

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2014.12.013

船舶生活污水处理进展及发展趋势

胡芝悦, 钟登杰, 邓胡飞, 王立同

(重庆理工大学 化学化工学院, 重庆 400054)

摘 要: 针对国际海事组织提出的船舶污水排放新标准 MEPC. 200(62), 结合船舶生活污水自身的特点, 综述了船舶生活污水的处理方法、研究现状及处理方法的优缺点, 探索及改进了船舶生活污水处理新工艺, 并对船舶生活污水处理前景进行了展望。

关 键 词: 船舶生活污水; 环保; 处理工艺

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2014)12-0064-07

Trends and Progress of Ship Sewage Treatment

HU Zhi-yue, ZHONG Deng-jie, DENG Hu-fei, WANG Li-tong

(School of Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: According to the new standard MEPC. 200(62) of ship sewage emissions proposed by the International Maritime Organization, the treatment methods, research situation, advantages and disadvantages of ship sewage treatment were reviewed by combining with the own unique characteristics of ship sewage. The exploration and improvement of new ship sewage treatment technology was introduced and the development prospect of ship sewage methods was also looked ahead.

Key words: ship sewage; environment protection; treatment process

近年来, 由于运输成本的增加, 船舶运输业在国际商贸运输中占有的比重逐年增大。据统计^[1], 约90%~95%商品依靠船舶运输。船舶运输业发展给水体生态环境带来了巨大的挑战。联合国海事组织(International Maritime Organization, IMO)近些年连续提高船舶生活污水排放标准, 2016年1月1日起将执行MEPC. 200(62)决议(见表1), 相比现行标准更加严格。MEPC. 200

(62)决议不仅重申了船舶生活污水排放标准, 并且标明了控制排放任何船舶废水的区域坐标, 如夏威夷群岛、瓦胡岛、拉纳岛等海岸附近禁止排放生活污水。本文针对MEPC. 200(62)决议新标准, 介绍了船舶生活污水处理基本方法, 总结船舶生活污水处理的研究进展, 并对船舶生活污水处理的发展趋势进行展望。

收稿日期: 2014-06-25

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2011jjA20003)

作者简介: 胡芝悦(1988—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事废水处理研究。

引用格式: 胡芝悦, 钟登杰, 邓胡飞, 等. 船舶生活污水处理进展及发展趋势[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2014(12): 64-70.

Citation format: HU Zhi-yue, ZHONG Deng-jie, DENG Hu-fei, et al. Trends and Progress of Ship Sewage Treatment[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science 2014(12): 64-70.

表1 MEPC. 200(62) 控制排放主要指标

处理指标	控制量
BOD_5	$\leq 125 \text{ mg/L}$
COD	$\leq 125 \text{ mg/L}$
TSS	$\leq 35 \text{ mg/L}$
pH 值	6 ~ 8.5
N	$< 20 \text{ mg/L}$ 或 $> 70\%$
P	$< 1 \text{ mg/L}$ 或 $> 80\%$
大肠杆菌	$\leq 100 \text{ 个/100 mL}$
Cl^-	$< 0.5 \text{ mg/L}$

1 船舶生活污水

按照 IMO 定义,船舶生活污水主要可分为黑水、灰水。《防止船舶生活污水造成污染规则》规定:黑水必须经过处理达标后排放,对灰水排放却没有具体要求。从国外水域环境管理发展趋势看,灰水处理排放已经纳入船舶生活污水排放系统,灰水处理工艺日趋成熟,有关限制灰水排放处理的规范未来可能出台并作为保护海洋的重要依据。

船舶生活污水危害主要表现为:船舶生活污水中有机物降解导致水体发生氧亏,海洋气候环境恶化;缩短水华或赤潮爆发周期;生活污水中的细菌、病毒等能够引起人类寄生性和传染性疾病。

不同于城市生活污水,船舶生活污水处理受船舶环境限制。船舶生活污水的产生和排放受人类活动影响,波动性大,流量不稳定;卫生用具大多采用海水冲洗,其需处理指标浓度大,污染物负荷高^[2]。结合船舶本身的特点,船舶卫生系统应具备质量轻、体积小、耐腐蚀并能够适应船舶运动,能承受震动及摇晃等特点。从船舶生活污水处理发展来看,基本上沿用了改进的城市生活污水处理方法。其主要方法有物理法、化学法和生物法。

