



化工进展
Chemical Industry and Engineering Progress
ISSN 1000-6613, CN 11-1954/TQ

《化工进展》网络首发论文

题目: 油井采出液预分水用轴向水力旋流器的实验
作者: 白春禄, 王春升, 陈家庆, 尚超, 张明, 刘美丽, 郑晓鹏
DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1380
收稿日期: 2019-08-27
网络首发日期: 2019-11-15
引用格式: 白春禄, 王春升, 陈家庆, 尚超, 张明, 刘美丽, 郑晓鹏. 油井采出液预分水用轴向水力旋流器的实验. 化工进展.
<https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1380>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

文章类型：研究开发

DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1380

油井采出液预分水用轴向水力旋流器的实验

白春禄^{1,2}, 王春升³, 陈家庆^{1,2}, 尚超³, 张明³, 刘美丽^{1,2}, 郑晓鹏³

(¹北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617; ²深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室, 北京 102617; ³中海油研究总院工程研究设计院, 北京 100028)

摘要：高含水油井采出液的高效预分水是目下油气集输处理领域面临的关键难题之一，轴向水力旋流器因具有结构紧凑、分离效率高等优点而得到了国内外的广泛关注。本文针对自主研发的油井采出液预分水用轴向水力旋流器开展了室内实验研究。与切向水力旋流器对比，轴向水力旋流器不仅分离效率更高，而且油出口处的油滴聚结长大近 1.8 倍，在分水率高于 50% 的情况下，水出口处的含油浓度低于 1000 mg/L；轴向水力旋流器压降较低，且压降比与分流比呈线性相关。分流比、含水率和流量对分离性能均有显著影响，其中分流比的变化直接影响油核的大小和稳定性，室内样机的最佳分流比为 0.45，当含水率为 90%、处理量为 1.00 m³/h 时分水率与含油浓度分别为 62.9% 和 432.8 mg/L；含水率高于 75% 时分离性能良好；室内样机的最佳流量为 1.50 m³/h。自主研发的轴向水力旋流器不仅满足性能要求，而且在操作弹性、可控性方面较切向水力旋流器均有一定的提升。

关键词：分离；两相流；混合物；水力旋流器；油井采出液；高含水；实验验证

中图分类号：TE934 文献标志码：A

Experimental study of axial hydrocyclone for pre-dehydration from wellstream

BAI Chunlu^{1,2}, WANG Chunsheng³, CHEN Jiaqing^{1,2}, SHANG Chao³, ZHANG Ming³, LIU Meili^{1,2},
ZHENG Xiaopeng³

(¹College of Mechanical Engineering, Beijing University of Petroleum and Chemical Technology, Beijing 102617, China; ²Key Technology and Equipment of Deepwater Oil and Gas Pipeline Beijing Key Laboratory, Beijing 102617, China; ³Engineering Research and Design Institute of CNCCO Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: Efficient pre-dehydration from high water cut wellstream is one of the key problems in the field of oil and gas gathering and transportation at present. Axial hydrocyclone has attracted wide attention at home and abroad because of its compact structure and high separation efficiency. The laboratory experiments were carried out on the axial hydrocyclone for pre-dehydration from wellstream developed by ourselves. Compared with the tangential hydrocyclone, the axial hydrocyclone not only exhibits higher separation efficiency, but also promotes the oil droplets at the oil outlet grow nearly 1.8 times, and the oil concentration at the water outlet is lower than 1000 mg/L when the dehydration rate is higher than 50%. The pressure drop of axial hydrocyclone is lower, and the pressure drop ratio is linearly related to the split ratio. The split ratio, water cut and flow rate have significant effects on the

收稿日期：2019-08-27；修改稿日期：2019-11-12。

基金项目：“十三五”国家科技重大专项子课题（2017ZX05032005-002）；北京市属高校高水平教师队伍建设支持计划高水平创新团队建设计划（IDHT20170507）；国家自然科学基金（21908008）。

第一作者：白春禄（1994—），男，硕士研究生，研究方向为多相流高效分离技术与设备。E-mail: 18660062501@163.com。

通信作者：陈家庆，教授，博士，研究方向为多相流高效分离技术与设备。E-mail: jiaqing@bipt.edu.cn。

separation performance of the axial hydrocyclone. The change of split ratio directly affects the size and stability of the oil core, and the optimum split ratio is 0.45. When the water cut is 90% and the flow rate is 1.00 m³/h, the dehydration rate and oil concentration are 62.9% and 432.8mg/L, respectively. The separation performance is good when the water cut is higher than 75%. The optimum flow rate of axial hydrocyclone is 1.50 m³/h. The self-developed axial hydrocyclone not only meets the performance requirements, but also has certain improvement in operational flexibility and controllability compared to tangential hydrocyclone.

