

Research status of hydrocyclone and its application prospect in wastewater treatment of coal chemical industry

Yuanwei SUI^{1,2}, Guangru JIA³, Gaojie XU², Qiang DONG^{1*}, Pengge NING^{2*}, Hongbin CAO²

1. Department of Biology and Environmental Engineering, Hefei University, Hefei, Anhui 230601, China

2. Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. Hebei Iron and Steel Group Hansteel Company, Handan, Hebei 056015, China

Abstract: The hydrocyclone is a kind of effective device for two-phase fluids separation using centrifugal force field. Although the hydrocyclone has a simple structure and small size, its separation efficiency is very high and it can be easily installed. Therefore, it is widely used in chemical, petroleum and underground mining industries. First, this work mainly introduces the working principle, theoretical research and application status of the hydrocyclone. The research development of hydrocyclone is discussed from the aspects of numerical simulation, structural parameters, operating parameters and physical parameters, as well as the progress of its application technology. And based on the characteristics: high emulsification, high dispersion and high viscosity of coal chemical wastewater water, the application prospect of hydrocyclone in coal chemical wastewater pretreatment is discussed. The combination of simulation and experiment of hydrocyclone has become the main research direction. The fluid condition of two-phase flow in hydrocyclone is deeply discussed, which provides theoretical basis for the improvement of the hydrocyclone structure, which is conducive to the rapid development of hydrocyclone and people's in depth understanding of it, and expands the application scope of hydrocyclone. We found that the research on structure improvement and operation parameters optimization of hydrocyclone are quite limited and the key to effective oil–water separation is the properties of the fluids. Therefore, it is very important to pretreat oily wastewater in the beginning. Demulsifier or flocculant, ultrasonic or microwave can be used to improve the physical properties of oily wastewater. For oily wastewater treatment, the detailed researches on the effects of oily wastewater's physical properties and the application of numerical simulation will guide us to improve the separation efficiency of hydrocyclone in the future. It is certain that the hydrocyclone will have good economic benefits and wide application prospects in the deoiling and decoking process of coal-chemical wastewater.

Key learning points:

- (1) Oil and water properties have an important influence on the separation performance of hydrocyclone.
- (2) The combination of chemical reagents and mechanical equipment has the characteristics of high efficiency and energy saving.
- (3) Hydrocyclones have excellent application prospects in coal chemical wastewater treatment.
- (4) Numerical simulation plays an important role in the parameter optimization of hydrocyclone.

Key words: hydrocyclone; oil–water separation; physical property parameters; numerical simulation

收稿: 2018-07-26, 修回: 2018-09-11, 网络发表: 2018-09-29, Received: 2018-07-26, Revised: 2018-09-11, Published online: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51425405); 中国科学院青年创新促进会资助项目(编号: 2016042)

作者简介: 隋元伟(1992-), 男, 安徽省滁州市人, 硕士研究生, 环境工程专业, Tel: 010-82545052, E-mail: 1547931893@qq.com; 通讯联系人, 董强, Tel: 13855138908, E-mail: qdong@hfuu.edu.cn; 宁朋歌, Tel: 010-82544879, E-mail: pgning@ipe.ac.cn.

引用格式: 隋元伟, 贾广如, 许高洁, 等. 水力旋流器研究现状及其在煤化工废水处理中的应用前景. 过程工程学报, 2019, 19(2): 235–245.
Sui Y W, Jia G R, Xu G J, et al. Research status of hydrocyclone and its application prospect in wastewater treatment of coal chemical industry (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(2): 235–245, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218248.

水力旋流器研究现状及其在煤化工废水处理中的应用前景

隋元伟^{1,2}, 贾广如³, 许高洁², 董强^{1*}, 宁朋歌^{2*}, 曹宏斌²

1. 合肥学院生物与环境工程系, 安徽 合肥 230601

2. 中国科学院过程工程研究所绿色过程与工程重点实验室, 北京 100190

3. 河北钢铁集团邯郸钢铁集团有限责任公司, 河北 邯郸 056015

摘 要: 水力旋流器是利用离心力场进行两相流体分离的设备, 具有体积小、效率高、结构简单和安装便捷等特点, 广泛应用于化工、石油及地下开采等工业领域。本工作主要介绍了旋流器的工作原理、理论研究和应用现状, 从数值模拟、旋流器的结构参数、操作参数和物性参数及应用技术拓展等方面综述了水力旋流器的研究现状, 并针对煤化工废水水质高乳化、高分散和高粘度等特点, 综合分析了水力旋流器在煤化工废水预处理中的应用前景。旋流器模拟与实验相结合为目前研究的主要方向, 深度分析了旋流器内两相流的运动状态, 为旋流器结构改良提供理论依据, 推动旋流器快速发展。旋流器结构改良设计和操作参数的优化均有一定局限性, 油水物性是影响油水分离的决定性因素。因此, 前期对含油废水进行预处理极为重要, 可采用破乳剂或絮凝剂、超声或微波等方法改善含油废水的物性, 对含油废水物性的研究和改善并结合数值模拟的应用将是未来提高水力旋流器分离效率的发展方向, 旋流器在煤化工废水除油脱焦粉工艺中有很好的经济效益和广阔的应用前景。

要 点:

- (1) 油水物性对水力旋流器分离性能有重要影响。
- (2) 化学试剂和机械设备联用具有高效和节能等特点。
- (3) 水力旋流器在煤化工废水处理中具有极好的应用前景。
- (4) 数值模拟在旋流器参数优化中具有重要作用。

关键词: 水力旋流器; 油水分离; 物性参数; 数值模拟

中图分类号: TQ051.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2019)02-0235-11

1 前言

1891 年 Bretney 申请了第一篇关于旋流器的专利^[1], 1939 年, Driessen 将水力旋流器用于煤泥水的选矿、澄清和固液分离等行业中^[2]。自 1968 年英国 Southampton 大学 Thew^[3]提出液-液可实现旋流分离的看法以来, 众多研究者对液-液旋流分离技术进行了大量研究, 取得了较好的成果。与沉淀池、浮选池等传统分离设备相比, 水力旋流器具有操作方便、效率高、结构简单和占地面积小等特点, 是一种新型高效节能的油水分离设备, 广泛用于工业废水除油工艺中。

1.1 水力旋流器的几何结构及工作原理

水力旋流器为锥形结构, 主要由上部柱段、中部锥段和尾部平行尾管构成。圆柱体上端设有切线方向的进料口, 顶部有溢流管和溢流导管, 低密度的轻相从溢流口流出。在圆锥形筒体底部有底流口, 密度大的重相从底流口流出, 其几何形状如图 1 所示。

水力旋流器利用流体在快速转动的流场中因相密度不同所受离心力不同而促使两相分离, 待分离的两相混合液以一定压力沿切线方向进入装置后, 由于两相具有密度差, 快速旋转流动过程中所受作用力不同, 在离心沉降作用下, 大密度相被抛向壁面, 而大部分低密度相向轴心迁移并沿轴心管作上升螺旋流动(内旋流)由溢

