



海上平台生产水处理的工业侧线试验研究

熊 泰¹, 代品一¹, 孟全意², 郑文强², 侯 旺², 杨 强¹

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237;

2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司惠州油田, 广东深圳 518067)

[摘要] 设计了组合纤维聚结(CFC)油水分离器、自适应微气浮旋流除油(AMFD)高效分离器 2 型油水分离设备,并在南海某平台进行了为期 36 d 的工业侧线试验,以验证新型油水分离技术针对海上平台生产水的处理效果。试验结果表明:CFC 油水分离器设备入口平均含油 341.03 mg/L,出口平均含油 9.43 mg/L,平均分离效率 97.2%,且可取消化学破乳剂的使用,除油效率高、设备体积小,可用于替代“水力旋流器+撇油罐”,具备向各类有生产处理需求的海上油田平台进行推广应用的價值;AMFD 高效分离器与生产分离器串联,当流量小于 5 m³/h 时,进口平均含油 364.4 mg/L,出口平均含油 19.0 mg/L,平均分离效率 94.4%,通过重力沉降法计算得出 AMFD 高效分离器和生产分离器出口水相油滴的中位粒径分别为 13.0 μm 和 14.5 μm,即 AMFD 高效分离器对于分散油分离效果较好,可应用于油水快速粗分离。

[关键词] 组合纤维聚结;自适应微气浮旋流除油;海上平台;油水分离;侧线试验

[中图分类号] X741 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)07-0161-07

Industrial sideline test of production water treatment on the offshore platform

XIONG Tai¹, DAI Pinyi¹, MENG Quanyi², ZHENG Wenqiang², HOU Wang², YANG Qiang¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Huizhou Oilfield, Shenzhen Branch, CNOOC Ltd., Shenzhen 518067, China)

Abstract: Two oil-water separation equipments containing combined fiber coalescer (CFC) oil-water separator equipment and adaptive mini-swirl flotation deoil (AMFD) high-efficiency separator were designed, and a 36-day industrial sideline test was carried out on a platform in the South China Sea to study the treatment effect of the new oil-water separation technology for the water produced by offshore platforms. The results showed that, CFC oil-water separator equipment had an average inlet oil content of 341.03 mg/L, an average outlet oil content of 9.43 mg/L, and an average separation efficiency of 97.2%, and the use of chemical demulsifiers could be eliminated. It could be used to replace “hydrocyclones+skimmers”, and had the value of being promoted and applied to various offshore oilfield platforms with production and processing needs because of its high production efficiency, small equipment size. AMFD high-efficiency separator was connected in series with the production separator. When the flow rate was less than 5 m³/h, the average inlet oil content was 364.4 mg/L, the average outlet oil content was 19.0 mg/L, and the average separation efficiency was 94.4%. Calculated by gravity sedimentation method, the median diameters of water-phase oil droplets at the outlet of AMFD high-efficiency separator and production separator were 13.0 μm and 14.5 μm, respectively, that was, AMFD high-efficiency separator had a good effect on the separation of dispersed oil, and could be used for rapid and coarse separation of oil and water.

Key words: combined fiber coalescer; adaptive mini-swirl flotation deoil; offshore platform; oil-water separation; sideline test

海洋油气资源开发是我国海洋强国战略的重要组成部分,关系国家能源安全^[1]。《中国海洋石油集

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52025103)

团有限公司 2020 可持续发展报告》指出,2020 年中国海油国内油气产量首次突破 6 500 万 t,其中国内原油同比增产 240 万 t,占全国原油增幅的 80% 以上,海上油气生产已经成为重要能源增长极。我国近海大约有 200 余个石油开采平台,生产水是油气开采最大的副产物。排海生产水从 21 世纪初的不足 5 000 万 t/a,增长到目前每年超 2 亿 t,如不达标处理,会对海洋生态环境造成较大威胁^[2]。

随着我国对海洋资源的不断开发,对石油需求量的不断加大,各平台现有的生产量已无法满足实际需求,石油二次开采加速,导致采出液的含水率越来越高,部分油田采出液含水率达到 90% 以上^[3]。过高的含水率增加了平台负荷,提高了处理流程的复杂性,进而导致生产水排海指标的下滑。此外,由于我国各油田地质条件、开发方式、注水水质、油层改造措施、技术工艺等均不相同,导致各油田的采油污水性质差异较大^[4],且部分年久的海上平台生产水处理工艺还存在依赖进口的问题。为解决现有油水分离设备体积大、效率低以及应用面窄等问题,本研究设计了小型 CFC 组合纤维聚结油水分离器^[5]和 AMFD 高效微气浮除油分离器^[6],并前往中海石油南海某海上平台进行连续性的小规模工业侧线试验,以验证设备实际工业应用的油水分离性能。

