



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 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 ₂ /KHSO ₅ 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 ⁰ 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残渣废水	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 ₃ O ₄ 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 ²⁺ 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 ²⁺ 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 _{2.5} 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 ₂ 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 ² 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 Cu^{2+} and 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 ₂ /KHSO ₅ 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 ⁰ 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 ₃ O ₄ 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 <i>Acorus calamus</i> and <i>Ipomoea aquatica</i> 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_{2.5} 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_x by NH₃** 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 TiO₂** 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 A²O 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)

活性焦对水中汞的吸附性能

李志超^{1,2,3} 兰华春¹ 武利园¹ 刘会娟^{1*} 曲久辉¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085; 2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 审计署驻广州特派员办事处,广州 510623)

摘要 采用活性焦作为吸附剂,通过静态吸附实验,研究了活性焦对水中汞的吸附特性,并初步探讨了其吸附机理。活性焦对汞的吸附可用拟二级动力学模型描述;在 pH 为 5 时能达到对 Hg(II) 的最大吸附容量,在不同离子强度下均能保证对 Hg(II) 有较高的去除率;据 Langmuir 吸附等温线模型计算出活性焦对 Hg(II) 的饱和吸附容量可达 412.1 mg/g。结合红外光谱、Zeta 电位测试的结果,可推测活性焦对 Hg 的吸附过程是物理吸附和化学吸附综合作用的结果。活性焦是一种成本低、效果显著且稳定的吸附剂,有望在含汞废水处理中发挥重要作用。

关键词 活性焦 吸附 废水 Hg FTIR Zeta 电位

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2014)05-1899-07

Adsorptive behaviors of activated coke towards aquatic mercury

Li Zhichao^{1,2,3} Lan Huachun¹ Wu Liyuan¹ Liu Huijuan¹ Qu Jiuhui¹

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. CNAO's Guangzhou Resident Office, Guangzhou 510623, China)

Abstract Activated coke was facilitated as an adsorbent for the mercury wastewater and characterized via static adsorption experiments. The adsorption process was found to be best described by pseudo-second-order model. The maximum adsorption capacities occurred at pH 5, and high removal can be ensured despite variation of ionic strength. The Langmuir maximum adsorption capacity for Hg(II) was 412.1 mg/g. It can be drawn from the FTIR, Zeta-potentials analysis that the adsorption of Hg(II) on activated coke result from both physical and chemical effects. And activated coke is thus inferred to be an economic, effective and stable adsorbent, which would favor the treatment of mercury effluent.

Key words activated coke; adsorption; wastewater; Hg removal; FTIR; Zeta-potentials

人们普遍认为,汞是毒性最大的重金属之一^[1,2],研究表明,汞可对中枢神经系统、肺、肾和染色体造成永久性伤害^[3]。汞的来源可分为天然源和人工源,其中人工源主要来自氯代烷烃、纸浆、化肥等工业的废弃物^[4]。而在众多除汞方法中,吸附法兼具适用性和经济性^[5-8]。活性炭因为具有很高的比表面积^[5,6],经常用作吸附剂处理水中的重金属^[5,9-12]。目前活性炭已有很成熟的商业化应用,但是还是存在着价格过高的问题^[13,14],因此寻求一种来源更广和性能更好的吸附剂就显得尤为必要。

活性焦是以褐煤为主要原料研制出的一种外观为暗黑色的多孔含碳物质,是没有得到充分干馏或活化的活性炭类吸附剂。与活性炭相比,活性焦的机械强度更高,更耐受循环和装卸过程^[15,16],而且其成本与活性炭相比大幅度降低,因此引起了研究

人员的广泛兴趣。活性焦的比表面积要低于活性炭,其孔结构主要是由大孔和介孔组成的,微孔的比例相对少一些,更有利于溶液相在吸附剂内部的迁移和扩散^[17,18]。活性焦对较多污染物具有很好的吸附效果,已经广泛应用于工业废气处理中^[15,16,19-22],在污水处理中的应用也逐渐引起人们的重视^[18,23-25]。本文旨在研究活性焦吸附去除废水中的汞的效果和机理,以期为水中汞的去除提供技术参考。

