网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20160317.1056.038.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：刘喜元，李树，谢承利，等. MBR运行参数对处理船舶含油餐饮废水的影响[J]. 中国舰船研究，2016，11(2)：133-138.
LIU Xiyuan, LI Shu, XIE Chengli, et al. Effects of operating parameters of MBR on the treatment of ship's restaurant oily wastewater[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(2): 133-138.

MBR运行参数对处理船舶含油餐饮废水的影响

刘喜元[1]，李树[2]，谢承利[1]，王良武[1]
1 中国舰船研究设计中心，湖北 武汉 430064
2 中国农业机械化科学研究院，北京 100083

摘　要：膜生物反应器(MBR)处理船舶含油废水在工程中得到了广泛的应用，为了研究膜生物反应器运行参数对处理船舶含油餐饮废水的影响，通过生产油脂产生的废水模拟船舶含油废水的水质特性，搭建小型膜生物反应器陆上试验系统，用光谱仪等仪器测量化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)及氨氮等参数。研究膜生物反应器的水力停留时间(HRT)、COD和BOD及氨氮、膜压力、污泥浓度等指标之间的关系。系统稳定运行了70天。研究结果表明：膜生物反应器对油脂废水中COD、油、总碳(TOC)和BOD的去除率达80%以上，对氨氮的去除率达50%以上；油对膜的污染有较大影响。

关键词：船舶污水处理；膜生物反应器；水质特性；水力停留时间；含油餐饮废水
中图分类号：U664.9　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3969/j.issn.1673-3185.2016.02.019

Effects of operating parameters of MBR on the treatment of ship's restaurant oily wastewater

LIU Xiyuan[1], *LI Shu*[2], *XIE Chengli*[1], *WANG Liangwu*[1]
1 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China
2 Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

Abstract: Membrane bioreactor (MBR) has been widely applied to the treatment of ship's oily wastewater. To study the operating parameters of MBR on the treatment of oily wastewater produced by onboard restaurants, wastewater is first produced from axunge which simulates the water characteristics of ship's oily wastewater, and a small shore-based MBR system is subsequently founded. Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand(BOD), ammonia nitrogen are tested with the measuring device like spectroscope. The relationship between the Hydraulic Retention Time(HRT)s, COD, BOD, ammonia nitrogen, membrane pressure and sludge concentration during the 70 days operation of the MBR system is also studied, which shows that the MBR could remove the COD, oil, TOC, BOD by over 80% and ammonia nitrogen by over 50% in oily wastewater. Furthermore, the research also indicates that the oil greatly affects the membrane fouling.

Key words: ship sewage treatment; membrane bioreactor (MBR); water quality characteristic; Hydraulic Retention Time(HRT); restaurant oily wastewater

0 引　言

船舶是流动的平台，船员在生活过程中会产生大量的含油餐饮废水，而废水的排放会对水域产生严重的污染，尤其是在船舶锚泊、靠港时，并且污染的水域随着船舶的航行也会呈现出污染范

收稿日期：2015-01-25　　**网络出版时间：**2016-3-17 10:56
作者简介：刘喜元，男，1965年生，研究员。
王良武(通信作者)，男，1985年生，硕士，工程师。

围扩大的趋势。虽然目前在国际防污公约及大多数国家的环境保护法规中未对船舶餐饮废水提出具体的排放指标要求[1],但鼓励处理后再排放,且随着技术水平和环保要求的逐步提高,对含油餐饮废水处理后达标排放将成为必然趋势。

而在船舶含油餐饮废水的收集和处理上,中餐与西餐具有不同的特点。与西餐相比,中餐含油量大、残渣多,处理中餐产生的含油废水使我国船舶污水处理技术面临更大的挑战。船舶管路管径较小,而含油餐饮废水中含有油脂、固体颗粒,油脂聚集凝结后容易附着在管壁上,使管径不断"缩小",固体颗粒则容易堆积在弯头、阀门处造成堵塞。与岸上工程相比,受船舶空间和排水量限制,含油餐饮废水在处理过程中的水力停留时间(HRT)、沉淀池容积设置、残渣预处理及膜污染后的清洗都是污水处理过程中需要解决的难题。

