

含油污水生化处理技术的研究进展

刘国斌¹, 朱秋实¹, 詹爱霞², 史文婷¹, 陈进富^{1*}

(1. 中国石油大学(北京)环境工程系, 北京 102200; 2. 中国石油兰州石化公司, 甘肃 兰州 730060)

摘要:含油污水的生化处理技术可分为2类,即自然生态系统净化法与新型反应器法。自然生态系统净化法主要包括人工湿地法和氧化塘法,新型反应器法主要包括CASS工艺、ABR工艺以及MBR工艺等。介绍了国内外含油污水处理技术的最新研究现状和进展,对各种方法进行评价和比较,并对含油污水处理技术今后的发展提出了建议。

关键词:生化处理技术;人工湿地;CASS工艺;ABR工艺;MBR工艺

中图分类号:X506

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)03-0026-04

Progress of biochemical treatment technology for oily wastewater

LIU Guo-bin¹, ZHU Qiu-shi¹, ZHAN Ai-xian², SHI Wen-ting¹, CHEN Jin-fu^{1*}

(1. Department of Environmental Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102200, China;

2. Petrochina Lanzhou Petrochemical Company Lanzhou 730060, China)

Abstract: The biochemical treatment technologies for oily wastewater can be divided into two categories, the natural ecosystems purification method and the new type of reactor method. The natural ecosystems purification method mainly includes constructed wetlands method and oxidation ponds method. The new type of reactor includes cyclic activated sludge system (CASS), anaerobic baffled reactor (ABR), membrane sequencing batch reactor (MBR), etc. The comparison of various methods is performed. The suggestions for the development of the oily wastewater treatment technology in the future are put forward in the end.

Key words: biochemical treatment technology; constructed wetland; CASS; ABR; MBR

近年来,随着石油工业的迅猛发展,大规模生产活动急剧增加,大量的生产、加工污水随之产生。鉴于当今世界的石油工业现状,大多数的油田已经进入第三次采油阶段,开始出现采油耗水量大,采出液含水量高、成分复杂,油水分离较难等一系列的问题^[1],这无疑给含油污水的后续处理增加了难度。同时,日益增加的工业用水量,暴露出了严重的水资源短缺问题。据统计,某油田每天大约产生140万m³的含油污水,其中大约有120万m³的含油污水经过处理后,达到回用标准,用于二次油田回注,另外剩下20万m³外排^[2]。含油污水如果不经严格处理,一旦进入自然生态系统,将会对人类和自然界造成不可估量的损害。

1 含油污水的来源及特点

含油污水是指在石油生产、炼制、储运以及产品的二次加工过程中产生的污水^[3]。按照石油工业的上下游区分,可将含油污水分为采油污水和炼油污水。

(1)采油污水主要包括油田采出水、洗井污水、钻井污水、井下作业污水以及采油区雨水等。

(2)炼油污水主要包括各车间装置的出水、油罐进油后的脱除水、油罐定期清洗排水以及发生油品滴漏部位的地面冲洗水等。

由于含油污水的来源广泛,所以含油污水中污染物的种类繁多,特点各异。主要污染物包括石油类、COD、BOD、挥发酚、悬浮物、硫化物以及氨氮等^[4]。

2 生化处理技术现状

2.1 自然生态系统净化法

自然生态系统净化法就是利用天然水体或土壤生态系统的净化作用降解污染物的技术^[5],主要包括人工湿地法与氧化塘法等。

2.1.1 人工湿地法

人工湿地是由植物、水体和微生物构成的一个相互依存、相互作用的半自然半人工的生态系统。人工湿地系统的组成决定了系统中污染物的净化方式,具体包括植物的吸收作用,植物体、根系对污染物的截留作用,附着在植物体、介质表面的大量微生物对污染物的降解作用,污染物的自然沉淀,细菌、病毒微生物的自然衰亡,以及某些植物分泌物对细

收稿日期:2014-09-29

基金项目:中国石油低碳关键技术研究(2011E-2408)

