



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8期

Vol.7 No.8

中国科学院
生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

8
2013

目次

水污染防治

挤压法制备 Fe-Al-Ce 复合氧化物颗粒除氟性能及地下水处理应用	赵 蓓	张 昱	豆小敏	鄢晓梅	杨 敏(2801)		
剩余污泥中微生物絮凝剂的提取方法比较	周秀秀	戴晓晴	王春晖	元万琦	李向荣	夏四清	张志强(2808)
好氧颗粒污泥系统中丝状菌演替规律及其菌丝缠绕特性分析	李志华	莫丹丹	赵 静	刘进民	姬晓琴(2813)		
不同 C/N 下 BBFR-IVCW 耦合工艺对微污染水体脱氮效果	孔令为	贺 锋	夏世斌	徐 栋	唐光涛	吴振斌(2818)	
太湖水体附着细菌和浮游细菌的丰度与分布特征	宋玉芝	赵淑颖	黄 瑾	汤祥明	高 光	秦伯强(2825)	
连续流气提式反应器中有机物去除和氮转化的行为	高琳琳	王 瑶	王 君	张建宾	周丹丹	林媛黎(2832)	
卡拉胶、膨润土改性 PVA 包埋小球	钟成华	刘 鹏	张文东	刘 洁	曾雪梅(2837)		
铁屑粉煤灰组合处理含磷废水		张 鑫	张焕祯	刘光英	李 伟(2844)		
4 种人工湿地基质对马拉硫磷的吸附特性	苏凡凯	于静洁	周 硕	钟 远	孙力平	王少坡(2849)	
MFC-MBR 耦合系统运行效果		王翠娜	田 禹	苏欣颖	李 慧(2855)		
微波辅助光催化降解高浓度活性黑		周团团	王思达	郑利兵	曲 丹(2861)		
KMnO ₄ 缓释剂的释放性能及其在垃圾渗滤液处理中的应用	王艳龙	吴 嫚	史若馨	董双石	朱胜美(2867)		
臭氧催化氧化工艺深度处理印染废水		陆洪宇	马文成	张 梁	陈志强(2873)		
基于剪切乳化机的采油污水再现配置与分散相破碎乳化行为		桑义敏	陈家庆	刘 君	梁存珍(2877)		
昆明市分流制排水区域污水厂进水水质特征的统计学分析	孙迎雪	吴光学	胡洪营	吴毅晖	郭 昉	郭玉梅(2885)	
A/O + MBR 工艺处理玉米深加工废水的中试研究	颀亚玮	年跃刚	殷 勤	闫海红	雪 梅(2892)		
碳源类型及进水量分配对 CMICAO 工艺脱氮除磷的影响		雷晓芬	朱光灿	吕锡武	许 卓(2899)		
复合式膜生物反应器中胞外聚合物提取方法综合评价		陈 华	胡以松	王晓昌	金鹏康(2904)		
晋江西流域茶园降雨径流产污特征		李长嘉	潘成忠	滕彦国(2909)			
活性污泥系统中硝化菌衰减动力学参数测定	邢 灿	周 振	谷彩霞	蒋玲燕	尹盘基	张晓娜	方 正(2915)
混凝对二级出水中有机物分布特性的影响		程丽华	王 奇	韩 婷	李璐瑶	毕学军	刘长青(2919)
氯消毒再生水中 4 种卤乙酸的测定和影响因素分析				刘彦伟	田一梅	黄建军(2925)	
多介质渗透反应格栅中氨氮的转化与存在形态		杨应钊	刘 菲	孔祥科	李圣品	马剑飞(2931)	
一种新型 Fenton-流化床催化剂的制备及表征				邓 睿	汪晓军	黎玉香(2937)	
Biostyr 曝气生物滤池处理城市污水的沿程生化特性				王 琳	窦娜莎(2942)		
木粉/壳聚糖接枝丙烯酸-丙烯酰胺吸附树脂对二元重金属离子溶液中 Pb ²⁺ 的吸附		谢建军	姚庆鑫	韩心强	吴义强	李新功(2947)	
进水碳氮分离对曝气生物滤池的影响		张真江	李 继	吕小梅	董文艺	谢传波(2956)	
水温和 C/N 对土地生物过滤处理系统氮去除的影响			郭一令	王 晗	王 森	周五一(2961)	
秸秆黑碳的制备及吸附特性	谢 永	高志凤	王红艳	卓 馨	郑文雷	刘 超(2968)	
基于方波溶出伏安法的电化学传感器检测水体中痕量铅		张克东	豆俊峰	丁爱中	范福强	王营营(2973)	
丝瓜瓢固定化脱色菌 <i>Enterobactor</i> sp. S8 对活性黑 5 的脱色			丁丽娜	陈 亮	黄满红	赵松建(2979)	
原位帽封材料对水体中 Pb(II) 与 Cd(II) 静态吸附	康 超	袁兴中	曾光明	徐峻宇	黄华军	林宁波	王 侯(2985)
物化-生物组合工艺处理 TNT 红水				郝 志	叶正芳	赵泉林(2991)	
ABR 处理硫酸盐有机废水的 BP 神经网络建模		韦添尹	蒋永荣	刘可慧	刘成良	张 威(2997)	
微电解-混凝法处理抛光液废水				高媛媛	仝攀瑞	邹 力(3001)	
厌氧-局部循环供氧生物膜技术处理农村污水	吴 迪	高贤彪	李玉华	钱 姗	赵 秋	王立艳(3007)	
巯基化改性膨润土对重金属的吸附性能			李媛媛	刘文华	陈福强	赵秋香(3013)	
001 × 14.5 离子交换树脂对镍(II) 的吸附			杨金杯	陈玉成	余美琼	邱 挺(3019)	
树脂法去除并回收富营养化河涌水中的磷				叶志平	李焕文	林 颖(3025)	