Keywords: separation; two-phase flow; mixtures; hydrocyclone; wellstream; high water cut; experimental validation

现阶段中国东部的的主力油田均已进入高含水或特高含水开采期,油井采出液的综合含水率已超过 90%,有的油井甚至高达 98%^[1]。为了保证原油稳产或上产,油田作业方不得不增大采出液的提液量,常规集输处理工艺流程难以应付这种高含水局面^[2,3]。为了缓解油井采出液高含水的严峻形势,国内外研究人员近些年来主要尝试以下三种方案:一是对采出液在井下进行分离并将分离水直接回注,即增设井下油水分离系统(DOWS)^[4,5],但受限于系统的稳定性、适应性等问题,该技术迄今并没有得到大规模现场应用;二是对三相分离器进行结构改造或直接扩容,但成本较高^[6];三是在现有常规集输处理工艺流程前增加占地面积小、处理效率高的油井采出液预分水装置,这种解决方案调整弹性大、投入成本低^[7]。与其他油水分离设备相比,静态水力旋流器具有体积小、生产成本低、操作方便、无运动部件等优点,在油井采出液预分水领域颇受青睐^[8,9]。

英国南安普顿大学的 Martin Thew 等人于 1974 年设计了世界首台油水分离用静态切向水力旋流器。随着应用研究的不断深入,荷兰 Delft 理工大学于 20 世纪 90 年代末期提出了轴向水力旋流器的设计理念,并针对结构改进展开了一系列研究^[10]。国内关于液-液轴向水力旋流器的研究起步较晚,尚停留在小处理量样机室内实验阶段,迄今尚无成熟公开的液-液轴向水力旋流器结构尺寸理论设计方法,大多根据固-液分离用旋流器的几何关系及实验得出的经验公式,或参照 Thew 型双锥液-液水力旋流器的几何关系来进行^[3,4,17]。另一方面,现有可参考的液-液水力旋流器结构主要用于含油污水处理,不能直接移植用于油井采出液预分水场合。

笔者课题组前期借助数值模拟方法探究了轴向水力旋流器结构参数的影响,设计了一种油井采出液预分水用轴向水力旋流器,并搭建了室内实验平台^[14]。本文在此基础上,进一步探究油水分离前后油滴平均粒径的变化,通过对比试验验证轴向水力旋流器高效的分离性能和较低的压降,并探究分流比、含水率和流量对分离性能的影响,确定最优操作参数。

1 实验装置

基于课题组提出的油井采出液预分水用轴向水力旋流器的设计方法,设计加工了处理量为 1.00 m³ h⁻¹ 的室内试验样机,结构如图 1(a)所示,主要包括圆柱段、大锥段、小锥段、直尾管、油出口和水出口。充分混合的油水混合液在压力作用下从入口进入轴向水力旋流器,经起旋元件的导流作用,流体逐渐产生切向速度并进行旋转运动;当具有一定旋流强度的油水混物流经大锥段时,随着旋转半径的减小,油水混合物的旋流强度逐渐增大,形成稳定的强旋转流场;小锥段为油水分离提供足够的停留时间。由于油水两相存在密度差,水相在离心力作用下向外旋流区运动,并沿着旋流器内壁流向水出口;油相在径向压力梯度力的作用下进入内旋流区,并在中心逆向压力的作用下反向流动,最终经起旋元件中心位置的排油管排出。圆柱段的起旋叶片采用压降较低、加工难度较小、单位长度产生较大旋流强度的圆弧准线叶片,叶片出口角为 27°,长度为 40mm,叶片个数为 8 个。

为了进行轴向水力旋流器性能的对比分析评价,参照 Thew 型双锥液-液切向水力旋流器的几何关系,以 1.00m³ h⁻¹ 处理量为设计目标,设计并加工了国内外常用的(单)切向水力旋流器,结构如图 1(b)所示。两种实验样机的结构参数如表 1 所示。与切向水力旋流器相比,轴向水力旋流器在总长和圆柱管径方面均有

明显缩短，其结构更加紧凑，占地面积更小。

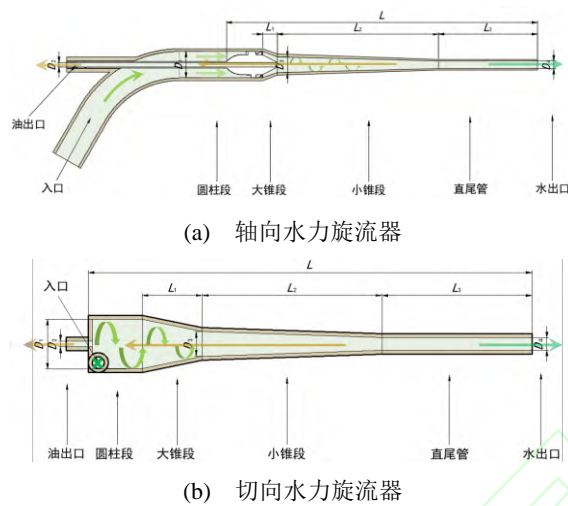


图 1 两种水力旋流器实验样机的结构示意图

表 1 两种水力旋流器实验样机结构参数

类别	总长 $L(\text{mm})$	大锥长度 $L_1(\text{mm})$	小锥长度 $L_2(\text{mm})$	直尾管长 $L_3(\text{mm})$	圆柱管径 $D_1(\text{mm})$	出油管径 $D_2(\text{mm})$	小锥管径 $D_3(\text{mm})$	出水管径 $D_4(\text{mm})$
轴向水力旋流器	757	22	460	240	40	7	24	12
切向水力旋流器	1067	71	386	560	50	6	25	12.5