1 油水分离侧线试验

1.1 CFC 油水分离器侧线试验

本试验拟探究 CFC 油水分离器用于油水精细分离的性能,尝试用 1 台 CFC 油水分离器取代“水力旋流器+撇油罐”两级设备在不同流量下连续运行,达到经一级装备分离后生产水可直接排海的目的。

CFC 油水分离器装置主要内件为安装于设备前端的异质纤维聚结模块,该模块由亲水疏油纤维和疏水亲油纤维以一定比例编织成 X 型或 Ω 型,其中聚四氟乙烯(PTFE)纤维用作亲油纤维,银纤维用作高疏油纤维,尼龙纤维用作低疏油纤维^[7-9]。单台设备设计处理量 5 m³/h,设计压力 1.25 MPa,总容积 0.25 m³,装置示意图见图 1。

异质纤维聚结模块的基本原理为微细分散油在亲油纤维表面的快速聚并分离以及乳化油在亲/疏水异质纤维交叉节点处的极性受力破乳。如图 2 所示,水中微细分散油滴在亲油纤维上发生碰撞捕获-快速聚并长大,随着大油滴的脱离,纤维表面得以更新,如此

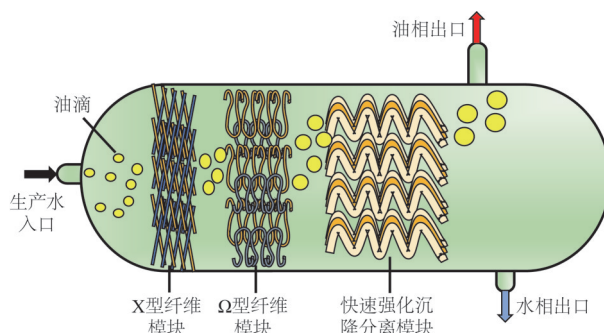


图1 CFC油水分离器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of CFC oil-water separator device

循环,实现油滴的快速聚并分离;油水乳化液滴在流经异质纤维交叉节点时,因液滴在亲油、亲水纤维上的极性受力差异,油滴向亲油性纤维迁移,水滴向亲水性纤维迁移,实现乳液的高效物理破乳。

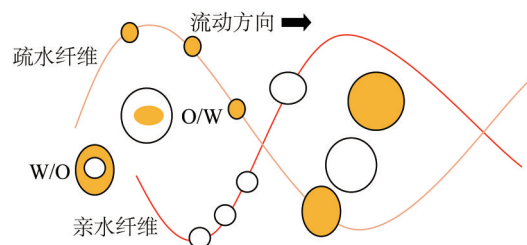


图2 纤维聚结分离原理

Fig. 2 Principle of fiber coalescence and separation

CFC 油水分离器侧线试验流程见图 3。

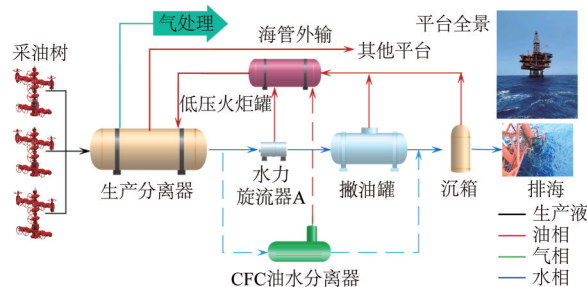


图3 CFC油水分离器侧线试验流程

Fig. 3 Sideline test process of CFC oil-water separator

如图 3 所示,从生产流程中分流出一部分生产水进行 CFC 油水分离器试验,设备入口与生产分离器出口相连,出口与沉箱相连,分别在设备进出口取样测定水中油含量,考察设备油水分离效果。