生物脱氮与甲烷化耦合的 EGSB-BAF 工艺模拟	白 翠	卢培利	陈俊华	张代钧(3031)
Visual modflow 在模拟实验室含水砂槽中柴油运移特征中的应用	李珊珊	李建兵	张 文	李 薇(3041)
花生壳活性炭对亚甲基蓝的吸附特性	刘亚纳	汤红妍	朱书法	周 鸣 苗 娟(3048)
Fe(III)/丙酮酸钠体系光解过程中生成的 Fe(II) 浓度和 ·OH 的浓度变化	封享华	丁世敏	龙 飞	陈江科 封 丽(3053)
污泥活性炭对次甲基蓝废水的吸附	李依丽	李利平	尹 晶	梁文俊 李 坚(3059)
不同组合垂直潜流式人工湿地对高碳或氮污水的净化效果	林吉东	欧阳琰	张兴赢	胡安春(3065)
纳米 TiO ₂ /硅藻土光催化降解废水中二甲胺	李 霞	胡勤海	陈菊芬	刘 苗 宋雪斐 张荣臻(3073)
Mg/Al/Fe 型类水滑石焙烧产物吸附去除水中硫酸根离子	于 洋	岳秀萍	刘吉明	曹 岳(3079)
NaCl-丙醇双水相体系分离富集草甘膦生产废水中草甘膦铵盐	余 龙	余 凤	陈 俊	(3085)
黄河入海口水质评价与预测	张 冉	孙宝盛	王永亮	司志娟 李小芳 颜廷文(3089)

大 气 污 染 防 治

机动车单车扬尘浓度分布规律的模拟	张 瑶	张鸿雁	崔海航	焦丽慧(3094)
复合型异质结催化剂 AgI-BiOI/ZSM-5 可见光催化氧化 NO	杨婧玲	方泽坤	李淑贞	廖唯辰 龚挹彬 张 琼 朱林飞 何 春(3099)
PCF 型湿式脱硫除尘器入口结构优化	肖育军	李彩亭	李珊红	方 鑫 文青波 范春贞 郭官清(3105)
负载型氧化铁对高毒气体 PH ₃ 的催化分解	李俐俐	胡春红	朱自学	古红梅 张宝贵(3111)
焙烧条件对 CuO/ZSM-5 催化剂脱硫脱硝性能的影响	李富霞	任晓光	李 鹏	侯 伟 宋永吉(3117)
海水及浓海水吸收二氧化硫	赵小芳	侯纯扬	樊利华	崔振东(3123)
活性炭纤维吸附含溴甲烷气体的性能	李小波	关建建	黄庆林	张瑞峰 楼旭日 马 兰 周矛峰 王同华(3131)
微型舱模拟室内环境中活性炭净化甲醛的能力	聂灵波	厉国重	李迎州	谢华庆(3137)

固 体 废 物 处 置

城市生物质废物中温单级厌氧消化中试研究	刘 晓	王 伟	沈人杰(3143)
预煅烧铜渣与生物质混合催化气化	邓双辉	胡建杭	王 华 李娟琴 胡 威(3148)
废轮胎热解衍生油非加氢脱硫	吴 丹	周 洁	俞天明 吴圣姬 阳永荣(3153)
蛋白酶和 EDTA-2Na 协同作用对剩余污泥水解的影响	祖叶品	刘宏波	符 波 刘 和(3158)
基于 GA-BP 算法的含油污泥处理工艺参数优化	周利坤	刘宏昭	贾贤补(3165)
微波活化煤矸石反应活性及胶凝性能	张长森	邓育新	吴其胜(3170)
SDS 和 PVP 强化生物淋溶锰渣的性能	叶 骥	刘云国	郭一明 凡传明 胡新将(3175)
制浆厂污泥制备活性炭吸附剂	胡湛波	孙全民	王景全(3181)
添加垃圾焚烧飞灰冷固小球的工业烧结实验	吴国防	文 娟	刘清才 杨 剑 马东冉(3186)
罐底含油污泥萃取溶剂的选择与优化	巫树锋	刘发强	杨 岳 刘光利 梁宝锋 李常青 江 岩 王 军(3191)
600 t/d 新型污泥喷雾干化-焚烧示范工程污染物去除效果	汪翠萍	俞其林	高志永 盛守祥 吴昌敏 王凯军(3196)
管道沉砂用作雨水花园土壤改良材料的可行性	邓文珊	李 田	王建军(3203)
混合酶强化剩余污泥微生物燃料电池性能	张植平	刘志华	李小明 杨 麒 罗 琨 杨 慧 王子龙(3209)

土 壤 污 染 防 治

加油站场地油品渗漏探测及土壤污染评估	李凌波	戴 兵	周艳红	詹月辰 马荣华 韩丛碧(3216)
石油污染土壤中孤东原油及其馏分的微生物降解性能	刘 东	王加宁	付玉娥	孔 学 李美玉 史 权(3223)
不同处理条件对石油污染土壤植物修复的影响	唐景春	刘文杰	徐婷婷	朱富珍 李景义 侯 涛(3231)

环 境 生 物 技 术

猪场生物发酵床垫料卫生研究	刘向明	刘 婕	张妮娅	齐德生(3237)
石油降解菌产表面活性剂的条件优化	高小朋	姜 钊	高秀梅	王 跃 任桂梅 贺晓龙(3244)

