



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第7卷 第4期

Vol.7 No.4

中国科学院 主办
生态环境研究中心
科学出版社 出版

4
2013

目 次

水 污 染 防 治

SBR 单级自养脱氮系统氮素转化途径	吕永涛	王 磊	孙 婷	王旭东	王志盈(1201)
基于 SIMULINK 的硝化反应动力学模型的仿真	罗飞杭	杨朝晖	卢 慧	罗远玲	战 琪(1206)
不同来源高浓度有机废水的集中处理	张伟军	高 雅	马士龙	张 明	王东升 徐岳阳(1213)
纯种氢氧化菌短程反硝化特性	周 莉	李正魁	王易超	范念文	(1219)
常温 CSTR 部分亚硝化影响因素及工况优化研究	仲 航	李 冬	吴 迪	曾涛涛	刘丽倩 苏东霞 张 杰(1225)
温度和污泥浓度对碱性条件下剩余污泥水解酸化的影响	苏高强	王淑莹	郑冰玉	彭永臻	(1231)
双向旋流污水净化器处理溢流污水	臧宝凤	黄勇强	徐明力	史 凯	朱 艳(1237)
铁碳布空气阴极微生物燃料电池的产电性能	唐玉兰	何亚婷	于鹏飞	孙 红	于 燕 彭 漫(1241)
十溴联苯醚共存条件下水中 Zn(II) 的生物吸附	白洁琼	尹 华	叶锦韶	彭 辉	叶 芊 何宝燕 李跃鹏 张 娜 彭素芬(1245)
微波辅助疏水膜的清洗	尹子飞	王 军	纪仲光	侯得印	(1251)
厌氧反应器废水资源化过程在线监测系统	王顺利	尚丽平	李占锋	邓 琥	刘先勇(1256)
不同因素对人工湿地基质脱氮除磷效果的影响	陈丽丽	赵同科	张成军	李 鹏	李新荣 董若征(1261)
新型化粪池处理生活污水启动阶段的实验	陈志强	关华滨			(1267)
pH 值对“Fe ⁰ -厌氧微生物”体系去除 2,4,6-三氯酚过程的影响	吴金钢	戴友芝	郭丽丽	汪桂芝	李小娜(1273)
二氧化钛颗粒制备及其对水中三价砷的去除	谢冬梅	曹林洪	崔金立		(1279)
氨基化凹凸土对水中焦化没食子酸的吸附	王春香	张 艳	薛爱莲	周守勇	赵宜江 陈智栋(1285)
吸附氧化/纳滤/吸附组合工艺处理丙烯腈工业废水	李 薇	展 侠	李继定	郑冬菊	(1290)
不同水生植物去除水体氮磷的效果	何 娜	孙占祥	张玉龙	刘鸣达	(1295)
增溶剂停留时间及对水质和浮游植物影响分析	李 岩	张饮江	刘晓培	吴 昊	张乐婷 段 婷 黎 臻 张曼曼(1301)
温度对亚硝化及氧化亚氮释放的影响	郭 宁	张 建	孔 强	苗明升	田 琳(1308)
超滤膜深度处理染整废水的膜污染机理	付乐乐	李 方	吴 亮	王 歌	(1313)
混凝沉淀去除丙烯酸丁酯废水浊度物质	谷小凤	宋玉栋	周岳溪	马力强	李 军 王 俊(1319)
连片生态浮床对微污染河水的净化效果	段金程	张毅敏	张红卫	高月香	晁建颖(1324)
循环式活性污泥工艺协同处理榨菜废水与城镇污水脱氮效果	何 强	丁文静	司马卫平		(1331)
微孔曝气变速氧化沟循环特性的中试研究	杨亚红	彭党聪	李 磊	郑阳光	韩 芸(1336)
不同类型潜流湿地处理养猪废水的对比	李鹏宇	王 振	袁林江	董 健	刘 琳 朱葛夫 刘超翔(1341)
粉煤灰制备混凝剂及其对黄河水的处理效果	李玉梅	陈莉荣	杜明展		(1346)
利用沉水植物生长期收割进行富营养化水体生态管理的实地研究	姜义帅	陈 灏	马作敏	李 静	(1351)
浊度仪法快速测定水体中硫酸盐含量	薛秀玲	李孟迪			(1359)
MBR 净化受污染地表水的自然启动及稳定运行除污染特性	杨 威	赵秋静	韩正双	李 凯	梁 恒 李圭白(1363)
RBF 与 Elman 神经网络在人工湿地复合基质去污效果预测中的应用	梁启斌	刘云根	田 昆	王万宾	(1368)
稳定表流湿地中污泥的形成及除污效果	张龙飞	王成端	王志帅		(1373)
新型多功能螯合树脂的合成及对水中 Cd(II) 离子的吸附特征	王佳佳	马慧敏	张田林		(1378)
多孔镁铝复合氧化物对水溶液中 Cr(VI) 的吸附性能	王秀娟	王海增			(1383)
啤酒废水常温厌氧消化启动及运行实验	林长松	徐龙飞	谈林友		(1389)
硫化物沉淀法处理含铅废水	何绪文	胡建龙	李静文	张晶晶	王建兵 葛 鹏(1394)
无机陶瓷膜处理油田采出水	丁 慧	彭兆洋	李 毅	温沁雪	陈志强(1399)
减压蒸馏耦合微电解处理六硝基萘二段洗水	车 冉	郝 志	叶正芳		(1405)
水解-复合生物滤池工艺处理盐化工工业废水	管 硕	张鸿涛	吴春旭	程林波	宁 涛(1411)