1.2 AMFD 高效分离器侧线试验

本试验拟探究一级 AMFD 高效分离器用于油水粗分离的性能,为后续结构优化作参考,以达到一级或两级 AMFD 高效分离器处理后生产水直接排海的目的。

如图4所示,AMFD高效分离器采用旋流离心分离式设计,一根主管带三根副管、多主管并联形成分离模块,用于实现气、固、液三相的快速分离分散。单台设备设计最大处理量 $5\text{ m}^3/\text{h}$,设计压力 1.38 MPa ,总容积 0.157 m^3 。AMFD高效分离器基于粒径分级分离,主体结构分为主分离腔及副分离腔2个部分。油水气从主分离腔的底部进入分离器内部,在旋转叶片作用下,形成旋转流运动,大粒径气泡、油滴在旋流作用下被快速分离,从主分离腔的上部排出;而未分离的小粒径油滴和气泡进入旋转半径较小的副分离腔,利用旋流腔体内形成的压力梯度场(边壁压力高,中心压力低),在径向截面内形成压力梯度场,而在溢流口形成负压场,在压力梯度场和离心场的综合作用下,使气泡携油从边壁区域运动到中心负压场,进而实现液体脱气除油过程^[10]。

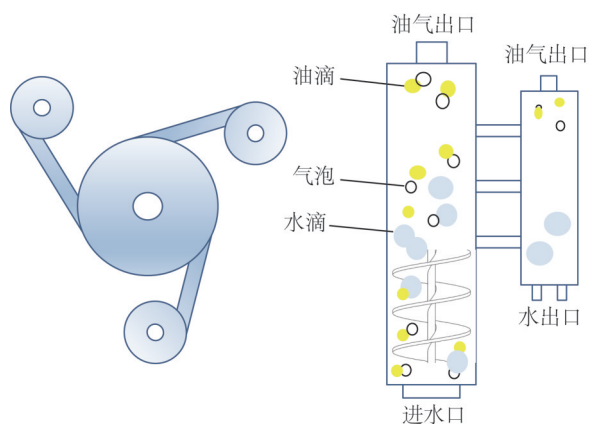


图4 AMFD内件主管装置示意

Fig. 4 Schematic diagram of AMFD inner core tube device

AMFD高效分离器侧线试验流程见图5。

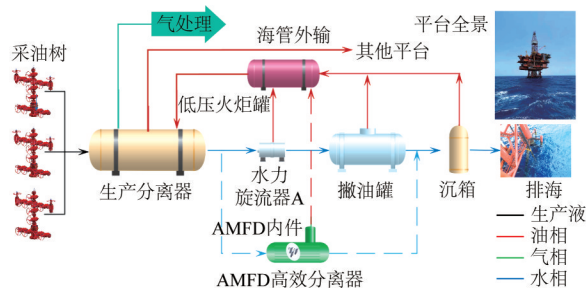


图5 AMFD高效分离器侧线试验流程

Fig. 5 Sideline test process of AMFD high-efficiency separator

如图5所示,此阶段试验中,用一台AMFD高效分离器进行生产水侧线试验,由生产分离器连接水力旋流器的管线引出小部分生产水接设备入口,将

设备出口再汇入此沉箱中,保证排海水水质免受污染。

1.3 油含量测试

参照《海上碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》(Q/HS 2042—2008),使用 wilks Infra Cal2 TOG/TPH Analyzer测油仪测量生产水中总石油烃含量。

1.4 除油率计算

除油率 E 的计算见式(1)。

$$E = \left(1 - \frac{\omega_{\text{out}}}{\omega_{\text{in}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: E ——除油率,%;

ω_{in} ——设备入口生产水中油的质量浓度, mg/L ;

ω_{out} ——设备出口生产水中油的质量浓度, mg/L 。

1.5 油滴粒径计算

由于平台上条件有限,无法用精密的仪器来直接测量水中油滴的粒径分布,因此采用重力沉降法^[11]对其进行间接测量。通过测量不同时间下同一高度处样品水中油含量,得到油含量与时间 t 的关系图,之后再根据式(2)来推算油含量与粒径的关系,最终经过运算及作图得到油滴粒径频率分布曲线。

$$d = \sqrt{\frac{18h\mu}{t\psi\Delta\rho g}} \quad (2)$$

式中: d ——油滴粒径, μm ;

h ——取样点距液面高度,取 0.1 m ;

μ ——连续相动力黏度,取 $1.005 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$;

t ——取样时间, s ;

ψ ——流变系数,取 1.36 ;

