

动态旋流分离技术研究进展及 新型分离机的理论研究

袁惠新*,董译文,张 衍,范凤山

(常州大学机械工程学院,江苏常州213164)

摘要:分析了现有用于液液分离的动态旋流器的技术进展、分离特性及其不足。针对高黏度、高浓度液液混合物分离难的问题,结合旋流器和离心机的优点,提出了一种新型的分离机——旋流器-离心机组组合式分离机。该新型分离机既有超重力特性,能强化沉降分离过程,又具有流体剪切作用,能打破液液互包混合体系,提高分离效率。

关键词:动态旋流器;液液分离;旋流器-离心机组组合式分离机

中图分类号:TK051.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)04-0159-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.04.039

Development of dynamic hydrocyclone separation technology and theoretical investigations on a new type separator

YUAN Hui-xin*, DONG Yi-wen, ZHANG Yan, FAN Feng-shan

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

Abstract: The progress of liquid-liquid separation technologies, especially of dynamic hydrocyclone, is introduced. Their separation features and drawbacks are discussed. In view of the problems that it's hard to separate the liquid-liquid mixture with high concentration or high viscosity, a new separator, a cyclone-centrifuge combined separator, is designed by combining the advantages of the cyclone and centrifuge. This new separator not only has the feature of the super-gravity which can strengthen the process of the settlement separation, but also has the fluid shearing action which can break the mixed system of the liquid, increasing the separation efficiency.

Key words: dynamic hydrocyclone; liquid-liquid separation; cyclone-centrifuge combined separator

工业生产中,广泛存在液液分离过程,如采出液油水分离、炼油过程中的煤油脱水、汽油脱水、石脑油脱水、环己烷和环己酮脱水、叔丁醇脱水等。特别是高浓度、高黏度的液液混合物,常常以液-液互相包裹的形式存在^[1],分离困难。另外,液液体系容易乳化,如果分离设备内剪切作用、湍流程度过大,会因乳化而恶化分离过程。

液液分离技术有多种,如沉降分离、聚结分离、电分离和超声波分离等。沉降分离为常用的分离技术。

1 传统的液液沉降分离技术

液液沉降分离包括重力沉降分离和超重力沉降分离。

重力沉降分离设备利用重力加速度或重力场,分离过程中沉降驱动力小,分离速度慢。因此,在一定的处理量下,重力沉降分离需要较长的时间或较大的设备体积。

超重力沉降分离包括离心机分离和旋流器分离。

用于液液分离的典型的离心机为管式离心机和碟式离心机。离心机内部流场主要为强制涡,具有低湍流特性^[2-4]。

旋流分离器为静态超重力分离设备^[5-7]。其工作原理是混合液通过切向进料口送入旋流腔内,在旋流腔内高速旋转产生旋流离心力场。由于离心力的作用,重液相沿壁面从底流口流出,轻液相则向中心聚集并由溢流口排出,这样就完成具有密度差的两相分离。旋流器其内部流场主要为准自由涡,具有剪切湍流特性,旋流场内存在剧烈的湍流及较高的速度梯度,产生较大的瞬时剪切力和局部压力波动以及黏性剪切力^[8-10]。

当混合液黏度较大时,采用静态旋流分离过程中压力损失大,旋流衰减快,离心驱动力不足而影响分离效果。而重力沉降分离技术和传统的离心分离技术因无法打破油水互包体系,也难以满

足分离要求。

2 动态旋流器

动态旋流器因在分离高黏度流体介质上具有独特的优势,近年来随着工程实践的需要有着广泛的应用。动态旋流器在结构改善、数值模拟计算等方面的研究,有着较大的进展。

2.1 动态旋流器型式

常见动态旋流器有 TOTAL 型、复合型和预旋流型 3 种型式^[11]。

Total 型动态旋流器有一高速旋转转筒,入口流道内设有旋转栅及导向锥。混合液流经旋转栅预旋加速,然后进入转筒内部。通过转筒内壁的摩擦力使得混合液加速旋转,增强了混合液内部离心力。最终,轻相聚集在转筒中心,经溢流口排出;重相则向转筒壁面迁移,由底流口流出^[12]。

复合型动态旋流器结合了静态旋流与动态旋流的特性,主要由 2 部分构成,动力驱动部分和常规静态旋流器部分。混合液经旋转栅加速产生高速旋转涡流,流入静态旋流腔,最终实现分离^[13]。

预旋流型动态旋流器主要由预旋流室和旋流器转筒组成。混合液在预旋流室中得到预分离后,切向流入旋转的转筒部分。在转筒的高速旋转下,离心力得到加强,进一步提高混合液的分离效率^[14]。