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-QN402)

收稿日期:2013-04-16; 修订日期:2013-05-07

作者简介:李志超(1987~),男,硕士研究生,主要从事吸附水处理技术研究工作。E-mail: lizhichao210@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hjlju@rcees.ac.cn

1 材料与方法

1.1 实验材料

试剂:活性焦从国家电力科学院获得,活性焦经100目筛分,并于0.01 mol/L HNO₃中振荡72 h后用去离子水洗至pH中性,80℃下烘干15 h,于干燥器中保存备用。

Hg(NO₃)₂为分析纯,购自姜堰环球试剂厂;HNO₃、HCl、H₂SO₄、KOH为优级纯,KNO₃、KCl、KBH₄、KBr、KBrO₃、盐酸羟胺、为分析纯,购自国药集团(Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd.)。测定Hg(II)所采用的标准溶液购自国家标准中心(National Research Center for Certified Reference Materials, China)。实验过程所用水均为超纯水(18.2 MΩ cm),用Milli-Q净化设备制得。

Hg(II)的储备液(100 mg/L)是通过将定量的Hg(NO₃)₂溶于超纯水中制取,于避光处保存,于使用前进行稀释,即为实验中所用含汞溶液。冷原子荧光法测汞所用氧化剂为KBrO₃-KBr溶液,取2.784 g KBrO₃和10 g KBr溶于1 L超纯水而得;还原剂为KBH₄-KOH溶液,取0.1 g KBH₄溶于1 L 0.2% KOH溶液而得;过量的氧化剂用数滴100 g/L盐酸羟胺去除。

1.2 实验仪器

溶液pH用pH计(Orion 3 Star pH benchtop, Thermo Scientific)测定。Hg(II)的浓度采用冷原子荧光法测定,原子荧光光谱仪型号为AF-610B(Beijing Rayleigh Analytical Instrument Co., China)。

使用ASAP 2000比表面积分析仪(Micromeritics Co., USA),傅里叶变换红外光谱(Bruker TENSOR 27 FTIR, USA),Zeta电位仪(DelsaNano C, Beckman Coulter Ltd., U. S. A.),透射电子显微镜(H-7500,日本日立公司),元素分析仪(Vario Macro, Germany)对活性焦进行表征。

1.3 吸附实验

吸附动力学实验:准确量取400 mL Hg初始浓度为1 mg/L的Hg(II)溶液(离子强度为10 mM KNO₃, pH值为5)于800 mL烧杯中,加入40 mg活性焦。烧杯用PVC膜封住,以防止汞的挥发,用磁力搅拌器以150 r/min的速度搅拌18 h,在预定时间采样后用0.45 μm滤膜过滤,滤液置于塑料离心管中密封好冷冻保存,以待后续检测。

pH和离子强度影响实验:配制Hg浓度为1

mg/L的Hg(NO₃)₂溶液,其离子强度分别为1 mmol/L、10 mmol/L、100 mmol/L或1 mol/L KNO₃。溶液的初始pH用HCl或NaOH调节到3、5或8。称取50 mL溶液于玻璃磨口三角瓶中,添加5 mg吸附剂,将三角瓶加盖封好,置于恒温摇床中25℃下振荡,速度为150 r/min,15 h后取样分析。

吸附等温线实验:配制了一系列Hg初始浓度在0~30 mg/L内的Hg(NO₃)₂溶液(pH 5,离子强度10 mmol/L KNO₃)。各取100 mL溶液,置于玻璃磨口三角瓶中,并投加5 mg吸附剂。其余步骤与pH和离子强度影响实验相同。

所有实验均做平行实验,以确保实验数据的准确性。

2 结果与讨论

2.1 活性焦的性质

碳是构成活性焦最主要的元素,作为活性焦的骨架存在^[17]。元素分析测定活性焦的C、N和H 3种元素的质量组成成分分别为34.10%、0.32%和0.54%。由图1和图2可知,活性焦呈现不规则的多孔结构,介孔(2~50 nm)和大孔(>50 nm)结构发达,此外还有少量的微孔结构(0~2 nm)。经BET模型计算得到活性焦的比表面积为193.7 cm⁻¹,平均孔径为2.8 nm,孔容为0.18 cm³/g。在吸附过程中,吸附剂的孔径分布是经常需要考虑的因素^[26]。介孔结构作为通道,更有利于溶液相在吸附剂内部的迁移和扩散,使Hg(II)更易进入微孔结构中,进而被吸附^[27],因而在吸附过程扮演了很重要的角色。