$\Delta\rho$ ——两相密度差,取 $\rho_{\text{水}} = 1 \times 10^3\text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{油}} = 0.85 \times 10^3\text{ kg/m}^3$;

g ——重力加速度,取 9.81 N/kg 。

2 试验结果与讨论

2.1 CFC油水分离器侧线试验效果

采用CFC油水分离器进行了为期 14 d 的连续性生产水分离试验。试验期间,设备运行稳定,水处理效果较佳,详细数据见图6。

由图6可知,在 $3 \sim 7\text{ m}^3/\text{h}$ 处理量范围内进行试验,设备入口平均含油 341.03 mg/L ,出口平均含油 9.43 mg/L ,平均除油率 97.2% 。

相同取样时间段,对平台现有水力旋流器出口水相、外排水(撇油罐出口水相)进行取样,油含量化验分析结果与CFC油水分离器进出口水中油含量进行对比,结果见图7。

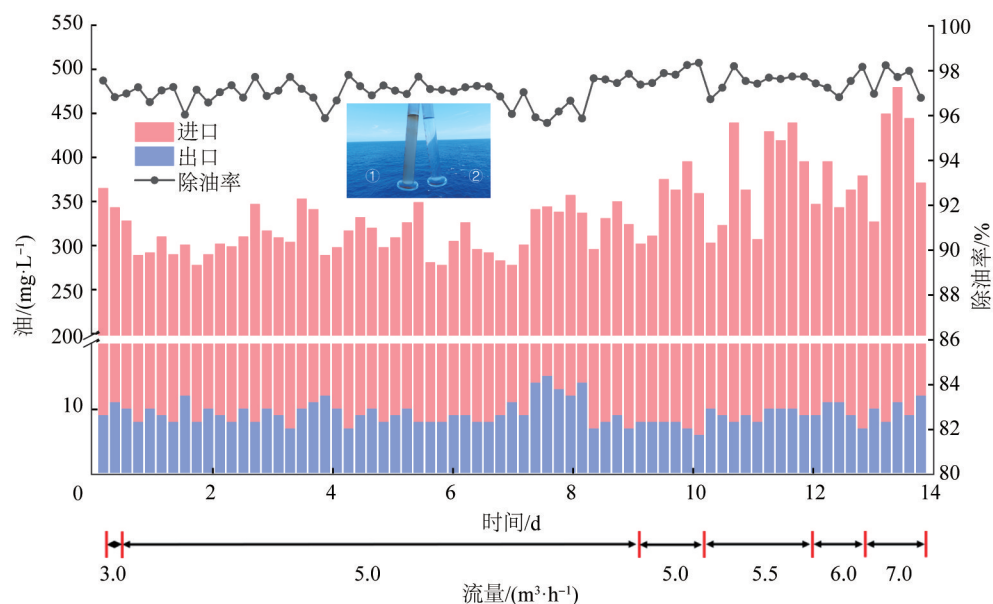


图6 CFC油水分离器进出口水相油含量

Fig. 6 Oil content in inlet and outlet water of CFC oil-water separator

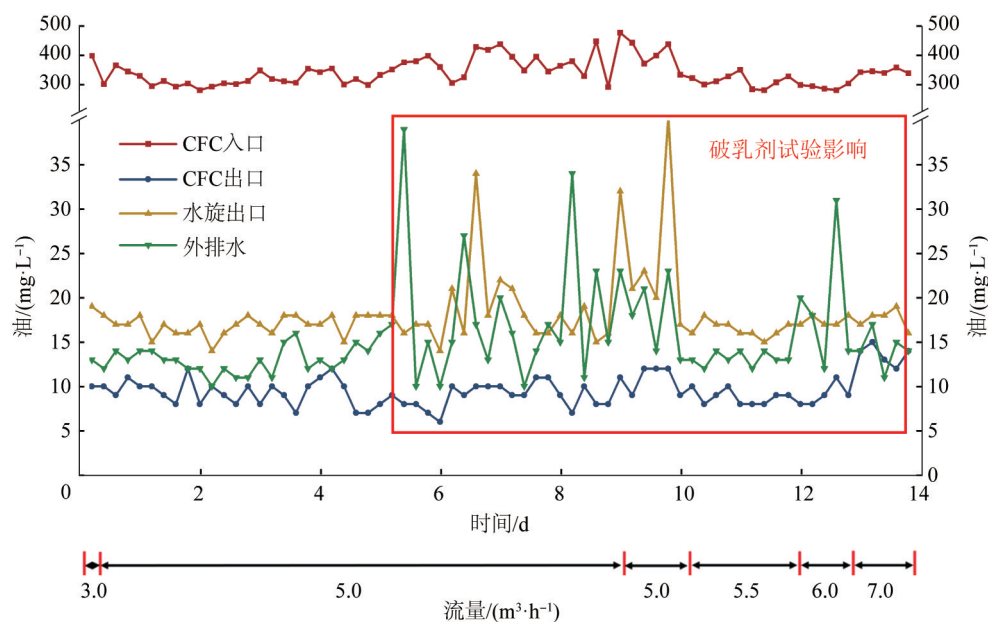


图7 CFC油水分离器进出口、水旋出口及外排水油含量

Fig. 7 Oil content of inlet and outlet, hydrocyclone outlet and external water of CFC oil-water separator drainage

由图7可知,水力旋流器出口水相平均含油18.25 mg/L,外排水平均含油15.33 mg/L。CFC分离器出口水与平台水力旋流器出水、外排水相比较,平均油含量更低,且在60%~120%处理流量下,CFC分离器出口油含量均低于外排水油含量,仅在流量为7.0 m³/h时,数据存在异常,分析原因可能是取样时操作不当。

图7中红框内数据异常原因为其他平台采出液

进行停用破乳剂试验,致使结果受到影响。在未停用破乳剂前,生产分离器出口水相平均含油321.08 mg/L,水力旋流器出口水相平均含油17.04 mg/L,外排水平均含油13.11 mg/L,CFC分离器出口水相平均含油9.31 mg/L,数据曲线相对平稳波动。在停用破乳剂试验过程中,生产分离器出口水相平均含油352.95 mg/L,水力旋流器出口水相平均含油18.98 mg/L,

