



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10期

Vol.7 No.10

中国科学院 生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版

10  
2013

## 目次

### 水污染防治

|                                               |     |          |           |           |
|-----------------------------------------------|-----|----------|-----------|-----------|
| 蠕虫捕食对污泥性质的影响 .....                            | 田禹  | 卢志明      | 卢耀斌       | 李之鹏(3701) |
| 改性钙铝 LDH 对水中硝基苯和萘的吸附 .....                    | 章萍  | 钱光人      | 王天琪       | 孙凯旋       |
| 周文斌(3708)                                     |     |          |           |           |
| 混凝辅助电化学法处理橙黄 G 染料废水 .....                     | 潘峰  | 刘林       | 王万峰       | 尤奇中       |
| 杨利敬(3713)                                     |     |          |           |           |
| 压裂废水粘度对二氧化锰臭氧催化氧化处理特性的影响 .....                | 金鹏康 | 贺栋       | 刘岚        | 冀忠伦       |
| 王晓昌(3719)                                     |     |          |           |           |
| 利用质子化的水杨醛接枝壳聚糖吸附水中硫酸根 .....                   | 郭莹娟 | 薛娟琴      | 毕强        | 杜业威       |
| 张美娜(3725)                                     |     |          |           |           |
| 混合液回流比对 MSBR 工艺强化生物脱氮的影响 .....                | 邓仁健 | 张金松      | 曲志军       | 杨靖波(3731) |
| 优化混凝处理低温低浊黄河水及对余铝的控制 .....                    | 高雅  | 毕哲       | 王东升       | 段晋明(3737) |
| 潮汐流-潜流组合人工湿地污水净化效率 .....                      | 高红杰 | 王帅       | 宋永会       | 彭剑峰       |
| 丁琳(3743)                                      |     |          |           |           |
| 用于氨氮去除的 13X 分子筛/PES 膜吸附剂的制备与性能表征 .....        | 王茗惠 | 张玉忠      | 林立刚       | 丁晓莉       |
| 李泓(3749)                                      |     |          |           |           |
| 高盐废水盐度对中度嗜盐菌生长动力学的影响 .....                    | 宋柳琼 | 常青       | 田秉晖       | 辛丽花(3755) |
| 木屑处置漏油事故的室内模拟 .....                           | 李曼曼 | 潘洪川      | 黄岁樑(3760) |           |
| 响应面优化 CCl <sub>4</sub> 增强超声降解左旋氧氟沙星模拟废水 ..... | 李娟  | 魏红       | 李克斌       | 王勤勤       |
| 李妮妮(3767)                                     |     |          |           |           |
| UASB 反应器降解活性染料废水的特性 .....                     | 曹咏  | 肖利平      | 吕仪婧(3773) |           |
| 双氯芬酸的吸附去除过程与机制 .....                          | 国小伟 | 田秉晖      | 辛丽花(3779) |           |
| 溶解氧对底泥扰动状态下水体中磷去除和固定的影响 .....                 | 李大鹏 | 黄勇(3785) |           |           |
| 中空纤维膜超滤聚丙烯酸钠溶液 .....                          | 张蛟蛟 | 曾坚贤      | 欧阳振中      | 刘国清       |
| 李书(3791)                                      |     |          |           |           |
| 炭化柚子皮对废水中双酚 A 的吸附 .....                       | 曾荣英 | 唐文清      | 冯泳兰       | 刘梦琴       |
| 黄波(3797)                                      |     |          |           |           |
| 活性炭纤维对水中微囊藻毒素的吸附性能 .....                      | 郑西强 | 刘群       | 陈云峰(3802) |           |
| 温度对木质纤维素水解与挥发性脂肪酸累积的影响 .....                  | 李玲  | 闻岳       | 徐超        | 王莉蕙       |
| 周琪(3807)                                      |     |          |           |           |
| 太湖湖滨带的缓冲效果 .....                              | 成小英 | 卜卫志      | 张明        | 周昱宏       |
| 张光生(3813)                                     |     |          |           |           |
| 活性污泥中温与高温絮凝特性 .....                           | 陈海蓉 | 闻岳       | 曹阿生       | 黄静水       |
| 周琪(3821)                                      |     |          |           |           |
| 活性焦吸附对煤化工废水膜处理工艺的影响 .....                     | 徐莉莉 | 孙硕       | 王军        | 侯得印       |
| 栾兆坤(3827)                                     |     |          |           |           |
| 电混凝处理电镀综合废水 .....                             | 王海东 | 陈发源      | 杨春风       | 赵旭        |
| 曲久辉(3833)                                     |     |          |           |           |
| A <sup>2</sup> /O-MBR 工艺处理低负荷污水并回用 .....      | 胡以松 | 王晓昌      | 张永梅       | 陈华        |
| 金鹏康(3839)                                     |     |          |           |           |
| 高效脱氮除磷耦合技术物料平衡系统的构建 .....                     | 蔡健明 | 操家顺      | 周碧波(3844) |           |
| 循环水养殖系统中流化床生物滤器净水效果影响因素 .....                 | 张海耿 | 张宇雷      | 张业桦       | 顾川川       |
| 宋红桥(3849)                                     |     |          |           |           |
| 天然黄铁矿的除磷性能 .....                              | 张菁  | 李睿华      | 李杰        | 刘波(3856)  |
| 谭江月(3861)                                     |     |          |           |           |
| 超声强化活性污泥法处理含芳香族硝基化合物废水 .....                  | 谭江月 | 徐志强      | 黄云碧(3861) |           |
| 吸附饱和和活性炭的 Fenton 试剂再生 .....                   | 李小豹 | 杨春平      | 郭俊元       | 杨佳        |
| 邱国良(3867)                                     |     |          |           |           |
| 山地城市合流污水特细砂来源 .....                           | 何强  | 胡澄       | 徐志恒       | 孙兴福       |
| 李华(3874)                                      |     |          |           |           |
| Ti(IV)催化臭氧/过氧化氢预处理酸性难降解废水 .....               | 余夙  | 刘汉水      | 高燕        | 童少平(3881) |
| 光催化氧化深度处理电镀有机废水的工程化实验 .....                   | 李鹏  | 何华良      | 刘国光       | 林亲铁       |
| 吕文英(3885)                                     |     |          |           |           |
| 不同工艺对含高浓度腐殖酸地下水处理的可行性 .....                   | 宋数宾 | 高雅       | 张伟军       | 徐慧        |
| 肖峰(3890)                                      |     |          |           |           |
| 完全自营养脱氮过程中的影响因素 .....                         | 蔡庆  | 张代钧      | 肖苒颖       | 姚宗豹       |
| 卢培利(3895)                                     |     |          |           |           |
| 不同类型组合与停留时间下串联型基质床净污效果 .....                  | 汪晓燕 | 任丽君      | 潘玮        | 安树青(3901) |
| 生物质材料预处理餐饮废水 .....                            | 翁建兵 | 张凤娥      | 董良飞       | 雷春生       |
| 付东庆(3908)                                     |     |          |           |           |
| CTMAB/SDS 改性沸石对水中痕量邻苯二甲酸酯吸附机制 .....           | 徐宇峰 | 王龙       | 郭劲松       | 高旭(3913)  |
| 磁性埃洛石对水溶液中盐酸土霉素的吸附 .....                      | 张中杰 | 王旭       | 邱士鑫       | 潘建明(3921) |
| 天然沸石吸附氨氮的影响因素 .....                           | 安莹  | 王志伟      | 张一帆       | 吴志超(3927) |
| 铂钨共掺杂纳米 TiO <sub>2</sub> 的制备、表征及光催化性能 .....   | 杜鹏  | 赵振波      | 陈刚(3933)  |           |
| 水力负荷和回流比对前置反硝化 BAF 系统处理玉米青贮液的影响 .....         | 邹海明 | 谢越       | 王艳        | 李飞跃(3939) |
| 准好氧矿化垃圾反应床+超声/芬顿联用技术处理垃圾渗滤液 .....             | 陈颖  | 喻泽斌      | 孙玲芳       | 潘终胜       |
| 项国梁(3946)                                     |     |          |           |           |

