



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 8 卷 第 5 期

Vol.8 No.5

中国科学院  
生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版

5  
2014

## 目 次

### 水 污 染 防 治

新型碳源驯化的 SRB 去除酸性矿山废水中 $\text{SO}_4^{2-}$ 最佳反应条件 .....	肖丽萍	汪兵兵	魏 芳	裴 格(1705)
粉煤灰砖块对磷酸盐的吸附特性 .....	刘 超	杨永哲	宛 娜(1711)	
木屑黄原酸盐对双离子体系中铜镍的吸附 .....	夏 璐	胡伊旭	张博涵	李国磊(1718)
孔径对微孔曝气充氧性能的影响 .....	庄 健	王洪臣	齐 鲁	刘国华
改进型生物质阴离子交换纤维制备及吸附性能 .....	陈 卓	许 丹	张 敏	夏世斌(1727)
复合改性海泡石同步处理废水中的氮磷 .....	代 娟	刘 洋	熊佰炼	张进忠(1732)
溴酸钾对二茂铁(Fe)非均相 Fenton 效能的影响 .....	王 倩	田森林	宁 平(1739)	
Fenton-超声联合处理金刚烷胺制药废水 .....	樊 杰	曾 萍	张盼月	宋永会
Vis/Co-TiO <sub>2</sub> /KHSO <sub>5</sub> 体系 Fenton-光催化协同降解苯酚 .....	陈晴空	谢志刚	吉芳英	郭 倩
不同 Ca/P 比下碳酸根对磷酸钙沉淀反应回收磷的影响 .....	赵亚丽	宋永会	钱 锋	程建光
“控源-截污-资源化”模式处理面源污染 .....	汤爱萍	王金保	李 爽(1761)	
藻类吸附剂对六价铬的吸附特性 .....	王 岩	代群威	陈国华	高 超
改性花生壳对 Cd(II) 和 Pb(II) 的吸附机理 .....	雷 娟	易筱筠	杨 琛	卢桂宁
骨炭对 Pb(II) 的吸附特性 .....	张金利	刘大伟	杨 庆(1784)	
吸附剂浓度对 Zn(II) 和 Cd(II) 在高岭土上吸附的影响 .....	郭亚利	严锦根	侯万国(1791)	
US/Zn <sup>0</sup> 体系降解水中的对硝基苯甲酸 .....	宋亚丽	张光明	常爱敏	王 丽
活性污泥法处理炼油碱渣废水 .....	阎 辉	张大涌	李志娟	宿新泰
微波活化过硫酸钾深度处理印染废水 .....	赵 琪	赵哲颖	谭德俊	陈泉源(1807)
氧化石墨烯/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 磁性纳米材料固定辣根过氧化物酶及其降解酚类物质 .....	常 青	黄 佳	江国栋	唐和清
5 种植物材料的水解释碳性能及反硝化效率 .....	钟胜强	杨 扬	陶 然	李 丽
氨基修饰介孔分子筛 SBA-15 对水中 Pb <sup>2+</sup> 吸附性能 .....	魏建文	韦真周	廖 雷	赵淞盛
三乙二醇二甲基丙烯酸酯为交联剂制备的高吸水树脂对重金属的吸附 .....	李国玉	司马义	努尔拉	(1831)
铁盐絮凝 + MBR 处理钨冶炼含神含氮废水 .....	钟常明	王汝胜	吴昆泽	余夏静(1840)
菖蒲和空心菜在处理微污染河水潜流人工湿地中的应用 .....	黄 磊	张绍博	鲁言言	杜 刚
生物沸石球强化吸附氨氮废水的动力学研究 .....	唐 海	沙俊鹏	赵 翔(1851)	
磁性膨润土的制备、表征及类 Fenton 催化降解橙黄 II .....	王光华	万 栋	李文兵	鲁云洲
含吡啶有机废水物化预处理工艺 .....	徐之寅	刘志英	陆雪梅	徐炎华(1863)
混凝-膜组合工艺处理水产养殖废水 .....	陈 强	黎中宝	陈明岭(1869)	
纳滤工艺去除水中微量内分泌干扰物 .....	沈智育	沈耀良	郭海娟(1877)	
水中柴油污染物的微生物降解及其动力学 .....	闫 雪	夏巧华	姜洪吉	丁金城
河流型水源地源水典型氯化消毒副产物及其前体物的强化去除工艺 .....	黄 辉	孙瑞林	程志鹏	费相琴
填料表面亲水改性对 MBBR 处理船舶生活污水的影响 .....	杨东方	齐 崑	苏荣欣	何志敏(1895)
活性焦对水中汞的吸附性能 .....	李志超	兰华春	武利园	刘会娟
聚甲酰胺酰胺树脂对水中 Cu <sup>2+</sup> 的吸附 .....	李青彬	冯云晓	程永华(1906)	
磁性膨胀石墨对甲基橙模拟废水的吸附脱色 .....	丁小惠	王 榕	刘 燕	张延宗
石英砂滤料表面润湿改性 .....	包彩霞	常 青	未碧贵(1915)	
EGSB 反应器处理焦化废水的颗粒污泥反应动力学研究 .....	汪艳霞	董春娟	耿昭宇	翟 伟(1921)
微生物絮凝剂的制备及其对城市污水厂污泥的脱水 .....	张 峰	尹 华	叶锦韶	彭 辉
牡蛎壳生物滤池处理含盐污水中的硝化特性 .....	彭义亮	熊小京	郑天凌	黄凌风(1933)
控氧生物膜系统对微污染水体的脱氮性能 .....	张 华	何闪英(1939)		
4A 沸石分子筛处理中低浓度氨氮废水 .....	桂 花	谭 伟	李 彬	白 梅
			杨 敏	王红斌(1944)

短程硝化处理炼油催化剂废水 .....	赵小晶 胡 奇 陈 扬 胡威夷 周 戈 袁 青 高大文(1951)
表面活性剂强化抽出处理含水层中 DNAPL 污染物的去除特征 .....	伍 斌 杨 宾 李慧颖 杜晓明 杜 平 房吉敦 郭观林 李发生(1956)
宝钢焦化废水处理脱氮研究与实践 .....	金学文 李恩超 吕树光 邱兆富 杨 帆(1965)
载钴活性焦对 As(V) 的吸附性能与去除效果 .....	周 宁 彭先佳(1970)
固定化白腐真菌处理含酚废水 .....	樊鹏跃 崔建国 贾 贺(1977)
铁基膨润土对水中磷酸根的吸附热力学及动力学研究 .....	商丹红 包 敏(1982)
微生物制剂强化 SBR 处理系统 .....	刘 珍 黄瑞敏 何杰财(1987)
颗粒物粒径和有机物分子量对超滤膜污染的影响 .....	王红雨 齐 鲁 陈 杰 陈 清 李圭白(1993)
固定化菌藻微球的制备、表征及其对富营养化湖水的修复 .....	郑 佩 陈芳艳 唐玉斌 盛建国 成小锋(1999)
进水碳负荷浓度对垂直潜流式人工湿地中植物根系微生物动态的影响 .....	程 璞 张 慧 陈 健(2006)

