

# 新型高效旋流气浮污水处理技术研究

魏丛达<sup>1</sup>, 张健<sup>2</sup>, 吴奇霖<sup>1</sup>, 许晶禹<sup>2\*</sup>, 吴应湘<sup>2</sup>

(1.中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518067;

2.中国科学院力学研究所, 北京 100190)

通讯作者 E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

**摘要:** 伴随原油开采中污水量的不断增加及其排放指标的提高, 对含油污水的处理技术提出更高的要求, 气浮处理技术以低能耗、效率高等优势成为研究和应用的重点方向。针对气浮污水处理技术的基本理论, 分别从微气泡的生成方式、高效旋流气浮的处理工艺和流场特征等方面, 结合前期在高效管道式分离技术研究中取得的成果, 自主研发新型的高效旋流气浮污水处理技术和装置, 并设计加工形成符合工业应用标准的样机。现场测试研究中, 对设计加工的样机按照实际工况进行连续运行和测试, 得出经处理后水中含油率可以降至 10mg/L 以内, 并分别给出了处理量和絮凝剂添加量等因素对污水处理性能的影响规律。

**关键词:** 旋流气浮; 污水处理; 含油污水; 现场测试

## 1 引言

海洋石油平台排海的生产废水中含油率要尽可能低, 以满足日益严格的环保要求, 另一方面, 为响应国家号召, 实现绿色节能生产, 研究新型且集能耗低、处理效率高等优点于一体的技术和方法降低采油生产废水中的油含量具有重要的意义。目前, 污水处理技术和方法主要有重力分离、离心分离、气浮、过滤和生物处理等, 各项处理技术中, 气浮污水处理技术以其自身的多项优点成为目前研究的热点, 石油化工含油污水处理中, 常采用的气浮方法有: 引气气浮和溶气气浮等。但随着对含油污水处理要求的提高和处理量的增大, 传统气浮装置越来越难以满足生产污水处理的要求。

本研究中, 针对气浮污水处理技术的基本理论, 分别从微气泡的生成方式、高效旋流气浮的处理工艺和流场特征等方面, 结合前期在管道式分离技术研究中取得的成果, 以及油水乳状液方面的研究, 自主研发新型的高效旋流气浮污水处理技术和装置, 并设计加工形成符合工业应用标准的样机进行现场测试和分析, 对新型高效气浮装置的整体工艺和处理性能进行系统的分析和优化。

## 2 新型高效旋流气浮污水处理工艺流程设计

基于气浮技术的除油机理，将旋流场和气浮技术的结合能够有效增加微气泡和油滴的黏附机率，提高含油污水的处理效率。研究中，结合管道式分离技术的研究成果，以提高处理效率和指标为出发点，分别对旋流场的形成和气浮微气泡的生成等技术进行系统的研究和筛选。

图 1 给出了自主研发的新型高效旋流气浮污水处理系统的原理流程，其主要由导流片型管道式分离器、溶气泵式气浮装置和微米孔板气浮装置构成。从图中可以看出，需处理含油污水首先进入导流片型管道式分离器，高含油的混合液经分离器的出油口流出，初步处理后的污水进入溶气泵式气浮装置罐体内，并通过对分离器的出水口采用切向的方式，在罐体内形成稳定旋流场。然后，溶气泵气浮装置通过生成的微气泡，及形成的旋流场对污水进行处理，分离出的油相和少量的气体经罐体顶部的收油装置和出油口流出，处理后的水相由罐体下部的出水口流出，进入下一级微米孔板气浮装置。最终，微米孔板气浮装置通过切向入口形成的旋流场和微米孔板生成的气泡对污水进行进一步的处理，经处理后的油相和气体经罐体顶部的收油装置和出油口管路流出，达标的水相进行直接外排或油井回注，完成含油污水的处理。

