

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2022.01.007

柱型旋流器内油-水两相流的流场特征和分离性能

朱沫¹, 欧宇钧¹, 吴辰¹, 吴奇霖², 张健^{3*}, 许晶禹³

(1. 中海油能源发展装备技术有限公司深圳分公司, 深圳 518000, E-mail: zhangjian@imech.ac.cn;
2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 柱型旋流器采用切向入口的方式产生稳定的旋流场, 实现两相的分离, 具有占地面积小和分离效率高等优点。该文采用数值模拟的方法对旋流器内油-水两相流动时的流场特征进行系统的分析, 并采用原油对旋流器的分离性能进行实验验证, 研究结果可直接应用于石油工业中的原油-水两相分离。数值模拟中将研究得到的混合液表观黏度计算模型嵌入到 CFD 软件中, 有效提高了计算的精度。研究得出, 柱型旋流器的切向入口、柱型主体和溢流口等综合设计在其内部能够形成稳定且有效的强旋流场, 深入揭示了油-水两相的分离机理和过程。分流比对柱型旋流器中心涡长度的影响较为明显, 随着溢流口分流比的增加, 中心涡的长度近似呈指数增加的规律, 指数系数约为 0.39, 分流比对零轴向速度面的影响微小。得出柱型旋流器处理后的水中含油率可由 8.26% 降至约 0.18%, 对应的分离效率为 64%。柱型旋流器主体的管径对处理效果具有较大的影响, 实际应用中, 需针对不同的来液条件进行柱型旋流器的选型和设计, 且旋流器对于原油-水两相的分离效果存在最佳分流比。

关键词: 油-水分离; 柱型旋流器; 数值模拟; 流场特征; 分离效率

中图分类号: TE931

文献标志码: A

Investigation on flow field and separation characteristics of oil-water two-phase flow in cylindrical cyclone

Mo Zhu¹, Yu-jun Ou¹, Chen Wu¹, Qi-lin Wu², Jian Zhang^{3*}, Jing-yu Xu³

(1. Shenzhen Branch of CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd, Shenzhen 518000, China;
2. Shenzhen Branch of CNOOC, Ltd, Shenzhen 518000, China;
3. Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Cylindrical cyclone is new type of oil-water separation equipment which can produce a stable swirling flow field by through the tangential inlet design. It is advantaged on the space usage and separation efficiency. In the paper, the oil-water two-phase flow field and separation characteristics in cylindrical cyclone is studied by the numerical simulation and experiments. The results show that the structure design of the cylindrical cyclone can produce a stable and efficient velocity distribution which

收稿日期: 2021-05-12(2021-08-24 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金(11972039)

作者简介: 朱沫(1988-), 男, 深圳人, 工程师。

Received: May 12, 2021 (Revised August 24, 2021)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11972039)

Biography: Mo Zhu (1988-), Male, Engineer.

is useful to the oil-water two-phase separation. The flow split ratio has a great influence on the length of the core vortex. As the increasing of the up-outlet flow split ratio, the length of the core vortex in the cylindrical cyclone is increased according to an exponent rule and the index coefficient is about 0.39. Furthermore, the effect of the structure and inlet flow parameters on the separation phenomenon is researched systematically. The oil volume fraction in the down-outlet can be decreased from 8.26% to 0.18% by through the cylindrical cyclone. Moreover, the diameter of the cylinder has a great influence on the separation results, so the dimension of the cylindrical cyclone should be designed for different inlet conditions in order to obtain the optimal separation consequence. There is a best flow split ratio of the cylindrical cyclone for a fixed inlet conditions.