作者简介:刘国斌(1992-),男,硕士生;陈进富(1964-),男,教授,研究方向为环境污染控制工程,通讯联系人,0931-89733637, cjf64@

163.com。

菌等病毒微生物的抑制、灭活作用等。

杨旭等^[6]采用水平潜流人工湿地+超滤组合工艺对含油污水进行了处理。结果表明,当进水流量为 $1.2\text{ m}^3/\text{d}$,PVDF超滤膜的压力为 0.2 MPa 时,出水水质较好,其中总氮的去除率达到 66.07% ,COD的去除率达到 82.98% ,石油类污染物的去除率达到 73.18% ,BOD以及氨氮的去除率分别达到 55.99% 和 55.36% 。Israa等^[7]对潜流人工湿地法处理含油污水的效果进行了实验研究。实验对象分别为 0.10% 、 0.18% 以及 0.25% (油水体积比)的3种模拟含油污水,考察了曝气率对石油类污染物去除率的影响。实验结果表明,对潜流人工湿地进行适当的曝气,能够加强生物的降解能力。当曝气率为 $1\text{ L}/\text{min}$ 时,3种含油污水中的石油类污染物的去除率分别为 84.1% 、 86.3% 、 88.3% 。

杨旭等^[8]还研究了表流人工湿地+聚砜(PSF)膜组合工艺对含油污水的处理效果,结果表明,石油类污染物的去除率达到 53.51% ,COD的去除率达到 55.82% ,总氮、总磷以及氨氮的去除率分别达到了 49.70% 、 61.67% 、 54.70% 。Bethany等^[9]采用表流人工湿地法处理模拟含油污水。结果表明,湿地水的深度能够改变湿地系统内的氧化还原条件,从而影响处理效果。湿地水的深度与金属元素的去除率呈正比,与石油类污染物的去除率呈反比,石油类污染物的去除率最高可达到 $94\%\sim 95\%$ 。

潜流和表流人工湿地法的区别主要在于其布水方式。在低温条件下,表流人工湿地污水在表面流动,保温性能差,水温降低易对微生物数量和活性造成影响。潜流人工湿地与大气之间隔有覆盖层,具有良好的保温效果,同时可减少蒸发和流动的能量损失^[10]。人工湿地法具有低能高效、运行维护简单且环境友好度高等优点。但是,该方法存在占地面积大,受气候温度和植物种类的影响大、易造成二次污染等缺点。

2.1.2 氧化塘法

氧化塘法指利用水塘中微生物和藻类等水生植物对污水进行净化。其净化功能主要是通过“藻菌共生系统”实现。水塘中的细菌通过降解污水中的有机污染物,产生营养物质(磷酸盐、铵盐等)供藻类生长,藻类通过光合作用产生氧气供细菌繁殖,从而形成共生系统^[11]。根据水塘的深浅不同,可将氧化分为好氧塘、兼性塘和厌氧塘。

胡琦^[12]采用氧化塘法处理大港油田采油污水,依次设置了隔油池、曝气池、沉淀池、兼性塘以及好

氧塘。结果表明,COD、石油类以及SS的去除率分别达到 77% 、 98% 、 26% 。桑玉全等^[13]对桩西采油厂氧化塘处理装置出水进行了长期监测。监测结果显示,COD的去除率受季节的影响较小,挥发酚的去除效果受季节因素影响较大,石油类污染物的去除效果比较稳定,硫化物的去除率较高。桑玉全等^[14]还对氧化塘处理系统中适于高含盐含油污水的微生物种类进行了研究。研究表明,蓝藻(蓝细菌)是吸附降解石油类污染物的主要贡献者。Shpiner等^[15]考察了不同工艺配置情况下(HRT、好氧与厌氧条件等)氧化塘的处理效果。在进水COD为 $1\ 050\sim 1\ 350\text{ mg}/\text{L}$,含油量为 $400\sim 500\ \mu\text{L}/\text{L}$,NaCl含量为 $6\text{ g}/\text{L}$,HRT为 6 d 的情况下,COD的去除率达到 85% 以上,除油率达到 82% 以上,且随着HRT的增加而增加。

根据好氧塘、兼性塘和厌氧塘的特点和实际情况,选择单个或几个不同类型的氧化塘,能达到较好的处理效果。氧化塘法具有技术投资少、处理成本低等优点。但是,个别出水指标受季节和风向等环境因素的影响较大,同时应注意来水状况。

2.2 新型反应器法

传统的含油污水处理工艺主要为活性污泥法及其简易变形,反应器的形式比较单一。随着污水处理难度的增加,传统的反应器出现处理效率低和运行效果差的问题。未来含油污水处理的发展方向应致力于开发更高效的新型反应器,以满足目前含油污水资源化的形势。

