



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 <sup>0</sup> -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 <sub>2.5</sub> 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

<b>Nitrogen conversion pathway of autotrophic nitrogen removal process in single SBR</b> .....	Lü Yongtao Wang Lei Sun Ting Wang Xudong Wang Zhiying(1201)
<b>Stimulation based on SIMULINK for nitrification reaction kinetics model</b> .....	Luo Feihang Yang Zhaohui Lu Hui Luo Yuanling Zhan Qi(1206)
<b>Central treatment of wastewater with high organic content from different industrial sources</b> .....	Zhang Weijun Gao Ya Ma Shilong Zhang Ming Wang Dongsheng Xu Yueyang(1213)
<b>Shortcut denitrification characterization of immobilized AOB</b> .....	Zhou Li Li Zhengkui Wang Yichao Fan Nianwen(1219)
<b>Research on influencing factors and operation optimization for CSTR partial nitrification at normal temperature</b> .....	Zhong Hang Li Dong Wu Di Zeng Taotao Liu Liqian Su Dongxia Zhang Jie(1225)
<b>Effect of temperature and sludge concentration on hydrolysis and acidification of waste activated sludge under alkaline condition</b> .....	Su Gaoqiang Wang Shuying Zheng Bingyu Peng Yongzhen(1231)
<b>Treatment of overflow using two-way cyclone flocculation hydrocyclone</b> .....	Zang Baofeng Huang Yongqiang Xu Mingli Shi Kai Zhu Yan(1237)
<b>Electricity generation performance of microbial fuel cells with carbon cloth as air-cathode and iron as cathode catalyst</b> .....	Tang Yulan He Yating Yu Pengfei Sun Hong Yu Yan Peng Man(1241)
<b>Biosorption of zinc (II) in water with decabromodiphenyl ethers</b> .....	Bai Jieqiong Yin Hua Ye Jinshao Peng Hui Ye Qian He Baoyan Li Yuepeng Zhang Na Peng Sufen(1245)
<b>Microwave assisted cleaning of hydrophobic membrane</b> .....	Yin Zifei Wang Jun Ji Zhongguang Hou Deyin(1251)
<b>Online monitoring system of anaerobic reactor in processes of transforming wastewater into resources</b> .....	Wang Shunli Shang Liping Li Zhanfeng Deng Hu Liu Xianyong(1256)
<b>Influences of different factors on effect of matrix nitrogen and phosphorus removal in substrates of constructed wetland</b> .....	Chen Lili Zhao Tongke Zhang Chengjun Li Peng Li Xinrong Dong Ruozheng(1261)
<b>Experiment on start-up phase of new modified septic tanks treating domestic sewage</b> .....	Chen Zhiqiang Guan Huabin(1267)
<b>Effect of pH values on process for removal of 2,4,6-trichlorophenol by Fe<sup>0</sup>-anaerobic microbe system</b> .....	Wu Jingang Dai Youzhi Guo Lili Wang Guizhi Li Xiaona(1273)
<b>Preparation and evaluation of TiO<sub>2</sub> granule for As(III) removal from water</b> .....	Xie Dongmei Cao Linhong Cui Jinli(1279)
<b>Adsorption of pyrogallol from aqueous solution by amine modified attapulgite</b> .....	Wang Chunxiang Zhang Yan Xue Ailian Zhou Shouyong Zhao Yijiang Chen Zhidong(1285)
<b>Treatment of wastewater from acrylonitrile industries with combined processes of adsorption oxidation, nanofiltration and adsorption</b> .....	Li Wei Zhan Xia Li Jiding Zheng Dongju(1290)
<b>Efficiency of removing nitrogen and phosphorus from simulated wastewater using hydrophytes</b> .....	He Na Sun Zhanxiang Zhang Yulong Liu Mingda(1295)
<b>Retention time and effects on water quality and phytoplankton of water shade agent-True Blue</b> .....	Li Yan Zhang Yinjiang Liu Xiaopei Wu Hao Zhang Leting Duan Ting Li Zhen Zhang Manman(1301)
<b>Effect of temperature on ammonification and nitrous oxide emission in partial nitrification</b> .....	Guo Ning Zhang Jian Kong Qiang Miao Mingsheng Tian Lin(1308)
<b>Fouling mechanism in advanced treatment of dyeing wastewater by ultrafiltration membrane</b> .....	Fu Lele Li Fang Wu Liang Wang Ge(1313)
<b>Removal of turbidity from butyl-acrylate wastewater by coagulation-sedimentation</b> .....	Gu Xiaofeng Song Yudong Zhou Yuexi Ma Liqiang Li Jun Wang Jun(1319)
<b>Purification effect of ecological floating beds of flakiness connection in slightly polluted river water</b> .....	Duan Jincheng Zhang Yimin Zhang Hongwei Gao Yuexiang Chao Jianying(1324)
<b>Nitrogen removal efficiency of co-processing pickle wastewater and municipal sewage by cyclic activated sludge system(CASS) process</b> .....	He Qiang Ding Wenjing Sima Weiping(1331)
<b>Pilot study on flow characteristics of a variable-velocity oxidation ditch with fine bubble</b> .....	Yang Yahong Peng Dangeong Li Lei Zheng Yangguang Han Yun(1336)
<b>Comparison of two different constructed wetland systems to treat swine wastewater</b> .....	Li Pengyu Wang Zhen Yuan Linjiang Dong Jian Liu Lin Zhu Gefu Liu Chaoliang(1341)
<b>Preparation of coagulant from fly ash and its application in Yellow River water treatment</b> .....	Li Yumei Chen Lirong Du Mingzhan(1346)
<b>Field study on effect of harvesting submerged plant during growing season for ecological management of eutrophicated water</b> .....	Jiang Yishuai Chen Hao Ma Zuomin Li Jing(1351)
<b>Rapid determination of sulfate in water by turbidimetry</b> .....	Xue Xiuling Li Mengdi(1359)
<b>Pollutants removal characteristics of natural start-up and steady operation of membrane bioreactor (MBR) for treating polluted surface water</b> .....	Yang Wei Zhao Qiujing Han Zhengshuang Li Kai Liang Heng Li Guibai(1363)
<b>Application of RBF and Elman neural network in prediction on pollutant removal efficiency of constructed wetland with different compound substrates</b> .....	Liang Qibin Liu Yungen Tian Kun Wang Wanbin(1368)
<b>Sludge formation and decontamination effect of stable surface flow wetland systems</b> .....	Zhang Longfei Wang Chengduan Wang Zhishuai(1373)
<b>Synthesis of multifunctional chelating resin and its adsorption properties for Cd(II) in water</b> .....	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/TiO<sub>2</sub>/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<sub>2.5</sub> 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)



