

BIPTVAS - II 型轴向涡流分离器工程样机及其 在流花 11-1 油田的现场试验*

姬宜朋¹ 陈家庆¹ 蔡小磊¹ 李平² 王春升³ 尚超³ 张明³

(1. 北京石油化工学院 北京 102617; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广东深圳 518067; 3. 中海油研究总院 北京 100028)

姬宜朋,陈家庆,蔡小磊,等. BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器工程样机及其在流花 11-1 油田的现场试验[J]. 中国海上油气,2016,28(1):133-138.

Ji Yipeng, Chen Jiaqing, Cai Xiaolei, et al. A BIPTVAS-II voraxial separator prototype and its pilot test in LH 11-1 oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(1): 133-138.

摘要 介绍了自主研制的 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器工程样机的结构和工作原理,并对其在南海流花 11-1 油田成功进行的正交、单一变量和连续运行现场应用试验进行了分析。试验结果表明,转鼓转速是影响其分离性能的最关键操作工艺参数,稳定、高效运行时的转速范围为 1 650~1 700 r/min;在不添加任何药剂的情况下,设备以最优操作参数稳定运行,当入口污水含油量在 200 mg/L 左右时,分离器水出口的含油量可降低到 30 mg/L 以下,除油效果超过现场安装的水力旋流器。该技术的成功研发将为我国海洋石油工业的增产减污提供可行的技术解决方案,值得进一步开展工程放大应用研究。

关键词 BIPTVAS-II 型工程样机;轴向涡流;油水分离;现场试验;流花 11-1 油田

中图分类号: TE835 **文献标识码:** A

A BIPTVAS-II voraxial separator prototype and its pilot test in LH 11-1 oilfield

Ji Yipeng¹ Chen Jiaqing¹ Cai Xiaolei¹ Li Ping² Wang Chunsheng³ Shang Chao³ Zhang Ming³

(1. Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangdong 518067, China; 3. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: This paper described the structure and operating principle of a BIPTVAS-II voraxial separator prototype which was developed with independent intellectual property. The orthogonal experiment, individual parameter-effect experiment and continuous running experiment that were conducted in LH 11-1 oilfield were analyzed. The experimental results show that, the drum rotation velocity was the key operation parameter affecting the separation performance and only when it rotated at the range of 1 650~1 700 r/min, could the prototype operate smoothly and effectively. When the inlet oil content was around 200 mg/L, even without any addition of chemicals, the BIPTVAS-II would run with optimum performance and the outlet oil content could be controlled below 30 mg/L. This separation efficiency was higher than that obtained with the hydrocyclone used in LH 11-1 oilfield. The successful development of the prototype will provide the offshore oil industry with a practicable solution for increasing production and decreasing pollution, being worthy of larger-scale application research.

Key words: BIPTVAS-II prototype; voraxial eddy; oil-water separation; field experiment; LH 11-1 oilfield

* 中海油研究总院科研项目“气浮旋流一体化水处理设备放大研究(编号:CCL2014RCPS0090RNN)”,北京市属高等学校“长城学者”培养计划资助项目“加油站埋地油罐机械清洗系统的关键技术研究(编号:CIT&TCD20150317)”部分研究成果。

第一作者简介:姬宜朋,男,博士,主要从事多相流分离技术与设备的研究。地址:北京市大兴区黄村镇清源北路 19 号(邮编:102617)。E-mail:jiypeng@bipt.edu.cn。

由于油田采出液中含水率的不断攀升和平台空间的限制,用于海上油田生产平台上的油、水、气多相分离技术和方法正在悄然发生着变化,其中最为显著的变化是内联、紧凑型分离技术的研究和应用逐渐为业内所认可^[1-3]。从目前各类内联、紧凑型分离技术的分离原理来看,其最大特点是充分利用了离心分离技术,在上千倍的重力加速作用下,分离时间得到了大幅度减少,主要代表性产品有静态水力旋流器、轴向入口水力旋流器以及 FMC 公司的 In-Line DeWaterer 等。与传统分离技术相比,内联型分离技术的设备体积小、重量轻,更容易实现撬装化和集成化,被誉为是解决未来海洋平台水处理问题的关键技术,也将为边际油田开发提供一种有效的解决方案^[4-9]。轴向涡流分离器(VAS)为上世纪末美国 EVTN 公司研制的一种新型分离设备,与其他紧凑型分离设备相比,轴向涡流分离器具有分离效率高(分离水中的自由油时分离效率可达 95%~100%)、能耗低(处理量为 1 135 m³/h 时能耗仅为

