

文章编号:1674-2869(2014)08-0051-05

# 相间作用下脱油水力旋流器油相分布

郑小涛<sup>1</sup>, 龚 程<sup>1</sup>, 徐红波<sup>2</sup>, 喻九阳<sup>1</sup>, 刘 昊<sup>1</sup>

1. 化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉工程大学), 湖北 武汉 430205;

2. 广州民航职业技术学院飞机维修工程学院, 广东 广州 510470

**摘 要:**在旋流分离过程中, 油滴尺寸分布会因聚合与破裂现象而产生改变, 从而对分离效率产生影响. 利用 Fluent 软件结合群体平衡模型及多尺寸分组方法在考虑相间相互作用的情况下, 对脱油 Matthias Meyer 水力旋流器中油滴浓度及直径分布进行了模拟. 结果表明:含群体平衡模型的方法较不含群体平衡模型的方法所得到的分离效率精确度更高, 与实验数据相比较误差分别为 2% 与 6%. 模型中聚合现象较破裂现象明显, 使得大直径油滴含量增大且聚集在内旋流及圆柱段, 而小直径油滴含量减小且聚集在圆锥段. 分散相破裂效率与湍流耗散率成正比, 聚合效率与油相浓度成正比的关系得到了验证.

**关键词:**聚合; 破裂; 分散相; 水力旋流器

**中图分类号:**TE991.2

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2014.08.009

## 0 引 言

水力旋流器作为一种液-液分离设备因其维护费低、无移动单元、操作简单等优点, 已在多个行业得到了广泛应用和发展, 特别是在油田中处理含油废水以及对原油进行脱水两方面<sup>[1]</sup>. 因此为了揭示旋流分离器的分离特性及为旋流分离器设计提供理论依据和参考, 人们对旋流分离器展开了大量的研究.

Hargreaves and Silvester 通过代数应力模型对低含油率的水力旋流分离过程进行了模拟, 分析了其速度场及分离效率<sup>[2]</sup>. Grady 利用雷诺应力湍流模型(RSM)及代数滑移混合多相流模型对低含油率的旋流分离过程进行了速度场和分离效率研究<sup>[3]</sup>. 但前人对低含油率的旋流分离过程的研究中, 鲜有考虑到油滴在流场中的相互作用. 在液-液旋流分离过程中, 分散相液滴会因湍流而产生的瞬时剪切力和局部压力波动而产生破裂现象, 因相互碰撞而产生聚合现象. 液滴的破裂和聚合现象会导致液滴的粒径尺寸分布改变, 从而对分离效率产生重要影响<sup>[4]</sup>. 文中利用群体平衡模型(PBM)对低含油率的旋流分离过程中的相间相互作用及油相分布进行了分析.

## 1 数值模拟方程

### 1.1 群体平衡模型

利用 PBM 模拟因相间作用而产生的油滴的

破裂及聚合的现象, 建立油滴的密度平衡方程, 在大范围内预测油滴的尺寸和浓度. 利用 MUSIC (multi-size-group) 模型, 将油滴分为若干粒径组, 油滴的相互作用会导致不同粒径组的浓度的增加及减少<sup>[5]</sup>, 因此油相连续方程可表示为:

$$\frac{\partial(\alpha_o \rho_o f_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_o \rho_o u_o f_i) = S_i \quad (1)$$

式(1)中,  $\alpha$  为体积分数,  $\rho$  为密度,  $o$  为油相,  $f_i$  为油相中的不同粒径组的体积分数 ( $\alpha_{o,i} = f_i \alpha_o$ ,  $\sum \alpha_{o,i} = \alpha_o$ ). 式中源项为由油滴相互作用引起的第  $i$  组油滴质量的变化.

$$S_i = B_B - D_B + B_C - D_C \quad (2)$$

其中  $B_B$ 、 $B_C$  为由于聚合和破裂现象而引起的当前粒径组质量的增大,  $D_B$ 、 $D_C$  为由于聚合和破裂现象而引起的当前粒径组质量的减小.

