



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第7卷 第4期

Vol.7 No.4

中国科学院 主办
生态环境研究中心
科学出版社 出版

4
2013

目次

水污染防治

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

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

大气污染防治

Fenton 试剂法降解餐厨垃圾异味	狄彦强	刘杰民	刘思园	颜鲁春	冯振华(1445)	
特殊植物类群空气凤梨对大气污染物甲醛的净化	李俊霖	李 鹏	王恒蓉	郑桂灵	(1451)	
天津市纪庄子污水处理厂恶臭气体排放研究	王 钊	王秀艳	高 爽	白志鹏	(1459)	
碳纳米管/二氧化钛/壳聚糖催化薄膜光催化活性及苯降解机理		曾丽萍	张 泉	张国强	(1465)	
不锈钢烧结纤维毡外加粉体助剂过滤烟尘微粒	包 力	杨国华	李邯鹏	王炳辉	杜 珂	黄 三(1472)
西安市冬、夏两季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征分析	张承中	丁 超	周变红	陶 李	刘立忠	(1477)

固体废物处置

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

土壤污染防治

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

噪声污染防治

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

环境生物技术

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

相关研究

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

CONTENTS

Nitrogen conversion pathway of autotrophic nitrogen removal process in single SBR	Lü Yongtao Wang Lei Sun Ting Wang Xudong Wang Zhiying(1201)
Stimulation based on SIMULINK for nitrification reaction kinetics model	Luo Feihang Yang Zhaohui Lu Hui Luo Yuanling Zhan Qi(1206)
Central treatment of wastewater with high organic content from different industrial sources	Zhang Weijun Gao Ya Ma Shilong Zhang Ming Wang Dongsheng Xu Yueyang(1213)
Shortcut denitrification characterization of immobilized AOB	Zhou Li Li Zhengkui Wang Yichao Fan Nianwen(1219)
Research on influencing factors and operation optimization for CSTR partial nitrification at normal temperature	Zhong Hang Li Dong Wu Di Zeng Taotao Liu Liqian Su Dongxia Zhang Jie(1225)
Effect of temperature and sludge concentration on hydrolysis and acidification of waste activated sludge under alkaline condition	Su Gaoqiang Wang Shuying Zheng Bingyu Peng Yongzhen(1231)
Treatment of overflow using two-way cyclone flocculation hydrocyclone	Zang Baofeng Huang Yongqiang Xu Mingli Shi Kai Zhu Yan(1237)
Electricity generation performance of microbial fuel cells with carbon cloth as air-cathode and iron as cathode catalyst	Tang Yulan He Yating Yu Pengfei Sun Hong Yu Yan Peng Man(1241)
Biosorption of zinc(II) in water with decabromodiphenyl ethers	Bai Jieqiong Yin Hua Ye Jinshao Peng Hui Ye Qian He Baoyan Li Yuepeng Zhang Na Peng Sufen(1245)
Microwave assisted cleaning of hydrophobic membrane	Yin Zifei Wang Jun Ji Zhongguang Hou Deyin(1251)
Online monitoring system of anaerobic reactor in processes of transforming wastewater into resources	Wang Shunli Shang Liping Li Zhanfeng Deng Hu Liu Xianyang(1256)
Influences of different factors on effect of matrix nitrogen and phosphorus removal in substrates of constructed wetland	Chen Lili Zhao Tongke Zhang Chengjun Li Peng Li Xinrong Dong Ruozheng(1261)
Experiment on start-up phase of new modified septic tanks treating domestic sewage	Chen Zhiqiang Guan Huabin(1267)
Effect of pH values on process for removal of 2,4,6-trichlorophenol by Fe⁰-anaerobic microbe system	Wu Jingang Dai Youzhi Guo Lili Wang Guizhi Li Xiaona(1273)