2 实验条件与性能评价方法

2.1 工艺流程与实验方法

所搭建水力旋流器分离性能室内实验装置的工艺流程如图 2 所示，主要包括油水混合系统、分离系统和测量系统等。

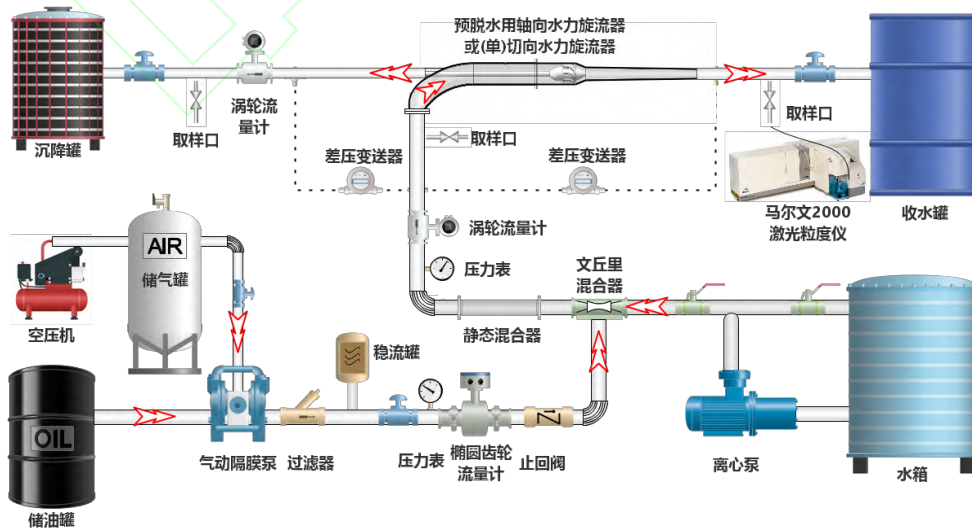


图 2 室内实验装置的工艺流程示意图

(1) 油水混合系统

水相密度为 1000 kg/m^3 ，动力粘度为 $0.656 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (40°C)；油相采用与原油物化性质更为接近的 32# 白油，其密度为 853 kg/m^3 ，动力粘度为 $38 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (40°C)。油水混合系统主要通过文丘里管和静态混合器完成油水在线剪切混合，以获得均匀的油水混合液^[15]。油相泵送采用气动隔膜泵后接缓冲罐的方式以尽量控制乳化程度，油相流量通过椭圆形齿轮流量计测量（精度为 0.2 级）；水相泵送采用离心泵分流的方式来控制流量和压力；油水混合物的流量通过涡轮流量计测量（精度为 0.5 级）。

(2) 分离系统

分离系统的主要结构为管路可互换的轴向水力旋流器或切向水力旋流器。室内实验平台实物照片如图 3 所示，轴向水力旋流器和切向水力旋流器分别位于点画线框图和虚线框图中。为了弥补两种水力旋流器轴向长度的差异，可拆卸油出口测量管路并轴向移动。

(3) 测量系统

测量系统主要进行油滴粒径的测量和混合物含油浓度测量。取样经 BRIJ-35 乳化剂稳定后，利用英国 Malvern 公司 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测量油水混合物中油滴的粒径大小及其分布^[10]；样品经济南盛泰电子科技有限公司 STC-302 型自动液液萃取仪充分萃取后，采用美国 Wilks Enterprise 公司 CVH 型 TOG/TPH 分析仪测量水出口含油浓度。



图 3 室内实验平台

2.2 实验方法和评价手段

室内实验主要探究分流比、含水率和流量对轴向水力旋流器分离性能的影响，其中分流比范围为 $0.35 \sim 0.65$ ，入口流量范围为 $1.00 \sim 2.00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，入口含水率范围为 $70\% \sim 90\%$ 。评价指标为分水率和水出口含油浓度，分水率作为油井采出液预分水型水力旋流器最直接的分离性能评价指标，可根据式(1)来计算。据《油田油气集输设计规范》(GB50350-2015)，由油气集输处理设备排出的污水含油量不应大于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，因此采出液预分水技术工程应用时应更加重视分离设备水出口处的含油浓度^[16]。