外排水平均含油 16.67 mg/L, CFC 分离器出口水相平均含油 9.62 mg/L。与破乳剂试验前相比, 停加破乳剂后, 生产分离器出口水相、水力旋流器出口水相以及外排水油含量数值均明显升高, 数据曲线波动异常, 偶尔外排水油含量曲线与水力旋流器出口水相油含量曲线交叉, 分离效率受影响较大, 而 CFC 分离器水相出口含油在破乳剂试验前后仅有 0.31 mg/L 的变化, 几乎不受停用破乳剂试验的影响。因此, 该技术可以取消破乳剂的使用, 实现不添加化学药剂的绿色处理, 表明高效的物理分离设备可以增强甚至取代化学法处理^[12]。

图8为试验流量为 5.0 m³/h 时的生产水取样实物图, 图中①、②、③、④分别为 CFC 分离器入口和出口、水力旋流器出口以及外排水出口的水样, 可以明显看出 CFC 分离器出口水相变得澄清透明, 与现有平台设备处理后的水相无异。

综上, 一级 CFC 油水分离器可用于取代“水力旋流器+撇油罐”两级装置串联, 且可取消化学破乳剂的使用, 分离后生产水油含量远低于国家一级海域月平均生产水排放标准 (≤ 20 mg/L)。

2.2 AMFD 高效分离器侧线试验效果

采用 AMFD 高效分离器进行了 5 d 的连续性生产水分离试验, 运行结果见图 9。

试验过程中, AMFD 高效分离器处理流量从 3.0 m³/h 逐渐提升至 8.0 m³/h。如图 9 所示, 当流量小于 5 m³/h 时,



图8 生产水取样现场图

Fig. 8 Site drawing of production water sampling

设备有较佳的处理效果, 其进口平均含油 364.4 mg/L, 出口平均含油 19.0 mg/L, 平均分离效率 94.4%。

图10为 AMFD 高效分离器进出口、水旋出口和外排水油含量的对比曲线, 可以看出, 低流量下设备出口与现工艺条件下的外排水油含量基本保持一致, 皆低于国家一级水域排海标准, 同时, AMFD 高效分离器水相停留时间仅为平台原水处理流程中“水力旋流器+撇油罐”的 77.5%。而流量升高后设备出口油含量明显增大、除油效率显著降低, 无法达到国家生产水排放标准。因此, 在较佳流量下可采取一级 AMFD 高效除油器进行油水的快速粗分离, 从而达到减少分离时间和设备占地面积的目的。