## 大气污染防治

PPS 滤布对柴油机排放 PM 的过滤效率 .....	闫 妍 孟忠伟 陈 鹏 李 路(2013)
燃煤工业锅炉 PM <sub>2.5</sub> 排放规律 .....	尹连庆 殷春肖 赵浩宁 徐 铮(2020)
优化的甘蔗皮渣吸附居室甲醛 .....	陈 莉 窦 婵(2025)
改进钒基 SCR 脱硝催化剂的抗碱金属中毒性能 .....	石晓燕 丁世鹏 贺 泓 刘汉强 路光杰(2031)
二次活化活性炭纤维吸附回收二氯甲烷 .....	李香燕 赵 轩 刘晓光 赵海猛(2035)
泡沫镍负载改性 TiO <sub>2</sub> 降解甲醛 .....	马云飞 陈宗家(2040)
锡冶炼含砷烟尘低温陶瓷固化技术 .....	罗中秋 周元康 张召述 周新涛 夏举佩(2045)

## 固体废物处置

长期保藏对厌氧氨氧化污泥脱氮性能的影响 .....	袁 怡 黄 勇 李 祥 郑宇慧 潘 杨 李 勇 李大鹏(2051)
pH 值对烧结砖中重金属释放的影响 .....	田梦莹 杨玉飞 黄启飞 张增强 何 洁 于泓锦(2057)
超声破解污泥上清液对 A <sup>2</sup> O 工艺脱氮除磷和微生物群落结构的影响 .....	刘亚利 袁一星 李 欣 詹技灵 杜茂安 吴晨光(2063)
废旧冰箱拆解聚氨酯泡沫塑料制备 PU/PP 复合材料 .....	兰永辉 方益民 杨文清 吴吉权(2068)
剩余污泥催化剂的制备及其脱色性能 .....	孟冠华 孙 曼 刘宝河 张 俊(2073)
添加牛粪对蚯蚓处理污泥的影响 .....	姜宇蛟 朱静平(2079)
回转窑式纯氧熔融焚烧垃圾技术研究 .....	何雪鸿 阎维平(2085)
垃圾堆体固有渗透与孔隙度协同演化特征实验研究 .....	易 富 许 越 刘 磊 田 宇(2091)
废旧混凝土用作水泥稳定基层的实验研究 .....	杨 俊 黎新春 陈峻松 谭 渊 胡圣列 钟 颂(2097)

## 土壤污染防治

复合纳米材料对土壤重金属离子吸持固化的模拟研究 .....	韩莎莎 柳 婧 赵 焯 呼丽娟 徐东昱 胡存智 郎文聚 李天杰(2104)
-------------------------------	---------------------------------------

## 环境生物技术

新型微生物菌剂对垃圾渗滤液的除臭效果 .....	徐 锐 唐 昊 文 娅 曹爱新 赵国柱 周传斌(2110)
一株耐铬不动杆菌对十二烷基硫酸钠的降解特性 .....	关向杰 杨海君 黄水娥 贺强礼 狄 准(2117)

## 环境监测与评价

毒性微生物传感器的研制及应用 .....	王晓辉 王会玲 白志辉(2124)
百菌清农药残留的 SPE-GC 检测 .....	王天丽 刘天成 李 彬 谭 伟 杨 敏 王红斌(2129)
循环流化床锅炉燃煤技术热电厂生命周期评价 .....	李 娇 张 芸 邵 帅 隋秀文 张晓旭(2133)

## 相关研究

砷离子印迹聚合物的制备及性能评价 .....	宋 卓 冯 流 张添俞(2141)
生物降解实验中的接种物标准化研究 .....	杨 婧 陈晓倩 殷浩文(2146)