$$S = \frac{Q_u(1-W_u)}{Q_i(1-W_i)} \quad (1)$$

3 实验结果与讨论

3.1 油滴粒径分析

据 Stokes 沉降定律，油滴粒径是影响油水分离效果关键因素之一^[17,18]。为合理评价轴向水力旋流器的分离性能，分析了旋流器入口、水出口和油出口处的油滴粒径分布情况。入口流量分别为 $1.00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1.50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $2.00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 工况条件下，含水率对油水混合物中油滴的索特平均直径(D_{32})的影响如图 4 所示。 D_{32} 又称当量比表面直径、表面积体积平均直径，是颗粒群表面积分布的平均直径，表示与该颗粒群粒形相同、比表面积相同的颗粒粒度。从图中可以看出，随着含水率的升高， D_{32} 均有下降的趋势，且入口流量越高 D_{32} 越小。这是由于“文丘里+SK 型静态混合器”的油水混合方式依靠复杂结构对流体的剪切作用，同一流量下即保持相同的剪切强度，含水率的升高使得较少的油相剪切更为均匀；入口流量的增加提高了流体剪切强度，使得相同含水率下的 D_{32} 减小。在可操作的流量、含水率的范围内，“文丘里+SK 型静态混合器”的油水混合方式可操作性较好，所产生油水混合物的 D_{32} 基本稳定在 $60 \sim 157 \mu\text{m}$ 之间。

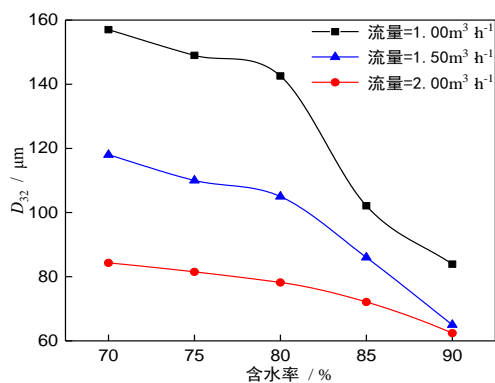


图4 不同流量下含水率与 D_{32} 的关系

图5为入口流量 $1.00\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 、含水率为80%、分流比为0.6时，轴向水力旋流器和切向水力旋流器入口、油出口、水出口处的油滴粒径对比图。从图中可以看出，入口油滴粒径基本呈正态分布，油水混合较为均匀；入口油滴 D_{32} 稳定在 $142.6\mu\text{m}$ 时，轴向水力旋流器水出口和油出口处油滴的 D_{32} 分别为 $25.9\mu\text{m}$ 和 $266.7\mu\text{m}$ ，切向水力旋流器水出口和油出口处油滴的 D_{32} 分别为 $53.7\mu\text{m}$ 和 $210.6\mu\text{m}$ 。轴向水力旋流器水出口处的油滴能保持更小的切割粒径，展示了更高的分离性能；油出口处的油滴平均粒径增大至1.8倍，可判断油相在轴向水力旋流器内的聚结效果更强。这是由于轴向水力旋流器形成了更加稳定的旋转流场，消除了切向入口造成的涡核摆动，从而抑制了油滴的剪切破碎^[19-21]。

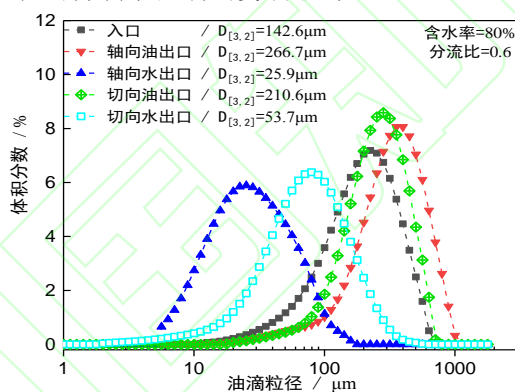
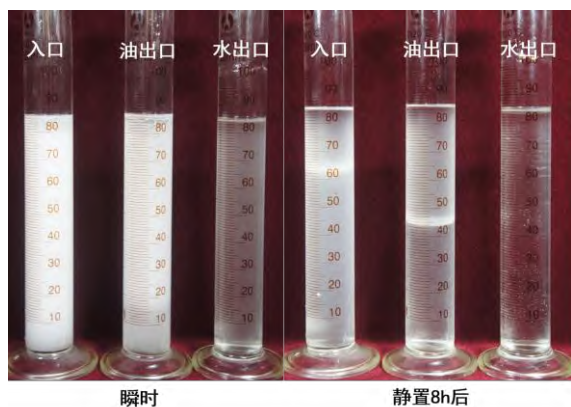
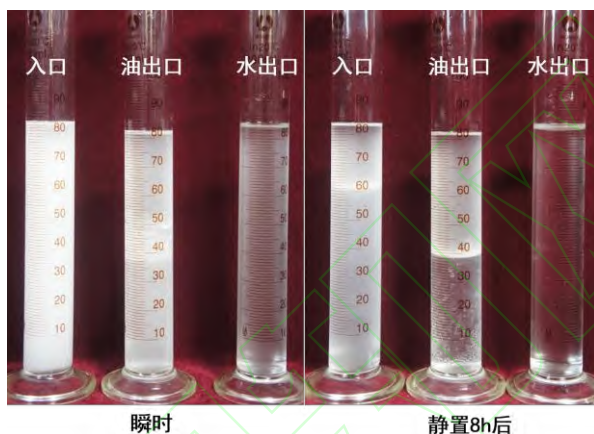


