



## Progress in numerical simulation of liquid-liquid cyclone separator

Yanni CHI, Xianghai MENG, Rui ZHANG, Haiyan LIU, Zhichang LIU\*

State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

**Abstract:** The cyclone separator is a liquid-liquid separation device that has been developed very rapidly in recent years. The main advantages of cyclone separators are high efficiency, energy saving, economic space occupation, and low cost. It is widely used in such industries as mineral processing and metallurgy, sewage treatment, food, paper making, and petroleum chemistry. Therefore, it is particularly important to study the relevant characteristics of the cyclone separator. Besides, numerical simulation is an important method for the development and research of liquid-liquid cyclone separators. This work systematically introduced the research progress of the numerical simulation of liquid-liquid cyclone separators, where the effects of the selection of cyclone separator model, the variation of geometric structure (including the inlet, the cone section, the overflow pipe, the guide vane and the cylindrical section) and operating parameters (including the split ratio, the total flow and the feed ratio) on the separation efficiency as well as the flow field were analyzed, and the final evaluation indices (including the separation efficiency and the pressure drop) were also proposed. Besides, some opinions on the change of geometrical structure and operating parameters influencing the separation efficiency and the pressure drop were provided, and the numerical simulation of the vortex and the droplet breaking and coalescing, as well as the development of new separation efficiency evaluation formulas were prospected. New ideas for the following up research workers of the cyclone separator were provided.

### Key learning points:

- (1) The selection of the cyclone separator model in the numerical simulation was summarized.
- (2) The influence of geometric structure and operating parameter changes on separation efficiency and flow field were analyzed.
- (3) The future research direction of liquid-liquid cyclone separator was pointed out.

**Key words:** cyclone separator; numerical simulation; geometric structure; operating parameters; separation; evaluation index

收稿: 2020-08-13, 修回: 2020-11-10, 网络发表: 2020-12-03; Received: 2020-08-13, Revised: 2020-11-10, Published online: 2020-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 21890763; 21425626)

作者简介: 池燕妮(1990-), 女, 湖北省孝感市人, 博士研究生, 化学工程与环境专业, E-mail: cyn18810369570@163.com; 刘植昌, 通讯联系人, E-mail: lzch@cup.edu.cn.

**引用格式:** 池燕妮, 孟祥海, 张睿, 等. 液液旋流分离器的数值模拟研究进展. 过程工程学报, 2021, 21(10): 1132-1141.

Chi Y N, Meng X H, Zhang R, et al. Progress in numerical simulation of liquid-liquid cyclone separator (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(10): 1132-1141, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220262.

# 液液旋流分离器的数值模拟研究进展

池燕妮, 孟祥海, 张 睿, 刘海燕, 刘植昌\*

中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249

**摘 要:** 旋流分离器是近年来发展非常迅速的液液分离设备, 其主要优点是高效、节能、占地面积少且成本低, 工业应用广泛。数值模拟是液液旋流分离器研发与研究的重要手段。本工作系统地介绍了目前液液旋流分离器在数值模拟中的研究进展, 详细地分析了数值模拟过程中旋流分离器模型的选择、几何结构和操作参数的改变对分离效率和流场的影响及最终的评价指标, 并对几何结构和操作参数改变提出了见解, 对液滴破碎和聚并、旋涡的数值模拟及开发新的公式评价分离效率进行了展望。

**要 点:**

- (1) 汇总了数值模拟中旋流分离器模型的选择。
- (2) 重点综述了几何结构和操作参数改变对分离效率和流场的影响。
- (3) 展望了液-液旋流分离器今后的研究方向。

**关键词:** 旋流分离器; 数值模拟; 几何结构; 操作参数; 分离; 评价指标

**中图分类号:** TQ460.6+4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2021)10-1132-10

## 1 前 言

目前含油污水和高含水油田在工业上属于较难分离的液液体系, 然而随着海上油田开采及环保要求的逐步提高, 高效率的油水分离已成为能源化工行业亟待解决的问题。当今成熟的高含水油水体系分离工艺主要包括浮选法和重力沉降法, 但占地面积大、成本高且分离效果不佳, 因此开发新型的油水分离工艺迫在眉睫。

旋流分离器是利用不互溶液体密度差异在高速旋转过程中产生不同的离心力而实现两相分离的设备, 最早的研究始于英国 Thew 等<sup>[1-3]</sup>的研究, 他们用旋流分离器实现液液分离并设计出了样机。从此, 旋流分离器逐步推广并取得了大量的研究成果<sup>[4-7]</sup>, 具有占地面积少、成本低、不受海上船体振动影响等优点<sup>[8,9]</sup>, 在油水分离中具有广阔的应用前景: 如在海洋平台上净化油水气<sup>[10]</sup>; 在原油预处理过程中使大部分水在生产井附近脱除<sup>[11]</sup>; 加拿大的前沿工程研究中心将旋流分离器应用于井下油水分离, 有效提高了油藏采收率<sup>[12]</sup>。尽管液液旋流分离技术具有广阔的应用前景, 但液液旋流分离器依赖传统实验成本高、内部流场测量困难, 近几年随着计算机的快速发展和对计算流体动力学(CFD)<sup>[13-16]</sup>认识地不断加深, 数值模拟有效克服了传统实验的弊端, 为液液旋流分离器深入研究提供了新的思路。

基于上述背景, 本工作主要对数值模拟中液液旋流分离器模型选择、几何结构和操作条件对性能的影响进

行分析总结, 并指出了液液旋流分离器在后续研究中的重点研究方向。

## 2 数值模拟模型的选择

目前对流体运动规律分析基于流体力学理论, 通过精确求解流体运动控制方程组判断出流体的运动规律。旋流分离器分离液液两相时, 各相在流动过程中具有特定的惯性响应并与流场相互作用, 影响液液体系分离的因素主要有两相的物性、连续相流场的湍流效应、液滴对湍流场的影响效应、相间作用力、液滴的破碎和聚并等。在 CFD 中描述液液分离体系的模型主要由多相流模型、湍流模型、两相曳力模型、液体表面张力模型、湍流变动模型等。其中多相流模型是针对多相体系提出来的, 考虑了相间分离传质; 湍流模型耦合多相流模型使用, 描述了两相流场的湍流效应; 两相曳力模型主要考虑相间阻力作用, 目前是基于气固、气液或液固提出的经验方程, 在运用时与实验数据进行对比选择合适的曳力模型; 液体表面张力模型是将作用在相界面上的力转化为周围体积内的力, 属于相间作用力; 湍流变动模型考虑了离散相颗粒对连续相湍流场的影响效应, 主要取决于离散相的体积分数和平均影响程度。多相流模型和湍流模型是模拟液液分离中最基础的模型, 其他模型耦合这两个模型使用, 因此本工作重点对多相流模型和湍流模型展开讨论。