|                                                            |                               |                       |     |           |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----|-----------|
| 胺化木质素对水中 Cu(II)、Cd(II) 的吸附 .....                           | 周 艳                           | 王宗芹                   | 孙 莉 | 罗 婷(3953) |
| 畜禽沼液中抗生素和激素的微波处理 .....                                     | 陈庆华                           | 陈玉成                   | 杨志敏 | 田 伟(3958) |
| 低温条件下硝化污泥的驯化 .....                                         |                               | 方明亮                   | 杨云龙 | 楼洪森(3963) |
| 改性二次锆渣吸附去除废水中的磷 .....                                      | 周 乐                           | 徐龙君                   | 李 礼 | 谢太平(3967) |
| 矿化垃圾床+三维电极/电 Fenton 法处理老龄垃圾渗滤液 .....                       |                               |                       |     |           |
| ..... 孙玲芳 喻泽斌 陈 颖 汝 旋 李明洁 周 涛(3972)                        |                               |                       |     |           |
| ESA/AMPS 共聚物与磁场的协同阻垢作用 .....                               | 刘 展                           | 刘振法                   | 张利辉 | 王 昕(3979) |
| 膜电解法在线再生酸性蚀刻液及回收铜新技术 ... 徐海清 钟洪胜 赵国鹏 袁国伟 胡耀红 陈力格 罗慧梅(3985) |                               |                       |     |           |
| 温度变化对厌氧氨氧化反应的影响 .....                                      |                               | 姚俊芹                   | 刘志辉 | 周少奇(3993) |
| 环境因子对汾河水上公园再生水中藻类生长的影响 .....                               | 宋正光 高 磊 范 婧 张鸿涛 吴春旭 王玉双(3997) |                       |     |           |
| 活性炭吸附处理电镀废水中的 EDTA .....                                   | 郭文波 李子富 程世昆 张 扬 周晓琴(4004)     |                       |     |           |
| 水平潜流人工湿地处理太原市城市再生水的运行效能 .....                              | 王玉双 张鸿涛 朱木兰 陈荣柱 李晓崑 高 磊(4009) |                       |     |           |
| A/O-MBR 工艺处理校园生活污水中水回用工程的设计与运行 .....                       |                               |                       |     |           |
| ..... 李菲菲 张 衍 陈吕军 李 荧 李 伟 李建国 赵满成 吕启元(4015)                |                               |                       |     |           |
| 太原市汾河公园再生水补水方案优化模拟 .....                                   | 薛祥山 张鸿涛 袁国清 徐 亚 杜 娟 吴春旭(4021) |                       |     |           |
| 加热酸化-Fenton 氧化处理乳化液废水 .....                                |                               | 蒲维肖 刘丹丹 王志强 陈文清(4027) |     |           |

大 气 污 染 防 治

|                                |                           |  |  |  |
|--------------------------------|---------------------------|--|--|--|
| 添加剂对炭黑颗粒润湿和沉降性能的影响 .....       | 宋靖珂 李彩亭 路 培 赵亚培 战 琪(4032) |  |  |  |
| 过渡金属离子改性 MCM-41 对乙烯吸附的影响 ..... | 马晓东 欧阳峰 申东美 曹小凯(4038)     |  |  |  |

固 体 废 物 处 置

|                                                            |                                   |               |  |  |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------|--|--|
| 钢渣掺量对泡沫混凝土砌块性能的影响 .....                                    |                                   |               |  |  |
| ..... 廖洪强 何冬林 郭占成 赛音巴特尔 邓德敏 余广炜 贺 婷 李 鹏(4044)              |                                   |               |  |  |
| 城市污水厂污泥的浸泡油炸 .....                                         | 张 晶 吴中华 李占勇 王瑞芳 岳 莲(4049)         |               |  |  |
| 粉煤灰免烧陶粒制备及其重金属废水净化性能 .....                                 |                                   | 邹正禹 刘阳生(4054) |  |  |
| 湿热水解处理餐厨垃圾氮素转化规律 .....                                     | 赵国鹏 李鸣晓 席北斗 祝超伟 魏自民 李 丹 刘东明(4061) |               |  |  |
| 炼焦煤尾煤催化热解制取富氢燃料气 ... 柳树成 付兴民 朱逢豪 贾晋炜 李 宁 高成龙 徐精求 舒新前(4067) |                                   |               |  |  |
| 垃圾焚烧飞灰对染料(亚甲基蓝)的吸附性能 .....                                 | 李夫振 周少奇 黎 强 林奕明(4072)             |               |  |  |
| 废 LCD 面板有机材料水热资源化产乙酸 .....                                 | 白 岚 卢尚铭 贺文智 李光明 黄菊文 章 琦(4079)     |               |  |  |
| 碱熔预处理对粉煤灰溶解规律的影响及其动力学 .....                                | 王红宇 管伟雄 赵 颖 席北斗(4085)             |               |  |  |
| 不同堆肥方式对鸡粪与秸秆混合堆肥效果 .....                                   | 黄 川 黄 珊 李家祥(4090)                 |               |  |  |

土 壤 污 染 防 治

|                                         |                               |  |  |  |
|-----------------------------------------|-------------------------------|--|--|--|
| 不同镉污染农田土壤上秸秆和炭化秸秆分解动态及其对土壤镉的吸附特征 .....  | 张 晶 苏德纯(4097)                 |  |  |  |
| 微米 Cu/Fe 对污染土壤洗脱液中有机氯农药的降解 .....        | 李 群 张胜田 万金忠 赵 欣 林玉锁 陈 鑫(4103) |  |  |  |
| 两株镉抗性奇异变形杆菌对龙葵修复镉污染土壤的强化作用 .....        |                               |  |  |  |
| ..... 刘莉华 刘淑杰 陈福明 杨小龙 杨春平 赵晶晶 吴秉奇(4109) |                               |  |  |  |
| 高效石油烃降解菌 SKD-1 的分离、筛选及其降解性能 .....       | 陆洪省 魏文超 王厚伟 宋静静 马 晶(4116)     |  |  |  |

