

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.015

海上油田生活污水一体化处理装置应用研究

张子臣¹, 陈袁袁², 张 岳³, 国 健³

(1. 中海石油环保服务<天津>有限公司, 天津 300452; 2. 海油环境科技<北京>有限公司, 北京 102211; 3. 中海油节能环保服务有限公司, 天津 300452)

摘 要: 通过分析海上油田生活污水的产排特点,针对性地开发了一种海上油田生活污水一体化处理装置,采用“接触氧化+MBR”工艺,将预处理、厌氧、好氧、MBR及杀菌消毒等工艺合为一体。经过现场调试及连续5个月的运行跟踪,该一体化装置对COD及NH₄⁺-N的平均去除率分别为91%和89%,出水水质可达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)的指标要求,并在海上平台实现冲厕回用。该装置具有防污堵、操作简便及自动化程度高等特点,出水水质可长周期稳定达标,适用于海上油田生活污水处理。

关键词: 海上油田生活污水; 产排特点; 一体化处理装置; 冲厕回用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0107-06

Application of Integrated Treatment Device for Domestic Sewage in Offshore Oilfield

ZHANG Zi-chen¹, CHEN Yuan-yuan², ZHANG Yan³, GUO Jian³

(1. CNOOC Environmental Protection Services <Tianjin> Co. Ltd., Tianjin 300452, China;
2. CNOOC Environmental Technology <Beijing> Co. Ltd., Beijing 102211, China; 3. CNOOC Energy Conservation and Environmental Protection Service Co. Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: This paper analyzed the production and discharge characteristics of domestic sewage in offshore oilfields, and developed an integrated treatment device for domestic sewage in offshore oilfields. The process consisted of contact oxidation and MBR, which integrated pretreatment, anaerobic reaction, aerobic reaction, MBR, disinfection and other processes into a whole process. After on-site commissioning and 5-month operation tracking, the average removal rates of COD and ammonia nitrogen of the integrated device were 91% and 89%, respectively. The effluent quality met the limits specified in *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Water Consumption* (GB/T 18920-2002), which could be used for toilet flushing and recycling on offshore platforms. The device has the characteristics of anti clogging, simple operation and high degree of automation, and the effluent quality can reach the discharge standard stably for a long period, which is suitable for the treatment of domestic sewage in offshore oilfields.

Key words: domestic sewage in offshore oilfield; production and discharge characteristics; integrated treatment device; toilet flushing and recycling

海上油田生活污水,即海上钻井平台和相关油气生产设施产生的生活污水,主要包括厨房灰水、洗

涤灰水(包括日常盥洗、洗浴及洗衣间排放污水)、冲厕黑水以及医务室排出的污水等^[1]。不同于陆地生

生活污水,由于特殊环境条件的限制,即海上平台卫生系统排泄周期短、海上设施占地紧张以及油气生产任务繁重等,海上油田生活污水处理装置需要具备抗冲击负荷能力强、结构紧凑、自动化程度高以及维护简便等特点。膜生物反应器(MBR)是将微滤或超滤膜分离技术与传统生物处理法有机结合而成的新型污水处理工艺,具有占地面积小、出水水质好以及抗冲击负荷能力强等特点,在污水处理及回用中发挥着越来越重要的作用^[2]。同时,这些特点也决定了其适用于海上特殊工况,可以在海上油田生活污水处理方面起到重要作用。

1 海上油田生活污水产排特点

由于海上平台卫生系统排泄周期比较短,因而排放的污水比陆地城市排水系统更为新鲜(分解较少)^[3],即含有更高的污染负荷。另外,由于海上平台的人员数量和生活习性相对固定,日常生活污水的平均水质、水量波动不大。但值得关注的是,由于不同时间段的用水量变化,即用水高峰期的存在,造成海上生活污水排放的瞬时波动较大,进而对生活污水处理装置造成冲击。