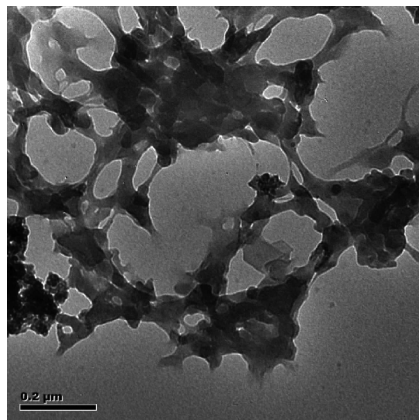


图1 活性焦的TEM图像

Fig. 1 TEM image of activated coke

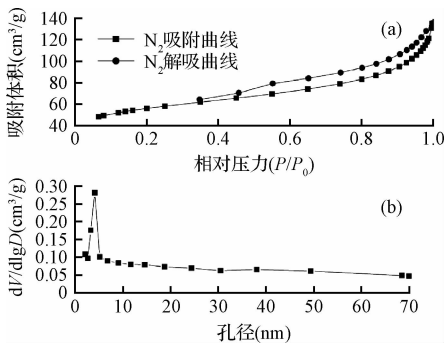


图 2 活性焦的 N₂ 吸附/解吸曲线及 BJH 孔径分布曲线

Fig. 2 N₂ adsorption/desorption curve and BJH pore diameter distribution curve of activated coke

2.2 活性焦的吸附性能

2.2.1 吸附动力学

研究吸附动力学可以更深入地了解吸附剂与吸附质反应的路径和机理^[14]。对此进行研究,吸附剂量 0.1 g/L, pH 5, 离子强度 10 mM KNO₃, 搅拌速度 160 r/min。如图 3 所示,活性焦对于不同初始浓度的 Hg 的吸附过程类似,都可分为 2 个阶段,分别为快速反应阶段和缓慢平衡阶段。在第 1 阶段,活性焦对 Hg 的吸附量快速上升,以 Hg(II) 的初始浓度为 1.0 mg/L 时为例,活性焦在吸附的前 200 min 的吸附量可达到平衡吸附量的 90% 以上。一般认为,这一阶段受控于 Hg(II) 离子由溶液向吸附剂表面活性位点的迁移过程^[28,29],而吸附开始阶段表

面浓度与平均吸附相浓度之间较高的差值则促进了这一迁移过程^[13]。此外活性焦的多孔性结构可为 Hg(II) 进入其表面(或其大孔表面)提供便捷的通道^[17],也会对吸附过程产生有利的影响。第 2 阶段 Hg(II) 的吸附速率较慢,并逐渐趋近平衡。由于吸附性表面及大孔活性位点都已被占据^[9],Hg(II) 的吸附转向孔内及微孔结构的表面。此时,Hg(II) 的吸附过程主要受孔内/表面扩散过程控制^[13]。

采用拟一级、拟二级动力学模型^[14,30]对吸附数据进行拟合,结果如表 1 所示。可以看出,用拟二级动力学模型拟合的相关系数较高,说明活性焦对 Hg(II) 的吸附为二级反应,有化学过程的参与^[14,30]。实验发现,活性焦对 Hg(II) 的吸附均可在 480 min 内达到平衡。在以下实验中为了确保吸附均能达到平衡,设定搅拌时间为 15 h。