# 无机陶瓷膜处理油田采出水

丁慧<sup>1,2</sup> 彭兆洋<sup>2</sup> 李毅<sup>1</sup> 温沁雪<sup>2</sup> 陈志强<sup>2\*</sup>

(1. 胜利油田胜利勘察设计院有限公司, 东营 257026; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

**摘要** 针对陶瓷膜在油田采出水处理过程中操作参数的选择及污染机理进行了研究。通过现场实验, 分析了不同的操作参数对膜通量的影响, 陶瓷膜对含油量及悬浮物的去除效果, 膜阻力组成及膜污染清洗方法。实验结果表明, 在确定出水水质达到低渗透油田注水水质 A1 级标准条件下, 陶瓷膜过滤最佳操作条件为: 跨膜压差 0.16 MPa、温度 50℃、膜面流速 5.0 m/s。同时发现, NaOH 和 HNO<sub>3</sub> 联合清洗有助于恢复膜通量。

**关键词** 无机陶瓷膜 油田采出水 膜阻力 膜污染

中图分类号 X741 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)04-1399-06

## Treatment of oilfield produced water by inorganic ceramic membrane

Ding Hui<sup>1,2</sup> Peng Zhaoyang<sup>2</sup> Li Yi<sup>1</sup> Wen Qinxue<sup>2</sup> Chen Zhiqiang<sup>2</sup>

(1. Shengli Engineering & Consulting Co. Ltd., Shengli Oil Field, Dongying 257026, China;

2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract** The operation parameters and fouling mechanism of ceramic membrane used for treating oilfield produced water were discussed. The field test analyzed the effects of different operation parameters on membrane flux, oil and suspended solid removal efficiency by ceramic membrane, the constituent of membrane resistance and the cleaning method of membrane fouling. Experimental results show that the optimal operation condition are transmembrane pressure of 0.16 MPa, temperature of 50℃ and cross-flow velocity of 5.0 m/s when the quality of the effluent is achieved with A1 standard. Results also show that NaOH combined with HNO<sub>3</sub> is helpful to recover membrane flux.

**Key words** inorganic ceramic membrane; oilfield produced water; membrane resistance; membrane fouling

在石油开采过程中, 将各油层采出液经原油脱水工艺处理后的脱出水被称为油田采出水。一般来说, 由于各个油田地质条件不同、注水水质不同, 因此油田采出水成分复杂, 除含有原油、无机盐和重金属、固体颗粒和微生物外, 还可能含有化学添加剂, 以及为开采油田注入地层的除氧剂、杀菌剂、破乳剂、防垢剂和润滑剂等<sup>[1,2]</sup>。

在油田采出水处理上, 常规处理工艺为自然沉淀除油—混凝除油—过滤除油的“三段式”处理工艺<sup>[3]</sup>, 油田采出水经过常规工艺处理后的出水水质基本可以达到中、高渗透油层的回注标准, 但不能够达到低渗透及特低透油层的回注水 A1 级标准。由于我国低渗透油藏储量占 60% ~ 70%, 是今后相当长一个时期内增储上产的主要基础, 因此, 对低渗透油层回注水处理的研究尤为重要<sup>[4]</sup>。

随着膜科学技术的发展, 国内外逐渐展开利用膜分离技术处理油田采出水的研究<sup>[5]</sup>。由于陶瓷膜具有效率高、设备占地面积小、操作简便、易于实现自动化控制、易于工业规模使用等优点, 并且在分离过

