

## 水力旋流分离器在油水分离领域的研究进展

谢鑫<sup>a</sup>, 陈凌<sup>b</sup>, 黄凌波<sup>a</sup>, 欧阳平<sup>b</sup>, 任博平<sup>b</sup>, 张贤明<sup>b</sup>

重庆工商大学 a. 机械工程学院; b. 废油资源化技术与装备工程研究中心, 重庆 400067

**摘要:**水力旋流器利用密度差实现两相分离, 具有结构简单、分离效率高等优点, 因此在原油预脱水处理等油水分离领域得到广泛应用。鉴于此, 通过分析和收集水力旋流器相关文献, 对油水分离领域水力旋流分离器的研究现状进行了阐述和总结, 包括水力旋流分离器的发展历程、基本结构、内部流场和工作原理等相关方面; 同时, 对油水分离领域不同类型的水力旋流分离器进行了对比分析, 发现在水力旋流器的结构参数优化以及内部液体流动规律等方面, 单一结构的参数优化或单一、静态的系统分析不能系统全面地反映实际复杂工况。因此, 将计算机仿真模拟和相关先进检测技术相结合, 用于旋流器的参数优化、内部液体流动规律分析以及构建预测模型等方面, 对于旋流器的结构设计优化、分离效率提升等方面意义重大; 另外, 目前的研究多着重于旋流器的结构和流体特性等方面, 对于旋流器内部的磨损、疲劳损伤等方面的研究较为缺乏; 最后, 对水力旋流分离器在油水分离方面研究的不足和发展方向进行了分析和展望。

**关键词:**油水分离; 水力旋流分离器; 旋流; 离心; 导叶

**中图分类号:** TQ028.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0004.007

### Research Review of Hydrocyclone for Oil-water Separation

XIE Xin<sup>a</sup>, CHEN Ling<sup>b</sup>, HUANG Lingbo<sup>a</sup>, OUYANG Ping<sup>b</sup>, REN Boping<sup>b</sup>, ZHANG Xianming<sup>b</sup>

a. School of Mechanical Engineering; b. Engineering Research Centre for Waster Oil Recovery Technology and Equipment, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

**Abstract:** The hydrocyclone uses density difference to realize two-phase separation, which has the advantages of simple structure and high separation efficiency, so it is widely used in oil-water separation fields such as the pre-dehydration of crude oil. In view of this, the research status of hydrocyclone in the field of oil-water separation was expounded and summarized by analyzing and collecting relevant literature on hydrocyclone, including the development history, basic structure, internal flow field and working principle of hydrocyclone. Meanwhile, different types of hydrocyclones in the field of oil-water separation were compared and analyzed. It is found that in the aspects of structural parameter optimization and internal liquid flow law of hydrocyclones, single structural parameter optimization or single and static system analysis cannot systematically and comprehensively reflect the actual complex working conditions. Therefore, the combination of computer simulation and related advanced detection technology is of great significance for the optimization of cyclone parameters, the analysis of internal liquid flow law and the construction of a prediction model, and is also of great significance for the optimization of cyclone structure design and the improvement of separation efficiency. In addition, the current research

**收稿日期:** 2022-03-05 **修回日期:** 2022-05-18 **文章编号:** 1672-058X(2023)04-0048-09

**基金项目:** 重庆市自然科学基金博士后科学基金项目(CSTC2021JCYJ-BSHX0194); 重庆市技术创新与应用示范项目(CSTC2018JSCX-MSYBX0339); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800816); 教育部平台科技资助项目(FYKF201907).

**作者简介:** 谢鑫(1994—), 男, 硕士研究生, 从事油水分离装置等环保设备关键技术研究.

**通讯作者:** 陈凌(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事废油资源化利用技术与设备研究. Email: chenling1618@ctbu.edu.cn.

**引用格式:** 谢鑫, 陈凌, 黄凌波, 等. 水力旋流分离器在油水分离领域的研究进展[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 48—56.

XIE Xin, CHEN Ling, HUANG Lingbo, et al. Research review of hydrocyclone for oil-water separation[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(4): 48—56.

mostly focuses on the structure and fluid characteristics of the cyclone, while the research on the internal wear and fatigue damage of the cyclone is lacking. Finally, the research deficiency and development direction of hydrocyclone in oil-water separation were analyzed and prospected.

**Keywords:** oil-water separation; hydrocyclone; rotating flow; centrifuge; guide vane

## 1 引言

随着世界各国的经济平稳增长,能源消费也逐渐增加,考虑到能源与环境的相互协调,大部分国家已经开始从一次能源向清洁能源进行转换。尽管各国政府都在加大力度对新型能源进行推广,但由于石油高热值、适用范围广的特点,在相当长的一段时间内仍将是全世界可利用能源的重要支柱。根据世界能源年鉴 2021 版显示<sup>[1]</sup>,2020 年全球石油消费量为 88 477 千桶/d,我国石油消费量以 14 225 千桶/d 位居第二。当前,我国多数油田已步入开采后期,采出液中水分和杂质含量高,油水乳化严重,增加了地面联合站的处置难度<sup>[2]</sup>。