37 kW)、尺寸小且结构紧凑(处理量为 1 135 m³/h 时设备的总占地面积不大于 4 m²)、分离过程没有压力降等优点^[10-14]。几种典型的紧凑型液-液分离设备的性能比较见表 1,其中 VAS4000 型轴向涡流分离器和 InLine DeWaterer 为管式分离设备,可以实现完全内联安装;STREAMLINER™为法国威立雅公司生产的轴向入口型水力旋流器^[15]。由表 1 可见,InLine DeWaterer 系列设备处理量过小(最大处理量仅为 40 m³/h)且无法集成,用于处理大液量的油田生产水时需要多个分离器并联,因此一般用在小液量的边际油田采出液预处理工艺中^[15];STREAMLINER™水力旋流器(LLHC)和轴向涡流分离器相比,在相同处理量下轴向涡流分离器的体积更小,且能耗低(处理量为 330 m³/h 的 STREAMLINER™型水力旋流器前增压泵的功率为 90 kW,处理量为 450~1 135 m³/h 的 VAS-8000 型水力旋流器所用电机的功率仅为 37 kW),综合考虑被测试液体含油量和各分离器的除油效率,二者对油-水分离的处理能力相当。

表 1 轴向涡流分离器与水力旋流器的关键参数比较

Table 1 The comparison of the key parameters between the VAS and LLHC

设备名称	处理量/ (m ³ ·h ⁻¹)	电机功率/ kW	压力降/ MPa	分离效率/ %	核心设备体积/ m ³	测试液体 含油量
VAS4000 型轴向涡流分离器	57~200	8.82	0.00	87~97	0.53	600~7 000 mg/L
InLine DeWaterer	10~40	0	0.03~0.25	95	0.3	1%~50%
STREAMLINER™	330	0	1.00	70~80	1.2	100~300 mg/L

美国 EVTN 公司对轴向涡流分离器的研究和应用已经取得相当大的成功,然而至今尚无其关键技术理论研究的文献报道,缺少内部的结构细节和技术要点以及主体结构的设计理论和方法,更没有针对特定待分离混合液的分离性能试验研究的报道。近年来,北京石油化工学院围绕该型分离器开展了系统、深入的应用基础研究,设计了 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器工程样机,并在流花 11-1 油田成功地进行了现场应用试验。本文在简单阐述轴向涡流分离器的结构、工作原理的基础上,根据现场应用试验测试数据,分析了轴向涡流分离器操作参数对其分离性能的影响,阐释了轴向涡流分离器在处理流花 11-1 油田生产水时操作参数的合理取值范围。

1 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器工程样机结构及工作原理

自主研发的 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器工

程样机如图 1 所示,该样机主要由驱动机构、旋转的涡发生器、静止的锥形机筒和轻相收集管等组成,关键技术参数见表 2。驱动机构的输入端通过同步带与变频调速电动机相连,涡发生器的转速可以通过调节变频电动机的转速进行控制。驱动机构的末端安装有斜齿轮,涡发生器转鼓外圆周中间位置也加工有斜齿轮,驱动轴上齿轮和转鼓上齿轮相啮合实现传动。机筒固定安装在转鼓的末端,并与其保持同轴,且其入口直径与转鼓内径保持一致,轻相收集管安装在静止锥形机筒内部中心线的末端。