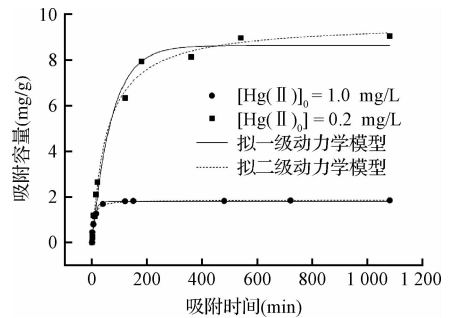


图 3 活性焦吸附 Hg(II) 的动力学曲线

Fig. 3 Hg(II) adsorption kinetics curve by activated coke

表 1 吸附动力学拟合参数

Table 1 Parameters of adsorption kinetics calculated from two models

[Hg(II)] ₀ (mg/L)	拟一级动力学模型 $q_t = q_c(1 - e^{-k_1 t})$			拟二级动力学模型 $q_t = k_2 q_c^2 t / (1 + k_2 q_c t)$		
	q_c (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	q_c (mg/g)	k_2 (min ⁻¹)	R^2
0.2	1.79	0.101	0.969	1.86	0.092	0.988
1.0	8.62	0.014	0.985	9.64	0.002	0.994

2.2.2 pH 和离子强度的影响

图 4 所示为不同 pH 及离子强度时活性焦对 Hg 吸附的影响。Hg(II) 的初始浓度为 1.0 mg/L, 吸附剂投加量 0.1 g/L, 搅拌速度 160 rpm, 平衡时间 15 h。溶液 pH 分别为 3、5 和 8。所采用离子强度调节剂为 KNO₃, 离子强度分别为 1 mmol/L、10 mmol/L、100 mmol/L 和 1 mol/L。对于活性焦来说, 各个离子强度下吸附容量随 pH 变化的趋势是相似

的。活性焦对 Hg 的吸附容量在 pH 小于 5 时随 pH 升高而上升, 最大值出现在 pH 5 处, pH 继续升高, 吸附容量反而下降。

图 5 所示为 Hg(II) (1.0 mg/L) 在不同 pH 下的形态分布模拟结果。可以看出, 在 pH < 5 时, Hg(II) 的形态主要为 3 种, 即 Hg(OH)₂(aq)、Hg²⁺ 和 Hg(OH)⁺。随着 pH 升高, Hg(OH)₂(aq) 所占比例逐渐升高, 直至 pH > 5 时, Hg(OH)₂(aq) 成为单一

的主导形态。在低 pH 时,大量存在的 H^+ 会与带正电的 Hg^{2+} 和 $Hg(OH)^+$ 在结合位点上产生竞争^[31]。同时 pH 越低,越有利于活性焦表面的质子化,也就越削弱和减少带负电的位点^[29]。这种情况下,活性焦和带正电形态的 $Hg(II)$ 之间会产生静电斥力,阻止它们靠近吸附剂和溶液之间的界面^[31]。溶液 pH 升高,会增强静电引力,减弱 H^+ 的竞争,因此吸附容量上升。当 pH 超过 5 后, Hg 的水解作用成为主导,大量水解产物覆盖于活性焦表面,会对活性焦的吸附性能产生不利影响^[32],使得吸附容量下降。

在 pH 3~5 范围内,在 $Hg(II)$ 形态中占主导的为 $Hg(OH)_2(aq)$, Hg^{2+} 和 $Hg(OH)^+$, 与活性焦的作用为内层配合^[33,34]。这些离子覆盖在吸附剂表面,会带来大量正电荷。而离子强度增加的话,会对这些正电荷有一定保护作用^[34],从而会提高吸附容量。而 pH 5~8 范围内, $Hg(II)$ 的水解产物占主导,与活性焦的作用为外层配合。离子强度增加,会削弱外层配合的静电力,使吸附容量降低。

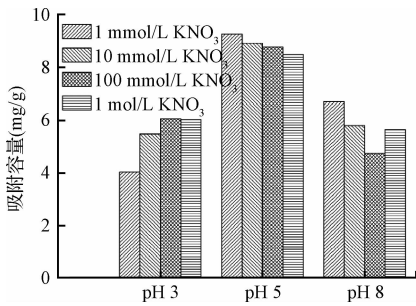


图4 不同 pH 及离子强度对活性焦吸附 $Hg(II)$ 的影响

Fig. 4 Influence of pH and ionic strength on $Hg(II)$ adsorption by activated coke