膜生物反应器(MBR)由于出水水质好,稳定性高,可获得比普通活性污泥法高得多的生物浓度,能极大地提高生物降解能力和抗负荷冲击能力[2],因而作为一种成熟的污水处理技术被广泛应用于工业废水、生活污水的处理,成为当前污水处理技术的主流方向。

尽管MBR在处理含油餐饮废水方面已有较多的研究,但不同的HRT情况下,对于MBR处理含油餐饮废水过程中溶解性有机物特性(DOM)的研究仍处在不断探索中,而溶解性有机物的物质组成及结构变化与污染物的降解和膜污染速率密切相关[3]。本文将结合船舶餐饮废水水量和成分波动大的特点,采用小型系统原理模型的方法,研究船舶含油餐饮废水中污染物对膜的影响以及生化处理的效果。为保证研究的稳定性,试验中采用含油废水替代含油餐饮废水。

1 含油废水的水质特性

含油废水中的有机组分大多以动植物油、脂肪酸和胶质等物质为主,基本上可以被生物降解。因船舶含油餐饮废水的水质波动大,采集困难,采用了某油脂生产车间经预处理后的废水作为试验研究对象,其含油率基本稳定,易于获取和存储。搭建的处理含油废水的小型膜生物反应器系统稳定运行了70天,得到如表1所示的处理后的水质特性结果。其中,化学需氧量(COD)、油、总碳(TOC)和生化需氧量(BOD)的含量仍较高,均未达到GB 18918-2002[4]规定的国家一级排放标准。而从BOD/COD的比值(平均0.51)来看,废水中的污染物主要是生物可降解性有机物。

表1 含油废水的水质特性

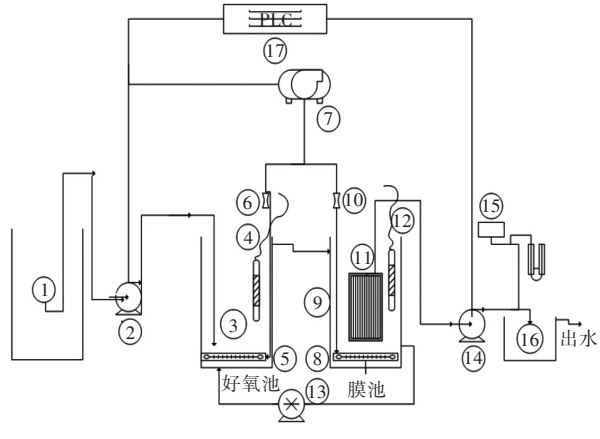
Tab.1 Water quality characteristics of oily wastewater

项目	范围/(mg·L^{-1})	平均/(mg·L^{-1})
COD	1 355 ~ 2 009	1 775
油	4 080 ~ 6 230	4 991
TOC	689 ~ 971	828
氨氮	3.7 ~ 34.1	7.9
BOD	712 ~ 1 136	907

由于常规的生物工艺出水中残留的有机污染物浓度和浊度仍相对较高,故需进一步采用强化处理技术去除这些污染物,以减小对环境的影响。近年来,MBR技术在难降解的工业废水和洗浴废水处理中已相继应用。有关研究人员采用MBR对工业含油废水进行了处理,发现能有效去除工业含油废水中的难降解有机物。目前,用于含油废水深度处理的技术包括气浮、无机膜过滤等工艺,而采用MBR处理含油废水的相关报道则相对较少[5]。因此,有必要对实际工程应用MBR系统中的膜污染问题进行较为系统的研究,以提供高效和稳定运行的科学依据。

2 试验模型

为了验证含油废水对MBR的影响,根据船舶污水处理工艺搭建了小型膜生物反应器试验系统,如图1所示。试验系统由调节池、好氧池和膜池等组成,系统的主体采用有机玻璃加工,以便实时观察池内液位状态,并通过量杯分别采集调节池和清水池的水样进行分析。作为试验模型的进水水样和出水水样,进水流量由进水计量泵控制,每天的进水量约为25 L。