Preparation and evaluation of TiO₂ granule for As(III) removal from water	Xie Dongmei Cao Linhong Cui Jinli(1279)
Adsorption of pyrogallol from aqueous solution by amine modified attapulgite	Wang Chunxiang Zhang Yan Xue Ailian Zhou Shouyong Zhao Yijiang Chen Zhidong(1285)
Treatment of wastewater from acrylonitrile industries with combined processes of adsorption oxidation, nanofiltration and adsorption	Li Wei Zhan Xia Li Jiding Zheng Dongju(1290)
Efficiency of removing nitrogen and phosphorus from simulated wastewater using hydrophytes	He Na Sun Zhanxiang Zhang Yulong Liu Mingda(1295)
Retention time and effects on water quality and phytoplankton of water shade agent-True Blue	Li Yan Zhang Yinjiang Liu Xiaopei Wu Hao Zhang Leting Duan Ting Li Zhen Zhang Manman(1301)
Effect of temperature on ammonification and nitrous oxide emission in partial nitrification	Guo Ning Zhang Jian Kong Qiang Miao Mingsheng Tian Lin(1308)
Fouling mechanism in advanced treatment of dyeing wastewater by ultrafiltration membrane ...	Fu Lele Li Fang Wu Liang Wang Ge(1313)
Removal of turbidity from butyl-acrylate wastewater by coagulation-sedimentation	Gu Xiaofeng Song Yudong Zhou Yuexi Ma Liqiang Li Jun Wang Jun(1319)
Purification effect of ecological floating beds of flakiness connection in slightly polluted river water	Duan Jincheng Zhang Yimin Zhang Hongwei Gao Yuexiang Chao Jianying(1324)
Nitrogen removal efficiency of co-processing pickle wastewater and municipal sewage by cyclic activated sludge system(CASS) process ...	He Qiang Ding Wenjing Sima Weiping(1331)
Pilot study on flow characteristics of a variable-velocity oxidation ditch with fine bubble	Yang Yahong Peng Dangeong Li Lei Zheng Yangguang Han Yun(1336)
Comparison of two different constructed wetland systems to treat swine wastewater	Li Pengyu Wang Zhen Yuan Linjiang Dong Jian Liu Lin Zhu Gefu Liu Chaoxiang(1341)
Preparation of coagulant from fly ash and its application in Yellow River water treatment	Li Yumei Chen Lirong Du Mingzhan(1346)
Field study on effect of harvesting submerged plant during growing season for ecological management of eutrophicated water	Jiang Yishuai Chen Hao Ma Zuomin Li Jing(1351)
Rapid determination of sulfate in water by turbidimetry	Xue Xiuling Li Mengdi(1359)
Pollutants removal characteristics of natural start-up and steady operation of membrane bioreactor (MBR) for treating polluted surface water	Yang Wei Zhao Qiujing Han Zhengshuang Li Kai Liang Heng Li Guibai(1363)
Application of RBF and Elman neural network in prediction on pollutant removal efficiency of constructed wetland with different compound substrates	Liang Qibin Liu Yungen Tian Kun Wang Wanbin(1368)
Sludge formation and decontamination effect of stable surface flow wetland systems	Zhang Longfei Wang Chengduan Wang Zhishuai(1373)
Synthesis of multifunctional chelating resin and its adsorption properties for Cd(II) in water ...	Wang Jiajia Ma Huimin Zhang Tianlin(1378)