同时,随着液液分离技术的发展,国内外学者提出了各类改进型动态旋流器。

李高森^[15]在传统静态旋流器与动态旋流器的基础上设计了一种静螺旋栅式除油型动态旋流器。结合传统旋流器结构,在高速旋转的旋流筒入口处增加了一新型静止的螺旋栅,使得混合液能迅速形成旋转液涡。通过数值模拟和理论推导的方法研究了不同形式的旋转栅对流场的影响,最终提供了合适的结构设计,改善装置的分离性能。

程向新等^[16]针对常规分离装置无法达到船舶含油污水处理要求的问题,研究出了一种船舶含油污水动态旋流器。介绍了该分离器的结构设计,包括旋转筒的长径比、旋转栅结构、溢流口、底流锥等。通过实验,验证了该分离装置的可行性。但装置内部的流场运动有待进一步研究。

张攀峰等^[17]在传统含油废水处理方法的基础上,对分离器旋转栅、溢流口和转筒 3 个主要部件进行了优化,设计了含油废水动态旋流分离系统。通过模拟实验,分析了转速、流量与分离效率的关系。

随着转速的增大,动态旋流器的分离能力得到提高。当转速达到一定值后,旋流器内入口压力、压力降过大,分离效率出现明显下降。与静态旋流器相比,动态旋流器操作范围宽,适应性强,在一定处理量范围内都能保持较高的分离效率。

任师^[18]结合离心机与泵的结构性能特点,设计了自增压型动态水力旋流器。采用旋转叶轮提供驱动,进料口装有导流叶片,溢流出口处设置叶轮装置,改善了循环式中心进料动态旋流器溢流口压力损失大的不足。通过数值计算,研究了该装置局部结构参数、操作参数对流场以及分离性能的影响。结果表明,装置内部流场分布合理,具有良好的分离性能和增压性能。

洪远等^[19]通过对典型的动态旋流器的数值模拟与试验,优化了旋流器的结构参数,包括转筒长度、旋转栅叶片数、叶片长度、溢流口直径等,为油田生产中动态旋流器的设计及选型提供了参考。

2.2 动态旋流器的数值模拟研究

Jiao 等^[20]采用 RSM 模型模拟动态旋流器内部流场及分离效率,并与试验结果进行了对比。结果证明了进液速度以及旋转栅转速很大程度上决定了分离器内部切向速度的分布。随着转速的提高,旋流器分离效率增大。不同转速条件下,入口速度对分离效率的影响也有所不同。

郭广东等^[21]选取 Total 型动态旋流器为研究对象,同样采用 RSM 湍流模型对旋流器内部速度场进行了数值模拟。分析了流场内 3 个速度分量的分布情况,分别为切向、轴向、径向,证明了运用 FLUENT 软件模拟内部复杂流场的可靠性。随后在此基础上,采用离散相模型和多相流模型模拟了内部油滴运动轨迹以及油水两相分离过程^[22]。油相的运动轨迹主要由油滴粒径的大小决定。

张攀峰等^[23-24]研究了不同转速下动态旋流器的内部流场的分布。结果表明,随着转速的增大,旋流器内部切向速度、静压增大,湍动能除旋转栅附近明显增大外,后段部分减弱。动态旋流器内部呈强旋转湍流流动,且具有各项异性特性。旋转栅的结构与转速对于内部湍流强度以及湍流耗散有显著影响。

王尊策等^[25-26]也对不同操作参数下复合式动态旋流器内部流场进行了数值模拟。分析了流量及转速对速度场、两相分布的影响。研究表明,旋流器内切向速度由准自由涡和准强制涡组成,呈现双涡结构,与张攀峰等^[27]所研究结果相吻合。同时随着

流量及转速的增大,轴心处油相浓度增大且各相速度增加。

2.3 现有动态旋流器的不足

现有动态旋流器多采用轴向进料结构,转鼓长径比较大。轴向进液方式虽然简化了入口结构,却一定程度上限制了设备的分离性能。轴向进液时,流场内部主要运动为重相由中心向壁面迁移,为保证混合液在停留时间内得到分离,不得不选取较大长径比。转筒直径偏小,则使得动态旋流器内离心驱动能力降低;同一直径下,较长的转筒长度则使系统不平衡振动加剧,影响流场的稳定性,出口处易造成已分离两相返混现象。

3 新型分离机

鉴于上述动态旋流器的优缺点,本文中研究设计了一新型分离机,旋流器-离心机组合式液液分离机。分离机采用切向进液方式,选择合适的长径比,结合了旋流器高湍动能、高剪切力和离心机分离因数高等特点,避免了静态旋流器内油滴破碎和乳化现象;同时可打破混合液中液液互相包裹体系,从而能有效分离有高浓度、高黏度等特性的油水混合液。