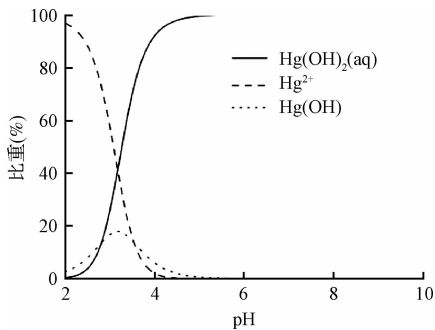


图5 $Hg(II)$ 在不同溶液 pH 下形态分布曲线

Fig. 5 $Hg(II)$ speciation as a function of solution pH

2.2.3 吸附等温线

图6所示为活性焦对 Hg 的吸附等温线。所述

实验条件为 pH 5, 温度 25℃, 离子强度为 10 mM KNO_3 , 吸附剂投加量 0.05 g/L, 搅拌速度 160 r/min, 平衡时间 15 h。

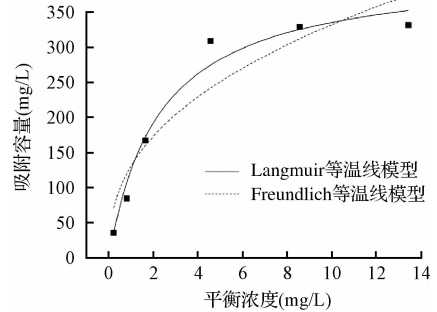


图6 活性焦对 $Hg(II)$ 的吸附等温线

Fig. 6 $Hg(II)$ adsorption isotherm by activated coke

分别用 Langmuir 和 Freundlich 等温线模型^[27,35]来拟合实验数据,得到的参数列于表2。可以看出,Langmuir 等温线模型可以较好地拟合活性焦对 Hg 的吸附,其最大吸附容量是 412.1 mg/g。而 Jenny 等利用石油裂解副产物制得的活性炭对 Hg 的吸附容量可达 112 mg/g^[36], Stephen 和 Karivelu 利用生物质制得的活性炭对 Hg 的饱和和吸附容量分别为 94.4 mg/g 和 55.6 mg/g^[37,38], Gomez 等^[10]利用 SO_2 和 H_2S 在高温下对活性炭进行改性后,对 Hg 的吸附容量达到 345.8 mg/g。本研究所用活性焦对 Hg 的吸附容量活性焦可与活性炭相媲美,加之其大大降低的成本^[17],为实际应用中含 Hg 废水的工艺中提供了广阔的前景。

表2 活性焦吸附等温线拟合参数

Table 2 Parameters of adsorption isotherm calculated from two models

Langmuir model			Freundlich model		
$Q = Q_{max}LC / (1 + LC)$			$Q = FC^{1/n}$		
Q_{max} (mg/g)	L (L/mg)	R^2	F	N	R^2
412.1	0.44	0.969	12.2	1.4	0.868

2.3 吸附机理初探

为研究活性焦吸附 $Hg(II)$ 的机理,利用红外光谱研究了吸附 $Hg(II)$ 前后表面的官能团的变化,结果如图7所示。活性焦的谱图中,最显著的是 3550~3250 cm^{-1} 和 1260~1000 cm^{-1} 的 2 处吸收谱带,分别代表醇类—OH、C—O 的伸缩振动^[39]。饱和烷烃的 C—H 的对称与不对称伸缩振动在

3 000 ~ 2 800 cm^{-1} 有强烈吸收,其对称弯曲振动也在 1 383 cm^{-1} 处有一单一吸收峰^[40,41]。通过对比活性焦在吸附 Hg (II) 后的谱图,发现活性焦表面 C—H 的吸收 (3 000 ~ 2 800 cm^{-1} , 1 383 cm^{-1}) 在吸附 Hg 后变得更加尖锐,之前的文献中也有类似报道^[40]。这说明 C—H 可能作为静电吸附位点与 Hg (II) 结合,从而将之吸附在活性焦表面。而众所周知的是,活性焦是一种由煤或其他生物质炼制而来的碳基材料,所以其中广泛存在的 C—H 可在 Hg (II) 的吸附过程中发挥重要作用。