Key words: Oil-water separation; Cylindrical cyclone; Numerical simulation; Flow field; Separation efficient

引言

随着油田产液量的大幅增长,以及采出液中的含水率持续增加,部分油田的含水率已达到95%以上,给采出液的多相或两相混合液的分离等技术带来极高的挑战^[1]。同时,海上油田资源开采量逐渐增加,故分离系统的处理量也在不断地增加,这就意味着需要更多的分离设备对采出液进行处理,但由于开采平台的空间和承载重量的限制,急需一种具有分离效率高且占地面积小等优点集于一体的新型油-水分离技术。

目前,国内外学者围绕着油-水分离技术开展了大量的理论和应用研究工作,多相或两相的分离方法主要有重力分离、离心分离、电脱分离、浮选分离及过滤分离等^[2-3]。目前,石油工业中使用较多的分离装置均以重力分离原理为基础的倾斜板和波纹板等分离技术,但由于重力分离技术存在分离速度较慢且占用空间大等局限性,若实现处理量的增加,必定需要增加分离设备的体积^[4]。同样,对于电脱、浮选及过滤等方法,普遍存在分离效率低的缺点,大大限制了其在高含水和高流量下处理来液中应用。对于离心分离方法,具有处理速度快且占地面积小的优点^[5-6],在上世纪八十年代国际上便提出了采用水力旋流器进行油水分离的方法,并且对水力旋流器的结构设计进行了改进^[7],但由于水力旋流器的入口设计和锥度结构对处理量有较严格的限制,将水力旋流器用于油水分离具有较大的难度和局限性。因此,针对油-水分离中存在的问题,国内外学者提出并设计了集占地面积小、处理速度快及适用范围广等优势于一体的高效柱型旋流分离器^[8],其类似于锥形旋流分离器的切向入口设计,形成稳定的旋流场,利用油水两相的密度差,使重质相水向壁面运动,轻质相油向轴心运动,达到两相的初步分离,然后通过柱型旋流器溢流口和底流口的结构设计,在柱体内形成一定的压力场,使核心处聚并的密度较小的油相经溢流口流出,周边分布的密度较大的水相经底流口流出,完成油-水两相的完全分离^[9-11]。

针对柱型旋流器的流场特征和分离性能,刘海飞等^[12]开展了大量的研究,分别对分离器内的单相流流场进行了数值模拟和室内实验,得到了相应的旋流场和压力分布特征,结果表明设计的柱型旋流器的结构可以形成一个有效的使油-水实现分离的流场和压力场。另一方面,采用室内实验的方法对柱型旋流器的分离性能进行了测试,研究结果表明油水两相来液在不同的工况下均可以实现较好的分离^[13]。本文基于上述的研究成果,为了进一步了解柱型旋流分离器在石油工业中应用的可行性和分离效果,以及其适用的范围,对分离器内油-水两相流动时的流场特征进行数值模拟,并采用原油进行实验,研究关键结构参数和流动参数等对分离性能的影响规律。相比较于常用的白油和液压油等实验模拟用油,原油的成分更为复杂,含油蜡质和沥青质等,在黏度和表面张力等物性参数方面具有较大的区别。采用原油进行实验模拟测试,得到的结果更贴近于工业生产条件,可充分验证柱型旋流分离器应用于原油开采生产现场的可行性和分离效果。

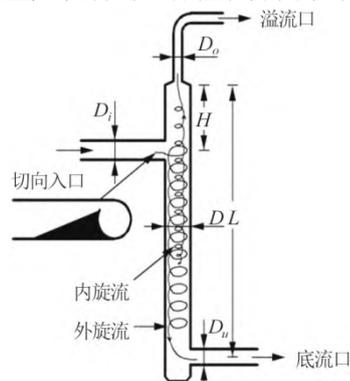


图1 柱型旋流分离器结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the cylindrical cyclone

1 实验装置和方案

实验中,为系统给出结构参数对柱型旋流分离器分离性能的影响规律,设计加工了三种不同规格的柱型旋流分离器样机,主体管道的内径分别为75 mm、60 mm和50 mm,具体部件的结构和尺寸如图2和表1所示。

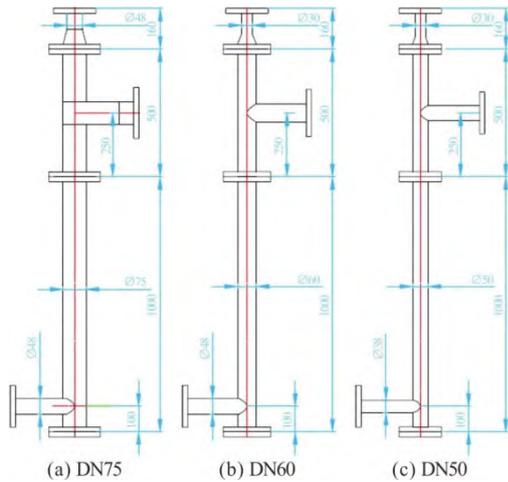


图 2 (网上彩图) 柱型旋流分离器样机的结构尺寸
Fig.2 (Color online) Dimensions of the cylindrical cyclone