## CONTENTS

- Optimum reaction conditions for removing sulfate in acid mine drainage by SRB domesticated with new organic carbon sources** ..... Xiao Liping Wang Bingbing Wei Fang Pei Ge(1705)
- Adsorptive characteristics of fly ash blocks to phosphate** ..... Liu Chao Yang Yongzhe Wan Na(1711)
- Adsorption of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  in dual ion system by sawdust xanthate** ..... Xia Lu Hu Yixi Zhang Bohan Li Guolei(1718)
- Effects of pore diameter on oxygenation performance in fine pore aeration** ..... Zhuang Jian Wang Hongchen Qi Lu Liu Guohua Li Xiaodong Long Haitao(1723)
- Preparation and adsorption properties of improved anion exchange fiber from biomass** ..... Chen Zhuo Xu Dan Zhang Min Xia Shibin(1727)
- Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus in wastewater by composite modified sepiolite** ..... Dai Juan Liu Yang Xiong Bailian Zhang Jinzhong(1732)
- Effect of potassium bromate on efficiency of heterogeneous Fenton catalyzed by ferrocene** ..... Wang Qian Tian Senlin Ning Ping(1739)
- Treatment of wastewater from amantadine production by Fenton-ultrasound process** ..... Fan Jie Zeng Ping Zhang Panyue Song Yonghui Li Dongyi(1744)
- Synergistic effect of Fenton-photocatalysis through degradation of phenol by Vis/Co-TiO<sub>2</sub>/KHSO<sub>5</sub> reaction system** ..... Chen Qingkong Xie Zhigang Ji Fangying Guo Qian Liu Tingyi Xu Xuan(1749)
- Effect of carbonate on calcium phosphate precipitation at different Ca/P ratios for phosphorus recovery** ..... Zhao Yali Song Yonghui Qian Feng Cheng Jianguang Liang Hui(1755)
- Integrated mode of source controlling-wastewater intercepting-recycling for rural non-point source pollution** ..... Tang Aiping Wan Jinbao Li Shuang(1761)
- Cr (VI) adsorption characteristic of alga adsorbent** ..... Wang Yan Dai Qunwei Chen Guohua Gao Chao Wang Xiannian(1769)
- Adsorption mechanism of modified peanut shell to Cd (II) and Pb (II)** ..... Lei Juan Yi Xiaoyun Yang Chen Lu Guining Dang Zhi(1775)
- Adsorption behaviors of bone char to heavy metal Pb (II)** ..... Zhang Jinli Liu Dawei Yang Qing(1784)
- Effect of sorbent concentration on Zn(II) and Cd(II) adsorption on kaolinite** ..... Guo Yali Yan Jingen Hou Wanguo(1791)
- Degradation of p-nitrobenzoic acid by US/Zn<sup>0</sup> system** ..... Song Yali Zhang Guangming Chang Aimin Wang Li Zong Dongliang(1797)
- Treatment of refining alkaline residue wastewater by an activated sludge method** ..... Yan Hui Zhang Dayong Li Zhijuan Su Xintai Niu Chunge(1802)
- Tertiary treatment of dyeing wastewater with microwave activated potassium persulfate** ..... Zhao Qi Zhao Zheyang Tan Dejun Chen Quanyuan(1807)
- Immobilization of horseradish peroxidase onto graphene oxide/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles and its use for degradation of phenols** ..... Chang Qing Huang Jia Jiang Guodong Tang Heqing De Lihei(1812)
- Carbon releasing characteristics and denitrification effects of five plant materials** ..... Zhong Shengqiang Yang Yang Tao Ran Li Li Zhang Min Zhao Jiancheng(1817)
- Aqueous Pb(II) removal by adsorption on amine-functionalized mesoporous silica SBA-15** ..... Wei Jianwen Wei Zhenzhou Liao Lei Zhao Songsheng Wang Dunqiu(1825)
- Heavy metal adsorption of superabsorbent polymer absorbents using three glycol dimethyl acrylate as crosslinking agent** ..... Li Guoyu Ismayil Nurulla(1831)
- Treatment of tungsten smelting wastewater containing arsenic and ammonia nitrogen by ferric salt flocculation + MBR** ..... Zhong Changming Wang Rusheng Wu Kunze Yu Xiajing(1840)
- Application of *Acorus calamus* and *Ipomoea aquatica* planted in subsurface horizontal flow constructed wetlands purifying slightly polluted river water** ..... Huang Lei Zhang Shaobo Lu Yanyan Du Gang Gao Xu(1845)
- Kinetic study of adsorption enhancement on ammonia nitrogen wastewater by biological zeolite ball** ..... Tang Hai Sha Junpeng Zhao Xiang(1851)
- Synthesis, characterization and Fenton-like degradation for Orange II of magnetic bentonite** ..... Wang Guanghua Wan Dong Li Wenbing Lu Yunzhou Chen Kun(1857)
- Pretreatment process of organic wastewater containing pyridines** ..... Xu Zhiyin Liu Zhiying Lu Xuemei Xu Yanhua(1863)
- Aquacultural wastewater treatment by coagulation-membrane filtration combination process** ..... Chen Qiang Li Zhongbao Chen Mingling(1869)
- Removal of trace endocrine disruptors from polluted water with nanofiltration process** ..... Shen Zhiyu Shen Yaoliang Guo Haijuan(1877)
- Biodegradation and kinetics of diesel pollutants in water** ..... Yan Xue Xia Qiaohua Jiang Hongji Ding Jincheng Lu Jie(1883)
- Enhanced processes for removal of typical chlorinated disinfection by-products and their precursors from river-type water source** ..... Huang Hui Sun Ruilin Cheng Zhipeng Fei Xiangqin Wei Changmei Xu Jiming(1888)
- Effect of carriers' hydrophilicity on treatment of wastewater from ship by moving bed biofilm reactor** ..... Yang Dongfang Qi Wei Su Rongxin He Zhimin(1895)
- Adsorptive behaviors of activated coke towards aquatic mercury** ..... Li Zhichao Lan Huachun Wu Liyuan Liu Huijuan Qu Jihui(1899)
- Adsorption of copper (II) from aqueous by polyazomethineamides** ..... Li Qingbin Feng Yunxiao Cheng Yonghua(1906)
- Decolorization of wastewater containing methyl orange by adsorption of magnetic exfoliated graphite** ..... Ding Xiaohui Wang Rong Liu Yan Zhang Yanzong Deng Shihuai Yang Gang Shen Fei(1911)
- Surface modification of quartz sand filter for wetting property** ..... Bao Caixia Chang Qing Wei Bigui(1915)
- Kinetics research of granules in EGSB reactor treating coking wastewater** ..... Wang Yanxia Dong Chunjuan Geng Zhaoyu Zhai Wei(1921)

- Microbial flocculant preparation and its application in dewatering of sewage treatment plant sludge** ..... Zhang Feng Yin Hua Ye Jinshao Peng Hui Yang Simin Liu Jing(1927)
- Nitrification of saline sewage using oyster shell packing biofilter** ..... Peng Yiliang Xiong Xiaojing Zheng Tianling Huang Lingfeng(1933)
- Nitrogen-removal ability of oxygen controlled biofilm system for micro-polluted water** ..... Zhang Hua He Shanying(1939)
- Removal ammonia-nitrogen from medium-low concentration wastewater by 4A zeolite molecular sieve** ..... Gui Hua Tan Wei Li Bin Bai Mei Yang Min Wang Hongbin(1944)
- Treatment of catalyst wastewater with shortcut nitrification-denitrification in a sequencing batch reactor** ..... Zhao Xiaojing Hu Qi Chen Yang Hu Weiyi Zhou Ge Yuan Qing Gao Dawen(1951)
- Removal characteristic of DNAPL contaminants in surfactant enhanced equifer remediation** ..... Wu Bin Yang Bin Li Huiying Du Xiaoming Du Ping Fang Jidun Guo Guanlin Li Fasheng(1956)
- Research and practice for total nitrogen removal in Baosteel coking wastewater treatment** ..... Jin Xuewen Li Enchao Lü Shuguang Qiu Zhaofu Yang Fan(1965)
- Sorption properties and removal effect of As(V) on activated coke-supported Co** ..... Zhou Ning Peng Xianjia(1970)
- Treatment of phenol-containing wastewater using immobilized white rot fungi** ..... Fan Pengyue Cui Jianguo Jia He(1977)
- Study on kinetics and thermodynamics for phosphate in aqueous solution adsorption onto iron-modified bentonite** ..... Shang Danhong Bao Min(1982)
- Bio-augmentation of SBR with microbial agent** ..... Liu Zhen Huang Ruimin He Jiecai(1987)
- Effects of particle sizes and organics molecular weights on ultrafiltration membrane fouling in drinking water treatment** ..... Wang Hongyu Qi Lu Chen Jie Chen Qing Li Guibai(1993)
- Preparation, characterization of immobilized bacteria-algae microspheres and bioremediation of eutrophic lake water** ..... Zheng Pei Chen Fangyan Tang Yubin Sheng Jianguo Cheng Xiaofeng(1999)
- Effects of influent carbon loading on rhizosphere microbial diversity in vertical subsurface-flow constructed wetland** ..... Cheng Pu Zhang Hui Chen Jian(2006)
- Filtration efficiency of PPS fabric for trapping diesel engine emitted PM** ..... Yan Yan Meng Zhongwei Chen Peng Li Lu(2013)
- Regular pattern of PM<sub>2.5</sub> emission from coal-fired industrial boilers** ..... Yin Lianqing Yin Chunxiao Zhao Haoning Xu Zheng(2020)
- Adsorption of formaldehyde in living room by optimized sugarcane skin** ..... Chen Li Dou Chan(2025)
- Improvement of alkali resistance of vanadium-titanic-based catalysts for selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by NH<sub>3</sub>** ..... Shi Xiaoyan Ding Shipeng He Hong Liu Hanqiang Lu Guangjie(2031)
- Secondary activation of activated carbon fiber and its adsorption capability to dichloromethane** ..... Li Xiangyan Zhao Xuan Liu Xiaoguang Zhao Haimeng(2035)
- Photocatalysis of formaldehyde with porous nickel mesh loaded with modified TiO<sub>2</sub>** ..... Ma Yunfei Chen Zhongjia(2040)
- Solidification/stabilization of arsenic-bearing fly ash from a tin refining process with chemically bonded ceramics cement** ..... Luo Zhongqiu Zhou Yuankang Zhang Zhaoshu Zhou Xintao Xia Jupei(2045)
- Influence of long-term preservation on nitrogen removal capabilities of ANAMMOX sludge** ..... Yuan Yi Huang Yong Li Xiang Zhen Yuhui Pan Yang Li Yong Li Dapeng(2051)
- Effects of pH on release of heavy metal in sintered brick** ..... Tian Mengying Yang Yufei Huang Qifei Zhang Zengqiang He Jie Yu Hongjin(2057)
- Effects of ultrasonic-disintegrated sludge supernatant on nutrient removal performances and microbial community structure in A<sup>2</sup>O process** ..... Liu Yali Yuan Yixing Li Xin Zhan Jiling Du Maoan Wu Chenguang(2063)
- PU/PP composite material fabricating from polyurethane foam of scrap refrigerator** ..... Lan Yonghui Fang Yimin Yang Wenqing Wu Jiquan(2068)
- Preparation and decoloring performance of catalyst from excess sludge** ..... Meng Guanhua Sun Man Liu Baohe Zhang Jun(2073)
- Influence of cow dung addition on sewage sludge treatment by earthworms** ..... Jiang Yujiao Zhu Jingping(2079)
- Pure oxygen melting incineration technology of municipal solid waste in rotary kiln** ..... He Xuehong Yan Weiping(2085)
- Experimental study on synergetic characteristics of intrinsic permeability and porosity of landfill piles** ..... Yi Fu Xu Yue Liu Lei Tian Yu(2091)
- Experimental study on waste concrete used as cement stabilized base** ..... Yang Jun Li Xinchun Chen Junsong Tan Yuan Hu Shenglie Zhong Song(2097)
- Simulation study on sorption and fixation of composite nanomaterial to heavy metal ions in soil** ..... Han Shasha Liu Jing Zhao Ye Hu Lijuan Xu Dongyu Hu Cunzhi Yun Wenju Li Tianjie(2104)
- Effect of odor removal from refuse leachate treating by a new microbial agent** ..... Xu Rui Tang Hao Wen Ya Cao Aixin Zhao Guozhu Zhou Chuanbin(2110)
- Degradation characteristics of sodium dodecyl sulfate by a chromium resistant *Acinetobacter* strain** ..... Guan Xiangjie Yang Haijun Huang Shuie He Qiangli Di Zhun(2117)
- Research and application of toxic microbial sensor** ..... Wang Xiaohui Wang Huiling Bai Zhihui(2124)
- Determination of chlorothalonil pesticide residues by SPE-GC** ..... Wang Tianli Liu Tiancheng Li Bin Tan Wei Yang Min Wang Hongbin(2129)
- Life cycle assessment of thermal power plant based on circulating fluidized bed combustion technology** ..... Li Jiao Zhang Yun Shao Shuai Sui Xiuwen Zhang Xiaoxu(2133)
- Synthesis and performance evaluation of As(III)-ion-imprinted polymer** ..... Song Zhuo Feng Liu Zhang Tianyu(2141)
- Study of inoculum standardization for biodegradation test** ..... Yang Jing Chen Xiaoqian Yin Haowen(2146)