Adsorption behavior of Cr(VI) from aqueous solution on porous Mg/Al mixed oxides	Wang Xiujian Wang Haizeng(1383)
Start-up and operation of anaerobic digestion of brewery wastewater at ambient temperature ...	Lin Changsong Xu Longfei Tan Linyou(1389)
Treatment of wastewater containing lead by sodium sulfide precipitation	He Xuwen Hu Jianlong Li Jingwen Zhang Jingjing Wang Jianbing Ge Peng(1394)
Treatment of oilfield produced water by inorganic ceramic membrane	Ding Hui Peng Zhaoyang Li Yi Wen Qinxue Chen Zhiqiang(1399)
Treatment of hexanitrostilbene wastewater by vacuum distillation coupling in micro-electrolysis	Che Ran Hao Zhi Ye Zhengfang(1405)
Salt chemical industrial wastewater treatment using hydrolysis-combined biological filter process	Guan Shuo Zhang Hongtao Wu Chunxu Cheng Linbo Ning Tao(1411)
Optimization of preparation conditions of polyacrylic acid/humic acid/rectorite adsorbent based on response surface methodology	Chen Fangyan Ye Wei Sun Yihan Jia Liping Tang Yubin(1417)
Control of algal bloom with immobilized biological catalyst	Zhou Xiaoyun Huang Ruimin Liu Xin Wen Ganbin(1425)
Influence of different influent flow distribution ratios on biological nitrogen and carbon removal by multi-stages A/O process	Wang Min Zhang Zhi Chen Jieyun Fan Gongduan Jin Ke Liang Peng Hu Ling(1430)
Treatment of wastewater containing high concentration of 1-propanol with UV photocatalysis/Fenton reagent	Zeng Huiming Cheng Shenyu Shen Xiaoli Ma Huanlin(1435)
Application of nanofiltration technology in treatment of urban soil composting leachate	Ning Guixing Zhang Xin Wang Kai Jiang Anping Wang Guilin(1440)
Treating food waste odor by Fenton reagent method	Di Yanqiang Liu Jiemin Liu Siyuan Yan Luchun Feng Zhenhua(1445)
Purification of air pollutant—formaldehyde with special plant group—epiphytic <i>Tillandsia</i>	Li Junlin Li Peng Wang Hengrong Zheng Guiling(1451)
Research of odor emission in Jizhuangzi Sewage Treatment Plant in Tianjin	Wang Zhao Wang Xiuyan Gao Shuang Bai Zhipeng(1459)
Photocatalytic degradation activity and mechanism of CNTs/TiO ₂ /CS Film of gas phase benzene	Zeng Liping Zhang Quan Zhang Guoqiang(1465)
Filtering soot particles by stainless steel sintered fiber felt combining with powder	Bao Li Yang Guohua Li Hanpeng Wang Binghui Du Ke Huang San(1472)
Pollution characteristics of carbon aerosol in PM _{2.5} of Xi'an during winter and summer	Zhang Chengzhong Ding Chao Zhou Bianhong Tao Li Liu Lizhong(1477)
Isolation of an <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> strain and its performance in bioleaching of copper from waste printed circuit boards	Zhang Ting Zhu Nengwu Xu Zhiguo Shi Chaozhong(1482)
Performance and synergistic effect of anaerobic co-digestion of corn stover and chicken manure	Feng Yajun Yuan Hairong Zhang Liang Li Chao Gao Jian Li Xiujin(1489)
Biogas production potential of Taihu cyanobacteria at different storage times	Zhao Mingxing Ruan Wenquan(1495)
Recycling of the iron resources of CFBC fly ash by magnetizing roasting-magnetic separation	Wu Houqin Li Jun Lu Zhongyuan Xu Longhua Guan Bo Wei Yanfei(1500)
Mix design of AC-13 asphalt concrete with circulating fluidized bed combustion ash	Hou Li Zhao Zhi Lu Zhongyuan Song Lixian Peng Hong Chen Peijun Li Jun(1505)
Preparation and characterization of sponge film based on feather reduction residue	Zhuang Yuan Wu Xiaoqian Cao Zhangjun Zhao Xiaoxiang Zhou Meihua(1510)
Hydrogen-rich synthesis gas production via thermochemical of refuse derived fuel	Wu Wei(1515)
Treatment of chicken manure by two-phase anaerobic digestion reactor	Ni Zhe Pan Chaozhi Niu Dongjie Chen Ling(1522)
Effect of adding nitrogen loss inhibitor on quality of dehydrated blue-green algae compost	Ren Yun Cui Chunhong Liu Fenwu Zhan Xinhua Zhou Lixiang(1527)
Advanced treatment of leachate from MSW incineration by ozonation	Mu Yongjie Ye Jiexu Sun Dezhi(1535)
Recovery process of glass substrate from liquid crystal display	Sun Yuanyuan Li Longzhu Tang Huidong(1541)
Synthesis of thermosetting PR with WPCB vacuum pyrolysis oils	Zhu Zao Cai Sihan Sun Shuiyu Liu Jingyong Zhang Rongxue Xu Dongjun Zhong Sheng Yang Fan Li Shenyong Xu Pingting(1545)
Migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils under uniform electric field	Wang Cuiping Xu Wei Sun Hongwen(1550)
Leaching characteristics of heavy metals in compost sludge in loess	Ma Kejing Zhang Mingquan Cai Pu(1557)
Heavy oil-contaminated soils remediation by Fenton oxidation	Liu Qiyou Li Lin Zhang Yunbo Zhao Dongfeng Zhao Chaocheng(1563)
Microorganism remediation of Hg, Pb and Cr contaminated soil	Li Mengjie Wang Cuiling Li Rongchun Hong Junyan Yan Liang Liu Li Zhuang Li(1568)
Bioaugmentation remediation of petroleum contaminated soil	Zhang Xiuxia Teng Zhi Wu Jiadong(1573)
Influence of oil in soil on growth and physiological indexes of <i>suaeda heteroptera</i> and plant-microbial remediation	Gao Naiyuan Liu Xianbin Zhao Xingru(1578)
Numerical prediction of aerodynamic noise radiated from longitudinal symmetric plane of high-speed train and shape optimization	Xiao Yougang Zhang Ping(1583)
Screening of lube oil biodegradation strain and degrading characteristics	Guo Xiaoyan Zhang Zhihong Shen Qiying Li Cuiqing(1589)
Numerical simulation on field characteristics of multiphase flow in side-entering stirred tank	Zhang Linjin Chen Gongguo Bai Yang Ye Xuchu(1594)