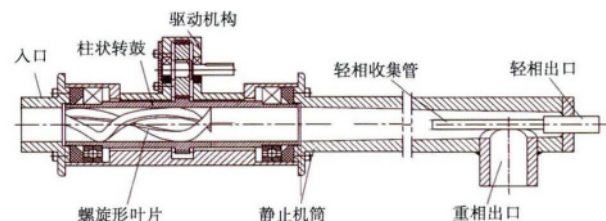


图 1 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器的结构示意图

Fig. 1 Structural sketch of BIPTVAS-II voraxial separator

表 2 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器关键技术参数
Table 2 The key technical parameters of BIPTVAS-II voraxial separator

参数	数值	参数	数值
额定流量/(m ³ ·h ⁻¹)	4	主体长度/m	2.6
水力停留时间/s	2.6	主体宽度/m	0.5
额定压力/MPa	0.3	主体高度/m	0.3
转鼓转速/(r·min ⁻¹)	260~3 800		

涡发生器为内壁固定焊接有一定数量渐变螺旋形叶片的转鼓,叶片的长度和高度均小于转鼓的长度和半径,前端有叶片的区域称为加速区,后端无叶片的区域为稳流区;高度较小的叶片又将加速区分为外环叶片区和中心中空区。工作过程中,待分离混合液自左端进入涡发生器,首先受加速区转鼓和叶片的驱动产生高速轴向旋转;与此同时,外环叶片区液体的轴向速度在螺旋形叶片的泵送作用下得以增加,从而迫使中心中空区流体流向外环叶片区,形成中心低压区。涡运动和轴向运动复合叠加,初步形成了外环液体的轴向涡流运动形态流入涡发生器后端的稳流区。进入稳流区的待分离混合液在转鼓内壁边界效应的影响下,轴向涡运动逐渐增强,并形成稳定的轴向涡流入静止分离机筒。在静止机筒内轴向涡产生的强大离心力场(离心力加速度约 1 000 g)使待分离混合液中的重相以一定的径向速度向外运移,轻相向中心汇聚,最终借助轻相收集管实现分离。转鼓转速由电机控制,因此可实现单管大处理量下的强离心分离,进而可以直接安装在油水集输管线上,实现完全内联。另外,螺旋叶片的泵送作用可以抵消分离过程中的压力降,进而实现无压力损失的分离过程。

2 现场试验

自主研发的 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器工程样机在流花 11-1 油田作业区“南海胜利号”FPSO 上进行了现场应用试验。流花 11-1 油田产出的原油在 90℃时密度为 934 kg/m³,黏度为 24.26 mPa·s,石蜡的质量含量为 10%,沥青的质量含量为 4%,是典型的高密度、高黏度、低含硫、低含蜡、低凝固点、欠饱和和环烷基生物降解程度较高的偏重质原油^[16]。流花 11-1 油田的生产工艺流程如图 2 所示,各油井采出液经水下管汇收集后输送至 FPSO 上,主要的分离工作均在 FPSO 上完成。现场应用试验中污

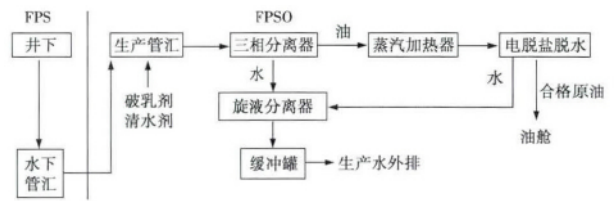


图 2 流花 11-1 油田生产工艺流程
Fig. 2 The flow chart of the LH11-1 oilfield

水的接入点为水力旋流器增压泵出口,试验时除系统已经添加的药剂外,不添加任何其他药剂。

2.1 正交试验

影响 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器分离性能的因素主要有处理量、分流比和转鼓转速等,各因素取值见表 3。在不添加任何药剂的情况下,就处理量、分流比和转鼓转速对除油率的影响开展正交试验。正交试验测试的入口含油量、水出口含油量以及分离效率的直方图如图 3 所示。由图 3 可见,随操作工艺参数的变化,分离效率呈现巨大的波动,最高分离效率大于 70%,最低分离效率低于 10%,最

表 3 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器现场应用试验关键参数表
Table 3 The key parameters of situ experiment of BIPTVAS-II voraxial separator