水力旋流分离器主要用以密度不同的液-液两相分离或固-液分离,设备运行维护方便,整体结构布局紧凑简单,便于量产制造,进而降低制造成本。此外,设备具有较高的分离效率和较低的运行功耗,且长时间使用仍具有极高的稳定性<sup>[3]</sup>。20 世纪 90 年代以来,随着我国石油钻井行业的发展及钻井深度的提高,水力旋流器得到了密切关注并被大范围应用于原油的预脱水处理,尤其是高含水量的原油处理。此外,随着近 20 年我国钢铁冶金、化工等重工业的飞速发展,水力旋流器由于其占地小、分离效率高等特点,被广泛用于含油污水脱油等油水分离领域,并根据不同的工作环境和生产需求,在原有结构基础上衍生出各式各样的水力旋流器,基于其相应处理介质物理特性、分散相结构型式等的不同进行分类,大体上可以划分成三大类,分别是 L-L 型旋流器(分离不同液体(Liquid))、G-L 型旋流器(分离气体(Gas)和液体(Liquid)的混合相)、S-L 型旋流器(分离固体(Solid)和液体(Liquid)的混合相)以及最后的 G-S-L 型旋流分离器(分离固体(Solid)、液体(Liquid)以及气体(Gas)混合的复杂三相混合相)。鉴于此,本文对油水分离领域的水力旋流分离器的发展历程进行了回顾,且聚焦研究现状,对近期国内外水力旋流分离器在油水分离领域的研究及其应用等相关方面进行了归纳总结,同时对结构设计、运行条件等对分离性能的影响进行了对比分析,并展望了水力旋流器研究应注重的重点和关键。

## 2 水力旋流分离器的发展历程

在 19 世纪 90 年代初的一篇美国专利中,第一次出现了旋流离心分离器的概念<sup>[4]</sup>;自 20 世纪 50 年代开始,水力旋流分离器开始大规模发展,并被推广应用于石油化工、冶金环保、废水处理等领域<sup>[5-6]</sup>;1960 年以来,随着应用的推广,对旋流分离器结构的改进有了很大的发展,如 Davies 设计了导管柱式旋流分离器<sup>[7]</sup>,进一步促进了水力旋流分离器在各行各业的推广应用<sup>[8-9]</sup>,结构上持续不断地发展也推动了其相关理论的研究,为后续旋流器的不断改进提供了积极的指导意义。

进入 21 世纪以来,随着各学科的快速发展和各种测量仪器的发明以及计算机辅助计算机软件的出现,人们对水力旋流分离器的研究跨越其原有的阶段并达到了一个新的台阶,开始通过观测、仿真等辅助手段研究旋流器内部流场、颗粒等情况与分离效率间的关系。例如:Karimi 等<sup>[10]</sup>为研究水力旋流器的分离效率与分离过程中的流速、涡流结构型式等特性参数的关系,对油水分离的全过程进行了详细的仿真模拟,发现对于油水分离来说,水力旋流器的分离效率与旋流切向速度和轴向速度密切相关,同时在旋流分离器顶端会产生特定型式的涡流变形结构。相较于 Karimi 等粗略的分析其旋流器分离效率与其流速等之间的关系,Dharma 等<sup>[11]</sup>通过观测仪器对旋流器进行动态实时观测,系统地观测分析了油水分离的全过程,对进料管油水混合相的喷射速度、油相或水相比例(油包水型为油相比例、水包油型为水相比例)、旋流切向速度和轴向速度(用分流比的函数表示)等与分离效率之间存在的量化关系进行了分析比对。由于实际工况并不一定是两相液体进行分离,由此 Yang 等<sup>[12]</sup>对旋流分离器进料口结构处分散相颗粒的分布规律进行了详细的研究,在此基础上设计了多种结构型式的水力旋流器(如 CM 型、PRM 型、RRM 型等),并通过仿真模拟对分散相颗粒的分布规律、分离效率等进行了研究,得到了相应的分离机理模型。同样的,Safikhani 等<sup>[13]</sup>通过仿真模拟对旋流器中分散相颗粒的流动型式、运动轨迹与时间的关系等进行了研究,获得了旋流器中各部分结构的流速分配规律,可用于旋流器的结构优化。目前为止,

随着各种水力旋流器结构的提出,为达到更好的分离效率,针对旋流器结构、参数优化和旋流理论等方面的研究一直是水力旋流器研究的重点。

### 3 水力旋流分离器结构及工作原理

#### 3.1 水力旋流分离器的基本结构和分离理论

水力旋流分离器在结构上主要包含有进料管、溢流管、旋流管、锥管和底流管,如图 1 所示。基于水力旋流分离器产生旋流的不同方式,水力旋流器从结构形式上可大致分为以下两类:

(1) 切向离心型水力旋流分离器:利用切向进料形成旋流,产生旋流离心分离的效果,从而实现油水分离。

(2) 轴向导叶型水力旋流分离器:在旋流管和溢流管的管壁之间设有导叶,利用导叶形成旋流,通过形成的旋流产生更为强力的旋流离心力,并由此来进行油水分离,达到预期分离目的。

另外,只用于进行单一油水分离的水力旋流器并不能满足日益复杂的实际工况,考虑实际原液预处理等复杂工况存在的固体颗粒,国内外相关学者提出了油-水-固三相旋流分离器<sup>[10-11]</sup>,在已有油水分离的结构中加入了固体沉降分离的结构,从而达到实现油-水-固混合物的三相分离的目的。随着技术的不断发展,水力旋流器类型逐渐多样,但其技术原理依旧不变,均是以不同的离心力来实现对混合物的分离。

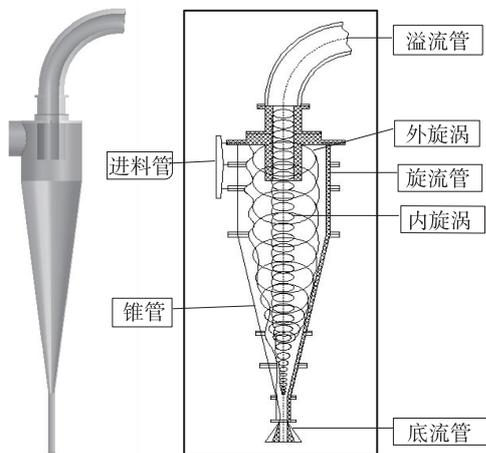


图 1 水力旋流分离器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydrocyclone separator structure