硫化物沉淀法处理含铅废水

何绪文 胡建龙 李静文 张晶晶 王建兵 葛鹏

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083)

摘要 采用硫化物沉淀法处理含铅废水,考察了 Na_2S 投加量、反应初始 pH 等操作条件对铅离子去除效果的影响,以及硫化铅沉淀反应过程的动力学特征,并采用激光粒度分析仪对反应生成的硫化铅沉淀的粒径分布进行了测定。实验结果表明, S^{2-} 与废水中 Pb^{2+} 之间的沉淀反应能较好地符合一级反应动力学特征; Na_2S 与 Pb^{2+} 的最佳物质的量之比为 3;最佳的反应初始 pH 为 6~9。在最佳操作条件下, Pb^{2+} 的平均去除率为 99.60%,反应出水中 Pb^{2+} 平均浓度为 0.13 mg/L,低于污水综合排放标准(GB8978-1996)中铅的排放浓度限值。反应生成的硫化铅沉淀的平均粒径为 2.62 μm ,具有较好的沉淀性能,能够通过沉淀的方式与废水分离。

关键词 铅 重金属 废水处理 硫化钠 沉淀

中图分类号 X522 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)04-1394-05

Treatment of wastewater containing lead by sodium sulfide precipitation

He Xuwen Hu Jianlong Li Jingwen Zhang Jingjing Wang Jianbing Ge Peng

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract The wastewater containing lead ion was treated with sodium sulfide precipitation process. Precipitation reaction kinetics of PbS and operation variables, such as Na_2S dosage, initial pH of wastewater, were investigated. The particle size distribution was studied using laser particle size analyzer as well. The results showed that the precipitation reaction fitted well with first order reaction model. The optimal Na_2S dosage (molar ratio of $\text{Na}_2\text{S}/\text{Pb}^{2+}$) and initial pH of wastewater were 3 and 6~9, respectively. Under the optimal operation conditions, the Pb^{2+} removal efficiency of 99.60% was obtained, and the residual Pb^{2+} concentration was 0.13 mg/L after treatment, it was below the lead discharge limit of Wastewater Integrated Discharge Standard of China (GB8978-1996). The mean particle size of PbS formed in the precipitation reaction was 2.62 μm , which indicates that the PbS precipitation can be well separated from wastewater by sedimentation treatment.

Key words lead; heavy metal; wastewater treatment; sodium sulfide; precipitation

铅蓄电池^[1]、有色金属采选^[2]、冶炼^[3]等行业在生产过程中会产生大量含铅废水。近年来,铅污染导致的环境安全问题十分突出。含铅废水的处理方法有化学沉淀法(包括石灰中和沉淀法^[4]、螯合沉淀法^[5]、硫化物沉淀法^[6])、吸附法^[7,8]、膜分离法^[9,10]等。由于成本较低、处理效果好,石灰中和沉淀法在实际含铅废水处理工程中最为常用。但该方法在实际应用中也存在诸多问题。例如,石灰沉淀法处理含铅废水处理主要存在污泥产量大、脱水性能差、管道等输水设施结垢严重等缺点^[4,11]。

与传统的石灰中和沉淀法相比,硫化物沉淀法处理含铅废水具有更为广阔的研究应用前景。首先,硫化铅沉淀具有比氢氧化铅沉淀更低的溶度积常数,反应出水中残余的铅离子浓度更低。其次,硫化物沉淀法能回收废水中的铅,反应生成的硫化铅

沉淀能够被资源化利用。但该方法也还存在一些问题有待进一步研究,如反应中硫化物需要过量投加,增加了处理成本;在某些条件下,反应生成的硫化物沉淀较难与水分离^[12-15]。

本文重点研究了硫化物沉淀法处理含铅废水的工艺条件及沉淀反应的动力学特征,并通过激光粒度分析仪考察了处理过程中生成的硫化铅沉淀的粒径分布特征,为硫化钠沉淀法处理含铅废水的工程应用提供理论依据。

基金项目:环保公益性行业科研专项(201009037);中央高校基本科研业务费(2009KH01)

收稿日期:2011-12-27; **修订日期:**2012-02-08

作者简介:何绪文(1964~),男,工学博士,教授,博士生导师,主要从事环境污染防治与资源综合利用方向的研究。

E-mail:hexuwen@sina.com.cn

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验过程中所使用的硫化钠、硝酸铅、氢氧化钠等化学药品均为分析纯药品。实验所使用的含铅废水为实验室模拟配水。实验所用储备液及溶液均用超纯水配制。

1.2 实验装置

硫化物沉淀法处理含铅废水实验装置如图1所示。硫化物沉淀反应器为密闭装置,有效容积为1.5 L,反应器置于磁力搅拌器上,反应器内放有磁力搅拌子。通过磁力搅拌子的搅拌作用,加快反应器内的传质过程。反应器上方设置有排气口,并与防倒吸装置、 H_2S 吸收装置相连。反应过程中生成的 H_2S 气体由吸收装置吸收去除。