水平 个数	入口流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	分流比	转鼓转速/ (r·min ⁻¹)
1	2.5	0.05	1 700
2	3.0	0.07	1 900
3	3.5	0.09	2 100
4	4.0	0.12	2 300
5	4.5	0.15	2 500
6	5.0	—	2 700

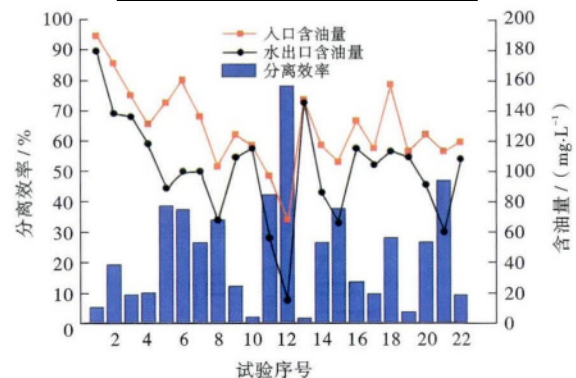


图 3 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器正交试验入口含油量、出水口含油量和分离效率

Fig. 3 The separation effective, the oil content of inlet and water outlet for orthogonal experimental of BIPTVAS-II voraxial separator

优操作工艺参数组合明显,为第12组,此时分离效率为77.9%。最优操作工艺参数组合为:入口流量 $3.5\text{ m}^3/\text{h}$ 、转速 $1700\text{ r}/\text{min}$ 、分流比15%。

2.2 单因素试验

为了更加精确地分析不同操作工艺参数组合下BIPTVAS-II型轴向涡流分离器工程样机对流花11-1油田生产污水的分离性能,拟围绕正交试验所得最优操作工艺参数组合进行单一变量试验。为使实验数据覆盖面更广,单一变量试验中各因素的水平取值是在避开正交试验中重复数据的前提下,对最优参数组合中各参数取值作进一步细化而得,细化后的操作工艺参数水平取值见表4。

表4 BIPTVAS-II型轴向涡流分离器优化后的操作参数表

Table 4 Optimized levels for operation parameters of

BIPTVAS-II voraxial separator

水平个数	入口流量取值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	分流比	转鼓转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	2.9	0.07	1400
2	3.3	0.08	1600
3	3.7	0.09	1650
4	4.1	0.11	1750
5	4.5	0.13	1800
6	5.0	0.17	2000

2.2.1 转速对分离性能的影响

保持分流比、流量为最优操作工艺参数不变,当分流比为15%、入口流量为 $3.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时,BIPTVAS-II型轴向涡流分离器入口含油量、水出口的含油量和分离效率随转速的变化曲线如图4所示。由图4可见,转速对分离性能的影响很大,且最佳转速区间较窄,当转速在 $1650\sim 1700\text{ r}/\text{min}$ 时分离效

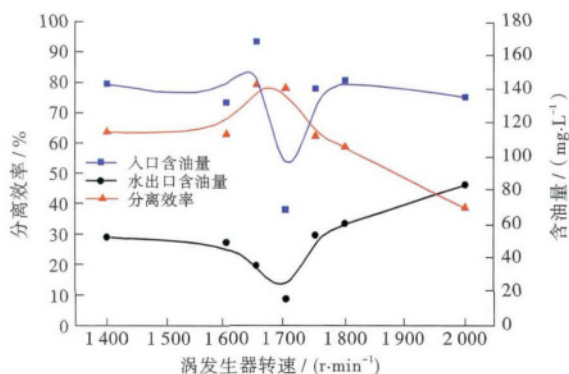


图4 BIPTVAS-II型轴向涡流分离器分离效率随转鼓转速的变化曲线

Fig. 4 The curve of separation efficiency changes with rotation velocity of BIPTVAS-II voraxial separator

率最高,最高分离效率可达80%以上;远离最佳转速区间后的分离效率迅速降低,低转速区轴向涡流分离器的分离效率较低,但相对稳定,当转速在 $1400\sim 1650\text{ r}/\text{min}$ 时分离效率维持在65%左右;而当转速高于最优转速时,分离效率随转速的增加而迅速降低,当转速为 $2000\text{ r}/\text{min}$ 时分离效率已经降至37%。