1-调节池;2-进水计量泵;3-好氧池;4-好氧池加热棒;5-好氧池微孔曝气管;6-好氧池气体流量计;7-空气泵;8-膜池穿孔曝气管;9-膜池;10-膜池气体流量计;11-膜组器;12-膜池加热棒;13-污泥回流泵;14-产水隔膜计量泵;15-压力传感器;16-清水池;17-PLC自控箱

图1 MBR试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the MBR test system

试验系统各组成部件参数如下：

1）调节池。用于贮存含油废水，按照产水每天25 L计算，定期采集水样，调节池的总容积约为50 L。

2）好氧池。用于降解水体中的有机物，培养污泥，采用微孔曝气为微生物提供一个良好的生存环境，HRT按照12 h计算，有效容积按照24 L计算，总容积约为30 L。

3）膜池。用于安装膜组件，试验用膜组件选用PVDF膜，有效膜面积0.05 m^2，HRT按照2 h计算，有效容积按照4 L计算，总容积约为12 L。

4）清水池。用于存放产水，容积为20 L。

3　试验仪器

使用的试验仪器如下：

1）扫描电子显微镜。用于观察污染前后膜丝表面的形貌变化及其截面的变化。

2）压汞仪。用于测量膜丝的孔径和孔隙率。

3）电子万能试验仪。用于测量拉伸强度和延展率。

4）接触角测定仪。用于测量样品材料表面水滴与表面之间的夹角，反映样品材料表面的亲疏水性。

5）耦合等离子体发射光谱仪。用于测量膜丝表面沉积的无机离子浓度，包括钙、镁、铝、铁、硅、磷、锰和铜等，可以反映MBR试验中膜丝上无机物的污染情况。

6）傅立叶变换红外光谱仪。用于测量膜丝外表面沉积的有机污染物。

7）X射线光电子能谱仪。用于对膜丝外表面沉积的有机和无机元素进行整体定量分析，以更精确地分析膜丝表面污染物元素的含量。

4　含油废水处理的试验结果

试验采用连续运行方式，含油废水通过进水泵从调节池进入好氧池，在好氧池中经过充分的充氧后推流进入膜池，膜池的液位通过液位计控制，整个系统通过PLC自控箱控制。每隔一段时间采集反应器内的水样，进行水质分析。下面介绍水质分析后得到的MBR中HRT对COD、油、TOC、氨氮及BOD的去除率的影响。膜通量对过膜压力（TMP）的影响和溶解氧（DO）、温度、pH值及污泥浓度的变化情况，最后对试验结果进行分析。

4.1　HRT对COD去除率的影响

HRT是涉及污水生物处理系统的一个重要参数，它不仅与系统的处理效果有关，还直接决定了生物反应器容积的大小[6]。试验系统稳定运行后，测量含油废水进、出水的COD含量，定期采集水样，共取样16次。如图2所示，进水的COD含量在1 400 ~ 2 000 mg/L之间，出水的COD含量在150 ~ 380 mg/L之间。

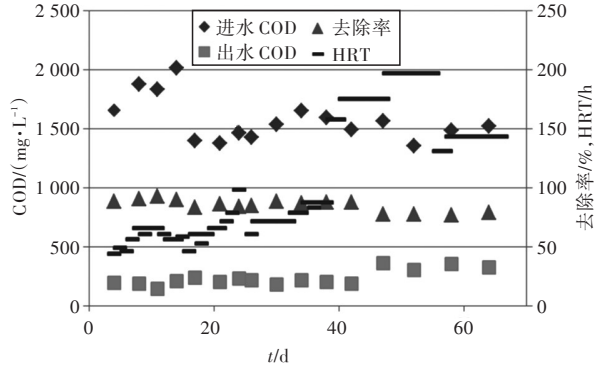


图2　HRT对COD去除率的影响

Fig.2　Removal effect of HRT on COD

从测量结果可以看出，COD的去除率随着HRT的变化而变化，但当HRT为70和140 h时，COD的去除效果差别不大，平均去除率为85.2%，相应的出水浓度为233.6 mg/L。有研究表明：COD的去除与污泥浓度有关，随着系统连续运行时间的增加，污泥浓度不断累积，可挥发性污泥浓度（MLVSS）与污泥浓度（MLSS）的比值却呈下降趋势。MBR系统对COD的去除效果随污泥负荷的增加存在着先降后升的现象[7]。