随着水力旋流分离器各种结构的创新与发展,旋流器的相关理论也得到了丰富,主要的旋流器分离理论有以下两类:一类是基于 Dressen<sup>[14]</sup>的湍流两相流分离模型和 Fahlstrom<sup>[15]</sup>的底流拥挤理论,研究分离物料粒度与旋流管结构之间的关系和对应的定量模型;另一类是基于 Rietema<sup>[16]</sup>的停留时间理论,在分离物料颗粒尺寸与旋流器结构的基础上,加入了物料在旋流器内停留时间的因素,研究物料粒度、旋流器结构型式和停留时间的关系及对应的定量模型。

#### 3.2 水力旋流分离器的工作原理

水力旋流器的工作原理如下:互不相溶的油水两相通过切向进料或通过旋流器内设的导叶形成高速旋流状态,在高速旋流运动状态下,因油水两相的密度不同形成外旋涡和内旋涡两种不同的流场形态。其中,外旋涡以密度较大的水相为主(存在少量油相,具体比例与旋流工况相关),沿旋流器管壁向下流动至底流管排出;内旋涡以密度较小的油相为主(存在少量水相,具体比例与旋流工况相关),沿旋流器中轴方向向上流动至溢流管排出。水力旋流器的关键在于旋流器内通过高速旋流所产生的离心力和其油水分离所需停留时间的匹配,针对不同的油水分离工况,通过设置相对应的锥管锥角、长度、溢流管管径等参数来实现油水分离所需离心力和停留时间的匹配。相较于气-液型(G-L)分离和固-液型(S-L)分离,液-液型(L-L)旋流分离更为复杂,其原因在于油水小液滴密度差异小,一方面要求在旋流器内形成高速旋转的涡流运动使其油滴有充足的分离动力,另一方面又要有效控制旋流强度以防止液滴受到过大的旋转剪切力造成油滴破碎。

### 4 油水分离领域水力旋流分离器研究现状

目前,对于在油水分离处理领域中有着重要地位的水力旋流分离器的研究,主要体现在以下几个方面:

(1) 水力旋流分离器构型参数及其操作参数的优化设计。水力旋流器的结构、进口流量、分散相的浓度均会对油水旋流分离效率有一定的影响;当选择合理的参数,不仅会达到预期的分离效果,而且也能极大地提高旋流器的分离效率。

(2) 水力旋流分离器与其他物理场的耦合强化。单一的离心分离难以应对日益复杂的生产工况以及日益增长的生产需求,在离心分离的基础上集成其他操作单元,以实现油水分离的耦合强化,如利用耦合脉冲电场结合旋流离心场,利用脉冲电场快速聚集小型固体颗粒物、聚结微小分散相液滴,利用旋流离心场高效去除大液滴和杂质颗粒物,协同实现油水分离处理得以高效化。

(3) 对水力旋流分离器的理论研究。探究旋流机理,阐明分离机制,运用 CFD 技术,通过数值模拟仿真,构建湍流涡流模型,对油水分离过程进行定量的分析研究,并对旋流器内流场进行预测。其中,对水力旋流分离器主体部分与进口部分结构型式的优化设计以及对旋流分离机理的研究是目前研究的重点方向。

#### 4.1 切向离心型水力旋流分离器

切向离心型水力旋流分离器的结构示意图如图 2 所示,其利用切向进料形成旋流,结构的关键在于进料管的切向进料进口,进料管的进口截面形状与旋流管段内的旋流强度、流场稳定性等密切相关。

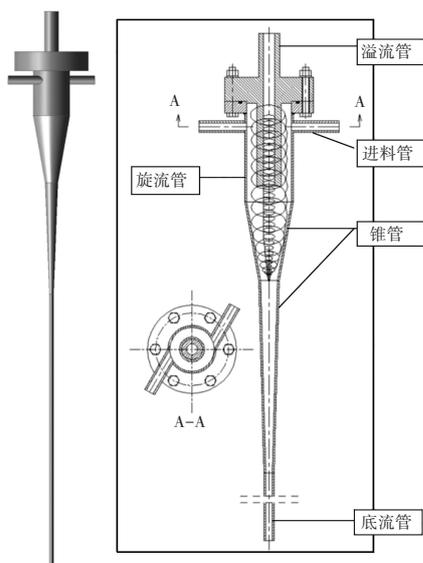


图 2 切向离心型水力旋流分离器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tangential centrifugal hydrocyclone

国内外研究人员对切向型水力旋流器的进口结构布局进行了大量的设计研究,主要包括:基于等速比螺旋的特点,李枫等<sup>[17]</sup>提出采用等速螺线(即阿基米德螺线)的切向进口形式,以降低进料对旋流器内部的冲击和磨损,同时还可转化部分静压能为旋转动能,提升其油水分离效率、减少分离能耗。通过研究分析阿基米德螺线切向进口油水旋流分离器的优点,许多研究在已有模型的基础上,对含螺旋形进口在内的多种非常规切向进口结构的水力旋流器进行了仿真模拟,例如:Noroozi 等<sup>[18]</sup>基于欧拉-欧拉多相流模型,对含螺旋形等结构的水力旋流器进行了仿真模拟,发现螺旋形的进料口结构能有效地提高旋流器的分离效率,同时随着进料管的进口流速增大,油水分离效率越高。近年来,针对螺旋形切向进口油水旋流器的特点,龚俊等<sup>[19]</sup>采用 Fluent 对采用阿基米德螺旋线进口形式的旋流器进行了仿真模拟,分析了旋流器内部流场各部分参数对于其分离效率的综合影响,为后续的结构设计提供了理论依据。此外,张悦刊等<sup>[20]</sup>提出了多进口旋流器结构的构想,以此解决单进口旋流器稳定性差、分级效率低等问题,并基于流体力学对旋流器多进口结构进行数值模拟,对比实验结果进行分析其不同进口数的旋流器分离效率,发现通过增多旋流器的进口数量,便可提升旋流分离器的分离效率。