2 物理法

物理法作为船舶生活污水处理常用方法之一,主要采用机械方法分离生活污水中固体悬浮

物、胶体及分散性颗粒。分离后的滤渣可以直接送入焚烧炉中进行焚烧,达标后污水排出船舷或作为中水进行回用。物理方法处理船舶生活污水主要包括贮存法、絮凝-沉淀法、膜分离法等。

2.1 絮凝-沉淀法

絮凝-沉淀主要是向生活污水中投加絮凝剂,生活污水中大分子颗粒在分子力作用下形成絮状体,并在沉降过程中相互凝聚,脱离水相形成沉淀。

硅藻土具有较强吸附能力,是理想吸附剂。徐明^[3]考察了硅藻土对于生活污水出水水质的影响,综合考虑絮凝效果及经济效益,确定硅藻土最佳投加量为 30 mg/L ,并通过实验证明硅藻土对于 TSS 及 COD_{Cr} 的去除效果十分明显。郑水林等^[4]对硅藻土进行选矿提纯及表面处理,制备改性絮凝剂并将其应用于生活污水处理中。该处理剂可将水中 COD_{Cr}、TSS、TP 等污染物处理到 90% 以上。

2.2 膜分离法

活性膜具有选择透过性,膜分离技术在净化水质方面应用广泛。按照被截留固体粒径不同,膜分离分为微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)、反渗透(RO)。船舶卫生系统中膜过滤装置一般采用 UF 膜,该过程仅为物理过程,不会对水体造成二次污染。然而在膜分离过程中,由于滤饼形成,浓差极化和膜孔阻塞等问题造成膜污染,导致膜通量或跨膜压差减小^[5],需要对膜组件进行周期性清洗,增加了操作步骤及工艺的复杂性。

Julie Guilbaud^[6]利用 PCI-AFC80 管状膜直接处理船舶洗衣灰水(pH 值=7, COD=1 300 mg/L, TSS=80 mg/L)在 35bar 25℃下,出水中 COD、TSS 含量仅为 48 mg/L、7 mg/L。滤液可作为中水循环使用 3~4 次,该装置每天可以处理 65 m³ 的洗衣灰水,其中大约 52 m³ 循环进入洗衣机进水处,经浓缩后的灰水则加入到黑水处理体系。

刘婷等^[5]对比了在线反洗、离线混合正反洗等 3 种膜冲洗方法,结果表明:正反洗优于其他方法,膜通量可以达到冲洗前的 6 倍。采用错流工艺,生活污水切向流经膜表面使微粒既不能进入膜孔,又不能停留在膜表面引起膜表面阻塞^[7]。

金伟忠等^[8]针对膜过滤过程中膜孔易阻塞的问题,提出了曝气紊流、低压清洗及错流工艺,有效防止了浓差极化和滤饼堆积,长时间运行膜仍能保持较高通量。

3 化学法

化学法是船舶生活污水处理主要方法之一,主要是借助化学反应消除、降解和氧化污染物。化学法主要包括臭氧氧化消毒法、电化学法等。

3.1 氧化消毒法

舰船卫生系统所利用的氧化消毒方式为含氯氧化消毒剂、臭氧氧化消毒及紫外线消毒。含氯消毒剂在船舶生活污水处理中应用最为广泛,通过投加次氯酸盐、电解海水等产生强氧化作用及氯化作用。臭氧具有强氧化性并且能够作用于大肠杆菌蛋白质使遗传物质受到损伤,臭氧消毒法是船舶生活污水氧化消毒中最具有前途的处理工艺之一。由于臭氧在水中寿命短,其现场制取工艺复杂且需要占用大量空间,目前只应用于对卫生条件要求较高的大型医疗船。利用氧化消毒工艺处理船舶生活污水装置主要有美国 ENVIROCINC 公司生产的 ORCA II 系列装置。