### 1.2 破裂模型

采用 Luo 提出的破裂模型, 在假定湍流各向同性的基础上, 认为液滴破裂速率等于液滴与湍流的碰撞频率与破裂几率之积<sup>[6]</sup>.

$$g(v_j; v_i) =$$

$$0.5 \cdot 0.923(1 - \alpha_o) \left( \frac{\epsilon}{d_j^2} \right)^{1/3} \cdot g \int_{\xi_{\min}}^1 \frac{(1 + \xi)^2}{\xi^{11/3}} e^{-x_c} d\xi \quad (3)$$

式(3)中  $\epsilon$  为湍动能耗散率,  $d$  为油滴直径,  $\xi$  为各向同性湍流惯性子区漩涡的无因次尺度,  $x_c$  表示气泡破裂所需最小能量

$$x_c = \frac{12(f_{BV}^{2/3}) + (1 - f_{BV}^{2/3}) - 1\sigma}{2\rho_w \epsilon^{2/3} d_j^{5/3} \xi^{11/3}} \quad (4)$$

收稿日期:2014-06-11

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

其中,  $w$  为水相.

$$f_{BV}=\frac{d_i^3}{d_j^3}$$

(5)

1.3 聚合模型

文中采用 Prince 提出的聚合模型,聚合速率可以通过碰撞速率和聚合机率计算求得<sup>[7]</sup>:

$$\Omega(d_i,d_j)=\theta_{ij}\eta_{ij}$$

(6)

碰撞速率表达式如下:

$$\theta_{ij}=\frac{\pi}{4}n_in_j(d_i+d_j)^2\epsilon^{1/3}(d_i^{2/3}+d_j^{2/3})^{1/3}$$

(7)

式(7)中  $n$  为油粒浓度.

聚合机率表达式如下:

$$\eta_{ij}=\exp\left(-\frac{r_{ij}^{5/6}\rho_w^{1/2}\epsilon^{1/3}}{4\sigma^{1/2}}\ln\frac{h_0}{h_f}\right)$$

(8)

式(8)中  $h_o$  为初始液膜厚度为  $10^{-3}$ ,  $h_f$  为临界液膜厚度为  $10^{-6}$ ,  $\sigma$  为表面张力.

$$\text{临界半径 } r_{ij}=0.5r_ir_j/(r_i+r_j)$$

(9)

2 几何模型与计算方法

2.1 几何模型

旋流分离器采用 Matthias Meyer<sup>[8]</sup> 文中的模型,结构示意图如图 1 所示.旋流器总长 415 mm,底流口及溢流口直径为 10 mm,圆锥段角度为 6.3°,圆柱段直径为 50 mm,入口口为 14×5 mm 的矩形.

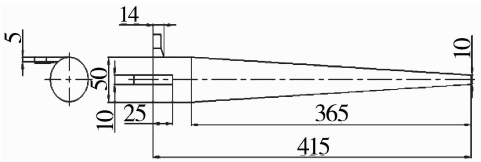


图 1 Matthias Meyer 模型

Fig. 1 The model of Martin Thew's

2.2 网格划分与边界条件

本研究利用 ICEM CFD 软件采用结构化六面体网格对几何模型进行网格划分,考虑到近壁处的速度梯度较大及内旋流处湍流强度较大,因此对模型中心处和近壁处网格进行了加密,网格划分如图 2 所示.

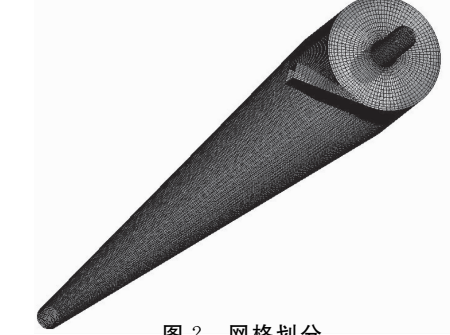


图 2 网格划分

Fig. 2 The grids of model

模拟介质主相为水,次相为油,各相物性如表 1 所示.油相被分为 12 个粒径组,粒径组直径与体积分数如表 2 所示.入口为速度入口,入口流速 3.2 m/s.

溢流口和底流口为自由出口,分流比分别为 0.4 与 0.6.采用欧拉-欧拉多相流模型,雷诺应力湍流模型(RSM).