响应面法优化聚丙烯酸/腐殖酸/累托石吸附剂的制备条件	陈芳艳	叶伟	孙怡涵	贾丽萍	唐玉斌(1417)		
生物制剂法治理藻类水华	周晓云	黄瑞敏	刘欣	文淦斌(1425)			
不同流量分配比对多级 A/O 工艺去除有机物及脱氮的影响	王敏	张智	陈杰云	范功端	金可	梁鹏	胡玲(1430)
光催化氧化-Fenton 组合方法降解高浓度正丙醇废水	曾惠明	程慎玉	沈晓莉	马欢林(1435)			
纳滤膜在垃圾渗滤液深度处理中应用	宁桂兴	张忻	王凯	姜安平	汪桂林(1440)		

大气污染防治

Fenton 试剂法降解餐厨垃圾异味	狄彦强	刘杰民	刘思园	颜鲁春	冯振华(1445)		
特殊植物类群空气凤梨对大气污染物甲醛的净化	李俊霖	李鹏	王恒蓉	郑桂灵(1451)			
天津市纪庄子污水处理厂恶臭气体排放研究	王钊	王秀艳	高爽	白志鹏(1459)			
碳纳米管/二氧化钛/壳聚糖催化薄膜光催化活性及苯降解机理	曾丽萍	张泉	张国强(1465)				
不锈钢烧结纤维毡外加粉体助剂过滤烟尘微粒	包力	杨国华	李邯鹏	王炳辉	杜珂	黄三(1472)	
西安市冬、夏两季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征分析	张承中	丁超	周变红	陶李	刘立忠(1477)		

固体废物处置

一株氧化亚铁硫杆菌的分离及其浸出废旧线路板中铜的效果	张婷	朱能武	许治国	石超宏(1482)						
玉米秸与鸡粪混合厌氧消化产气性能与协同作用	冯亚君	袁海荣	张良	李超	高健	李秀金(1489)				
不同存放时间太湖蓝藻产沼气潜力	赵明星	阮文权(1495)								
磁化焙烧-磁选法回收循环流化床固硫灰中铁	巫侯琴	李军	卢忠远	徐龙华	管波	韦燕飞(1500)				
掺固硫灰 AC-13 型沥青混合料配合比设计	侯莉	赵智	卢忠远	宋丽贤	彭洪	陈培军	李军(1505)			
鸡毛不溶解蛋白海绵膜的制备与表征	庄媛	吴小倩	曹张军	赵晓祥	周美华(1510)					
利用废弃物衍生燃料的热化学处理法制富含氢气合成气	吴畏(1515)									
两相厌氧消化工艺处理鸡粪	倪哲	潘朝智	牛冬杰	陈玲(1522)						
添加氮损失抑制剂对蓝藻泥堆肥质量的影响	任云	崔春红	刘奋武	占新华	周立祥(1527)					
臭氧氧化法深度处理生活垃圾焚烧厂沥滤液	穆永杰	叶杰旭	孙德智(1535)							
液晶显示器玻璃基板回收工艺	孙媛媛	李龙珠	唐惠东(1541)							
废旧线路板真空热解油合成热固性酚醛树脂	朱灶	蔡思涵	孙水裕	刘敬勇	张荣学	徐东军	钟胜	杨帆	李神勇	许婷婷(1545)

土壤污染防治

均匀电场下多环芳烃在土壤中的迁移	王翠苹	许伟	孙红文(1550)				
堆肥污泥重金属在黄土中的淋滤特征	马可婧	张明泉	蔡圃(1557)				
Fenton 氧化技术处理稠油污染土壤	刘其友	李琳	张云波	赵东风	赵朝成(1563)		
汞、铅、铬污染土壤的微生物修复	李梦杰	王翠玲	李荣春	洪俊彦	严亮	刘丽	庄立(1568)
生物强化修复石油污染土壤	张秀霞	滕芝	吴佳东(1573)				
石油烃对翅碱蓬生理特性的影响及植物-微生物联合降解	高乃媛	刘宪斌	赵兴茹(1578)				

噪声污染防治

高速列车纵向对称面气动噪声计算及外形优化	肖友刚	张平(1583)					
----------------------------	-----	----------	--	--	--	--	--

环境生物技术

润滑油高效降解菌的筛选及降解性能	郭晓燕	张志红	沈齐英	李翠清(1589)			
------------------------	-----	-----	-----	-----------	--	--	--

相关研究

侧入式搅拌槽中多相流场特性的数值模拟	张林进	陈功国	柏杨	叶旭初(1594)			
--------------------------	-----	-----	----	-----------	--	--	--