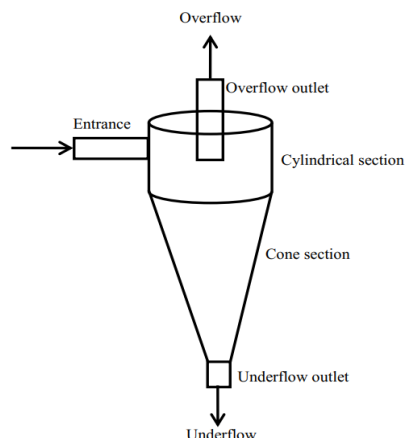


图 1 水力旋流器的结构示意图

Fig.1 Schematic of hydrocyclone structure

流口排出, 而重相在重力作用下沿壁面下沉由底流口排出, 从而实现分离^[4]。

1.2 水力旋流器的理论研究

当前旋流器理论主要是总结的经验公式, 主要有停留时间理论、两相湍流理论、平衡轨道理论和数值模拟计算等, 一般假设颗粒自身无重力、无相互作用力。旋流器理论对旋流器内部参数的改进和工艺优化具有重要意义。

1.2.1 停留时间理论

Rietema^[5]提出了停留时间理论, 认为分离粒度 d_{50}

为分离效率达 50%时的颗粒粒度，该粒度的颗粒从进料中心进入旋流器，正好可在停留时间内从进料口中心到达器壁。以该理论为基础推导出了固-液旋流器分离效率公式。

1.2.2 两相湍流理论

两相湍流理论模型包括一般公式和湍流模式，主要考虑湍流扩散对分离的影响。最初 Driessen^[6]提出应关注湍流对切向速度表达式中 n 的影响，继而 Rietema^[7]从 N-S 方程出发，认为湍流扩散引起颗粒分离。Bloor 等^[8]在 Prandtl 混合长度理论^[9]的基础上建立了更严密的单相粘性流体流动湍流模型，得到了流速分布及涡流粘度的空间分布。Schubert^[10]在前人研究的基础上提出了分离粒度的计算公式。由于湍流存在，建立经验公式时应充分考虑湍流的影响，以得到更完善的公式反映旋流

器的工作性能。

1.3 水力旋流器应用现状

旋流器具有结构简单、处理量大和分离能力强等特征，在石化、矿采和环保等领域得到推广。纵览当前的发展趋势，凡是有密度差、粒度差和形态差的两相流体均可用旋流器进行分离，分离效率远大于重力分离^[11]。当前对旋流器分离技术的研究可分为静态水力旋流器(以英国 Thew^[3]提出的液-液旋流分离为代表)和动态水力旋流器(以法国 Totalcep 和 Neyrtec 为代表^[12])。本工作主要讨论静态水力旋流器。

根据分离特征旋流器可分为五大类：固-液分离、固-固分离、液-液分离、液-气分离和固-气分离，基本应用领域如表 1 所示。

表 1 旋流器分类及应用领域
Table 1 Classification and application of hydrocyclone

| Type | Purpose of separation | Field of application |
|----------------------------|---|--|
| Solid-liquid hydrocyclone | Obtaining a pure liquid phase and a high concentration solid phase | Mineral concentration, environmental protection, ceramics, building materials, and other industrial products for concentration and geological drilling |
| Solid-solid hydrocyclone | Obtaining grit that is smaller than the specified grain-size solids or obtain high-density concentrates and low-density tailings | The heavy classification of mineral engineering, separation and removal of heavy medium |
| Liquid-liquid hydrocyclone | Obtaining two pure liquid with different densities | Crude oil dehydration in oil industry, degreasing of oily wastewater and dehydration of light oil |
| Liquid-gas hydrocyclone | Utilizing the negative pressure zone generated by the high tangential velocity of the hydrocyclone to degassing and obtain high pure liquid | Separating gas from crude oil in oil industry |
| Solid-gas hydrocyclone | Obtaining clean gas and pure solids or get two solids of different sizes | Various types of flue gas dust and purification of various dust gases in environmental projects |

水力旋流器通常单独使用，也可同其它分离设备联用以提高分离效率并拓展应用范围，有望实现多相分离。

2 旋流器的研究现状

2.1 研究概况

早期旋流器主要分为液-固型和固-固型。液-固型旋流器用于得到纯净液体(溢流)和高浓度(密度)固体物料(沉砂)，早期主要用于选矿、陶瓷、建材、产物浓缩等行业。如荷兰皇后号挖泥船上倾斜安装着一台直径 2500 mm、高 6500 mm、处理量为 8000 m³/h 的特大型旋流器，用于处理石块和砂子，固体物料浓度为 10vol%。在给料压力 0.15 MPa 的条件下，分离粒度为 250 μm、底流浓度为 32vol%。固-固旋流器与液-固旋流器分离原理相同，结构大同小异，早期用于分级产品、脱泥和重介质旋流器的选别作业等。2 种旋流器可单独使用，亦可结合使用，代替传统分离工艺，提高工业生产的分离效率，具有重要的意义。随着时代的进步，2 种旋流组合利用无法达到实际要求，应用领域受到限制，一些产品无法很好分离处理，Bradely^[13]指出传统型水力旋

流器不能实现油水分离的两个主要原因，一是相对于固-固两相或固-液两相混合流体的密度差，油-水两相密度差过小，分离难度加大；二是旋流器内两相介质间的剪切力易造成分散相油滴破碎。因此，一段时期内旋流分离技术一直未突破液-液分离应用的瓶颈。1968 年 Thew^[3]借鉴了固-固旋流器和液-固旋流器的研究进展，针对已有研究的缺陷，提出液-液可以旋流分离。由于液-液旋流器具有体积小、生产能力大和分离效率高等优点，很快用于海上石油开采。液-液水力旋流器最具代表性的是 20 世纪 80 年代中期英国 Southampton 学校 Thew^[3]研发的双锥型液-液水力旋流器和陆耀军等^[14]研制的优选结构液-液水力旋流器，后者是一种改良型液-液水力旋流器，大大提高了工作效率^[11]。

根据功能不同，水力旋流器主要分为预分离旋流器、脱水型旋流器和除油型旋流器，分离原理相同，结构大同小异，如表 2 所示。海上石油开采使用单个水力旋流器往往很难达到预期要求，3 种水力旋流器联合使用大大提高了石油开采效率。

改善水力旋流器的处理效果，首先需了解两相在旋

流器内的分离过程，其次要剖析分离过程中的影响因素。研究发现，旋流器的工作性能受结构参数、操作参数和物性参数影响。对水力旋流器的分离性能有待进一步研究，实验研究不仅量大，且运行成本较高，结果也不一定准确。随着科技的发展，模拟与实验结合成为旋流器研究的主要方向，可深度分析旋流器内两相流的运动状态，为旋流器结构改良提供理论依据，有利于提高旋流器的工作效率。本工作从以下三方面综述旋流器的研究现状：旋流器内部流场的计算机模拟、旋流器工作性能影响因素、应用技术拓展。

表 2 液-液水力旋流器类别
Table 2 Liquid-liquid hydrocyclone category

| Type | Pre-separation hydrocyclone | Dewatering hydrocyclone | Deoiling hydrocyclone | Ref. |
|--|---|---------------------------------|--|------|
| Purpose | Removal a large amount of water from the mixture to meet the external transmission requirements | | Sewage degreasing to meets the environmental protection requirements | |
| The liquid of oil-outlet | Oil with less than 40vol% water | Oil with less than 10vol% water | Oil that needs to be removed | [5] |
| The liquid of water-outlet | Oily sewage | Oily sewage | Purified water | |
| Oil concentration in inlet | <40wt% | >60wt% | <2% | [15] |
| Oil concentration in water-outlet | <2000 mg/L | <5wt% | <30 mg/L | [15] |
| Water content of the oil-outlet | Less than 40% | Less than 10wt% | Unrelated | [5] |
| Treatment method of the liquid in oil-outlet | Further processing is required | No dehydration | Return to upstream | |
| Treatment method of the liquid in water-outlet | Further degreasing | | Outward discharge | |
| Phase characteristic | Oil in the continuous phase, and water in the dispersed phase | | Water is the continuous phase, and oil is the dispersed phase | |