朱巧英^[9]针对氯化物消毒不完全且易产生“三致”副产物的缺点,考察了臭氧通入量及消毒时间对氧化消毒效果的影响。实验结果表明:在实验室静态条件下,当臭氧投加量为 $7.0 \sim 8.0 \text{ g/m}^3$,消毒时间达到 3 min 时,大肠杆菌的数量少于 100 个/100 mL,达到了 MEPC. 200(62) 决议的标准。

3.2 电化学法

利用电化学反应,精确控制电子得失和电极电势在电极表面发生特定的氧化还原反应,处理生活污水。电化学处理船舶生活污水方法主要有电絮凝、电催化氧化、微电解等。

3.2.1 电絮凝

以铁或铝为阳极,在直流电流作用下,金属阳极失去电子溶出 Fe^{2+} 或 Al^{3+} ,经一系列水解、聚合反应生成多核羟基络合物和氢氧化物。电絮凝较絮凝-沉淀法更具优势,絮凝体能够克服船舶摇晃,在重力及电场作用下定向移动,沉淀完全。电

絮凝由于其良好的处理效果,在旧船改造过程中有广泛应用。

龙奎等^[10]将电絮凝与电解技术耦合,综合二者优势,采用单因素优化方法确定电絮凝处理参数,再采用电解法进行深度处理船舶生活污水,取得了良好的处理效果,尤其是 COD 的总去除率达到了 93%。青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司研制出新一代拥有自主知识产权的生活污水处理系统。该系统主要包括电絮凝单元、电解单元、消氯单元等核心部件,综合利用絮凝作用、电解电极氧化作用、次氯酸钠杀菌作用以及紫外消氯作用处理污水,可满足各类船舶及海上平台的污水处理需求。该系统具有体积小、耐水力负荷冲击性好、处理效果稳定、自动化程度高等特点,总体技术和主要指标都处于国际先进水平。

3.2.2 电催化氧化法

在外加电场作用下,经过一系列物理、化学和电化学变化,有催化活性的电极在水处理过程中能够有效去除污染物,甚至能将难生化降解、有毒的有机物氧化为易于生化降解的有机小分子物质。电催化氧化具有广泛的应用前景,目前有关电催化氧化的研究主要集中在有机物降解的影响因素及机理探讨、电极的开发及制备、反应器设计及供电方式革新等。

电极在电催化氧化技术中处于中心地位,电极材料对阳极析氧能力和电流效率影响巨大,理想电极应具备良好的导电性、高析氧过电位、高催化活性、高稳定性。1963 年 Since Beer 发明了“形稳阳极”(dimensionally stable anodes, DSA),即在金属基体上沉积一层厚度大约几微米的金属氧化物,研究人员对形稳阳极进行了包括制备、电催化氧化机理、掺杂、阳极钝化等多方面进行了研究并取得良好的效果。李小波^[11]在钛基涂层电极的氧化物涂层中掺杂一些其他的金属和非金属元素,形成表面缺陷,在禁带间可形成与中间化合物作用的电子表面态,使半导体表面的电极反应过程加快。

刘珊等^[12]利用 Ru/Sn 电极处理生活污水,各项指标均达到国家一级生活污水排放标准,并论证了中间产物的杀菌作用。汪定国^[13]利用 Ti/

$\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ti/RuO}_2\text{-IrO}_2$ 和 $\text{Ti/SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2/\text{PbO}_2$ 3 种电极处理模拟生活污水,研究了电解时间、电流密度、电解质浓度对电解效果的影响。结果表明:在最佳反应条件下 COD、氨氮及大肠杆菌去除率能分别达到 95%、100%、100%。李彩然^[14]利用 $\text{Ti/IrO}_2\text{-RuO}_2$ 电极对模拟船舶生活污水进行处理, COD_{Cr} 浓度为 1 065 mg/L, 固体悬浮物浓度为 183 mg/L, pH 值为 7.2, 大肠杆菌为 3.6×10^5 个/100 mL。2 h 之内电极对溶液中 COD、 BOD_5 的去除率达 80% 以上, 对于大肠杆菌的去除率可达 100%。结果表明: $\text{Ti/IrO}_2\text{-RuO}_2$ 在处理船舶生活污水过程中电极稳定性好, 具有很强的析氯及催化能力。