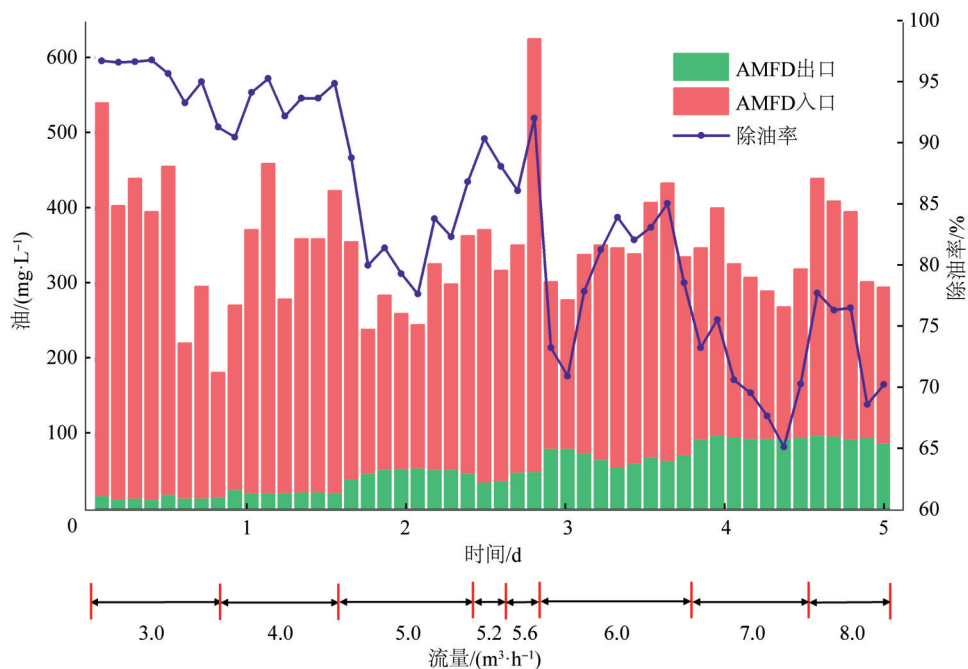


图9 AMFD 高效分离器进出口水相油含量

Fig. 9 Oil content in inlet and outlet water of AMFD high-efficiency separator

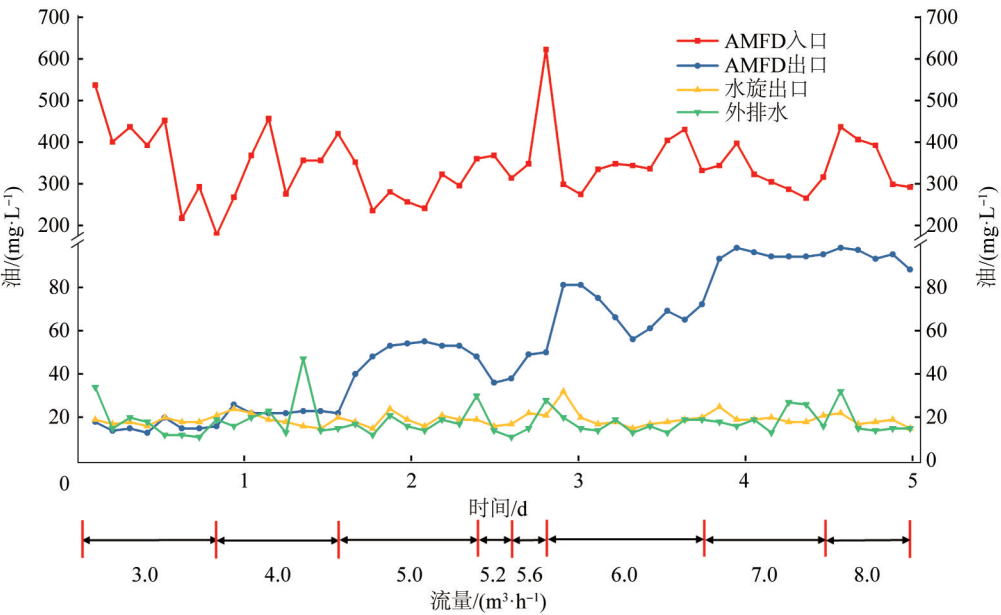


图 10 AMFD 高效分离器进出口、水旋出口、外排水水相油含量

Fig. 10 Oil content of inlet and outlet, hydrocyclone outlet, external drainage water of AMFD high-efficiency separator