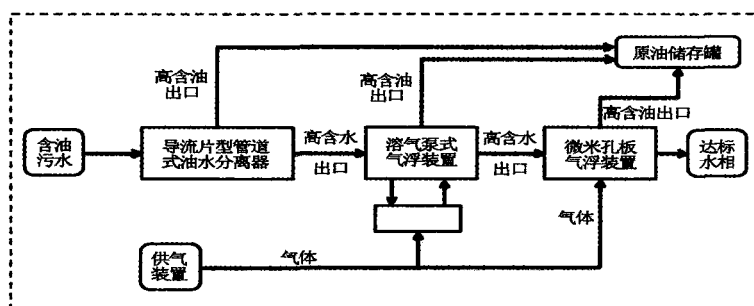


图 1 新型高效旋流气浮污水处理原理流程

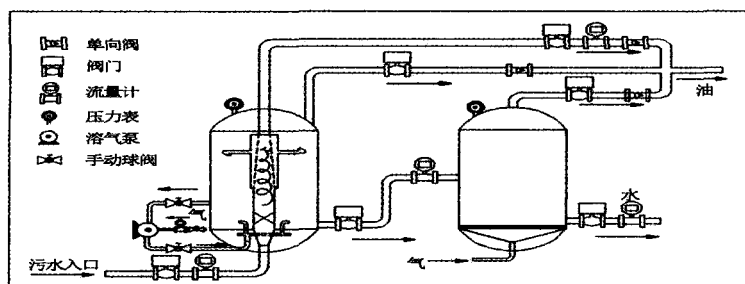


图 2 新型高效旋流气浮污水处理工艺流程图

根据上述自主研发的新型高效旋流气浮污水处理系统的原理流程图，进一步提高气浮处理技术的效率和指标，同时，充分考虑气浮装置的体积和能耗等因素，对新型高效旋流

气浮污水处理的工艺流程进行优化设计。图 2 为新型设计的高效旋流气浮污水处理系统的工艺流程图,从图中可以看出,导流片型管道式分离器置于第一级气浮装置的内部,实现紧凑型设计,且切向除水口的开设方式可以直接用于在气浮罐体内产生旋流场,实现旋流气浮的工作形式。另一方面,溶气泵气浮装置的注气方式采用轴向多分支管设计,有效实现生成微气泡在罐体内的均匀分布,提高气浮污水处理的效率和指标。

基于上述的工艺流程设计,结合工业生产现场的污水参数,自主设计加工一套适用于工业生产线的新型旋流气浮污水处理装置,设计处理量为  $20\text{m}^3/\text{h}$ ,溶气泵气浮装置和微米孔板气浮装置罐体的内径均为  $1\text{m}$ 、高度为  $1.8\text{m}$ 。然后,采用现场测试的方法对新型旋流气浮污水处理装置的工作性能进行系统的分析。

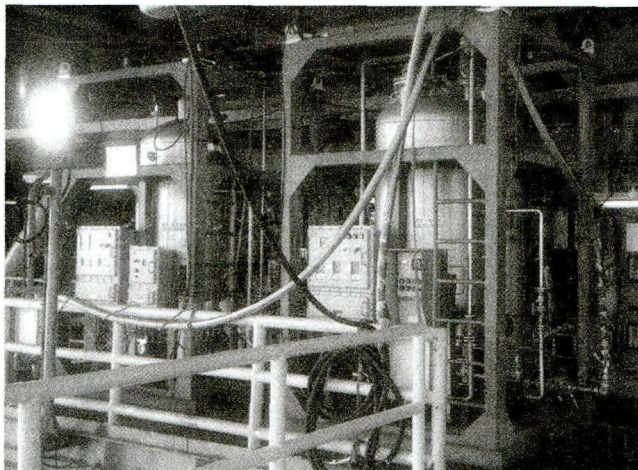


图 3 高效旋流气浮装置现场安装

### 3 工业样机现场测试分析

基于上述的研究成果和海上采油平台的应用环境,自主设计加工一套高效旋流气浮污水处理装置,并配备流量调节和控制设备,相应的工艺流程和电气设备均取得中国船级社的质量认证。图 3 为设计加工的新型高效旋流气浮装置的撬装结构,以及在南海陆丰采油平台的安装情况。气浮装置的入口连接至生产现场三相分离器的出水口,压力约为  $1.0\text{MPa}$ ,温度约为  $95^\circ\text{C}$ ,流量为  $0\sim 25\text{m}^3/\text{h}$ ,可通过阀门进行连续调节;气浮装置的出水口连接至生产现场的开排灌,沉降后进行排海处理;气浮装置的出油口连接至废油回收罐,罐体压力约为  $20\text{kPa}$ 。数据分析中,除油效率 ( $\eta$ ) 定义为:

$$\eta = \frac{\varepsilon_{o,in} - \varepsilon_{o,out}}{\varepsilon_{o,in}} \times 100 \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_{o,in}$  为气浮装置总入口含油率,单位为  $\text{mg/L}$ ;  $\varepsilon_{o,out}$  为气浮装置出水口含油率,



单位为 mg/L。

### 3.1 不同处理量下气浮装置的工作性能

现场测试中, 首先研究新型高效旋流气浮污水处理装置在来液流量不同工况下的处理效率和指标, 具体调试中, 入口流量 ( $Q_{in}$ ) 为  $10\sim 25\text{m}^3/\text{h}$ , 污水含油率 ( $\varepsilon_0$ ) 约为  $66\text{mg}/\text{L}$ , 絮凝剂的添加量 ( $\varepsilon_f$ ) 约为  $45\text{mg}/\text{L}$ , 调节气浮装置各个分支管路的分流比, 使其处于最佳工作状态, 出水口的分流比约为 0.8, 即来液流量的 80% 经出水口流出。最终, 待气浮装置各个分支管路的流量和压力稳定后, 进行长时间连续运行和监测, 并分别在总入口、溶气泵气浮装置的出水口、出油口和微米孔板气浮装置的出水口取样化验, 分析气浮装置对污水的处理效果。