CONTENTS

Defluoridation performance and application of granular Fe-Al-Ce trimetal oxide adsorbent by extrusion method for fluoride removal from groundwater	Zhao Bei Zhang Yu Dou Xiaomin Wu Xiaomei Yang Min(2801)
Comparison among extraction methods of microbial flocculant from excess sludge	Zhou Xiuxiu Dai Xiaoqing Wang Chunhui Qi Wanqi Li Xiangrong Xia Siqing Zhang Zhiqiang(2808)
Successive variations and entanglement characters of filamentous microorganisms in an aerobic granular sludge system	Li Zhihua Mo Dandan Zhao Jing Liu Jinmin Ji Xiaoqin(2813)
Nitrogen removal of BBFR-IVCW system treating micro-polluted water under different C/N ratios	Kong Lingwei He Feng Xia Shibin Xu Dong Tang Guangtao Wu Zhenbin(2818)
Abundance and distribution of particle-attached bacteria and free-living bacteria in Lake Taihu	Song Yuzhi Zhao Shuying Huang Jin Tang Xiangming Gao Guang Qin Boqiang(2825)
Performances of organic removal and nitrogen transformation in a continuous airlift reactor	Gao Linlin Wang Yao Wang Jun Zhang Jianbin Zhou Dandan Lin Yuanli(2832)
PVA-immobilized beads modified by carrageenan and bentonite	Zhong Chenghua Liu Peng Zhang Wendong Liu Jie Zeng Xuemei(2837)
Scrap iron combined with fly ash for treatment of phosphorus wastewater	Zhang Xin Zhang Huanzhen Liu Guangying Li Wei(2844)
Characteristics of malathion adsorption on four constructed wetland substrates	Su Fankai Yu Jingjie Zhou Shuo Zhong Yuan Sun Liping Wang Shaopo(2849)
Analysis of performances of microbial fuel cell-membrane bioreactor system	Wang Cuina Tian Yu Su Xinying Li Hui(2855)
Microwave assisted photocatalysis degradation of high concentration Active Black	Zhou Tuantuan Wang Sida Zheng Libing Qu Dan(2861)
Application of controlled release potassium permanganate and its application in treatment of landfill leachate	Wang Yanlong Wu Man Shi Ruoxin Dong Shuangshi Zhu Shengmei(2867)
Advanced treatment of dyeing wastewater using catalytic ozonation process	Lu Hongyu Ma Wencheng Zhang Liang Chen Zhiqiang(2873)
Behavior of produced wastewater preparation base on shearing emulsifier and dispersed phase droplet breakup	Sang Yimin Chen Jiaqing Liu Jun Liang Cunzhen(2877)
A statistical study of influent quality of wastewater treatment plant with separate sewer system in Kunming city	Sun Yingxue Wu Guangxue Hu Hongying Wu Yihui Guo Fang Guo Yumei(2885)
Pilot-scale study on A/O + MBR for maize deep processing wastewater	Xie Yawei Nian Yuegang Yin Qin Yan Haihong Xue Mei(2892)
Effects of carbon sources and water distribution on nitrogen and phosphorus removal for CMICAO process	Lei Xiaofen Zhu Guangcan Lü Xiwu Xu Zhuo(2899)
Assessment on extraction methods of EPS from hybrid membrane bioreactor	Chen Hua Hu Yisong Wang Xiaochang Jin Pengkang(2904)
Rainfall-runoff and pollution characteristics of tea garden in Xixi watershed within Jinjiang River basin	Li Changjia Pan Chengzhong Teng Yanguo(2909)
Determination of decay kinetic parameter for nitrifying biomass in activated sludge systems	Xing Can Zhou Zhen Gu Caixia Jiang Lingyan Yin Panji Zhang Xiaona Fang Zheng(2915)
Effect of coagulation on distribution properties of dissolved organic matters in secondary effluent	Cheng Lihua Wang Qi Han Ting Li Luyao Bi Xuejun Liu Changqing(2919)
Determination and influencing factors of four types of haloacetic acids in chlorine disinfection reclaimed water	Liu Yanwei Tian Yimei Huang Jianjun(2925)
Transformation and existing form of ammonia-N in a multi-media permeable reactive barrier	Yang Yingzhao Liu Fei Kong Xiangke Li Shengpin Ma Jianfei(2931)
Fabrication and characterization of a novel catalyst for Fenton-FBR	Deng Rui Wang Xiaojun Li Yuxiang(2937)
Biochemical characteristic along Biostyr biological aerated filter for municipal wastewater treatment	Wang Lin Dou Nasha(2942)
Selective adsorption of Pb ²⁺ on wood flour/chitosan graft acrylic acid-acrylamide resins in two heavy metal ion solutions	Xie Jianjun Yao Qingxin Han Xinqiang Wu Yiqiang Li Xingong(2947)
Impact of COD and ammonia separation on BAF performance	Zhang Zhenjiang Li Ji Lü Xiaomei Dong Wenyi Xie Chuanbo(2956)
Influence of temperature and C/N ratio on nitrogen removal in wastewater land bio-filtration process	Guo Yiling Wang Han Wang Sen Zhou Wuyi(2961)
Adsorption characteristics and preparation of straw black carbon	Xie Yong Gao Zhifeng Wang Hongyan Zhuo Xin Zheng Wenlei Liu Chao(2968)
Determination of trace lead in water using an eletrochemical sensor based on square wave anodic stripping voltammetry	Zhang Kedong Dou Junfeng Ding Aizhong Fan Fuqiang Wang Yingying(2973)
Decolorization of Reactive Black 5 by strain <i>Enterobactor</i> sp. S8 immobilized on <i>Luffa cylindrica</i> sponge	Ding Lina Chen Liang Huang Manhong Zhao Songjian(2979)
Static adsorption for Pb(II) and Cd(II) in water by material of in-situ capping	Kang Chao Yuan Xingzhong Zeng Guangming Xu Junyu Huang Huajun Lin Ningbo Wang Hou(2985)
Treatment of TNT red water by physico-chemical and biological technologies	Hao Zhi Ye Zhengfang Zhao Quanlin(2991)
Model and simulink of anaerobic baffled reactor treating sulfate organic wastewater based on back-propagation neural network	Wei Tianyin Jiang Yongrong Liu Kehui Liu Chengliang Zhang Wei(2997)
Polishing liquid wastewater treatment by micro-electrolysis-coagulation	Gao Yuanyuan Tong Panrui Zou Li(3001)
Treatment of rural domestic sewage with anaerobic and local circulating oxygen-supply biofilm technology	Wu Di Gao Xianbiao Li Yuhua Qian Shan Zhao Qiu Wang Liyan(3007)
Adsorption properties of thiol-functionalized bentonite for heavy metals	Li Yuanyuan Liu Wenhua Chen Fuqiang Zhao Qiuxiang(3013)
Adsorption of Ni(II) by ion exchange resin(001×14.5)	Yang Jinbei Chen Yucheng Yu Meiqiong Qiu Ting(3019)