3.2.3 微电解技术

向生活污水反应器中投加铁、碳混合颗粒, 铁碳表面形成大量微小原电池, 放电过程中形成羟基自由基、活性氢原子及 Fe^{2+} 等具有反应活性的粒子。该方法是一种集电化学、氧化还原、物理吸附、电絮凝等为一体的污水处理方法^[15]。主要用于生活污水预处理, 通常与活性污泥法联用。微电解技术在高浓度有机物去除、有机物脱色、提高絮凝效果等方面应用广泛。

王新奇等^[16]将海绵铁投入活性污泥处理系统中, 形成微电解-活性污泥处理系统, 利用该系统处理 COD_{Cr} 浓度为 600 mg/L 的生活污水, 出水中 COD_{Cr} 平均浓度为 20.1 mg/L。远远高于 MPEC. 200(62) 决议的要求。微电解-活性污泥是处理高有机物浓度生活污水的一种重要方法。在该系统中海绵铁可以为微生物提供附着生长的位点, 其形成的微电流能够协同活性污泥处理高有机物浓度生活污水。

Yang Xiaoyi^[17]将微电解-活性污泥同微电解法及活性污泥法进行对比, 结果表明: 微电解-活性污泥法具有很高的处理效率, 利用该方法处理高浓度 COD 废水, 去除率可达 93.9%。

4 生化法

同能耗大、花费高的电化学法相比, 生化法因其经济性, 在船舶生活污水处理中广泛应用。在

现役船舶卫生系统中, 生化装置占有绝对优势。通过对微生物诱导及驯化并提供有利于微生物生长繁殖的环境, 达到提高微生物代谢处理生活污水的目的。生化法主要有接触式生物氧化法、活性污泥法、序批次活性污泥、MBR 膜生物等。

4.1 接触式生物氧化法

生物接触式氧化是在生物膜法派生出的一种生活污水处理方法, 添加适宜微生物附着生长的填料, 曝气充氧后的污水以一定的流速流经处理单元并浸没全部填料, 污水与生物接触, 通过生物氧化作用, 分解生活污水中的有机物。生物接触氧化具有净化效率高、处理时间短、耐冲击负荷能力强、无剩余活性污泥等优点。为旧船改造加装生活污水处理装置提供了良好的技术条件。接触式生物氧化处理装置主要有日本大晃公司生产的 SBT 型及交通部上海船舶科学运输研究所生产的 CSWA 系列。

陈志莉^[18]进行了生物接触法模拟处理船舶生活污水实验, 重点考察其对 COD_{Cr} 、SS、 BOD_5 及氨氮等去除效果。生物接触氧化工艺可以较好地去除模拟船舶生活污水, 并在水质波动较大的情况下获得稳定出水, 具有良好抗冲击性能, 出水也符合国际海事组织环保会议决议。董良飞等^[19]采用 UBF-接触氧化反应器处理船舶生活污水, 接触生物氧化池中微生物代谢及表面膜更新速率较快, BOD_5 及 SS 的检测结果表明: 出水质量均达到了国家船舶生活污水处理的排放要求。

4.2 活性污泥法

活性污泥法在控制水环境污染进程中发挥重大作用。由于活性污泥疏松的结构, 因此其对污水中悬浮物及可溶性有机物等大分子物质具有很强的吸附凝聚及氧化分解能力, 在此基础上结合一定的人工措施, 可高效率地处理污水。目前, 发展成熟的活性污泥处理装置有英国哈姆沃西公司的 ST 型装置、美国红狐公司的 RF 装置及江苏南极公司的 WCB 型装置等。

活性污泥法属成熟水处理工艺, 但生活污水中溶氧量、温度及污水 pH 值的波动都会引起活性污泥膨胀问题, 主要原因为: 在不当地条件下, 活性污泥中丝状菌、贝氏菌及丝硫菌呈指数增长, 通过

增加厌氧工艺(A/O 或 A^2/O) 段和投加适量絮凝剂能有效抑制活性污泥的膨胀问题,同时能够强化活性污泥脱氮、脱磷性能,提高反硝化作用。Abid Ali Khanp^[20]综述了厌氧流化床与微好氧反应器联用处理生活污水技术,在后处理过程中去除悬浮于生活污水中的胶体、病原体及氮、磷等营养性盐类。刘硕^[21]采用复合式 A^2/O 工艺,通过排泥的方法实现磷的去除。TN、TP 的去除率达到了 70% 以上。