2.2.2 处理量对分离性能的影响

保持分流比、转鼓转速为最优操作工艺参数不变,BIPTVAS-II型轴向涡流分离器不同处理量下轴向涡流分离器分离效率的变化关系如图5所示。由图5可见,当处理量小于 $4.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时,此时轴向涡流分离器的水力停留时间为 2.8 s ,分离效率可稳定在80%以上,最高分离效率为85%;而当处理量超过 $4.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时分离效率迅速降低,当入口流量为 $5\text{ m}^3/\text{h}$ 时,分离效率已降至42%,降幅超过50%。与转速对分离性能的影响相比较,处理量对轴向涡流分离器分离性能的影响较小,高效分离工况下处理量的取值范围较宽,当入口流量小于 $4.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时分离效率均可达到80%以上,只需要保证分离过程的水力停留时间大于 2.8 s 即可。

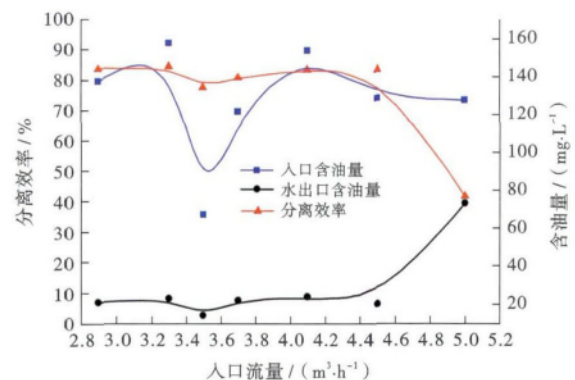


图5 BIPTVAS-II型轴向涡流分离器分离效率随流量的变化曲线

Fig. 5 The curve of separation efficiency changes with the flow of BIPTVAS-II voraxial separator

2.2.3 分流比对分离性能的影响

保持处理量、转鼓转速为最优操作工艺参数不变,BIPTVAS-II型轴向涡流分离器不同分流比下分离效率的变化曲线如图6所示。由图6可见,分离效率随分流比的增加先迅速增加而后缓慢下降,当分流比在8%~11%时分离效率较高,此时分离效率可达80%以上。增加分流比,安装在分离机筒中心处的收油管内流量增加,显然有利于汇聚于轴

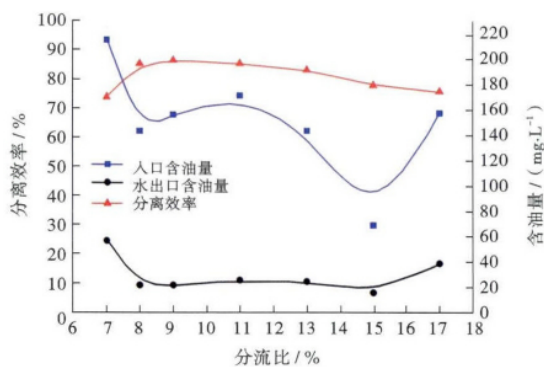


图 6 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器分离效率随分流比的变化曲线

Fig. 6 The curve of separation efficiency changes with the split of BIPTVAS-II voraxial separator

心区的油相排出,当分流比大于 8%时分离效率不再随分流比的增加而持续增加,因此在最优操作工艺参数下,分离器无法使部分溶解油和小粒径油滴向机筒轴心区汇聚,这部分油相仍然会均布在混合液中,为此仅靠增加分流比对这部分油相不产生影响。当分流比大于 10%时,分离效率呈小幅度下降趋势,不能分离的溶解油和小粒径油滴仍然均布在混合液中,因此可以认为过大的分流比会对涡流造成扰动,使已汇聚于轴心区的油相出现向机筒四周分散的可能,从而使轴向涡流分离器的分离效率降低。