环 境 生 物 技 术

|                                                               |                           |  |  |  |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------|--|--|--|
| 鼠李糖脂对微生物菌剂降解石油的影响 .....                                       | 王冬梅 陈丽华 周立辉 海立强 李长宝(4121) |  |  |  |
| 一株高效异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及脱氮性能 .....                               |                           |  |  |  |
| ..... 周迎芹 信 欣 姚 力 裴瑞林 方 鹏 羊依金(4127)                           |                           |  |  |  |
| 共代谢基质对芽孢杆菌 Y-4 降解异喹啉的影响 ... 王光华 刘雪琴 李文兵 李 进 朱 政 刘 晨 朱亦男(4133) |                           |  |  |  |
| 碳纤维毡表面改性对微生物燃料电池性能的影响 .....                                   | 彭新红 于宏兵 王 鑫 李 勇(4139)     |  |  |  |
| 发光细菌法在水质综合毒性在线检测中的应用 .....                                    | 陈继红 王富生 舒易强 杜丛伟(4144)     |  |  |  |

CONTENTS

Effect of worm’s predation on sludge characteristics ..... Tian Yu Lu Zhiming Lu Yaobin Li Zhipeng (3701)

Adsorption properties and mechanisms of nitrobenzene and naphthalene to CaAl-LDH modified by SDS from water ..... Zhang Ping Qian Guangren Wang Tianqi Sun Kaixuan Zhou Wenbin (3708)

Treatment of Orange G dye wastewater by electrochemical process with auxiliary coagulation ..... Pan Feng Liu Lin Wang Wanfeng You Qizhong Yang Lijing (3713)

Impact of fracturing wastewater viscosity on characteristics of manganese dioxide catalytic ozonation process ..... Jin Pengkang He Dong Liu Lan Ji Zhonglun Wang Xiaochang (3719)

Adsorption of sulfate onto protonated grafted-chitosan from aqueous solution ..... Guo Yingjuan Xue Juanqin Bi Qiang Du Yewei Zhang Meina (3725)

Influence of mixed liquor recycle ratio on enhanced bio-denitrification in modified sequencing batch reactor process ..... Deng Renjian Zhang Jinsong Qu Zhijun Yang Jingbo (3731)

Optimization of coagulation performance and residual aluminum control for Yellow River water with low temperature and low turbidity ..... Gao Ya Bi Zhe Wang Dongsheng Duan Jinming (3737)

Sewage purification effect of tidal flow-subsurface flow hybrid constructed wetland ..... Gao Hongjie Wang Shuai Song Yonghui Peng Jianfeng Li Rui Zhi Erquan Ding Lin (3743)

Preparation and characterization of 13X zeolites/PES membrane adsorbent for ammonia nitrogen removal ..... Wang Minghui Zhang Yuzhong Lin Ligang Ding Xiaoli Li Hong (3749)

Effect of salinity on moderate halophilic bacteria growth kinetics in high salinity wastewater ..... Song Liugong Chang Qing Tian Binghui Xin Lihua (3755)

Indoor experimental study on removing spilled surface oil by sawdust ..... Li Manman Pan Hongchuan Huang Suiliang (3760)

Degradation of levofloxacin by ultrasound/CCl<sub>4</sub>: optimization by response surface methodology ..... Li Juan Wei Hong Li Kebin Wang Qinqin Li Nini (3767)

Degradation characteristics of reactive dye wastewater in UASB reactor ..... Cao Yong Xiao Liping Lü Yijing (3773)

Adsorption removal process and mechanism of diclofenac ..... Guo Xiaowei Tian Binghui Xin Lihua (3779)

Effect of dissolved oxygen on phosphorus removal and immobilization under sediment disturbance conditions ..... Li Dapeng Huang Yong (3785)

Ultrafiltration behaviors of poly ( acrylic acid ) sodium salt solutions by using hollow fiber membranes ..... Zhang Jiaojiao Zeng Jianxian Ouyang Zhenzhong Liu Guoqing Li Shu (3791)

Adsorption of bisphenol-A by using carbonized pomelo peel ..... Zeng Rongying Tang Wenqing Feng Yonglan Liu Mengqin Huang Bo Wu Anfu (3797)

Adsorption performance of activated carbon fiber to microcystins in water ..... Zheng Xiqiang Liu Qun Chen Yunfeng (3802)

Effect of temperature on lignocellulosic wastes hydrolysis and volatile fatty acids accumulation ..... Li Ling Wen Yue Xu Chao Wang Lihui Zhou Qi (3807)

Buffering effect of riparian zone of Taihu Lake ..... Cheng Xiaoying Bu Weizhi Zhang Ming Zhou Yuhong Yang Haofei Zhang Guangsheng (3813)

Biofloculation of mesophilic and thermophilic activated sludge ..... Chen Hairong Wen Yue Cao Asheng Huang Jingshui Li Haisong Zhou Qi (3821)

Impact of activated coke adsorption on membrane treatment process of coke plant wastewater ..... Xu Lili Sun Shuo Wang Jun Hou Deyin Luan Zhaojun (3827)

Treatment of electroplating wastewater by electrocoagulation ..... Wang Haidong Chen Fayuan Yang Chunfeng Zhao Xu Liu Huijuan Qu Jiuhui (3833)

Low loading wastewater treatment and reuse by A<sup>2</sup>/O-MBR process ..... Hu Yisong Wang Xiaochang Zhang Yongmei Chen Hua Jin Pengkang (3839)

Mass balance system regeneration of efficient nitrogen and phosphorus removal coupling technique ..... Cai Jianming Cao Jiashun Zhou Bibo (3844)

Influencing factors of purifying effluent of recirculating aquaculture system by fluidized-sand biofilter ..... Zhang Haigeng Zhang Yulei Zhang Yewei Gu Chuanchuan Song Hongqiao Wu Fan (3849)

Removal efficiency of phosphorus by pyrite ..... Zhang Jing Li Ruihua Li Jie Liu Bo (3856)

Activated sludge process enhanced by ultrasound for treatment of wastewater containing nitroaromatic compound ..... Tan Jiangyue Xu Zhiqiang Huang Yunbi (3861)

Regeneration of saturated activated carbon by Fenton reagent ..... Li Xiaobao Yang Chunping Guo Junyuan Yang Jia Qiu Guoliang Yi Bin (3867)

Sources of ultra-fine grit in combined sewer of mountainous urban ..... He Qiang Hu Cheng Xu Zhiheng Sun Xingfu Li Hua (3874)

Pretreatment of acid refractory wastewater by Ti(IV)-catalyzed ozonation ..... Yu Su Liu Hanshui Gao Yan Tong Shaoping (3881)

Engineering experiment of electroplating organic effluent advanced treatment by photocatalytic oxidation ..... Li Peng He Hualiang Liu Guoguang Lin Qintie Yao Kun Lü Wenying (3885)

Feasibility of treatment of ground water with high humic acid content using different technologies ..... Song Shubin Gao Ya Zhang Weijun Xu Hui Xiao Feng Zhou Caiyong (3890)