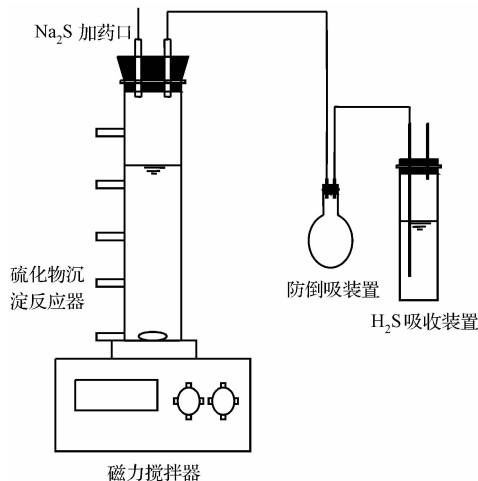


图1 硫化物沉淀法处理含铅废水实验装置

Fig.1 Schematic diagram of wastewater containing lead treatment experiment with sodium sulfide precipitation method

1.3 实验方法

在考察 Na_2S 投加量、反应pH对废水中铅离子去除效果影响的实验中,先取一定体积的含铅废水置于烧杯中,用0.5%的NaOH与0.5%的盐酸溶液将废水的pH调至一定值,然后将含铅废水置于 Na_2S 沉淀反应器中,塞好反应器上的密封塞。取一定体积的1%的 Na_2S 溶液,通过密封塞上方的加药口加入到 Na_2S 反应器中,并启动磁力搅拌器,开始反应计时。待反应一定时间后,从取样口取出10 mL反应后的水样,用0.45 μm 水系滤膜过滤,并用1% HNO_3 溶液将滤后水样酸化至pH<2,酸化后的水样置于4℃冰箱内保存,用于

铅离子浓度测定。

废水中铅离子浓度采用原子吸收法测定,反应生成的PbS沉淀采用Malvern激光粒度分析仪测定,参数如下:泵速:2 800 r/min;超声频率:20 000 Hz;测定时间:5 min。溶液pH采用pH 211型pH计测定。

2 结果与讨论

2.1 Pb^{2+} 沉淀反应动力学特征

在废水中初始 Pb^{2+} 浓度31.56 mg/L,初始pH 5, Na_2S/Pb^{2+} 加药比1:1的条件下,考察了 Pb^{2+} 的沉淀反应动力学特征,反应过程中 Pb^{2+} 浓度随时间变化见图2。

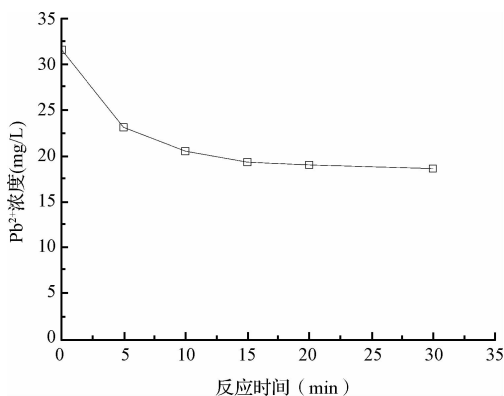


图2 沉淀反应过程中 Pb^{2+} 浓度随反应时间的变化

Fig.2 Pb^{2+} concentration as a function of reaction time during the course of precipitation reaction

由于沉淀反应过程一般可用一级动力学模型进行描述^[16,17],因此采用一级动力学方程对PbS沉淀生成过程进行拟合。一级动力学方程为:

$$\ln\left(\frac{C_t - C_e}{C_0 - C_e}\right) = -Kt$$

式中: C_t 为反应时间为 t min时刻的 Pb^{2+} 浓度; C_0 为反应开始时 Pb^{2+} 浓度,本实验中 Pb^{2+} 的初始浓度为31.56 mg/L; C_e 为反应达到平衡时前离子浓度,本实验条件下测得其为18.36 mg/L; K 为速率常数; t 为反应时间。

通过对图2中的反应结果按照一级动力学方程进行拟合,结果表明在该实验条件下铅离子与水中 S^{2-} 的反应过程较好地符合一级动力学方程。拟合的决定系数 R^2 为0.945,拟合得到的速率常数为0.147 min^{-1} 。反应过程的动力学方程为 $C_t = 13.2 e^{-0.147t} + 18.36$ ($R^2 = 0.945$)。