Removal and recovering of phosphorus from eutrophic river water with resin	Ye Zhiping Li Huanwen Lin Ying(3025)
Modeling EGSB-BAF process capable of biological nitrogen removal and methanogenesis	Bai Cui Lu Peili Chen Junhua Zhang Daijun(3031)
Application of Visual modflow in modeling transport of diesel in aquifer sandy trough	Li Shanshan Li Jianbing Zhang Wen Wang Zhansheng Li Wei(3041)
Adsorption characteristics of methylene blue on peanut shell activated carbon	Liu Yana Tang Hongyan Zhu Shufa Zhou Ming Miao Juan(3048)
Concentration change of Fe(II) and ·OH produced during photolysis of Fe(III)-pyruvate system	Feng Xianghua Ding Shimin Long Fei Chen Jiangke Feng Li(3053)
Adsorption of methylene blue dye wastewater by sludge based activated carbon	Li Yili Li Liping Yin Jing Liang Wenjun Li Jian(3059)
Effects of various combinations of vertical-subsurface flow constructed wetlands on various influent high carbon or nitrogen loading wastewaters	Lin Jidong Ouyang Yan Zhang Xingying Hu Anchun(3065)
Photocatalytic degradation of dimethylamine in wastewater with nano-TiO ₂ /diatomite	Li Xia Hu Qinhai Chen Jufen Liu Miao Song Xuefei Zhang Rongzhen(3073)
Removal of sulfate ions from aqueous solution via adsorption on calcined Mg/Al/Fe hydrotalcite-like compounds	Yu Yang Yue Xiuping Liu Jiming Cao Yue(3079)
Separation and enrichment of glyphosate from glyphosate wastewater by NaCl/propanol aqueous two-phase system	Yu Long Yu Feng Chen Jun(3085)
Water quality evaluation and forecast of Yellow River estuary	Zhang Ran Sun Baosheng Wang Yongliang Si Zhijuan Li Xiaofang Yan Tingwen(3089)
Numerical simulation about concentration distribution of raising dust caused by a traveling vehicle	Zhang Yao Zhang Hongyan Cui Haihang Jiao Lihui(3094)
Photocatalytic reduction of NO using heterojunction AgI-BiOI/ZSM-5 composite under visible light	Yang Jingling Fang Zekun Li Shuzhen Liao Weichen Gong Yibin Zhang Qiong Zhu Linfei He Chun(3099)
Optimization of inlet structure for PCF wet desulfurization dust catcher	Xiao Yujun Li Caiting Li Shanhong Fang Xin Wen Qingbo Fan Chunzhen Guo Guanhong(3105)
Catalytic decomposition of highly toxic PH ₃ gas over supported Fe ₂ O ₃	Li Lili Hu Chunhong Zhu Zixue Gu Hongmei Zhang Baogui(3111)
Effect of calcination conditions on performance of desulfuration and denitrification of CuO/ZSM-5 catalyst	Li Fuxia Ren Xiaoguang Li Peng Hou Wei Song Yongji(3117)
Absorption of sulfur dioxide by seawater and concentrated seawater	Zhao Xiaofang Hou Chunyang Fan Lihua Cui Zhendong(3123)
Adsorption performance of CH ₃ Br-containing gas on activated carbon fiber	Li Xiaobo Guan Jianjian Huang Qinglin Zhang Ruifeng Lou Xuri Ma Lan Zhou Maofeng Wang Tonghua(3131)
Purification capacity of activated carbon for formaldehyde in simulating indoor environment of micro-chamber	Nie Lingbo Li Guozhong Li Yingzhou Xie Huaqing(3137)
Pilot-scale research of one-stage mesophilic anaerobic digestion of municipal biomass waste	Liu Xiao Wang Wei Shen Renjie(3143)
Catalytic gasification of pre-calcined copper slag and biomass mixture	Deng Shuanghui Hu Jianhang Wang Hua Li Juanqin Hu Wei(3148)
Non-hydrogenation desulfurization of derived pyrolytic oil from scrap tires	Wu Dan Zhou Jie Yu Tianming Wu Shengji Yang Yongrong(3153)
Effect of synergistically adding protease and EDTA-2Na on waste activated sludge hydrolysis	Zu Yebin Liu Hongbo Fu Bo Liu He(3158)
Parameters optimization of oil sludge treatment process based on GA-BP algorithm	Zhou Likun Liu Hongzhao Jia Xianbu(3165)
Reactivity and cementitious properties of coal gangue by microwave irradiation	Zhang Changsen Deng Yuxin Wu Qisheng(3170)
SDS and PVP enhanced biological leaching of manganese in manganese slags	Ye Ji Liu Yunguo Guo Yiming Fan Chuanming Hu Xinjiang(3175)
Preparation of activated carbon adsorbent derived from paper mill sludge	Hu Zhanbo Sun Quanmin Wang Jingquan(3181)
Industry experiment of hazard-free treatment for MSW incineration fly ash by meallurgical sintering	Wu Guofang Wen Juan Liu Qingcai Yang Jian Ma Dongran(3186)
Selection of solvents for extraction of crude oil tank bottom sludge	Wu Shufeng Liu Faqiang Yang Yue Liu Guangli Liang Baofeng Li Changqing Jiang Yan Wang Jun(3191)
Pollutant removal of a new spray drying/incineration demonstration project with capacity of 600 t/d for sludge treatment	Wang Cuiping Yu Qilin Gao Zhiyong Sheng Shouxiang Wu Changmin Wang Kaijun(3196)
Feasibility of applying sewer silt as soil permeability improver for rain garden facility	Deng Wenshan Li Tian Wang Jianjun(3203)
Enhanced performance of surplus sludge microbial fuel cells by additional mixed enzymes	Zhang Zhiping Liu Zhihua Li Xiaoming Yang Qi Luo Kun Yang Hui Wang Zilong(3209)
Leak detection of underground storage tank and assessment of site contamination at gas stations	Li Lingbo Dai Bing Zhou Yanhong Zhan Yuechen Ma Ronghua Han Congbi(3216)
Performance of microbial degradation of Gudong oil and its fractions in petroleum contaminated soil	Liu Dong Wang Jianing Fu Yue Kong Xue Li Meiyu Shi Quan(3223)
Effect of different treatment conditions on phytoremediation of petroleum-contaminated soil	Tang Jingchun Liu Wenjie Xu Tingting Zhu Fuzhen Li Jingyi Hou Tao(3231)
Research on hygiene of piggery bio-fermentation litter	Liu Xiangming Liu Jie Zhang Niya Qi Desheng(3237)
Optimization of conditions for oil-degrading bacteria producing surfactant	Gao Xiaopeng Jiang Zhao Gao Xiumei Wang Yue Ren Guimei He Xiaolong(3244)