图 4 给出了处理量为  $10\sim 25\text{m}^3/\text{h}$  的运行工况下, 高效旋流气浮装置的总入口、出油口和出水口三个分支管路的含油率测试结果。当气浮装置的入口流量为  $10\text{m}^3/\text{h}$ 、 $15\text{m}^3/\text{h}$ 、 $20\text{m}^3/\text{h}$  和  $25\text{m}^3/\text{h}$ , 含油率分别为  $67\text{mg}/\text{L}$ 、 $66\text{mg}/\text{L}$ 、 $57\text{mg}/\text{L}$ 、 $66\text{mg}/\text{L}$  时, 经处理后的水中含油率可降至  $7\text{mg}/\text{L}$ 、 $12\text{mg}/\text{L}$ 、 $5\text{mg}/\text{L}$  和  $7\text{mg}/\text{L}$ , 而此时出油口管路中的含油率分别为  $260\text{mg}/\text{L}$ 、 $320\text{mg}/\text{L}$ 、 $311\text{mg}/\text{L}$  和  $334\text{mg}/\text{L}$ 。因此, 在测试的流量范围内, 设计加工的高效旋流气浮装置对污水进行处理可以达到较理想的效果, 除油效率均约为 90%, 经处理后水中含油率远低于排海或油井回注的标准。图 5 分别给出了入口流量为  $25\text{m}^3/\text{h}$ , 高效旋流气浮装置的总入口、一级出水口、出油口和二级出水口的取样, 从中可以较直观的看出设计加工的气浮装置对污水的处理效果。

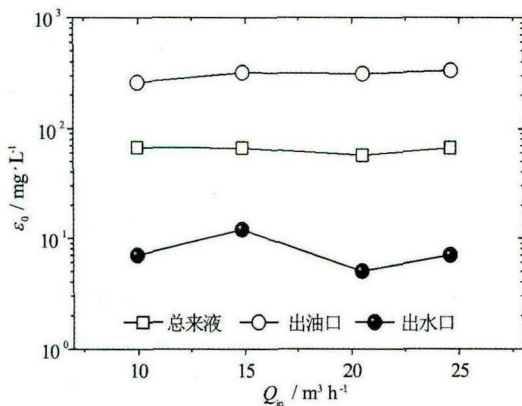


图 4 不同处理量旋流气浮装置各分支管含油率分析图

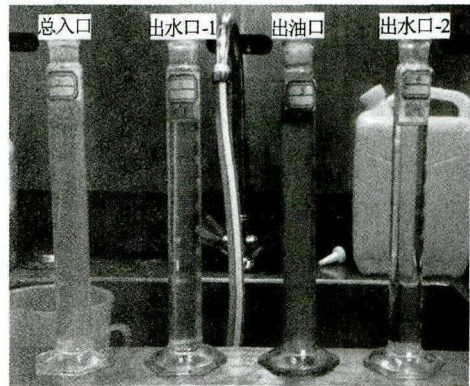


图 5 旋流气浮装置运行取样结果

### 3.2 絮凝剂的添加对污水处理效果的影响

气浮处理技术应用中, 絮凝剂的添加可以有效增加微气泡与油滴聚集和黏附的机率和效果, 进而提高气浮对污水处理的效率。现场测试研究中, 为得到絮凝剂添加对污水处理效果的影响规律, 固定旋流气浮装置入口的流量为  $10\text{m}^3/\text{h}$ , 分别添加不同含量的絮凝剂, 分析高效旋流气浮装置对污水的处理效果。循环测试中, 采用的絮凝剂由中海油深圳分公司陆丰作业区提供, 型号为 HYQ403。

图 6 给出了处理量 ( $Q_{in}$ ) 为  $10\text{m}^3/\text{h}$ , 絮凝剂的添加量分别为  $0$ 、 $5\text{mg}/\text{L}$ 、 $15\text{mg}/\text{L}$  和  $43\text{mg}/\text{L}$