程中, 不发生相变、不添加或只需添加极少化学药剂、不会产生难以处理的污泥, 油的回收相对容易。因此, 是油田采出水处理技术的重点发展趋势之一<sup>[6,7]</sup>。

本文依托胜利油田某污水处理站开展了无机陶瓷膜处理油田采出水的现场实验研究, 确定了最佳操作参数, 考察连续运行过程中出水水质效果, 并开展了对膜污染的研究, 确定了行之有效的清洗方法, 为油田采出水处理工业化发展提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验用水

实验用水取自胜利油田某污水处理站, 油田采出水经过水站一次除油罐、电化学预氧化处理装置、

基金项目: 胜利油田科技管理局项目 (GKD1001)

收稿日期: 2012-04-05; 修订日期: 2012-06-21

作者简介: 丁慧 (1969~), 女, 高级工程师, 主要从事油田采出水处理与环保技术的研究。E-mail: dinghui5460@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: czqhit@163.com

混凝沉降罐、陶瓷过滤器处理后进入陶瓷膜实验装置。陶瓷膜系统进水水质如表1所示。

表1 陶瓷膜系统进水水质及A1级水质标准

Table 1 Influent quality of ceramic membrane system and effluent quality of A1 standard

水质指标	陶瓷膜系统进水	回注水 A1 标准
含油量(mg/L)	5~10	≤5.0
悬浮物(mg/L)	3.5~6.2	≤1.0
粒径中值(μm)	1.55~2.31	≤1.0
pH	6.5~7.2	6.5~7.5
温度(℃)	50	—

## 1.2 实验装置

实验装置如图1所示,所用陶瓷膜管为江苏久吾高科技股份有限公司所生产的200 nm孔径陶瓷膜,膜管长0.5 m,有效膜面积0.1 m<sup>2</sup>。

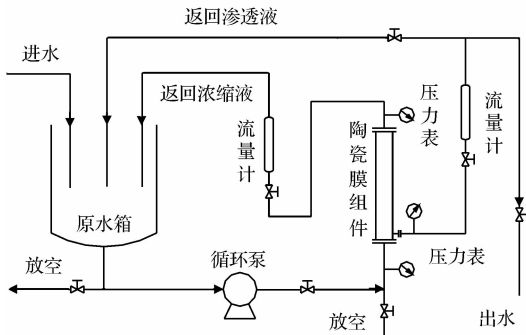


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental process

## 1.3 分析项目与方法

测定的指标有水温、pH、含油量、悬浮物含量、粒径中值。水温:温度计;pH:PHS-3C型精密pH计;含油量:分光光度法;悬浮物含量:重量法;粒径中值:库尔特粒径分析仪。其中油含量、悬浮物含量以及粒径中值的分析方法均按照SY/T5329-1994《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》中标准方法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 跨膜压差对膜通量的影响

在膜过滤过程中,膜面两侧的跨膜压差是膜过滤过程的推动力,其大小直接影响膜的过滤性能。在操作温度50℃、膜面流速5 m/s条件下,在不同的跨膜压差下连续运行6 h,考察膜通量随时间的变化情况,实验结果如图2所示。

由图2可以看出,在陶瓷膜过滤过程中,初始通量随跨膜压差的增加而增大,但通量的衰

减速度也较快。这是因为随着跨膜压差的增大,膜过滤过程的推动力增加,从而膜通量增加,同时较大的跨膜压差会使得采出水中的油滴、悬浮物等在膜孔或者膜面的沉积速度增加,甚至可以将油滴、悬浮物等被挤入膜孔内,造成膜孔堵塞,使得膜污染速度加快,导致膜通量衰减较快<sup>[8]</sup>。

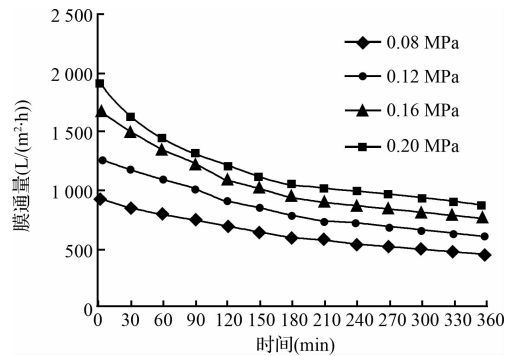


图2 不同跨膜压差下膜通量与时间的关系

Fig. 2 Relation between membrane flux and time at different trans-membrane pressure

在研究跨膜压差与膜通量之间的关系的时候,需要一个参数为膜稳定通量,本实验所采用的膜稳定通量为装置连续运转6 h时的膜通量的值。在操作条件为温度50℃、膜面流速5 m/s为例,稳定通量如图3所示。