2.3 稳定运行试验

根据单一变量试验结果,对正交试验所得的最优参数组合进行修正,稳定运行时的最优参数是:处理量 3.8 m³/h、转鼓转速 1 700 r/min、分流比 11%。对 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器进行稳定运行试验,运行过程中入口含油量、水出口含油量和分离效率的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可见,当入口污水含油量在 100~300 mg/L 之间变化时,出水口含油量可以保持在 16~30 mg/L 之间,平均除油率为 82.6%。在入口含油量出现较大波动时,出水口的含油量仍然较为稳定,因此对于流花 11-1 油田的生产水污水,BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器工程样机性能稳定,且分离效率较高。

表 5 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器与流花 11-1 油田现用水力旋流器性能比较

Table 5 Performance comparison of the VAS and LLHC used at LH11-1 oilfield

	分离效率 / %	入口平均含油量 / (mg·L ⁻¹)	水出口平均含油量 / (mg·L ⁻¹)	处理量 / (m ³ ·h ⁻¹)	能耗 / kW
BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器	82.6	150	26	330.00	15
水力旋流器	67.0	150	50	331.25	90

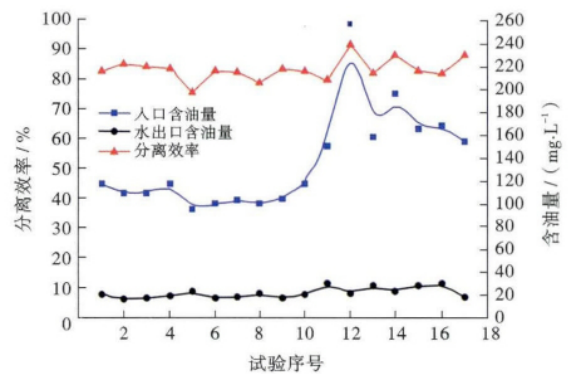


图 7 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器最优操作参数下稳定运行时入口、水出口含油量和分离效率

Fig. 7 The separation effective, the oil content of inlet and water outlet while steady run with optimum operating parameter of BIPTVAS-II voraxial separator

2.4 应用前景分析

BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器与流花 11-1 油田现用水力旋流器的性能比较见表 5,其中轴向涡流分离器的处理量和能耗是参考 EVTN 公司相关的产品给出,水力旋流器的能耗是按照安装在其入口处的增压泵计算^[17]。由表 5 可见,相同工况下,相对水力旋流器而言,BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器的能效比更低、分离效率也更高。就初次投资的建造成本而言,流花 11-1 油田现用水力旋流器为法国威立雅公司 STREAMLINER™ 型轴向入口水力旋流器,其处理量为 331.25 m³/h,每台分离器的总投资 250 万元左右;BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器为北京石油化工学院自主设计加工,当处理量为 120 m³/h 时,轴向涡流分离器及其配套附件的总成本不大于 50 万元。就运行成本而言,由表 5 可见,BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器每小时可节电 75 kW。因此,通过本次试验结果和流花 11-1 油田现用水力旋流器的运行情况比较可见,轴向涡流分离器的国产化应用有巨大市场前景,有以下潜在应用:

1) 代替斜板除油器,以减小油田特别是海上油田生产平台上水处理设备的总占地面积,减小总的地面建设和设备的投资。

2) 代替现有的水力旋流器,相同入口条件下,水相出口含油量更低,且轴向涡流分离器可实现真正的内联,从而可以大幅度减小水处理设备的占地面积,降低能耗,减小投资。

3) 扩容时,利用占地面积更小的轴向涡流分离器与水力旋流器并行,可以增加油田水处理能力。

4) 使用轴向涡流分离器对井液进行预分离,降低三相分离的负荷。

5) 由于其占地面积小、重量轻,可以直接安装在船上,用于处理轮船的压舱水。

6) 用于边际小断块油田撬装化处理设备中的污水处理,以减小撬装设备的总体积和总造价。

3 结论

1) BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器可以高效、稳定地处理流花 11-1 油田的生产污水,当入口含油量在 100~300 mg/L 之间时,除油效率可达 80% 以上,最高除油效率可达 91.8%,水出口含油量可稳定在 30 mg/L 以下。