表 1 柱型旋流分离器各部件尺寸 (单位: mm)

Table 1 Dimensions of the cylindrical cyclone (mm)

名称	柱体内径	入口内径	溢流口内径	总高度
DN75	75	75	48	
DN60	60	60	30	1 660
DN50	50	50	30	

本文实验在胜利油田室内循环管道上进行, 主体管道内径为60 mm, 具体的流程如图3所示。油相和水相首先进入混合罐进行掺混, 然后采用循环泵运输至设计加工的柱型旋流器进行实验, 溢流口和底流口的液体分别连接至分离缓冲罐。最终, 采用回输泵及相应的管道将混合液回输至各自的储存罐, 完成循环测试。实验中, 采用的油相为胜利油田近海平台开采的原油, 密度934 kg/m³, 黏度212 mPas, 采用的水相为油井采出液分离出来的地下水, 密度为998 kg/m³。实验中, 首先配制一定含油率的油-水混合液, 然后将循环泵调至预设的流量进行实验, 具体测试中, 分别调节柱型旋流分离器溢流口和底流口管道上安装的阀门, 待管道流动稳定后, 分别测量各个分支管路的流量和含油率, 分析其分离性能。

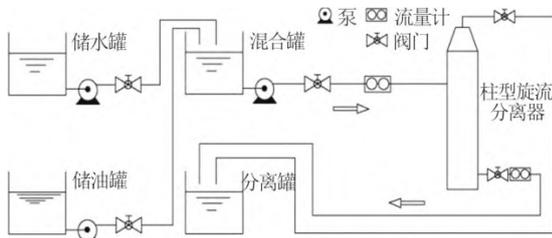


图 3 实验循环模拟流程示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental cycle simulation system

2 柱型旋流器内的流场特征

柱型旋流分离器采用切向入口设计, 以此得到稳定的旋流场, 其内部的流场特征对油水分离的效率具

有决定性的影响。本节研究中, 采用数值模拟的方法, 对柱型旋流分离器内部油水两相流的流场进行分析, 并给出相应的分离过程, 为精确设计分离器的结构和尺寸提供理论基础。

2.1 数值模型和方法

数值模拟中, 多相流模型可分为Euler-Lagrange和Euler-Euler两类。Euler-Lagrange模型常用来模拟其中的一相为分散相和另一相为连续相的流动, 适用的分散相含率一般小于0.1。Euler-Euler模型常用于模拟两相均为连续相的流动, 包括: Euler模型、混合模型和VOF模型等。本文研究中, 柱型旋流器内的油-水混合液相含率范围较宽, 且油-水之间的界面复杂多变, 分散相存在聚并和破碎的现象, 故采用Euler-Euler模型中的混合模型进行计算。

混合模型处理中, 油-水混合液首先被视为单一相, 求解混合液的控制方程, 忽略相之间的界面作用, 通过引入滑移速度对两相的流动进行描述。混合液的密度 ρ_m 采用加权平均的方式计算, 表观黏度 μ_m 采用前期研究得到的半经验公式计算^[14]

$$\rho_m = \alpha_o \rho_o + (1 - \alpha_o) \rho_w \quad (1)$$

$$\frac{\mu_m}{\mu_w} = \exp\left(\frac{2.5\alpha_o}{1 - k\alpha_o}\right) \cdot \left(\frac{\mu_o}{\mu_w}\right)^h \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (2)$$

式中: α_o 为油相的体积含率; ρ_o 和 ρ_w 分别为油相和水相的密度; μ_o 和 μ_w 分别为油相和水相的黏度; n 为混合液表现为非牛顿流体的流动指数, 混合液为牛顿流体时取值为1; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, 单位为s⁻¹; k 和 h 为常数, 是油水混合液分散程度的表征, 可通过实验测试拟合得到, 本文中 k 和 h 分别取值为0.8和0.26。通过文献[15]中的数据对比可以看出, 在油-水混合液表观黏度的计算上, 相比较于线性加权平均, 文中采用的计算公式具有更高的精度, 且接近油-水混合液的实际表观黏度。因此, 可明显提高数值模拟的精度。