CONTENTS

Nitrogen conversion pathway of autotrophic nitrogen removal process in single SBR	Lü Yongtao Wang Lei Sun Ting Wang Xudong Wang Zhiying(1201)
Stimulation based on SIMULINK for nitrification reaction kinetics model	Luo Feihang Yang Zhaohui Lu Hui Luo Yuanling Zhan Qi(1206)
Central treatment of wastewater with high organic content from different industrial sources	Zhang Weijun Gao Ya Ma Shilong Zhang Ming Wang Dongsheng Xu Yueyang(1213)
Shortcut denitrification characterization of immobilized AOB	Zhou Li Li Zhengkui Wang Yichao Fan Nianwen(1219)
Research on influencing factors and operation optimization for CSTR partial nitrification at normal temperature	Zhong Hang Li Dong Wu Di Zeng Taotao Liu Liqian Su Dongxia Zhang Jie(1225)
Effect of temperature and sludge concentration on hydrolysis and acidification of waste activated sludge under alkaline condition	Su Gaoqiang Wang Shuying Zheng Bingyu Peng Yongzhen(1231)
Treatment of overflow using two-way cyclone flocculation hydrocyclone	Zang Baofeng Huang Yongqiang Xu Mingli Shi Kai Zhu Yan(1237)
Electricity generation performance of microbial fuel cells with carbon cloth as air-cathode and iron as cathode catalyst	Tang Yulan He Yating Yu Pengfei Sun Hong Yu Yan Peng Man(1241)
Biosorption of zinc (II) in water with decabromodiphenyl ethers	Bai Jieqiong Yin Hua Ye Jinshao Peng Hui Ye Qian He Baoyan Li Yuepeng Zhang Na Peng Sufen(1245)
Microwave assisted cleaning of hydrophobic membrane	Yin Zifei Wang Jun Ji Zhongguang Hou Deyin(1251)
Online monitoring system of anaerobic reactor in processes of transforming wastewater into resources	Wang Shunli Shang Liping Li Zhanfeng Deng Hu Liu Xianyong(1256)
Influences of different factors on effect of matrix nitrogen and phosphorus removal in substrates of constructed wetland	Chen Lili Zhao Tongke Zhang Chengjun Li Peng Li Xinrong Dong Ruozheng(1261)
Experiment on start-up phase of new modified septic tanks treating domestic sewage	Chen Zhiqiang Guan Huabin(1267)
Effect of pH values on process for removal of 2,4,6-trichlorophenol by Fe ⁰ -anaerobic microbe system	Wu Jingang Dai Youzhi Guo Lili Wang Guizhi Li Xiaona(1273)
Preparation and evaluation of TiO ₂ granule for As(III) removal from water	Xie Dongmei Cao Linhong Cui Jinli(1279)
Adsorption of pyrogallol from aqueous solution by amine modified attapulgite	Wang Chunxiang Zhang Yan Xue Ailian Zhou Shouyong Zhao Yijiang Chen Zhidong(1285)
Treatment of wastewater from acrylonitrile industries with combined processes of adsorption oxidation, nanofiltration and adsorption	Li Wei Zhan Xia Li Jiding Zheng Dongju(1290)
Efficiency of removing nitrogen and phosphorus from simulated wastewater using hydrophytes	He Na Sun Zhanxiang Zhang Yulong Liu Mingda(1295)
Retention time and effects on water quality and phytoplankton of water shade agent-True Blue	Li Yan Zhang Yinjiang Liu Xiaopei Wu Hao Zhang Leting Duan Ting Li Zhen Zhang Manman(1301)
Effect of temperature on ammonification and nitrous oxide emission in partial nitrification	Guo Ning Zhang Jian Kong Qiang Miao Mingsheng Tian Lin(1308)
Fouling mechanism in advanced treatment of dyeing wastewater by ultrafiltration membrane	Fu Lele Li Fang Wu Liang Wang Ge(1313)
Removal of turbidity from butyl-acrylate wastewater by coagulation-sedimentation	Gu Xiaofeng Song Yudong Zhou Yuexi Ma Liqiang Li Jun Wang Jun(1319)
Purification effect of ecological floating beds of flakiness connection in slightly polluted river water	Duan Jincheng Zhang Yimin Zhang Hongwei Gao Yuexiang Chao Jianying(1324)
Nitrogen removal efficiency of co-processing pickle wastewater and municipal sewage by cyclic activated sludge system(CASS) process	He Qiang Ding Wenjing Sima Weiping(1331)
Pilot study on flow characteristics of a variable-velocity oxidation ditch with fine bubble	Yang Yahong Peng Dangeong Li Lei Zheng Yangguang Han Yun(1336)
Comparison of two different constructed wetland systems to treat swine wastewater	Li Pengyu Wang Zhen Yuan Linjiang Dong Jian Liu Lin Zhu Gefu Liu Chaoliang(1341)
Preparation of coagulant from fly ash and its application in Yellow River water treatment	Li Yumei Chen Lirong Du Mingzhan(1346)
Field study on effect of harvesting submerged plant during growing season for ecological management of eutrophicated water	Jiang Yishuai Chen Hao Ma Zuomin Li Jing(1351)
Rapid determination of sulfate in water by turbidimetry	Xue Xiuling Li Mengdi(1359)
Pollutants removal characteristics of natural start-up and steady operation of membrane bioreactor (MBR) for treating polluted surface water	Yang Wei Zhao Qiujing Han Zhengshuang Li Kai Liang Heng Li Guibai(1363)
Application of RBF and Elman neural network in prediction on pollutant removal efficiency of constructed wetland with different compound substrates	Liang Qibin Liu Yungen Tian Kun Wang Wanbin(1368)
Sludge formation and decontamination effect of stable surface flow wetland systems	Zhang Longfei Wang Chengduan Wang Zhishuai(1373)
Synthesis of multifunctional chelating resin and its adsorption properties for Cd(II) in water	Wang Jiajia Ma Huimin Zhang Tianlin(1378)