2.2.1 CASS工艺

CASS工艺为活性污泥法的变型,在同一反应器中实现了生物降解过程与泥水分离过程。CASS反应器可分为3个反应区域,即生物选择区、预反应区和主反应区。

生物选择区始终保持厌氧环境,反应器进水与主反应区回流过来的污泥在生物选择区内充分混合,使污泥保持较高的活性,从而有效快速地吸附、降解部分易降解的有机污染物,同时,对难降解有机污染物有较好的水解作用。在生物选择区的厌氧条件下,污泥中的磷元素得到了有效地释放,同时,从主反应区回流的污泥带入了硝化态氮,在厌氧环境下发生了反硝化作用。预反应区即缺氧区,进一步促进磷元素的释放,强化反硝化作用,辅助生物选择区。主反应区内保持好氧状态,活性污泥絮体内部保持缺氧状态,从而实现同步硝化反硝化。

刘彦婷等^[16]采用“物化预处理+CASS工艺”

处理四川某炼油厂的含油污水。进水 BOD、COD 以及氨氮的浓度分别保持在 250 ~ 350、600 ~ 1 200、60 ~ 90 mg/L。经过 CASS 反应器后,出水 BOD 浓度保持在 15 mg/L 以下,COD 浓度保持在 80 ~ 100 mg/L,氨氮浓度保持在 15 mg/L 以下,去除率分别达到 95%、93%、90%。韩国义等^[17]采用“隔油 + 气浮 + CASS + BAF 工艺”处理含油污水。结果表明,出水 COD、氨氮以及石油类污染物的平均去除率分别达到 98.3%、98.75%、99.2%。张铁刚等^[18]采用 CASS + BAF 工艺处理高含油污水,研究表明,对于乳化油分多、COD 高的炼油厂污水,在物化段高效除油的前提下,生化段采用 CASS + BAF 为核心的处理工艺,既能保证出水达到污水综合排放标准(GB 8978—1996)二类污染物一级标准,又简化了生化段工艺流程。Moacir 等^[19]研究了 CASS 反应器中生物载体体积对其处理效果和污泥产生量的影响。研究结果表明,随着载体体积的增加,MLVSS 的浓度开始下降,从而减少污泥产生量。当载体所占体积比例为 7% 和 18% 时,污泥产生量分别降低 18% 和 36%,且不影响 COD 和 TSS 的去除效率。

传统的生化处理工艺只是好氧反应器与厌氧反应器等多个反应器的简单组合,而 CASS 工艺则在一个整体的反应器当中实现了好氧法与厌氧法的结合,减少了反应器的占地面积,具有降解效率高、抗冲击能力强、不易发生污泥膨胀等一系列的优点。但是,CASS 池内微生物的种类繁多,不同种类微生物之间存在着复杂的竞争或共生关系,将影响工艺处理效果,如硝化细菌与异养细菌存在对底物和溶解氧的竞争,造成硝化反应进行不彻底。

2.2.2 ABR 工艺

ABR 工艺全称为厌氧折流板反应器,反应器内部垂直于水流方向设置若干块折流板,从而保持反应器内具有较高的污泥浓度,减少水力停留时间。同时将反应器分隔成若干个串联的反应室,每个反应室可看作一个相对独立的上流式/下流式的污泥床系统,单个反应室内的活性污泥以颗粒化或絮状体形式存在,使污水中的有机污染物与微生物充分接触,对有机污染物起到吸附、降解以及过滤的作用。该反应器中的每个反应室相对独立,根据进水水质的不同,驯化出与该反应室环境条件相适应的微生物,从而保持微生物的最佳工作活性,即为有机污染物逐步降解的过程^[20]。

郑虎斌^[21]采用“ABR + SBR”组合工艺对中海

油湛江分公司涠洲终端处理厂的含油污水进行处理。ABR 工艺以连续方式运行,而 SBR 工艺则以间歇的方式运行,为了将这 2 个工艺有效地结合在一起,设计多个 SBR 装置并联使用,以满足连续出水的需要。进水 COD 为 150 ~ 400 mg/L,且盐度和硫化物含量较高。经处理后,出水 COD 为 39 mg/L,SS 含量为 16 mg/L,硫化物含量为 1.0 mg/L。张华等^[22]针对南海西部石油公司高盐采油污水,采用“ABR + SBR”组合工艺进行处理。运行结果表明,该组合工艺对高盐采油污水的处理效果良好,出水 COD 保持在 50 mg/L 以下,含油量达到 1 mg/L 以下,SS 小于 30 mg/L,氨氮小于 5 mg/L,出水水质达到国家一级排放标准。郑德俊等^[23]采用含有“ABR + BAF”工艺的组合工艺处理某石化工业的含油污水。运行结果表明,COD、BOD 以及氨氮的去除率分别达到 93.0%、95.8%、95.6%,同时石油类、挥发酚、硫含量的去除率均在 99.5% 以上,各项指标均优于国家一级排放标准。