1.1 水量特点

海上生产设施生活楼用水时间相对集中,且不同时间段波动性较大。为了解海上生活污水的产排规律,对海上多个生产设施的生活污水装置进行24 h连续监测,不同时间段污水量见表1。

表1 渤海某140人平台24 h连续实测污水量变化
Tab.1 Variation of sewage volume of a 140 person platform in the Bohai Sea for 24 h

时段	污水量/m ³	时段	污水量/m ³
06:00—07:00	1.8	18:00—19:00	2.4
07:00—08:00	2.1	19:00—20:00	3.5
08:00—09:00	0.8	20:00—21:00	4.6
09:00—10:00	0.9	21:00—22:00	2.5
10:00—11:00	1.7	22:00—23:00	1.5
11:00—12:00	2.3	23:00—24:00	0.1
12:00—13:00	1.8	00:00—01:00	0
13:00—14:00	0.7	01:00—02:00	0
14:00—15:00	0.9	02:00—03:00	0
15:00—16:00	0.7	03:00—04:00	0
16:00—17:00	2.1	04:00—05:00	0.5
17:00—18:00	3.0	05:00—06:00	1.5

基于平台连续5 d的日用淡水量和生活污水产生量监测,对各路产水用户(主要包括冲厕黑水、洗涤灰水及厨房灰水)分别进行计量统计,通过分析

得出海上生活污水不同来源的排放比例,其中,洗涤灰水约占55%,厨房灰水约占19%,冲厕黑水约占26%。

海上油田生活污水的产排特点为:不同时段的生活污水产生量波动较大,用水高低峰现象明显存在。生活污水产生量最高峰一般出现在晚上19:00—21:00;排放平峰期一般集中在10:00和16:00;而在早上06:00、中午12:00和晚上18:00会出现生活污水排放小高峰期。海上生活污水产水来源明确,主要包括冲厕黑水、洗涤灰水和厨房灰水,其中洗涤灰水占比最大,约50%~60%。

1.2 水质特点

由于平台人员的生活习惯和生活方式与陆地城镇普通用户不同,因此海上生活污水性质与陆地普通市政污水的差异性较大。由于城镇居民生活水平提高、日平均用水量增加、污水进入市政污水厂前停留时间较长等原因,相较于海上生活污水,市政生活污水的COD负荷偏低,因此这也决定了海上生活污水的处理不能照搬普通市政污水处理工艺,需在其基础上改进完善。陆地市政生活污水与海上平台(以渤海某淡水冲厕平台为例)的生活污水水质对比情况见表2。

表2 陆地与海上生活污水水质对比

Tab.2 Comparison of domestic sewage quality between land and sea

水样	pH	SS/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)
市政污水	6.5~8.0	150~200	200~450	200~300	20~90	2~6.5
海上生活污水	6.0~8.0	200~500	500~1 000	200~500	20~50	5~8

目前,部分海上油田的生活污水处理装置存在易污堵、维护频繁以及长周期稳定运行困难等问题。基于这些问题,结合海上油田污水的产排特点,笔者研究开发了一种新型的海上油田生活污水一体化处理装置,该装置优化集成了预处理、厌氧、好氧及MBR等技术,具有防污堵、现场维护工作量小并可实现出水水质长周期稳定达标等特点。该装置出水符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)冲厕回用的要求,可以用于平台生活楼冲厕,节约水资源;同时实现生活污水处理装置零排放,体现海上石油生产环保至上的

理念。

2 试验装置与方法

2.1 一体化处理装置工艺流程

将海上油田生活污水一体化处理装置应用于渤海某平台,处理流程见图1。该装置主体结构的材质为碳钢防腐,处理量为40 m³/d,水力停留时间(HRT)约为9 h,生化池(包括水解酸化池与接触氧化池两部分)采用组合填料,即塑料环骨架负载维纶丝,接触面积大,易生膜、换膜。膜池选用增强型亲水性聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜组件,膜孔径为0.05 μm。