表 1 各相物性

Table 1 The property

	密度/ kg · m <sup>-3</sup>	粘度/ Pa · s	表面张力/ N · m <sup>-1</sup>
水	998	1	
油	845	28	45.9×10 <sup>-3</sup>

表 2 粒径组参数

Table 2 Discrete droplet size fraction

组数 <i>i</i>	粒径 直径/ μm	体积 分数 <i>f<sub>i</sub></i>	油相 总体 积分 数 $\alpha_o$	油相 Sauter-mean 平均尺寸/ μm
1	15	0.009	0.005	150
2	40.1	0.035		
3	66.7	0.055		
4	89	0.064		
5	111.1	0.08		
6	130.2	0.105		
7	145.8	0.104		
8	195.8	0.285		
9	229.4	0.107		
10	256.9	0.056		
11	307.9	0.053		
12	431.5	0.046		

3 计算结果及分析

3.1 分离效率及油相分布分析

根据式(10)得出含 PBM 模型与不含 PBM 模型的分离效率分别为 95% 与 87%,相比于 Meyer and Bohnet 的实验分离效率 93%,误差分别为 2% 与 6%.

$$E=1-\frac{M_{o,b}}{M_{o,i}}$$

(10)

其中:  $M_{o,b}$  为底流口油相质量流量,  $M_{o,i}$  为入流口油相质量流量.

为进一步分析内部油相分布,因此于圆柱段和圆锥段选取两处特征截面.截面分布图如图 3 所示.

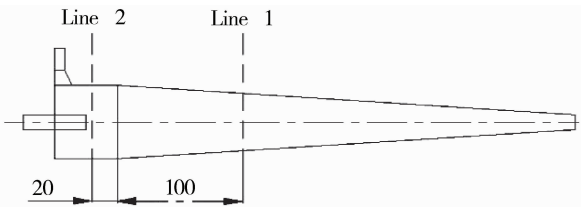


图 3 截面分布图

Fig. 3 The localization of cross section

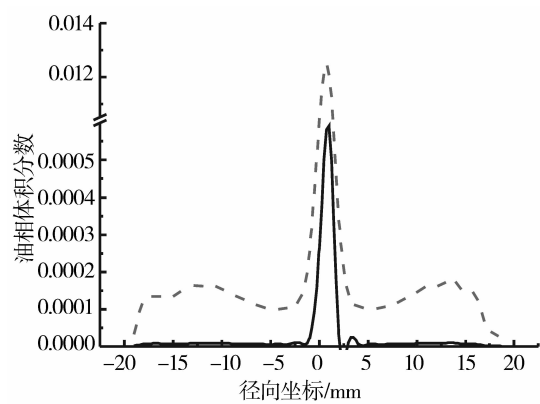


图 4 Line1 截面径向油相体积分数图  
Fig. 4 The oil fraction distribution on Line1  
注:——含 PBM,-----不含 PBM

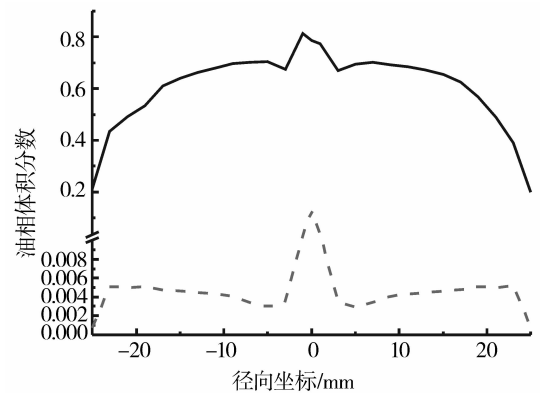


图 5 Line2 截面径向油相体积分数图  
Fig. 5 The oil fraction distribution on Line2  
注:——含 PBM,-----不含 PBM

图 4、图 5 分别为 Line1、Line2 的截面径向油相体积分数图。由此两图可知,含 PBM 分离器内部的油相分布与不含 PBM 分离器内部油相分布趋势一致。在内旋流处油相含量显著增加,外旋流处油相含量随径向距离增加而降低,内旋流与外旋流交界处内侧油相浓度下降,是由于油相进入内旋流后往中心处移动。由图 4 和图 5 可看出含 PBM 模型较不含 PBM 模型在圆锥段处油相含量小 1~2 个数量级,而圆柱段处油相含量大 2~4 个数量级。此现象是因为 PBM 模型中聚合现象占主导,使得圆柱段小直径油滴含量减少,大直径油滴含量增加,易于从圆柱段分离;而不含 PBM 模型中,油滴直径并未改变,小直径油滴需进入圆锥段,依赖该段更高的离心力进行分离。