ABR 工艺通过反应器内部折流板的设计,充分利用水力特性使污水与活性污泥颗粒充分接触,同时,随着污水的逐步降解,在 ABR 反应器中逐步培养出特定的微生物种群,大大地提高了降解效率。ABR 工艺作为一种厌氧反应器具有较强的水解酸化能力,可与多种类型的好氧反应器连用,为好氧反应器的稳定运行提供了保障。ABR 工艺具有结构简单、基建投资低,水力停留时间短等优点,越来越受到国内外学者的重视。但是,厌氧折流板反应器尚存在一些缺点,如第一个反应室较其他反应室所承受的负荷冲击较大,易受冲击。

2.2.3 MBR 工艺

MBR 工艺全称为膜生物反应器,即将高效的膜分离技术与常用的污水处理技术有机地结合。由于膜具有高效的截留作用,可以使反应器中保持较高的活性污泥浓度,降低污泥负荷,提高污水的处理效率^[24]。

李继宏等^[25]采用浸没式 MBR 工艺处理大庆某采油厂污水处理站聚驱采油污水,分别考察了 MBR 工艺的水力停留时间、温度以及溶解氧对处理效果的影响。研究表明,当水力停留时间为 10 h,温度为 30℃,溶解氧为 2.0 ~ 4.0 mg/L 时,MBR 工艺出水中 COD 以及水解聚丙烯酰胺的去除率分别达到 78.9%、75.0%,除油率达到 96.7%,固体悬浮物的去除率可达到 98.8%,处理效果良好。

刘锋平等^[26]采用升流式厌氧污泥床与浸没式

膜生物反应器相组合的工艺处理模拟含油污水。实验考察了不同水力停留时间条件下,氨氮含量、石油类污染物、挥发酚、COD以及浊度的去除效果。实验结果表明,氨氮的去除率达到98.58%,石油类污染物的去除率达到98.33%,挥发酚的去除率达到99.83%,COD的去除率达到95.00%,且浊度降低了99.84%。Ali等^[27]利用膜生物反应器处理高盐度含油污水,分别在不同的TDS、有机负荷率、运行周期的条件下运行,通过检测出水中COD、TOC以及石油类污染物含量来考察其对出水效果的影响。结果显示,当有机负荷率为 $1.124 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,TDS为 $35\ 000 \text{ mg}/\text{L}$,周期为48 h时,出水水质最好,COD、TOC以及石油类污染物的平均去除率分别达到97.5%、97.2%、98.9%。处理真实含油污水时,在相同的条件下,COD、TOC以及石油类污染物的平均去除率分别为86.2%、90.8%、90%。

MBR工艺是将高效的膜分离技术引入到污水的处理过程中来,利用膜的高效截留作用使反应器维持较高的污泥浓度,从而降低污泥负荷,提高降解效率。浸没式膜生物反应器属于厌氧膜生物反应器,具有处理效率高、出水水质稳定、污泥浓度高、耐负荷冲击能力强等特点。但是,膜污染与清洗措施的问题一直制约着MBR工艺的发展,同时由于其运行成本较一般污水处理工艺高,只适合小规模污水的处理。

3 结语

自然生态系统净化法与传统的污水生化处理工艺相比,具有高效低耗,运行维护简单,同时存在较大的经济效益和环境效益。目前鉴于该类工艺占地面积较大,在含油污水领域的应用相对较少,只适于具有较大面积荒地的地区采用。

含油污水处理目前所面临的问题主要包括污水排放量大、水质波动大、大分子有机物含量高、 BOD_5 浓度相对较低、可生化性差等。针对这一系列问题,单一方法处理效果有限,只有根据不同情况将各种处理技术相互结合,才能取得较好的处理效果,而且还能降低处理成本。因此如何对单项处理技术进行组合优化,更重要的是对物化-生物处理工艺的集成与优化的研究,将成为提高含油污水处理效率和经济性的关键,以上3种新型反应器为污水处理工艺的发展提供了更多的思路。