Influencing factors in completely autotrophic nitrogen removal process ..... Cai Qing Zhang Daijun Xiao Pengying Yao Zongbao Lu Peili (3895)

Pollutant removal efficiencies of different combination substrate beds and residence times ..... Wang Xiaoyan Ren Lijun Pan Wei An Shuqing (3901)

Pretreatment of restaurant wastewater by biomass materials ..... Weng Jianbing Zhang Fengge Dong Liangfei Lei Chunsheng Fu Dongqing (3908)

Mechanism of removal of trace phthalate esters with CTMAB/SDS zeolite ..... Xu Yufeng Wang Long Guo Jinsong Gao Xu (3913)

|                                                                                                                                                                            |                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Adsorption of oxytetracycline hydrochloride in aqueous solutions by magnetic halloysite composites .....                                                                   | Zhang Zhongjie Wang Xu Qiu Shixin Pan Jianming(3921)                                               |
| Factors influencing ammonium removal by natural zeolite as adsorbent .....                                                                                                 | An Ying Wang Zhiwei Zhang Yifan Wu Zhichao(3927)                                                   |
| Preparation, characterization and photocatalytic performance of platinum and cerium-codoped TiO <sub>2</sub> .....                                                         | Du Peng Zhao Zhenbo Chen Gang(3933)                                                                |
| Influence of hydraulic loading and reflux ratio on treatment of corn silage effluent using a pre-denitrification BAF .....                                                 | Zou Haiming Xie Yue Wang Yan Li Feiyue(3939)                                                       |
| Treatment of landfill leachate by combined semi-aerobic aged refuse bioreactor and ultrasound/Fenton processes .....                                                       | Chen Ying Yu Zebin Sun Lingfang Pan Zhongsheng Xiang Guoliang Gao Xingsheng(3946)                  |
| Adsorption of Cu(II), Cd(II) in aqueous solutions using aminated lignin .....                                                                                              | Zhou Yan Wang Zongqin Sun Li Luo Ting(3953)                                                        |
| Microwave treatment of antibiotics and hormone in livestock excreta-based biogas slurry .....                                                                              | Chen Qinghua Chen Yucheng Yang Zhimin Tian Wei(3958)                                               |
| Cultivation of nitrifying activated sludge at low temperature .....                                                                                                        | Fang Mingliang Yang Yunlong Lou Hongsen(3963)                                                      |
| Phosphorus removal in wastewater with modified secondary strontium residual .....                                                                                          | Zhou Le Xu Longjun Li Li Xie Taiping(3967)                                                         |
| Treatment of aged-landfill leachate by aged-refuse-based bioreactor and three dimensional electrode electro-Fenton process .....                                           | Sun Lingfang Yu Zebin Chen Ying Ru Xuan Li Mingjie Zhou Tao(3972)                                  |
| Synergistic scale inhibition of both ESA/AMPS copolymer and magnetic field .....                                                                                           | Liu Zhan Liu Zhenfa Zhang Lihui Wang Xin(3979)                                                     |
| New technology for on-line regeneration of acidic ethant and recovery of copper by membrane electrolysis .....                                                             | Xu Haiqing Zhong Hongsheng Zhao Guopeng Yuan Guowei Hu Yaohong Chen Lige Luo Huimei(3985)          |
| Influence of temperature change on anaerobic ammonia oxidation reaction .....                                                                                              | Yao Junqin Liu Zhihui Zhou Shaoqi(3993)                                                            |
| Effects of environmental factors on algal growth in Fenhe water park .....                                                                                                 | Song Zhengguang Gao Lei Fan Jing Zhang Hongtao Wu Chunxu Wang Yushuang(3997)                       |
| Adsorption of EDTA in electroplating wastewater by activated carbon .....                                                                                                  | Guo Wenbo Li Zifu Cheng Shikun Zhang Yang Zhou Xiaojin(4004)                                       |
| Performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands for treatment of municipal reclaimed wastewater in Taiyuan .....                                            | Wang Yushuang Zhang Hongtao Zhu Mulan Chen Rongzhu Li Xiaowei Gao Lei(4009)                        |
| Design and operation of an A/O-MBR process for campus sewage treatment and reclamation .....                                                                               | Li Feifei Zhang Yan Chen Lijun Li Ying Li Wei Li Jianguo Zhao Mancheng Lü Qiyuan(4015)             |
| Simulation and optimization of recycled water replenishment program on Fen River Park in Taiyuan .....                                                                     | Xue Xiangshan Zhang Hongtao Yuan Guoqing Xu Ya Du Juan Wu Chunxu(4021)                             |
| Treatment of emulsion wastewater with heating and acidification-Fenton oxidation .....                                                                                     | Pu Weixiao Liu Dandan Wang Zhiqiang Chen Wenqing(4027)                                             |
| Influence of additives on wetting and settlement performance of carbon black particles .....                                                                               | Song Jingke Li Caiting Lu Pei Zhao Yapei Zhan Qi(4032)                                             |
| Ethylene adsorption onto modified MCM-41 by transition metals through ion exchange method .....                                                                            | Ma Xiaodong Ouyang Feng Shen Dongmei Cao Xiaokai(4038)                                             |
| Influence of steel slag powder with different contents on properties of foam concrete .....                                                                                | Liao Hongqiang He Donglin Guo Zhancheng Sainbaatar Deng Demin Yu Guangwei He Ting Li Peng(4044)    |
| Immersion frying of municipal sewage sludge .....                                                                                                                          | Zhang Jing Wu Zhonghua Li Zhanyong Wang Ruifang Yue Lian(4049)                                     |
| Preparation of non-sintered ceramics from coal fly ash and its performance on heavy metals removal .....                                                                   | Zou Zhengyu Liu Yangsheng(4054)                                                                    |
| Rule of nitrogen transformation in hydrothermal process for treatment of restaurant wastes .....                                                                           | Zhao Guopeng Li Mingxiao Xi Beidou Zhu Chaowei Wei Zimin Li Dan Liu Dongming(4061)                 |
| Catalytic pyrolysis of coking-coal tailings for production of hydrogen-rich fuel gas .....                                                                                 | Liu Shucheng Fu Xingmin Zhu Fenghao Jia Jinwei Li Ning Gao Chenglong Xu Jingqiu Shu Xingqian(4067) |
| Adsorption properties of municipal solid waste incineration fly ash for dye (methylene blue) .....                                                                         | Li Fuzhen Zhou Shaoqi Li Qiang Lin Yiming(4072)                                                    |
| Acetic acid production from organic material in waste LCD panel by hydrothermal reutilization process .....                                                                | Bai Lan Lu Shangming He Wenzhi Li Guangming Huang Juwen Zhang Qi(4079)                             |
| Effect of alkaline fusion pretreatment on dissolution mechanism of fly ash and its adsorption kinetics .....                                                               | Wang Hongyu Guan Weixiong Zhao Ying Xi Beidou(4085)                                                |
| Effects of different composting models on co-composting chicken manure and maize straw .....                                                                               | Huang Chuan Huang Shan Li Jiaxiang(4090)                                                           |
| Decomposition dynamic and Cd adsorption characteristic of crop straw and biochar in different Cd-contaminated farmland soils .....                                         | Zhang Jing Su Dechun(4097)                                                                         |
| Degradation of organochlorine pesticides in soil washing effluent by micro Cu/Fe bimetallic particles .....                                                                | Li Qun Zhang Shengtian Wan Jinzhong Zhao Xin Lin Yusuo Chen Xin(4103)                              |
| Effects of two cadmium-resistant strains of <i>Proteus mirabilis</i> on enhanced remediation efficiency of <i>Solanum Nigrum</i> L. in serious cadmium polluted soil ..... | Liu Lihua Liu Shujie Chen Fuming Yang Xiaolong Yang Chungping Zhao Jingjing Wu Bingqi(4109)        |
| Isolation, purification of high-efficient hydrocarbon degrading bacteria SKD-1 and its degradation characteristics .....                                                   | Lu Hongsheng Wei Wenchao Wang Houwei Song Jingjing Ma Jing(4116)                                   |
| Effects of rhamnolipid on petroleum degradation of compound microbial inoculant .....                                                                                      | Wang Dongmei Chen Lihua Zhou Lihui Hai Liqiang Li Changbao(4121)                                   |
| Isolation and identification of a heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria with high efficiency and its denitrification characteristics .....          | Zhou Yingqin Xin Xin Yao Li Pei Ruilin Fang Peng Yang Yijin(4127)                                  |
| Influence of co-metabolism substrates on isquinoline biodegradation by bacillus Y-4 .....                                                                                  | Wang Guanghua Liu Xueqin Li Wenbing Li Jin Zhu Zheng Liu Chen Zhu Yanan(4133)                      |
| Effect of carbon felt surface modification on performance in microbial fuel cell .....                                                                                     | Peng Xinhong Yu Hongbing Wang Xin Li Yong(4139)                                                    |
| Application of luminous bacteria method in online test for comprehensive toxicity of water quality .....                                                                   | Chen Jihong Wang Fusheng Shu Yiqiang Du Congwei(4144)                                              |