图5 入口、油出口、水出口油滴粒径分布图

为了更为直观地展示轴向水力旋流器的分离性能，在上述工况条件下，在轴向水力旋流器和切向水力旋流器的入口、油出口、水出口处分别取样对比，瞬时和静置八小时后的样品对比如图6所示。混合均匀、呈乳白色的油水混合液进入水力旋流器后，绝大部分油相可从油出口排出，轴向水力旋流器水出口样品清澈，基本不含油；切向水力旋流器水出口样品较为浑浊，含油较多。轴向水力旋流器油出口样品中的油相在短时间内仅依靠重力就可上浮到液体表面，而切向水力旋流器的油出口样品浑浊且稳定，据 Stokes 沉降公式可知轴向水力旋流器油出口样品中的油滴粒径较大。静置八小时后，对比两种旋流器入口、油出口样品挂壁的油滴可知，轴向水力旋流器油出口样品中的油滴颗粒增大幅度较大，证明了油滴发生了更强的聚结效应。



(a) 切向水力旋流器



(b) 轴向水力旋流器

图6 两种水力旋流器入口、油出口和水出口处的样品

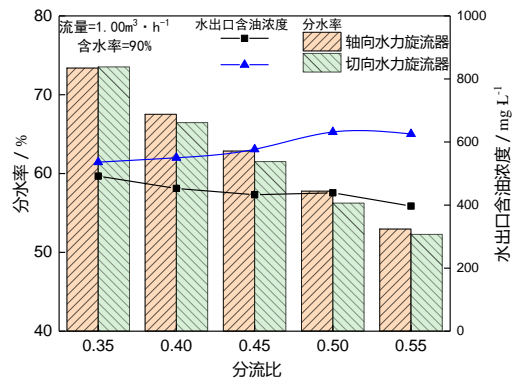
从油滴粒径的角度分析，轴向水力旋流器不仅表现了更为良好的分离性能，而且促进了油出口的油颗粒聚结长大近 1.8 倍，降低了后续处理难度。

3.2 分流比对分离性能的影响

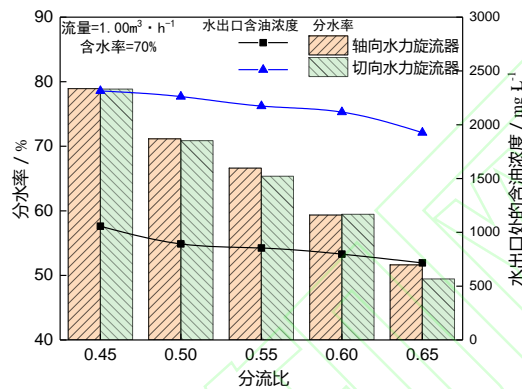
两种水力旋流器分离性能与分流比的关系如图 7 所示。从图(a)中可以看出，当含水率为 90%、流量为 $1.00\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 时，在分流比从 0.35 增加至 0.55 的过程中，轴向水力旋流器的分水率逐渐降低，但均维持在 50% 以上；水出口含油浓度均低于 500mg L^{-1} 。分流比的增大意味着水出口的流量减少，导致旋流管底部压力升高，反向内旋流的轴向速度增加，使得从油出口排出的水相逐渐增加，分水率降低。但是，轴向水力旋流器水出口处的含油浓度与分流比并不呈简单的正比例关系，这是因为油出口流量改变将造成轴向水力旋流器内部压力的变化，直接影响油核的大小和稳定性。分流比为 0.45 时油核稳定且大小适中，使分水率达到 60%，同时水出口处的水质最佳，含油浓度为 432.8mg L^{-1} 。在此含水条件下，切向水力旋流器的分水率可达 50% 以上，水出口处的含油浓度为 $530\text{-}630\text{ mg L}^{-1}$ 。

从图中可以看出，当含水率为 70%、流量为 $1.00\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 时，随着分流比从 0.45 增加至 0.65，轴向水力旋流器的分水率和水出口处的含油浓度均逐渐降低，但基本稳定在 1100mg L^{-1} 以下。为了在满足水出口处含油浓度低于 1000mg L^{-1} 的条件下，尽可能增大分水率，最佳分流比可选 0.50 左右，此时水出口处的含油浓度为 892.5mg L^{-1} 、分水率为 71.2%。在此含水条件下，切向水力旋流器水出口处的含油浓度为 $1930\sim 2320\text{mg L}^{-1}$ ，无法满足性能要求，且增大分流比并不能降低水出口处的含油浓度。