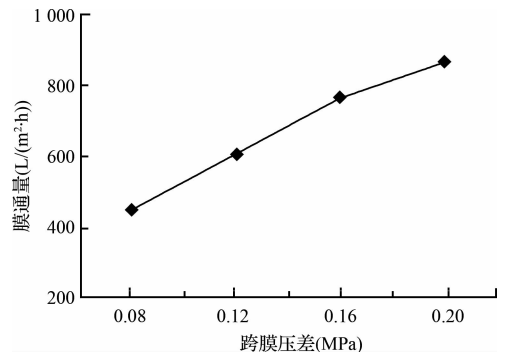


图3 跨膜压差与膜稳定通量的关系

Fig. 3 Relation between trans-membrane pressure and stable membrane flux

如图3可以看出,跨膜压差在0.08 MPa至0.16 MPa之间变化时,稳定膜通量与跨膜压差之间的关系近似为线性关系,当跨膜压差大于0.16 MPa时,稳定膜通量仍然增加,但增加幅度较小。这是因为根据凝胶层阻力模型,在膜表面上形成凝胶层后,若增加跨膜压差,则会出现凝胶层厚度增加,而膜通量增加减少,甚至下降的现象<sup>[9]</sup>。

通过以上分析,考虑跨膜压差对膜通量的影响,

同时根据膜厂家的建议及考虑动力消耗费用等因素,选择跨膜压差为 0.16 MPa 为宜。

## 2.2 膜面流速对膜通量的影响

在错流过滤中,一般认为,随膜面流速的提高,通量增大。这是因为随着膜面流速的增加,侧向剪切力增大,可以有效降低浓差极化的影响。但过高的膜面流速同时意味着循环量的增大及能耗的增加。实验条件:温度为 50℃,跨膜压差为 0.16 MPa 时,膜面流速与膜稳定通量的关系曲线见图 4。

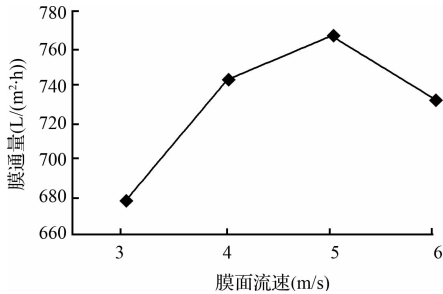


图4 膜面流速与膜稳定通量的关系

Fig. 4 Relation between membrane cross-flow velocity and stable membrane flux

从图 4 中可以看出:在较低的膜面流速下(小于 5 m/s),膜通量随膜面流速的增加而增大,但是在较高的膜面流速下(大于 5 m/s),膜通量随膜面流速的增加而减小,一个原因可能是在较高的膜面流速下,料液在膜管内部停留时间过短,另一个原因可能是,因为流速较高使得膜管内部压力不均匀,导致的膜通量下降<sup>[8]</sup>。因此,选定的膜面流速为 5 m/s。

## 2.3 温度对膜通量的影响

温度对膜通量的影响非常重要,一般来说,无论在压力控制区还是传质控制区,升高温度都能提高膜通量。在实验中,保持跨膜压差 0.16 MPa,膜面流速为 5 m/s 不变情况下,考察膜通量随温度的变化关系。

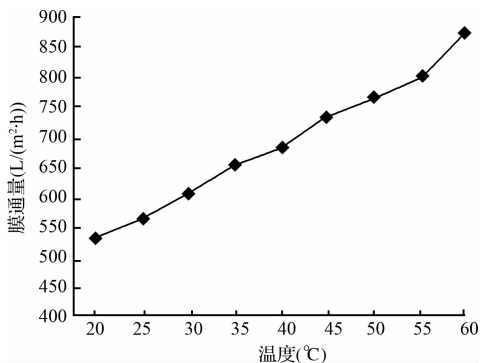


图5 温度对膜通量的影响

Fig. 5 Effect of temperature on flux

从图中 5 可以看出,温度对膜通量的影响较为显著。通量与温度近似成线性关系。这是由于随着料液温度的升高,粘度减小,膜过滤的传质阻力减小,从而提高膜通量<sup>[10,11]</sup>。另一方面,温度的升高同时使得料液的扩散能力得到提升,这也是膜通量得以提高的原因。但是在实际生产中,油田采出水温度为 50℃左右,通过提高待处理废水的温度来提高膜通量是不实际的。因此,在实际运行中不对温度进行控制。

## 2.4 过滤周期的确定

通过以上研究可知本研究的最优操作条件:温度为 50℃,跨膜压差为 0.16 MPa,膜面流速为 5 m/s。之后在此操作条件下对含油污水进行长时间的膜过滤实验,以考察陶瓷膜较长时间运行的通量衰减情况,实验结果见图 6。

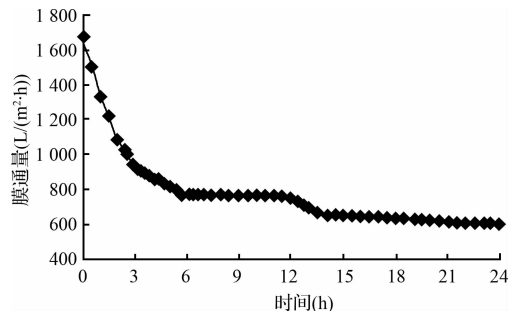


图6 最优条件下膜通量衰减曲线

Fig. 6 Flux decline curve at optimum operation condition

由图 6 可以看出,在过滤前 6 h 膜通量急速下降,下降幅度超过 50%,之后下降幅度变得相对缓慢,但是膜通量依然呈下降状态,说明利用陶瓷膜处理油田采出水时,即便是在最优操作条件下,膜通量衰减的发生仍不可避免。但是在最优操作条件下,利用陶瓷膜处理油田采出水时,膜通量可以在较长时间内达到稳定的结果。本实验中不对陶瓷膜进行其他反洗操作,当膜通量下降到初始膜通量的 35% 时,对其进行化学清洗,因此确定的清洗周期为 24 h。