除进口结构外,锥管锥角、长度、溢流管管径等结构参数同样对切向离心型水力旋流器的分离效果有着重要的影响,相关的研究包括:张丹等<sup>[21]</sup>结合仿真模拟分析和 PIV 粒子测速装置,从实验和理论上研究了旋流器锥管段锥角对旋流器内高速旋流的切向以及轴向速度的影响,研究结果发现有着存在分离效率最高的最佳锥角。Gao 等<sup>[22]</sup>通过大量实验探究了旋流器溢流

管的不同构造对其分离效率的影响,实验结果表明溢流管结构主要对内部流体旋流状态下处于切向方向上的流速以及压降有影响。在上述研究基础上,为了更为详细地了解旋流器各个部分对分离效率的影响,近年来,艾昕宇等<sup>[23]</sup>综合研究了溢流管管型结构、锥管结构型式(含大锥角、小锥角、各锥管长度等)等与分离效率之间的关系模型,研究结果表明溢流管出口直径、溢流管深入长度(旋流管上表面至底流管出口的垂直距离)、大锥角(双锥段结构中的大锥角)等参数变化是影响旋流器油水分离效率的主要因素,并采取递进优化的方法研究了切向离心型水力旋流器的最优结构参数。

上述研究主要包括水力旋流器进口螺旋线型式、多级进口结构型式、旋流器内部各结构型式(锥管、锥角、溢流管直径以及深入深度等)等对分离效率的影响,并提供了大量的结构参数优化模型。但在实际工况中,旋流器内壁的磨损、腐蚀等对结构内部压力、流场等均会产生相应的影响,从而会使得其水力旋流器的分离效率降低。目前为止,关于这方面的研究较为缺乏,还有待更进一步的深入研究。

#### 4.2 轴向导叶型水力旋流分离器

切向离心型水力旋流器利用切向进料形成旋流,对进料管的进口结构要求较高,同时为满足高速旋流的要求,切向进料管在径向空间上的尺寸较大,在进行多级并联、串联布局以提高油水分离处理量时对设备空间的要求较高。与切向离心型水力旋流器不同,轴向导叶型水力旋流分离器利用旋流管和溢流管之间的导叶形成高速旋流,其结构如图 3 所示,进料管采用轴向进料,大大降低了对进料管结构的要求,同时,设备径向尺寸较小,有利于旋流器的多级串、并联布局。

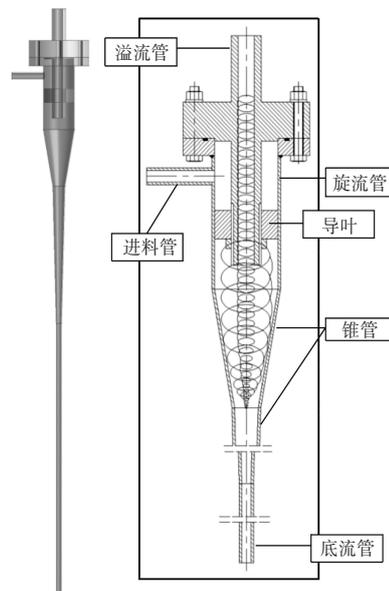


图 3 轴向导叶型水力旋流分离器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hydrocyclone with axial guide vane

2000 年以来,关于轴向导叶型水力旋流分离器的研究不断增多,主要包括:Chu 等<sup>[24]</sup>利用激光多普勒测速仪技术(LDV),观测研究设置十字形导叶的旋流器内部流场,研究结果表明相较于传统切向离心型旋流器,在旋流器内部设置导叶结构能有效地改善内部旋流的流场结构,降低管壁的压力损伤。在此基础上,Shi 等<sup>[25]</sup>利用 PIV 粒子测速装置对导叶型旋流器内部流场进行了观测,发现轴向速度呈现“钟形”分布,速度最大值出现在旋流器的中线位置,而切向速度的分布呈现对称分布。为探索轴向导叶型水力旋流分离器内部油、水分离行为及对旋流器的综合影响,李枫等<sup>[26]</sup>研究了油滴破碎行为,实验结果表明,油滴破碎区域集中在近壁面区域,在旋流器的轴心位置,多发生油滴的聚并行为。另外,王增辉等<sup>[27]</sup>结合模拟仿真与实验,研究了旋流器内部流速与压力之间存在的关联,得出了流速与压力在旋流器内分布位置的对应关系,为后续的结构设计和优化提供了关键的理论支撑。此外,李永业等<sup>[28]</sup>研究了导叶高度对旋流器分离效率的影响,通过模拟实验对最优导叶高度进行了详细的分析,并获得了导叶高度的最优值。

对于轴向导叶型水力旋流器来说,油水分离性能的差别主要在于导叶结构的差异,近年来,大量学者针对轴向导叶型水力旋流器的导叶结构进行了研究,国外的研究主要包括:Dirkzwager<sup>[29]</sup>以空气动力学的标准翼型为基准,设计了一种水力旋流器导叶,研究表明这种轴向导叶型旋流器相较传统的切向离心型旋流器在结构上更为紧凑,同时压损更低。在此基础上,Campen<sup>[30]</sup>、Slot 等<sup>[31]</sup>采用 NACA 四位数翼型的方法构建了新的旋流器导叶结构,并通过实验研究证明此导叶结构相对标准翼型结构来说,具有更高的分离性能。相对于国外研究者对导叶结构设计的注重,国内学者对于导叶的研究主要着重于在叶型曲线、导叶包角等结构参数的分析模拟方面,如:何利民等<sup>[32]</sup>探究了旋流器的叶面叶型结构,通过确定导叶关键点,并利用数学曲线插值,从而形成所需叶面的结构曲线,并可以根据实际情况进行曲线修改,以优化导叶结构。为提出具有较高分离效率的导叶结构,常晓巍等<sup>[33]</sup>在实验的基础上,结合仿真分析探究了具有不同导叶包角的旋流器所产生的旋流特性,这为后续的导叶包角的设计提供了重要的参考。在常晓巍的研究基础上,李锦涛等<sup>[34]</sup>采用数值模拟和物理模型实验的方式,研究了旋流器导叶包角与相应断面螺旋流特性之间的关系,结果表明导叶包角越大,螺旋流的周向速度和强度也越大。