- Adsorption behavior of Cr(VI) from aqueous solution on porous Mg/Al mixed oxides Wang Xiujuan Wang Haizeng(1383)
- Start-up and operation of anaerobic digestion of brewery wastewater at ambient temperature ... Lin Changsong Xu Longfei Tan Linyou(1389)
- Treatment of wastewater containing lead by sodium sulfide precipitation He Xuwen Hu Jianlong Li Jingwen Zhang Jingjing Wang Jianbing Ge Peng(1394)
- Treatment of oilfield produced water by inorganic ceramic membrane Ding Hui Peng Zhaoyang Li Yi Wen Qinxue Chen Zhiqiang(1399)
- Treatment of hexanitrostilbene wastewater by vacuum distillation coupling in micro-electrolysis Che Ran Hao Zhi Ye Zhengfang(1405)
- Salt chemical industrial wastewater treatment using hydrolysis-combined biological filter process Guan Shuo Zhang Hongtao Wu Chunxu Cheng Linbo Ning Tao(1411)
- Optimization of preparation conditions of polyacrylic acid/humic acid/rectorite adsorbent based on response surface methodology Chen Fangyan Ye Wei Sun Yihan Jia Liping Tang Yubin(1417)
- Control of algal bloom with immobilized biological catalyst Zhou Xiaoyun Huang Ruimin Liu Xin Wen Ganbin(1425)
- Influence of different influent flow distribution ratios on biological nitrogen and carbon removal by multi-stages A/O process Wang Min Zhang Zhi Chen Jieyun Fan Gongduan Jin Ke Liang Peng Hu Ling(1430)
- Treatment of wastewater containing high concentration of 1-propanol with UV photocatalysis/Fenton reagent Zeng Huiming Cheng Shenyu Shen Xiaoli Ma Huanlin(1435)
- Application of nanofiltration technology in treatment of urban solid composting leachate Ning Guixiang Zhang Xin Wang Kai Jiang Anping Wang Guilin(1440)
- Treating food waste odor by Fenton reagent method Di Yanqiang Liu Jiemin Liu Siyuan Yan Luchun Feng Zhenhua(1445)
- Purification of air pollutant—formaldehyde with special plant group—epiphytic *Tillandsia* Li Junlin Li Peng Wang Hengrong Zheng Guiling(1451)
- Research of odor emission in Jizhuangzi Sewage Treatment Plant in Tianjin Wang Zhao Wang Xiuyan Gao Shuang Bai Zhipeng(1459)
- Photocatalytic degradation activity and mechanism of CNTs/TiO₂/CS Film of gas phase benzene Zeng Liping Zhang Quan Zhang Guoqiang(1465)
- Filtering soot particles by stainless steel sintered fiber felt combining with powder Bao Li Yang Guohua Li Hanpeng Wang Binghui Du Ke Huang San(1472)
- Pollution characteristics of carbon aerosol in PM_{2.5} of Xi'an during winter and summer Zhang Chengzhong Ding Chao Zhou Bianhong Tao Li Liu Lizhong(1477)
- Isolation of an *Acidithiobacillus ferrooxidans* strain and its performance in bioleaching of copper from waste printed circuit boards Zhang Ting Zhu Nengwu Xu Zhiguo Shi Chaohong(1482)
- Performance and synergistic effect of anaerobic co-digestion of corn stover and chicken manure Feng Yajun Yuan Hairong Zhang Liang Li Chao Gao Jian Li Xiujin(1489)
- Biogas production potential of Taihu cyanobacteria at different storage times Zhao Mingxing Ruan Wenquan(1495)
- Recycling of the iron resources of CFBC fly ash by magnetizing roasting-magnetic separation Wu Houqin Li Jun Lu Zhongyuan Xu Longhua Guan Bo Wei Yanfei(1500)
- Mix design of AC-13 asphalt concrete with circulating fluidized bed combustion ash Hou Li Zhao Zhi Lu Zhongyuan Song Lixian Peng Hong Chen Peijun Li Jun(1505)
- Preparation and characterization of sponge film based on feather reduction residue Zhuang Yuan Wu Xiaoqian Cao Zhangjun Zhao Xiaoxiang Zhou Meihua(1510)
- Hydrogen-rich synthesis gas production via thermochemical of refuse derived fuel Wu Wei(1515)
- Treatment of chicken manure by two-phase anaerobic digestion reactor Ni Zhe Pan Chaozhi Niu Dongjie Chen Ling(1522)
- Effect of adding nitrogen loss inhibitor on quality of dehydrated blue-green algae compost Ren Yun Cui Chunhong Liu Fenwu Zhan Xinhua Zhou Lixiang(1527)
- Advanced treatment of leachate from MSW incineration by ozonation Mu Yongjie Ye Jiexu Sun Dezhi(1535)
- Recovery process of glass substrate from liquid crystal display Sun Yuanyuan Li Longzhu Tang Huidong(1541)
- Synthesis of thermosetting PR with WPCB vacuum pyrolysis oils Zhu Zao Cai Sihan Sun Shuiyu Liu Jingyong Zhang Rongxue Xu Dongjun Zhong Sheng Yang Fan Li Shenyong Xu Pingting(1545)
- Migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils under uniform electric field Wang Cuiping Xu Wei Sun Hongwen(1550)
- Leaching characteristics of heavy metals in compost sludge in loess Ma Kejing Zhang Mingquan Cai Pu(1557)
- Heavy oil-contaminated soils remediation by Fenton oxidation Liu Qiyou Li Lin Zhang Yunbo Zhao Dongfeng Zhao Chaocheng(1563)
- Microorganism remediation of Hg, Pb and Cr contaminated soil Li Mengjie Wang Cuiling Li Rongchun Hong Junyan Yan Liang Liu Li Zhuang Li(1568)
- Bioaugmentation remediation of petroleum contaminated soil Zhang Xiuxia Teng Zhi Wu Jiadong(1573)
- Influence of oil in soil on growth and physiological indexes of *suaeda heteroptera* and plant-microbial remediation Gao Naiyuan Liu Xianbin Zhao Xingru(1578)
- Numerical prediction of aerodynamic noise radiated from longitudinal symmetric plane of high-speed train and shape optimization Xiao Yougang Zhang Ping(1583)
- Screening of lube oil biodegradation strain and degrading characteristics Guo Xiaoyan Zhang Zhihong Shen Qiyang Li Cuiqing(1589)
- Numerical simulation on field characteristics of multiphase flow in side-entering stirred tank Zhang Linjin Chen Gongguo Bai Yang Ye Xuchu(1594)

微波辅助疏水膜的清洗

尹子飞^{1,2} 王 军^{2*} 纪仲光² 侯得印²

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083;

2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室,北京 100085)

摘要 针对膜蒸馏过程中膜表面常见的 CaSO_4 垢和腐殖酸混合垢,对微波强化疏水膜清洗的效果进行了研究。结果表明,对于膜表面的 CaSO_4 垢,微波辅助清洗效率高于常规清洗,且在清洗液的温度和流速较低时,微波的强化清洗效果更为明显;对于膜表面的腐殖酸混合垢,微波辅助清洗后的初始通量恢复率为 88.4%,比常规清洗高出 10.8%,同时可以相对缓解疏水膜的亲水化。