## 2.1 多相流模型

数值模拟主要有两种多相流模型用来描述两相或多相间的相互作用,分别为欧拉-拉格朗日模型与欧拉-欧拉模型。前者对连续相流体在欧拉框架下求解 Navier-Stokes 方程,对离散相在拉格朗日框架下求解颗粒轨道方程,记录每时每刻离散相所在位置,变化的是物质坐标;后者欧拉-欧拉模型以空间点为对象,将每相均处理为互相贯穿的连续介质,由于一相所占体积分数无法再被其他相占有,因此每相的体积分数是时间和空间的连续函数,且所有相的体积分数之和为1,关注的是固定在空间点上的流体状态,以空间坐标为自变量。由于旋流分离器应用于液液两相分离时,研究的流体经过固定位置上的分散情况,且两相在同一空间内存在相互渗透的特性,因此通常选择欧拉-欧拉模型。

欧拉-欧拉模型总共分为三种:VOF (流体体积模型)、Mixture (混合模型)和 Eulerian (欧拉模型)。VOF 是不同的流体组分共用一套动量方程,在每个计算单元内记录各组分所占有的体积率,适用于具有分层或表面自由流动的情况;Mixture 是求解混合物的动量方程,并通过相对速度描述分散相;Eulerian 是单独求解每一相的动量方程和连续方程,耦合了压力项和各界面的交换系数。Mixture 和 Eulerian 均适用于液液分离的情况,隋元伟等<sup>[17]</sup>将 Eulerian 和 Mixture 用于旋流分离器中分离油水,发现 Eulerian 得出分离效率随油滴粒径变化的模拟结果与实验结果更加接近;Zhang 等<sup>[18]</sup>运用 Eulerian 研究了不同操作参数下的流场分布规律,模拟结果的误差小于5%;Oropezaavazquez 等<sup>[19]</sup>的研究也得出了类似的结论,为广大研究者在处理液液体系时选择模型提供了参考。

旋流分离器中流体的运动是复杂且快速变化的,主要呈螺旋式运动。当体系中只有液液两相体系时,宜选用 Eulerian 模型<sup>[20-22]</sup>,因为 Eulerian 考虑了两相之间的阻力,更接近旋流分离器液液两相间的实际分离情况。但当体系中存在气体时,为了捕捉气液之间相界面可采用 VOF 模型<sup>[23-25]</sup>,如针对油田中含聚合物的污水一般采用注气的方法提高轴向速度,减小压力降,改善分离效果。此时液液两相和气体分为三层,气体在最中心层,重相在边壁,轻相位于气体和重相之间,三者呈现明显的分界。

## 2.2 湍流模型

合适的湍流模型<sup>[26-28]</sup>是数值模拟实现良好预测结果的基础。在 CFD 中单相湍流模型主要有 S-A 单方程、Standard  $k-\varepsilon$ 、RNG  $k-\varepsilon$  和 RSM (雷诺应力)模型等。其中前三者基于 Boussinesq 假设,湍动情况视为各向同

性,而旋流分离器内部是三维的强旋流场;RSM 模型考虑了湍流场中的各向异性效应,抛弃了 Boussinesq 假设,考虑了流线型弯曲、旋涡、旋转和张力的快速变化,能够准确地预测复杂的湍流场情况,已被越来越多的研究者验证<sup>[29,30]</sup>。

Hoekstra 等<sup>[31]</sup>采用 Standard  $k-\varepsilon$ 、RNG  $k-\varepsilon$  和 RSM 模型模拟了旋流分离器内部三维强旋流场,Huang<sup>[32]</sup>采用 RSM 模型模拟了旋流分离器油水分离的过程,Kharoua 等<sup>[33]</sup>和曹玮等<sup>[34]</sup>也采用了不同的湍流模型模拟旋流分离器,他们均发现 RSM 模型模拟结果与实验结果最接近,表明 RSM 模型能更加准确地反映旋流分离器的性能。许多研究者<sup>[35-37]</sup>发现 RSM 模型是一种有前景的湍流模型,旋流分离器流场中压力和速度瞬时变化特性导致了剪切和雷诺应力的复杂性,而 RSM 模型正是考虑了这一特性,因此适合于旋流分离器中三维强旋流场的模拟。但这些模拟研究大部分只是对宏观物理量进行了对比,并没有对流场中涡旋情况进行分析。

徐艳等<sup>[38]</sup>研究发现 RSM 模型对于整体的湍动能生成信息不准确,导致了小尺度涡结构信息的丢失,而 LES(大涡模型)使用了亚格子尺度模型,可以精确地得到湍动能和小尺度涡结构信息,在湍动能和漩涡模拟方面具有明显的优势,与 Saidi 等<sup>[39]</sup>的研究结果一致。另外 Wilcox<sup>[40]</sup>研究表明采用 LES 模型时对网格尺寸要求较高,网格数约为雷诺数的 9/4 次方。LES 模型可追踪强旋涡随时间波动的变化情况,强旋涡的结构信息对旋流分离器的分离效率具有潜在影响。

在单相湍流模型中,仅仅考虑了连续相流体的湍流作用,而未考虑两相间湍流效应,对此,Zhou 等<sup>[41,42]</sup>考虑两相间湍流效应基于单相湍流模型的理论提出了线性的、非线性的  $k-\varepsilon-k_p$  统一二阶矩两相湍流模型,这些模型中的关键部分在于对两相速度关联。还有一些学者模拟稠密两相流动时,考察了离散相中液滴间的碰撞效应,Dasgupta 等<sup>[43]</sup>建立液滴双方程湍流模型预测离散相的湍流情况,但并未考虑到离散相和连续相湍流场的相互作用;Zheng 等<sup>[44]</sup>推导出了五方程的稠密气粒两相湍流模型,发现该模型可以预报提升管内的两相流动。目前两相湍流模型中的关联采用量纲分析或半经验方法,基于各向同性理论,但实际湍流过程中是各向异性而且和离散相的弛豫时间相关,不符合实际情况,因此这些两相湍流模型并未进一步推广使用。

旋流分离器内部流动复杂,包括分离腔的内旋流和外旋流、盖下短路流、圆柱段的循环涡流等,其流动方式存在各向异性,S-A 单方程、Standard  $k-\varepsilon$ 、RNG  $k-\varepsilon$  模型及两相湍流模型不能反映旋流分离器各向异性的特