# EGSB 反应器处理焦化废水的颗粒污泥 反应动力学研究

汪艳霞<sup>1</sup> 董春娟<sup>1\*</sup> 耿绍宇<sup>2</sup> 翟伟<sup>3</sup>

(1. 太原大学环境工程系, 太原 030032; 2. 太原市城乡管理委员会排水管理处, 太原 030009;  
3. 太原理工大学化学与化工学院, 太原 030024)

**摘要** 为了对处理实际焦化废水微氧 EGSB 反应器污染物去除机理进行研究, 建立了处理实际焦化废水微氧 EGSB 反应器内污染物降解动力学模型, 考察 EGSB 反应器启动和稳定运行阶段不同运行条件时 COD 去除效果, 并分析动力学参数的变化。研究确定了处理实际焦化废水(进水 COD 2 000 mg/L 左右)微氧 EGSB 反应器在启动和稳定运行阶段所适用的基质降解模型, 动力学常数  $v_{\max}$ 、 $K_1$ 、 $K_S$ 、 $v_{\max}/K_S$ 、 $K_S/K_1$  分别为  $7.34 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ 、197.76 mg/L、19.53 mg/L、 $3.7 \times 10^{-4} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{mg})$ 、0.10 和  $2.4 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、66.64 mg/L、44.07 mg/L、 $5.4 \times 10^{-4} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{mg})$ 、0.66; 微氧 EGSB 反应器内颗粒污泥能够逐渐适应并高效降解焦化废水中污染物质, 焦化废水中毒性污染物质对颗粒污泥的抑制程度是由  $K_S/K_1$  决定的,  $K_S/K_1$  越大, 抑制程度越弱, 处理实际焦化废水 EGSB 反应器启动和稳定运行阶段的  $K_S/K_1$  分别为 0.04 ~ 0.1 和 0.66 ~ 0.74; 液体上升流速  $V_{\text{up}}$  的提高能够明显提高最大比基质降解速率  $v_{\max}$ , 降低半饱和和常数  $K_S$  和抑制常数  $K_1$ , 最终强化微氧 EGSB 反应器的运行效果, 稳定运行阶段 COD 去除率高达 92.7%。

**关键词** 焦化废水 颗粒污泥 动力学 液体上升流速  $V_{\text{up}}$  抑制常数  $K_1$

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2014)05-1921-06

## Kinetics research of granules in EGSB reactor treating coking wastewater

Wang Yanxia<sup>1</sup> Dong Chunjuan<sup>1</sup> Geng Zhaoyu<sup>2</sup> Zhai Wei<sup>3</sup>

(1. Department of Environment Engineering, Tanyuan University, Tanyuan 030032, China;

2. Tanyuan City and Town Manage Committee, Drainage Manage Department, Taiyuan 030009, China;

3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Tanyuan University of Technology, Tanyuan 030024, China)

**Abstract** To research the removal mechanism of the pollutants in the micro-aerobic EGSB reactor treating coking wastewater, the dynamic models for the degradation of pollutants in the EGSB reactor treating coking wastewater were founded. Moreover, the COD removal of the micro-aerobic EGSB reactor for the start-up and stable operation stage was studied and synchronously dynamics constants were analyzed. The results confirmed the suitable pollutants-utilization dynamic model for the startup and the stable operation stage of the micro-aerobic EGSB reactor treating actual coking wastewater (with about 2 000 mg/L influent COD concentration). The dynamics constant values of  $v_{\max}$ 、 $K_1$ 、 $K_S$ 、 $v_{\max}/K_S$ 、 $K_S/K_1$  for the startup and the stable operation stage were  $7.34 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ 、197.76 mg/L、19.53 mg/L、 $3.7 \times 10^{-4} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{mg})$ 、0.10 and  $2.4 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、66.64 mg/L、44.07 mg/L、 $5.4 \times 10^{-4} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{mg})$ 、0.66, respectively. The granules in the micro-aerobic EGSB reactor could gradually adapt and then highly efficiently remove the pollutants in the actual coking wastewater. The inhibitory extent of the toxic or inhibitory compounds on the granules was decided by  $K_S/K_1$ , and the inhibitory extent tended to weaken as  $K_S/K_1$  was increased. The  $K_S/K_1$  values for the startup and stable operation stage of the micro-aerobic EGSB reactor were 0.04 ~ 0.1 and 0.66 ~ 0.74, respectively. Increasing the liquid up-flow velocity  $V_{\text{up}}$  could make the maximum specific substrate removal rate  $v_{\max}$  increasing, the half-saturation coefficient  $K_S$  and inhibitor constant  $K_1$  decreasing and thus strengthen the operation effect of the micro-aerobic EGSB reactor. The COD removal efficiency of the micro-aerobic EGSB reactor at the stable operation stage could attain 92.7%.