从上述分析可知,目前针对轴向导叶型水力旋流器的研究主要集中在导叶结构及其相关因素对分离效率的影响等方面,但实际上对于轴向导叶型水力旋流器来说,其内部流场、分离效率等不仅与导叶结构相关,与溢流管、锥管、底流管等旋流器基本结构也密切相关,目前关于综合考虑旋流器基本结构及导叶结构的耦合对内部流场和分离效率的影响等方面的研究较少,同时对于导叶结构对旋流器整体结构强度的影响、导叶与旋流器壁之间的摩擦磨损情况及对疲劳性能的影响等方面的研究也较为缺乏,尚有待进一步的研究。

#### 4.3 耦合电场的水力旋流分离器

尽管切向离心型水力旋流分离器和轴向导叶型水力旋流分离器在油水分离上具有很好的效果,但对于高含水量的工业废油,之前的装置在处理效率等方面有着一定的限制<sup>[35]</sup>。鉴于此,国内有学者提出了电场和旋流场联合破乳脱水的构想,利用电场的耦合来提高油水两相的聚结分离效率,以加强旋流器的分离效果,其构造示意如图 4 所示。

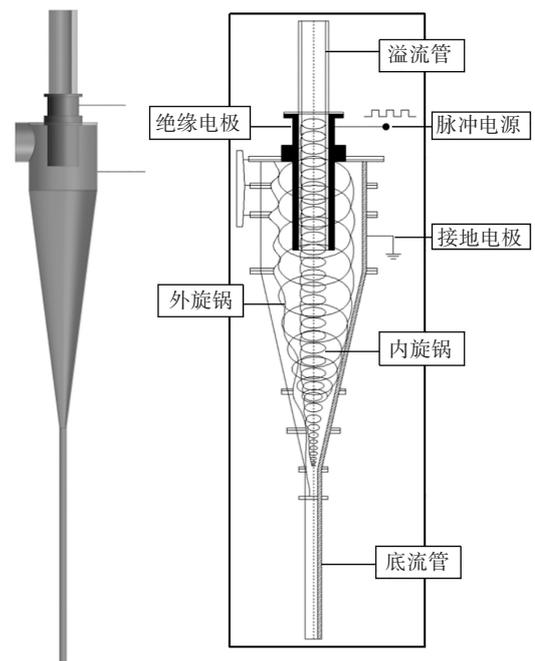


图 4 电场-旋流场耦合破乳脱水装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of demulsification and dehydration device with electric field-cyclone field coupling

针对耦合电场和旋流场的研究,龚海峰等<sup>[36-37]</sup>提出了一种高压脉冲电场与旋流离心场相结合的工艺用以对工业废油进行破乳脱水,通过理论分离和计算机模拟仿真得到了最合适的电场参数条件和最好的旋流场工作参数,并进行了破乳脱水实验,实验结果表明,耦合破乳脱水装置的脱水率(90.8%)相较于单一旋流离心场脱水率(41.7%)有较大的提升,说明耦合电场-

旋流场的破乳脱水装置脱水效果极其明显,能完成对废油乳化液的预期处理。但是,上述研究中底流管排液中(水相为主)的脱油比例较高,说明底流管排液中油相比比例程度偏高,对此需要对结构和工作参数进行优化改进。陈家庆等<sup>[38]</sup>针对底流口脱油比例较高的问题,提出了一种耦合静电场和旋流场的新型管式结构分离器,并对该分离器不同结构参数和工况条件下的分离过程进行了仿真分析研究,结果表明该分离器分离效果极高,可实现对油、水两相出口含油量和含水量的双重指标控制的目的。

此外,张贤明等<sup>[39]</sup>基于电场-旋流场耦合分离装置的 CFD 仿真模型,详细分析了电场-旋流场双场耦合装置进料口喷射速度、电场强度等工况条件与装置油水分离效果之间的关系,结果表明,对于一定工况下的油水混合物,存在最优的进口流速,使得电场-旋流场双场耦合装置的分离效果达到最优。在此基础上,邱值等<sup>[40]</sup>对电场-旋流场耦合分离装置的主体锥段结构进行了优化设计,并给出了直面双锥型、双球面相切型、双椭圆相切型以及复合曲锥型的锥段结构,通过 CFD 模拟仿真构建了预测模型并进行了实际破乳分离实验,实验结果表明,复合曲锥型相较于其他结构类型能有效实现油水乳化液的分离,分离效率高达 97%。

从以上的分析可知,耦合电场的水力旋流分离器与其之前单一的水力旋流器分离器相比有着更为优异的分离效率,其关键在于外加电场的结构、位置、电极型式(电极结构、是否绝缘电极、绝缘层介电常数、厚度等)及对应的电场参数与旋流器结构型式的有效协同和匹配。同时,其入口流速、内部流场以及基本结构的差异等相关的因素都对其分离效率有着一定的影响。

#### 4.4 油-水-固三相旋流分离器

对于原油预处理、钢铁企业含油污水处理等实际复杂工况,单纯的油-水式旋流分离器不能满足对于固体颗粒的脱除需求。鉴于此,国内外学者提出了油-水-固三相旋流分离器,在油-水旋流器的基础上加入固体颗粒的分离结构,以达到油-水-固的三相混合物的分离的目的,相关的研究如下:为去除油水混合物中的泥沙,Bendasiki 等<sup>[41]</sup>提出了一种油-水-固三相旋流器,可实现 50% 以上的泥沙去除率,但对油滴的去除效率一般。在 Bendasiki 提出的三相旋流器基础上,Seureau 等<sup>[42]</sup>对旋流器内部流场进行了详细的分析,提出了一种相对来说更有效率的油-水-固三相旋流器,将油滴的去除率提高到 90% 左右。为降低油-水-固三相旋流器的能耗,Kudra 等<sup>[43]</sup>设计了一种新的油-水-固三相旋流器,在底流管段通过固体分离隔板实现固