多相混合模型的基本控制方程如下^[16]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}_m) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{u}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m) = -\nabla P +$$

$$\nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{u}_m + \nabla \mathbf{u}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} +$$

$$\nabla \cdot \left[\sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_{dr,k} \mathbf{u}_{dr,k} \right] \quad (4)$$

式中: \mathbf{F} 为体积力, $\mathbf{u}_{dr,k}$ 为第 k 相的拖拽速度。

$$\mathbf{u}_{dr,k} = \mathbf{u}_k - \mathbf{u}_m \quad (5)$$

具体计算中,将油-水混合液表观黏度的计算模型嵌入到CFD软件中,提高计算的精度,并调用系统中的多相流混合液模型和RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行数值模拟^[7]。具体计算的边界条件设置中,柱型旋流器的入口采用混合速度入口,设置入口的混合液速度和相含率;溢流口和底流口均采用自由流出口边界条件,分别设置出口的分流比;其它壁面均设置为无滑移边界条件。

2.2 几何模型和网格划分

数值模拟中,选取柱型主体的内径为 50 mm 的旋流器建模,切向入口的内径同为 50 mm,顶部溢流出口和底部切向出口的内径分别为 25 mm 和 40 mm,主体的高度为 900 mm,溢流口距入口的距离为 225 mm。柱型旋流器的网格划分中,将整个几何模型划分为四部分,分别为柱型主体、切向入口段、溢流口段和底流口段,均采用 O-blocking 的方法进行结构网格,各个部分进行网格划分后的结果如图 4 所示。

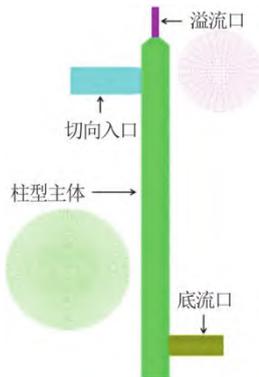


图 4 (网上彩图) 柱型旋流分离器模型网格划分结果
Fig.4 (Color online) Structure meshing result of the cylindrical cyclone

为确定计算网格的尺度,本文划分形成三个尺度的网格进行网格无关性验证^[8],单元网格的数量分别为 182 万、294 万和 343 万。计算工况:入口流速 2.0 m/s,溢流口的分流比为 0.2。图 5 给出了三种不同网格尺度下,计算得到的柱型旋流器主体垂直方向上中心处的压力分布。可以看出,网格数量最少的划分方案,计算结果有一定的偏差,另外两种网格划分方案的计算结果基本相同。因此,后续计算中,为提高计算的效率,采用中间尺寸的网格划分方法,即网格单元的数量为 294 万。

2.3 柱型旋流器的流场特征

具体计算中,入口的流速设置为 2.0 m/s,溢流口的分流比设置为 0.2,对旋流器内不同方向的速度分布进行系统的分析。图 6 给出了柱型旋流器内切向速度 u_t 的分布情况,分别选取四个不同截面的速度分布进行分析。从图中可以看出,切向速度沿各个截面上的变化趋势基本相同,从柱体壁面至中

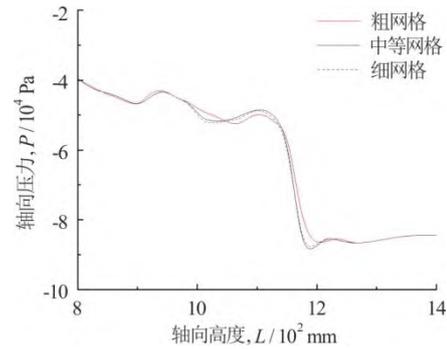


图 5 (网上彩图) 不同尺度网格计算主体中心处的压力分布
Fig.5 (Color online) Pressure curves calculated by different scale grids