# 光催化氧化深度处理电镀有机废水的工程化实验

李 鹏 何华良 刘国光\* 林亲铁 姚 琨 吕文英

(广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

**摘 要** 采用光催化氧化联用技术对电镀有机废水进行深度处理工程化实验。探讨了 UV、UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + TiO<sub>2</sub>、UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + FeSO<sub>4</sub>、UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + FeSO<sub>4</sub> + TiO<sub>2</sub>、UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> 和 UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 等体系对废水有机污染物去除率的影响。结果表明,相较于其他反应体系,UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体系具有更好的氧化效果,经碳滤处理后去除率达到90%以上,最终出水水质满足 GB18918-2002 一级标准(A标准)的要求。实际运行项目偿还款 5.33 年, NPV > 0, 内部收益率大于基准值 10%。研究表明,UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体系能降低加药量,工作量及运行成本。可为电镀企业实际废水处理提供现实依据,为优化电镀废水的处理工艺提供参考。

**关键词** UV TiO<sub>2</sub> Fenton 臭氧 电镀有机废水

**中图分类号** X703.1 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2013)10-3885-05

## Engineering experiment of electroplating organic effluent advanced treatment by photocatalytic oxidation

Li Peng He Hualiang Liu Guoguang Lin Qintie Yao Kun Lü Wenying

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract** Photocatalytic oxidation coupling techniques were used in engineering experimental study of electroplating organic effluent advanced treatment. The various effects of COD removal by different systems: UV, UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + TiO<sub>2</sub>, UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + FeSO<sub>4</sub>, UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + FeSO<sub>4</sub> + TiO<sub>2</sub>, UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> and UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> were discussed. It shows that the UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system has the best oxidation effect compared with other systems. With the eventual effluent filtered by activated carbon, the COD removal rate can reach as high as 90%, which meets the GB18918-2002 standard (A Level). Actual project repayment period was 4.31 years, NPV > 0, internal rate of return is greater than 10% benchmark. Experimental investigation shows that, the adoption of UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system can reduce the raw materials dosage, workload and running cost, which will provide realistic basis and reference to electroplating wastewater treatment process optimization.

**Key words** UV; TiO<sub>2</sub>; Fenton; ozone; electroplating organic effluent

近年来,电镀工业已成为我国的重要加工行业。在创造巨大经济效益的同时,电镀行业对环境所造成的污染也日益加重,每年排出电镀废水超过 40 亿 m<sup>3</sup><sup>[1]</sup>。电镀废水污染问题日益引起电镀业与环保界的高度重视。电镀添加剂作为电镀废水中主要的有机污染物<sup>[2]</sup>,对废水中的 COD 贡献占很大比重,这类添加剂如果得不到去除,势必引起出水 COD 超标,给水环境带来巨大的危害。

电镀废水中有机污染物常用的处理方法有化学氧化法<sup>[3]</sup>、吸附法<sup>[4]</sup>和生化-混凝法<sup>[5]</sup>等。相较于生物氧化法,化学氧化法具有氧化能力强、处理速度

快的优点,通常利用 Fenton 试剂氧化法。Fenton 试剂氧化法对水质、水量要求宽泛,适应性强,二次污染小,出水稳定的优点<sup>[6]</sup>,但 Fenton 试剂利用率偏低,相对于传统氧化法而言,处理费用偏高<sup>[7]</sup>。

本研究中废水源自广州某电镀添加剂生产企业

**基金项目:** 国家科技重大专项(2009ZX07211-005-03); 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(LYM09070)

**收稿日期:** 2012-07-15; **修订日期:** 2012-10-06

**作者简介:** 李鹏(1987~),男,硕士研究生,主要从事工业废水高级氧化研究。E-mail: lipeng5945@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: guoguangliu@263.net

的反应釜清洗废水,该公司采用多级 Fenton 高级氧化法处理电镀添加剂废水,双氧水与亚铁盐用量较大,成本高达 433 元/t。本研究拟通过 UV、TiO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、Fenton、O<sub>3</sub> 等与光催化氧化技术联用,通过自制的中试设备对废水二级出水进行深度处理,研究其最佳反应条件,目的在于通过该技术的工程化运行,进一步提高出水处理质量,寻求低费用处理模式,探索一种电镀添加剂废水深度处理的工程应用方法。

1 材料与方法

1.1 废水来源

该厂废水主要来源于电镀添加剂生产反应釜冲洗水,年废水量 4 800 m<sup>3</sup>,废水中含有 CN<sup>-</sup>、Cr<sup>6+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Ni<sup>+</sup>等离子,原水 COD 在 7 500 mg/L 以上。该公司污水处理过程中利用次氯酸根的氧化性与氰离子发生氧化还原反应,分二级破氰,去除 CN<sup>-</sup> 离子;采用 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 氧化还原法处理含铬废水,先将六价铬在酸性条件下还原成三价铬,再调节 pH 值至碱性条件,去除并回收三价铬。用 KMnO<sub>4</sub> 预氧化法处理含镍废水和化学铜废水以及有机废水<sup>[8]</sup>,以提高处理效率。去除上述离子后所得的综合废水采用 Fenton 法去除有机物,随后加 NaOH 和 FeCl<sub>3</sub> 等使重金属形成絮体沉淀后去除。有机废水经 Fenton 反应后 COD 浓度仍高达 500 ~ 600 mg/L。