关键词 微波辅助 膜清洗 CaSO_4 腐殖酸

中图分类号 X712 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)04-1251-05

Microwave assisted cleaning of hydrophobic membrane

Yin Zifei^{1,2} Wang Jun² Ji Zhongguang² Hou Deyin²

(1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract Common pollutants of CaSO_4 and humic acid on membrane surface in membrane distillation (MD) process were adopted to investigate the effect of microwave enhanced cleaning of hydrophobic membrane. The results show that for CaSO_4 sediment on the surface of membrane, the efficiency of microwave assisted cleaning is higher than that of conventional cleaning, and the microwave enhancing effect is more obvious when the temperature and flow velocity of cleaning fluid are lower. As for humic acid sediment on the membrane surface, the initial flux recovery ratio is 88.4% through microwave assisted cleaning, which is 10.8% higher than that of conventional cleaning. And microwave assisted cleaning can alleviate hydrophilization relatively at the same time.

Key words microwave assisted; membrane cleaning; CaSO_4 ; humic acid

高含盐废水的膜蒸馏过程存在膜污染问题,而且膜污染往往会伴随着膜的润湿,导致膜蒸馏过程崩溃^[1],所以疏水膜污染后必须及时清洗并干燥以恢复其性能,因此膜蒸馏过程稳定运行需要解决疏水膜的清洗问题,这是目前膜蒸馏技术研究热点之一^[2]。目前,膜清洗常用方法主要包括物理清洗、化学清洗和生物清洗^[3-5],也有文献报道将超声波^[6-8]、微波^[9]等新颖方法引入亲水膜清洗过程中,在研究阶段取得了一定的效果,但有研究表明,超声波会对料液及膜的稳定性产生负面影响^[10-13],而微波辅助疏水膜清洗方面的系统研究鲜见报道。

本研究以膜蒸馏过程中疏水膜表面难清洗典型难溶无机盐(CaSO_4)和可溶性有机物(腐殖酸)为研究对象,探讨微波辐射对疏水膜清洗效果的影响,并分析机理,为微波辅助疏水膜清洗技术的应用奠定

基础。

1 实验部分

1.1 实验试剂、材料及仪器

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 NaCl 、 NaOH 、盐酸均为分析纯,北京化工厂;腐殖酸,化学纯,国药集团化学试剂有限公司;所用膜为美国 PALL 公司生产的 Fluoro-Trans[®]聚偏氟乙烯(PVDF)平板疏水膜,平均孔径

基金项目: 国家科技部科研院所技术开发研究专项资金(2010EG111021);北京市财政资金资助项目(PXM2012_178203_000001);国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA063901)

收稿日期:2012-02-24;修订日期:2012-04-03

作者简介:尹子飞(1988~),男,硕士研究生,主要从事特种膜工艺研究。E-mail:yinzifei1988@126.com

* 通讯联系人,E-mail:junwang@reecs.ac.cn

为 $0.2 \mu\text{m}$; 平板膜组件自制, 有效膜面积为 29 cm^2 ; 微波炉, 格兰仕, 型号 G80F23N1P-M8, 输出功率 800 W , 额定微波频率 2450 MHz 。

1.2 实验装置与方法

本研究采用自制直接接触式膜蒸馏 (DCMD) 实验装置, 如图 1 所示, 料液经过恒温水浴加热后, 泵入膜组件的热侧, 蒸汽于组件冷侧被冷却液冷凝后输出至低温循环瓶, 通过电子天平称得的循环瓶的溢流量来计算膜蒸馏通量, 渗余液回流至循环罐中, 通过磁力循环泵实现热侧与冷侧循环。膜组件热侧和冷侧的温度变化由进出口温度计记录, 流速的变化采用转子流量计控制, 事先用量筒进行校正后测定。实验时, 先开启热侧和冷侧的恒温装置, 当达到预设温度后再开启循环泵, 待热侧、冷侧进出口温度稳定后, 每隔一定时间记录产水量和电导率的变化。清洗时, 向循环罐内加入清洗液, 分别在有无微波辐射的条件下对被污染的膜表面进行清洗。由于使用了改装的微波炉作为微波源, 考虑到微波辐射的泄漏会威胁人身安全, 故根据微波炉的规格大小, 订做了金属网外罩, 以对微波辐射进行屏蔽, 用 ML-91 型微波漏能仪检测的微波炉周围的微波辐射大小远低于对人体有伤害的 $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 可以确保人身安全。

实验过程中控制热、冷侧进口温度分别为 65°C 和 10°C , 流速分别为 0.1 m/s 和 0.5 m/s 。清洗液为 500 mL 超纯水, 清洗时间为 30 min 。

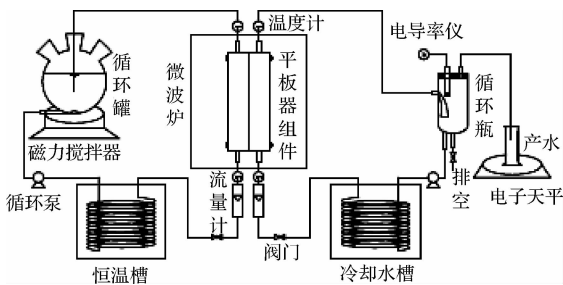


图1 微波辅助清洗直接接触式膜蒸馏实验装置
Fig. 1 Schematic diagram of the DCMD apparatus with microwave assisted cleaning

1.3 分析方法

电导率由电导率测控仪 (CM-230, 河北科瑞达仪器科技有限公司) 监测; 膜表面形态及孔内污染物采用扫描电镜-能谱仪 (S-3 000 N, 日本 Hitachi) 分析; 疏水膜接触角采用视频光学接触角测定仪 (OCAH200, 德国 Dataphysics) 测定; 疏水膜的机械性能采用万能