四种运行工况下, 高效旋流气浮装置对污水的处理效果。从图 6 中可以看出, 絮凝剂添加量为 5mg/L 时, 对气浮污水处理的效果基本没有影响, 处理后污水中含油率为 56mg/L, 除油效率为 43%; 当添加量增至 15mg/L 时, 污水中含油率由 47mg/L 降至 10mg/L, 除油效率为 79%; 絮凝剂添加量为 43mg/L 时, 污水中含油率降至 9mg/L, 仍呈现出下降的趋势。图 7 给出了来液流量为 10m<sup>3</sup>/h, 絮凝剂添加量为 15mg/L, 旋流气浮装置的总入口、一级装置出水口、出油口和二级装置出水口的取样。

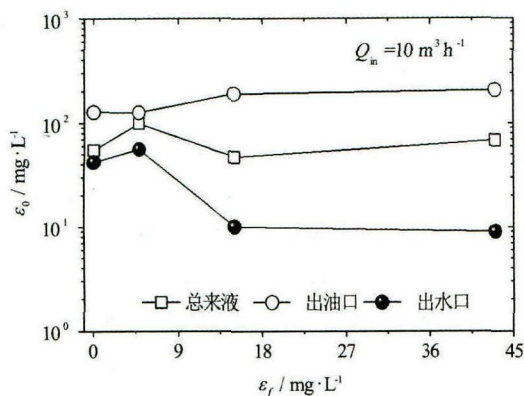


图 6 絮凝剂的添加量对旋流气浮污水处理效果的影响



图 7 旋流气浮装置运行取样结果

## 4 结论

针对气浮污水处理技术的基本理论, 分别从微气泡的生成方式、高效旋流气浮的处理工艺和流场特征等方面, 结合前期在高效管道式分离技术研究中取得的成果, 自主研发新型的高效旋流气浮污水处理技术和装置。最终, 设计加工形成符合工业应用标准的样机进行现场测试和分析。经系统分析可得出以下结论:

(1) 依据旋流气浮污水处理技术, 引入导流片型管道式分离器, 并置于气浮罐体的内部, 在实现紧凑型设计的同时, 能够形成利于提高微气泡和油滴黏附机率的稳定旋流场, 充分实现旋流场和气浮技术的高效融合, 并依据微气泡的注入方式的研究, 给出了新型高效旋流气浮污水处理技术的工艺流程设计;

(2) 基于上述的研究成果, 设计加工一套适用于海上平台的新型高效旋流气浮污水处理装置, 并在南海陆丰采油平台进行测试分析, 分别对加药量和处理量等因素对气浮污水处理效果的影响进行测试, 得到了相应的作用规律, 且在处理量为 10-25m<sup>3</sup>/h 的工况下处理后水中含油均低于 12ppm, 低于环境保护规定的排海或油井回注指标。



## 参 考 文 献

- [1] Silva S S, Chiavone-Filho O, Neto E L B, et al. Oil removal from produced water by conjugation of flotation and photo-Fenton processes[J]. Journal of Environment Management, 2015, 147: 257-263.
- [2] Santo C E, Vilar V J P, Botelho C M S, et al. Optimization of coagulation-flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 183: 117-123.
- [3] 陈家庆, 韩旭, 梁存珍, 等. 海上油田含油污水旋流气浮一体化处理设备及其应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 87-93.
- [4] 雷乐成. EDUR 泵气浮技术在油田稠油污水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2003, 29(2): 115-116.
- [5] Shi Shi-ying, Xu Jing-yu. Flow field of continuous phase in a vane-type pipe oil-water separator. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 60: 208-212.
- [6] 吴奇霖, 张健, 许晶禹. 粗油水乳状液的流变特性[J]. 油气储运, 2014, 33(5):531-537.

### Investigation on the new-type flotation technology for wastewater treatment in oil production

WEI Cong-da<sup>1</sup>, WU Qi-lin<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, XU Jing-yu<sup>2\*</sup>

(1 Shenzhen Branch Company, China National Offshore Oil Corporation, Shenzhen, 518067

2 LMFS, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190 )

\*Corresponding author, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

**Abstract:** The requirement of wastewater treatment technology is becoming higher as the increasing of water content in oil extraction and its emission targets in oil industry, and the flotation technology is one of the great technologies with the advantages of low energy consumption and high efficiency which can meet the requirement greatly. According to the basic theory of flotation and research consequence of pipe-type oil-water separator, the micro-bubble generated technology, flotation process and its flow field characteristics are investigated to design a new-type flotation technology with independent intellectual property rights. In the study, the methods of field test in oil production were used to obtain the flow field characteristics and processing capacity of the new-type flotation equipment. In the results, the flotation was operated for a long time and the oil volume fraction in wastewater can be decreased to less than 10mg/L which is greater than the requirement of environment. Also, the effect of flocculating agent and the capacity of flotation equipment were studied respectively.

**Key words:** Rotational flow flotation, wastewater treatment, oily water, field test