4.2　HRT对除油率的影响

试验系统稳定运行后，测量含油废水进、出水的含油量，定期采集水样，共取样16次。如图3所示，进水的含油量在4 100 ~ 6 200 mg/L之间，出水的含油量在120 ~ 280 mg/L之间。

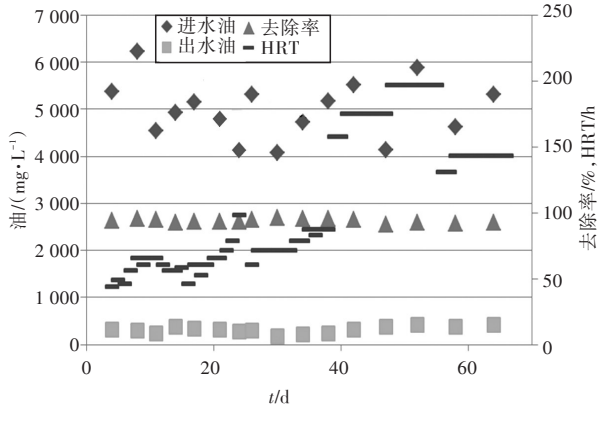


图3　HRT对除油率的影响

Fig.3　Removal effect of HRT on oil

由图3可知，进水中油的变化幅度较大，而出水中的含油量则较稳定，除油效果随着HRT的变化而变化，平均除油率为93.8%，相应的出水浓度为310.1 mg/L。

4.3 HRT对TOC去除率的影响

试验系统稳定运行后，测量含油废水进、出水的TOC含量，定期采集水样，共取样16次。如图4所示，进水的TOC含量在630～980 mg/L之间，出水的TOC含量在80～120 mg/L之间。

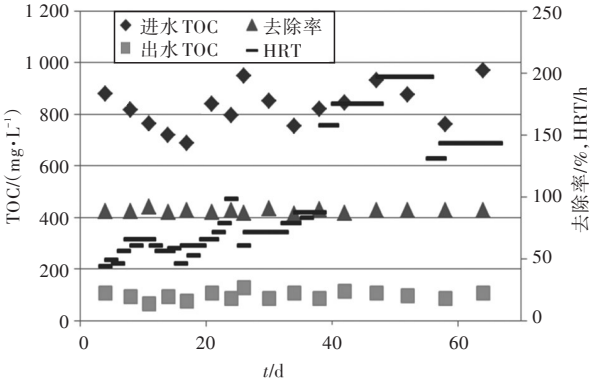


图4 HRT对TOC去除率的影响

Fig.4 Removal effect of HRT on TOC

由图4可知，去除TOC的效果随着HRT的增加而逐渐平稳，TOC的平均去除率为88.4%，相应的出水浓度为95.7 mg/L。

4.4 HRT对氨氮去除率的影响

试验系统稳定运行后，测量含油废水进、出水的氨氮含量，定期采集水样，共取样16次。如图5所示，进水的氨氮含量在4～34 mg/L之间，出水的氨氮含量在1～4.8 mg/L之间。