添加垃圾焚烧飞灰冷固小球的工业烧结实验

吴国防^{1,2} 文娟^{3*} 刘清才¹ 杨剑¹ 马东冉¹

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆市排水有限公司, 重庆, 400012;
3. 中煤科工集团重庆研究院, 重庆 400039)

摘要 将垃圾焚烧飞灰添加进烧结冷固球团配料进行造球, 对冷固小球的成分及强度进行分析, 结果表明, 添加垃圾焚烧飞灰冷固小球化学组成稳定, 重金属浸出毒性远低于危险废物鉴别标准, 落下强度较基准期略微降低, 但符合运输、贮存的要求。并对添加了飞灰的冷固小球对其后续烧结、冶炼工序的影响进行分析, 结果表明, 用添加飞灰的冷固小球进行烧结所得烧结矿的转鼓强度、落下强度及常规化学成分较基准期没有太大变化, 添加飞灰进行造球、烧结, 对其后续冶炼工序的顺行几乎没有影响, 所带来的额外的环境污染微乎其微。

关键词 垃圾焚烧飞灰 冷固小球 冶金烧结

中图分类号 X799.5 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)08-3186-05

Industry experiment of hazard-free treatment for MSW incineration fly ash by meallurgical sintering

Wu Guofang^{1,2} Wen Juan³ Liu Qingcai¹ Yang Jian¹ Ma Dongran¹

(1. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Chongqing Drainage Co. Ltd., Chongqing 400012, China; 3. Chongqing Research Institute of
China Coal Technology & Engineering Group Corporation, Chongqing 400039, China)

Abstract MSW incineration fly ash was added into cold-bonded pellet for sintering. The chemical and physical properties of cold-bonded pellet was investigated. Experimental results show that the chemical composition of cold-bonded pellet was stable. The leaching toxicity of cold-bonded pellet is far lower than the leaching toxicity identification standard of hazardous waste. Its drop number is a little lower than that of the pellet without adding MSWI fly ash, but still meets the demand for transporting and sintering. The effect of adding MSWI fly ash in cold-bonded pellet on the sintering as well as smelting process were studied. The results indicated that the drum strength, the falling strength and the chemical composition of the sinter show no significant change when compared to the sinter without adding MSWI fly ash. The hazard-free treatment for MSWI fly ash by metallurgical sintering has little effect on the subsequent process of smelting, and brings very little extra environmental pollution.

Key words MSWI fly ash; cold-bonded pellet; metallurgical sinter

随着社会发展及人口膨胀, 城市生活垃圾产量的激增给占地面积大、处理周期长、处理效率相对低下的固体废弃物填埋处理带来了巨大压力, 由此, 垃圾焚烧逐渐取而代之成为城市生活垃圾最主要的处理手段。但与此同时, 垃圾焚烧所产生的垃圾焚烧飞灰产量也与日俱增。垃圾焚烧飞灰富含重金属及二恶英, 是公认的危险废弃物, 目前国内外对垃圾焚烧飞灰重金属污染的处置手段主要有水泥固化、化学药剂法、酸提取法及熔融固化法等。

相比于水泥固化法的增容、化学药剂及酸提取法昂贵的费用及复杂难处理的后续水污染治理等缺点, 熔融法操作简单, 在固定重金属的同时, 还可降

解飞灰中的二恶英, 不仅能达到处理后废物进一步减容, 而且费用相对较低, 不会额外产生其他水污染。另外, 熔渣可作为路基材料, 从而达到有效利用的目的。稳定的运行实例及相对成熟的研究, 使得飞灰熔融处理法得到普遍的青睐, 逐渐取代传统笨重的水泥固化法, 从而得到广泛应用, 国内外学者对

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目 (2010BB0234, 2009AB7201)

收稿日期: 2012-06-04; **修订日期:** 2012-08-01

作者简介: 吴国防 (1964~), 男, 博士研究生, 主要从事固体废弃物处理方面的研究。E-mail: wgf9725@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wenjuan119@163.com