综上所述，轴向水力旋流器在不同工况下均展现出较强的分离性能，而且在操作弹性、可控性方面也有一定提升。



(a) 流量为 1.00m³ h⁻¹、含水率为 90% 时



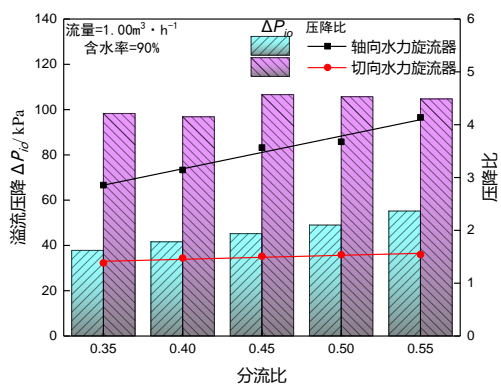
(b) 流量为 1.00m³ h⁻¹、含水率为 70% 时

图7 两种水力旋流器分离性能与分流比之间的关系

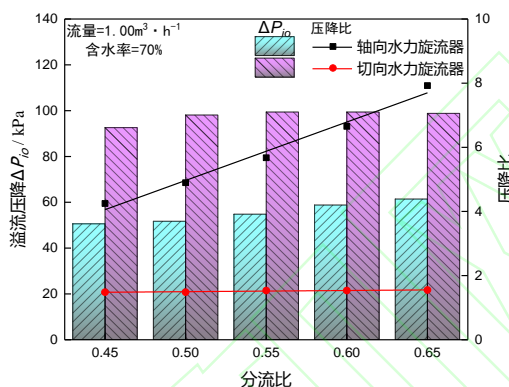
3.3 分流比对压降的影响

压降是评价水力旋流器性能的重要指标，主要包括溢流压降 ΔP_{io} 和底流压降 ΔP_{iu} 。水力旋流器的压降与流量和分流比直接相关，但不直接影响分离效率；压降比 ($\Delta P_{io} / \Delta P_{iu}$) 与分流比呈线性关系，则直接影响分离性能^[3]。为了更为直观地对比展示轴向水力旋流器与切向水力旋流器的压降，本实验的调节方式为：固定水出口处的阀门开度以控制 ΔP_{iu} 为定值，调节油出口处的阀门开度以达到目标工况。切向水力旋流器和轴向水力旋流器的 ΔP_{iu} 被分别控制在 65kPa 和 10kPa，即切向水力旋流器需要更大的注液压力以达到相同分流比。两种旋流器分流比与压降的关系如图8所示，从图中可以看出，当含水率为90%、流量为 1.00m³ h⁻¹ 时，随着分流比的增加，轴向水力旋流器和切向水力旋流器的 ΔP_{io} 分别在 40~50 kPa 和 90-110 kPa 范围内呈上升的趋势。因此从 ΔP_{io} 和 ΔP_{iu} 来看，轴向水力旋流器均能保持较低的压降。当含水率为 90%、流量为 1.00m³ h⁻¹ 时，也能得到上述结论。

含油污水处理工程应用中，水力旋流器的调控方式主要是根据压降比来控制分流比，即压降比与分流比之间需要较高的线性拟合度。从图中可以看出，在本实验工况范围内，切向水力旋流器的压降比随分流比的增加无明显变化，即无明显线性关系；轴向水力旋流器的压降比均随分流比的增加线性增加，因此可调控性更强。



(a) 流量为 $1.00\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 、含水率为 90% 时



(b) 流量为 $1.00\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 、含水率为 70% 时

图 8 两种水力旋流器分流比对压降的影响

鉴于轴向水力旋流器在分离性能以及压降与分流比的线性关联度方面表现较佳，接下来的实验研究将着重关注轴向水力旋流器入口水质、水量变化对分离性能的影响，其中水质变化主要体现在入口油水混合物的含水率。

3.4 入口油水混合物含水率对水出口处含油浓度的影响

在入口油水混合物含水率分别为 90%、85%、80%、75%、70% 条件下，得到轴向水力旋流器水出口处含油浓度与分流比的关系如图 9 所示。考虑到本实验工况均满足分水率大于 50%，因此出水水质可直接评价分离性能。由图可得，随着含水率的增加，同一分流比下水出口处的含油浓度均降低；水出口处的含油浓度在分流比为 0.45 左右均相对最低，进一步验证了流量为 $1.00\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 时，最佳分流比为 0.45。入口油水混合物含水率的增加意味着油相体积分数降低，从而使得旋流器内部中心油核的直径减少，在油出口直径一定的情况下，中心富集的油核能及时从油出口排出，致使随外旋流从水出口排出的油相减少。当入口油水混合物含水率高于 75% 时，所形成的油核均处于内旋区内，轴向水力旋流能够保持良好的分离性能；但当入口油水混合物含水率低于 75% 时，水出口处的含油浓度并非在分流比为 0.45 时最低，究其原因，可能是由于油核直径超过内旋区直径，大量的油相不能及时排出。为了缓解上述问题，只有进一步增加分流比，牺牲分水率来保证出水口处的含油浓度。