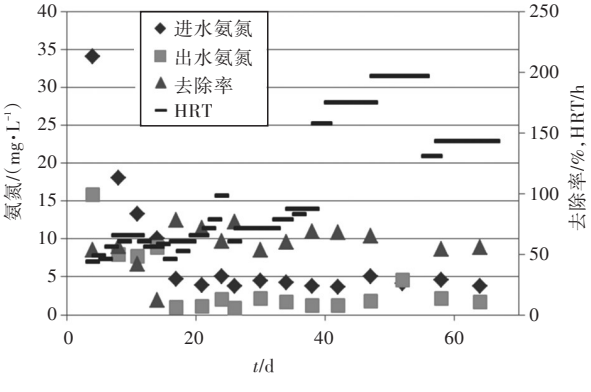


图5 HRT对氨氮去除率的影响

Fig.5 Removal effect of HRT on ammonia nitrogen

由图5可知，氨氮的去除率随着HRT的增大而逐渐平衡，氨氮的平均去除率为51.3%，相应的出水浓度为3.9 mg/L。

4.5 HRT对BOD去除率的影响

试验系统稳定运行后，测量含油废水进、出水的BOD含量，定期采集水样，共取样16次。如图6所示，进水的BOD含量在700～1 150 mg/L之间，出水的BOD含量在20～50 mg/L之间。

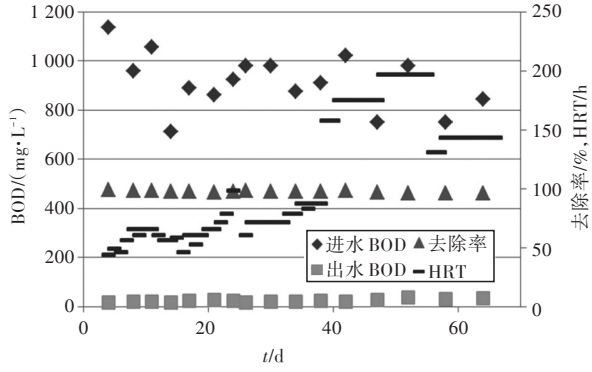


图6 HRT对BOD去除率的影响

Fig.6 Removal effect of HRT on BOD

由图6可知，BOD的去除效果随着HRT的增加而逐渐平稳，BOD的平均去除率为97.5%，相应的出水浓度为22.6 mg/L。

4.6 膜通量对过膜压力的影响

膜通量对膜污染的潜在趋势可以以膜所承受的压力来表现[8]，TMP对膜污染的试验结果如图7所示。可以发现，当膜通量较高（15 L/h）时，随着时间的增加，TMP变化较大。而将膜通量降低到8 L/h以下时，相应的TMP得到了有效控制，约在2~8 kPa之间。

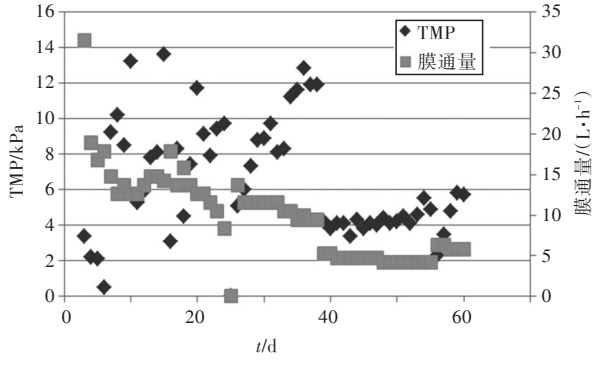


图7 膜通量对膜污染潜在趋势的影响

Fig.7 Effect of TMP on membrane fouling trend

当膜通量维持在15~20 L/h之间时，TMP的变化较明显，增加较为迅速。通过每周一次的化学清洗（500 mg/L次氯酸钠浸泡6 h）后，TMP有所降低，但随后又迅速增加。当将膜通量维持在5~8 L/h时，TMP得到了控制，维持在2~6 kPa之间。