其展开了多方面的研究: Sakai 等^[1] 熔融炉尾部采用气体冷凝和布袋过滤对熔融炉飞灰进行收集,研究了熔融过程重金属的迁移特性;Takaoka 等^[2] 通过在一定气氛和温度下分析垃圾焚烧飞灰熔融后熔渣中的重金属含量,从而分析熔融过程中重金属的迁移规律;张若冰^[3] 针对余杭热电 1#垃圾焚烧炉进行了变工况实验,研究垃圾焚烧过程中重金属污染物的分布特性;吴桢芬^[4] 就气氛对重金属迁移特性的影响进行了研究;Krik 等^[5]、陈德珍等^[6]、姜永海^[7] 研究了氯酸盐、废玻璃、硼砂、CaF₂、B₂O₃、CaCl₂、CaO 等添加剂对降低飞灰的熔融温度和提高重金属固化率的作用效果;李润东等^[8,9] 研究了冷却方式对熔融过程中重金属迁移分布的影响,并系统分析了熔融温度、气氛及添加剂等实验因素对二恶英分解的影响;杨剑等^[10,11] 对铁浴熔融法处理垃圾焚烧飞灰进行了实验室研究。

鉴于冶金烧结过程的反应温度可高达 1 250℃ 以上,二恶英等有机物质在此温度条件下可全部分解,重金属能被固定在熔渣中。根据前期对垃圾焚烧飞灰进行造球成型与铁浴熔融分离固化实验结果显示^[11]:铁浴熔融能有效的分离固化飞灰中重金属元素,90% 以上的 Mn、Fe 和 70% 以上 Cr、Cu 进入铁相,几乎 90% 以上的 Ti、Se、Ba 在渣相中富集,熔渣浸出毒性均能达标。铁浴熔融实验室基础研究结果验证了冶金烧结法处理垃圾焚烧飞灰的可行性。据此,尝试在不影响冶金烧结、冶炼生产工序正常运行的情况下,通过将垃圾焚烧飞灰以 3% 的质量比例与冶金物料混合制粒,再按约 6% ~ 8% 经电子秤配料进入烧结混合料,添加飞灰的冷固小球经烧结生产环节后,与其他烧结料一起成为烧结矿进入炼铁高炉生产工序(高炉冶炼温度 1 400℃ 以上)。

可以推测,由于添加飞灰的量非常低,对大批量的烧结、高炉冶炼生产不会产生影响,同时其所含重金属得到了分离固化;添加了飞灰的冷固小球在烧结冶炼过程中,低沸点重金属如: Pb、Zn、Cd 等挥发进入烧结烟气或高炉尾气中,高沸点重金属 Mn、Fe、Cr、Cu 等迁移进入烧结矿,随后在高炉冶炼过程中迁移进入铁水中。

通过考察添加了垃圾焚烧飞灰的冶金小球化学组成,抗压强度等理化性质,对后续烧结、冶炼工艺生产顺行的影响,以及对环境的影响,验证此法应用于冶金工业的可行性。

1 材料与方 法

实验采用垃圾焚烧飞灰的化学组成如表 1 所示。

冶金烧结方法处理垃圾焚烧飞灰的工业实验流程图见文献[11]。采用压缩空气将飞灰输送到冷固小球车间的密闭储料仓内,按 3% 的比例经配料称准确配料后进入密闭式双螺旋混料机内进行混合,再经皮带传送至专用圆盘造球机进行造球(混合后的物料水分约 6% ~ 7%)。造球机将物料造成 3 ~ 12 mm 的小球后经皮带机输送到小球成品仓进行固化储存(造球机造的小球含水约 11%),达到一定养护时间后从仓内放出,经皮带机输送到筛分机,经筛分后将大于 3 mm 的小球装入汽车运往烧结厂进行高温烧结,小于 3 mm 的小球返回到造球机前进行重新造球。

添加飞灰的冷固小球经汽车运输到烧结生产车间的接收槽,经电子秤配料后进入烧结混合料,其所占烧结混合料比例在 6% ~ 8%,故垃圾飞灰进入到烧结生产过程的比例仅为烧结料的 0.18% ~ 0.24%,其量微小。烧结生产过程是链带式的旋转烧结机,采用煤气点火,抽风负压烧结,其高温反应过程的温度为最高 1 250℃ 以上,因此二恶英在此温度条件下全部分解。添加飞灰的冷固小球经烧结生产环节后,与其他烧结料一起成为烧结矿进入炼铁高炉生产工序。

表 1 飞灰化学组成

Table 1 Chemical composition of fly ash (%)

成 分	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	平均值
SiO ₂	16.50	15.40	15.02	14.05	15.24
Al ₂ O ₃	5.92	5.80	5.66	5.42	5.7
Fe ₂ O ₃	5.40	5.09	4.55	4.29	4.83
CaO	17.73	21.57	26.54	29.31	23.79
MgO	4.59	4.20	3.90	4.00	4.17
SO ₃	9.97	8.57	7.75	6.36	8.16
K ₂ O	4.22	3.90	3.76	3.54	3.86
Na ₂ O	7.98	7.35	7.07	6.77	7.29
Cl ⁻	7.83	8.76	8.03	8.86	8.37
TiO ₂	1.04	0.94	1.06	1.05	1.02
Cr ₂ O ₃	0.13	0.12	0.13	0.11	0.12
MnO	0.12	0.12	0.13	0.14	0.13
CuO	0.09	0.08	0.07	0.08	0.08
ZnO	0.21	0.21	0.17	0.2	0.20
PbO	0.14	0.14	0.09	0.13	0.13

通过对添加垃圾焚烧飞灰的冷固小球及烧结矿化学组分分析、机械强度测试等,考察添加垃圾焚烧飞灰对冷固小球冶金性能的影响,及对后续烧结、冶

炼工序的影响。

2 结果与讨论

2.1 添加飞灰冷固球团的化学组成及浸出毒性分析

对重庆霖鸿环保科技有限公司冷固小球生产车间 2009 年 3 月、4 月实验期添加飞灰进行造球的冷固小球的化学成分及重金属含量分析,结果如表 2、表 3 所示。

表 2 添加飞灰冷固小球常规化学成分分析

Table 2 Chemical composition analysis of coad-bonded pellet adding with MSWI fly ash (%)									
编 号	SiO ₂	CaO	TFe	C	S	MgO	P	R 实	含水率
9-3	7.05	9.81	47.39	3.70	0.44	2.98	0.09	1.39	10.83
9-4	6.87	10.35	46.75	3.72	0.49	2.74	0.10	1.51	10.69