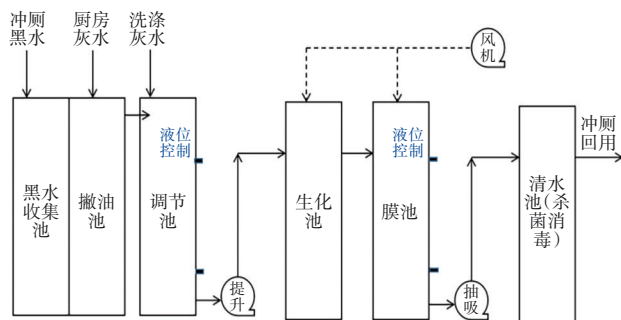


图1 海上油田生活污水一体化处理装置流程

Fig.1 Flow chart of integrated treatment device for domestic sewage in offshore oilfield

2.2 主要构筑物、设备及参数

黑水收集池:2 100 mm×850 mm×2 100 mm,收集池利用沉淀和厌氧发酵的原理,可去除大多数的悬浮物,处理后水溢流到调节池。

撇油池:1 700 mm×850 mm×2 100 mm,可分离厨房出水中的悬浮油,处理后水溢流到调节池。

调节池:2 450 mm×850 mm×2 100 mm,收集池、撇油池出水与洗涤灰水在此混合,以调节水质、均化水量,调节池污水经过提升泵进入生化池中的水解酸化池。

生化池:3 500 mm×1 400 mm×2 100 mm,罐体内部分隔为水解酸化池及接触氧化池两部分,水解酸化池可将污水中的大分子有机物降解成小分子有机物、非溶解性有机物转变为溶解性有机物,提高污水的可生化性;接触氧化池中的好氧微生物在填料上挂膜,组合填料填充率为70%。

膜池:2 800 mm×1 200 mm×2 100 mm,浸入式MBR膜组件3组,每组装10束中空纤维膜,每套膜架尺寸约900 mm×740 mm×1 550 mm,最大处理量

为3 m³/h。抽吸泵采用一用一备, $Q=3$ m³/h, $H=10$ m, $N=0.25$ kW。活性污泥浓度(MLSS)约为3 000~5 000 mg/L,溶解氧(DO)为2~5 mg/L,污泥COD负荷约为1.5 kg/(kg·d),污泥龄超过30 d。

2.3 试验方法

该装置的进水为渤海某平台生活污水,其COD约为600~800 mg/L,BOD₅约为300~400 mg/L,TN约为45~60 mg/L,NH₄⁺-N约为25~40 mg/L,所有水质指标均采用国家标准方法进行测定。装置运行期间,每天取样3次,分别为早上08:00、中午12:00、晚上19:00。从挂膜启动到整个系统稳定运行共24 d,跟踪运行150 d,共取样500余个。

3 结果与讨论

3.1 生化系统调试

生化系统的初期调试阶段对接触氧化填料采用自然挂膜方式^[4],即以原水加营养盐闷曝的方式进行挂膜启动。对膜池活性污泥采用间歇培养方式,即开始时将冲厕黑水与灰水以1:1进入生活污水处理装置,然后按照C:N:P=100:5:1的比例投加工业葡萄糖、尿素及磷肥,闷曝48 h,第3天取样发现模糊的活性污泥绒絮后,停止曝气,使膜池静止沉淀2 h后排放上清液,排放的上清液约占总体积的60%~70%。从停止曝气进行沉淀到重新曝气的间隔时间为3 h,然后再加入生活污水,继续闷曝,这样循环下去,共持续约3周,直至SV₃₀达到30%。