相分离,并系统地研究了进料量和分离效率之间的关系。近年来,同样针对油-水-固三相旋流器的结构特点,蒋明虎等<sup>[44]</sup>基于旋流分离理论,提出了一种新的三相旋流分离器结构,该三相旋流器可用于进行污水中固体颗粒相与不溶于水的悬浮物相的分离,且具有相应程度的分离效果,同时采用正交实验法和 CFD 软件进行模拟对比分析,并对三相旋流器的结构进行了优化。另外,刘鸿雁等<sup>[45]</sup>探究了三相分离器溢流管的结构型式及参数(含溢流管在旋流管中的布置型式、尺寸、壁厚等)对其分离效率的影响,并利用正交分析法得到了溢流管的最佳结构型式,即溢流管应尽量沿旋流管轴向满程布置于旋流管轴心中部,且管壁应采用薄壁结构,这样类似的构造有利于提升其分离效率。

上述研究表明,针对油-水-固三相旋流器还应当考虑固体对其旋流器结构、内部流场等方面的影响,从而得到最适用的三相旋流器,提高其油-水-固三相分离效率。另一方面,在实际工况中,旋流器服役作业过程大多数情况并非完全封闭,在油水混合物中存在的其他固体杂质对于旋流器的分离效率也有着一定的影响,如:固体颗粒在油水分离过程中对旋流器内壁的磨损导致旋流器器壁变薄,以及固体对于内部流场的改变导致的液体对内壁的冲击力的不稳定变化等,所以固体颗粒等这一系列影响因素也需要得到充分的考虑。

## 5 典型水力旋流分离器比较

目前水力旋流分离器呈现多样化发展,结构各异,各类水力旋流分离器的比较见表 1,由表 1 及上述分析比较可知:

(1) 切向离心型水力旋流分离器主要对进口类型进行优化设计。首先,从单进口到多进口,多进口旋流器可以减小分离粒度,同时,多进口旋流器能在较低入口速度工况下实现传统旋流器高入口速度才能完成的分级效果;其次,从直线等截面型入口到阿基米德曲线型入口,阿基米德螺线型矩形截面的双液道入口结构,对于提高旋流器内部涡流流场的稳定性、降低旋流动能损失、提高设备服役寿命及工作效率等方面有着明显的优势。

(2) 轴向导叶型水力旋流分离器主要对导向叶片结构进行优化设计。首先,从螺旋叶片到弧形叶片,经由弧形导叶产生的流场可以明显提高物相沿旋流器内部旋流切线方向上的速度,同时可较好地提升旋流场的稳定性,对其油水混合物的分离效率进行一定的改善;其次,从低导叶高度到高导叶高度,最优的导叶高度使得水力旋流器分离性能最佳。

(3) 耦合电场的水力旋流分离器,通过耦合静电场或脉冲电场以达到高效的油水分离效率。

(4) 油-水-固三相旋流分离器,能满足对油水混合液中泥沙和铁屑等微小颗粒的分离,提高油水分离质量。

表 1 水力旋流器总结与比较

Table 1 Summary and comparison of oil-water hydrocyclone

结构类型	分离器特点	分离器优点	分离效率	文 献
切向进口	阿基米德螺旋线进口	增加流场稳定性、增加零部件使用寿命	—	[17]
切向进口	多方向进口	增加流场稳定性、实现分级效果	96.34%	[20]
轴向进口	最优导叶高度	断面轴向速度最大、径向速度最小旋流器水力性能最优	—	[28]
轴向进口	弧形导叶	导叶对流体有比较好的控制能力和加速能力油水分离能力高、液滴破碎概率小	—	[32]
切向进口	耦合电场	电场促进小液滴聚集成大液滴	90.8%	[36]
切向进口	电场+复合曲锥面旋流场	复合曲锥面结构增强油水分离	97%	[40]
切向进口	油-水-固三相分离	分离油水混合液中微小颗粒能力显著	90%	[41]

## 6 结束语

本文对水力旋流分离器的发展历程、基本结构、分离机理、工作原理等方面进行了一定的阐述和总结,并聚焦当下水力旋流分离器在油水分离领域的研究现状,比较分析了各类旋流分离器的结构功能特点,可以发现水力旋流分离器已取得不少显著进展,但仍存在很多挑战:

(1) 对旋流器结构相关方面参数的优化不应止步。目前研究多集中于对单一结构的参数优化设计,应从以往的对单一参数、静态系统的分析转变为多参数耦合动态系统的分析,通过计算机辅助数值分析模拟实际复杂情况,将实验数据与模拟数据相结合以优化结构模型,提高旋流分离器的分离效率,满足高效的生产需求。

(2) 对旋流器内部液体流动规律有待更深层次的研究。随着计算机技术的不断发展,通过 CFD 模拟仿真旋流器内部液体的运动情况、以及内部流场对于旋流器不同部位器壁压力分配的影响情况等,并综合考虑结构、器壁受力变形、磨损等因素对旋流器内部流场的影响规律,构建预测模型,用于指导实际加工制造,提高旋流器的分离效率。

(3) 在实际的运行工况中,水力旋流器需要定期反洗,其实际工况承受的载荷为疲劳载荷。同时,油水混合物中固体微粒在高速旋流过程中对内壁的磨损、原油及含油污水中的氯离子对于整个旋流器的腐蚀等,均会致使旋流器的局部损伤,使其疲劳性能降低,进而影响旋流器的工作性能,达不到预期的服役周期,严重情况下还会导致生产事故。因此,研究实际工况下水力旋流器的疲劳性能、损伤机理及损伤演化规律,