4.3 序批次活性污泥法

序批次活性污泥反应器(sequencing batch reactor, SBR)采用空间分隔的操作方式将连续型操作改为间歇型操作。SBR 兼有推流、厌氧、好氧循环处理过程,提高了操作弹性和反应灵活性。

单立志等^[22]将内循环生物流化床与电化学消毒工艺结合起来建立了 SBR 式流化床船用污水处理设备,在生物流化床反应器处理污水的同时,电化学消毒器对上清液进行消毒,设备出水水质完全满足《船用生活污水处理系统技术条件》(GB10833—89)。Moawad^[23]考察了厌氧流化床—序批次活性污泥反应系统对生活污水的处理效果,结果表明:经处理后,COD、BOD 及 TSS 的残余浓度分别为 26.5、85.0 mg/L。Khan et al^[24]进行了流式厌氧床—间歇式序批次活性污泥反应器放大性能的测试,其中 BOD、TSS 的去除率分别达到了 90%、90%。

4.4 MBR 膜生物法

膜生物反应器(membrane bio-reactor, MBR)是膜分离与生物处理相结合的新兴污水处理技术。通常由反应器内好氧细菌降解生活污水中有机物、硝化细菌氧化氨氮、膜分离技术强化分离、增强反应器功能等。MBR 由生物膜移动床和水下膜分离反应器组合成,通过控制曝气比产生厌氧、缺氧及好氧等条件。目前应用于实际生产的主要有好氧膜生物、A/O 膜生物、 A^2/O 膜生物等工艺^[10]。

MBR 具有设备紧凑、自动化程度高、污泥产生量小、出水水质好等优点,广泛用于旧船改造和新型船舶的装备上。由于生物膜高效截留,出水可以直接进行回用,因此 MBR 在生化法处理船舶生

活污水中是最有前途的反应器。

马如中^[25]对比了 MBR 与传统的膜分离技术认为:MBR 不但起渗透分离作用,而且表面的生物膜也参加了化学反应。研究表明:去除污水中的有机物依靠微生物的新陈代谢,微生物的浓度越高,有机物去除能力越强;膜生物反应器可将传统的污泥质量浓度由 2 000 mg/L 提高到 6 000 mg/L;有机物去除能力为传统污水处理的 5~7 倍。同时,由于膜高效截留作用,MBR 出水悬浮物接近于 0,细菌总指标优于饮用水标准,COD 和氨氮去除率可分别达 95%。Tao Wang^[26]对 MBR 和 SBR 进行厌氧氨氧化菌的接种,反应启动时间方面相对于 SBR 缩短了 41.6%,在氮元素去除方面相比于 SBR 提高了 53.2 mg/(L·d)。张先超等^[27]针对船舶生活污水中 BOD_5 及 TSS 比城市生活污水高得多的问题,选取生物法+MBR 作为主要处理工艺处理高 COD、高 TSS、高 BOD_5 (1 122 mg/L、946 mg/L、732 mg/L) 生活污水。样机处理结果表明:COD、TSS、 BOD_5 的去除率分别达到 92%、98%、97%,大肠杆菌检测值为 0,完全达到了决议的标准。Sun Cheng^[28]利用 MBR 同时处理黑水、灰水和船舱压载水,膜反应单元和膜分离单元单独操作实现最佳操作条件,实验表明:该反应器具有高渗透效率和高有机物去除率。

5 存在问题及展望

目前,船舶生活污水处理工艺具有各自的优势和缺点(见表 2)。膜材料、微生物鉴定和分离、电化学技术及其交叉学科的发展为船舶生活污水处理提供了良好的理论基础和技术支持^[29]。膜分离、MBR、电催化氧化在未来船舶生活污水处理过程中理应发挥主要作用。另外,由于船舶生活污水成分复杂、处理指标繁多,单一的处理工艺往往不能满足排放标准,联合处理工艺往往能够发挥各自优势而对船舶生活污水处理装置的研究和应用带来新突破。英国哈姆沃西公司就曾开发过一种以粗分离+生物处理+膜分离为原理的污水处理装置,符合黑、灰水处理要求,并用于大型的游船。白韬光等^[30]认为重力预处理—精密过滤