3.2 分散相相互作用分析

图 6 为分离器内部和入口的油相积分液滴尺寸分布图。由图 6 可知分离器内部的积分液滴尺寸分布曲线  $Q_{real}$  较入口积分液滴尺寸分布曲线  $Q_{in}$  靠右,说明在所选分离器模型内部,油滴的聚合现象占主导,使得小油滴含量降低,大直径油滴含量增加。

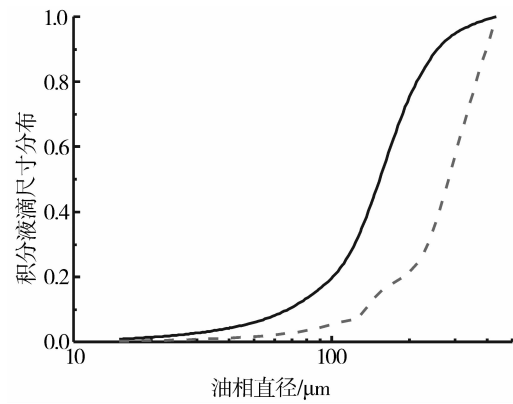


图 6 积分液滴尺寸分布图  
Fig. 6 The cumulative drop size distribution  
注:—— $Q_{in}$ ,----- $Q_{real}$

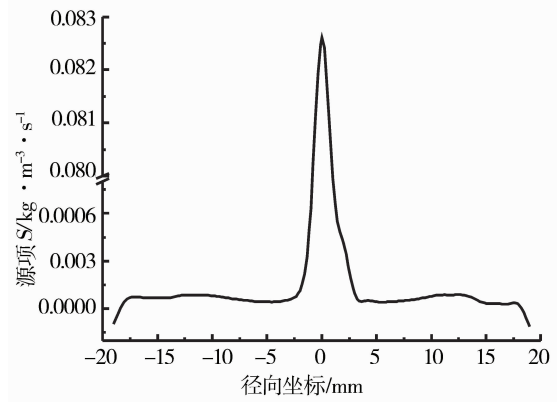


图 7 Line1 最大直径油滴源项图  
Fig. 7 The twelfth size group's net source on Line1  
注:——最大直径油滴

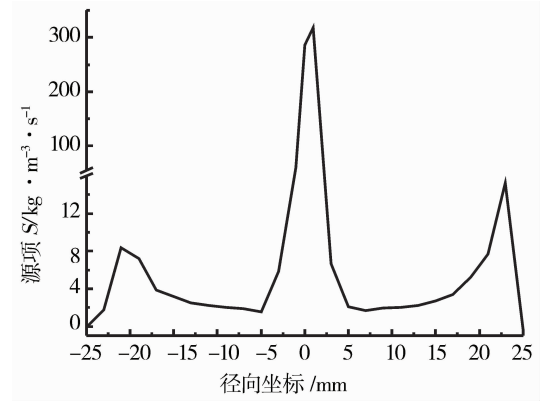


图 8 Line2 最大直径油滴源项图  
Fig. 8 The twelfth size group's net source on Line2  
注:——最大直径油滴

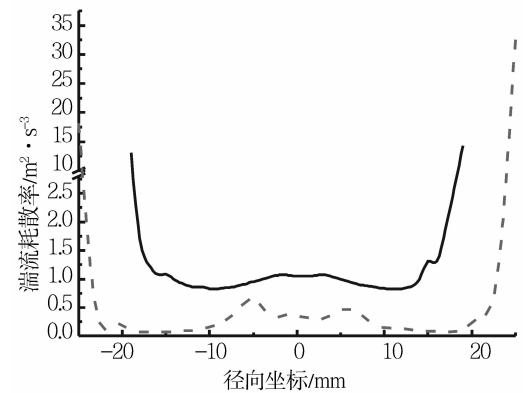


图 9 湍流耗散率  
Fig. 9 The turbulence dissipation rate  
注:——Line1,-----Line2

最大直径油滴的含量只能因聚合现象而增加,破裂现象而减少.图 7 和图 8 分别为截面 Line1 和 Line2 的最大直径油滴源项分布图.图 9 为截面 Line1 和 Line2 的湍流耗散率图.由图 7 和图 8 及图 9 可知,在圆锥段及圆柱段,聚合现象占主导,由于破裂率与湍流耗散率成正比,因此近壁处源项为负数.由图 4~8 可知,由于聚合效率与油相浓度成正比,因此内旋流内部聚合现象明显.圆柱段较圆锥段,油相浓度高且湍流耗散率低,因此最大直径油滴的源项高,生成量大.