2.2 Na₂S 投加量对 Pb²⁺ 去除效果的影响

Na₂S 的投加量是影响硫化钠沉淀法的处理效果与运行成本的重要参数。硫化钠投加过量不仅会造成出水中 S²⁻ 浓度超标,而且也会增加处理成本^[18,19]。硫化钠投加量不足也会使得铅离子去除效率较低,出水中铅离子浓度超标。在废水初始 Pb²⁺ 浓度 31.9 mg/L, 初始 pH 6, 反应时间 20 min 的条件下,考察了 Na₂S 投加量对铅离子去除效率的影响,实验结果如图 3 所示。

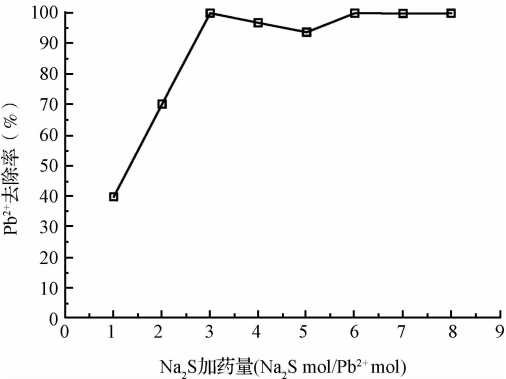


图 3 Na₂S 投加量对 Pb²⁺ 去除效果的影响

Fig. 3 Effect of Na₂S dosage on Pb²⁺ removal efficiency

从图 3 中可见,Pb²⁺ 去除率随 Na₂S 加药量的升高是一个先升高后降低再升高的波动变化的过程。在 Na₂S 与 Pb²⁺ 的物质质量之比由 1 增加至 3 时,Pb²⁺ 的去除率随 Na₂S 的投加量的增加而升高。Na₂S 与 Pb²⁺ 的物质质量之比为 3 时,Pb²⁺ 的去除率为 99.89%。Na₂S 与 Pb²⁺ 的物质质量之比由 3 增加到 5 的过程中,Pb²⁺ 的去除率随 Na₂S 的投加量的增加而降低,出水中铅离子浓度均大于 1 mg/L。Na₂S 与 Pb²⁺ 的物质质量之比由 5 增加到 8 的过程中,Pb²⁺ 的去除率随 Na₂S 的投加量的增加而增加。加药比为 6 时,Pb²⁺ 的去除率达到相对稳定状态,加药比为 6~8 的条件下,出水 Pb²⁺ 的平均浓度为 0.06 mg/L,低于废水综合排放标准 (GB8978-1996) 中铅离子的排放浓度限制 1 mg/L。因此,最佳的 Na₂S 投加比为 3,在 Pb²⁺ 的去除率较高的同时,Na₂S 的投加量也最小。

由于 Na₂S 的过量投加,反应出水中的 S²⁻ 浓度会有一定程度的升高。废水中 Pb²⁺ 与 S²⁻ 反应形成沉淀后,通过沉淀处理将硫化铅沉淀从处理后出水中分离,然后再向沉淀后出水中添加盐酸或硫酸,使过量的 S²⁻ 形成硫化氢气体,然后通过碱液吸收该

硫化氢气体得得硫化钠溶液,可将该部分硫回收利用。

2.3 反应 pH 对 Pb²⁺ 去除效果的影响

废水的初始 pH 也是影响硫化钠沉淀法对废水中铅离子去除率的重要因素。S²⁻ 在水中的存在形态与溶液的 H⁺ 结合形成 HS⁻ 与 H₂S。其化学反应如下^[20]:

$$\text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons \text{HS}^- + \text{H}^+ \quad K_{p1} = \frac{[\text{HS}^-][\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{S}]} \quad pK_1 = 6.99 \quad (1)$$

$$\text{HS}^- \rightleftharpoons \text{S}^{2-} + \text{H}^+ \quad K_{p2} = \frac{[\text{S}^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HS}^-]} \quad pK_2 = 17.4 \quad (2)$$

H⁺ 与 S²⁻ 的结合降低了 S²⁻ 的使用效率。在废水初始 Pb²⁺ 浓度 30.6 mg/L、Na₂S/Pb²⁺ 加药比 3:1、反应时间 20 min 的条件下,考察了 pH 对 Pb²⁺ 去除效率的影响,实验结果见图 4。从图 4 中可知,在 pH 为 2~6 的条件下,Pb²⁺ 的去除率随 pH 的增加而升高。pH 值大于 6 的条件下,Pb²⁺ 的去除率达到相对稳定状态,平均去除率为 99.60%,反应出水中 Pb²⁺ 平均浓度为 0.13 mg/L,低于污水综合排放标准 (GB8978-1996) 中铅的排放浓度限值。