建议今后含油污水的生化处理技术的研究应该围绕以下几个方面展开:①筛选高效降解菌种;②通

过优化反应器内部的结构,开发出新型高效的生物反应器;③根据不同含油污水的具体性质和特点,结合相关领域的高新技术,研究开发更多更高效的生化处理组合工艺。

参考文献

- [1] 许艳宏,于春海.含油污水的处理方法[J].科学家创业,2012,(13):103-104.
- [2] 金明权,范廷寿,贺延昭.冀东油田含油污水生化处理技术应用[J].天然气勘探与开发,2005,28(1):44-47.
- [3] 刘兴林,田同鑫.石油库污水的一种物化加生化处理技术[J].化学过程与装备,2010,(9):198-201.
- [4] Mohamed Al Zarooni, Walid Elshorbagy. Characterization and assessment of Al Ruwais refinery wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136(3):398-405.
- [5] 胡新洁.生化处理技术在含油污水中的应用[J].油气田环境保护,2011,21(3):36-38.
- [6] 杨旭,张雪萍,王继富,等.人工湿地组合工艺处理对含油含污水净化效果研究[J].生态环境学报,2013,22(4):662-665.
- [7] Israa Abdulwahab Al-Baldawi, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Fatimah Suja, et al. Effect of aeration on hydrocarbon phytoremediation capability in pilot sub-surface flow constructed wetland operation[J]. Ecological Engineering, 2013, 61:496-500.
- [8] 杨旭,刘硕,陈晓红,等.表流人工湿地——聚砜膜组合工艺处理含油污水效能研究[J].哈尔滨师范大学:自然科学学报,2012,28(6):88-90.
- [9] Bethany L Alley, Ben Willis, John Rodgers Jr, et al. Water depths and treatment performance of pilot-scale free watersurface constructed wetland treatment systems for simulated freshoilfield produced water[J]. Ecological Engineering, 2013, 61:190-199.
- [10] 黄锦楼,陈琴,许连煌.人工湿地在应用中存在的问题及解决措施[J].环境科学,2013,34(1):401-408.
- [11] Mohamed I Badawy, Rifaat A El-Wahaab, Ahmed Moawad, et al. Assessment of the performance of aerated oxidation ponds in the removal of Persistent Organic Pollutants (POPs): A case study[J]. Desalination, 2010, 251:29-33.
- [12] 胡琦.大港油田氧化塘生物处理采油污水[J].油气田环境保护,2006,16(1):21-22.
- [13] 桑玉全,马晓蕾.氧化塘技术处理采油污水运转效果监测及分析[J].油气田环境保护,2006,16(1):46-48.
- [14] 桑玉全,郑经堂.粉煤灰厂氧化塘内微生物生长状况探讨[J].煤炭技术,2011,30(2):14-215.
- [15] Shpiner R, Liu G, Stuckey D C. Treatment of oilfield produced water by waste stabilization ponds: Biodegradation of petroleum-derived materials [J]. Bioresource Technology, 2011, 100(24):6229-6235.
- [16] 刘彦婷,齐永红,杨宏远,等.基于CASS工艺的炼油污水生化处理研究[J].当代化工,2012,41(1):63-65.
- [17] 韩国义,郑俊,王正收,等.隔油气浮两段生化法处理炼油厂含油污水[J].中国给水排水,2012,26(2):64-67.

度和比表面积随压力的增加基本保持不变。

1.2 金属有机骨架材料

MOF材料是由金属离子和有机配体自组装而成的配位聚合物,具有三维的孔结构,这类材料孔道均一,孔径可调,其催化、储能、分离和微观吸附特性被广泛研究。

不饱和的金属吸附位在吸附过程中与气体分子发生电荷相互作用,并由于金属位价键的不同而具有高度的选择性。Karra等^[6]根据理想溶液吸附理论研究了MOF-14对CO₂/CH₄和CO₂/N₂的吸附选择性,结果表明,CO₂/N₂的分离系数高于CO₂/CH₄,丰富的微孔和开放的金属吸附位使其很适合分离CO₂和N₂。Anbia等^[7]也通过研究证明,CH₄的吸附量与MOF-235的孔容和众多金属吸附位有关。

MOF材料的吸附过程复杂多变,伴随着传质和传热,由于宏观现象不能很好地解释微观分子间发生的相互作用,分子模拟被逐渐应用于吸附存储的研究中,为实验提供了越来越重要的参考和指导。Ding等^[8]根据巨正则蒙特卡罗模型模拟得出MOF-399完全活化后比表面积将达到7 100 m²/g,孔容为7.55 cm³/g,这将是已合成的MOF材料中的最高值。Bao等^[9]从热力学角度研究了CO₂和CH₄在MOF材料上的吸附分离性能,结果表明,CO₂和CH₄在Cu-MOF上的吸附热均低于在碳分子筛和5 Å沸石上的热值,该MOF材料具有良好的热稳定性。