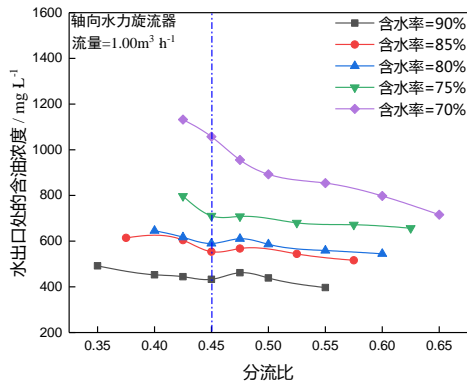


图9 不同入口油水混合物含水率对水出口处含油浓度的影响

3.5 入口油水混合物流量对分离性能的影响

入口油水混合物的含水率为 90% 时，流量对轴向水力旋流器分离性能的影响如图 10 所示。从图中可以看出，虽然实验样机的设计处理量为 $1.00\text{m}^3\text{h}^{-1}$ ，但在流量为 $1.50\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 时分离性能最好，即分水率较高且水出口处的含油浓度整体较低，而当流量进一步增大时分离效果明显下降。究其原因，流量的增大将直接造成固定结构内流体旋流强度的增加和水力停留时间的缩短，旋流强度的增加虽然可以提高油滴径向移动速度进而提高分离效率，但会不可避免地造成液滴破碎，增大分离的难度；水力停留时间缩短后，部分油相不能及时反向排出。笔者在前期开展 CFD 数值模拟过程中观察到油核轴向长度随着流量的增大逐渐增加，当流量从 $1.00\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 增加到 $1.50\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 时，产生的中等旋流强度使得油滴聚结占有主导地位，而液滴破碎和水力停留时间缩短造成的不利影响较小；当流量进一步增大时，强烈剪切力和更短停留时间所带来的不利影响占主导地位，分离性能显著降低。但即便如此，轴向水力旋流器在可操作流量和分流比内，仍能达到水出口处含油浓度低于 $1000\text{mg}\text{L}^{-1}$ 、分水率超过 50% 的要求。

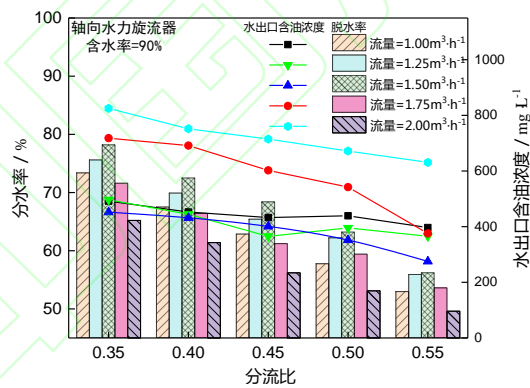


图 10 含水率对分离性能的影响

4 结论

针对自主研发的油井采出液预分水用轴向水力旋流器样机开展了室内实验研究，探究油水分离前后油滴平均粒径的变化，对比分析分流比对两种水力旋流器压降、分离性能的影响，考察入口油水混合物含水率和流量对轴向水力旋流器分离性能的影响。得到如下结论：

(1) 与切向水力旋流器相比，轴向水力旋流器对混合均匀、油滴粒径较小的油水混合物不仅表现出更良好的分离性能，而且油出口的油颗粒聚结长大幅度较大，增大倍数近 1.8 倍。

(2) 在满足分水率要求的分流比范围内，切向水力旋流器分离效果差，而且增大分流比不能明显降低水出口处的含油浓度；轴向水力旋流器不仅满足水出口处的含油浓度要求，而且含油浓度的绝对值更低。轴向水力旋流器压降更低，且压降比与分流比间的线性拟合度较高，便于运行操作调控。

(3) 在本文的实验范围内，分流比、含水率和流量对轴向水力旋流器的分离性能均有显著影响。分水率随分流比的增加而降低，水出口处的含油浓度与分流比并不呈简单的正比例关系，最佳分流比为 0.45；当

含水率为 90%、处理量为 $1.00\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 、分流比为 0.45 时, 分水率与含油浓度分别为 62.9% 和 432.8mg L^{-1} ; 轴向水力旋流器水出口处的含油浓度随入口油水混合物含水率的增加而提高, 含水率高于 75% 时的分离性能良好。轴向水力旋流器样机的最优处理量为 $1.50\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 。

符号说明

Q_i	——	入口流量, m^3h^{-1}
Q_u	——	水出口流量, m^3h^{-1}
W_i	——	入口含油浓度体积分数, %
W_u	——	水出口含油浓度体积分数, %
S	——	分水率, %
ΔP_{io}	——	溢流压降, kPa
ΔP_{iu}	——	底流压降, kPa