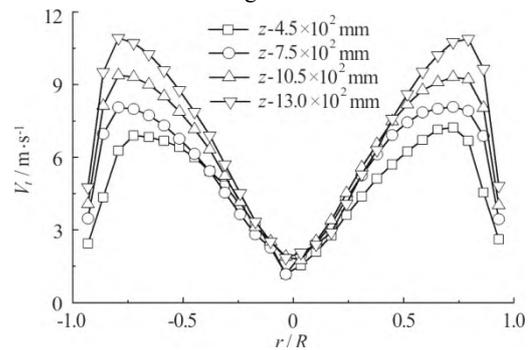


图 6 柱型旋流器内的切向速度分布
Fig.6 Tangential velocity distribution in the cylindrical cyclone

心处,均呈现为先增大后减小的规律。因此,柱型旋流器结构可以形成稳定的切向速度场,进而为油-水两相的稳定分离提供可靠的离心力。

柱型旋流器主体内的轴向速度 u_a 的变化规律如图 7 所示。可以看出,在柱型旋流器不同的横截面上,轴向速度的方向和变化规律基本相同。首先,从壁面到柱体核心处,轴向速度均呈现为先增大后减小的变化趋势,此时速度的方向均向下。然后,进一步靠近旋流器的中心处,轴向速度的方向将会发生变化,即轴向速度在径向上存在零点。在零点外部的液体向下流动,通过底部出口排出,而零点内部的液体向上流动,从顶部出口流出。图 8 为旋流器柱体内的速度矢量图,可以清晰地看到旋流器内向下运动的外旋流和向上运动的内旋流。因此,通过油-水两相在柱型旋流器内由切向速度产生的离心加速度使油相聚并在管道中心处,水相聚在管壁附近处,而轴向速度的分布便促使聚集的油核向上流动,经溢流口流出,旋流器主体周边的水相向下流动,经底流口流出,最终完成油-水两相的分离。

柱型旋流器主体内径向速度 u_r 的变化规律如图 9 所示。从旋流器壁面到中心处,径向速度的数值先逐渐增大后快速减小,速度的方向相同,均是由壁面指向轴心处,在旋流器的核心处切向速度为零。从图中还可以看出,沿着轴向不同的位置,旋流器内径向速度的数值有一定的区别,从切向进口到底部的出口方向,同一径向位置,径向速度的数

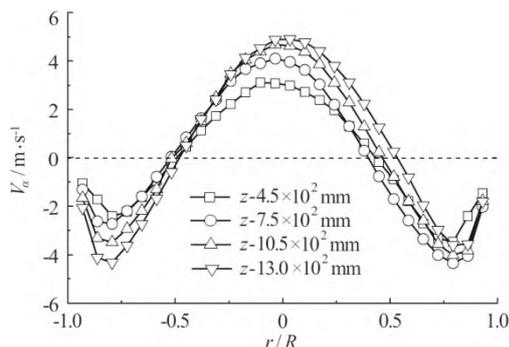


图7 柱型旋流器内的轴向速度分布
Fig.7 Axial velocity distribution in the cylindrical cyclone

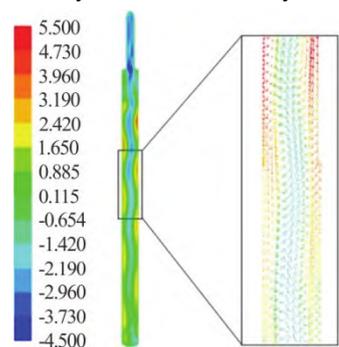


图8 (网上彩图) 柱型旋流器内速度分布矢量图
Fig.8 (Color online) The vector diagram of the velocity distribution in the cylindrical cyclone

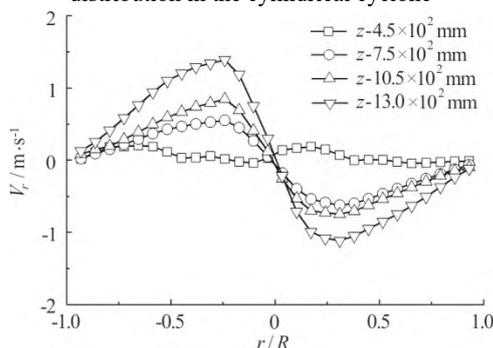


图9 柱型旋流器内的径向速度分布
Fig.9 Radius velocity distribution in the cylindrical cyclone

值逐渐减小,表明在旋流器的切向入口附近,旋流场强度较高,油-水混合液的分离速度较快;而在远离入口处,分散相油滴颗粒进入柱型旋流器中心处油核的速度较慢,即分离效率相对较低。