—膜分离技术具有良好的发展前景。笔者认为应该结合船舶生活污水本身的特点,采用不同反应器处理船舶生活污水,因此提出了利用电絮凝—电催化氧化耦合处理模式。电絮凝反应器主要用于去除船舶生活污水中的 TSS、TP、大肠杆菌等大

颗粒有机物,掺杂有海水的电催化氧化反应器主要用于去除船舶生活污水中的 TN、COD、BOD₅等,并且能够避免海水中 Ca²⁺、Mg²⁺等离子对絮凝电极产生的极化和钝化现象。

表2 各类船舶生活污水处理技术及工艺特点

处理技术		优势	存在问题	设备型号
物理法	絮凝—沉淀	操作简单,经济	重力沉淀效果不明显,多用于船舶生活污水预处理过程	ATLAS 系列(丹麦)
	膜分离	在去除 TSS、盐类、大肠杆菌、效果明显	主要存在膜易阻塞的问题,费用高昂	
化学法	化学氧化消毒	处理 COD _{Cr} 等方面具有较大优势	易产生“三致”污染物,处理不完全。	ORCA II 系列装置
	电絮凝	处理量大,处理迅速	能耗大,材料消耗大,成本高,产生污泥量大	Omnipure 电解法
	电催化氧化	设备占地面积小,处理效率高,处理效果彻底	能耗高,电极寿命短,副反应严重,反应机理不明确	(美国 Seven Trent Denora)
	接触式生物氧化	净化效率高,污泥剩余少,耐冲击负荷能力强。	需要专业人员长期驯化细菌;污水负荷大幅度变化时处理效果不佳;	日本大晃 SBT 型 交通部上海船舶科学运输研究所 CSWA 系列
生化法	活性污泥	氮,磷 COD, TSS 等去除效果好	活性污泥引发恶臭 ^[9] ;反应器启动时间较慢;	ST 型(英国哈姆沃西)
	MBR	设备紧凑,自动化程度高,活性污泥少,出水水质好。	生物膜机械性能差,受环境、温度影响很大。	RF 型(美国红狐) MBR-xx 系列

6 结束语

2016 年 1 月 1 日,MEPC. 200(62) 决议将执行。由于原有生活污水处理装置在大多数情况下无法满足处理要求,因此改进现役船舶生活污水处理装置和开发新型处理工艺成为船舶工业的重要内容,对于正在建设的船舶采用何种生活污水处理装置也成为一个重要内容。通过对于上述各种生活污水的处理方法的比较综合,MBR、电催化氧化和各种联合处理技术将表现出良好的应用前景。

参考文献:

[1] Chang Y C,Wang N, Durak O S. Ship recycling and marine pollution [J]. Marine pollution bulletin, 2010, 60 (9): 1390-1396.

[2] 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.

[3] 徐明. 投加硅藻土对城镇污水处理厂出水水质影响研究 [J]. 绿色科技, 2013(4): 143-144.

[4] 郑水林,王庆中. 改性硅藻精土在污水处理中的应用 [J]. 非金属矿, 2000, 23(4): 36-37.

[5] 刘婷. 三种预处理技术对超滤膜污染的影响及其机理的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[6] Guilbaud J, Massé A, Andrès Y, et al. Laundry water recycling in ship by direct nanofiltration with tubular membranes [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 55(2): 148-154.

[7] 尹晓峰. 船舶废水处理技术综述 [J]. 舰船科学技术, 2010, 32(12): 30-33.

[8] 金伟忠. 船用 MBR 膜生物反应器及其污水处理机理的研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2005.

[9] 朱巧英. 臭氧消毒技术在舰船生活污水处理中的应用 [J]. 船海工程, 2010, 39(6): 24-25.