在生化系统的培养阶段每天取样镜检,图2为进水及膜池上清液中COD的变化。

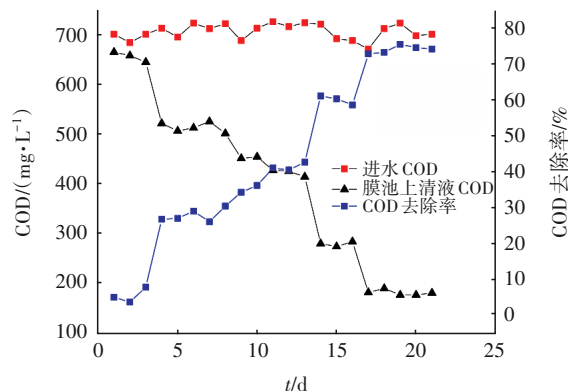
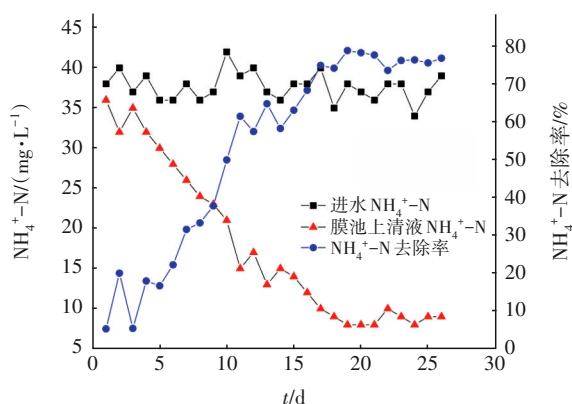


图2 一体化生活污水处理装置调试阶段COD变化

Fig.2 COD variation during commissioning of integrated treatment device for domestic sewage

一体化生活污水处理装置调试阶段进水及膜池上清液中NH₄⁺-N的变化如图3所示。

图3 一体化生活污水处理装置调试阶段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化Fig.3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ variation during commissioning of integrated treatment device for domestic sewage

活性污泥中的微生物在培养过程中要经历适应期、对数增长期、减速增长期以及内源代谢期,每个阶段微生物的种类呈现不同的比例。在调试初期能看到大量的肉足虫和鞭毛虫类;在调试半个月左右发现固着型纤毛虫,并且水质开始稳定变好;调试第20天左右,镜检发现大量钟虫和轮虫,COD与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到75%~80%,活性污泥系统已经成熟且出水水质实现长周期稳定达标,标志着生化系统挂膜启动成功。

3.2 DO对装置运行效果的影响

考察好氧区DO(1.5、2.5、3.5、4.5 mg/L)对一体化装置处理效果的影响,以装置进水到膜池上清液处理段作为考察对象,结果见图4。

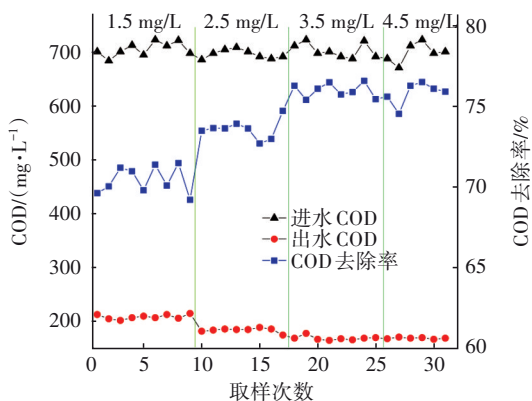


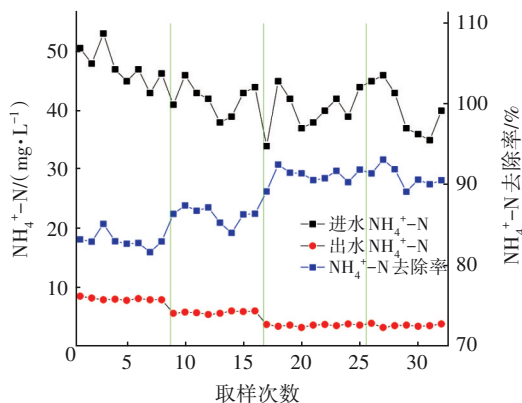
图4 DO对装置COD去除效果的影响

Fig.4 Effect of DO on COD removal efficiency

当好氧区(包括接触氧化池与膜池)的DO为1.5 mg/L时,COD的平均去除率仅为69%~70%,去除效果稍差,这是由于DO不足导致接触氧化段和MBR段活性污泥处理效果不理想,进而导致好氧段