注:“R 实”代表实际的碱度。

表 3 添加飞灰冷固小球重金属成分分析

Table 3 Heavy metal composition analysis of coad-bonded pellet adding with MSWI fly ash (%)								
编 号	Mn	Cd	As	Pb	Zn	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
9-3	0.14	—	—	0.05	0.25	0.08	1.46	1.85
9-4	0.15	—	—	0.08	0.16	0.07	1.40	1.61

注:“—”表示未检测出成分含量。

由表 2、表 3 可知,添加垃圾焚烧飞灰冷固小球 TFe 的变化率低于 ±2%,R 的波动低于 ±0.15,含水率低于 13%,化学组成稳定,不会对混合料的成分带来波动。

根据危险废物的浸出毒性鉴别标准(GB 5085.3-2007),采用酸浸出法对添加不同比例垃圾焚烧飞灰及水泥的冷固小球重金属浸出毒性进行了分析,结果如表 3 所示。随着垃圾焚烧飞灰添加比例从 0.5% 增加到 3%,冷固小球的重金属浸出毒性没有太大波动,且均远低于危险废物浸出毒性鉴别标准。

表 4 添加飞灰冷固小球重金属浸出毒性分析

Table 4 Leaching toxicity analysis of coad-bonded pellet adding with MSWI fly ash							
添加剂组成 (水泥% + 飞灰%)	添加飞灰冷固小球重金属浸出毒性(mg/L)						
	Cd	Pb	Cu	Zn	As	Cr(总)	
8 + 0.5	0.086	0.184	0.089	0.030	0.004	0.150	
8 + 1.0	0.092	0.160	0.118	0.024	0.006	0.155	
8 + 2.0	0.081	0.191	0.103	0.030	0.007	0.141	
8 + 3.0	0.084	0.148	0.100	0.025	0.006	0.156	
标 准	1	5	100	100	5	15	

在冷固小球制备过程中,飞灰的添加量非常低,仅为 3%,由于条件所限,未能对其所含二恶英的量进行检测,但可以推测,其所含二恶英的量被大大稀释了。

2.2 添加飞灰冷固球团的机械强度

重庆霖鸿环保科技有限公司冷固小球车间提供的生产数据如表 5 所示。

表 5 添加飞灰冷固小球机械强度测试

Table 5 Mechanical strength test of coad-bonded pellet adding with MSWI fly ash				
编 号	落下次数 (个)	粒级组成 (%)		
		<3 mm	3 ~ 12 mm	>12mm
基准样	≥12	≤10	≥80	≤10
9-4	11.4	10.3	80.5	9.2
9-5	11.4	11	81.1	7.9

注:“落下次数”用来检验球团的强度是否达标

由表 5 可知添加垃圾焚烧飞灰制造的冷固小球落下强度较基准期略微降低,且制球过程所产生的粒径 <3 mm 及 3 ~ 12 mm 的冷固小球在粒级组成中所占比例偏高。但冷固小球的强度及粒级组成较基准期的变化不大,均符合运输、贮存的要求。

2.3 添加飞灰冷固球团对后续工艺的影响

2.3.1 对烧结工序的影响

采用基准期样品 1 个、实验期样品 5 个,对烧结矿重金属成分进行分析(实验室 X 射线荧光光谱分析法),测试结果如表 6 所示。

由表 6 可知,添加飞灰冷固小球经烧结后,烧结矿的常规化学成分较基准期没有太大变化,只有金属 Zn、Cr、K、Na 含量略微增加。

表 6 烧结矿重金属成分分析

Table 6 Heavy metal composition analysis of sintering ore (%)								
编 号	Mn	Cd	As	Pb	Zn	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
基准样	—	—	—	—	—	—	—	—
2-1	0.27	—	—	—	0.05	0.08	0.06	0.09
2-2	0.22	—	—	—	0.04	0.07	0.14	0.10
2-3	0.31	—	—	—	0.04	0.06	0.15	0.08
2-4	0.25	—	—	—	0.04	0.07	0.13	0.08
2-5	0.22	—	—	—	0.05	0.07	0.12	0.07

注:“—”表示未检测出成分含量。

表 7 烧结矿机械强度测试结果

Table 7 Mechanical strength test of sintering ore (%)			
试样号	转鼓强度		落下强度 F
	转鼓指数 T	抗磨指数 A	
基准样	73.40	3.88	93.60
2-1	76.86	4.07	92.72
2-5	80.31	3.97	85.50
2-3	81.86	4.32	91.72
2-4	83.58	4.65	87.60
2-5	79.31	4.28	92.70

采用国标 (GB8209-87) 进行烧结矿机械强度测定。根据重钢提供的烧结矿试样,按实际的粒度组成,分 40 ~ 25 mm、25 ~ 16 mm、16 ~ 10 mm 3 个粒级配制转鼓试样。取矿石试样 (7.5 ± 0.05) kg 放入转鼓内,以 25 r/min 的转速转动 200 转,然后将试料用机械摇筛分级,机械摇筛筛孔为 6.3 mm × 6.3 mm,反复次数为 20 次/min,筛分时间为 1.5 min 共往复 30 次。测得添加飞灰烧结矿的机械强度如表 7 所示。

由表 7 的测定结果可看出,实验期添加飞灰冷固小球烧结所得烧结矿的转鼓强度较基准期未添加飞灰冷固小球烧结所得烧结矿有所提高,其转鼓指数 T 增高明显,抗磨指数 A 增高较为微小;实验期的烧结矿落下强度较基准期烧结矿落下强度稍有降低。