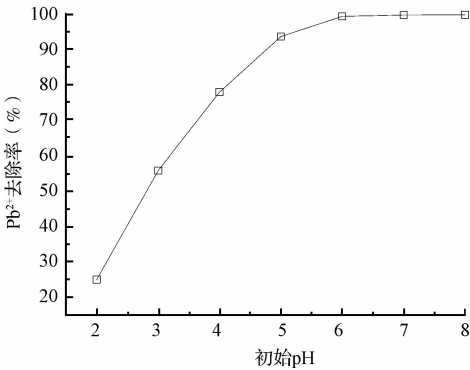


图 4 废水初始 pH 对 Pb²⁺ 去除效果的影响

Fig. 4 Effect of initial pH on Pb²⁺ removal efficiency

2.4 PbS 沉淀分布特征

PbS 沉淀的粒径分布直接决定了硫化钠沉淀法生成的硫化铅沉淀从废水中分离的难易程度。在加药比 Na₂S/Pb²⁺ 为 3:1、废水初始 pH 为 6、反应时间 20 min 的条件下,通过激光粒度分析仪测定了硫化铅沉淀的粒径分布,实验结果见图 5。

根据图 5 中硫化铅沉淀的粒径分布的统计学信息可知,Na₂S 与废水中 Pb²⁺ 发生沉淀反应后,生成的 PbS 沉淀的平均粒径 D_{0.5} 为 2.62 μm。该粒径

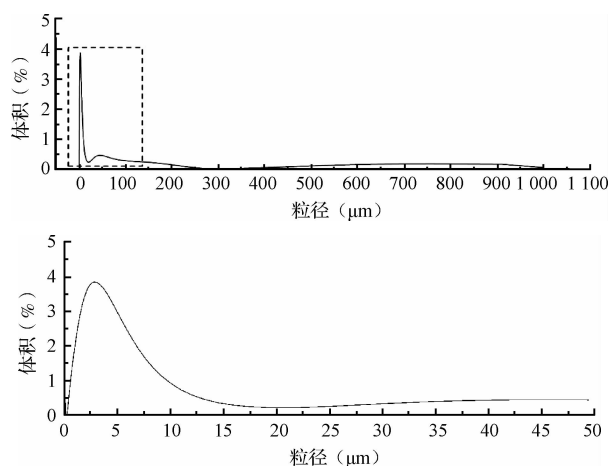


图5 硫化铅沉淀粒径分布图

Fig. 5 Particle size distribution of PbS

大于传统意义上胶体的粒径的最大值 $1\ \mu\text{m}$, 且粒径分布较为集中。平均粒径为 $2.62\ \mu\text{m}$ 的硫化铅沉淀不以胶体的状态存在, 具有较好的沉淀性能, 能够采用沉淀处理使之从废水中分离。

3 结 论

(1) S^{2-} 与废水中 Pb^{2+} 的沉淀反应过程能较好地符合一级反应动力学特征。

(2) Pb^{2+} 去除率随 Na_2S 加药量的升高是一个波动变化的过程。 Na_2S 与 Pb^{2+} 的最佳物质的量之比为 3。

(3) pH 值大于 6 的条件下, Pb^{2+} 的去除率达到相对稳定状态, 平均去除率为 99.60%, 反应出水中 Pb^{2+} 平均浓度为 $0.13\ \text{mg/L}$, 低于污水综合排放标准 (GB8978-1996) 中铅的排放浓度限值。

(4) 反应生成的硫化铅沉淀的平均粒径为 $2.62\ \mu\text{m}$, 具有较好的沉淀性能, 能够通过沉淀的方式与废水分离。

参 考 文 献

[1] 陈丽春, 龚起. 电池生产含铅废水处理技术研究. 环境科学与管理, **2009**, 34(1): 101-103
Chen L. C., Gong Q. Technical study of treating lead effluent from battery production. Environmental Science and Management, **2009**, 34(1): 101-103 (in Chinese)

[2] 彭新平, 陈伟, 吴兆清. 硫化铅锌矿选矿废水处理与回用技术研究. 湖南有色金属, **2010**, 26(2): 40-42
Peng X. P., Chen W., Wu Z. Q. Research on lead-zinc sulfide ore dressing wastewater treatment and reuse technologies. Hunan Nonferrous Metals, **2010**, 26(2): 40-42 (in

Chinese)

[3] 杨晓松, 刘峰彪. 高密度泥浆法处理铅锌冶炼综合废水. 有色金属, **2009**, 61(4): 166-169
Yang X. S., Liu F. B. Treatment of comprehensive wastewater from lead and zinc smelting with high density sludge. Nonferrous Metals, **2009**, 61(4): 166-169 (in Chinese)

[4] Baltpurvins K. A., Burns R. C., Lawrance G. A., et al. Effect of electrolyte composition on zinc hydroxide precipitation by lime. Water Research, **1997**, 31(5): 973-980