## 2.5 出水水质分析

在进行无机陶瓷膜处理油田采出水操作参数的研究过程中,分别测定了不同的时间陶瓷膜处理油田采出水时含油量及悬浮物含量的变化情况,如图 7 和图 8 所示。

图 7 显示了陶瓷膜在不同进水水质条件下对油田采出水中石油类物质的去除效果,可以看出,出水含油量均能够稳定在 1.0 mg/L 以下,出水平均含油量为 0.18 mg/L,去除率在 95% 以上,平均去除率达 97.44%,图 8 显示了陶瓷膜在不同进水水质条件下



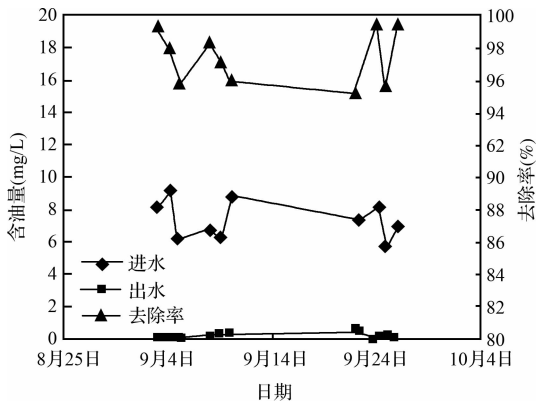


图7 陶瓷膜系统对油的去除效果

Fig.7 Oil removal curves of ceramic membrane system

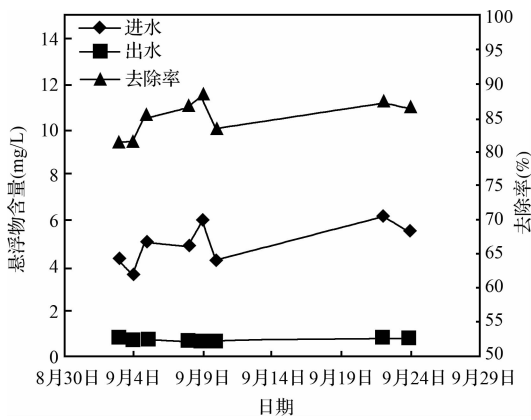


图8 陶瓷膜系统对悬浮物的去除效果

Fig.8 SS removal curves of ceramic membrane system

对油田采出水中悬浮物的去除效果,可以看出,经过无机陶瓷膜过滤以后,出水悬浮物含量稳定,均在 $1.0 \text{ mg/L}$ 以下,去除率在85%以上。

同时,对陶瓷膜的出水取样对其粒径中值及pH进行测定,发现其粒径中值在 $0.7 \sim 1 \mu\text{m}$ 之间变化,pH在7.0左右。综上所述,陶瓷膜处理油田采出水出水达到SY/T5329-94《碎屑岩油藏注水水质推荐指标》中A1级标准,即含油量 $\leq 5 \text{ mg/L}$ ,悬浮物含量 $\leq 1 \text{ mg/L}$ ,粒径中值 $\leq 1 \mu\text{m}$ ,满足回注要求。

## 2.6 膜污染阻力分析

本文同时对陶瓷膜污染机理进行了探讨。在前人研究<sup>[12,13]</sup>的基础上,同时为了简化膜污染的阻力分布,对膜阻力重新进行了划分。将由膜本身、膜与溶质的相互吸附、溶质的堵孔、膜面形成的凝胶层和浓差极化引起膜通量减小的阻力重新进行了划分<sup>[14,15]</sup>。将陶瓷膜总传质阻力 $R_t$ 分为固有阻力 $R_m$ 、可逆污染阻力 $R_{re}$ 、部分可逆污染阻力 $R_{pre}$ 和不可逆污染阻力 $R_f$ 。用低压高流速的流体冲刷膜表面,能够去除的膜的阻力部分为可逆阻力 $R_{re}$ ,然后