表 3 湍流模型分类
Table 3 Classification of turbulence model

| Model | Feature |
|--------------------------------|---|
| Standard $k-\varepsilon$ model | Proposed by Launder et al. ^[22] , was applicable to a wide range, economy and reasonable precision. It is a semi-empirical formula, which is summarized from the experimental phenomena |
| RNG $k-\varepsilon$ model | The RNG model adds a condition to the ε equation, which effectively improves the accuracy. It is an improvement of the standard $k-\varepsilon$ model. This improvement is mainly reflected in the model coefficient and the dissipative additional terms, but does not break through the isotropic framework within the vortex-viscosity assumption. The framework of the same-sex model ^[23] . It takes the turbulent eddies into account which improves the accuracy in this area |
| RSM model | Since RSM more strictly considers streamlined bending, vortices, rotations, and rapid changes in tension than single- and double-equation models, it has the potential for higher accuracy predictions for complex flows. However, this prediction is limited to the equation related to Reynolds stress. The Reynolds stress model gives up isotropic velocity assumptions and takes full account of the sharp changes in stress tensors caused by fluid rotation and streamline bending. When the model considers the anisotropy of Reynolds pressure, an RSM model, such as hurricane flow, is applied |
| LES model | Large eddy simulation calculation is complex, LES most of the fleet in super computer or network parallel environment ^[24-26] LES belongs to high Re number simulation, for low Re number close to the surface area when the flow, you need to use other processing method, see literature ^[27-29] |

2.2 旋流器内部流场的数值模拟研究

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)适应性强且应用范围广,对流动计算域的几何形状和边界复杂的条件能找出满足工程需要的数值解;其次,可利用模拟平台选择各种模拟模型及流动参数对流体的运动状态进行模拟,对比不同方案;再者,其所受影响因素较少、灵活、能精确地对流场进行模拟并给出详细和完整的结果。虽然水力旋流器无内部零件、体积小且操作便利,但内部流场相当复杂^[16],内部微粒的流动形式和浓度分布也极为复杂^[2]。随着计算技术不断发展,数值模拟已成为研究水力旋流器的重要手段^[17-20],为后续深入研究提供更多依据。

研究者通过数值模拟并结合流体基本理论公式,利用计算机超强的计算能力,对液-液旋流器内部流场及分离行为进行了研究^[21],对旋流器的结构参数、操作参数和物性参数进行一定优化,提高水力旋流器处理能力。

数值模拟的关键是选择适合的粘性(湍流)模型,CFD 粘性模型主要包括 Standard $k-\varepsilon$ 双方程模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、RSM 模型和 LES 模型等,根据不同流场选用不同模型。表 3 为几种模型的特点。

已有研究^[30,31]表明,采用 RSM 和 LES 湍流模型模拟三维旋转流动具有较高的计算精度。随着研究的深入,仅靠实验研究水力旋流器性能不仅周期长、效率低、成本高,且水力旋流器内流场是三维的,极为复杂。将理论分析、数值模拟与实验结合则可缩短实验周期和降低成本。随着模拟技术的发展,计算流体动力学 FLUENT 软件已普遍用于模拟水力旋流器内部流场。

模拟的关键在于模型和模拟参数的选择。邵悦等^[32]采用 RSM 和 Mixture 模型对两种不同结构的油水旋流器(LLHC)进行数值计算,搭建了相应的实验台进行对比,结果表明,内部流场的模拟与实验结果误差在 10%以内,有效证明了该模型方法的准确性。Kharoua 等^[33]采用

RNG $k-\varepsilon$ 和 RSM 模型分别模拟分析, 结果表明 RNG $k-\varepsilon$ 模型的模拟结果与实验结果误差较大, 而 RSM 模拟结果较准确。Xia 等^[34]分别选择 LES 和 RSM 模型模拟水力旋流器内流场和压力场, 结果显示, LES 对流场的模拟更具有合理性和真实性。每种模型都有其特点, 应根据流场特点选择合适的模型, 并结合实验结果验证所选模型的正确性。大量模拟研究选择不同模型并结合实验结果对比分析, 证实了水力旋流器内流场模拟的合理性, 对模型参数的选择有指导意义。

水力旋流器结构虽简单, 但其内部流场复杂, 流体

在不同截面上的轴向、径向和切向速度随径向位置不同有不同变化, 切向速度变化最大, 其次是轴向速度, 径向速度变化最小。切向速度决定流体离心力大小。图 2 是各截面上的切向速度、轴向速度和径向速度分量的分布。由图 2(a)可看出, 轴向高度 $x=0.06\text{ m}$ 横截面上切向速度较大, 表明流体在柱段所受离心力较大, 柱段是主要的分离区。切向速度由中心向壁面先增后减, 以零轴速包络面(轴向速度为零的点构成的面, LZVV)为界, 流场被分为内旋流区和外旋流区, 两区流体的切向速度均为正, 表明内旋流与外旋流流动方向一致。