材料试验机 (5565, 美国 instron) 测试。

1.4 清洗效果评价方法

膜表面 CaSO_4 垢的清洗效果采用清洗速率比 v 来评价:

$$v = \frac{m_1}{m_2} \quad (1)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为微波辅助清洗和常规清洗时清洗液中 Ca^{2+} 质量, mg 。根据电导率与 Ca^{2+} 浓度的线性关系, 由清洗液电导率换算求得。

膜表面腐殖酸混合垢的清洗效果采用通量恢复率 FR 来评价:

$$FR = \frac{J}{J_0} \quad (2)$$

式中: J 为污染膜清洗后膜蒸馏过程实时监测通量值, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; J_0 为新膜纯水初始通量值, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2 结果与讨论

2.1 微波辅助清洗 CaSO_4 垢

配制 65°C 下饱和 CaSO_4 溶液 ($0.2440 \text{ g}/100 \text{ mL H}_2\text{O}$) 进行膜蒸馏浓缩实验。随着实验的进行, CaSO_4 溶液在膜表面处于过饱和状态, CaSO_4 晶体会逐渐形成而沉积在膜表面, 导致膜通量的持续下降, 至实验结束 (运行 8.5 h) 时通量下降幅度达到 80% , 膜组件进口及膜表面覆盖了大量沉积物。整个实验过程中, 产水电导率维持在 $1.7 \sim 3.6 \mu\text{S}/\text{cm}$ 之间, 没有出现明显的膜润湿现象。然后分别采用微波辅助清洗和常规清洗 2 种方式对污染膜进行清洗, 并考察清洗液的温度和流速对微波强化清洗效果的影响。清洗过程中, 实时监测清洗液电导率的变化, 通过公式 (1) 来求得即时清洗速率比, 并得到如图 2 所示的曲线。

由图 2 可知, 在微波辅助清洗和常规清洗的清洗液平均温度相同的条件下, 清洗速率比基本都大于 1.0 , 这可以用微波的非热效应来解释: 水分子在微波场下产生转向极化, 分子状态变得极为活跃, 与膜面 CaSO_4 晶体的有效碰撞频率较常规清洗大大增加, 从而加速 CaSO_4 晶体溶解而脱离膜表面, 因此微波辅助清洗效率要高于常规清洗。由于本研究的前期污染只是在 CaSO_4 饱和浓度的基础上单纯的浓缩, 运行时间较短, CaSO_4 结晶并未形成致密的沉积层, 在两种清洗方式下分别清洗 30 min , 都可基本完全清除沉积物 (如图 3 所示), 使得最终清洗速

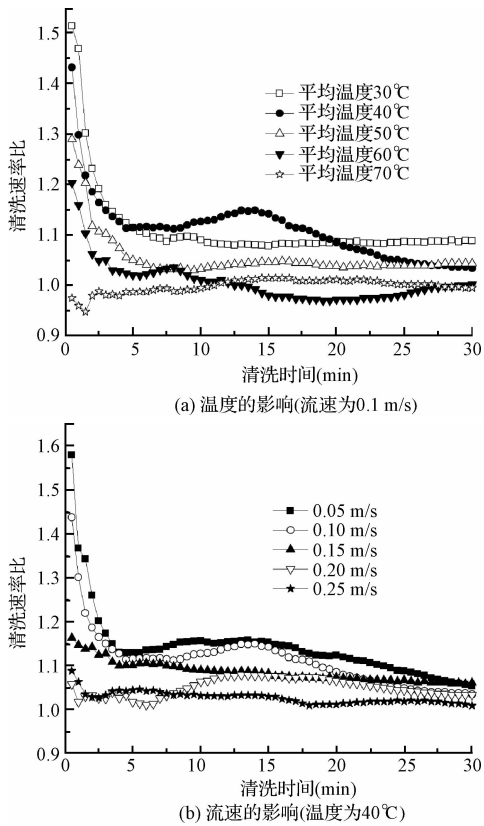


图 2 清洗液温度和流速对微波强化清洗 CaSO_4 垢的影响

Fig. 2 Effect of temperature and flow velocity on CaSO_4 sediment cleaning with microwave

率比均趋近于 1。由图 2 也可看出,微波辐射对疏水膜清洗的强化效果在清洗液温度和流速较低时更为明显,原因在于低温下水的介质损耗高,低流速下水在微波场中停留的时间长,从而吸收的微波能量多,水分子能够更强烈地以振动、转动的形式对微波产生响应。在低温和低流速下进行清洗也有助于提高疏水膜的使用寿命。

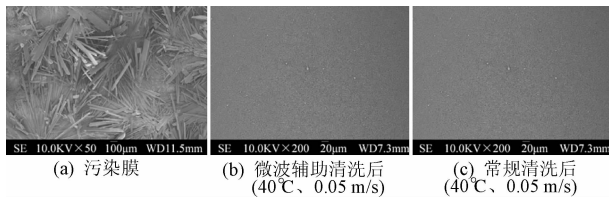


图 3 膜表面电镜图

Fig. 3 SEM morphology of membrane surface

PVDF 膜属于极性材料,也会吸收微波能量,为了考察微波辐射对膜的机械性能和疏水性的影响,对清洗后(清洗条件为 40°C 、 0.05 m/s)的膜的机械性能和被清洗面接触角进行了测试,结果如表 1 和

图 4 所示。由表 1 可知,2 种方式清洗后膜材料的断裂强力以及其所对应的抗拉强度没有显著的变化,而微波辅助清洗后的断裂伸长率缩短为常规清洗的 $2/3$ 左右,与之相对应的杨氏模量则增大了将近 70% 。原因在于膜材料经微波辐射后,内部结构将发生一定程度的微观变化,表现在断裂伸长率缩短了 $1/3$,在断裂强力不变的情况下,杨氏模量发生较大程度的增加,即表现为膜材料的脆性增加^[14]。由图 4 可知,微波辅助清洗和常规清洗后疏水膜接触角与新膜相比基本没有变化,说明在本研究的时间范围内,微波辐射对疏水膜的疏水性能基本没有影响。