点,RSM 模拟的速度场、分离效率和压力降结果和实验值吻合度较高,但并不能反映流场中小尺度涡结构信息,新型的 LES 模型可研究流场中湍动能及小尺度涡结构信息,然而它对网格尺寸和计算机能力要求较高,加上旋流分离器目前实验搭建难度高,漩涡测量方法困难,未用实验进行验证,因此目前学者仍使用 RSM 模型模拟分析旋流分离器的内部流场。

### 3 旋流分离器结构的数值模拟优化

#### 3.1 入口结构优化

旋流分离器的结构主要由入口、柱段、锥段、底流管和溢流管组成,旋流分离器的结构影响了性能,因此可通过结构优化提高分离效率和降低能耗。入口是物料进入旋流分离器的首要通道,并与旋流腔紧密相连,对流体产生旋流有重大影响,因此研究人员在入口结构方面做了大量的工作<sup>[45-47]</sup>。

王军等<sup>[48]</sup>模拟了单入口和双入口的旋流分离器,发现双入口使流场呈现对称分布,获得高的分离效率,促进了液液两相的高效分离。马艺等<sup>[49]</sup>模拟了切入式和轴流式旋流分离器,发现轴流式分离效率和能耗均优于切入式,拓展了旋流分离器的工业应用。谢宇等<sup>[50]</sup>模拟了旋流分离器的入口角度 $\theta$ 对油水分离的影响,发现当 $\theta$ 为 $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 时分离效率最高; $\theta$ 为 $15^\circ$ 和 $30^\circ$ 时,分离性能较差; $\theta$ 为 $60^\circ$ 时不具备分离能力,这是源于过小的切向速度导致离心力不足以使油水分离,因此较大的离心力是油水两相高效分离的关键因素之一。魏立新等<sup>[51]</sup>模拟了矩形和圆形入口旋流分离器分离油水,发现矩形入口的分离效率较好,模拟有效性还有待进一步实验验证。

改变入口角度是为了使入口结构和旋流腔平滑过渡连接,减少湍动能、降低压力损失,使压力损失集中在旋流分离器的内腔中,为液液分离提供能量。双入口结构设计使流场呈对称性,保证轻相在中心运动,重相在壁面附近运动,利于分离。

#### 3.2 锥段结构优化

锥段在旋流分离器中主要起到分离的作用,由于渐缩式设计强化了离心力场,诸多研究表明离心力场的强弱直接影响着两相分离,因此对锥段锥角、长度和形状等的设计成为近年来优化旋流分离器的方向。

蒋基安等<sup>[52]</sup>采用渐扩锥形进料体和多锥段进行组合,发现可有效减少短路流,增加液滴的停留时间。吕凤霞等<sup>[53]</sup>对比单锥和双锥旋流分离器,发现油滴在双锥结构中更易发生聚并,湍流强度较弱,适用于处理小液滴的液液体系。袁惠新等<sup>[54]</sup>研究锥体长度对微型旋流

分离器分离性能的影响,发现适当增加锥段长度可获得较佳的分离性能,能量损失小,而锥段过长会促使重相携带更多的轻相从底流口流出,降低了分离效率,旋流分离器锥段长度为主体直径的 6 倍左右为宜。王尊策等<sup>[55]</sup>研究了大、小锥角对压降比的影响,发现压降比随着大、小锥角增大而增大,在实际生产工艺中,小锥角大于 $2^\circ$ 时提高入口压力补充能耗;大锥角大于 $20^\circ$ 时通过调节分流比降低压力损失。

综上所述,多锥段结构设计能够减少短路流,增加有效停留时间,减少湍流强度,对密度差( $<500 \text{ kg/m}^3$ )较小的液液体系更有利于分离;锥体长度影响流体能量损失和分离效率,适当的锥段长度可使分离效率最大化;大、小锥角的变化影响旋液分离器中压降比,在实际生产中,可通过外界补充能量或调控分流比控制能耗。

#### 3.3 溢流管结构优化

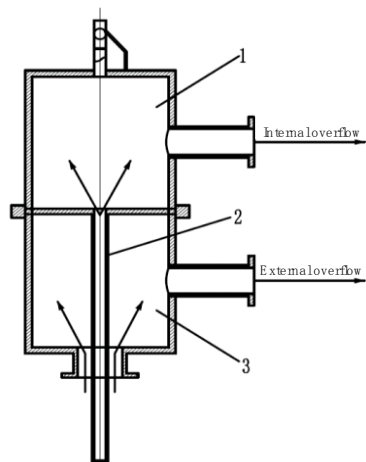
溢流管是轻相物料的排出通道,其结构改变主要影响旋流分离器的压降降低能耗,溢流管越长,轻相排出路径越长,所需能量越大,所以能耗越大。

牛伟<sup>[56]</sup>模拟了 20 mm 旋流分离器中 2, 3, 4 和 5 mm 溢流管直径对分离效率的影响,发现在其他尺寸固定的条件下,溢流管直径为 3 mm 的分离效率最高,压降随溢流口直径增大而变小,表明需选择合适的溢流管直径来平衡分离效率和能耗。刘培坤等<sup>[57]</sup>模拟了单溢流和双溢流管旋流分离器,发现双溢流管对比单溢流管具有切向速度大、轴向速度和径向速度小、分离小液滴粒径和分离效率高的特性,拓展了旋流分离器在液液高速流场中的使用。许敏<sup>[58]</sup>增加溢流管外径,保持内径不变以增加溢流管的厚度,提高分离效率,节约能耗,这是降低了进料口和筒体间的湍动能损失和短路流对流场的影响,使轻相顺利地由溢流口排出。

当旋流分离器主直径 $D$ 为定值时,可根据经验值 $0.12D \sim 0.2D$ 选择溢流管直径;当分离的液滴直径较小或流速较大时,可使用双溢流管提高分离效率,双溢流管结构如图 1 所示,在溢流管中心插入一根同轴的小直径内溢流管,内外溢流管保持末端平齐;当分离效率或能耗仍然不能满足要求时,可选择厚壁溢流管进一步提高。

#### 3.4 导叶结构的优化

近年来一些学者<sup>[59-61]</sup>在旋流分离器中加入导向叶片来提高分离效率,其结构简图如图 2 所示,导叶上连溢流管,固定在旋流分离器圆柱段内。进料时重相流体经导叶加速形成高速旋转的流场进入旋流分离器内,两相在离心力的作用下,轻相向中心汇聚向上形成内旋流,重相向边壁附近聚集向下形成外旋流,最终轻相从溢流