通过现代技术以及计算机软件进行模拟分析等方式给出合理的寿命预测模型和安全评估方法,对于水力旋流器的结构设计、强度评估及安全稳定运行等方面意义重大,也是未来水力旋流器研究发展的一个重要方向。针对水力旋流器的疲劳研究,课题组基于旋流器材料的单轴、多轴疲劳试验,进行了相应的分析研究,以期对油水分离领域水力旋流器的强度设计和安全评估提供实验支撑和理论依据。

## 参考文献(References):

- [1] BP P L C. BP 世界能源统计年鉴[M]. 2021 版. 伦敦: 赫瑞瓦特大学能源经济研究与政策中心, 2021.  
BP P L C. BP Yearbook of world energy statistics [M]. 2021 edition. London: Center for Energy Economic Research and Policy, Heriot-Watt University, 2021.
- [2] 张瑞泉, 梁成浩, 刘刚. 三元复合乳化与破乳机理[J]. 油气田地面工程, 2006, 26(2): 21—21.  
ZHANG Rui-quan, LIANG Cheng-hao, LIU Gang. Mechanism of ternary emulsification and demulsification[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2006, 26(2): 21—21.
- [3] 李丁丁. 旋流分离器的流场分析与结构优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.  
LI Ding-ding. The flow field analysis and structure optimization of the cyclone separator[D]. Tai Yuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [4] BRETNEY E. WATER purifier: US453105A[P]. 1891-05-26.
- [5] 徐继润, 罗茜. 水力旋流器流场理论[M]. 北京: 北京科学出版社, 1998.  
XU Ji-run, LUO Qian. Flow field theory of hydrocyclone[M]. Bei Jing: Beijing Science Press, 1998.

- [6] 吕一波,康文泽. 分离技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2000.  
LV Yi-bo, KANG Wen-ze. Separation technology [M]. Xu Zhou: China University of Mining and Technology Press, 2000.
- [7] MOVAFAGHIAN S, JAUA-MARTURET J A, MOHAN R S, et al. The effects of geometry, fluid properties and pressure on the hydrodynamics of gas-liquid cylindrical cyclone separators[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(6): 999—1018.
- [8] ERDAL F M. Local measurements and computational fluid dynamics simulations in a gas-liquid cylindrical cyclone separator[M]. Tulsa: The University of Tulsa, 2001.
- [9] GOMEZ L E. Dispersed two-phase swirling flow characterization for predicting gas carry-under in gas-liquid cylindrical cyclone compact separators[M]. Tulsa: The University of Tulsa, 2001.
- [10] LIU H, XU J, ZHANG J, et al. Oil/water separation in a liquid-liquid cylindrical cyclone[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(1): 116—123.
- [11] DHARMA I A, ARFFAN F, PRAMBUDI A R. Development of liquid-liquid cylindrical cyclone separator for oil-water separation [C]//American Institute of Physics Conference Series. USA: AIP Publishing LLC, 2016: 553—563.
- [12] YANG Q, LV W, MA L, et al. CFD study on separation enhancement of mini-hydrocyclone by particulate arrangement [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 102: 15—25.
- [13] WANG B, XU D L, CHU K W, et al. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator [J]. Applied Mathematical Modelling, 2006, 30(11): 1326—1342.
- [14] DRISSEN M G. Review of industrial mining [J]. Special Issue, 1951, 4: 449—461.
- [15] FAHLSTROM P H. Studies of the hydrocyclone as a classifier [J]. Pro 6th Znt Miner Process Congr Cannes, 1963: 87—114.
- [16] RIETEMA K. Performance and design of hydrocyclone [J]. Chemical Engineer Science, 1961, 15(3): 298—302.
- [17] 李枫,刘彩玉,蒋明虎,等. 水力旋流器中阿基米德螺旋线入口的设计[J]. 化工机械, 2004(3): 139—141.  
LI Feng, LIU Cai-yu, JIANG Ming-hu, et al. Design of the Archimedean helix inlet in a hydrocyclone [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2004, 31(3): 139—141.
- [18] NOROOZI S, HASHEMABADI S H. CFD simulation of inlet design effect on deoiling hydrocyclone separation efficiency[J]. Chemical Engineering & Technology, 2009, 32 (12): 1885—1893.
- [19] 龚俊,叶俊红,姚明修. 基于FLUENT的水力旋流器入口结构参数优化设计流场仿真[J]. 山东化工, 2019, 48(6): 182—184.  
GONG Jun, YE Jun-hong, YAO Ming-xiu. Flow field simulation of optimal design of hydrocyclone inlet structure parameters based on fluent software [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(6): 182—184.
- [20] 张悦刊,葛江波,刘培坤,等. 多进口旋流器流场特征及分离性能[J]. 化工进展, 2022, 41(1): 86—94.  
ZHANG Yue-kan, GE Jiang-bo, LIU Pei-kun, et al. Flow field characteristics and separation performance of multi-inlet hydrocyclone [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(1): 86—94.
- [21] 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 Dan, CHEN Ye. Effect of the cone angle on flow field and separation performance of solid-liquid hydrocyclones [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(8): 11—16.
- [22] GAO X, CHEN J, FENG J, et al. Numerical investigation of the effects of the central channel on the flow field in an oil - gas cyclone separator [J]. Computers & Fluids, 2014, 92: 45—55.
- [23] 艾昕宇,胡耀强,邓志安,等. 结构参数对油-水两相双锥型旋流分离器影响的数值模拟[J]. 非常规油气, 2021, 8(4): 68—73, 119.  
AI Xin-yu, HU Yao-qiang, DENG Zhi-an, et al. Numerical simulation of the influence of structural parameters on oil-water two-phase double-cone hydrocyclone [J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(4): 68—73.
- [24] CHU L Y, YU W, WANG G J, et al. Enhancement of hydrocyclone separation performance by eliminating the air core [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2004, 43(12): 1441—1448.
- [25] SHI S, XU J, SUN H, et al. Experimental study of a vane-type pipe separator for oil-water separation [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012, 90 (10): 1652—1659.
- [26] 李枫,熊峰,刘彩玉,等. 油滴聚并破碎行为对水力旋流器分离性能的影响[J]. 石油机械, 2019, 47(6): 73—78.  
LI Feng, XIONG Feng, LIU Cai-yu, et al. Effect of oil droplet coalescence and breakup behavior on separation performance of hydrocyclone [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47 (6): 73—78.
- [27] 王增辉,马兴亮. 轴流导叶旋流分离器数值模拟[J]. 山东化工, 2018, 47(14): 138—143.  
WANG Zeng-hui, MA Xing-liang. Research on design and calculation of flare knockout drum [J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(14): 138—143.
- [28] 李永业,张涛,李飞,等. 不同导叶高度的旋流器运动时的水力特性研究[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(5): 706—711.  
LI Yong-ye, ZHANG Tao, LI Fei, et al. Study on hydraulic characteristics of hydrocyclones with different guide vane