2.4 分流比对柱型旋流器内流场的影响

对于固定的来液工况,柱型旋流器的分流比是实际应用中唯一可调节的操作参数,其通过控制溢流口和底流口的流量比,对分离处理的效果进行调整。本文研究中,采用柱型旋流器溢流口的分流比 λ_{over} 对研究结果进行分析。

$$\lambda_{\text{over}} = \frac{Q_{\text{over}}}{Q_{\text{in}}} \quad (6)$$

式中: Q_{over} 和 Q_{in} 分别为柱型旋流器溢流口和入口的体积流量。

研究中,将柱型旋流器主体中心处轴向速度向上的旋流场定义为中心涡结构。因此,在数值模拟中,通过轴向速度的方向和数值确定了中心涡的结构,进而通过网格的尺寸计算得到中心涡的长度等参数。图 10 给出了分流比对柱型旋流器内中心涡结构的影响,入口混合液的流速为 2.0 m/s,选取的溢流口分流比分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.5。从图中可以看出,分流比对中心涡长度的影响较为明显,随着溢流口分流比的增加,中心涡的长度逐渐增加。图 11 给出了柱型旋流器中心涡的长度随分流比的变化情况,近似呈指数增加的规律,指数系数约为 0.39。另外,通过图 10 还可以看出,分流比对旋流器内中心涡直径的影响微小,中心涡的内径均维持在约 23 mm。因此,柱型旋流器分流比调节的过程中,主要是增加中心涡结构的长度,即变相的延长分散相油滴进入旋流器中心涡的时间,进而提高分离的效率。

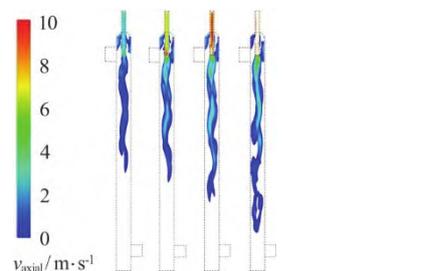


图10 (网上彩图) 不同分流比下柱型旋流器的中心涡结构
($\lambda_{\text{over}}=0.1, 0.2, 0.3$ 和 0.5)

Fig.10 (Color online) The structure of the vortex core in the cylindrical cyclone with different flow split ratios

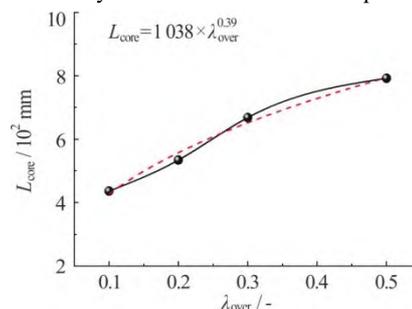


图11 (网上彩图) 分流比对柱型旋流器中心涡长度的影响规律
Fig.11 (Color online) The effect of flow split ratio on the length of the vortex core in the cylindrical cyclone

3 柱型旋流器分离性能测试分析

为得到柱型旋流器应用于原油-水两相混合液分离的能力,以及不同规格旋流器适用的范围及最佳工作条件,研究中,设计形成了三种不同尺寸的柱型旋流分离器进行实验研究,并综合考虑分流比和处理量等参数对柱型旋流器分离性能的影响。数据分析中,为定量描述旋流器的分离效果,引入了分离效率(η)对分离性能进行评价,具体的定义如式 7 所示,其定量体现了柱型旋流器油-水分离的综合效果。

$$\eta = \left| \frac{Q_{o,down}}{Q_{o,in}} - \frac{Q_{w,down}}{Q_{w,in}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式中： $Q_{o,down}$ 和 $Q_{o,in}$ 分别为柱型旋流器底流口和入口油相的体积流量，单位为 m^3/h ； $Q_{w,down}$ 和 $Q_{w,in}$ 分别为柱型旋流器底流口和入口水相的体积流量，单位为 m^3/h 。