[10] 龙奎, 齐威, 杨东方, 等. 电絮凝—电解耦合技术处

- 理船舶生活污水的研究[J]. 工业水处理, 2014, 34(4).
- [11] 李小波. 电催化氧化技术处理难降解有机废水浅谈[J]. 十堰职业技术学院学报, 2009, 22(5): 89-91.
- [12] 刘珊, 孙宏亮, 孙大鹏, 等. 电化学氧化法处理生活污水的研究[J]. 应用化工, 2007, 36(6): 567-572.
- [13] 汪定国, 王建飞, 李炳华. 电催化氧化法处理生活污水研究[J]. 环境工程, 2007, 25(3): 29-31.
- [14] 李彩然. Ti/IrO₂-RuO₂ 处理船舶生活污水研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(3): 71-74.
- [15] Shulin Qin Xiangdong Li et al. Pretreatment of Chemical Cleaning Wastewater by Microelectrolysis Process[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 1154-1158.
- [16] 王新奇, 程爱华. 微电解-活性污泥法去除污水中COD的试验研究[J]. 陕西科技大学学报, 2013, 31(5): 38-41.
- [17] Yang X, Xue Y, Wang W. Mechanism, kinetics and application studies on enhanced activated sludge by interior microelectrolysis[J]. Bioresource technology, 2009, 100(2): 649-653.
- [18] 陈志莉, 易其臻, 熊开生, 等. 生物接触氧化法处理船舶生活污水的中试[J]. 云南农业大学学报, 2009, 24(6): 882-885.
- [19] 董良飞, 张志杰. UBF-接触氧化处理船舶生活污水[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(3): 103-106.
- [20] Khan, Abid Ali, et al. Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 55(12): 1232-1251.
- [21] 刘硕, 王宝贞, 王正, 等. 复合式膜生物反应器强化脱氮除磷的实验研究[J]. 现代化工, 2006, 26(5): 40-44.
- [22] 单立志, 陈孟林, 施汉昌, 等. SBR式流化床船用生活污水处理设备及其处理效果[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(10): 128-131.
- [23] Moawad A, Mahmoud UF, El-Khateeb MA, et al. Coupling of sequencing batch reactor and UASB reactor for domestic wastewater treatment[J]. Desalination 2009, 242: 325-335.
- [24] Khan A A. Integrated UASB reactor and its different aerobic post treatment options for sewage treatment[D]. India: Indian Institute of Technology, 2011.
- [25] 马如中, 何丽君, 张百祁, 等. 膜分离技术在船用生活污水处理装置上的应用[J]. 船海工程, 2010, 39(6): 4-6.
- [26] Wang T, Zhang H, Gao D, et al. Comparison between MBR and SBR on Anammox start-up process from the conventional activated sludge[J]. Bioresour Technol, 2012, 122: 78-82.
- [27] 张先超, 徐建平, 周福来. 船舶生活污水处理工艺研究[J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2011, 26(3): 4-6.
- [28] Sun C, Leiknes T O, Weitzenböck J, et al. The effect of bilge water on a Biofilm-MBR process in an integrated shipboard wastewater treatment system[J]. Desalination, 2009, 236(1): 56-64.
- [29] 王晓丹, 龙腾锐, 丁文川, 等. 重庆市典型小城镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(1): 117-121.
- [30] 白韬光. 船舶污水处理技术及其发展趋势[J]. 上海造船, 2006(2): 44-45.

(责任编辑 何杰玲)

(上接第35页)

- [6] 陈宝, 柯坚. 悬架橡胶衬套对乘坐舒适性影响的双工况分析[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(5): 134-140.
- [7] SMITH M C. Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(10): 1648-1662.
- [8] SMITH M C. Performance Benefits in Passive Vehicle Suspensions Employing Inerters[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(4): 235-257.
- [9] Smith M C, Wang F C. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(4): 235-257.
- [10] 左鹤声. 机械阻抗方法和应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [11] 陈龙, 杨晓峰, 汪若尘, 等. 基于二元件 ISD 结构隔振机理的车辆被动悬架设计与性能研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 90-95.
- [12] 喻凡, 林逸. 汽车动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [13] 陈龙, 张孝良, 江浩斌, 等. 基于机电系统相似性理论的蓄能悬架系统[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1248-1250.
- [14] 李川, 王时龙, 张贤明, 等. 一种含螺旋飞轮运动转换器的悬架的振动控制性能分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 96-100.

(责任编辑 刘 舸)