表 1 疏水膜的机械性能

Table 1 Mechanical properties of hydrophobic membrane

项目	断裂强力 (MPa)	断裂伸长率 (%)	抗拉强度 (MPa)	杨氏模量 (MPa)
常规清洗后	2.60	63.61	2.63	10.52
微波辅助清洗后	2.52	43.10	2.62	17.66

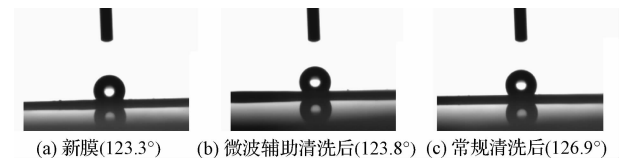


图 4 疏水膜接触角

Fig. 4 Contact angle of hydrophobic membrane

2.2 微波辅助清洗腐殖酸混合垢

溶液中的腐殖酸浓度、离子强度、钙离子浓度和 pH 值对腐殖酸膜蒸馏过程有明显的影^[15,16]响,研究过程中,配制模拟含盐含腐殖酸废水(向 200 mg/L 腐殖酸溶液中加入 $3\text{ mmol/L CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 100 mmol/L NaCl 溶液,调节 pH 为 7 配制成混合溶液)进行膜蒸馏实验,采用将冷侧产水实时返回热侧循环罐的方式维持料液浓度保持基本恒定。随着实验的进行,通量明显降低,电导逐渐升高,至实验结束时(运行 100 h),通量下降幅度达 70% ,电导率已从初始的 $5\ \mu\text{S/cm}$ 上升到接近 $35\ \mu\text{S/cm}$,这表明已有部分膜孔被润湿,污染膜的截面线扫描图也证明了此点,如图 5 所示,在选取的膜截面线路上都不同程度的分布着 Na 元素。

在平均清洗温度为 40°C ,清洗流速为 0.1 m/s 的条件下采用微波辅助清洗和常规清洗两种方式对污染膜进行清洗,清洗后的膜表面形态用扫描电镜进行观察,并将清洗后的膜组件烘干后用上述混合溶液进行膜蒸馏实验,以探讨微波辐射对腐殖酸混

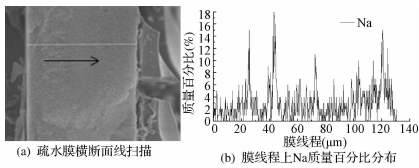


图5 污染膜线扫描图

Fig.5 Line scanning of fouled membrane

垢的清洗效果,结果如图6和图7所示。

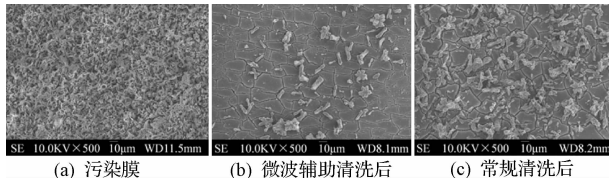


图6 膜表面电镜图

Fig.6 SEM morphology of membrane surface

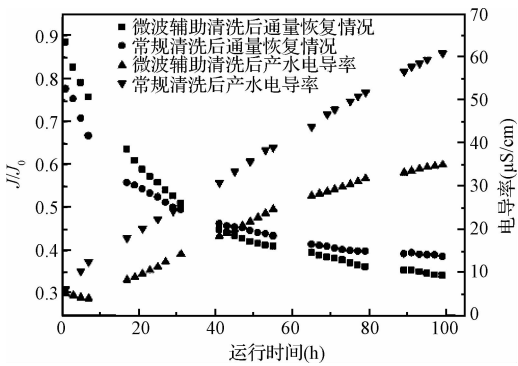


图7 不同清洗方式对腐殖酸混合垢清洗效果的影响

Fig.7 Effect of different cleaning methods on HA sediments

由图6可知,微波辅助清洗后膜面污染物比常规清洗后明显要少,说明微波辐射对膜面腐殖酸混合垢也有强化清洗作用。由图7也可看出,常规清洗后初始通量恢复率为77.6%,而微波辅助清洗后的为88.4%,比常规清洗高出10.8%。而且随着膜蒸馏的运行,微波辅助清洗后的疏水膜产水通量相对于常规清洗下降较快,在运行40h后,通量下降幅度分别为43.5%和31.3%,且常规清洗后的膜其膜通量开始超过微波辅助清洗后的膜,另外,微波辅助清洗后膜蒸馏过程的产水电导率相对于常规清洗上升较慢,至实验结束时,微波辅助清洗后的产水电导率为38.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$,与前期污染后的产水电导率相差不大,而常规清洗后的产水电导率为60.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。上述现象侧面说明了微波辐射对于膜孔中的污染物也有较好的去除作用,因而可以相对缓解疏水膜的亲水化,而常规清洗由于对膜孔中的污染物

去除效果不好,造成疏水膜的润湿较微波辅助清洗后更快、更严重。随着膜被润湿程度的增加,模拟溶液直接以微滤形式跨膜进入产水侧,造成膜通量假性增加,而膜表面垢的存在会引起膜蒸馏有效膜面积的下降,造成膜通量下降,当膜通量因膜润湿增加的量与因膜面结垢减少的量基本持平时,即表现为通量下降曲线趋于平稳,产水电导率大幅上升。

3 结论

本研究尝试将微波技术引入膜蒸馏污染膜的清洗过程中,并分别选取 CaSO_4 和腐殖酸作为对象进行了微波强化清洗效果的研究,得到如下结论:

(1)对于膜表面的 CaSO_4 垢,微波辅助清洗效率要高于常规清洗,且在低清洗温度和流速下,这种强化效果会更明显。对于PVDF疏水膜的机械性能和被清洗面接触角的测试表明,在本研究的时间内,微波辐射对膜材料的机械性能有一定程度的影响,而对膜的疏水性能基本没有影响;