1. Overflow tank inside 2. Overflow pipe  
3. Overflow tank outside

图1 双溢流管结构设计示意图

Fig.1 Schematic diagram of double overflow pipe structure design

口排出,重相从底流口排出。

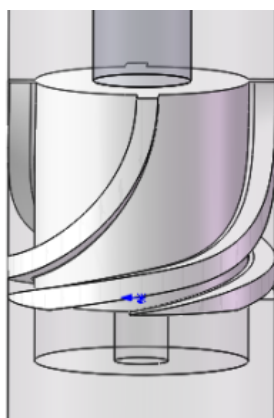


图2 导叶结构图

Fig.2 Structure diagram of guide van

潘威丞等<sup>[62]</sup>模拟了旋流分离器柱段中叶片个数对流场的影响,发现两个起旋叶片时,锥段部分轴向方向油相速度变化较慢,而柱段部分旋流强度逐渐加强,使油相经历更短的路径和停留时间向中心聚集,提高了分离效率,为旋流分离器的内部结构设计提供了参考。Zhang等<sup>[63]</sup>在旋流分离器中加入导叶分离甘油水溶液和煤油,发现导叶使重相旋转加速,增加了两相的切向速度,保证了两相的混合与分离,为旋流分离器推广应用于化学反应发生奠定了基础,促使混合-反应-分离一体化。

在旋流分离器中加入导叶使重相形成旋流场,形成强的离心力场,尤其是在液液两相密度差较小的情况下可提高分离效率10%左右,能促进两相之间的混合和分

离,后续可将旋流分离器进一步应用于有化学反应发生的体系中,实现混合-反应-分离一体化。

### 3.5 圆柱段结构优化

圆柱段结构主要起到两相之间混合的作用,并减少分离过程中循环涡的产生。因为两相混合之后经过锥段时,轻相在中心内旋流与重相在器壁外旋流形成双螺旋流动模式,再次经过圆柱段时,降低了旋转速度和湍动能,减少了循环涡的产生,使两相能有效分离。

蒋基安等<sup>[52]</sup>对比了渐扩锥形和柱形进料体,发现渐扩锥形不但可以增加流体切向速度还能减少短路流,但是这方面的流场信息尚未用实验验证。Noroozi等<sup>[47]</sup>研究了指数、圆锥、二次多项式和标准矩形柱段对分离效率影响,发现指数型结构提高分离效率8%左右,二次多项式效果最差,指数型结构边缘变化快,流场易产生突变效应,消除了再循环涡产生。Young等<sup>[64]</sup>研究了圆柱段不同长度对分离效率的影响,发现长度越小越有利于提高分离效率,但长度过小会影响流体的切向速度,因此选择适宜的圆柱段长度。

旋流分离器圆柱段主要影响再循环涡、短路流和切向速度。再循环涡和短路流的产生与圆柱段边缘结构有关,边缘变化越剧烈,引起流场湍动越大,越不易形成循环涡和短路流。而切向速度是由边缘结构及长度共同影响的,长度越短,流场经过大直径圆柱段的时间越短,其速度衰减更少,因此设计时长度尽量越短越好。

## 4 旋流分离器操作参数数值模拟优化

### 4.1 分流比优化

旋流分离器分流比定义为溢流口的体积流量和入口体积流量的比值,在保证产品分离效率一定的情况下其大小取决于目标产品是重相还是轻相。如果产品是重相,则需尽可能保证分流比小,以保证底流口流量较大,产量高,轻相则相反;如果在保证产量一定的情况下提高分离效率,当产品是重相时,则需保证分流比尽可能大,轻相仍然相反。

袁惠新等<sup>[54]</sup>研究发现分流比增大会导致分离效率升高,升高的幅度根据旋流分离器结构确定,因此对于特定结构的旋流分离器应当选择合适的分流比,兼顾分离效率与能耗。崔运静等<sup>[65]</sup>用模拟和实验研究了35 mm旋流分离器,发现大锥管段分离能力随分流比增大而增强。Liu等<sup>[66]</sup>的数值模拟研究也得出同样的结论。

上述研究在对比分离效率时仅考虑采出产品的流量与进入旋流分离器产品流量的比值,对产品的纯度未

进行比较,得出分离效率随分流比增大而增大的结论。目前在气固分离中用分级效率评价产品的纯度和流量,由于液液体系中液体的流动是连续的,且现有的液滴粒径仅只是对旋流分离器某一位置进行测量,导致分级效率公式的应用受到限制,大多数研究者仅考虑了产品的流量,后续研究可同时考虑两者以研究液液旋流分离器的流动规律。

#### 4.2 总流量优化

总流量是影响旋流分离器处理能力的重要参数之一,贺会群等<sup>[67]</sup>研究了不同流量下 25 mm 旋流分离器的压力降,发现流量增大导致压力降增加,流量越大,油滴剪切破碎越剧烈,消耗了更多的能量,因此流量控制在 1.2~2.5 m<sup>3</sup>/h 内。舒朝晖等<sup>[68]</sup>研究了 70 mm 旋流分离器中油滴的运动轨迹,发现分离效率随体积流量先急剧增加后增加缓慢,而压降却增大很快,流量范围控制在 4.3~5.2 m<sup>3</sup>/h 之间,周宁玉等<sup>[69]</sup>也得出了同样的结论,对于固定几何结构的旋流分离器,有适宜的处理量。Beeby 等<sup>[70]</sup>研究了 50 mm 的旋流分离器中不同入口速度对浓缩包油乳状液中湍流强度和脱除率的影响,发现湍流强度随入口速度增大而增大,脱除率随速度增加先急剧增加后趋于不变,表明了旋流分离器能量损失和湍动能有关,湍动能越剧烈,能耗越大。

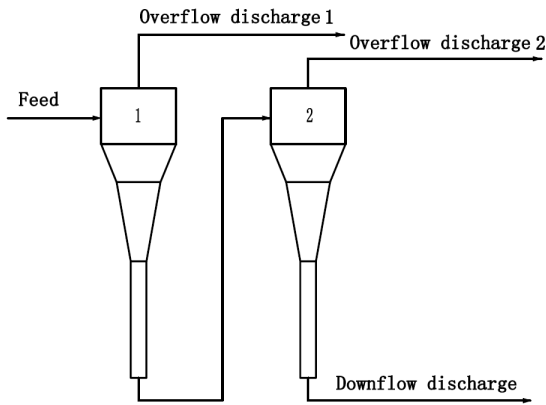
当入口流量较低时,两相之间的旋流速度小,使重相携带着大量的轻相液滴从底流口流出,进而分离效率较低;当流量继续增加时,分离效率达峰值,此时轻相在旋流分离器的中心轴线附近形成稳定的油核;当入口流量继续增加时,分离效率减小。而压力降随总流量增加不断增加,因此,对液液旋流分离器有一个最佳的处理量范围,在这个范围内分离效率和能量损失达到平衡。