**Key words** coking wastewater; granules; kinetics; liquid up-flow velocity  $V_{\text{up}}$ ; inhibitor constant  $K_1$

对生物反应器进行动力学分析, 并估计动力学参数具有非常重要的意义, 一方面有助于理解生物降解过程微生物的能力; 另一方面也有助于理解生物反应器的运行过程。

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(2011011008-3); 山西省科技攻关项目(20120313008-2)

收稿日期: 2013-04-13; 修订日期: 2013-05-24

作者简介: 汪艳霞(1978~), 女, 讲师, 主要从事水污染控制与回用技术研究工作。E-mail: swallow9966@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: chunjuand@126.com

已有许多研究者对生物反应器内微生物增长的动力学进行研究<sup>[1-4]</sup>,焦化废水含有大量有毒的有机污染物,这些有毒污染物对于驯化后的微生物菌群来讲可以考虑为非抑制性物质,可以用 Monod 的非抑制性动力学方程来描述: $\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S}$ ,其中, $\mu$ 、 $\mu_{\max}$ 和 $K_s$ 是与反应器运行有关的动力学常数。相应的污染物降解动力学模型分别为:

$$\frac{S_0 - S_e}{t} = v_{\max} \frac{XS_e}{K_s + S_e}, \text{即}, \quad (1)$$

$$\frac{Xt}{S_0 - S_e} = \frac{1}{v_{\max}} + \frac{K_s}{v_{\max}} \frac{1}{S_e}$$

式中: $S_0$ 表示进水浓度, $S_e$ 表示出水浓度。

而当污泥没有驯化或是其浓度过高时,这些有毒污染物又应考虑为抑制性物质,目前,有几个动力学模型可以用来描述这种非竞争性抑制,但 Haldane 模型是最简单、应用最广泛的<sup>[5-8]</sup>,具体方程为:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{S + K_s + \frac{S^2}{K_i}}, \text{其中}, K_i \text{是抑制常数。相}$$

应的污染物降解动力学模型分别为:

$$\frac{S_0 - S_e}{t} = v_{\max} \frac{XS_e}{K_s + S_e + S_e^2/(K_i)} \quad (2)$$

在高基质浓度时, $S \geq K_s$ ,上式可转化为:

$$\frac{Xt}{S_0 - S_e} = \frac{1}{K_i v_{\max}} S_e + \frac{1}{v_{\max}} \quad (3)$$

每种反应器都有自身独特的生态系统,其中,哪种微生物占优势决定于反应器构型,每种反应器的结构特点和运行方式将会影响着反应器内微生物菌群的组成以及微生物菌群内各种微生物的生理特点。由于 $\mu_{\max}$ 、 $K_s$ 和 $K_i$ 值与微生物种类有关,所以 $\mu_{\max}$ 、 $K_s$ 和 $K_i$ 值也相应地由反应器构型来决定<sup>[9-11]</sup>。EGSB反应器的典型特点有二:(1)污泥浓度高,并且以颗粒污泥形态存在;(2)液体上升流速高,泥水传质效果好。相应地这些特点也明显地反映到了动力学模型上,影响着 $\mu_{\max}$ 、 $K_s$ 和 $K_i$ 值,对反应器的运行效果有明显的作<sup>[12,13]</sup>。而且,处理实际焦化废水 EGSB 反应器不同运行阶段,尤其是稳定运行阶段,大量毒性污染物驯化颗粒污泥微生物菌群后到底适用哪种动力学模型需要进一步探讨。

本研究对动力学参数进行求解,对处理焦化废水的微氧 EGSB 反应器的运行机理进行探讨,同时确定处理焦化废水微氧 EGSB 反应器在启动阶段和

稳定运行阶段所适用的动力学模型,以期进一步指导处理焦化废水等含有毒难降解污染物废水 EGSB 反应器的设计和运行。

## 1 实验部分

### 1.1 反应器

实验所用 EGSB 反应器高 2.3 m,有效容积 18 L。其中,反应区高 1.8 m,内径 10 cm,有效容积 12 L,具体的工艺流程如图 1 所示。进水和回流水分别采用蠕动泵加压,两者合流进入 EGSB 反应器。回流水收集到曝气柱内,通过给曝气柱内回流水曝气的方式来给颗粒污泥床供氧,并通过控制曝气柱内曝气量来控制 EGSB 反应器内溶解氧量。对进出水氧化还原电位(ORP)进行监测以调节曝气量,进而控制 EGSB 反应器内的氧化还原状态。

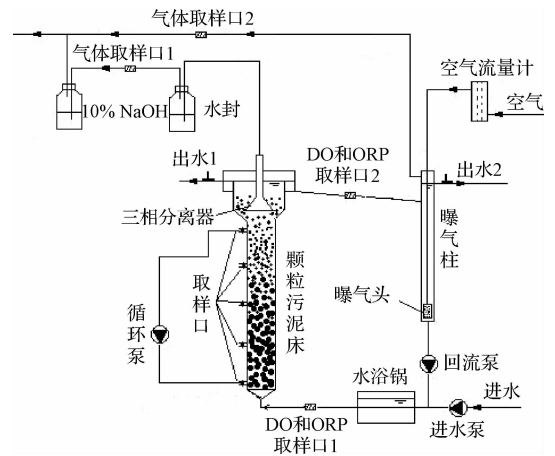


图 1 实验用 EGSB 反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental EGSB reactor

### 1.2 接种污泥

取自常温用啤酒废水启动成功 EGSB 反应器内的颗粒污泥,用焦化废水来驯化。污泥浓度为 21.1 g/L(以 MLSS 计),MLVSS/MLSS 为 0.64,污泥比产甲烷活性为 0.75 g/(g·d)(以每 g COD 转化的甲烷 COD 计)。

### 1.3 实验用水

取自太原煤化集团第二焦化厂调节池出水管,COD、NH<sub>3</sub>-N 浓度和色度分别为 2 000 mg/L 左右、70 ~ 210 mg/L 和 150 ~ 500 倍,pH 在 6.5 ~ 8.1 之间。