反洗陶瓷膜一段时间,能够去除的膜的阻力部分为部分可逆阻力 $R_{pre}$ ,剩下的膜的阻力为膜的固有阻力 $R_m$ 和不可逆阻力 $R_f$ <sup>[16]</sup>。其中,陶瓷膜固有阻力 $R_m$ 可用新膜过滤蒸馏水测量通量再通过Darcy公式<sup>[17]</sup>求出。并且总传质阻力 $R_t$ 公式为:

$$R_t = R_m + R_{re} + R_{pre} + R_f \quad (1)$$

则不可逆阻力 $R_f$ 可根据总传质阻力 $R_t$ 及其余阻力之差求出。具体实验方法如下。

在温度为 $50^\circ\text{C}$ 、跨膜压差为 $0.16 \text{ MPa}$ 、膜面流速为 $5.0 \text{ m/s}$ 的操作条件下,使用新膜过滤蒸馏水得到膜通量 $J_0$ ,蒸馏水的粘度为 $\mu$ ,则此时膜的传质阻力 $R_0$ 即为膜的固有阻力 $R_m$ ,大小为:

$$R_0 = R_m = \frac{\Delta P}{\mu \times J_0} \quad (2)$$

在温度为 $50^\circ\text{C}$ 、跨膜压差为 $0.16 \text{ MPa}$ 、膜面流速为 $5.0 \text{ m/s}$ 的操作条件下,使用陶瓷膜过滤油田采出水,得到膜的稳定通量 $J_1$ ,油田采出水的粘度为 $\mu_1$ ,则此时膜的传质阻力 $R_1$ 即为膜的总传质阻力 $R_t$ ,大小为:

$$R_1 = R_t = \frac{\Delta P}{\mu_1 \times J_1} \quad (3)$$

将过滤后的污染膜用低压高流速的蒸馏水冲刷膜表面30 min后,在温度为 $50^\circ\text{C}$ 、跨膜压差为 $0.16 \text{ MPa}$ 、膜面流速为 $5.0 \text{ m/s}$ 的操作条件下,再用该膜过滤蒸馏水,得到的膜通量 $J_2$ ,此时膜的传质阻力记为 $R_2$ ,大小为:

$$R_2 = \frac{\Delta P}{\mu \times J_2} \quad (4)$$

将上一步处理后的陶瓷膜再经过蒸馏水高压反冲洗30 min后,在温度为 $50^\circ\text{C}$ 、跨膜压差为 $0.16 \text{ MPa}$ 、膜面流速为 $5.0 \text{ m/s}$ 的操作条件下,用该膜过滤蒸馏水,得到的膜通量 $J_3$ ,此时膜的传质阻力记为 $R_3$ ,大小为:

$$R_0 = \frac{\Delta P}{\mu \times J_3} \quad (5)$$

通过以上分析,再结合下列公式,求出各阻力的大小:

$$R_2 = R_t - R_{re} \quad (6)$$

$$R_3 = R_t - R_{re} - R_{pre} \quad (7)$$

$$R_f = R_3 - R_0 \quad (8)$$

$$R_m(\%) = \frac{R_m}{R_t}, R_{re}(\%) = \frac{R_{re}}{R_t}, R_{pre}(\%) = \frac{R_{pre}}{R_t}; R_f(\%) = \frac{R_f}{R_t} \quad (9)$$

根据以上计算方法得出个各阻力占总传质阻力的比例大小如图9所示。

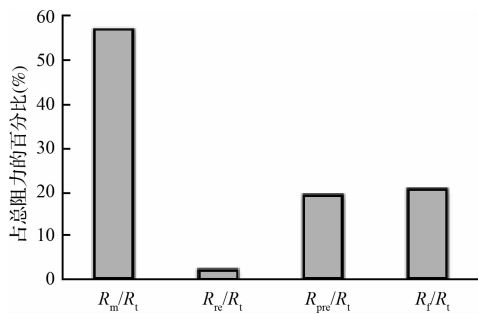


图 9 各阻力占总传质阻力比例

Fig. 9 Ratio of each resistance to total resistance

由图 9 可以看出,在孔径为 200 nm 的陶瓷膜中,陶瓷膜的固有阻力所占比例最大,达到 56.9%,可逆阻力占的比例最小,约为 3.3%,部分可逆阻力和不可逆阻力所占的比例分别为 19% 和 20.8%。可以得知,陶瓷膜固有阻力很大,说明陶瓷膜具有高截留率、低渗透率的特点;可逆阻力所占的比例最小和部分可逆阻力较大,则说明了膜污染中浓差极化和吸附等“表层污染”程度很低,滤饼层和膜孔堵塞等“深层污染”程度较高;另外的 20.8% 不可逆阻力,说明通过物理方法处理不能得到清除,需要采用化学方法进行处理。

## 2.7 膜清洗研究

一般认为,膜污染发生的原因是由于油田采出水组成复杂,污水中含有大量的油滴、微粒及胶体等杂质,在过滤过程中会吸附、沉积在膜表面或膜的孔道内,造成陶瓷膜即使在最优操作条件下运行,膜通量的衰减仍伴随着整个过滤过程。错流过滤和反冲洗操作可以在一定程度上减缓浓差极化、清除部分吸附在膜表面的沉积物质及吸附或堵塞于膜孔的杂质,减缓膜污染的发生,但仍有杂质吸附在膜表面或堵塞在膜孔道中,膜通量得不到完全恢复,从阻力分析中也可验证,确实存在一部分通过物理方法不易清除的不可逆阻力<sup>[18,19]</sup>。这时,只有采用化学清洗方法才能彻底清洗陶瓷膜,恢复膜通量。