1.2 废水性状

废水呈淡黄色,较混浊,pH 值为 2.97,有轻微刺鼻气味。

1.3 实验药品与仪器

实验药品:双氧水(27.5%,工业用)、绿矾(七水硫酸亚铁)、氢氧化钠、浓硫酸均为分析纯。

实验仪器包括以下几种:

(1)光催化氧化装置(1 m × 1.5 m × 1.4 m,自研,见图 1),有效容积 2 m<sup>3</sup>。主要材质为 PP 与不锈钢,间歇式运行。该装置采用 5 槽上下隔流挡板分开,有效地延长了水力停留时间,装置后部配有连通管,能有效地增大各槽之间的流通速度,提高过滤效率。底部均匀分布曝气管,在压缩空气导流曝气条件下,能够很好地进行臭氧曝气。配 25 支 80 W 紫外灯管,由佛山雪莱特光电定制生产。灯管两侧悬挂 TiO<sub>2</sub> 纳米管网,在光照条件下催化氧化有机物。

(2)阳极氧化法制备的 TiO<sub>2</sub> 纳米管(河南师范大学,黄淮水环境与污染防治省部共建教育部重点实验室制),箱体内共放置 10 块,可提供 15 m<sup>2</sup> 的

TiO<sub>2</sub> 受光面积,有效提高光催化反应效率。纳米管阵列的形貌用场发射扫描电镜(FESEM, Hitachi, S-4800)观察,如图 2 所示。

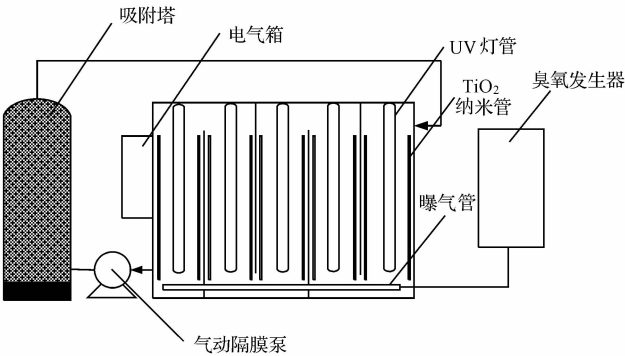


图 1 光催化氧化装置示意图

Fig. 1 Diagram of photocatalytic oxidation device

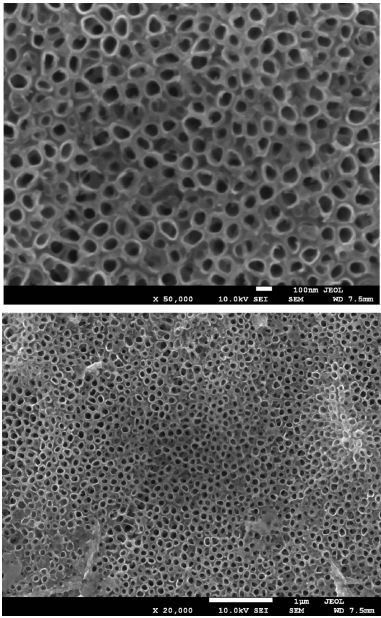


图 2 阳极氧化法制备的 TiO<sub>2</sub> 纳米管的 FESEM 图片

Fig. 2 FESEM pictures of TiO<sub>2</sub> nanotube arrays prepared by anodization

(3)KHCO<sub>2</sub>-100 型 COD 消解自动回流仪(南京科环);

(4)A302043 酸度计(美国 Orion);

(5)QBY3-50 气动隔膜泵(上海边锋);

(6)LA-YQ 立式空气源臭氧发生器(20 g/h,广州蓝奥);

(7)活性炭滤罐,玻璃钢材质,标准操作压力为 10.5 kgf/cm<sup>2</sup>(1.030 MPa)。

1.4 实验方法

反应容器容积为 1.8 m<sup>3</sup>,注满二级出水,通入

压缩空气,打开气动隔膜泵,使废水混合均匀后取初始水样。加 NaOH 调节 pH 值至 4,打开 UV 灯组,待光源稳定后加药(加药方式见表 1),并以此为零点计时。每隔一段时间取样,用 NaOH 调 pH 至 10 左右,静置沉降一段时间后,取上清液测 COD,COD 采用 GB11914-89《COD 测定重铬酸盐法》测定。 $\text{H}_2\text{O}_2$  的理论投加量计算公式: $Q=2\times\rho(\text{COD})\times 34/32(\text{mg/L})$ ,30% 的过氧化氢的密度为 1.11 g/mL,经计算,COD 为 1 000 mg/L 的废水, $\text{H}_2\text{O}_2$  加入量为 6.38 mL/L,溶液中不同 COD 含量的  $\text{H}_2\text{O}_2$  理论加入量以此推算, $\text{FeSO}_4$  按摩尔比  $\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2=1:10$  投加, $\text{O}_3$  投加量为 20 g/h。

表 1 分组实验设置  
Table 1 Group Experimental Settings

| 组 别 | 反应条件                                                           | 反应时间(h) |
|-----|----------------------------------------------------------------|---------|
| 1   | UV                                                             | 6       |
| 2   | UV + $\text{H}_2\text{O}_2$                                    | 6       |
| 3   | UV + $\text{H}_2\text{O}_2$ + $\text{TiO}_2$                   | 6       |
| 4   | UV + $\text{H}_2\text{O}_2$ + $\text{FeSO}_4$                  | 6       |
| 5   | UV + $\text{H}_2\text{O}_2$ + $\text{FeSO}_4$ + $\text{TiO}_2$ | 6       |
| 6   | UV + $\text{O}_3$ + $\text{TiO}_2$                             | 6       |
| 7   | UV + $\text{O}_3$ + $\text{TiO}_2$ + $\text{H}_2\text{O}_2$    | 6       |

2 实验结果和讨论

2.1 不同方法处理 COD 的变化

反应开始后,每隔 1 h 取样一次,检测水样 COD,比较 UV、UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{TiO}_2$ 、UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{FeSO}_4$ 、UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{FeSO}_4$  +  $\text{TiO}_2$ 、UV +  $\text{O}_3$  +  $\text{TiO}_2$  和 UV +  $\text{O}_3$  +  $\text{TiO}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}_2$  体系对废水 COD 的影响。结果如图 3 所示。

2.1.1 单独 UV 对 COD 去除率的影响

在单独光照下废水反应 6 h,COD 从 490.2 mg/L 下降到了 425.96 mg/L,COD 去除率仅为 13.1%,这是因为在紫外光的照射下废水中产生少量的·OH 自由基,该自由基具有很强的氧化性,能矿化废水中部分易降解有机物,使得废水中 COD 浓度降低<sup>[9]</sup>。