#### 4.3 入口浓度优化

入口浓度反映重相进料和轻相进料的相对含量,是旋流分离器中一个重要的工艺操作参数。韩捷等<sup>[71]</sup>用随机轨道模型研究了不同入口浓度的油水分离过程,发现两相在旋流分离器上各个截面上的浓度均呈先增大后减小的规律,表明浓度只影响旋流分离器的处理效果。Ge 等<sup>[72]</sup>研究了 70 mm 旋流分离器入口含油浓度由 2% 提高到 30% 时对分离效率的影响,发现较低的进料浓度可提高分离效率,当浓度超过 24% 时,分离效率急剧下降,再一次表明了旋流分离器的分离能力有限,对浓度高的混合物分离效率不佳。

数值模拟中随机轨道模型主要应用于低浓度混合物分离,研究离散相在旋流分离器中的运动轨迹和停留时间。针对高浓度体系,CFD 提供 DEM, MP-PIC 等模型,但这些模型目前大多用于气固或固液体系中<sup>[73-76]</sup>,

在液液体系中罕见报道,另外随分散相体积分数增加,计算时间和存储能力呈指数增长趋势,不适宜处理复杂的大尺寸流动。另一方面旋流分离器自身分离能力有限,在实际生产中,可将两个甚至多个旋流分离器串联使用提高分离效率(图3)。



1. First stage cyclone 2. Second stage cyclone

图3 旋流分离器串联示意图

Fig.3 Schematic diagram of cyclone separator series

### 5 旋流分离器数值模拟评价指标

在旋流分离器分离过程中,工业上运用了很多指标评价其性,主要有分离效率、分流比、处理量、排液比和压降比。其中最重要的评价指标是分离效率和压力降,分离效率可保证产品合格,压力降则保证生产装置能耗小且安全系数高。因此本工作重点介绍分离效率和压力降这两个评价指标。

#### 5.1 分离效率

##### (1) 质量效率

分离轻重两相时,如果从溢流口产品的纯度进行考虑,分离效率定义为溢流口中轻相的质量流量与入口轻相的质量流量之比,即质量效率如式(1)所示:

$$\eta_m = \frac{m_o}{m_i} = 1 - (1 - F) \frac{C_u}{C_i} \quad (1)$$

式中, $\eta_m$ 为质量效率(%), $m_o$ 为溢流口中轻相的质量流量(kg/h), $m_i$ 为入口轻相的质量流量(kg/h), $C_u$ 为底流口轻相的浓度(%), $C_i$ 为入口轻相的浓度(%), $F$ 为分流比(%)。

假设当旋流分离器没有分离作用时,此时出、入口的质量浓度相等,那么质量效率也应该为零,但将这个假设条件代入式(1),可得 $\eta_m = F$ ,表明此公式无法表达分离效率为零的实际情况。特别是当 $F$ 较大时,运用质量效率公式计算所得结果与旋流分离器实际情况对比误差较大。因此该公式一般适用于溢流比小于进料比的



情况,这样计算出的分离效率和实际情况相差不大。

## (2) 简化效率

如果只是单纯分析旋流分离器的分离效果,则应当忽略由于分流而造成的影响,对此 Kelsall<sup>[77]</sup>提出了简化分离效率公式如式(2)所示:

$$\eta_j = \frac{\eta_m - F}{1 - F} = 1 - \frac{C_u}{C_i} \quad (2)$$

简化效率公式克服了质量效率公式出现的问题,但又出现了新的问题,即简化效率公式里没有出现分流比对分离效果的影响。假设有两台旋流分离器,操作条件相同,计算的简化效率应该是一致的,但实际上应该是分流比越小,效率越高。因为分流比越小,在保证底流产品效率一定的情况下,底流采出产品的流量更大。因此简化效率是运用在分流比一定的情况下比较分离效率。

## (3) 综合效率

为了克服上述两个公式的弊端,Colman等<sup>[78]</sup>提出了综合效率如式(3)所示:

$$\eta = K(1 - F)\eta_j$$

$$K = \frac{1}{1 - C_i} \quad (3)$$

从上述公式可得出综合效率的影响因素为简化效率 $\eta_j$ 、分流比 $F$ 和入口浓度 $C_i$ 。一般情况下,当 $F > C_i$ 时,可将重相中的轻相除去,因此 $\eta < \eta_j$ 。当 $\eta_j$ 和 $C_i$ 保持不变时, $F$ 越大,综合效率 $\eta$ 越小,因此这个公式表示了综合分离效率与分流比的关系,又能保证效率是从0到1进行变化的。

## 5.2 压力降

旋流分离器中进行的是三维的强湍流运动,因此必然存在着各种各样的能量损失,在液液运动的过程中,压力能转变为动能来使液体产生足够的离心力从而保证轻重两相分离。目前大部分研究学者<sup>[79-81]</sup>对于旋流分离器的压力降计算是基于进、出口静压力。则旋流分离器溢流口压力降公式如式(4)所示:

$$\Delta p_0 = p_{in} - p \quad (4)$$

底流口压力降为

$$\Delta p_u = p_{in} - p \quad (5)$$

式中, $p_{in}$ 为入口压力, $p_0$ 为溢流口压力, $p_u$ 为底流口压力。

对于液液旋流分离器而言,当出入口的流量对压力的影响不可忽略时,总的压力降需要通过流量加权平均计算,即

$$\Delta p = \Delta p_0 \frac{Q_0}{Q_{in}} + \Delta p_u \frac{Q_u}{Q_{in}} \quad (6)$$

由于在旋流分离器分离过程中,压降越小,造成的

能耗也就越低。因此可通过降低出入口的压差减小能耗,提高安全性。这也表明了压力降是评价旋流分离器在工业应用中一项很重要的指标。

## 6 结语与展望

学者们对液液旋流分离器在数值模拟方面的研究不断深入,从结构方面进行改进不断提高分离效率和降低能耗,在结构确定的条件下研究操作条件变化可使分离效率达最高,能耗最低,且模拟值与实验值的一致性也不断增加。在接下来的研究中还可从以下四个方面进行探索:

(1) 在数值模拟中,运用阻力模型衡量液液两相之间的作用力大小,这些阻力模型是否可以运用于液液体系需要用实验加以验证。

(2) 液滴破碎和聚并是在欧拉模型中引入群体平衡方程,但大部分研究学者只是粗略地提出了研究结论,并未用实验进行验证。还有液滴破碎和聚并到底是因为何种操作结构或操作条件引起的也需要进行进一步探讨研究。

