

# 操作参数对三相分离旋流器 分离性能影响的研究

袁惠新\*, 严沁萍, 李双双

(常州大学机械工程学院, 江苏常州 213164)

**摘要:**为了探究改进结构后的操作参数对三相分离器分离性能的影响,采用CFD软件Fluent对其进行数值模拟研究,并通过操作参数试验间接验证。结果表明,随着进料流量的增大,油相和固相分离效率均增大,而中心溢流分率对油相分离效率的影响要大于固相。模拟结果表明,随着流量增大,油相分离效率在70%以上,固相分离效率在80%以上;中心溢流分率增大,油相分离效率在90%以上,固相分离效率则无明显变化。

**关键词:**计算流体力学;三相分离旋流器;操作参数;分离性能

中图分类号:TE992.3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)08-0190-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.08.046

## Influence of operating parameters on separation performance of a three-phase hydrocyclone

YUAN Hui-xin\*, YAN Qin-ping, LI Shuang-shuang

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** To explore the influence of the improved structure on the performances of the three-phase hydrocyclone, the flow field and separation process are simulated through the CFD software FLUENT, which is also indirectly validated by experiment. The results show that with the increase of inlet flow rate, oil phase and solid phase separation efficiency are both increased. The ratio of central outflow has greater influence on the oil phase than the solid one. Along with the increase of inlet flow rate, the efficiency of oil phase and solid phase is above 70% and 80%, respectively. The growth rate of central outflow makes the efficiency of oil phase reaches above 90%, without significant influence on the solid phase.

**Key words:** CFD; three-phase hydrocyclone; operating parameters; separation performance

随着炼油工艺技术快速发展,延迟焦化工艺成为重油深度加工的主要方法之一<sup>[1]</sup>。其生产过程中运用水力除焦技术冲洗焦炭塔中的焦炭,过程中会产生大量的冷焦水。目前,延迟焦化工艺过程中主要采用旋流除焦器去除冷焦水中焦粉<sup>[2]</sup>,然而实际生产过程中发现溢流出现焦粉颗粒,造成后续设备阻塞而严重影响冷焦水处理系统的正常运转,传统的旋流除焦器无法克服这一缺点。

针对冷焦水(焦粉、油分散相、水连续相)及类似的这种多相混合物的处理,在采用旋流器进行分离时,充分考虑固体颗粒的亲油性与疏水性,采用旋流式固-液-液三相分离器,将溢流口改进成同轴套筒式溢流管结构,在不扰乱流场结构的情况下,部分焦粉颗粒可以从底口排出;带粉油芯从中心溢流口排出;水从环形溢流口排出,从而实现了油、水、焦粉的同时分离。这种三相分离旋流器具有较高的分离效率,可有效防止堵塞的发生。

本文中采用CFD软件Fluent对三相分离器进行模拟研究,分析操作参数对其分离性能的影响,为三相分离旋流器的开发应用提供参考。

## 1 三相分离旋流器的数值计算方法

### 1.1 分离器模型建立及网格划分

用Gambit对三相分离器进行了三维建模,三相分离器的结构如图1。采用六面体结构化网格分区

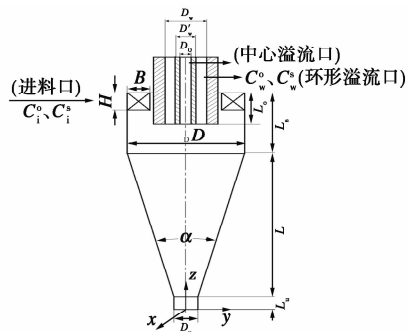


图1 分离器结构图

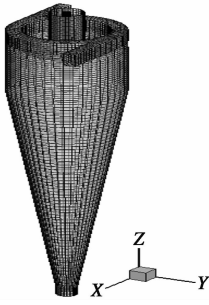


图2 分离器网格划分图

表1 分离器基本尺寸

结构参数	数值
分离器直径 $D/\text{mm}$	68
中心溢流口直径 $D_o/\text{mm}$	4
环形溢流口内 ( $D_w'$ ), 外径 ( $D_w$ )/mm	5, 16
底流口直径 $D_u/\text{mm}$	12
入口 $B/\text{mm}$	5.33
入口 $H/\text{mm}$	10.65
柱段长度 $L_c/\text{mm}$	81
套管插入深度 $L_o/\text{mm}$	27
底流管长度 $L_u/\text{mm}$	10
锥段长度 $L/\text{mm}$	283
锥角 $\alpha/(\text{°})$	12