2) 操作工艺参数对轴向涡流分离器的分离性能有较大影响,而转速对分离性能影响最大,高效分离的转速变化区间很窄,仅当转速在 1 650~1 700 r/min 之间时轴向涡流分离器才能实现高效分离。流量的影响相对较小,就 BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器而言,只需要保证流量小于 4.5 m³/h 即可,此时水力停留时间为 2.8 s。当分流比在 10% 附近时,BIPTVAS-II 型轴向涡流分离器的分离效率较高,较大的分流比会造成出口涡流的扰动,不利于提高其分离效率。

3) 与常规水力旋流器相比较,轴向涡流分离器具有分离效率高、运行成本低、尺寸小、可直接安装在管线上等优点,且其初次投入成本也较低,相关产品有较大市场价值。

参 考 文 献

- [1] XIAO A J, WHITE R, WANG S, et al. Inline water separation (IWS) field prototype development and testing[C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 2010: 1-11.
- [2] SIMMONS M J H, KOMONIBO E, AZZOPARDI B J, et al. Residence time distributions and flow behaviour within primary crude oil-water separators treating well-head fluids[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82: 1383-1390.
- [3] AIOTAIBI M, AL-JABRI S M, AL-KHALEDI S. Future challenges due to the increase produced water in upstream of oil and gas industry[C]. SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference. Mishref, Kuwait, 2013: 1-8.
- [4] HANNISDAL A, WESTRA R, AKDIM M R. Compact separation technologies and their applicability for subsea field development in deep water[C]. OTC 23223, 2012.
- [5] SCHOOK R, THIERENS D. Debottlenecking of mature field production through the use of very compact and efficient separation equipment[C]. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2011.
- [6] VERBEEK P, AL-MOOSANI A. In-line separation pilot to support produced water injection[C]. Petroleum Technology Conference. Doha, Qatar, 2009: 1-7.
- [7] FANTORFT R, MOHAMED R A, MIKKELSEN R, et al. Revolutionizing offshore production by inline separation technology[C]. Annual Technical Conference and Exhibition. Florence, Italy, 2010: 1-12.
- [8] KOHMUENCH J N. Improving efficiencies in water-based separators using mathematical analysis tool[D]. Blacksburg: the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [9] SCHOOK R, ASPEREN V V. Compact separation by means of inline technology[C]. Middle East Oil and Gas Show and Conference, 2005: 1-7.
- [10] ALBERTO D B, MICHAEL M A. Apparatus with voraxial separator and analyzer[P]. United States: USA 6248231B1, 2001-06-19.
- [11] RICHTER H E. Method and apparatus for separating fluids having different specific gravities[P]. United States Patent, US 5084189, 1992-01-28.
- [12] DIBELLA A, ANTHONY M. Voraxial filtration system with self-cleaning auxiliary filtration apparatus[P]. United States Patent, US 7727386 B2, 2010-06-01.
- [13] MICHAEL M, ALBERTO A, BELLA D. Voraxial filtration system with self-cleaning auxiliary filtration apparatus[P]. United States Patent, US 0109684 A1, 2005-05-26.
- [14] SHELDON C. Separator tested for used in offshore oil production[N/OL]. Industrial news[2004-05-08]http://www.filtsep.com.
- [15] WESTRA R, IBOUHOUTEN B, HENRIK B, et al. Qualification of inLine dewatering technology[C]. SPE Offshore Oil and Gas Conference and Exhibition. Aberdeen, UK, 2013: 1-11.
- [16] 郑书忠,滕厚开,王素芳.流花油田水处理技术的开发与应用[J].中国工程科学,2011,13(5):41-49.
- [17] Zheng Shuzhong, Teng Houkai, Wang Sufang. The exploitation and application of water treatment technology in Liuhua Oilfield[J]. Engineering Science, 2011, 13(5): 41-49.
- [17] PERRY A F. New type of water separator could help fill multiple oilfield needs[J]. World Oil, 2005, 12: 49-52.

收稿日期:2015-07-19 改回日期:2015-08-30

(编辑:叶秋敏)