(3) 旋流分离器中漩涡的产生和涡流的大小,大多数研究采用了LES模型进行研究,但研究结果尚需通过实验值进行验证。

(4) 分离效率目前的评判标准主要是集中于所采用的目标产物的流量进行评价,但对于产品的纯度考虑较少,后续可以提出新的公式评价分离效率,以适用不同研究或生产要求。

## 参考文献

- [1] Colman D A, Thew M T. Hydrocyclone for oil/water separation [C]//International Conference on Hydrocyclons. Cambridge: BHRA Fluid Engineering, 1980: 143-166.
- [2] Forder A, Thew M, Harrison D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves [J]. Wear, 1998, 216(2): 184-193.
- [3] Thew M. Hydrocyclone redesign for liquid-liquid separation [J]. Chemical Engineer Science, 1986, 7(8): 17-23.
- [4] 王欣, 李金龙, 石璐. CFD数值模拟在旋流分离器设计中的应用 [J]. 石油化工设备, 2016, (4): 31-34.  
Wang X, Li J L, Shi L. Application of CFD numerical simulation in the design of cyclone separator [J]. Petrochemical Equipment, 2016, (4): 31-34.
- [5] Chen S, Doolen G D. Lattice Boltzmann method for fluid flows [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998, 30(1): 329-364.
- [6] Peri D, Rossetti M, Campana E F. Design optimization of ship hulls via CFD techniques [J]. Journal of Ship Research, 2001, 45 (2): 140-149.
- [7] Tahara Y, Tohyama S, Katsui T. CFD-based multi-objective optimization method for ship design [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2006, 52(5): 499-527.
- [8] Nwoko N, Mamphweli S, Makaka G. An investigation into heat

- recovery from the surface of a cyclone dust collector attached to a downdraft biomass gasifier [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 98: 1158–1164.
- [9] Shakeel S M, Rafeie M, Henderson R, et al. A 3D-printed mini-hydrocyclone for high throughput particle separation: application to primary harvesting of microalgae [J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17 (14): 2459–2469.
- [10] Gay J C, Triponey G, Bezard C, et al. Rotary cyclone will improve oily water treatment and reduce space requirement/weight on offshore platforms [Z]. United Kingdom: Society of Petroleum Engineers, 1987: 14–18.
- [11] 何同, 王勇. 水力旋流分离器在高含水期原油脱水中的应用 [J]. *天然气与石油*, 1995, 15(3): 12–18.  
He T, Wang Y. Application of hydrocyclone in the dehydration of crude oil in high water cut period [J]. *Natural Gas and Oil*, 1995, 15(3): 12–18.
- [12] Liu S, Yan Y, Gao Y. Optimization of geometry parameters with separation efficiency and flow split ratio for downhole oil–water hydrocyclone [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, 8: 370–374.
- [13] Zhang J, Wang Y Y, Jin Y H. Research of pressure drop reduction in cyclone separator based on CFD technology [J]. *New Technology & New Process*, 2007, (12): 46–51.
- [14] Kim C S, Park S Y. Performance analysis of cyclone oil separators using CFD simulation [M]. Korea: Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2012: 72–79.
- [15] Galbraith M C, Allmaras S, Darmofal D L. A verification driven process for rapid development of CFD software [C]//*Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Berlin Heidelberg: Springer–Verlag, 2013: 1–26.
- [16] Yeoh G H, Liu C, Tu J, et al. Advances in computational fluid dynamics and its applications [J]. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2011, 20(5): 30–49.
- [17] 隋元伟, 董强, 宁朋歌. 水力旋流分离器数值模拟参数的基础研究 [J]. *合肥学院学报(自然科学版)*, 2019, 36(2): 51–55, 62.  
Sui Y W, Dong Q, Ning P G. Fundamental research on numerical simulation parameters of hydrocyclones [J]. *Journal of Hefei University (Natural Science Edition)*, 2019, 36(2): 51–55, 62.
- [18] Zhang M Y, Zhu L, Wang Z B, et al. Flow field in a liquid–liquid cyclone reactor for isobutane alkylation catalyzed by ionic liquid [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2017, 125: 282–290.
- [19] Oropezavazquez C, Afanador E, Gomez L, et al. Oil–water separation in a novel liquid–liquid cylindrical cyclone (LLCC) compact separator—experiments and modeling [J]. *Journal of Fluids Engineering—Transactions of the ASME*, 2004, 126(4): 553–564.
- [20] Qian F, Huang Z, Chen G, et al. Numerical study of the separation characteristics in a cyclone of different inlet particle concentrations [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2007, 31 (9): 1111–1122.
- [21] Ni P, Jonsson L T I, Ersson M, et al. The development of an Eulerian deposition model in liquid metal flows and its application on nozzle clogging during continuous casting of steel [C]//*International Congress on the Science & Technology of Steelmaking*. Beijing: Chinese Society for Metals, 2015, 25(6): 439–442.
- [22] Shi S, Wu Y, Zhang J, et al. A study on separation performance of a vortex finder in a liquid–liquid cylindrical cyclone [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22(5): 391–397.
- [23] Xiao Y, Liu W, Liu D. Simulation of liquid atomization in cyclone atomizer based on VOF–DPM coupling model [C]//2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM). 2019: 323–327.
- [24] Kuang S, Qi Z, Yu A B, et al. CFD modeling and analysis of the multiphase flow and performance of dense medium cyclones [J]. *Minerals Engineering*, 2014, 62: 43–54.
- [25] Cui B, Zhang C, Wei D, et al. Effects of feed size distribution on separation performance of hydrocyclones with different vortex finder diameters [J]. *Powder Technology*, 2017, 322: 114–123.
- [26] Pericleous K A, Rhodes N, Cutting G W. A mathematical model for predicting the flow field in a hydrocyclone classifier [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1984, 25(6): 52–59.
- [27] Papoulias D, Lo S. Advances in CFD modelling of multiphase flows in cyclone separators [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2015, 43: 1603–1608.
- [28] Monredon T C, Hsieh K T, Rajamani R K. Fluid flow model of the hydrocyclone: an investigation of device dimensions [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1992, 35: 65–83.
- [29] Motin A, Benard A. Design of liquid–liquid separation hydrocyclones using parabolic and hyperbolic swirl chambers for efficiency enhancement [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2017, 122: 184–197.
- [30] Azadi M, Azadi M, Mohebbi A. A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 182(1): 835–841.
- [31] Hoekstra A J, Derksen J J, Den Akker H E A V. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54: 2055–2065.
- [32] Huang S. Numerical simulation of oil–water hydrocyclone using reynolds–stress model for eulerian multiphase flows [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2005, 83(5): 829–834.
- [33] Kharoua N, Khezzar L, Nemouchi Z. Computational fluid dynamics study of the parameters affecting oil–water hydrocyclone performance [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E—Journal of Process Mechanical Engineering*, 2010, 224(2): 119–128.
- [34] 曹玮, 邹宽, 杨荣. 水力旋流分离器湍流流动的数值模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(1): 127–129.  
Cao W, Zou K, Yang M. Numerical simulation of turbulent flow in hydrocyclone [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25 (1): 127–129.
- [35] Liu M, Chen J, Cai X, et al. Oil–water pre-separation with a novel axial hydrocyclone [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2017, 26(1): 60–66.
- [36] Raoufi A, Shams M, Farzaneh M, et al. Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2008, 47(1): 128–137.
- [37] Safikhani H, Akhavanbehadi M A, Shams M, et al. Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators [J]. *Advanced Powder Technology*, 2010, 21(4): 435–442.
- [38] 徐艳, 柯林, 吴泽民, 等. 基于 RSM 和 LES 湍流模型的旋流分离器流场数值模拟 [J]. *化工机械*, 2015, 42(3): 409–412, 446.  
Xu Y, Ke L, Wu Z M, et al. Numerical simulation of flow field in cyclone separator based on RSM and LES turbulence model [J]. *Chemical Machinery*, 2015, 42(3): 409–412, 446.
- [39] Saidi M, Maddahian R, Farhanieh B, et al. Modeling of flow field