图 12 和 13 给出了两种不同工况条件下，三种规格柱型旋流器分离器的运行结果。入口的体积含油率均为 8.26%，原油-水混合液的流量分别为 $11 m^3/h$ 和 $23 m^3/h$ ，运行中调节旋流器溢流口的分流比均为 0.5。从图 12 中可以看出，两种不同处理量条件下，DN60 规格柱型旋流器底流口的体积含油率最低，经过分离后水中体积含油率可由 8.26%降至约 0.18%，即相对于另外两种规格的旋流器，其对混合液中水相的分离效果更好。同时，从图 13 中可以看出，针对实验的工况，DN60 规格柱型旋流器的分离效率最高，约为 64%，能够更好地实现原油-水两相混合液的快速分离。综上所述，柱型旋流器主体的管径对处理效果具有较大的影响，实际应用中，需针对不同的来液条件进行柱型旋流器的选型和设计。

工业应用中，对于设计形成的柱型旋流器，分流比是唯一可调节的操作参数。图 14 给出了分流比对柱型旋流器分离性能的影响，入口原油-水混合来液的流量和含油率分别为 $23 m^3/h$ 和 8.26%。从图中可以看出，随着旋流器溢流口分流比的增加，底流口的含油率呈现为逐渐减小的趋势，且当分流比约为

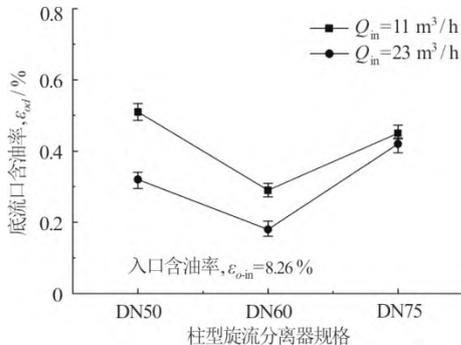


图 12 不同规格柱型旋流器底流口的含油率情况
Fig.12 Oil volume fraction in the down-outlet of the cylindrical cyclone

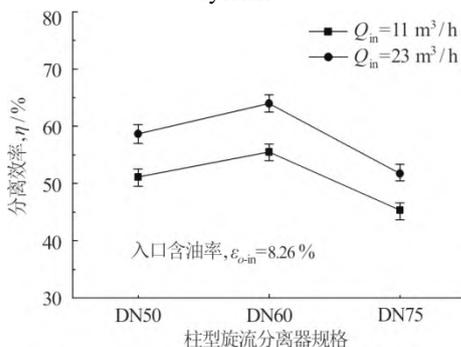


图 13 柱型旋流分离器的分离效率
Fig.13 Separation efficient of the cylindrical cyclone

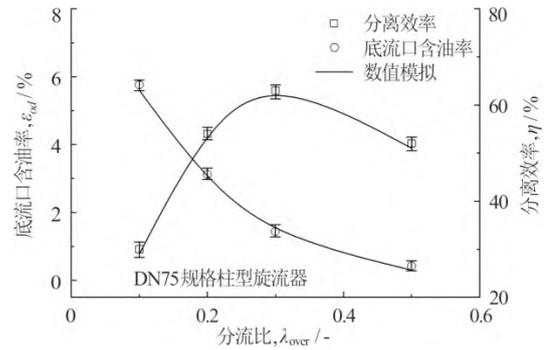


图 14 分流比对柱型旋流器分离性能的影响
Fig.14 The effect of the flow split ratio on the separation characteristics of the cylindrical cyclone

0.4 时，底流口的含油率趋于平缓，即达到了柱型旋流器对水相进行处理的极限。另一方面，随着溢流口分流比的增加，柱型旋流器的分离效率呈现为先增加后减小的规律，即针对固定的来液工况，柱型旋流器对于原油-水两相的分离效果存在最佳分流比，使油相和水相的综合分离效果达到最优状态。

4 结论

柱型旋流分离器为一种新型的油-水高效分离装置，具有占地面积小、分离效率高及易维护等优点，本文研究中，通过数值模拟的方法对柱型旋流分离器内油-水两相流动时的流场特征进行了系统的分析，并采用原油对其分离性能进行实验研究，给出了柱型旋流分离器的结构参数和分流比等对分离性能的影响，研究成果可直接应用于原油-水两相混合液分离的柱型旋流分离器的设计，具有重要的工业应用价值。