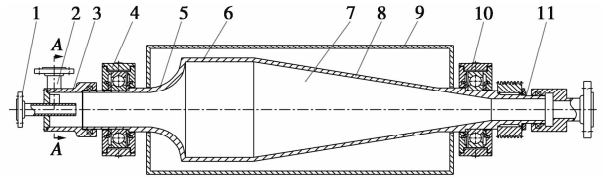
3.1 旋流器-离心机组合式液液分离机的基本结构及工作原理

如图1所示,分离机由2部分组成:固定不转的预旋部分和转动的转鼓部分。其中预旋部分主要由进料管、溢流管和旋流腔构成;转鼓部分主要由转鼓颈部、转鼓喇叭口、转鼓大圆筒、转鼓锥筒和转鼓小圆筒组成。分离机2部分采用同轴连接,结构简单。与其他型式旋流器相比,内部流体无需二次入流,减少了流体的突扩和突缩,从而降低内部湍流能耗和避免了混合液的剪切乳化。

根据角动量守恒原理及高黏度流体内摩擦的影响,物料旋转速度将逐渐减小,将影响分离过程。为了克服这一点,旋流器后面直接是离心机转鼓部分。转鼓部分从颈部向喇叭口内径逐渐增大,经过转鼓大圆筒后再进入锥段部分。

混合液经过进料口以一定的速度切向进入分离机的预旋部分,即旋流器部分,在旋流腔内产生旋流。在旋流段,物料经受流体剪切作用和离心沉降作用,液液互包体系被打碎,同时完成部分沉降过程,达到一定程度的预分作用。互释以后的液液混合物随后进入离心机段,此处湍流强度较小,离心力更为强大,极其有利于液液分离,特别是高黏度、高

浓度液液混合物的分离。值得指出的是,该分离机是利用旋流器锥顶排出重相、中间溢流口排出轻相的技术,使沉到转鼓壁面的重液相沿着锥面顺畅地从旋流器锥顶排出,而聚集到分离机中间的轻液相反向流动,从右端的溢流口排出。



1—溢流管;2—进料管;3—旋流腔;4—左轴承;
5—转鼓喇叭口;6—转鼓大圆筒;7—转鼓;8—转鼓锥筒;
9—分离机罩壳;10—右轴承;11—转鼓小圆筒

图1 旋流器-离心机组合式液液分离机结构图

3.2 旋流器-离心机组合式液液分离机的理论分析

旋流器-离心机组合式液液分离机的分离原理同水力旋流器相同,也是利用2种介质间的密度差进行离心分离,但其流场特性及液滴受力情况不同。

不管在旋流器段还是在离心机段,液滴都受到因介质旋转而产生的离心力。

旋流器段:

$$F_c = \rho_p (\pi d^3 / 6) (v^2 / r)$$

离心机段:

$$F_c = \rho_p (\pi d^3 / 6) r \omega^2$$

式中, r 为液滴径向位置; ρ_p 为液滴密度; d 为液滴粒径。

通过比较可知,一般来讲,离心机段颗粒的旋转半径大于旋流器段。因此,颗粒在离心机段所受的离心力大于旋流器段。

另外,在旋流场内,在沿径向的压力分布表现为靠近壁面处较高,而轴中心附近区域的静压较低,因此,颗粒还受到径向压力梯度引起的离心浮力的作用:

$$F_B = \rho_m (\pi d^3 / 6) r \omega^2 (\rho_p - \rho_m)$$

式中, ρ_m 为介质的密度。

在离心机段,轻、重两相受到更大的有利于沉降分层的径向作用力,使得在离心机段更小的颗粒可以完成沉降。

在旋转场中,颗粒还受到剪切应力的作用:

$$\tau_{r\theta} = \mu_0 r (\partial \omega / \partial r)$$

式中, μ_0 为流体黏度; $\partial \omega / \partial r$ 为流体旋转的角速度梯度。

由于在预旋部分流体的流动主要为准自由涡,外涡流区存在切向剪切应力 $\tau_{r\theta}$,具有剪切特性,使

液液互相包裹体系被打破。离心机内物料的旋转是由转鼓带动的,基本上为强制涡。但离开转鼓壁面越远,旋转越慢。因此,离心机内也存在角速度梯度,但与旋流器内的相比,其值小得多。离心机内的剪切应力比旋流器内的小得多。因此,在离心机内,液液互包体系很难被打破。而在旋流器内,液液互包体系容易被打破。当然,旋流器内的剪切强度和湍流强度不宜过大,否则,液滴会被过分破碎、乳化而恶化分离过程。新型分离机除了在预旋部分和转鼓壁面处由于摩擦可能引起的湍流之外,沿转筒轴向方向上的切向速度和轴向速度基本恒定,流场稳定性好。相比于静态水力旋流器,湍流强度得到了抑制。