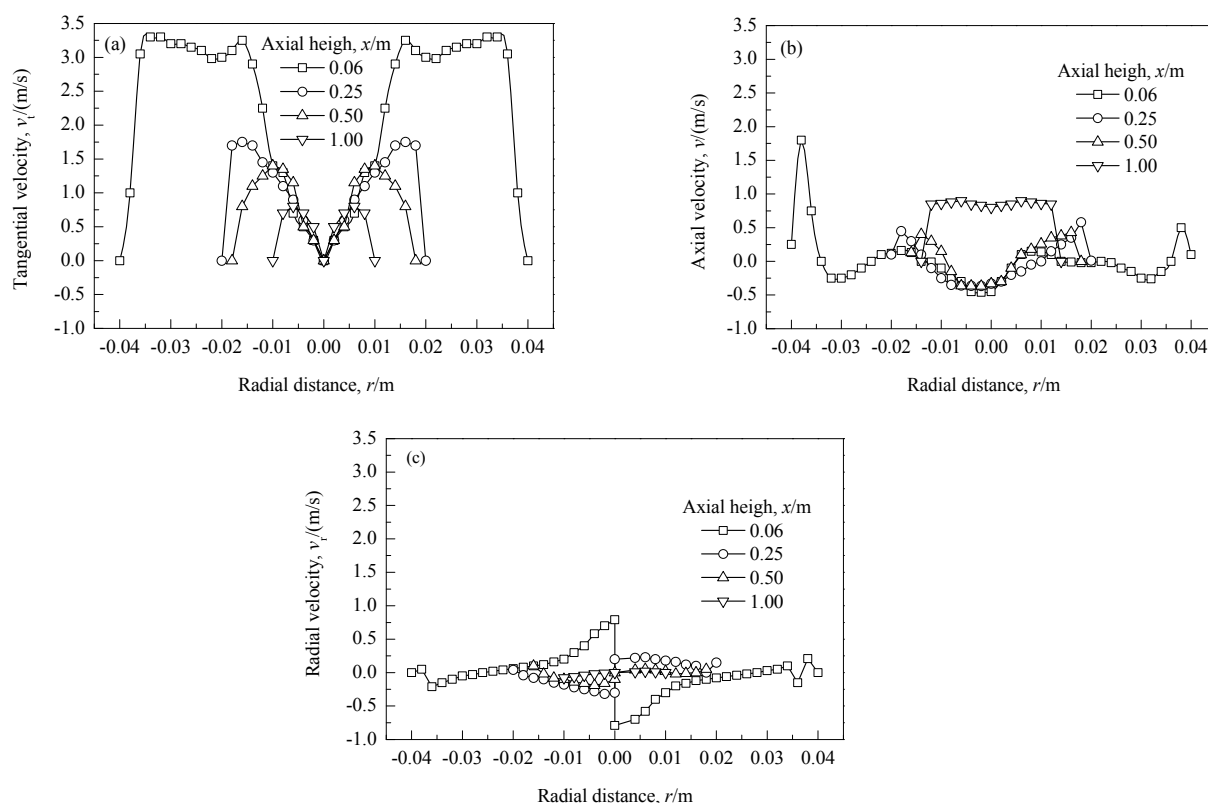


图2 各截面上的速度分布

Fig.2 Velocity distribution in each section

由轴向速度的分布[图 2(b)]可见, $x=0.06\text{ m}$ 截面的轴向速度发生了 3 次方向改变, 表明圆柱段局部存在上下循环流。 $x=0.25$ 和 0.5 m 截面每侧均有轴向速度为零的点, 即零轴速包络面上的两点, 两点外侧流体向下流动, 即外旋流, 两点内侧流体向上流动, 即内旋流。 $x=1.0\text{ m}$ 截面流体的轴向速度已基本稳定。不同截面的轴向速度的稳定性不同, 越靠近底流口处, 旋流器轴心处上旋流区域越小, 直至消失。

由径向速度分布[图 2(c)]可见, 旋流器轴向区域速度梯度很大, 表明内旋流流场极利于分离。

文献^[35-37]对除油型水力旋流器采用 RSM 模型进行

了数值模拟, 得到了大致相同的速度分布规律。众多研究表明, 旋流器内流场十分复杂, 水力旋流器的数值模拟更宜采用 RSM 模型。

实验与模拟结果比较可判断数值模拟方法的可行性。数值模拟可提供两相流分离的规律和分离过程中的影响因素, 对旋流器的性能分析和参数优化有指导意义。研究旋流器分离过程应将实验和模拟方法对比, 充分考虑两种方法的特点, 互相对比印证, 结合理论分析对模拟结果进行有针对性的修正, 才能得到比较全面、客观的结论。模拟与实验结合更有利于快速、高效和深度了解水力旋流器。

2.3 影响旋流器分离效率的因素

2.3.1 结构参数对分离效率的影响

传统的旋流器结构较简单,主要由柱段、锥段、平尾段、1 个进口、1 个溢流口和 1 个底流口构成。旋流器的结构对分离过程中液滴的破碎、旋流器的工作效率和能耗有很大影响,结构改良可有效提高分离设备的工作性能。

水力旋流器的进口分为单切向、双切向和轴向进口。轴向进口需在进口下方安设导流叶轮,使流体能在旋流器中螺旋运动。马艺等^[38]采用 CFD 对传统切向式进口旋流器和新型轴流式进口旋流器内压力场进行模拟,结果表明,新型轴流式入口相比于传统切入式进口具有阻力小、径向压降大、轴向压降小和能耗小等特点,有助于液-液分离。刘晓敏等^[39]将旋流器的单切向进口改为双切向进口,对旋流器内流场进行研究,双切向进口旋流器内流场更具有轴向对称性,不仅能使流体高速旋转,且降低了旋流器运行时的进口压力,扩展了水力旋流器的应用领域。俞接成等^[40]研究了轴向进口水力旋流器内油水分离情况,选择 RSM 湍流模型和 MIXTURE 多相流模型进行流场模拟,结果显示,轴向进口式旋流器对废水除油的分离效果较好。Noroozi 等^[41]研究了渐开线式、螺旋形和轴线式进口结构对水力旋流器分离能力的影响,并与标准式水力旋流器对比,采用螺旋形进样口时,分离效率可提高约 10%。这些研究结果对水力旋流器进口结构改良有指导意义。

溢流口为轻相出口,溢流管主要结构参数包括溢流管径、插入深度和壁厚。管径与含油率有关,含油率小时选择小直径的溢流口。寇杰等^[42]研究了溢流管径对旋流器工作性能的影响,结果显示,较小直径的溢流口有利于分离,薄壁直圆溢流管易导致盖下短路流(未经分离直接从上出口排出的部分流体),为降低短路流的过度影响,一般不首选薄壁溢流管。Hwang 等^[43]对直径 10 mm 的水力旋流器模拟研究发现,溢流管壁厚增加增大了离心力,提高了颗粒的分离效率。也有研究者针对短路流的影响对溢流管进行结构设计,钟声^[44]推出了增加溢流管插入深度、同时在管壁开孔的优化方案,降低短路流的影响。周先桃等^[45]研究了水力旋流器的内流场和短路流,认为采用螺旋溢流管可有效降低短路流的影响,使分离效率提升 5%~7%,效果良好。为降低短路流的影响,不能只单纯改进溢流管结构,可在溢流管外部增添一些结构降低短路流的流量,提升旋流器的工作性能。

旋流器圆柱段流场较复杂,内部存在短路流与循环流,圆柱段减少了压力过度损失,降低了液滴破碎程度。圆柱段结构设计不仅要防止因剪切力造成油滴破裂,还

需保证流体的切向速度足以使两相充分分离。褚良银^[46]研究水力旋流器内固-液两相流场时发现,旋流器圆柱段为有效的离心沉降区,有利于固体颗粒物分离,固-液分离宜采用长柱形旋流器^[47]。但圆柱段长度不宜过长,否则会增加能量损耗,影响流体的切线速度,旋流器的柱长一般约为其直径的 0.7~2.0 倍^[48]。

旋流器的锥段是主要的分离部位,锥段收缩强化了离心场,有利于流体分离。锥段主要的影响因素包括锥角和锥长,锥角影响流体的离心力,锥长决定流体停留时间,且二者互相影响。张丹等^[49]采用激光粒子测速和数值模拟方法对比了不同锥角的旋流器的分离效果,结果显示,小锥角型固-液水力旋流器有利于小固体颗粒物分离。Saidi 等^[50]研究了不同锥角下流体的速度和压力变化,结果表明,锥角越大,切向速度越大,且径向压力随锥角增大而增大,分离效率提高,但锥角过大反而不利于分离,锥角过大,锥长过小,减少了流体在锥段的分离时间,流体无法充分分离,锥角为 6° 的旋流器分离效率最高,与前人^[51]的单锥旋流器的锥角一致。耿高峰^[52]采用 CFD 模拟方法研究锥长对旋流器内流场的影响,表明锥长改变对旋流器内旋流的轴向速度和外旋流的切向速度影响较大,为旋流器结构设计提供参考。

底流口为重相出口,增加底流管长度可提高油柱的稳定性,收集到更小粒径的油滴,改善水力旋流器的性能。为使水力旋流器达到较满意的效果,底流管必须达到一定长度。王振波^[53]研究了底流管径和长度对旋流器分离能力的影响,表明底流管径增加有利于中心油柱稳定,但长度过大的底流管也会使压力损失较大,增加了能耗。