- heights in motion[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(5): 706—711.
- [29] DIRKZWAGER M. A new axial cyclone design for fluid-fluid separation [M]. Delft: Delft University of Technology, 1996.
- [30] CAMPEN L V, MUDDE R F, SLOT J, et al. A numerical and experimental survey of a liquid-liquid axial cyclone[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2012, 10(1): 1205—1224.
- [31] SLOT J J. Development of a centrifugal in-line separator for oil-water flows[M]. Enschede: University of Twente, 2013.
- [32] 何利民, 田洋阳, 罗小明. 一种应用于双锥型液-液旋流器的导叶设计新方法[J]. 石油学报(石油加工), 2018, 34(3): 581—591.  
HE Li-ming, TIAN Yang-yang, LUO Xiao-ming. A new method for the guide vanes design in double-cone liquid-liquid cyclone[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2018, 34(3): 581—591.
- [33] 常晓巍. 不同导叶包角旋流器产生的螺旋流流速特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.  
CHANG Xiao-wei. Research on the velocity of spiral flow caused by hydrocyclone with different wrap angle of guide[D]. Tai Yuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [34] 李锦涛. 不同导叶包角旋流器对下游断面螺旋流流速特性的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.  
LI Jin-tao. Study on influence of different guide vane angled cyclone on flow velocity characteristics of spiral flow in downstream section[D]. Tai Yuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [35] FATHI A, ALIZADEH M. Effects of blade manufacturing deviations on turbine performance[C]// American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. USA: ASME, 2013: 203—211.
- [36] 龚海峰, 戴飞, 余保, 等. 高压脉冲电场-旋流离心场联合破乳脱水装置与试验[J]. 现代化工, 2018, 38(4): 178—181.  
GONG Hai-feng, DAI Fei, YU Bao, et al. Equipment and experiment for demulsification and dewatering by combining high voltage pulsed electric field with swirl centrifugal field[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(4): 178—181.
- [37] 龚海峰, 张贤明, 杨智君, 等. 废油双场耦合破乳装置与结构优化[J]. 流体机械, 2016, 44(11): 49—52, 24.  
GONG Hai-feng, ZHANG Xian-ming, YANG Zhi-jun, et al. Demulsification device of waste oil by coupled double fields and structural optimization [J]. Fluid Machinery, 2016, 44(11): 49—52, 24.
- [38] 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 Wei-cheng, CHENG Jia-qing, JI Yi-peng, et al. Structure design and internal flow field study of tubular electrostatic cyclone separator [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(11): 74—80.
- [39] 张贤明, 李文龙, 龚海峰, 等. 双场耦合破乳脱水装置中乳化石油液滴聚结与破碎的数值分析[J]. 石油学报(石油加工), 2020, 36(2): 357—366.  
ZHANG Xian-ming, LI Wen-long, GONG Hai-feng, et al. Simulation on the coalescence and breakup of droplet in double field coupling demulsification and dewatering device[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2020, 36(2): 357—366.
- [40] 邱值, 龚海峰, 陈凌, 等. 双场耦合分离装置锥段结构对油水分离的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2022, 38(2): 404—413.  
QIU Zhi, GONG Hai-feng, CHENG Ling, et al. Effects of cone structure on oil-water separation in double-field coupling separation device[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2022, 38(2): 404—413.
- [41] BEDNARSKI S, LISTEWNIK J. Hydrocyclones for simultaneous removal of oil and solid particles from ships' oily waters[J]. Filtration & separation, 1988, 25(2): 92—97.
- [42] SEUREAU J J, AURELLE Y. Three-phase separator for the removal of oil and solids from produced water[J]. Society of Petroleum Engineers, 1994(9): 25—28.
- [43] KUDRA T, HASHMI K. Concentration of liquid feed in hydrocyclone to reduce drying energy use[J]. Drying Technology, 2010, 28(10): 1227—1232.
- [44] 蒋明虎, 张蓓蓓, 邢雷, 等. 基于正交试验法的三相分离器结构优选与性能分析[J]. 化工机械, 2018, 45(5): 622—625.  
JIANG Ming-hu, ZHANG Bei-bei, XING Lei, et al. Structure parameter optimization and separation efficiency analysis of the three-phase hydrocyclone based on the orthogonal method[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2018, 45(5): 622—625.
- [45] 刘鸿雁, 王亚, 韩天龙, 等. 水力旋流器溢流管结构对微细颗粒分离的影响[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 1921—1931.  
LIU Hong-yan, WANG Ya, HAN Tian-long, et al. Influence of vortex finder configurations on separation of fine particles [J]. CIESC Journal, 2017, 68(5): 1921—1931.