2.1.2 UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  对 COD 去除率的影响

在 UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  下废水反应 6 h,COD 从 469.1 mg/L 下降到了 384.3 mg/L,去除率为 18.1%。加入双氧水以后,去除率有了一定的提高但是仍然较低,这可能是反应时温度较低且为酸性环境,双氧水相对稳定不易分解转化造成的<sup>[10]</sup>。

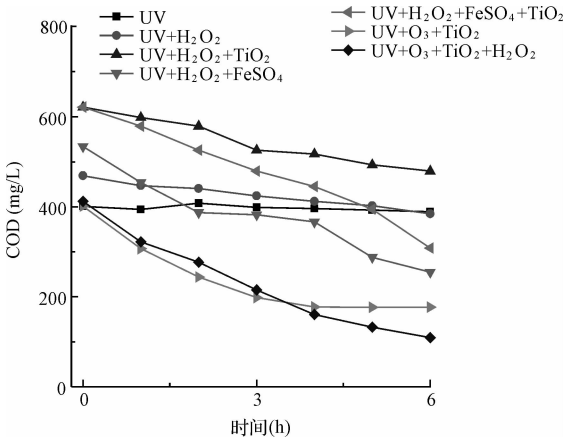


图 3 不同处理方法下 COD 浓度的变化  
Fig. 3 Change of COD under different treatment methods

2.1.3 UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{TiO}_2$  对 COD 去除率的影响

在 UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{TiO}_2$  下废水反应 6 h,COD 从 621.6 mg/L 下降到了 479.6 mg/L,去除率为 22.8%。加入  $\text{TiO}_2$  后去除率又得到了小幅提升,这可能是因为  $\text{TiO}_2$  在 UV 照射下能激发出电子,进一步促进  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成·OH,进而增大了反应效率<sup>[11]</sup>。

2.1.4 UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{FeSO}_4$  对 COD 去除率的影响

在 UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{FeSO}_4$  下废水反应 6 h,COD 从 534 mg/L 下降到了 254.8 mg/L,去除率为 52.3%。去除率有大幅度增加,但效果并不理想。分析认为,Fenton 反应过程中产生的色度,在反应中会引起光传播介质的变化,从而阻碍紫外光的传播,光降解的作用微乎其微,可以认为仍是传统的 Fenton 反应。

2.1.5 UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{FeSO}_4$  +  $\text{TiO}_2$  对 COD 去除率的影响

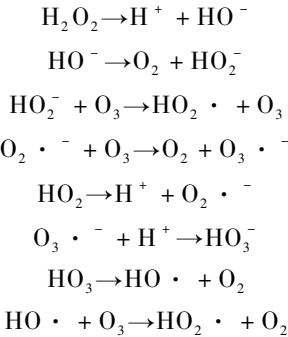
在 UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{FeSO}_4$  +  $\text{TiO}_2$  下废水反应 6 h,COD 从 621.6 mg/L 下降到了 308.18 mg/L,去除率为 50.4%。这可能是由于反应是以 Fenton 反应为主,Fenton 反应过程中产生的  $\text{Fe}^{3+}$  离子在反应中会大量阻挡紫外光,致使  $\text{TiO}_2$  同样情况下可以吸收到的有效光线减少<sup>[12]</sup>,而 Fenton 反应则弥补了光化学反应的缺失,因此去除率与 UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{FeSO}_4$  体系接近。

2.1.6 UV +  $\text{O}_3$  +  $\text{TiO}_2$  对 COD 去除率的影响

在 UV +  $\text{O}_3$  +  $\text{TiO}_2$  下废水反应 6 h,COD 从 401.4 mg/L 下降到了 176.4 mg/L,去除率为 56.0%。可见,不加入铁离子能够消除色度对紫外光的影响, $\text{TiO}_2$  能够激发电子,促进  $\text{O}_3$  氧化有机物,去除效果的提高是由于 UV +  $\text{O}_3$  +  $\text{TiO}_2$  工艺不是利用  $\text{O}_3$  与有机物直接反应,而是以自由基型的反应为主,即液相  $\text{O}$ ,在紫外光辐射作用下发生分解产生·OH,由·OH 与水中的溶解性有机物进行反

应<sup>[13]</sup>。但是我们发现,COD 达到 176.4 mg/L 左右不在继续下降。这说明·OH 产量仍不高,O<sub>3</sub> 不足以继续氧化废水中的小分子有机酸。

2.1.7 UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对 COD 去除率的影响  
在 UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 下废水反应 6 h,COD 从 412.0 mg/L 下降到了 109.2 mg/L,去除率为 73.5%。相较于 UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> 体系,我们发现加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 后,COD 能够继续下降,相同时间内降到了 109.2 mg/L,并仍有持续下降的趋势,说明该体系中各因素之间存在协同作用。Hoigné 等<sup>[14]</sup>认为,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的加入有助于 O<sub>3</sub> 的分解,从而增加·OH 的数量,基本过程可用下式来描述:



2.2 实验结果分析

UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 组合去除废水中 COD 效果最好,达到了 73.5%。用 UV、UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + TiO<sub>2</sub> 时降解率都比较低,分别为 13.1%、18.1% 和 22.8%,UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + FeSO<sub>4</sub> 的氧化效果要优于以上 3 种体系,达到了 52.3%,这是由于该体系中主要以传统 Fenton 反应为主,反应放热,能够促进 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 分解,从而进一步促进·OH 的生成;UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + FeSO<sub>4</sub> + TiO<sub>2</sub> 体系的氧化效果与 UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + FeSO<sub>4</sub> 接近,这可能是因为 Fenton 反应存在时铁盐产生的色度影响了透光率,并且铁盐易吸附在 TiO<sub>2</sub> 表面,降低了 TiO<sub>2</sub> 受光面积,减小了 UV 激发电子空穴的几率。UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> 体系的去除率为 56%,优于 Fenton 反应效果,说明 O<sub>3</sub> 氧化效果更强;UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 相较于其他体系具有最好的氧化效果,去除率达到了 73.5%。

反应后经碳滤,最终出水 COD 小于 50 mg/L,满足 GB18918-2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中一级标准(A 标准)的要求。

3 经济可行性分析

3.1 投资分析

光催化氧化装置(包括 TiO<sub>2</sub> 纳米管,自研)4

万元,蓝奥 LA-YQ 立式空气源臭氧发生器(20 g/h),5 000 元,共计 4.5 万元。

3.2 运行费用分析

旧工艺:600 mg/L 废水每吨需用 27.5% 双氧水 4.8 kg,800 元/t,0.0048 × 800 = 3.84 元;600 mg/L 废水每吨需用硫酸亚铁 0.02 t,650 元/t,650 × 0.02 = 13 元。每吨水深度处理成本为 3.84 + 13 = 16.84 元。

改造后:臭氧发生器功率 500 W,每吨水处理 6 h,500 × 6 = 3 kWh,3 × 2 = 6 元;增加臭氧发生器冷却用水费用:1 × 2 = 2 元。椰壳活性炭 130 元/袋,2 袋/罐。每日过滤后反冲洗,抽干水分再经气吹,敞口干燥,可连续使用 72 d 以上。260/(72 × 1.8) ≈ 2 元。