- and separation efficiency of a deoiling hydrocyclone using large eddy simulation [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, 112: 84–93.
- [40] Wilcox D C. *Turbulence Modeling for CFD* [M]. United States: DCW Industries, 2006: 17–23.
- [41] Zhou L X, Gu H X. A non-linear  $k-\varepsilon-k_p$  two-phase turbulence model [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, 125(1): 191–194.
- [42] Zhou L X, Chen T. Simulation of strongly swirling gas-particle flows using USM and  $k-\varepsilon-k_p$  two-phase turbulence models [J]. *Powder Technology*, 2001, 114(1/2/3): 1–11.
- [43] Dasgupta S, Jackson R, Sundaresan S. Gas-particle flow in vertical pipes with high mass loading of particles [J]. *Powder Technology*, 1998, 96: 6–23.
- [44] Zheng Y, Wan X T, Qian Z, et al. Numerical simulation of the gas-particle turbulent flow in riser reactor based on  $k-\varepsilon-k_p-\varepsilon_p-\Theta$  two-fluid model [J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(24): 6813–6822.
- [45] Duan S Q, Chen M Z J, Zhang R, et al. Effect of light phase inlet structure on liquid-liquid cyclone reactor for isobutane alkylation catalyzed by ionic liquid [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2019, 140: 22–28.
- [46] 邢雷, 蒋明虎, 张勇, 等. 入口形式对旋流分离器内油滴聚结特性影响研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2018, 32(6): 1322–1331.
- Xing L, Jiang M H, Zhang Y, et al. Study on the influence of inlet form on coalescence characteristics of oil droplets in cyclone [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2018, 32(6): 1322–1331.
- [47] Noroozi S, Hashemabadi S H. CFD analysis of inlet chamber body profile effects on de-oiling hydrocyclone efficiency [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2011, 89(7): 968–977.
- [48] 王军, 陈宁. 水力旋流分离器油-水分离性能数值模拟 [J]. *机电设备*, 2014, 31(2): 14–18.
- Wang J, Chen N. Numerical simulation of oil-water separation performance of hydrocyclones [J]. *Electromechanical Equipment*, 2014, 31(2): 14–18.
- [49] 马艺, 金有海, 王振波. 两种不同入口结构型式旋流器内的流场模拟 [J]. *化工进展*, 2009, 28(S1): 497–501.
- Ma Y, Jin Y H, Wang Z B. Simulation of the flow field in two types of cyclones with different inle structures [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2009, 28(S1): 497–501.
- [50] 谢宇, 陈大彬, 王树青, 等. 水力旋流分离器流动特性的数值模拟研究 [J]. *内蒙古石油化工*, 2014, (11): 6–9.
- Xie Y, Chen D B, Wang S Q, et al. Numerical flow simulation hydrocyclone characteristics [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2014, (11): 6–9.
- [51] 魏立新, 刘扬, 张乐天. 液-液水力旋流分离器的模拟分析与结构优化 [J]. *石油机械*, 2006, (1): 36–39.
- Weu L X, Liu Y, Zhang L T. Simulation analysis and structure optimization of liquid-liquid hydrocyclone [J]. *Petroleum Machinery*, 2006, (1): 36–39.
- [52] 蒋基安, 赵天彪, 杨兴华, 等. 基于CFD的多锥段旋流分离器内部流场的数值模拟 [J]. *现代矿业*, 2013, 29(11): 21–24.
- Jiang J A, Zhao T B, Yang X H, et al. Numerical simulation of internal flow field in multi-cone cyclone based on CFD [J]. *Modern Mining*, 2013, 29(11): 21–24.
- [53] 吕凤霞, 杨贺, 袁惠新, 等. 液-液分离水力旋流分离器油滴破碎与聚并的数值模拟 [J]. *石油机械*, 2017, (11): 76–81.
- Lü F X, Yang H, Yuan H X, et al. Liquid-liquid hydrocyclone for oil droplet coalescence and break numerical simulation [J]. *Petroleum Machinery*, 2017, (11): 76–81.
- [54] 袁惠新, 姚宇婷, 付双成, 等. 锥段长度对微型旋流分离器内流场影响的数值模拟 [J]. *化工机械*, 2011, (3): 91–94.
- Yuan H X, Yao Y T, Fu S C, et al. Numerical simulation of the influence of the length of the cone section on the flow field in the micro cyclone [J]. *Chemical Machinery*, 2011, (3): 91–94.
- [55] 王尊策, 赵立新, 李枫, 等. 液液水力旋流分离器流场特性与分离特性研究(四)—锥角变化对压力损失的影响 [J]. *化工装备技术*, 1999, (6): 5–7.
- Wang Z C, Zhao L X, Li F, et al. Research on flow field characteristics and separation characteristics of liquid-liquid hydrocyclones (4) —the influence of cone angle change on pressure loss [J]. *Chemical Equipment Technology*, 1999, (6): 5–7.
- [56] 牛伟. 溢流管直径对旋流分离器分离效率影响的数值模拟 [J]. *化工技术与开发*, 2015, 44(1): 45–48.
- Niu W. Numerical simulation of the influence of the diameter of the overflow pipe on the separation efficiency of the cyclone [J]. *Chemical Technology and Development*, 2015, 44(1): 45–48.
- [57] 刘培坤, 赵雅琴, 杨兴华, 等. 双溢流管旋流分离器分离性能的数值模拟与试验研究 [J]. *煤矿机械*, 2020, 41(2): 40–43.
- Liu P K, Zhao Y Q, Yang X H, et al. Numerical simulation and experimental research on the separation performance of the double overflow pipe cyclone [J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(2): 40–43.
- [58] 许敏. 水力旋流分离器内部流场数值模拟及分离性能分析 [J]. *石油矿场机械*, 2012, (3): 27–30.
- Xu M. Numerical simulation of internal flow field and analysis of separation performance of hydrocyclone [J]. *Petroleum Field Machinery*, 2012, (3): 27–30.
- [59] Jin X H, Jin Y H, Wang Z B. An experimental study on the axial flow guide vane type gas-liquid cyclone separators [J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2007, 8(10): 26–32.
- [60] Lee Y, Ahuja V, Hosangadi A, et al. Impeller design of a centrifugal fan with blade optimization [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2011, 24(6): 53–78.
- [61] Akiyama T, Marui T. Dust collection efficiency of a straight-through cyclone—effects of duct length, guide vanes and nozzle angle for secondary rotational air flow [J]. *Powder Technology*, 1989, 58(3): 181–185.
- [62] 潘威丞, 陈家庆, 姬宜朋, 等. 管式静电旋流分离器的设计及内部流场研究 [J]. *石油机械*, 2019, 47(11): 74–80.
- Pan W C, Chen J Q, Ji Y P, et al. Design of tubular electrostatic cyclone separator and research on internal flow field [J]. *Petroleum Machinery*, 2019, 47(11): 74–80.
- [63] Zhang M Y, Zhang T Y, Wang Z B, et al. Mixing and separation of liquid-liquid two-phase in a novel cyclone reactor of isobutane alkylation catalyzed by ionic liquid [J]. *Powder Technology*, 2017, 32(5): 289–295.
- [64] Young G A B, Wakley W D, Taggart D L, et al. Oil-water separation using hydrocyclones: an experimental search for optimum dimensions [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1994, 11(1): 37–50.
- [65] 崔运静, 仇性启, 王丽娟. 液液分离水力旋流分离器流场激光测试研究 [J]. *流体机械*, 2005, (6): 6–8.
- Cui Y J, Qiu X Q, Wang L J. Research on laser measurement of flow field of liquid-liquid separation hydrocyclone [J]. *Fluid Machinery*, 2005, (6): 6–8.
- [66] Liu H F, Xu J Y, Wu Y X, et al. Numerical study on oil and water two-phase flow in a cylindrical cyclone [J]. *Journal of*