### 1.4 实验方法

先用啤酒废水启动成功接种市政消化污泥的



EGSB 反应器,然后用焦化废水(COD 浓度为 2 000 mg/L 左右)驯化启动 EGSB 反应器并稳定运行。在启动阶段和稳定运行阶段都相应考察了不同 HRT (15、12、10 和 8 h)时 COD 去除率的变化,同时分析液体上升流速  $V_{up}$  和污泥浓度  $X$  变化时 COD 去除率的变化情况。

依据实验数据求解不同运行阶段的动力学常数。

对动力学常数进行分析并确定处理焦化废水在启动和稳定运行阶段的污染物质降解动力学模型。

### 1.5 分析项目和方法

COD 的测定采用国家标准方法<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 COD 去除

整理微氧 EGSB 反应器启动(驯化)阶段和稳定运行阶段 COD 去除率的实验数据如表 1 所示。

### 2.2 启动运行阶段动力学常数的求解

对于启动运行阶段,EGSB 反应器内微生物没有得到焦化废水的驯化,所以适合采用 Haldane 模

型,根据表 1 实验数据,通过式(3) ( $\frac{Xt}{S_0 - S_e} = \frac{1}{K_1 v_{max}} S_e + \frac{1}{v_{max}}$ )求解处理焦化废水微氧 EGSB 反应器启动运行阶段不同条件时动力学参数,具体见图 2。

液体上升流速  $V_{up}$  和污泥浓度  $X$  均没有提高时的动力学常数:  $v_{max} = 2.65 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ,  $K_1 = 415.82$

mg/L,  $K_s = 39.57 \text{ mg/L}$ ,  $\frac{v_{max}}{K_s} = 6.7 \times 10^{-5} \text{ L}/(\text{h} \cdot$

mg),  $\frac{K_s}{K_1} = 0.10$ ;

单纯提高  $V_{up}$  后的动力学常数:  $v_{max} = 7.34 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ,  $K_1 = 197.76 \text{ mg/L}$ ,  $K_s = 19.53 \text{ mg/L}$ ,

$\frac{v_{max}}{K_s} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{mg})$ ,  $\frac{K_s}{K_1} = 0.10$ ;

同时提高  $V_{up}$  和  $X$  后的动力学常数:  $v_{max} = 9.35 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ,  $K_1 = 162.81 \text{ mg/L}$ ,  $K_s = 6.38 \text{ mg/L}$ ,

$\frac{v_{max}}{K_s} = 1.47 \times 10^{-3} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{mg})$ ,  $\frac{K_s}{K_1} = 0.04$ 。

表 1 不同阶段微氧 EGSB 反应器运行情况

Table 1 Operation of micro-aerobic EGSB reactor for varied stages

运行阶段	$V_{up}$ (m/h)	HRT (h)	COD 浓度 (mg/L)		去除率 (%)	$\frac{Xt}{S_0 - S_e}$	$\frac{1}{S_e}$	
			进水 ( $S_0$ )	出水 ( $S_e$ )				
启动运行阶段 适用式(6.31)	单纯 $V_{up}$ 提高	15	1 845.50	977.00	47.1	493.96	\	
		12	1 709.75	781.50	54.3	369.73		
		10	1 750.25	713.50	59.2	275.86		
		8	1 843.25	659.25	64.2	193.24		
		15	1 845.50	797.75	56.8	409.45		
		12	1 709.75	675.75	60.5	331.91		
		10	1 750.25	501.25	71.4	228.98		
		8	1 843.25	466.50	74.7	166.19		
	$V_{up}$ 、 $X$ (污泥性能进一步 优化)同时提高	15	1 845.50	773.14	58.1	400.05	\	
		12	1 709.75	666.23	61.0	328.89		
		10	1 750.25	471.94	73.0	223.73		
		8	1 843.25	438.16	76.2	162.84		
		15	1 973.23	566.32	71.3	304.92		0.0018
		12	1 789.37	424.08	76.3	251.38		0.0024
		10	2 012.36	408.51	79.7	178.32		0.0024
		8	1 876.53	350.91	81.3	149.97		0.0028
稳定运行阶段 适用式(6.30)	$V_{up}$ 提高	15	1 973.23	368.99	81.3	267.42	0.0027	
		12	1 789.37	295.25	83.5	229.70	0.0034	
		10	2 012.36	211.30	89.5	158.80	0.0047	
		8	1 876.53	136.99	92.7	131.53	0.0073	



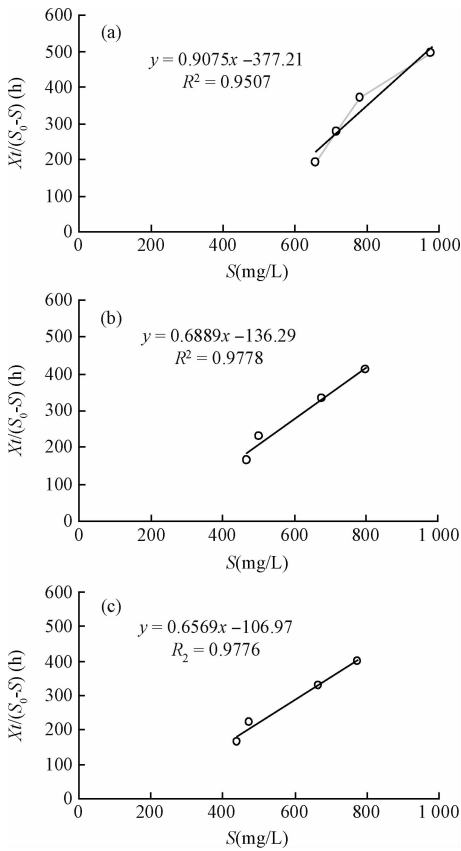


图2 微氧 EGSB 启动运行阶段动力学常数  
Fig. 2 Kinetic constants for the micro-aerobic EGSB reactor at startup stage

分析通过式(3)所求得的处理焦化废水微氧 EGSB 反应器启动运行阶段的动力学参数,可以看出,液体上升流速  $V_{up}$  的提高明显降低了抑制因子  $K_i$  和半饱和常数  $K_s$ , 提高了最大比降解速率  $v_{max}$ 。主要考虑  $V_{up}$  的提高能够强化泥水传质效果,优化微生物菌群结构,强化微生物对污染物质的亲和力,并降低焦化废水中毒性污染物质对微生物的毒性作用。从而使得微氧 EGSB 处理焦化废水时的 COD 去除率明显提高,如启动运行阶段,没有提高  $V_{up}$  时, COD 去除率为 64.2% (HRT = 8 h), 提高  $V_{up}$  后达到 74.7%。

但在 EGSB 反应器内,除了  $V_{up}$  这样一个很重要的反应器动力学参数影响着 COD 的去除外,还有一个很重要的因素就是颗粒污泥这种特殊的微生物生态系统或存在形态,颗粒污泥保证了反应器内相对较高的污泥浓度,但更为重要的是颗粒污泥具有特殊的菌群结构,菌群丰富,而且菌群排列紧密,各种微生物菌群以混生、簇生或分区生长,协同代谢,为