参考文献

- [1] 马猛, 王聪, 张永学, 等. 高含水稠油预分离用分离器水力特性研究[J]. 石油机械, 2017, 45(2): 73-77.
MA M, WANG C, ZHANG Y X, et al. Study on hydraulic characteristics of separators for high water-cut heavy oil pre-separation[J]. Petroleum Machinery, 2017, 45(2): 73-77.
- [2] 倪玲英. 高含水原油对水力旋流器预分离性能的影响[J]. 石油机械, 1999, 27(9): 19-21.
NI L Y. Effect of high water-cut crude oil on pre-separation performance of hydrocyclone[J]. Petroleum Machinery, 1999, 27(9): 19-21.
- [3] 倪玲英. 分流比对高含水原油预分离水力旋流器性能的影响[J]. 油气田地面工程, 1999, 18(4): 39-41.
NI L Y. Influence of split ratio on the performance of pre-separation hydrocyclone for high water-cut crude oil [J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 1999, 18(4): 39-41.
- [4] 吴应湘, 许晶禹. 管道式油气水分离技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
WU Y X, XU J Y. Pipeline oil, gas and water separation technology[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [5] 提浩强. 海上大流量井下油水分离系统设计及实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
TI H Q. Design and experimental research of downhole oil-water separation system with large flowrate[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [6] 张劲松, 冯叔初. 对井下油水分离和同井回注的认识[J]. 油气田地面工程, 2001, 20(2): 5-6.
ZHANG J S, FENG S C. Understanding of downhole oil-water separation and reinjection in the same well[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2001, 20(2): 5-6.
- [7] 熊思. 油井产出液预分水用新型水力旋流器的设计与特性研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2015.
XIONG S. Design and characteristics of a new hydrocyclone for pre-dehydration from wellstream[D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2015.
- [8] LIU M L, CHEN J Q, CAI X L, et al. Oil-water pre-separation with a novel axial hydrocyclone[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 26(1): 60-66.
- [9] DAS T, JASCHKE J. Modeling and control of an inline deoiling hydrocyclone[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(8): 138-143.
- [10] SLOT J J, CAMPEN L, HOEIJMAKERS H W M, et al. In-line oil-water separation in swirling flow[C]//8th International Conference on CFD in Oil & Gas. Trondheim, Norway: Metallurgical and Process Industries, 2011: 21-23.
- [11] ROCHA A D, BANNWART A C, GANZAROLLI M M. Numerical and experimental study of an axially induced swirling pipe flow[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015, 53: 81-90.
- [12] MOTIN A, TARABARA V V, BENARD A. Numerical investigation of the performance and hydrodynamics of a rotating tubular membrane used for liquid-liquid separation[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 473: 245-255.

- [13] DURDEVIC P, RAJU C, BRAM M, et al. Dynamic oil-in-water concentration acquisition on a pilot-scaled offshore water-oil separation facility[J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 124-135.
- [14] 熊思, 刘美丽, 陈家庆, 等. 油井采出液预分水用轴向水力旋流器的数值模拟[J]. *石油机械*, 2015, 43(11): 107-113.
XIONG S, LIU M L, CHEN J Q, et al. Numerical simulation of axial hydrocyclone for pre-dehydration from wellstream[J]. *Petroleum Machinery*, 2015, 43(11): 107-113.
- [15] 桑义敏, 陈家庆, 梁存珍, 等. 采油污水的室内再现配置及静态混合器剪切强度研究[J]. *环境工程*, 2012, 30(5): 21-27.
SANG Y M, CHEN J Q, LIANG C Z, et al. Study on indoor reproduction configuration and shear strength of static mixer for produced water[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(5): 21-27.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 油田油气集输设计规范: GB 50350—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Oil and gas gathering and transportation design specification: GB 50350—2015[S]. Beijing: Planning Press of China, 2015.
- [17] 赵立新, 蒋明虎, 孙德智. 旋流分离技术研究进展[J]. *化工进展*, 2005, 24(10):1118-1123.
ZHAO L X, JIANG M H, SUN D Z. Research progress of cyclone separation technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2005, 24(10):1118-1123.
- [18] 吕凤霞, 杨贺, 袁惠新, 等. 液-液分离水力旋流器油滴破碎与聚并的数值模拟[J]. *石油机械*, 2017, 45(11): 71-76.
LU F X, YANG H, YUAN H X, et al. Numerical simulation of oil droplet breakage and coalesce in liquid-liquid separation hydrocyclone[J]. *Petroleum Machinery*, 2017, 45(11): 71-76.
- [19] 高助威, 王娟, 王江云, 等. 旋风分离器内涡核摆动的特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(12): 2610-2618.
GAO Z W, WANG J, WANG J Y, et al. Study on the characteristics of vortex core wobble in cyclone separator[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(12): 2610-2618.
- [20] 高助威, 王娟, 王江云, 等. 两种不同入口结构旋风分离器内涡核摆动的对比[J]. *化学反应工程与工艺*, 2018, 34(4): 11-20.
GAO Z W, WANG J, WANG J Y, et al. Comparison of vortex core wobble in cyclone separators with two different inlet structures[J]. *Chemical reaction Engineering and Technology*, 2018, 34(4): 11-20.
- [21] 赵海鹏, 张秀欣. 旋风分离器涡核非稳现象的分析与研究[J]. *煤矿机械*, 2004, 24(7): 43-45.
ZHAO H P, ZHANG X X. Analysis and study on vortex vore instability of cyclone separator[J]. *Coal Mining Machinery*, 2004, 24(7): 43-45.