目前尚未建立用于旋流器分离的通用数学模型,仅能定性或在一定条件下利用其结构参数针对分离性能的影响建立关联式。为达到更好的分离效果,通过实验不断对旋流器结构进行优化,除对进口管、溢流管、底流管、柱段、锥段和旋流器器壁结构进行改良外,还有研究者^[2]对旋流器内部进行改造,在其内部增加转动叶片、空气导管、中心锥、弹簧振子、卸料螺旋和小旋流器等。

为发挥旋流器工作的潜能,针对普通水力旋流器的缺点,提出了复合联用式水力旋流器,包括充气水力旋流器、磁力水力旋流器和电化学水力旋流器等^[2]。

2.3.2 操作参数对分离效率的影响

操作参数主要包括分流比、进口流量、溢流压降与底流压降之比(PDR)。对于固定结构的旋流器和待处理混合液,存在最佳进口流量和分流比。

进口流量直接反映旋流器的分离效果,压降则为旋流器能耗指标。张婷婷^[54]采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型模拟了进

口流量对旋流器分离效率的影响,结果表明,分离效率随进口流量增大先增后减,进口流量为 $12 \text{ m}^3/\text{h}$ 时分离效果最好,进口流量过大加剧了油滴破碎,分离效果反而不好。王振波等^[55]实验研究了单锥除油型水力旋流器的压降比特性,结果显示,压降比和压降随进口流量增大而增大。

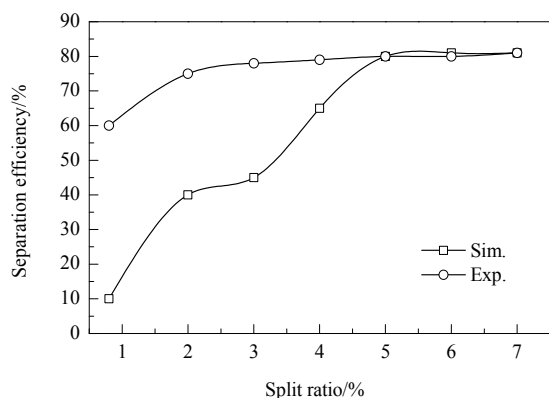


图3 分流比与分离效率的关系

Fig.3 Relationship between split ratio and separation efficiency

分离效率随分流比增加缓慢增大至平稳状态,液滴粒径越小,分离效果越差,最佳分流比却越大。这是因为液滴粒径越小,所需离心力越大,分流比增大,速度变化较大,加剧了油滴破碎,正面影响(分流比增大)与负面影响(油滴破碎程度增加)抵消,达到最佳值,因而最佳分流比随油滴粒径减小而增大。分流比过大会造成溢流流量过大,加强循环流和短路流的强度,反而不利于油水分离,因此在保证分离效率的前提下,应尽可能降低分流比。分流比主要通过调节底流口阀改变底流和溢流的压差控制,舒朝晖^[57]对旋流器中的压降及压降比进行了系统分析,结果表明,旋流器的压降比与分流比线性关联。

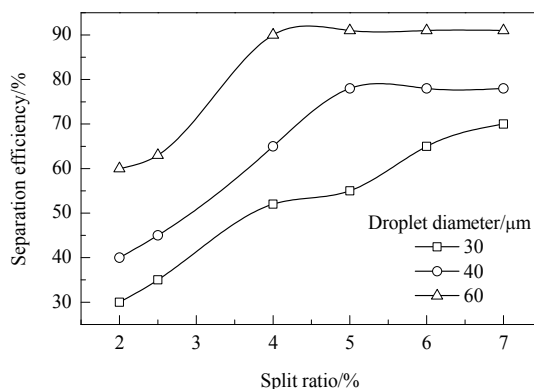
以上结果表明,水力旋流器的操作参数是决定其工作性能的关键,流量与分流比决定着旋流器的分离效果,流量是处理能力的指标,压降则体现能耗。操作参数优化虽可增强旋流器的分离性能,但分离性能也受结构和物性参数影响。对于高乳化、高粘度的油水混合物,单独调节结构参数或操作参数很难达到较好的分离效果。

2.3.3 物性参数对分离效率的影响

油水界面张力、油滴粒径、乳化状态和油水粘度等物性参数均影响水力旋流器的分离能力,针对物性参数提高水力旋流器分离效率的研究也越来越普遍。

非极性憎水性的油滴经乳化后,在表面活性剂的作用下变成携带电荷的胶核,由于极性和表面能的影响,

Colman 等^[56]对迁移效率曲线作过预测,虽然不够严谨,但得出分离效率与分流比有一定关系。图3是分流比与旋流器分离效率的关系。由图可见,模拟结果与实验结果基本契合,但分流比小于5%时,模拟值明显小于实验值,这是由于实验中油滴聚集上浮,提高了分离效率,而模拟未考虑油滴聚集的影响。



携带电荷的油滴胶核与携正电荷的离子或极性水分子相互吸引形成双电层结构,油珠被一层柔软的双电层包裹,因同性相斥,油滴间聚集难度加大,使油滴能长久稳定存在于水中。乳化状态的混合液在分离过程中由于液滴粒径不易变大,液滴间相互作用,使分散相受到更大离心力才能分离,增加了分离油水的难度。

油滴粒径是水力旋流器分离油水过程中极为关键的参数。文献^[58-60]研究了入口油滴平均粒径与旋流器分离性能的关系,结果显示,旋流器的分离效率随入口油滴平均粒径增大而增大,入口油滴平均粒径大于 $100 \mu\text{m}$ 时,油滴可完全分离,但入口油滴平均粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 时,分离效率快速下降,油滴直径为 $1 \mu\text{m}$ 时,液-液旋流器几乎无分离能力。

粘度是影响水力旋流器分离效果的重要参数,分散相粘度越大,两相间的阻力越大,不利于分散相沿径向向轴心迁移。入口分散相浓度较大时易聚集成块,不仅堵塞溢流口,且不易分离,甚至会影响整个工艺。Belaidi 等^[61]采用单相乳化和多相乳化进行出水研究,含水量大于40%后粘度降低,分离效率增大。罗然等^[60]利用CFD模拟了不同粘度的油水混合液对油相分布的影响,表明随粘度增加,油相集中度很快下降,混合液粘度增至 $10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,几乎无法分离。杨琳等^[62]利用CFD方法研究了粘度对旋流器分离效率的影响,粘度越大越不利于油滴聚集上浮,分离效率下降。

pH 值对油水两相界面张力有很大影响,油水两相

界面张力降低,液滴间作用力减小,有利于油滴分离。赵远鹏^[63]的研究显示, pH 值为 6~8 时油水表面张力最大,此时油水最不易分离,随 pH 增大,油水两相表面张力迅速下降,油水分离效率显著提高。

对于高乳化、高分散和高粘度的油水混合物,单一结构的水力旋流器很难达到理想的分离状态。处理该类废水需水力旋流器与其它设备或化学试剂联用,同时对结构参数和操作参数优化,充分利用各设备的特点,发挥水力旋流器的潜力,达到较理想的处理结果。

2.4 应用技术拓展

旋流器因具有体积小、效率高和分离快等特点在许多技术领域得到了普遍应用。早期水力旋流器就作为高效固-液分离设备广泛用于选矿,随着研究不断深入,1983 年第一台液-液水力旋流器用于海上石油开采试验,相比之下,三相分离技术的研究远晚于两相。