对COD的降解不足。当DO上升到2.5 mg/L时,COD的平均去除率有所提高,达到约73%~74%。当DO进一步上升到3.5 mg/L时,COD的平均去除率达到75%~76%,去除率进一步提高,去除效果较好,原因是DO升高有利于好氧段微生物的生长,大大提高了其降解COD的能力。但随着DO继续升高,COD的去除率无明显提高。

考察好氧段DO对去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果如图5所示。当好氧区DO为1.5 mg/L时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率为80%~85%,去除效果未达到理想状态,这是因为DO过低不利于接触氧化池的微生物进行硝化作用,从而影响 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除。当DO增加到2.5 mg/L时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率上升到85%~88%。当DO继续上升到3.5 mg/L时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率可稳定在90%左右,去除效果较好。研究表明^[5],生化好氧段的DO越高,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果越好,原因是好氧阶段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除主要依靠好氧微生物的硝化作用,当DO充足时,好氧段微生物的硝化作用可以发挥到最佳水平。同样,随着DO继续升高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率变化不明显。

图5 DO对装置 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果的影响Fig.5 Effect of DO on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency

3.3 装置的抗冲击负荷能力

在一体化处理装置运行期间,通过水量、水质分析可知用水最高峰出现在晚上19:00—21:00。为此连续7 d分别在08:00—09:00和19:00—21:00取进出水水样(1#~7#和8#~14#)测定COD,结果见图6。可知在晚上用水高峰时进水COD相对较高,分析原因主要是用水高峰期水量大,前端预处理段出现扰动,沉积在底部的污泥甚至被搅动起来,并且部分污水在装置内的停留时间变短。后端厌氧水

解酸化段和接触氧化段的COD均出现偏高现象,但是装置出水的COD变化不大,初步说明一体化装置的抗冲击负荷能力较强。

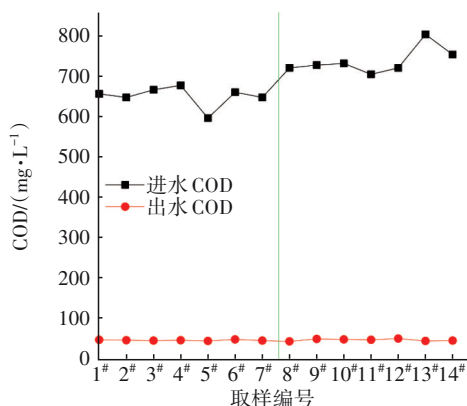


图6 不同取样时间进出水COD

Fig.6 COD of influent and effluent at different sampling time

3.4 膜运行参数

装置处理量设定为 $1.67 \text{ m}^3/\text{h}$, MBR最大处理量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$, 通过管线阀门控制膜通量。膜参数设置如下: 高液位设置为 1.9 m , 低液位设置为 1.75 m , 泵抽吸 540 s , 停止 5 s , 反洗 45 s 。跨膜压差(TMP)为 $15\sim 65 \text{ kPa}$, 其变化如图7所示。