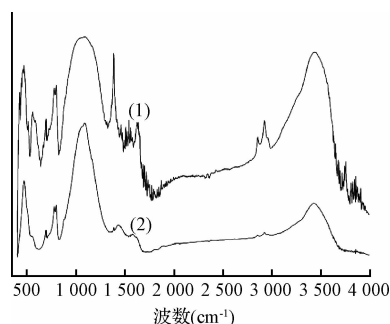


图 7 活性焦对 Hg (II) 吸附前(1)和吸附后(2)的红外光谱图像

Fig. 7 FTIR spectrum of activated coke before (1) and after (2) Hg (II) adsorption

用 Zeta 电位法分析吸附剂在吸附 Hg (II) 前后的表面电特性随 pH 变化的情况,所用空白溶液为超纯水,Hg (II) 溶液浓度为 1.0 mg/L ,吸附剂投加量为 0.1 g/L ,结果如图 8 所示。活性焦在低 pH 下表现出正电位,而当 pH 升高到一定程度后则转为负电位。活性焦的等电点在 pH 5 左右,与文献报道活性炭的等电点接近^[42]。这与活性焦与活性炭均为热裂解后的碳基产品^[5,17]不无关系。这类碳基产品表面含有丰富的官能团和 π 键,从而具有酸碱两性^[42]。吸附剂的 Zeta 电位会随 pH 增长会显著降低,说明固液界面吸附羟基是造成界面负电性的主要原因^[43]。对 Hg (II) 的吸附会使吸附剂的 Zeta 电位升高,是因为吸附剂表面吸附了 Hg (II) 之后正电荷积累的原因。同时,还发现在弱酸性至弱碱性的 pH 范围内发生了电性的改变。在此 pH 范围内,吸附剂表面接近中性,而此时溶液中的 Hg (II) 趋近固液界面是没有静电作用力支持的^[43]。也就是说,还有 Hg (II) 与吸附剂表面的专性吸附参与其中。化学吸附的作用使得吸附剂表面不仅能发生电性中和,还能继续积累 Hg (II) 进而发生电性改

变^[44]。这说明活性焦对于 Hg (II) 的吸附过程都不仅仅是简单的静电吸附作用,还包含专性的化学吸附过程。这与活性焦本身含有的羟基等基团有关。

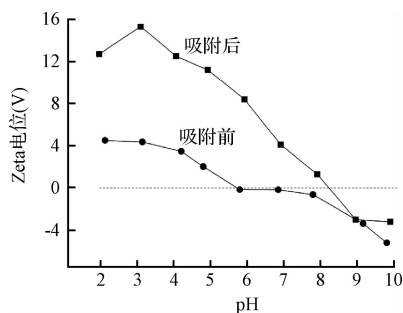


图 8 吸附 Hg (II) 前后的活性焦在不同溶液 pH 下的 Zeta 电位变化曲线

Fig. 8 Zeta-potentials of activated coke before and after Hg (II) adsorption as a function of solution pH

3 结 论

(1)活性焦具有以介孔为主的多孔性结构,表面存在多种基团,有利于对 Hg (II) 的吸附。

(2)活性焦对于 Hg (II) 的吸附过程可在 480 min 内达到平衡,较符合拟二级动力学模型,为二级反应。

(3)活性焦对于 Hg (II) 的吸附最优 pH 在 5 左右,对于 Hg (II) 的饱和吸附容量可达 412.1 mg/g ,在含碳类吸附剂中具有很大优势。

(4)活性焦作为一种水处理吸附剂,因其较大的吸附容量、稳定的去除效果、较高的机械强度和低廉的成本,有望在含汞废水等一系列重金属废水的处理中发挥重要作用。

参 考 文 献

[1] Clarkson T. W. The toxicology of mercury. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, **1997**, 34(4): 369-403

[2] Grandjean P., Weihe P., Jørgensen T. J., et al. Impact of maternal seafood diet on fetal exposure to mercury, selenium, and lead. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, **1992**, 47(3): 185-195