4 结语

对于高黏度、高浓度液液混合物,分离的必要条件是打破液液互包体系。重力沉降分离技术和传统的离心分离技术难以满足分离要求的主要原因就是无法打破油水互包体系。现有的动态旋流器也是这个问题。

新型分离机——旋流器-离心机组式液液分离机,在结构上得到了简化,改变了传统的轴向进料方式,采用切向进液,提高了分离机的分离能力。特别是吸收了旋流器和离心机的优点,既具有流体剪切效应,打破液液互包体系,又具有强大的离心沉降作用,在处理高浓度、高黏度及大处理量液液混合物方面有明显的优势。因此,旋流器-离心机组式液液分离机值得加以深入研究。

参考文献

- [1] 刘美,赵德智,龙文字,等. 重质油分离方法研究进展[J]. 现代化工,2013,33(7):22-25.
- [2] Román Fernández X, Nirschl H. Simulation of particles and sediment behaviour in centrifugal field by coupling CFD and DEM[J]. Chemical Engineering Science,2013,94:7-19.
- [3] Yamamoto T, Shinya T, Fukui K, et al. Classification of particles by centrifugal separator and analysis of the fluid behavior[J]. Advanced Powder Technology,2011,22(2):294-299.
- [4] Gao H, Guo L, Zhang X. Liquid-solid separation phenomena of two-phase turbulent flow in curved pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2002,45(25):4995-5005.
- [5] Wang H, Zhang Y, Wang J, et al. Cyclonic separation technology: Researches and developments[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2012,20(2):212-219.
- [6] Schütz S, Gorbach G, Piesche M. Modeling fluid behavior and drop-let interactions during liquid-liquid separation in hydrocyclones[J]. Chemical Engineering Science,2009,64(18):3935-3952.
- [7] 于洲,马春元. 动态旋流分离装置分离效率的理论及实验研究[J]. 现代化工,2014,34(6):122-125.
- [8] 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.
- [9] 于玲玲. 井下油水分离水力旋流器的数值分析及结构优化[D]. 大庆:大庆石油学院,2009.
- [10] 徐上峰. 液液离心分离设备性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [11] 陈家庆,桑义敏. 复合型动态水力旋流器的结构设计研究[J]. 北京石油化工学院学报,2005,13(1):27-33.
- [12] 张攀峰,邓松圣,张洁,等. 动态旋流分离技术研究进展[J]. 四川化工,2007,10(2):27-29.
- [13] 王尊策,陈维勤,蒋明虎,等. 动态水力旋流器结构参数的优选设计[J]. 石油学报,2001,22(4):104-107.
- [14] 赵宗昌,刘兆东,沙庆云,等. 转动式油水分离水力旋流器研究[J]. 化工学报,1997,48(1):119-122.
- [15] 李高森. 一种静螺旋栅式动态旋流器设计及其操作参数对分离性能的影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [16] 程向新,任威,宋修福,等. 船舶含油污水动态旋流分离器的结构设计研究[J]. 船舶工程,2013,35(5):36-39.
- [17] 张攀峰,邓松圣,张福伦. 含油废水动态旋流分离技术研究[J]. 化工机械,2012,39(1):5-7.
- [18] 任帅. 自增压型动态水力旋流器的性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
- [19] 洪远,廖柯熹,王雯娟. 动态液-液水力旋流器的结构优化[J]. 油气储运,2010,29(7):509-511.
- [20] Jiao J, Zheng Y, Wang J, et al. Experimental and numerical investigations of a dynamic cyclone with a rotary impeller[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification,2008,47(9/10):1861-1866.
- [21] 郭广东,邓松圣,华卫星. 基于 Fluent 的动态旋流器流场计算机模拟仿真[J]. 计算机系统应用,2013,22(9):199-202.
- [22] 郭广东,邓松圣,华卫星,等. 动态液-液旋流分离器油滴运动轨迹模拟[J]. 后勤工程学院学报,2013,29(3):24-29.
- [23] 张攀峰,邓松圣,王斌,等. 转速对动态旋流器流场影响的数值分析[J]. 后勤工程学院学报,2012,28(2):26-30.
- [24] 张攀峰,邓松圣,张福伦. 液-液动态旋流器内两相湍流的数值分析[J]. 中国储运,2011,(12):122-124.
- [25] 王尊策,张井龙,徐艳,等. 不同操作参数下动态水力旋流器内部油水两相流动的数值模拟[J]. 化工机械,2012,39(2):194-197.
- [26] 王尊策,时培明,吕凤霞. 复合式水力旋流器内部流场的数值模拟[J]. 石油学报,2005,26(1):125-128.
- [27] 张攀峰,邓松圣,张福伦,等. 动态旋流器内油水两相分离数值模拟[J]. 机床与液压,2012,40(9):116-118. ■