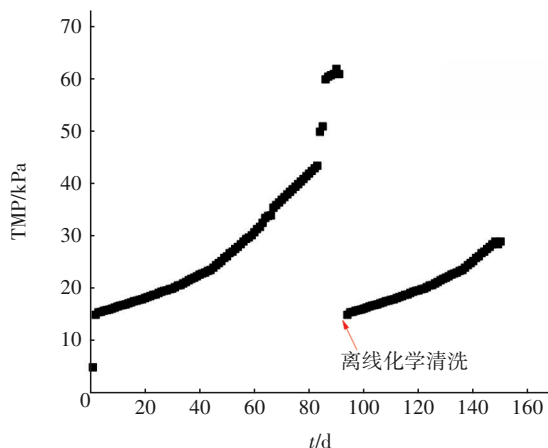


图7 MBR系统的TMP变化

Fig.7 TMP variation in MBR

在整个试验过程中,膜运行依靠自动反洗与在线化学清洗进行膜污染控制,系统在运行初期TMP增长缓慢,说明膜污染程度较轻^[6]。在此阶段,污泥混合液中的生物絮体在膜表面形成滤饼层,滤饼层对TMP的增长影响较小。在系统运行约85 d后,系统的膜污染程度加剧,初步说明膜运行过程中,在3个月的正常维保周期内,无需离线化学清洗,系统

具有较强的抗污染能力。运行91~93 d时采用次氯酸钠和氢氧化钠进行离线化学清洗,清洗后膜通量得到恢复。

3.5 一体化装置对COD的去除效果

一体化装置对COD的去除效果见图8。装置的进水COD平均值为 687 mg/L , 出水COD基本稳定在 60 mg/L 以下, 平均去除率达到91%。运行期间, 该装置表现出较强的抗冲击负荷能力, 出水水质稳定达标。

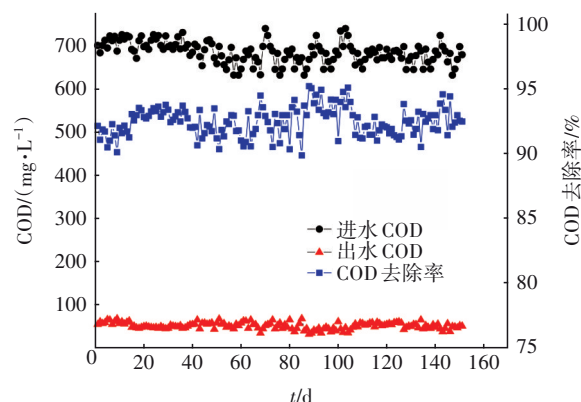


图8 一体化装置对COD的去除效果

Fig.8 COD removal effect of integrated device

3.6 一体化装置对 NH_4^+-N 的去除效果

一体化装置对 NH_4^+-N 的去除效果如图9所示, 装置的进水 NH_4^+-N 平均值为 38 mg/L , 出水氨氮平均值约为 $6\sim 7 \text{ mg/L}$, 平均去除率达到89%。可以看出, 一体化装置的 NH_4^+-N 去除效果较好, 且抗冲击负荷能力较强。污水在好氧阶段进行硝化反应, 将 NH_4^+-N 转化为 NO_2^--N 和 NO_3^--N , 反硝化细菌再将 NO_2^--N 和 NO_3^--N 转化为 N_2 去除^[7]。