各种毒性污染物质的快速降解及中间代谢产物的及时传递提供可能。如启动阶段污泥浓度  $X$  提高后,  $v_{max}$  明显增加 ( $7.34 \times 10^{-3} \rightarrow 9.35 \times 10^{-3}$ ),  $K_s$  大幅降低 ( $19.53 \rightarrow 6.38$ ), 速率常数 ( $\frac{v_{max}}{K_s}$ ) 提高了一个数量级,为此,随着后续 EGSB 反应器的进一步稳定运行,颗粒污泥内的菌群结构的进一步优化, COD 去除率从启动阶段基本结束时的 76.2% 提高到了稳定运行阶段的 92.7%。

### 2.3 稳定运行阶段动力学常数的求解

稳定运行阶段,不能确定到底采用哪种动力学模型,所以,分别采用 2 种动力学模型求解动力学参数,对比分析最后确定适用的动力学模型。

(1) 采用 Monod 方程,根据表 1 实验数据,通过式(1) ( $\frac{Xt}{S_0 - S_e} = \frac{1}{v_{max}} + \frac{K_s}{v_{max}} \frac{1}{S_e}$ ) 求解处理焦化废水微氧 EGSB 反应器稳定运行时  $V_{up}$  提高前后动力学参数,具体见图 3。

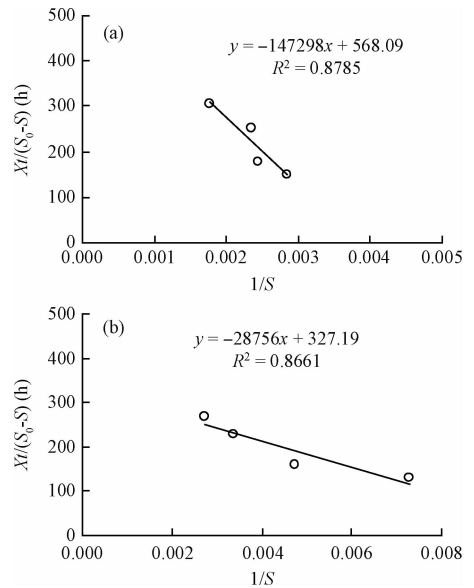


图3 微氧 EGSB 反应器稳定运行阶段动力学常数(式(3))

Fig. 3 Kinetic constants for the micro-aerobic EGSB reactor at steady operation stage

液体上升流速  $V_{up}$  提高前的动力学常数:  $v_{max} = 1.76 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ,  $K_s = 259.28 \text{ mg/L}$ ,  $\frac{v_{max}}{K_s} = 6.79 \times 10^{-6}$ ;

$V_{up}$  提高后的动力学常数:  $v_{max} = 3.05 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ,

$$K_s = 87.91 \text{ mg/L}, \frac{v_{\max}}{K_s} = 3.47 \times 10^{-5}。$$

(2) 采用 Haldane 模型。根据实验数据,通过式

(3)  $(\frac{Xt}{S_0 - S_e} = \frac{1}{K_1 v_{\max}} S_e + \frac{1}{v_{\max}})$  求解处理焦化废水微氧 EGSB 反应器稳定运行时  $V_{up}$  提高前后动力学参数,具体见图 4。

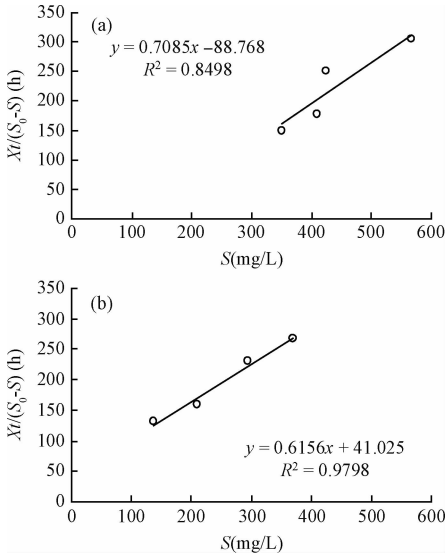


图 4 微氧 EGSB 反应器稳定运行阶段动力学常数

Fig. 4 Kinetic constants for the micro-aerobic EGSB reactor at steady operation stage

液体上升流速  $V_{up}$  没有提高时的动力学常数:

$$v_{\max} = 1.1 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}, K_1 = 125.29 \text{ mg/L}, K_s = 92.20 \text{ mg/L}, \frac{v_{\max}}{K_s} = 1.2 \times 10^{-4}, \frac{K_s}{K_1} = 0.74;$$

$V_{up}$  提高后的动力学常数:  $v_{\max} = 2.4 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ ,

$$K_1 = 66.64 \text{ mg/L}, K_s = 44.07 \text{ mg/L}, \frac{v_{\max}}{K_s} = 5.4 \times 10^{-4}, \frac{K_s}{K_1} = 0.66。$$

在处理焦化废水微氧 EGSB 反应器的稳定运行阶段,采用式(1)还是式(3)进行动力学分析还需进一步探讨,因为从驯化的角度分析,此阶段微生物可能已经适应了焦化废水中的污染物,但近 2 000 mg/L 的进水 COD 浓度,而且其中有多大比例是对微生物菌群有抑制作用? 微生物菌群的适应度是多少? 都需要综合分析,所以采用式(1)和式(3)分别计算微氧 EGSB 反应器稳定运行阶段的动力学参数进行对比分析。

与线性 (Monod) 模型相比,非线性 (Haldane) 模型更适用于处理焦化废水微氧 EGSB 反应器的稳定运行阶段。分析主要原因:虽然稳定运行阶段颗粒污泥内微生物已经得到驯化适应了焦化废水中各种毒性抑制物质,但由于实验中焦化废水的 COD 浓度相对偏高(2 000 mg/L 左右),毒性物质的抑制作用也相对占优势(在毒性物质存在的环境中生长的微生物的比增长速率  $\mu$  决定于基质两方面竞争性的作用,一方面基质浓度增加比增长速率有增加的趋势;另一方面基质浓度增加,抑制作用增强,又会使得微生物比增长速率有减小的趋势)<sup>[15]</sup>。但用 Monod 模型所计算出来的动力学参数  $v_{\max}$  和  $\frac{v_{\max}}{K_s}$  都偏低,甚至比启动阶段还低一个数量级。而用 Haldane 模型计算的动力学参数  $v_{\max}$  和  $\frac{v_{\max}}{K_s}$  比较合理,比启动阶段基本高一个数量级。另外,对比分析启动和稳定运行阶段  $K_1$  值,随着微生物菌群对焦化废水中污染物质的进一步适应,抑制常数  $K_1$  也明显降低。为此,Haldane 模型适用于处理焦化废水微氧 EGSB 反应器的稳定运行阶段。