目前我国工业废水排放量大,废水处理难度也越来越大,尤其对于水质复杂和水质波动较大的煤化工废水,其中的含焦粉量和含油量也逐年增加,普通的水力旋流器已不能对液-液-固三相进行分离。液-液-固三相旋流器主要是在静态旋流器的基础上增添了集砂结构。Bednarski 等^[64]利用液-液-固三相分离水力旋流器对砂、油和水进行分离,除油率高达 99.2%,除砂率为 97.7%,具有良好应用前景。

3 水力旋流器在煤化工废水处理中的应用

3.1 煤化工废水的特点

我国石油和天然气能源严重紧缺,而煤炭相对丰富。从长久来看,石油和天然气难以支撑未来社会所需,而煤炭可经热加工和催化加工等工艺转变为多种燃料和化工产品,弥补我国能源的不足,这就产生了煤化工。煤化工工厂产生的废水主要分成一般有机废水、高浓度有机废水和含盐废水三大类,煤化工废水的水质与排放指标^[65]如表 4 所示。从表可知,煤化工废水中有机物含量大,成分复杂且具有高毒性,是一种高分散、高乳化和高粘度的含油废水。废水中含大量油类物质、酚类有毒物质和焦粉,其中的焦油能抑制后续生物处理构筑物的活性。该类废水中的油含量远超出最高允许排放量(10 mg/L),虽然油类和焦粉含量不高,但两者稳定性好,较难处理。为减轻后续处理负荷,需采用一定的预处理技术分离废水中的油类和焦粉类物质。

煤化工废水中的油滴主要以浮油、分散油、乳化油 3 种形态存在,水质较复杂,含油量约 1000~1400 mg/L,

表 4 煤化工(气化)废水水质与排放标准
Table 4 Coal chemical industry (gasification) water quality and wastewater discharge standards

| Index | Content/(mg/L) | Secondary standard/(mg/L) ^[65] |
|------------------|----------------------|---|
| Phenol | 3000~4000 | Volatile phenol≤0.5 |
| Polyphenol | 1500~2500 | |
| Ammonia nitrogen | 6700~10200 | ≤50 |
| Oil | 1000~1400 | ≤10 |
| SS | 300~600 | ≤200 |
| COD | 20000~30000 | ≤150 |
| pH | 9~10 (dimensionless) | 6~9 (dimensionless) |
| Sulfide | 50~200 | ≤1 |

含固体颗粒物 300~600 mg/L。焦粉和煤粉有利于废水形成油包水(W/O)型乳状液,其稳定性与焦粉粒径有一定关系,焦粉粒度越小,乳状液越稳定,油水越难分离,处理越困难,且焦油抑制后续生物处理构筑物中活性污泥的活性,焦粉易堵塞管和磨损管道,增加维护成本,因此预除油和除焦粉是整个工艺正常运作的保障。

3.2 水力旋流器在煤化工废水处理中的应用前景

目前,煤化工废水预除油和脱焦粉设施主要有除油池、隔油池、浮选池和沉淀池等,但多数煤化工厂对废水的除油脱焦粉都不够重视,相关设备闲置不用,加大了后续处理废水的负荷,影响处理效率,使废水治理效率下降。而污水处理设备占地面积大,设备投资和运行成本都很高。废水含油不仅增加后续处理负荷,甚至可能影响整个工艺正常进行,同时废油和废渣长时间存在会损坏管道,增加成本,因此预处理除油脱渣是煤化工工艺从预处理到生化处理再到深度处理的关键。快速除油脱渣对企业是一个难题,传统工艺已完全满足不了工业需求,反而增加成本,而旋流器体积小、效率高、方便安装等特点可以满足目前工业需求。

提高煤化工废水处理的可生化性需在各废水罐区设置小型高效的除油脱渣设备,对废水进行预处理,及时回收废水中的有用物质。现有的预除油和脱焦粉设备因过于庞大、处理效率低、液体停留时间长、易被腐蚀和不易扩容等问题而不被广泛利用。水力旋流器具有体积小、效率高和处理量大等特点,同时结合数值模拟方法对旋流器结构进行快速优化,必将在煤化工废水处理行业具有广阔的应用前景:

- (1) 除油型水力旋流器可替代隔油池和气浮选等除油设备,对含油废水进行脱油处理;
- (2) 水力旋流器并联可增大废水处理量,易扩容,其串联可增大废水处理效率;
- (3) 脱水型水力旋流器可替代化学脱水和电脱水设备,可对回收的原油进行脱水处理,降低含水率,处理后的油可外输,增加经济效益;
- (4) 液-液-固三相分离水力旋流器可同时除去废水

中的油和焦粉,焦粉回收可用于高炉炼铁和铜、铅、锌、钛、锑、汞等有色金属的鼓风炉炼制,起到还原剂、加热剂和料柱骨架的作用;

(5) 传统的除油设备只能除去 150 μm 或更大粒径的油滴,增加捕捉小粒径油滴可通过减少处理量或增大处理设备面积实现。废水处理量根据生产能力而定,不能随便更改,除去更小粒径的油滴需将处理设备面积增大许多,例如,油滴粒径从 150 μm 减至 50 μm ,除油设备面积需增大 9 倍^[66],因此通过增加除油设备面积改善除油效果很难实现。水力旋流器具有除去更小粒径油滴的能力,且通过适当改变废水物性,工作能力会显著提高;

(6) 传统除油脱渣设备易造成附件区域污染及产生异味,而水力旋流器结构闭合,能减小对空气的污染,同时及时回收污油,使其不与低含油污水混合,不污染其它区域;

(7) 改善废水物性可有效增大水力旋流器的处理效率,高温高压可降低剪切力,降低废水粘度,降低油滴分离过程中的阻力,有利于油滴聚集上浮,提高分离能力;

(8) 可对不同结构的水力旋流器进行快速模拟,有利于设计最佳结构的旋流器,大大减少实验周期和费用。

因此煤化工废水除油脱焦粉使用水力旋流器替代传统设备,不仅可显著提高分离效率,且具有很好的经济效益和广阔的应用前景。

4 结语与展望

水力旋流器因用时短、分离效率高等特点会很快应用于煤化工废水除油脱渣,废水量较大时可采用水力旋流器并联方式,同时可结合数值模拟方法研究物性参数、操作参数和结构参数对旋流器分离性能的影响,得到最佳操作条件及最利于油水分离的物性条件,并对旋流器的结构进行快速优化设计。

结构参数和操作参数很大程度上影响着旋流器的工作性能,但单一结构的水力旋流器很难对高粘度,高乳化的油水渣混合物进行有效分离。目前对水力旋流器的结构研究还不够深入,其结构设计多半是经验或半经验半理论。不同含油渣废水的物性参数对旋流器的工作性能影响很大,通过一定预处理可使水力旋流器除油脱渣效果达到最佳。对含焦粉的高乳化、高粘度和高分散的煤化工废水可将破乳剂或絮凝剂、超声或微波、水力旋流器联合使用。化学试剂、工程设备和模拟结合是未来水力旋流器发展的趋势,可取代传统除油脱渣设备。开发新型高效节能预处理工艺,必将在煤化工废水除油