4.7　溶解氧、温度和pH值的变化

试验中，处理含油废水的MBR共运行了70天，溶解氧、温度和pH值每天测量3次，试验结果如图8所示。

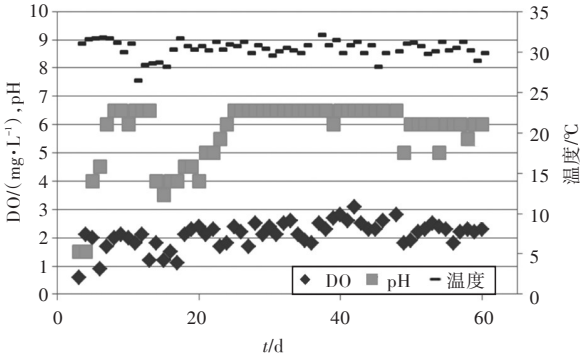


图8　MBR的运行状况

Fig.8　Experimental conditions of MBR

整个系统在运行过程中温度保持在30~35 ℃之间，因为温度的变化会加剧膜污染的速率，低温会加剧膜污染[9]。但是，当微生物适应低温环境后，膜污染速率会逐渐减缓，而低温时MBR的出水水质并未受到明显的影响[10]。由于原水的pH值较小，水体呈现酸性，因此，在调节池中将水体的pH值调至6.5~7.5之间，整个系统运行过程中的溶解氧保持在1~3 mg/L之间。

4.8　污泥浓度的变化

如图9所示，整个系统在运行过程中MBR中的污泥变化较为明显，随着MBR的运行，SV30（曝气池混合液在量筒静止沉降30 min后污泥所占的体积百分比）持续增加，最终维持在80%~95%之间。由于调节池底部沉积物（无机杂质）进入MBR，而且系统运行后一直未排污泥，因此，在后期运行过程中，MLSS逐渐增加到20 000 mg/L，但系统中的MLVSS基本维持在2 000~4 000 mg/L之间，整个系统对有机物的去除率仍然较高。

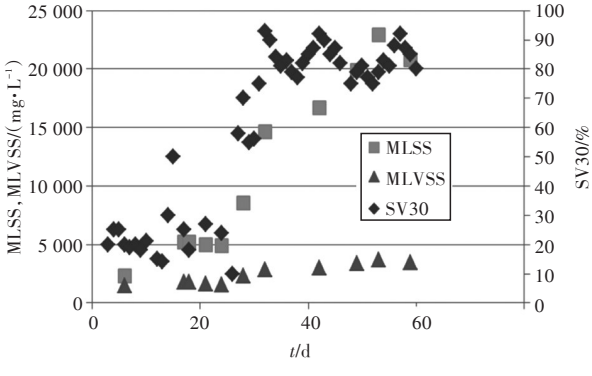


图9　MBR中的污泥性状变化

Fig.9　Changes of the sludge in MBR

4.9　试验结果分析

从以上试验结果可以看出，该试验系统对COD、油、TOC、氨氮和BOD均具有较好的去除效果。由于废水中的有机成分较为复杂，水体中难降解的有机污染物也较多，因此，出水中部分有机污染物还需进一步物化处理。污染物去除效果的差异是由系统有机负荷率的变化引起的[11]，表2为采用MBR处理含油废水的试验结果。

表2　MBR处理含油废水的效果

Tab.2　Treatment effects of oily wastewater by MBR

项目	进水/(mg·L⁻¹)	出水/(mg·L⁻¹)	去除率/%
COD	1 575.8	233.6	85.2
油	4 991.6	310.1	93.8
TOC	828.5	95.7	88.4
氨氮	7.9	3.9	51.3
BOD	914.3	22.6	97.5

从表2可以看出，油和BOD的去除率最高，其出水分别为310.1和22.6 mg/L，说明水体的可生化性较好。COD和TOC的去除效果相当，出水分别为233.6和95.7 mg/L，说明水体中的大部分有机物被降解，残留的有机物大多为难以生物降解的有机物。整个系统的氨氮降解率不佳，出水氨氮含量为3.9 mg/L，这可能与进水中的氨氮太少有关，但依然达到了GB 18918-2002规定的国家一级排放标准。

5　结　论

基于建立的试验系统，对MBR处理含油废水的试验过程进行了监测。重点研究了HRT对COD、油、TOC、氨氮、BOD去除率的影响和膜通量对过膜压力的影响，以及MBR中溶解氧、温度、pH值、污泥浓度的变化情况。通过研究，得出如下结论：

1）MBR处理含油废水，对于COD、油、TOC、氨氮和BOD有着很高的去除率，BOD和氨氮的含量达到国家一级排放标准。

2）当膜通量较高（15 L/h）时，随着时间的增加，TMP变化较大，而将膜通量降低到8 L/h以下时，相应的TMP得到了有效控制。

参考文献：

[1]　中国船级社. 经1978年议定书修订的1973年国际防止船舶造成污染公约[S]. 北京：人民交通出版社，2003.