Jia等^[10]使用直接混合法将对苯二甲酸和三乙胺溶解在*N,N*-二甲基甲酰胺中制备MOF-5,在不同压力下考察了致密化处理对MOF-5的甲烷体积存储量的影响,结果表明,机械挤压可以提高堆密

度,但在一定程度上降低了甲烷的存储量。晶体密度是堆密度的上限,这种密度在实际制备中是不可能达到的,因此3.69 MPa下得到的最大甲烷存储量81 v/v远低于其他学者根据晶体密度得到的135 v/v。

1.3 沸石材料

沸石相对活性炭具有更均一的孔径,因此许多学者尝试将二者结合起来制备CH₄吸附材料,Antoniou等^[11]将硬模板法和化学气相沉积法相结合制备高比表面积沸石状碳材料,Song等^[12]通过研究Y型沸石中的糠醇热解合成的3种活性炭,发现降低热解温度有利于孔径的均一,也能促进直径小于1 nm的微孔的形成,升高温度有利于高比表面积和大孔容的形成,但当温度过高时,会造成微孔塌陷和中孔的形成。

Rad等^[13]以KOH、NaOH和Na₃AlO₃为原料,硅胶和硅酸为2种不同硅源,采用水热法制备T型沸石。具体方法是,将KOH和NaOH溶解在去离子水中,缓缓加入Na₃AlO₃,最后加入硅胶或硅酸,同时搅拌混合物,在室温下搅拌1 d后将凝胶置于高压灭菌器中在378 K下保存7 d,最后用去离子水清洗白色固体,在110 K下烘干。作者通过考察硅源、相对碱度和硅模块等合成参数对水热法制备T型沸石的影响发现,使用硅胶作为硅源能提高T型沸石的结晶度和相纯度;增加硅模块,减少相对碱度能提高产品的相对结晶度。

傅明星等^[14]制备的P型沸石对Cd⁺的吸附率达到97.82%,但由于孔径较小,P型沸石的存储能力不足。王楠等^[15]以聚酰胺酸为前驱体,Y型沸石为掺杂物,采用刮涂法制膜,经高温炭化制得Y型沸石/炭杂化膜,并考察了沸石含量和炭化温度对杂

(上接第29页)

[18] 张铁刚,隋许英,苏升坚,等. CASS + BAF工艺在炼油污水处理中的应用[J]. 水处理技术,2010,36(2):126-128.

[19] Moacir Messias de Araujo Junior, André Lermontov, Philippe Lopes da Silva Araujo, et al. Reduction of sludge generation by the addition of support material in a cyclic activated sludge system for municipal wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2013, 143:483-489.

[20] Siti Roshayu Hassan, Irvan Dahlan. Anaerobic wastewater treatment using anaerobic baffled bioreactor: A review [J]. Central European Journal of Engineering, 2013, 3(3):389-399.

[21] 郑虎斌. 污水生化处理技术在濠洲终端的应用研究[J]. 价值工程, 2010, (2):116-118.

[22] 张华, 张学洪, 王敦球, 等. ABR + SBR工艺处理高盐采油污水工程[J]. 水处理技术, 2008, 34(2):89-91.

[23] 郑德俊, 任运根. 组合工艺处理炼油污水工程实践[J]. 福建建筑, 2008, (12):119-121.

[24] Ali Reza Pendashteh, Luqman Chuah Abdullah, Fakhru'l-Razi A, et al. Evaluation of membrane bioreactor for hypersaline oily wastewater treatment [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2012, 90(1):45-55.

[25] 李继宏, 胡筱敏, 李亮, 等. 膜生物反应器处理聚驱采油污水研究[J]. 环境污染与治, 2013, 35(2):28-33.

[26] 刘锋平, 李薇, 李继强, 等. HRT对UASB-SMBR(PTFE)组合工艺处理某油田含油污水性能的影响[J]. 石油学报:石油加工, 2013, 28(6):1053-1060.

[27] Ali Reza Pendashteh, A. Fakhru'l-Razi, Naz Chaibakhsh, et al. Modeling of membrane bioreactor treating hypersaline oily wastewater by artificial neural network [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(2):568-575. ■