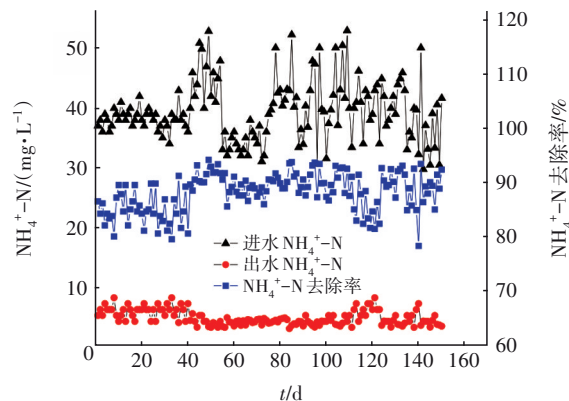


图9 一体化装置对 NH_4^+-N 的去除效果

Fig.9 NH_4^+-N removal effect of integrated device

3.7 其他出水指标检测

装置在海上平台稳定运行期间,将早、中、晚取得的出水样品返回陆地检测机构进行第三方检测,结果见表3。

表3 装置出水第三方检测结果
Tab.3 The third party test results of device effluent

检测项目	一体化处理装置出水		
	早	中	晚
COD/(mg·L ⁻¹)	48	52	56
pH	7.14	7.19	7.13
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	4.2	4.1	3.8
阴离子表面活性剂/(mg·L ⁻¹)	未检出	未检出	未检出
氨氮/(mg·L ⁻¹)	2.50	3.22	3.35
色/度	未检出	未检出	未检出
总大肠菌群/(个·L ⁻¹)	未检出	未检出	未检出
嗅	无不快感	无不快感	无不快感
浊度/NTU	未检出	未检出	未检出
溶解性总固体/(mg·L ⁻¹)	255	283	258
铁/(mg·L ⁻¹)	0.212	0.266	0.266
锰/(mg·L ⁻¹)	0.056 0	0.067 4	0.058 2
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	6.3	6.5	6.8

由表3可知,装置出水水质符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)的要求,可进行冲厕回用。经过5个月的连续稳定运行,为平台节约淡水约1 500 m³。设备稳定运行期间,剩余污泥的排泥频率约为每月1次,排出的剩余污泥需要用罐体收集,运回陆地集中处置。

4 结论

开发的新型海上油田生活污水一体化处理装置运行稳定,抗冲击负荷能力强,对COD、NH₄⁺-N的平均去除率分别达到了91%和89%,且出水水质符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)的冲厕回用水标准。在5个月的稳定运行期间,设备未出现污堵、出水水质波动剧烈等问题,无需现场工作人员专门清理,大大减轻了工作量,实现了出水水质长周期稳定达标。

参考文献:

[1] 国家海洋局. 海洋石油勘探开发污染物排放浓度限值: GB 4914—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
State Oceanic Administration. Effluent Limitations for

Pollutants from Offshore Petroleum Exploration and Production: GB 4914—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese).
[2] 高伟楠. A²O+MBR工艺用于北方某再生水厂提标扩建工程[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 91–95.
GAO Weinan. Application of A²O + MBR process in the upgrading and expansion project of a water reclamation plant in North China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 91–95 (in Chinese).
[3] 董良飞. 船舶生活污水污染特征及控制对策研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
DONG Liangfei. Study on Pollution Characteristics and Countermeasures of Sewage aboard Ships [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005 (in Chinese).
[4] 韩剑宏, 刘燕, 朱浩君, 等. 反硝化生物滤池的自然挂膜启动研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(3): 1–4.
HAN Jianhong, LIU Yan, ZHU Haojun, et al. Biofilm formation and startup in denitrification biofilter [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(3): 1–4 (in Chinese).
[5] 郭冬艳, 李多松, 孙开蓓, 等. 同步硝化反硝化生物脱氮技术[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(3): 41–44, 61.
GUO Dongyan, LI Duosong, SUN Kaibei, et al. Simultaneous nitrification and denitrification technology [J]. Safety and Environmental Engineering, 2009, 16(3): 41–44, 61 (in Chinese).
[6] FABRIS R, LEE E K, CHOW C W K, et al. Pre-treatments to reduce fouling of low pressure micro-filtration (MF) membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2007, 289(1/2): 231–240.
[7] 肖妍圻, 陈鑫, 周伟, 等. 喀斯特地区乡镇污水一体化处理技术效果分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(9): 12–16.
XIAO Xinqi, CHEN Xin, ZHOU Wei, et al. Performance of integrated bioreactor treating rural domestic sewage in karst area [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 12–16 (in Chinese).

作者简介: 张子臣(1989—), 男, 山东临沂人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为海上油田污水处理。

E-mail: 534181303@qq.com

收稿日期: 2020-09-18

修回日期: 2020-10-28

(编辑: 沈靖怡)