域分别生成计算单元网格<sup>[3]</sup>,然后拼接生成了总的网格系统,整个三维模型划分了93 488个网格,如图2。分离器基本尺寸见表1。

## 2 数值方法

### 2.1 计算方法

计算时,采用 Pressure Based 隐式求解器,湍流模型选用 RSM 模型<sup>[4-5]</sup>,由于冷焦水中分散相的体积分数低于5%,采用颗粒轨道模型(DPM)模拟油滴、焦粉的分离过程<sup>[6-7]</sup>,控制方程中压力-速度耦合项选用协调一致的 SIMPLEC 算法,其中压力插补格式采用 PRESTO 格式控制,离散格式中对流项采用 QUICK 格式。首先获得稳定的单相流场(此时不考虑分散相),可得到旋流器内部连续相压力、速度分布,作为三相流计算的初始场,再加载颗粒相求解颗粒运动方程,并在旋流器进出口进行颗粒捕捉,最终可得到油与焦粉的分离效率。

### 2.2 物性参数及边界条件

本文中单相模拟物料为水,三相模拟物料为冷焦水。物料及相关特性参数如表2。

表2 物料及相关物性参数

物相	物质	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	浓度 $C/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	粒径 $d/\mu\text{m}$
连续相	水	998.2		
分散相1	油	870	1	80
分散相2	焦粉	1200	1	40

(1)连续相边界条件。进料口设置为速度入口,速度方向垂直于入口界面指向入口内侧。溢流口和底流口设置为自由出口。固壁边界采用标准壁面函数,假设为无滑移壁面边界。

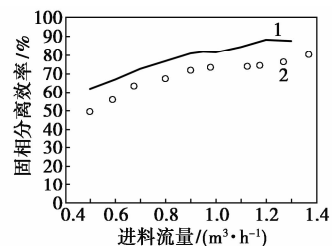
(2)分散相边界条件。本文中的模拟针对颗粒粒径的设置分2种情况,一是单一粒径分布,颗粒参数如表2,另一种是颗粒粒径为 Rosin-Rammler 分布<sup>[8]</sup>。在这种分布下,颗粒粒径整个范围内被分成多个区间,每个区间都用平均直径来表示,模拟计算颗粒运动轨迹时用的就是这个平均直径。本文中 R-R 分布模型的参数值为:油相颗粒平均粒径  $d_m^o = 150$ , Spread Parameter 为 6.87;固相颗粒平均粒径  $d_m^s = 70$ , Spread Parameter 为 4.01。

(3)多相模拟的边界条件。分散相颗粒由入口截面均匀入射,速度和液相相同;环形溢流口设置为逃逸,颗粒运行至此终止计算;分散相颗粒碰壁后,满足镜面反射原理,切向速度减小,径向速度降低,且方向相反,反弹系数为0.5。

### 2.3 多相模拟可靠性的验证

物理模型的近似、网格的划分、边界条件的设置以及其他的一些因素等都可能使模拟值偏离实际的情况,因此,在对结果分析前,要先对数值模拟的可靠性进行验证。

图3是不同流量下固相颗粒分离效率的模拟结果和实验结果的比较,模拟结果要比实验值略大,这是由于模拟时未考虑颗粒所受到的虚假质量力、Magnus 力和 Saffman 力<sup>[9]</sup>,而且实验所用三相分离器在尺寸、形位方面存在制造误差,如各出口与旋流器的同轴性等。但模拟出的曲线和实验得出的结果趋势是一致的,反映了模拟的可靠性程度。



1—模拟值;2—实验值

图3 进料流量与固相分离效率的关系

### 3 模拟结果及分析

影响分离性能的因素很多,归纳起来可分为 2 大类,操作参数和结构参数。三相分离器的操作参数是指操作者根据实际分离情况,现场进行调节分离器的某些参数,本文中主要考虑进料流量与分流比这 2 个因素。

#### 3.1 进料流量对分离性能的影响

图 4 是在分流比恒定、进料流量变化时模拟得到的进料流量与分离效率的关系。

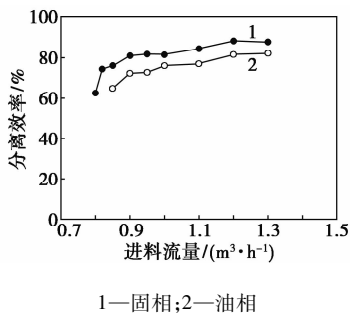


图 4 进料流量对分离效率的影响

从图 4 中可知初始阶段油相和固相分离效率均随进料流量增大而增大。这是因为进料流量的改变会影响切向速度的大小,改变旋流场中的离心力,从而影响分离效率。油相的分离效率在进料流量 0.85 ~ 1.0 m³/h 的范围内迅速上升到 70% 左右,固相的分离效率在 0.8 ~ 0.9 m³/h 的范围迅速上升到 80% 左右,之后变化缓慢。这是因为进料流量达到一定程度时,切向速度过大,产生了较高的剪切力,湍流强度增大,分散相更容易受湍流脉动的影响,还没来得及分离便会被带入环形溢流管排出。

