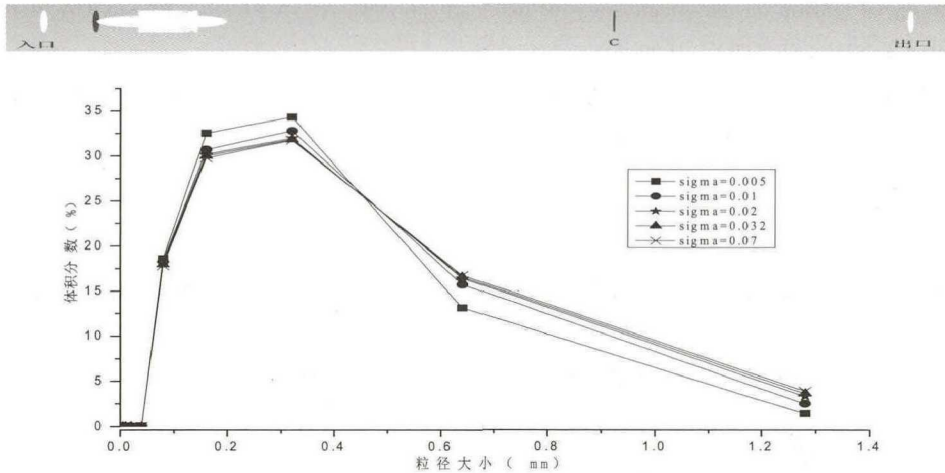


图 9 截面 C 处不同表面张力系数下油滴粒径分布

## 4 结论

通过对管道式旋流器的数值模拟，可以看出，在导流片前后会有明显的压降且入口流速越大，导流片前后的压降就越大。油水混合液在经过导流片后，离散相油滴有明显的聚集现象，同时，随着远离导流片，中心处的含油率呈现为先增大后减小的规律。改变油水乳状液流量（即入口流速），在一定范围内，流量增加可以达到提升油滴聚并率，提高大油滴比例的作用，但超出一定范围后，再增加流量，反而会使油滴破碎率提高，降低油水分离效果。在油水乳状液中加入破乳剂能够降低油水表面张力，表面张力越小，大油滴体积分数越高，油滴聚并效果越好。因此，为了得到较好的油水分离效果，应该先在油水乳状液中加入破乳剂，通过控制破乳剂的剂量，使乳状液表面张力达到极小值。当加入破乳剂的油水乳状液进入旋流场后，还需要控制入口流量，使流量维持在油滴聚并率最高的范围内。

## 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 Y X, Xu J Y. Oil and water separation technology. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 201506.
- 2 BENNETT M, Williams R. Monitoring the operation of an oil/water separator using impedance tomography[J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(5): 605-614.
- 3 KHAROUA N, KHEZZAR L, NEMOUCHI Z. Hydrocyclones for de-oiling applications-A review[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2010, 28(7): 738-755.

- 4 乔建江,詹敏,张一安. 乳化原油的破乳机理研究 I. 油水界面张力对破乳效果的影响[J]. 石油学报(石油加工), 1999, 15(2): 1-5.  
Qiao J, Zhan M, Zhang Y, et al. Study on the mechanism of petroleum emulsion's breaking I. Effect of interfacial tension on the effectiveness of demulsification[J]. ACTA PETROLEI SINICA PETROLEUM PROCESSING SECTION, 1999, 15(2): 1-5.
- 5 MENON V, WASAND T. Coalescence of water-in-shale oil emulsions[J]. Separation Science and Technology, 1984, 19(8-9): 555-574.

## **Oil-water separation characteristics under combined action of swirling flow field and demulsifier**

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

<sup>1</sup>School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

<sup>2</sup>Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** Oil-water separation is an indispensable process in crude oil exploitation. And physical-chemical composite algorithm is most frequently used in oil-water emulsion to improve separation efficiency. In this paper, the effect of demulsifier and swirling flow field on separation is studied by numerical simulation. In the numerical simulation, the Eulerian multiphase model and population balance model (PBM) are adopted to research the pressure distribution of oil-water flow in swirling flow field as well as the law of migration, coalescence and breakup of dispersed phase size. The results show that the swirling flow field has positive effect on oil-water separation. Without changing the surface tension coefficient, the coalescence rate of oil droplets increases first and then decreases with the increase of the inlet velocity. When keep a constant inlet velocity and change the surface tension coefficient, the coalescence rate of oil droplets increases with the decrease of the surface tension coefficient in the swirling flow field.

**Key words:** numerical simulation; swirling flow; demulsifier; oil-water separation