脱焦粉工艺中有很好的经济效益和广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 徐继润,罗茜.水力旋流器流场理论[M].北京:科学出版社,1998:33-75.
Xu J R, Luo Q. Hydrocyclone flow field theory [M]. Beijing: Science Press, 1998: 33-75.
- [2] 褚良银.水力旋流器[M].北京:化学工业出版社,1998:1-5,122-141.
Chu L Y. Hydrocyclone [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998: 1-5, 122-141.
- [3] Thew M T. Hydrocyclone redesign for liquid-liquid separation. [J]. The Chemical Engineer, 1986, (7/8): 17-23.
- [4] 庞学诗.水力旋流器技术与应用[M].北京:中国石化出版社,2011:46-49.
Pang X S. Technology and application of hydrocyclone [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011: 46-49.
- [5] Rietema K. Performance and design of hydrocyclones (I-IV) [J]. Chemical Engineering Science, 1961, 15(3/4): 298-325.
- [6] Driessen M G. Review of industrial mining [J]. Special Issue, 1951, (4): 449-461.
- [7] Rietema K. The mechanism of the separation of finely dispersed solids in cyclones [C]//Rietema K, Verver C G. Cyclones in Industry. Amsterdam: Elsevier, 1961: 46-63.
- [8] Bloor M I G, Ingham D B. The leakage effect in the industrial cyclone [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1975, 53(1): 7-11.
- [9] 暨朝颂.关于普朗特混合长度理论的分析[J].中国矿山工程,2013,42(2): 53-57.
Ji C S. Analysis of Prandtl's mixing length theory [J]. China Mine Engineering, 2013, 42(2): 53-57.
- [10] Schubert H. A hydrocyclone separation model in consideration of the turbulent multi-phase flow [J]. Particulate Science & Technology, 1985, 3(1/2): 1-13.
- [11] 庞学诗.水力旋流器技术与应用[M].北京:中国石化出版社,2011:282-294.
Pang X S. Technology and application of hydrocyclone [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011: 282-294.
- [12] Gay J C, Triponey G, Bezard C, et al. Rotary cyclone will improve oily water treatment and reduce space requirement/weight on offshore platforms [C]//Society of Petroleum Engineers. Offshore Europe. 1987: 63-72.
- [13] Bradley D. A theoretical study of the hydraulic cyclone [J]. Society of Chemical Industry, 1958, 34: 40-45.
- [14] 陆耀军,沈熊,周力行.优选结构液-液旋流管分离特性[J].化工学报,1999,50(6): 758-765.
Lu Y J, Shen X, Zhou L X. Separation performance of innovative liquid-liquid hydrocyclone [J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 1999, 50(6): 758-765.
- [15] 李自力,何利民,何跃生.水力旋流器在炼油厂污水处理系统中的应用前景[J].炼油技术与工程,1995,(5): 34-37.
Li Z L, He L M, He Y S. Prospect of hydrocyclone application in waste water treatment system of refineries [J]. Petroleum Refinery Engineering, 1995, (5): 34-37.
- [16] Petty C A, Parks S M. Flow structures within miniature hydrocyclones [J]. Minerals Engineering, 2004, 17(5): 615-624.
- [17] 刘彩玉,李枫,于永红.复合式水力旋流器径向压力分布及单体

- 生产能力的确定 [J]. 化工机械, 2009, 36(5): 434–438.
- Liu C Y, Li F, Yu Y H. Radial pressure distribution and unit production ability determination of compound hydrocyclones [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2009, 36(5): 434–438.
- [18] Dueck J G, Matvienko O V, Neesse T. Modeling of hydrodynamics and separation in a hydrocyclone [J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2000, 34(5): 428–438.
- [19] Schuetz S, Mayer G, Bierdel M, et al. Investigations on the flow and separation behavior of hydrocyclones using computational fluid dynamics [J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 73(2): 229–237.
- [20] Nowakowski A F, Cullivan J C, Williams R A, et al. Application of CFD to modelling of the flow in hydrocyclones: is this a realizable option or still a research challenge? [J]. Minerals Engineering, 2004, 17(5): 661–669.
- [21] 郑小涛, 龚程, 徐红波, 等. 圆柱段长度对水力旋流分离性能的影响 [J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37(1): 20–24.
- Zheng X T, Gong C, Xu H B, et al. Influence of cylinder section length on separation performance of hydrocyclone [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2015, 37(1): 20–24.
- [22] Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence [M]. Manhattan: Academic Press, 1972: 135–142.
- [23] 陆耀军, 周力行, 沈熊. 不同湍流模型在液–液旋流分离管流场计算中的应用及比较 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(2): 105–109.
- Lu Y J, Zhou L X, Shen X. Different turbulence models for simulating a liquid hydrocyclone [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(2): 105–109.
- [24] Mare L D, Jones W P. LES of turbulent flow past a swept fence [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 606–615.
- [25] Dejoan A, Schiestel R. LES of unsteady turbulence via a one-equation subgrid-scale transport model [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(4): 398–412.
- [26] Lübecke H, Schmidt S, Rung T, et al. Comparison of LES and RANS in bluff-body flows [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(14): 1471–1485.
- [27] Fluent Inc. FLUENT User's Guide [Z]. 2006.
- [28] Schmidt R C, Kerstein A R, Wunsch S, et al. Near-wall LES closure based on one-dimensional turbulence modeling [J]. Journal of Computational Physics, 2003, 186(1): 317–355.
- [29] Viazso S, Dejoan A, Schiestel R. Spectral features of the wall-pressure fluctuations in turbulent wall flows with and without perturbations using LES [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2001, 22(1): 39–52.
- [30] 琚选择, 李自力, 孙卓辉, 等. 液–液水力旋流器两相湍流数值模拟研究进展 [J]. 化学工业与工程, 2009, 26(1): 84–90.
- Ju X Z, Li Z L, Sun Z H, et al. Progress in numerical simulation of two-phase turbulent flow in the liquid–liquid hydrocyclone (LLHC) [J]. Chemical Industry & Engineering, 2009, 26(1): 84–90.
- [31] Bhaskar K U, Murthy Y R, Raju M R, et al. CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone [J]. Minerals Engineering, 2007, 20(1): 60–71.
- [32] 邵悦, 赵会军, 王小兵. 水力旋流器油水分离数值模拟与实验研究 [J]. 常州大学学报(自然科学版), 2013, 25(2): 51–55.
- Shao Y, Zhao H J, Wang X B. Numerical simulation and experimental investigation on oil–water separation within liquid–liquid hydrocyclone [J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2013, 25(2): 51–55.
- [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] Xia Y F, Deng S S, Gu M, et al. Field simulation of liquid–liquid hydrocyclone based on large eddy theory [C]//Fuzzy Information and Engineering Volume 2. Berlin: Springer, 2009: 901–906.
- [35] 赵立新, 崔福义, 蒋明虎, 等. 基于雷诺应力模型的脱油旋流器流场特性研究 [J]. 化学工程, 2007, 35(5): 32–35.
- Zhao L X, Cui F Y, Jiang M H, et al. Study on the characteristics of flow field inside de-oiling hydrocyclone based on Reynolds stress model [J]. Chemical Engineering, 2007, 35(5): 32–35.
- [36] 刘海生, 贺会群, 艾志久, 等. 雷诺应力模型对旋流器内流场的数值模拟 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(9): 243–245.
- Liu H S, He H Q, Ai Z J, et al. Numerical simulation of inner flow field in hydrocyclone with RSM model [J]. Computer Simulation, 2006, 23(9): 243–245.
- [37] 李坤, 李正兴, 袁惠新. 单入口水力旋流器内速度分布特性的数值模拟 [J]. 矿山机械, 2006, (4): 87–89.
- Li K, Li Z X, Yuan H X. Numerical simulation of velocity distribution in a single inlet hydrocyclone [J]. Mining & Processing Equipment, 2006, (4): 87–89.
- [38] 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(增刊 1): 497–501.
- Ma Y, Jin Y H, Wang Z B. Flow field simulation in two different inlet structure hydrocyclone [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(S1): 497–501.
- [39] 刘晓敏, 檀润华, 蒋明虎, 等. 水力旋流器结构形式及参数关系研究 [J]. 机械设计, 2005, 22(2): 26–29.
- Liu X M, Tan R H, Jiang M H, et al. Research on structural form and parametric relations of hydrocyclones [J]. Journal of Machine Design, 2005, 22(2): 26–29.
- [40] 俞接成, 陈家庆, 韩景. 轴向入口油水分离水力旋流器及其数值模拟 [J]. 北京石油化工学院学报, 2009, 17(2): 19–23.
- Yu J C, Chen J Q, Han J. Axial entrance hydrocyclone for oil–water separation and its numerical simulation [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2009, 17(2): 19–23.
- [41] Noroozi S, Hashemabadi S H. CFD simulation of inlet design effect on deoiling hydrocyclone separation efficiency [J]. Chemical Engineering and Technology, 2010, 32(12): 1885–1893.
- [42] 寇杰, 何利民. 除油水力旋流器溢流口结构试验研究 [J]. 化工机械, 2000, 28(4): 193–196.
- Kou J, He L M. An experimental investigation on the structure of the overflow mouth of a deoiling hydrocyclone [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2000, 28(4): 193–196.
- [43] Hwang K J, Chou S P. Designing vortex finder structure for improving the particle separation efficiency of a hydrocyclone [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 172: 76–84.
- [44] 钟声. 新型多孔溢流管式水力旋流器的研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2012: 25–32.
- Zhong S. Research on a new type porous overflow hydrocyclone [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012: 25–32.
- [45] 周先桃, 陈文梅, 雷明光, 等. 水力旋流器短路流消除方法 [J]. 石油化工设备, 2003, 32(5): 4–6.
- Zhou X T, Chen W M, Lei M G, et al. Eradication of short-flow in a