(1) 系统给出了柱型旋流器内油-水两相流动的流场特征，得到了油-水两相分离的机理和过程，为分离器的结构设计和优化提供可靠的理论基础。通过油-水两相在柱型旋流器内由切向速度产生的离心加速度使油聚并在管道中心处，水相聚集在管壁附近处，而轴向速度的分布便使聚集的油核向上流动，经溢流口流出，重质相水相向下流动，经底流口流出，最终完成油-水两相的分离。

(2) 分流比对柱型旋流器中心涡长度的影响较为明显，随着溢流口分流比的增加，中心涡的长度近似呈指数增加的规律，指数系数约为 0.39。相反，分流比对零轴向速度面的影响微小，中心涡的内径均维持在约 23 mm，即分流比对中心涡直径的影响可以忽略。

(3) 通过原油实验给出了工业应用中柱型旋流器的分离性能和适用范围，得出经柱型旋流器处理后的水中含油率可由 8.26% 降至约 0.18%，对应的分离效率为 64%。柱型旋流器主体的管径对处理效果

具有较大的影响, 实际应用中, 需针对不同的来液条件进行柱型旋流器的选型和设计, 且柱型旋流器对于原油-水两相的分离效果存在最佳分流比。

参 考 文 献:

- [1] 陈家庆, 王强强, 肖建洪, 等. 高含水油井采出液预分水技术发展现状与展望 [J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1434-1443.
- [2] 王胜, 史仕荧. 导流片型油水旋流分离器的入口结构优化 [J]. 石油机械, 2019, 47(4): 80-84.
- [3] 李枫, 高金明, 邢雷, 等. 聚并破碎模型对 T 型管分离器流场特征及分离性能影响 [J]. 流体机械, 2020, 48(11): 17-24.
- [4] 张军, 钟兴福, 林黎明, 等. 管道式分离技术及其在油气行业混合介质分离中的应用 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 782-790.
- [5] 薄启炜, 张琪, 赵东伟, 等. 重力式井下分离确定分流比的实验研究 [J]. 石油机械, 2003, 31(6): 3-5.
- [6] 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 [J]. 过程工程学报, 2021(10): 1132-1141.
- [7] 刘杨, 王振波. 水力旋流器分离效率影响因素的研究进展 [J]. 流体机械, 2016, 44(2): 39-42.
- [8] Afanador E. Oil-water separation in liquid-liquid cylindrical cyclone separator [D]. The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, USA, 1999.
- [9] Oropeza-Vazquez C, Afandor 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*, 2004, 126(4): 553-564.
- [10] Mathiravedu R S, Wang S B, Mohan R S, et al. Performance and control of liquid-liquid cylindrical cyclone separators [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2010, 132(1): 1-9.
- [11] Gao Z, Wang J, Wang J, et al. Analysis of the effect of vortex on the flow field of a cylindrical cyclone separator [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 211: 438-447.
- [12] 刘海飞, 邓晓辉, 罗东红, 等. 柱型旋流器内单相流场压降的实验研究 [J]. 水力学研究与进展 A 辑, 2010, 25(6): 851-856.
- [13] Liu H F, Xu J Y, Zhang J, et al. Oil-water separation in a liquid-liquid cylindrical cyclone [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2012, 24(1): 116-123.
- [14] Zhang J, Wu Q L, Liu S, et al. Numerical investigation on the gas-liquid two-phase flow and separation characteristics in T-junction [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(34): 21443-21450.
- [15] Zhang J, Xu J Y. Apparent viscosity characteristics and prediction model of an unstable oil-in-water or water-in-oil dispersion system [J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2019, 40(11): 1645-1656.
- [16] Prosperetti A, Tryggvason G. Computational methods for multiphase flow [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [17] 吕秀丽. 水力旋流器湍流场特性分析研究 [J]. 煤炭技术, 2020, 39(12): 144-147.
- [18] 涂佳黄, 文广龙, 王程, 等. 振荡流下带圆角单柱体绕流特性数值研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2020, 35(6): 781-790.