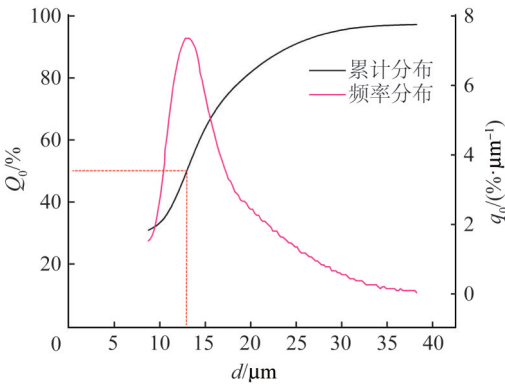
2.3 油滴粒径分析

取流量为 10 m³/h 时 AMFD 高效分离器进出口的水样,采用沉降法测量其油滴粒径。不同时间下水相油含量的原始数据见表 1。

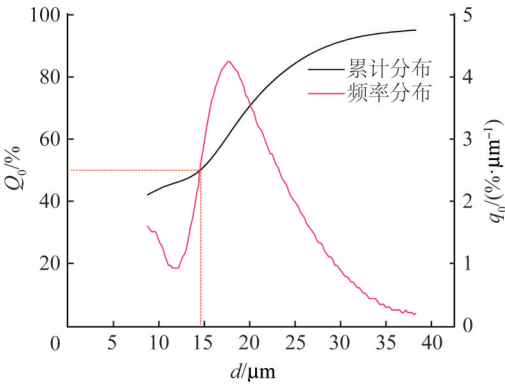
表 1 不同时间下水相油含量
Table 1 Oil content in water at different times

时间/min	油/(mg·L ⁻¹)	
	AMFD 高效除油器入口	AMFD 高效除油器出口
0	380	164
10	360	159
41	252	131
70	189	99
130	170	58
190	160	51

由表 1 数据并结合式(2)可得油含量与粒径 d 的关系曲线,进而可获得粒径累计体积(Q_0)与粒径(d)的关系曲线,即图 11 中的粒径累计分布曲线,再对该曲线进行求导,得到对应的图 11 中的粒径频率分布曲线,其中 q_0 表示单一粒径对应的体积分数^[9]。由图 11 可知,AMFD 高效分离器和生产分离器出口水相油滴的中位粒径分别为 13.0 μm 和 14.5 μm ,说明此平台生产水中油是以分散油为主,且 AMFD 高效分离器对此细小粒径的分散油有良好的分离效果。



(a) AMFD 进口



(b) AMFD 出口

图 11 AMFD 进出口水相油滴粒径分布

Fig. 11 Oil droplet size distribution of AMFD inlet and outlet water phase

3 结论

(1)从生产分离器水相出口接入CFC油水分离器试验装置,在生产水平均含油341.03 mg/L的条件下,其出口水相平均含油9.43 mg/L,低于当前平台外排水中油的质量浓度15.33 mg/L,平均分离效率97.2%,且可取消化学试剂的使用,因此该技术装置可替代原工艺中水力旋流器和撇油罐串联工段。

(2)从生产分离器水相出口接入AMFD高效分离器试验装置,在流量小于5 m³/h,设备进口生产水平均含油364.4 mg/L的条件下,设备出口水相平均含油19.0 mg/L,平均分离效率94.4%。且AMFD高效分离器水相停留时间仅为平台原水处理流程中“水力旋流器+撇油罐”的77.5%条件下,以一级设备取代“水力旋流器+撇油罐”两级设备串联,外排水油含量低于国家一级水域排海标准。

(3)运用重力沉降法计算可得,AMFD高效分离器和生产分离器出口水相油滴的中位粒径分别为13.0 μm和14.5 μm,表明AMFD高效分离器针对此细小粒径分散油的分离效果明显。

(4)CFC油水分离技术是一种新型高效的生产水除油技术,适用于空间狭小、承重能力受限的海上油田生产水快速深度除油处理过程,环保效益显著,是推动绿色海洋环保装备国产化发展的重大突破,具备向各类有生产处理需求的海上油田平台进行推广应用的价值。