- hydrocyclone [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2003, 32(5): 4–6.
- [46] 褚良银. 水力旋流器固液两相流场研究 [D]. 成都: 四川大学, 1992: 18–24.
- Chu L Y. Study on solid–liquid two phase flow field of hydrocyclone [D]. Chengdu: Sichuan University, 1992: 18–24.
- [47] 褚良银. 固液分离用水力旋流器的设计 [J]. *化工装备技术*, 1995, (1): 10–13.
- Chu L Y. Design of hydrocyclone for solid–liquid separation [J]. *Chemical Equipment Technology*, 1995, (1): 10–13.
- [48] 柳吉祥. 旋转流分选的理论及应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985: 145–188.
- Liu J X. Theory and application of rotary flow separation [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1985: 145–188.
- [49] 张丹, 陈晔. 锥角对固–液水力旋流器流场及其分离性能的影响 [J]. *流体机械*, 2009, 37(8): 11–16.
- Zhang D, Chen Y. Effect of the cone angle on flow field and separation performance of solid–liquid hydrocyclones [J]. *Fluid Machinery*, 2009, 37(8): 11–16.
- [50] Saidi M, Maddahian R, Farhanieh B. A parametric study on deoiling hydrocyclone flow field [C]//International Conference on Mechanical and Industrial Engineering 2012. 2012: 24–32.
- [51] 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 & Engineering*, 1994, 11(1): 37–50.
- [52] 耿高峰. 油水分离水力旋流器锥段长度对速度场影响研究 [J]. *化学工程与装备*, 2012, (2): 30–33.
- Geng G F. Influence of cone length on velocity field of oil–water separation hydrocyclone [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2012, (2): 30–33.
- [53] 王振波. 油田采出水处理用水力旋流器的试验研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2001: 43–45.
- Wang Z B. Experimental investigation on hydrocyclone used to dispose extracted water from production of oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2001: 43–45.
- [54] 张婷婷. 水力旋流器操作参数优选 [J]. *科技创新导报*, 2015, (4): 70.
- Zhang T T. Optimizing operation parameters of hydrocyclone [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2015, (4): 70.
- [55] 王振波, 贾少磊, 金有海. 除油型旋流器压降比特性试验研究 [J]. *化工机械*, 2004, 31(1): 1–4.
- Wang Z B, Jia S L, Jin Y H. An experimental investigation on the pressure drop ratio characteristics of oil-removing cyclones [J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2004, 31(1): 1–4.
- [56] Colman D A, Thew M T, Comey D R. Hydrocyclones for Oil/water separation [C]//International Conference on Hydromcyclones. 1980: 143–166.
- [57] 舒朝晖. 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: 61–66.
- Shu C H. Study on separation characteristics and software design of hydrocyclones for oil-water separation [D]. Chengdu: Sichuan University, 2001: 61–66.
- [58] Wolbert D, Ma B F, Aurelle Y, et al. Efficiency estimation of liquid–liquid hydrocyclones using trajectory analysis [J]. *Aiche Journal*, 1995, 41(6): 1395–1402.
- [59] 薛红兵, 康宜华, 姚薇, 等. 除油旋流器内壁油滴粒径分布规律研究 [J]. *石油机械*, 2001, 29(12): 1–3.
- Xue H B, Kang Y H, Yao W, et al. Study on droplet size distribution on inner wall of deoiling hydrocyclone [J]. *China Petroleum Machinery*, 2001, 29(12): 1–3.
- [60] 罗然, 张伟, 王家辉, 等. 用 CFD 确定物性参数对井下油水分离效率的影响 [J]. *石油和化工设备*, 2010, 13(6): 23–26.
- Luo R, Zhang W, Wang J H, et al. Effect of physical parameters on downhole oil–water separation efficiency determined by CFD [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2010, 13(6): 23–26.
- [61] Belaidi A, Thew M T, Munaweera S J. Hydrocyclone performance with complex oil–water emulsions in the feed [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2010, 81(6): 1159–1170.
- [62] 杨琳, 梁政, 田家林, 等. 粘度对液–液旋流器内部流场及分离效率影响的仿真分析 [J]. *流体机械*, 2010, 38(3): 28–32.
- Yang L, Liang Z, Tian J L, et al. Simulation study on viscosity impacting on the internal flow field and separation efficiency of liquid–liquid cyclone [J]. *Fluid Machinery*, 2010, 38(3): 28–32.
- [63] 赵远鹏. 阿尔油田含酸化返排液原油脱水技术研究 [J]. *内蒙古石油化工*, 2014, (11): 100–103.
- Zhao Y P. Study on crude oil dehydration technology of acid of flowback in A'r oil field [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2014, (11): 100–103.
- [64] Bednarski S, Listewnik J. Separation of liquid–liquid solids mixtures in a hydrocyclone-coalescer system [C]//Hydrocyclones. Berlin: Springer Netherlands, 1992: 329–358.
- [65] 中华人民共和国国家环境保护局国家技术监督局, 国家环境保护行政主管部门. 污水综合排放标准: GB8978-1996 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 8–10.
- National Technical Supervision Bureau of the State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China, Environmental Protection Administrative Department of Nation. Integrated standard for waste water discharge: GB8978-1996 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 8–10.
- [66] 夏永明, 孙良康. 石油储运过程环境污染控制 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1992: 146–173.
- Xia Y M, Sun L K. Environmental pollution control in petroleum storage and transportation process [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1992: 146–173.