[5] 刘立华, 吴俊, 李鑫, 等. 重金属螯合絮凝剂对废水中铅、镉的去除性能. 环境工程学报, **2001**, 5(5): 1029-1034
Liu L. H., Wu J., Li X., et al. Removal performance of heavy metal chelating flocculant for Pb^{2+} and Cd^{2+} in wastewater. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2001**, 5(5): 1029-1034 (in Chinese)

[6] 陈洁, 鲁安怀, 姚志健. 天然铁的硫化物处理含 Pb (II) 废水的实验研究. 岩石矿物学杂志, **1999**, 18(4): 323-328
Chen J., Lu A. H., Yao Z. J. The application of natural iron-bearing sulfide to the treatment of Pb (II) wastewater. Acta Petrologica et Mineralogica, **1999**, 18(4): 323-328 (in Chinese)

[7] 雒和敏, 曹国璞. 活性炭对含铅废水吸附特性研究. 环境工程学报, **2010**, 4(2): 373-376
Luo H. M., Cao G. P. Study on adsorption characteristics of activated carbon to lead wastewater. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2010**, 4(2): 373-376 (in Chinese)

[8] 潘国营, 周卫, 王素娜. 粉煤灰处理含铅废水的试验研究. 煤炭工程, **2008**, 55(9): 77-79
Pan G. Y., Zhou W., Wang S. N. Research on test of lead content waste water treatment with fly ash. Coal Engineering, **2008**, 55(9): 77-79 (in Chinese)

[9] 陈浚, 朱润晔, 陈建孟, 等. 用电渗析法纯化回用含铅废水. 水处理技术, **2005**, 31(6): 43-46
Chen J., Zhu R. Y., Chen J. M., et al. Purification of wastewater containing Pb^{2+} by electrodialysis. Technology of Water Treatment, **2005**, 31(6): 43-46 (in Chinese)

[10] 沈黎, 孙勇, 熊大民. 含铅废水处理技术研究进展. 南方金属, **2010**, (1): 9-12
Shen L., Sun Y., Xiong D. M. Advances in treatment technique for Pb-containing wastewater. Southern Metals, **2010**, (1): 9-12 (in Chinese)

[11] 张宏伟, 贾小慧. 石灰法处理铅锌冶炼污水的工艺参数研究. 有色冶金设计与研究, **2008**, 29(1): 30-32
Zhang H. W., Jia X. H. Research on process parameters

- of lead-zinc smelting sewage treatment in lime method. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, **2008**, 29 (1):30-32 (in Chinese)
- [12] Hille R. P., Peterson K. A., Lewis A. E. Copper sulphide precipitation in a fluidised bed reactor. *Chemical Engineering Science*, **2005**, 60(10):2571-2578
- [13] Lewis A. E. Review of metal sulphide precipitation. *Hydrometallurgy*, **2010**, 104(2):222-234
- [14] Migdisov A. A., Williams-Jones A. E., Lakshtanov L. Z., et al. Estimates of the second dissociation constant of H_2S from the surface sulfidation of crystalline sulfur. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **2002**, 66 (10): 1713-1725
- [15] 黄万抚, 王淑君. 硫化沉淀法处理矿山酸性废水研究. *环境污染治理技术与设备*, **2004**, 5(8):60-62
- Huang W. F., Wang S. J. Research on treatment of mine wastewater using sulfide precipitation floatation. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, **2004**, 5(8):60-62 (in Chinese)
- [16] 唐建成, 邓意达, 李军, 等. 均匀沉淀法制备 ZnS 粉末的动力学. *中国有色金属学报*, **2007**, 17(1):75-79
- Tang J. C., Deng Y. D., Li J., et al. Growth kinetics of ZnS particle made by homogeneous precipitation. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, **2007**, 17(1):75-79 (in Chinese)
- [17] 董玉琳. 沉淀反应的热力学及动力学初探. *贵州化工*, **2001**, 26(3):32-33
- Dong Y. L. Discussion on thermodynamics and kinetics of precipitation reaction. *Guizhou Chemical Industry*, **2001**, 26(3):32-33 (in Chinese)
- [18] Veeken Adrie H. M., Akoto L., Hulshoff Pol L. W., et al. Control of the sulfide (S^{2-}) concentration for optimal zinc removal by sulfide precipitation in a continuously stirred tank reactor. *Water Research*, **2003**, 37(15): 3709-3717
- [19] Banfalvi G. Removal of insoluble heavy metal sulfides from water. *Chemosphere*, **2006**, 63(7):1231-1234
- [20] Stén P., Forsling W. Precipitation of lead sulfide for surface chemical studies. *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*, **2000**, 172(1-3):17-31