[3] Berglund F., Berlin M. Risk of methylmercury cumulation in man and mammals and the relation between body burden of methylmercury and toxic effects. *Chemical Fallout: Current Research on Persistent Pesticides*, **1969**

[4] Baeyens R., Ebinghous R., Vasilev O. Global and region-

- al mercury cycles: Sources, fluxes and mass balances. Kluwer Academic Publishers, **1996**
- [5] Wajima T., Murakami K., Kato T., et al. Heavy metal removal from aqueous solution using carbonaceous K₂S-impregnated adsorbent. *Journal of Environmental Sciences*, **2009**, 21(12): 1730-1734
- [6] Nadeem M., Shabbir M., Abdullah M. A., et al. Sorption of cadmium from aqueous solution by surfactant-modified carbon adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, **2009**, 148(2-3): 365-370
- [7] Cheremisinoff P. N. *Handbook of water and wastewater treatment technology*. USA: Butterworth-Heinemann, **2001**
- [8] Mattigod S. V., Fryxell G. E., Feng X., et al. Removal of mercury from aqueous streams of fossil fuel power plants using novel functionalized nanoporous sorbents. Springer, New York: *Coal Combustion Byproducts and Environmental Issues*, **2006**
- [9] Yardim M. F., Budinova T., Ekinçi E., et al. Removal of mercury (II) from aqueous solution by activated carbon obtained from furfural. *Chemosphere*, **2003**, 52(5): 835-841
- [10] Gomez-Serrano V., Macias-Garcia A., Espinosa-Mansilla A., et al. Adsorption of mercury, cadmium and lead from aqueous solution on heat-treated and sulphurized activated carbon. *Water Research*, **1998**, 32(1): 1-4
- [11] McDougall G. J., Hancock R. D., Nicol M. J., et al. The mechanism of the adsorption of gold cyanide on activated carbon. *Journal of the South African Institute Mining and Metallurgy*, **1980**, 80(9): 344-356
- [12] Cheremisinoff P. N. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology*. New York: Marcel Dekker, Inc, **1995**
- [13] Mohan D., Pittman C. U. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents--A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, **2007**, 142(1-2): 1-53
- [14] Ho Y. S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, **1999**, 34(5): 451-465
- [15] Tao S., Li C., Fan X., et al. Activated coke impregnated with cerium chloride used for elemental mercury removal from simulated flue gas. *Chemical Engineering Journal*, **2012**, 210(1): 547-556
- [16] Jastrzab K. Properties of activated cokes used for flue gas treatment in industrial waste incineration plants. *Fuel Processing Technology*, **2012**, 101(1): 16-22
- [17] 冯治宇. 活性焦制备与应用技术. 大连:大连理工大学出版社, **2007**
- [18] Zhang M., Zhao Q., Bai X., et al. Adsorption of organic pollutants from coking wastewater by activated coke. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2010**, 362(1-3): 140-146
- [19] Itaya Y., Kawahara K., Lee C., et al. Dry gas cleaning process by adsorption of H₂S into activated cokes in gasification of carbon resources. *Fuel*, **2009**, 88(9): 1665-1672
- [20] Li J., Kobayashi N., Hu Y. The activated coke preparation for SO₂ adsorption by using flue gas from coal power plant. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **2008**, 47(1): 118-127
- [21] Jastrzab K. Changes of activated coke properties in cyclic adsorption treatment of flue gases. *Fuel Processing Technology*, **2012**, 104(1): 371-377
- [22] Ogrisek S., Vanegas G. Experimental investigations of ammonia adsorption and nitric oxide reduction on activated coke. *Chemical Engineering Journal*, **2010**, 160(2): 641-650
- [23] Wießner A., Remmler M., Kusch P., et al. The treatment of a deposited lignite pyrolysis wastewater by adsorption using activated carbon and activated coke. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **1998**, 139(1): 91-97
- [24] Shawwa A. R., Smith D. W., Sego D. C. Color and chlorinated organics removal from pulp mills wastewater using activated petroleum coke. *Water Research*, **2001**, 35(3): 745-749
- [25] Zhang M., Zhao Q., Ye Z. Organic pollutants removal from 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) red water using low cost activated coke. *Journal of Environmental Sciences*, **2011**, 23(12): 1962-1969
- [26] Newcombe G., Donati C., Drikas M., et al. Adsorption onto activated carbon: Electrostatic and non-electrostatic interactions. *Water Supply*, **1996**, 14(2): 129-144
- [27] Puanngam M., Unob F. Preparation and use of chemically modified MCM-41 and silica gel as selective adsorbents for Hg(II) ions. *Journal of Hazardous Materials*, **2008**, 154(1-3): 578-587
- [28] Delac C., Gaslain F. O. M., Lebeau B., et al. Factors affecting the reactivity of thiol-functionalized mesoporous silica adsorbents toward mercury(II). *Talanta*, **2009**, 79(3): 877-886
- [29] Zhang G., Liu H., Liu R., et al. Removal of phosphate from water by a Fe-Mn binary oxide adsorbent. *Journal of Colloid and Interface Science*, **2009**, 335(2): 168-174
- [30] Maliyekkal S. M., Sharma A. K., Philip L. Manganese-