参考文献

- [1] 白天依. 实施海洋强国战略必须加强海洋开发能力建设[J]. 中州学刊, 2019(4): 85-90.
BAI Tianyi. Implementing the marine power strategy must enhance marine development capability [J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2019(4): 85-90.
- [2] 陈家庆, 刘涛, 王春升, 等. 海上油气田采出水处理技术的现状与展望[J]. 石油机械, 2021, 49(7): 66-76.
CHEN Jiaqing, LIU Tao, WANG Chunsheng, et al. Development status and prospect of produced water treatment technology for offshore oil & gas field[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(7): 66-76.
- [3] 田洋洋, 崔之健, 孙明龙, 等. 高含水采出液T形管分离器的流场数值模拟[J]. 石油机械, 2021, 49(3): 132-138.
TIAN Yangyang, CUI Zhijian, SUN Minglong, et al. Numerical simulation of flow field in T-junction separator of produced liquid with high water content[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(3): 132-138.
- [4] 王振伍, 钟小侠. 生产水处理新工艺在海洋平台的应用[J]. 石油和化工设备, 2015, 18(4): 98-99.
WANG Zhenwu, ZHONG Xiaoxia. Application of new production water treatment technology in offshore platform[J]. Petro & Chemical Equipment, 2015, 18(4): 98-99.
- [5] 刘懿谦, 孙盖南, 杨强. 海上油气田平台新型生产水高效除油技术的应用研究[C]//2018中国环境科学学会科学技术年会论文集: 第一卷. 安徽合肥: 中国环境科学学会, 2018: 562-567.
LIU Yiqian, SUN Gainan, YANG Qiang. Research on the application of new type of water-efficient oil removal technology at sea oil and gas field platforms[C]//Proceedings of 2018 CEST Annual Conference: Part I. Anhui Hefei: Chinese Society for Environmental Sciences, 2018: 562-567.
- [6] 王亚儒, 卢大雁, 张金鹏, 等. 高效自适应微气浮除油技术在海上重质油田生产水处理中的应用[J]. 石油天然气学报, 2020, 42(2): 99-106.
WANG Yaru, LU Dayan, ZHANG Jinpeng, et al. Application of highly efficient adaptive mini-swirl flotation deoil technology in produced water treatment of offshore heavy oil-field[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2020, 42(2): 99-106.
- [7] 杨强, 许萧, 卢浩, 等. 一种适用于油水深度分离的Ω型纤维编织方法: CN103952852B[P]. 2015-12-09.
YANG Qiang, XU Xiao, LU Hao, et al. An Ω-type fiber weaving method suitable for deep separation of oil and water: CN103952852B[P]. 2015-12-09.
- [8] 杨强, 王朝阳, 卢浩, 等. 一种适用于油水分离的X型纤维编织方法: CN103952853B[P]. 2015-08-26.
YANG Qiang, WANG Chaoyang, LU Hao, et al. An X-type fiber weaving method suitable for oil-water separation: CN 103952853B[P]. 2015-08-26.
- [9] LU Hao, PAN Zhicheng, WANG Hualin, et al. Fiber coalescence treatment of oily wastewater: A new theory and application[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 412: 125188.
- [10] 王朝阳, 杨强, 许萧, 等. 旋流脱气性能影响因素的CFD模拟[J]. 化工进展, 2015, 34(6): 1569-1575.
WANG Chaoyang, YANG Qiang, XU Xiao, et al. CFD simulation of influence factors of degassing performance of hydrocyclone [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(6): 1569-1575.
- [11] 刘森, 杨强, 卢浩, 等. 重力沉降法测定水-柴油乳液粒径分布[J]. 中国测试, 2016, 42(6): 50-53.
LIU Sen, YANG Qiang, LU Hao, et al. Determination of water-diesel emulsion particle size distribution by gravity sedimentation method[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(6): 50-53.
- [12] 卢浩, 刘懿谦, 代品一, 等. 油水强化分离技术[J]. 化工进展, 2020, 39(12): 4954-4962.
LU Hao, LIU Yiqian, DAI Pinyi, et al. Process intensification technologies for oil-water separation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(12): 4954-4962.

[作者简介] 熊泰(1999—), 硕士. E-mail: ecust_xt@163.com. 通讯作者: 杨强, 教授. E-mail: qyang@ecust.edu.cn.

[收稿日期] 2022-05-07(修改稿)