同样的条件,为何稳定运行阶段的  $K_s$  明显比启动阶段高,是不是稳定阶段的污泥浓度过高还是颗粒污泥粒径偏大或其他原因还需进一步研究。通过小试实验分析不同阶段污泥产甲烷活性的变化发现焦化废水对微生物的毒性抑制作用并没有随着接触时间的延长而减弱,反而有增加的趋势(数据和图表未列出),所以可能会出现稳定期  $K_s$  大于启动期  $K_s$ 。但最终影响反应器运行效果的并不是单纯的  $K_s$  或单纯的  $v_{\max}$ ,而是  $\frac{v_{\max}}{K_s}$ ,此比值越大越好;同时对于焦化废水这样一种含有大量毒性物质的废水而言,还取决于  $\frac{K_s}{K_1}$ ,此值越大说明焦化废水中毒性物质的毒性相对越小。启动运行阶段焦化废水中有毒污染物质的对微生物具有明显的抑制作用,  $\frac{v_{\max}}{K_s} = (1.47 \times 10^{-3} - 3.7 \times 10^{-4})$ ,  $\frac{K_s}{K_1}$  为 0.04 ~ 0.1;但随着微氧 EGSB 反应器的逐渐稳定运行,微生物逐渐得到驯化,最重要的是颗粒污泥内的微生物生态结构也发生了重大改变,有毒污染物质的抑制作用明显减弱,稳定运行阶段虽然的  $\frac{v_{\max}}{K_s}$  没有明显提高

( $5.4 \times 10^{-4} - 1.2 \times 10^{-4}$ ), 但  $\frac{K_s}{K_1}$  迅速提高到了 0.66 ~ 0.74, 为此, COD 去除率大幅提高(从 76.2% 到 92.7%)。

相对较低 COD 浓度时, 比如 1 000 mg/L 以下甚至 500 mg/L 左右, 是采用 Monod 方程(式(1))或 Haldane 模型(式(2))进行动力学分析, 需要专门的实验数据分析及动力学参数求解和对比分析来确定。

### 3 结 论

(1) 处理实际焦化废水(进水 COD 2 000 mg/L 左右)微氧 EGSB 反应器在启动运行阶段以及稳定运行阶段的适用的污染物质降解动力学模型为:

$$\frac{S_0 - S_e}{t} = v_{\max} \frac{XS_e}{K_s + S_e + S_e^2/(K_1)} \circ$$

(2) 处理实际焦化废水 EGSB 反应器启动阶段的动力学常数  $v_{\max}$ 、 $K_1$ 、 $K_s$ 、 $\frac{v_{\max}}{K_s}$ 、 $\frac{K_s}{K_1}$  分别为  $7.34 \times 10^{-3}$ 、197.76、19.53、 $3.7 \times 10^{-4}$ 、0.10; 稳定运行阶段的动力学常数  $v_{\max}$ 、 $K_1$ 、 $K_s$ 、 $\frac{v_{\max}}{K_s}$ 、 $\frac{K_s}{K_1}$  分别为  $2.4 \times 10^{-2}$ 、66.64、44.07、 $5.4 \times 10^{-4}$ 、0.66。

(3) 微氧 EGSB 反应器内颗粒污泥能够逐渐适应并高效降解焦化废水中污染物质, 焦化废水中毒性污染物质对颗粒污泥的抑制程度是由  $\frac{K_s}{K_1}$  决定,

$\frac{K_s}{K_1}$  越大, 抑制程度越弱。EGSB 反应器启动阶段的  $\frac{K_s}{K_1}$  为 0.04 ~ 0.1, 稳定运行阶段的  $\frac{K_s}{K_1}$  为 0.66 ~ 0.74。

(4) 液体上升流速  $V_{up}$  的提高能够明显提高最大比基质降解速率  $v_{\max}$ , 降低半饱和和常数  $K_s$  和抑制常数  $K_1$ , 最终强化微氧 EGSB 反应器的运行效果, 稳定运行阶段 COD 去除率高达 92.7%。

### 参 考 文 献

[1] Z. Lewandowsky. Behaviour of Biological reactors in presence of toxic compounds. *Wat. Res.*, **1987**, 21(2): 1147-1153  
 [2] P. Kumaran, Y. L. Paruchurf. Kinetics of phenol biotransformation. *Wat. Res.*, **1997**, 31(1): 11-22

[3] A. Kumar, S. Kumar, S. Kumar. Biodegradation kinetics of phenol and catechol using *Pseudomonas putida* MTCC 1194. *Biochem. Eng. J.*, **2005**, 22(2): 151-159  
 [4] V. Arutchelvan, V. Kanakasabai, R. Elangovan, et al. Kinetics of high strength phenol degradation using *Bacillus brevis*. *Journal of Hazardous Materials*, **2006**, 129(1-3): 216-222  
 [5] B. P. Sahariah, S. Chakraborty. Kinetic analysis of phenol, thiocyanate and ammonia-nitrogen removals in an anaerobic-anoxic-aerobic moving bed bioreactor system. *Journal of Hazardous Materials*, **2011**, 190(1-3): 260-267  
 [6] Kuscu, Ozlem Selcuk, Sponza, et al. Kinetics of para-nitrophenol and chemical oxygen demand removal from synthetic wastewater in an anaerobic migrating blanket reactor. *Journal of Hazardous Materials*, **2009**, 161(2-3): 787-799  
 [7] Chen Tingting, Zheng Ping, Shen Lidong. Kinetic characteristics and microbial community of Anammox-EGSB reactor. *Journal of Hazardous Materials*, **2011**, 190(1-3): 28-35  
 [8] Banerjee Aditi, Ghoshal, Alope K. Phenol degradation by *Bacillus cereus*; Pathway and kinetic modeling. *Bioresource Technology*, **2010**, 101(14): 5501-5507  
 [9] S. Philips, W. Verstraete. Effect of repeated addition of nitrite to semi-continuous activated sludge reactors. *Bioresource Technology*, **2001**, 80(1): 73-82  
 [10] M. Lay-Son, C. Drakides. New approach to optimize operational conditions for the biological treatment of a high-strength thiocyanate and ammonium waste; pH as key factor. *Water Res.*, **2008**, 42(3): 774-780  
 [11] S. Wang, N. C. Rao, R. Qiu, et al. Performance and kinetic evaluation of anaerobic moving bed biofilm reactor for treating milk permeate from dairy industry. *Bioresour. Technol.*, **2009**, 100(23): 5641-5647  
 [12] Dong C. J., Liu X., Zhao Q. L., et al. Mechanish research on performance of EGSB reactor at low temperature. *Journal of Harbin Institute of Technology*, **2008**, 40(10): 1558-1562  
 [13] 董春娟, 吕炳南. EGSB 反应器内颗粒污泥的快速培养及特性研究. *中国给水排水*, **2006**, 22(15): 62-66  
 Dong C. J., Lu B. N. Rapid culture and properties research of granular sludge in EGSB reactor. *China Water & Wastewater*, **2006**, 22(15): 62-66 (in Chinese)  
 [14] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, **2002**  
 [15] S. Sandhya, K. Swaminathan. Kinetic analysis of treatment of textile wastewater in hybrid column upflow anaerobic fixed bed reactor. *Chem. Eng. J.*, **2006**, 122(1-2): 87-92