清洗实验操作参数为:跨膜压差 0.25 MPa,膜面流速 6.0 m/s,清洗时间 30 min,清洗剂分别为 NaOH、HNO<sub>3</sub>、NaClO、柠檬酸和 EDTA,清洗剂浓度均为 1%。结果如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,不同的清洗剂都能使膜通量得到不同程度的恢复,说明了水中的有机物和无机物对膜都有一定的污染,但污染程度不同。对于单一的清洗剂来说,HNO<sub>3</sub> 清洗液能够使膜通量恢复最大,但是通量依然不能够达到 50%,NaClO 清洗液效果最差,通量恢复 17% 不到,可知单一的清

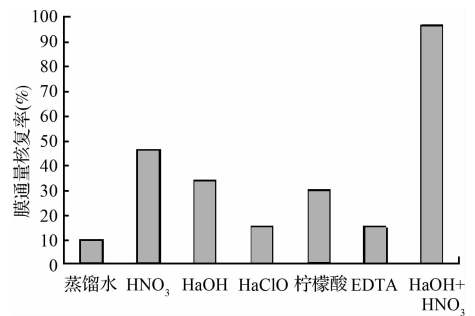


图 10 不同清洗药剂的清洗效果

Fig. 10 Cleaning efficiency of different cleaning agents

洗剂不能使膜通量达到较好的恢复效果。

使用 NaOH 和 HNO<sub>3</sub> 联合清洗方式,即先用 1% 浓度的 NaOH 清洗 30 min,后用 1% 浓度 HNO<sub>3</sub> 的清洗 30 min,能够得到较好的清洗效果,膜通量恢复率约为 97%,最终确定的清洗方法为 NaOH 和 HNO<sub>3</sub> 联合清洗法,具体清洗方法如下:

- (1) 水洗:排空系统残留的料液,用热水漂洗 10 min。
- (2) 碱洗:用蒸馏水配制浓度为 1% 的 NaOH 溶液,在 50℃ 低压高流速条件下循环清洗 30 min。
- (3) 水洗:排空系统残留的料液,用热水漂洗 10 min,冲洗至中性,然后排空。
- (4) 酸洗:用蒸馏水配制浓度为 1% 的 HNO<sub>3</sub> 溶液,在 50℃ 低压高流速条件下循环清洗 30 min。
- (5) 水洗:排空系统残留的料液,用热水漂洗 10 min,冲洗至中性,然后排空。测定蒸馏水通量。若达到恢复率,停止清洗;若未达到恢复率,重复以上操作,直到恢复通量为止。

## 3 结 论

(1) 在合适的操作条件下使用 200 nm 陶瓷膜过滤油田采出水,出水水质含油量均小于 1 mg/L,悬浮物含量小于 1 mg/L,满足 SY/T5329-94《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》中低渗透油田的回注水质 A1 级标准,具备了工业性放大实验的技术基础。确定陶瓷膜的最佳操作条件为跨膜压差 0.16 MPa、温度为 50℃、膜面流速 5.0 m/s,周期为 24 h。

(2) 将陶瓷膜的污染阻力重新划分为以下 4 类:陶瓷膜的固有阻力、可逆阻力、部分可逆阻力及不可逆阻力。通过实验得出陶瓷膜具有高截留率、低渗透率的特点,并且说明部分膜污染通过物理方法处理不能得到清除,需要采用化学方法进行处理的原因。

(3) 本文确定陶瓷膜的化学清洗方法是:使用 NaOH 和 HNO<sub>3</sub> 联合清洗方式,即先用 1% 浓度的

NaOH 清洗 30 min, 后用 1% 浓度  $\text{HNO}_3$  的清洗 30 min, 此清洗方法可有效清除膜污染物质, 膜通量恢复率约为 97% 以上。