- oxide-coated alumina: A promising sorbent for defluoridation of water. *Water Research*, **2006**, 40 (19): 3497-3506
- [31] Pang Y. , Zeng G. , Tang L. , et al. PEI-grafted magnetic porous powder for highly effective adsorption of heavy metal ions. *Desalination*, **2011**, 281(1) : 278-284
- [32] Gao B. , Gao Y. , Li Y. Preparation and chelation adsorption property of composite chelating material poly (amidoxime)/SiO₂ towards heavy metal ions. *Chemical Engineering Journal*, **2010**, 158(3) : 542-549
- [33] McBride M. B. A critique of diffuse double layer models applied to colloid and surface chemistry. *Clay and Clay Minerals*, **1997**, 45(4) : 598-608
- [34] Lützenkirchen J. Ionic strength effects on cation sorption to oxides: Macroscopic observations and their significance in microscopic interpretation. *Journal of Colloid and Interface Science*, **1997**, 195(1) : 149-155
- [35] Limousin G. , Gaudet J. P. , Charlet L. , et al. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Applied Geochemistry*, **2007**, 22 (2): 249-275
- [36] Cai J. H. , Jia C. Q. Mercury removal from aqueous solution using coke-derived sulfur-impregnated activated carbons. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **2010**, 49(6) : 2716-2721
- [37] Inbaraj B. S. , Sulochana N. Mercury adsorption on a carbon sorbent derived from fruit shell of *Terminalia catappa*. *Journal of Hazardous Materials*, **2006**, 133(1) : 283-290
- [38] Kadirvelu K. , Kavipriya M. , Karthika C. , et al. Mercury (II) adsorption by activated carbon made from sago waste. *Carbon*, **2004**, 42(4) : 745-752
- [39] Kang J. , Liu H. , Zheng Y. M. , et al. Systematic study of synergistic and antagonistic effects on adsorption of tetracycline and copper onto a chitosan. *Journal of Colloid and Interface Science*, **2010**, 344(1) : 117-125
- [40] Zhang J. , Dai J. , Wang R. , et al. Adsorption and desorption of divalent mercury (Hg²⁺) on humic acids and fulvic acids extracted from typical soils in China. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2009**, 335(1-3) : 194-201
- [41] 陈洁, 宋启泽. 有机波谱分析. 北京:北京理工大学出版社, **1996**
- [42] Chingombe P. , Saha B. , Wakeman R. J. Surface modification and characterisation of a coal-based activated carbon. *Carbon*, **2005**, 43(15) : 3132-3143
- [43] Marinova K. G. , Alargova R. G. , Denkov N. D. , et al. Charging of oil-water interfaces due to spontaneous adsorption of hydroxyl ions. *Langmuir*, **1996**, 12 (8): 2045-2051
- [44] Hackley V. A. Colloidal processing of silicon nitride with poly (acrylic acid): I, adsorption and electrostatic interactions. *J. Am. Ceram. Soc.*, **1997**, 80(9) : 2315-2325