[2]　刘韩超. 原水COD/N对膜生物反应器膜污染的影响研究[D]. 济南：山东大学，2011.

[3]　吴志超，何磊，王志伟. 水力停留时间对溶解性有机

物特性的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 556-561.

WU Zhichao, HE Lei, WANG Zhiwei. Influence of hydraulic retention time on characteristics of dissolved organic matter [J]. Journal of Tongji Universerty (Natural Science Edition), 2011, 39(4): 556-561.

[4] 国家环境保护总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918-2002[S/OL]. [2015-01-22]. http://wk.baidu.com/view/5eee62747fd5360cbaladb50?uid=1456452693567_20&ssid=31399dblec664609b36209e1b4de200.3.1456452724.1TVDJMpXngmK#1.

[5] JUDD S, JUDD C. Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.

[6] FANG H H P, YU H Q. Effect of HRT on mesophilic acidogenesis of dairy wastewater [J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 126(12): 1145-1148.

[7] 李秀芳, 吴建堃, 孙美侠. 污泥浓度对MBR净化效果影响试验研究[J]. 广东化工, 2014, 41(4): 74-76.

LI Xiufang, WU Jiankun, SUN Meixia. Effect of sludge concentration on removal efficiencies of membrane bioreactor [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(4): 74-76.

[8] 邢锴, 张宏伟, 龙树勇, 等. MBR中中空纤维膜和板式膜不同的膜污染机理[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2009, 42(11): 1028-1033.

XING Kai, ZHANG Hongwei, LONG Shuyong, et al. Different fouling mechanisms of hollow fiber membrane bioreactor and flat sheet membrane bioreactor [J]. Journal of Tianjin University (Natural Science Edition), 2009, 42(11): 1028-1033.

[9] ROSENBERGER S, LAABS C, LESJEAN B, et al. Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment[J]. Water Research, 2006, 40(4): 710-720.

[10] 李菊, 唐书娟, 王志伟. 温度对膜生物反应器运行特性及膜污染的影响[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(5): 110-114.

LI Ju, TANG Shujuan, WANG Zhiwei. Effect of temperature on the operating characteristics and membrane fouling in membrane bioreactor [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35 (5): 110-114.

[11] 袁丽梅, 张传义, 张雁秋, 等. 水力停留时间对膜生物反应器复合工艺污水处理特性的影响[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(5): 363-366.

YUAN Limei, ZHANG Chuanyi, ZHANG Yanqiu, et al. Effect of HRT on the performance of a step-feed hybrid MBR process treating synthetic domestic wastewater [J]. Environmental Pollution and Control, 2007, 29(5): 363-366.

(上接第120页)

DENG Zhihong, SHI Xiaocheng, XIA Guoqing, et al. Fault tolerant control for steam generators in nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31 (1): 107-111, 116.

[8] 张伟, 邓志红, 夏国清, 等. 蒸汽发生器故障诊断和容错控制中强跟踪滤波的应用研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(6): 23-27.

ZHANG Wei, DENG Zhihong, XIA Guoqing, et al. Research on fault diagnose and fault tolerant control of steam generator based on strong tracking filter[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(6): 23-27.

[9] 张永生, 马运义, 高伟, 等. U型管蒸汽发生器的简化集总参数动态模型[J]. 中国舰船研究, 2010, 5 (4): 52-55.

ZHANG Yongsheng, MA Yunyi, GAO Wei, et al. A simplified lumped parameter dynamic model for U-tube steam generator[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2010, 5(4): 52-55.

[10] 张永生, 马运义, 高伟, 等. 核动力蒸汽发生器水位的前馈反馈控制[J]. 船海工程, 2010, 39(4): 132-134.

ZHANG Yongsheng, MA Yunyi, GAO Wei, et al. Feedforward-feedback control of water level for the nuclear powered steam generator[J]. Ship and Ocean Engineering, 2010, 39(4): 132-134.