#### 4 结 语

a. 采用 PBM 模型,考虑油滴在流场中的聚合和破裂现象,能较准确的对低含油率水力旋流器中流场进行模拟,模拟结果较不考虑聚合和破裂现象的方法精确,其与实验结果误差分别为 2% 与 6%.

b. 对于本文所采用的模型,其聚合现象较破裂现象明显.因此小直径的油滴聚合成大直径的油滴,更易于圆柱段进入内旋流从溢流口流出.较不含 PBM 模型,其圆柱段油相含量高、圆锥段油相含量低.

c. 验证了破裂效率与湍流耗散度成正比、聚合效率与油相浓度成正比的关系,因此在模型中内旋流处油滴易发生聚合,在近壁处等高湍流耗散率区域油滴易发生破裂.

#### 致 谢

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

#### 参考文献:

[1] 郑小涛,徐成,喻九阳,等.液-液旋流分离器分离特性数值模拟[J].武汉工程大学学报,2014,36

(3):48-52.

ZHENG Xiao-tao, XU Cheng, YU Jiuyang, et al. Numerical simulation of separation character in liquid-liquid hydrocyclone [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(3): 48-52. (in Chinese)

[2] SCHUTZ S, GORBACH G, Piesche. Modeling fluid behavior and droplet interactions during liquid-liquid separation in hydrocyclones [J]. Chem Eng Sci, 2009(64): 35-39.

[3] NOROOZI S S, HASHEMABADI H, CHAMKHA A J. Numerical analysis of drops coalescence and breakage effects on De-oiling hydrocyclone performance [J]. Separation Science and Technology, 2013 (48): 991-1002.

[4] 舒朝辉.油水分离水力旋流器分离特性及其软件设计的研究[D].成都:四川大学,2001.

SHU Zhao-hui. Study on separation characteristics and software design of hydrocyclones for Oil-water separation [D]. Chendu: Sichuan University, 2001. (in Chinese)

[5] PATRUNO L E, DORAO C A, SVENDSEN H F, et al. Analysis of breakage kernels for population balance modeling [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(3): 501-508.

[6] 曹杨. Rushton 搅拌釜式生物反应器的射线 CT 测量及流体力学模拟计算[D].湘潭:湘潭大学,2010.

CAO Yang. The CT measurement and CFD simulation of rushton stirred tank bioreactor [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2010. (in Chinese)

[7] MICHAEL J Prince, HARVEY W Blanch. Bubble coalescence and break-up in Air-sparged bubble columns [J]. AIChE Journal, 1990, 36(10): 1485-1499.

[8] MATTHIAS Meyer, MATTHIAS Bohnet. Influence of Entrance Droplet Size Distribution and Feed Concentration on Separation of Immiscible Liquids Using Hydrocyclones [J]. Chem Eng Technol, 2003, 26(6): 660-665

## Oil distribution in de-oiling hydrocyclone under interphase interaction

*ZHENG Xiao-tao , GONG Cheng , XU Hong-bo , YU Jiu-yang , LIU Hao*

Hubei Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety(Wuhan Institute of technology), Wuhan 430205,China;  
Department of Aircraft Maintenance and Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510470,China

**Abstract:** In the separation process of hydrocyclone, the distribution of the size of oil droplets changes with the coalescence and breakage, and it affects the separation efficiency. Considering the interphase interaction,the Fluent software combined with population balance model and multi-size-model was adopted to simulate the concentration and size distribution of oil droplets in the de-oiling Matthias Meyer's hydrocyclone. The results show that the separation efficiency obtained by the population balance model is more accurate than that without the population balance model and the errors between the simulated data and the experimental data are 2% and 6% respectively. As coalescence is more obvious than breakage in this model, the concentration of the large oil droplets increases and the large oil droplets gather in the inner swirling flow and the cylindrical section, while the concentration of the small oil droplets decreases and the small oil droplets gather in the conic section. The relationships are verified that the efficiency of breakage is proportional to the turbulent dissipation rate and the efficiency of coalescence is proportional to the concentration of the oil phase.

**Keyword:** coalescence; breakage; dispersed phase; hydrocyclone

本文编辑:陈小平