改造后每吨水共节省处理费用:16.84 - 10 = 6.84 元,年节省处理费用 4.5 万元。

3.3 投资效益分析

每日废水量 18 m<sup>3</sup> 左右,设备总投资 19.5 万元。可行性分析<sup>[15]</sup>见表 2。

表 2 光催化氧化项目运行效果经济分析  
Table 2 Feasibility analysis of photocatalytic oxidation project

| 项 目                                         | 公 式                                                                                | 结 果       |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 项目投资 <i>I</i>                               | —                                                                                  | 19.5 万元   |
| 年运行费用总节省 <i>P</i>                           | —                                                                                  | 4.5 万元    |
| 设备年折旧费 <i>D</i>                             | $D = I/10$                                                                         | 1.95 万元   |
| 年增加现金流量 <i>F</i>                            | $F = P - 0.33 \times (P - D)$                                                      | 3.6585 万元 |
| 投资偿还期 <i>N</i>                              | $N = I/F$                                                                          | 5.33 年    |
| 净现值 NPV<br>( <i>i</i> = 10%, <i>n</i> = 10) | $\text{NPV} = \sum_{j=1}^n \frac{F}{(1+i)^j} - I$                                  | 1.43      |
| 内部收益率 IRR (%)                               | $\text{IRR} = i_1 + \frac{\text{NPV}_1(i_2 - i_1)}{\text{NPV}_1 +  \text{NPV}_2 }$ | 12        |

可见,对应方案的偿还期较短,只有 5.33 年,NPV > 0,内部收益率大于基准值 10%,该方案经济可行。

4 结 论

(1)传统 Fenton 反应处理电镀有机废水能力有限,对于低浓度有机废水效果一般,必须寻找替代方案进行废水深度处理。

(2)相较于其他反应体系,UV + O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体系具有更好的氧化效果,该体系用于实际应用,反应流程简单,没有污泥产生。装置后接碳滤处理,最终出水 COD 满足 GB18918-2002 一级标准(A 标准)的要求。

(3)采用该体系能减小加药量,工作量及运行成本,有利于创造更安全整洁的生产环境。改造后每吨水共节省处理费用: $16.84 - 10 = 6.84$  元,年节省处理费用 4.5 万元。对应方案的偿还期较短,只有 5.33 年, NPV > 0, 内部收益率大于基准值 10%。该方案经济可行,对电镀企业实际废水处理有一定的参考意义。

## 参 考 文 献

- [1] 黄瑞光. 五十年来我国电镀废水治理的回顾. 电镀与精饰, **2000**, 22(2):6-8  
Huang R. G. Looking back on the electroplating wastewater treatment in the past 50 years since the founding of new China. Plating and Finishing, **2000**, 22(2):6-8 (in Chinese)
- [2] 王晓波, 张述林, 陈世波. 电镀添加剂的研究概况. 宁波化工, **2007**, (1):27-30  
Wang X. B., Zhang S. L., Chen S. B. The general situation study of the electroplating additive. Ningbo Chemical Industry, **2007**, (1):27-30 (in Chinese)
- [3] 彭明智, 姜荆, 氧化-沉淀法处理高 COD 含镍污水. 电镀与涂饰, **2009**, 28(8):40-43  
Peng M. Z., Jiang J. Treatment of high COD nickel-containing wastewater by oxidizing-sedimentafing. Plating and Finishing, **2009**, 28(8):40-43 (in Chinese)
- [3] 陈华林, 周江敏, 黄崇宝, 等. 垃圾焚烧炉渣对电镀废水中 Cu 的吸附特性. 环境工程学报, **2008**, 2(1):101-104  
Chen H. L., Zhou J. M., Huang C. B., et al. Sorption properties of Cu in electroplating wastewater on municipal solid waste incinerator bottom ash. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2008**, 2(1):101-104 (in Chinese)
- [5] 青志鹏, 黄瑞敏, 王章霞. 微生物法处理电镀废水的进展. 电镀与精饰, **2007**, 29(3):21-24  
Qing Z. P., Huang R. M., Wang Z. X. Progress of electroplating wastewater treatment with microorganism method. Plating & Finishing, **2007**, 29(3):21-24 (in Chinese)
- [6] Kang Y. W., Hwang K. Y. Effects of reaction conditions on the oxidation efficiency in the Fenton process. Water Research, **2000**, 34(10):2786-2790
- [7] 汪晓军, 陈思莉, 顾晓扬, 等. 混凝-Fenton-BAF 深度处理垃圾渗滤液中试研究. 环境工程学报, **2007**, 1(10):42-45  
Wang X. J., Chen S. L., Gu X. Y., et al. Pilot study on intensive treatment of landfill leachate by flocculation-Fenton-biological aerated filter process. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2007**, 1(10):42-45 (in Chinese)
- [8] 彭明智, 姜荆. 高锰酸钾预氧化法处理含镍电镀污水. 电镀与涂饰, **2004**, 23(5):53-57  
Peng M. Z., Jiang J. Treatment of nickel-containing waste water by pre-oxidization with potassium permanganate; Plating & Finishing, **2004**, 23(5):53-57 (in Chinese)
- [9] 邓南圣, 吴峰. 环境光化学. 北京: 化学工业出版社, **2003**
- [10] 谢光炎, 肖锦. 不同金属离子存在下双氧水对难降解有机物的催化氧化. 化工环保, **1999**, 19(4):243-244  
Xie G. Y., Xiao J. Organic matter degradation of hydrogen peroxide catalytic oxidation with different metal ions presence. Environmental Protection of Chemical Industry, **1999**, 19(4):243-244 (in Chinese)
- [11] 肖俊霞, 韦朝海, 胡记杰, 等. 染料在 TiO<sub>2</sub>/UV 体系中的光催化氧化降解规律. 华南理工大学学报(自然科学版), **2008**, 36(3):77-82  
Xiao J. X., Wei C. H., Hu J. J., et al. Rules of photocatalytic oxidation degradation of dyes in TiO<sub>2</sub>/UV system. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), **2008**, 36(3):77-82 (in Chinese)
- [12] Liao C. H., Guroi M. D. Chemical oxidation by photolytic decomposition of hydrogen peroxide. Environmental Science & Technology, **1995**, 29(12):3007-3014
- [13] 刘金泉, 李天增, 王发珍, 等. O<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> 及 UV/O<sub>3</sub> 在焦化废水深度处理中的应用. 环境工程学报, **2009**, 3(3):501-505  
Liu J. Q., Li T. Z., Wang F. Z., et al. Application of O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> and UV/O<sub>3</sub> in advanced treatment of coking wastewater. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2009**, 3(3):501-505 (in Chinese)
- [14] Hoigné J., Bader H. The role of hydroxyl radical reactions in ozonation processes in aqueous solutions. Water Research, **1976**, 10(2):377-386
- [15] 何秋明. 浅谈投资决策分析的基本方法. 林业科技情报, **2004**, 39(4):41-43  
He Q. M. A brief talk on the basic method of investment and decision-making analyse. Forestry Science and Technology Information, **2004**, 39(4):41-43 (in Chinese)