## 参考文献

- [1] 张逢玉, 姜安玺, 吕阳. 油田采出水处理技术与发展趋势研究. 环境科学与管理, **2007**, 32(10): 65-68  
Zhang F. Y., Jiang A. X., Lü Y. Treatment techniques of oilfield wastewater and development. Environment Science and Management, **2007**, 32(10): 65-68 (in Chinese)
- [2] 周健儿, 包启富, 汪永清, 等. 无机陶瓷膜在含油废水中的应用进展. 陶瓷学报, **2008**, 29(1): 54-57  
Zhou J. E., Bao Q. F., Wang Y. Q., et al. Application of ceramic membranes in treating oily wastewater. Journal of Ceramics, **2008**, 29(1): 54-57 (in Chinese)
- [3] 吕慧超, 左岩. 油田回注水处理技术及其发展趋势. 工业用水与废水, **2009**, 40(2): 15-18  
Lü H. C., Zuo Y. Technology of oilfield reinjection water treatment and development trend thereof. Industrial Water & Wastewater, **2009**, 40(2): 15-18 (in Chinese)
- [4] 蒋生健. 低渗透油田回注水精细处理技术及发展. 工业水处理, **2007**, 27(10): 5-8  
Jiang S. J. Technology and development of fine treatment of low permeable oilfield reinjection water. Industrial Water Treatment, **2007**, 27(10): 5-8 (in Chinese)
- [5] Wu C. J., Li A. M., Li L., et al. Treatment of oily water by a poly(vinyl alcohol) ultrafiltration membrane. Desalination, **2008**, 225(1-3): 312-321
- [6] 孔祥平, 王宝辉. 膜法水处理技术在油田上的应用. 化工时刊, **2005**, 19(12): 40-42  
Kong X. P., Wang B. H. The application of membrane technology for water treatment in oil field. Chemical Industry Times, **2005**, 19(12): 40-42 (in Chinese)
- [7] 刘国强, 王铎, 王立国, 等. 膜技术处理含油废水的研究. 膜科学与技术, **2007**, 27(1): 68-72  
Liu G. Q., Wang D., Wang L. G., et al. Membrane technologies applied to oily wastewater treatment. Membrane Science and Technology, **2007**, 27(1): 68-72 (in Chinese)
- [8] 王春梅, 谷和平, 王义刚, 等. 陶瓷微滤膜处理含油废水的工艺研究. 南京化工大学学报, **2000**, 22(5): 38-42  
Wang C. M., Gu H. P., Wang Y. G., et al. Treatment process of oily wastewater by ceramic membrane. Journal of Nanjing University of Chemical Technology, **2000**, 22(5): 38-42 (in Chinese)
- [9] Bhavé R. R., Fleming H. L. Removal of oily contaminants in wastewater with microporous alumina membrane. AIChE Symp. Ser., **1988**, 84(2): 19-27
- [10] Mueller J., Yan W. C., Davis R. H. Cross-flow micro-filtration of oily water. Membrane Science, **1997**, 129(2): 221-235
- [11] Hu X. G., Bekassy-Molnar E., Koris A. Study of modeling transmembrane pressure and gel resistance in ultra-filtration of oily emulsion. Desalination, **2004**, 163(1-3): 355-360
- [12] 王志高, 邢卫红, 徐南平. 陶瓷膜过滤牛初乳过程的污染阻力分析. 膜科学与技术, **2004**, 24(1): 28-31  
Wang Z. G., Xing W. H., Xu N. P. Study on hollow fibre membrane contactor for the separation of carbon dioxide from carbon dioxide-nitrogen mixture. Membrane Science and Technology, **2004**, 24(1): 28-31 (in Chinese)
- [13] 赵鹤飞, 杨瑞金, 熊明民, 等. 陶瓷膜微滤秸秆木聚糖酶解液的阻力及膜通量模型. 农业工程学报, **2008**, 24(7): 227-232  
Zhao H. F., Yang R. J., Xiong M. M., et al. Models for micro-filtration of the hydrolysate of steam-exploded wheat straw by xylanase using ceramic membrane. Transactions of the CSAE, **2008**, 24(3): 227-232 (in Chinese)
- [14] 钟璟, 赵宜江, 李红, 等. 陶瓷微滤膜回收偏钛酸过程中的污染机理. 高校化工学报, **1998**, 12(2): 136-140  
Zhong J., Zhao Y. J., Li H., et al. Fouling of ceramic membranes in microfiltration of wastewater produced by sulfuric acid process in  $\text{TiO}_2$  plant. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, **1998**, 12(2): 136-140 (in Chinese)
- [15] 刘广立, 施汉昌, 黄霞, 等. 无机微滤膜过滤阻力的研究. 环境污染治理技术与设备, **2002**, 3(1): 15-18  
Liu G. H., Shi H. C., Huang X., et al. Study on the filtration resistance of inorganic microfiltration membrane. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, **2002**, 3(1): 15-18 (in Chinese)
- [16] 马敬环, 项军, 李娟, 等. 无机陶瓷膜错流超滤海水污染机理研究. 盐业与化工, **2009**, 38(3): 31-34  
Ma J. H., Xiang J., Li J., et al. Fouling mechanism of ceramic membranes in pretreatment seawater by cross-flow ultrafiltration. Journal of Salt and Chemical Industry, **2009**, 38(3): 31-34 (in Chinese)
- [17] 马琳, 秦国彤. 膜污染的机理和数学模型研究进展. 水处理技术, **2007**, 33(6): 1-4  
Ma L., Qin G. T. Mechanism and mathematical models of membrane fouling. Technology of Water Treatment, **2007**, 33(6): 1-4 (in Chinese)
- [18] 徐超. 油田含油污水陶瓷膜处理技术研究. 东营: 中国石油大学硕士学位论文, **2010**  
Xu C. Study on treatment of oily wastewater in oil-field by ceramic membrane technology. Dongying: Master's Degree Thesis of China University of Petroleum, **2010** (in Chinese)
- [19] 樊文玲, 林瑛, 郭立玮. 陶瓷膜澄清糖渍清水提液的膜清洗研究. 中草药, **2008**, 39(3): 369-371  
Fen W. L., Lin Y., Guo L. W. Cleaning process of ceramic membrane in clarification of Tangkeqing water extract. Chinese Traditional and Herbal Drugs, **2008**, 39(3): 369-371 (in Chinese)