(2)对于膜表面的腐殖酸混合垢,常规清洗后初始通量恢复率为77.6%,而微波辅助清洗后为88.4%,比常规清洗高出10.8%,且微波辐射对膜孔中的污染物也有较好的去除作用,可以相对缓解疏水膜的亲水化;

(3)微波辅助清洗和常规清洗过程中清洗液平均温度相同,因此认为微波强化清洗的效果应归结于微波非热效应;

本研究仅考察了微波辐射对膜面 CaSO_4 垢和腐殖酸混合垢的强化清洗作用,而实际废水的膜蒸馏过程运行周期长,形成的垢较复杂,更难清洗,笔者将进一步针对实际废水来考察微波辐射对污染膜的强化清洗效果。

参考文献

- [1] 吴庸烈. 膜蒸馏技术及其应用进展. 膜科学与与, 2003, 23(4):67-79, 92
Wu Yonglie. Advance of membrane distillation technology and the application. Membrane Science and Technology, 2003, 23(4):67-79, 92 (in Chinese)
- [2] 刘忠洲, 续曙光, 李锁定. 微滤、超滤过程中的膜污染与清洗. 水处理技术, 1997, 23(4):187-193
Liu Zhongzhou, Xu Shuguang, Li Suoding. membrane fouling and cleaning in UF and MF. Technology of Water Treatment, 1997, 23(4):187-193 (in Chinese)
- [3] 张国俊, 刘忠洲. 膜过程中膜清洗技术研究进展. 水处理

- 技术, **2003**, 29(4):187-190
- Zhang Guojun, Liu Zhongzhou. Progress in membrane cleaning techniques. *Technology of Water Treatment*, **2003**, 29(4):187-190 (in Chinese)
- [4] 赵平, 赵星洁, 王爱兵, 等. 膜的化学清洗. *河北化工*, **2005**, (1):15-16, 34
- Zhao Ping, Zhao Xingjie, Wang Aibing, et al. Chemical cleaning of membrane. *Hebei Chemical Industry*, **2005**, (1):15-16, 34 (in Chinese)
- [5] 孙洪贵, 夏海平, 蓝伟光. 分离膜材料的污染与清洗. *功能材料*, **2002**, 33(1):26-28, 32
- Sun Honggui, Xia Haiping, Lan Weiguang. Fouling and cleaning in membrane. *Functional Materials*, **2002**, 33(1):26-28, 32 (in Chinese)
- [6] Li J. X., Sanderson R. D., Jacobs E. P. Ultrasonic cleaning of nylon microfiltration membranes fouled by kraft paper mill effluent. *Journal of Membrane Science*, **2002**, 205(1-2):247-257
- [7] Chai X. J., Kobayashi T., Fujii N. Ultrasound-associated cleaning of polymeric membranes for water treatment. *Separation and Purification Technology*, **1999**, 15(2):139-146
- [8] Kim C. G., Yoon T. I., Lee M. J. Characterization and control of foulants occurring from RO disc-tube-type, membrane treating, fluorine manufacturing, process wastewater. *Desalination*, **2002**, 151(3):283-292
- [9] 杨俊红, 孙明迪, 邸倩倩, 等. 微波辅助对超滤膜清洗效果的影响. *中国工程热物理学会学术会议论文, 郑州*, **2008**
- Yang Junhong, Sun Mingdi, Di Qianqian, et al. Effect of microwave assisted cleaning of ultrafiltration membrane. *Academic Conference Papers of the Chinese Society of Engineering Thermophysics, Zhengzhou*, **2008** (in Chinese)
- [10] Masselin I., Chasseray X., Durand-Bourlier L., et al. Effect of sonication on polymeric membranes. *Journal of Membrane Science*, **2001**, 181(2):213-220
- [11] 张国俊, 刘忠洲. 超滤膜的超声波清洗研究. *环境科学*, **2003**, 24(6):130-134
- Zhang Guojun, Liu Zhongzhou. Study on assistant cleaning of ultrasound for the ultrafiltration membrane. *Environmental Science*, **2003**, 24(6):130-134 (in Chinese)
- [12] 王晓丽, 高博, 傅学起. 超声波处理对微滤膜损伤的影响. *膜科学与技术*, **2005**, 25(6):7-11
- Wang Xiaoli, Gao Bo, Fu Xueqi. Study on the damage of polymeric microfiltration membrane with ultrasonic treatment. *Membrane Science and Technology*, **2005**, 25(6):7-11 (in Chinese)
- [13] Chai X. J., Kobayashi T., Fujii N. Ultrasound effect on cross-flow filtration of Polyacrylonitrile ultrafiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, **1988**, 148(1):129-135
- [14] 纪仲光, 王军, 侯得印, 等. 微波辅助真空膜蒸馏试验研究. *第四届中国膜科学与技术报告会论文集, 北京*, **2010**. 500-505
- Ji Zhongguang, Wang Jun, Hou Deyin, et al. Experimental study on microwave assisted vacuum membrane distillation. *Academic Conference Papers of the Fourth Chinese Membrane Science and Technology Conference, Beijing*, **2010**. 500-505 (in Chinese)
- [15] 高海瑞, 王军, 王永红, 等. 天然有机物及无机盐对膜蒸馏过程的影响. *中国给水排水*, **2009**, 25(21):33-36, 40
- Gao Hairui, Wang Jun, Wang Yonghong, et al. Effects of natural organic matters and inorganic salts on membrane distillation process. *China Water & Wastewater*, **2009**, 25(21):33-36, 40 (in Chinese)
- [16] Srisurichan S., Jiratananon R., Fane A. G. Humic acid fouling in the membrane distillation process. *Desalination*, **2005**, 174(1):63-72