图 5 和图 6 分别是分流比及分散相含量固定,进料颗粒相粒度为 R-R 分布,模拟得到的不同进料流量下的油相粒级效率曲线和固相粒级效率曲线。图中表明,进料流量相同时,油相、固相的分离效率

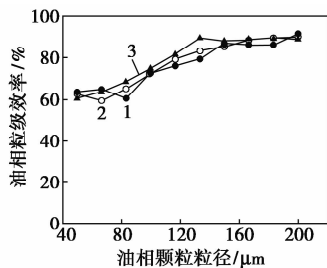


图 5 不同进料流量下油的粒级效率  
 进料流量:1— $Q_i = 1.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ;2— $Q_i = 1.16 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  
 3— $Q_i = 1.3 \text{ m}^3/\text{h}$

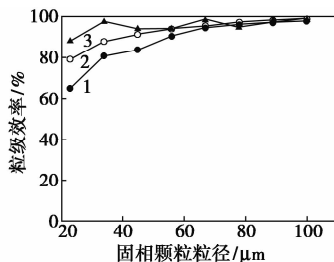


图 6 不同进料流量下固相的粒级效率  
 进料流量:1— $Q_i = 1.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ;2— $Q_i = 1.16 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  
 3— $Q_i = 1.3 \text{ m}^3/\text{h}$

随进料粒径的增大而上升。不同流量下,粒径大的颗粒的效率也越大。对于固相颗粒来说,流量 1.1 m³/h 时,小颗粒的级效率较小,此时级效率随粒径变化明显,而当流量增大到 1.2 m³/h 以后,小颗粒的级效率基本在 90% 以上,分离效率几乎不受粒径的影响。流量的变化对小颗粒影响要大于大颗粒。而对于油来说,无论粒径大小,进料流量的增大,效率的增幅均很小。

#### 3.2 分流比对分离性能的影响

定义三相分离器中心溢流分率、环形溢流分率、底流分率<sup>[10]</sup>分别为:

$$R_o = Q_o/Q \quad (1)$$

$$R_w = Q_w/Q \quad (2)$$

$$R_u = Q_u/Q \quad (3)$$

式中, $Q$  为进料体积流量; $Q_o$  为中心溢流体积流量; $Q_w$  为环形溢流体积流量; $Q_u$  为底流体积流量。

图 7 是在进料流量  $Q_i = 1.16 \text{ m}^3/\text{h}$ ,底流分率  $R_u = 0.1$  时模拟得到的中心溢流分率与分离效率的关系曲线。

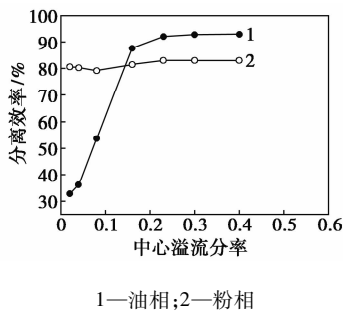
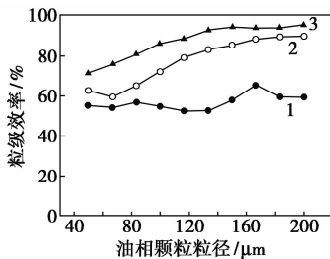


图 7 中心溢流分率对分离效率的影响

图 7 中表明,中心溢流分率  $R_o$  对油相分离效率的影响要大于固相。 $R_o < 0.16$  时,中心溢流分率  $R_o$  增大,油相分离效率迅速上升至 85% 左右;当  $R_o > 0.16$  时,分离效率缓慢上升,达到 90% 之后,基本不再改变。对于固相, $R_o$  增大,分离效率没有明显变化。

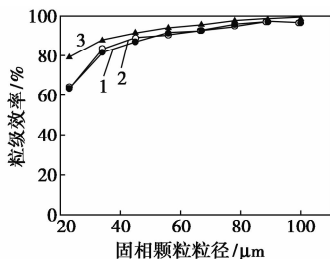
$R_0$  增大时,中心溢流管内轴向速度明显增高,流量增大,这使得更多的油相颗粒从该出口被分离出去,从而环形出口中排出的油相颗粒变少,使得油相分离效率提高,而绝大多数的固相颗粒从底流口排出,因而  $R_0$  变化并不会很大程度上影响固相颗粒的分离。