- Hydrodynamics Ser. B, 2010, 22(S1): 832–837.
- [67] 贺会群, 杨振会, 吴刚, 等. 油水旋流分离器流场模拟分析与研究 [J]. 石油机械, 2005, 33(12): 1–5.  
He H Q, Yang Z H, Wu G, et al. Simulation analysis and research on flow field of oil–water cyclone separator [J]. Petroleum Machinery, 2005, 33(12): 1–5.
- [68] 舒朝晖, 杨拓, 周宇, 等. 除油旋流分离器操作参数对分离效率影响的数值模拟 [J]. 石油化工设备, 2015, (5): 1–6.  
Shu Z H, Yang T, Zhou Y, et al. Numerical simulation of the effect of deoiling cyclone operating parameters on separation efficiency [J]. Petrochemical Equipment, 2015, (5): 1–6.
- [69] 周宁玉, 高迎新, 安伟, 等. 旋流分离器油水分离效率的模拟研究 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(9): 2953–2957.  
Zhou N Y, Gao Y X, An W, et al. Simulation study on oil–water separation efficiency of hydrocyclone [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(9): 2953–2957.
- [70] Beeby J P, Nicol S K. Concentration of oil–in–water emulsion using the air–sparged hydrocyclone [J]. Filtration & Separation, 1993, 30(2): 141–146.
- [71] 韩婕, 刘阿龙, 彭东辉, 等. 数值研究液–液水力旋流分离器内颗粒浓度分布特性 [J]. 化工机械, 2011, 38(6): 725–729.  
Han J, Liu A L, Peng D H, et al. Numerical study on the particle concentration distribution characteristics in liquid–liquid hydrocyclones [J]. Chemical Machinery, 2011, 38(6): 725–729.
- [72] Ge H, Chen J. Effects of inlet flow rate and concentration fluctuations on the separation performance of a novel dynamic hydrocyclone [C]//Oceans 2016 MTS/IEEE Monterey. 2016: 1–6.
- [73] Gotoh H, Harada E, Andoh E. Simulation of pedestrian contra–flow by multi–agent DEM model with self–evasive action model [J]. Safety Science, 2012, 50(2): 326–332.
- [74] He H P, Sun H Y, Wang X Z. Influence of DEM spatial resolution on the simulation results of gas diffusion model [J]. Journal of Geo–Information Science, 2013, 15(4): 527–531.
- [75] Xie J, Zhong W Q, Jin B S. Eulerian–lagrangian method for three–dimensional simulation of fluidized bed coal gasification [J]. Advanced Powder Technology, 2013, 24(1): 382–392.
- [76] Sung H G, Jang J S, Roh T S. Application of eulerian–lagrangian approach to gas–solid flows in interior ballistics [J]. Journal of Applied Mechanics, 2013, 80(3): 031407.
- [77] Kelsall D F. A further study of the hydraulic cyclone [J]. Chemical Engineering Science, 1953, 2(6): 254–272.
- [78] Colman D A, Thew M T. Correlation of separation results from light dispersion hydrocyclones [J]. Institution of Chemical Engineers, 1983, (61): 233–240.
- [79] Guerra V G, Béttega R, Gonçalves J A S, et al. Pressure drop and liquid distribution in a venturi scrubber: experimental data and CFD simulation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(23): 8049–8060.
- [80] Sultan R A, Rahman M A, Rushd S, et al. CFD analysis of pressure losses and deposition velocities in horizontal annuli [J]. International Journal of Chemical Engineering, 2019, 68(4): 70–89.
- [81] Ofei T N, Irawan S, Pao W, et al. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells [J]. Journal of Petroleum Engineering, 2014, 23(5): 48–64.