图8和图9分别是模拟得到在不同中心溢流分率下的油相和固相粒级效率曲线,进料颗粒粒径为R-R分布。图中表明,中心溢流分率保持不变时,颗粒粒径越大,油相、固相分离效率越高。中心溢流分率变化时, $R_0$  越大,油相和固相粒级效率越大,且大粒径油相颗粒和小粒径固相颗粒更明显。相对于油相来说,固相颗粒分离效率几乎不受  $R_0$  的影响。



中心溢流分率:1— $R_0 = 0.2$ ;2— $R_0 = 0.28$ ;3— $R_0 = 0.3$

图8 不同  $R_0$  下油相粒级效率



中心溢流分率:1— $R_0 = 0.2$ ;2— $R_0 = 0.28$ ;3— $R_0 = 0.3$

图9 不同  $R_0$  下固相粒级效率

## 4 结论

随着进料流量的增大,油相和固相分离效率均

增大。对于固相颗粒,小颗粒受进料流量的影响较大,粒径大的颗粒受进料流量的影响较小,当粒径增大到一定程度时,粒级效率几乎不变,而对于油相,无论粒径大小,进料流量的增大,效率的增幅均很小,进料流量对固相颗粒粒级效率的影响比油相大。

$R_0$  对油相分离效率的影响要大于固相。 $R_0 < 0.16$  时,随着  $R_0$  的增大,油相分离效率迅速上升到85%左右;当  $R_0 > 0.16$  时,分离效率缓慢上升,达到90%之后,基本不再改变。而对固相而言, $R_0$  的增大,分离效率没有明显变化。 $R_0$  越大,油相和固相粒级效率越大,且大粒径油相颗粒和小粒径固相颗粒受颗粒粒径的影响越明显。相对于油相来说,固相颗粒分离效率受  $R_0$  的影响较小。

## 参考文献

- [1] 孙宇,郑岩,胡勇刚.延迟焦化在炼油工业中的技术优势及进展[J].石化技术与应用,2012,30(3):260-264.
- [2] 薛旭.延迟焦化装置冷焦水密闭处理技术的应用[J].石油和化工设备,2008,11(3):31-34.
- [3] 王瑞金,张凯,王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [4] Murthy Y R, Bhaskar K U. Parametric CFD studies on hydrocyclone[J]. Powder Technology, 2012, 230:36-47.
- [5] Delgadillo J A, Rajamani R K. A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem[J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 77(4):217-230.
- [6] 彭炯,王晓瑾,邹磊,等.旋流分离器内三维两相流场的数值模拟[J].计算机与应用化学,2006,23(8):728-732.
- [7] Fluent I. FLUENT user's guide; Release 5.4.8[Z]. Lebanon, USA:Fluent Inc,2001.
- [8] Macias Garcia A, Cuerda Correa Eduardo M, Diaz Diez M A. application of the rosin-rammler and gates gaudin schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork[J]. Materials Characterization, 2004, (52):159-164.
- [9] Wang L Y, Zheng Z C, Wu Y X, et al. Numerical and experimental study on liquid-solid flow in a hydrocyclone[J]. Journal of Hydrodynamics, B, 2009, 21(3):408-414.
- [10] 袁惠新,冯磊.分离工程[M].北京:中国石化出版社,2001. ■

## 空气产品公司将在南京投资新建气体厂

2016年7月20日,全球领先的工业气体公司——空气产品公司宣布将在南京市浦口经济开发区投资建设气体工厂和其它相关设备,向园内企业长期供应大用量的超高纯工业气体。

浦口开发区是江苏省级高新技术园区,将建成包括集成电路、新材料、生物医药等产业在内的高端制造业之乡。该园区与南京化学工业园同属于江北新区,相距仅35 km。

空气产品公司已经在南京化学工业园确立了领先的市场地位,通过管道和其它供气模式为园区内以及遍布南京的几百家客户服务。公司在园区内建有3座大型空分装置,通过管道为包括惠生能源和塞拉尼斯在内的多家园区大用量客户提供工业气体,并服务于南京的商用气体市场。随着在浦口开发区的投资,公司将进一步扩大供应能力并增强在南京的市场领先地位,以更好地抓住南京日益增长的商业机遇。(Jenny Xu)