2.3.2 对高炉冶炼的影响

表 8 列出了重庆钢铁厂 2009 年 1 月到 2009 年 4 月期间高炉运行的部分生产指标。通过对比基准期 (2009-01 至 2009-02) 与实验期 (2009-03 至 2009-04) 高炉运行生产指标,可以看出添加飞灰进行造球、烧结,对其后续冶炼工艺的顺行几乎没有影响。

表 8 重庆钢铁厂 2009-01 至 2009-04 高炉生产指标
Table 8 Blast furnace production index of Chongqing Iron & Steel Group Co. Ltd. during 2009-01 to 2009-04

日期	质量标准 (%)			利用系数 (t/ m ³ · d)	综合冶炼 强度(t/ m ³ · d)	折算 焦比 (kg/t)
	合格率	一级品率	优质铁比			
2009-01	100	60.06	89.24	2.500	1.256	394
2009-02	100	54.61	89.77	2.626	1.308	380
2009-03	100	61.47	90.02	2.588	1.300	391
2009-04	100	61.83	90.25	2.623	1.303	382

2.3.3 烧结烟气监测

由重庆市环境监测中心负责对重庆市重钢集团股份有限公司三烧机头排放废气、烟尘中的污染物进行监测,结果显示:添加飞灰的冷固小球与其他烧结配料混合进入烧结后,烧结烟气中 SO₂、NO₂ 浓度与未添加飞灰进行烧结的浓度基本没有差别;但是烟尘浓度明显增加,后通过添加飞灰稳固剂改善烟尘浓度,将烟气中的烟尘浓度控制在 100 ~ 300 mg/m³;烟气烟尘中重金属全量浓度均不超标,但烟尘浸出浓度 Pb 明显高于本底质,其他没有太大变化。由此可知,添加飞灰的冷固小球进入烧结工序,在基本不影响烧结顺行的基础上,所带来的额外的环境污染微乎其微。

3 结 论

对添加垃圾焚烧飞灰的冷固球团化学成分及其机械强度等性能进行监测分析,结果表明,冶金烧结法处理垃圾焚烧飞灰能够有效实现飞灰的无害化,对造球、烧结、冶炼等冶金工艺环节的顺行基本没有影响,所带来的环境影响与未添加飞灰进行烧结冶炼所造成的环境影响基本没有差别,验证了冶金烧结法处理垃圾焚烧飞灰的工业应用可行性。

由于条件有限,未对垃圾焚烧飞灰中二恶英类物质在冶金烧结过程中的分解转化进行分析讨论,将在未来研究中进一步展开。

参 考 文 献

[1] Sakai S. , Urano S. , Takatsuki H. Leaching behavior of PCBs and PCDDs/DFs from some waste materials. Waste Management, 2000,20(2) :241-247

[2] Takaoka M. , Takeda N. , Miura S. The behavior of heavy metals and phosphorus in an ash melting process. Wat. Sci. Tech. ,1997,36(11) :275-282

[3] 张若冰. 垃圾焚烧过程中典型重金属污染物的分布特性研究. 杭州: 浙江大学硕士学位论文,2002

Zhang R. B. Research on heavy metal distribution from municipal solid waste incineration. Hangzhou: Master's Degree Thesis of Zhejiang University, 2002 (in Chinese)

[4] 吴桢芬. 气氛对城市生活垃圾焚烧过程及重金属行为的影响研究. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文,2000

Wu Z. F. Experimental study of the effects of atmospheres on MSWI process and heavy metals behaviors. Kunming: Master's Degree Thesis of Kunming University of Science and Technology, 2000 (in Chinese)

[5] Kirk D. W. , Chan C. Y. , Marsh H. Chromium behavior during thermal treatment of MSW fly ash. Journal of Hazardous Materials, 2002,90(B) :39-49

[6] 陈德珍,张鹤声,龚佰勋. 垃圾焚烧炉飞灰的低温玻璃化初步研究. 上海环境科学, 2002,21(6) :344-349

Chen D. Z. , Zhang H. S. , Gong B. X. Preliminary study on MSWI fly ash vitrification at lower temperature. Shanghai Environmental Sciences, 2002, 21(6) : 344-349 (in Chinese)

[7] 姜永海. 焚烧飞灰熔融过程特性及添加剂的研究. 北京: 北京化工大学硕士学位论文,2005

Jiang Y. H. Research on characteristics of melting and solidification process and additive of ash from refuse incinerator. Beijing: Master's Degree Thesis of Beijing Chemical University,2005 (in Chinese)

- [8] 李润东, 池涌, 王雷, 等. 城市垃圾焚烧飞灰熔融动力学研究. 浙江大学学报(工学版), **2002**, 23(4): 498-503
Li R. D., Chi Y., Wang L., et al. Kinetic study of MSW incineration fly ash melting by DSC-DTA. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), **2002**, 23(4): 498-503 (in Chinese)
- [9] 李润东, 于清航, 李彦龙, 等. 烧结条件对焚烧飞灰烧结特性的影响研究. 安全与环境学报, **2008**, 8(3): 60-63
Li R. D., Yu Q. H., Li Y. L., et al. Effect of experimental condition on sintering characteristics of MSWI fly ashes. Journal of Safety and Environment, **2008**, 8(3): 60-63 (in Chinese)
- [10] 杨剑, 杨福云, 刘清才, 等. 铁浴熔融分离垃圾焚烧飞灰中重金属的试验研究. 材料与冶金学报, **2008**, 7(2): 139-142
Yang J., Yang F. Y., Liu Q. C., et al. Experimental investigation on separation of heavy metal elements from waste incineration fly ash by using molting iron bath. Journal of Materials and Metallurgy, **2008**, 7(2): 139-142 (in Chinese)
- [11] 杨剑, 文娟, 刘清才, 等. 垃圾焚烧飞灰冶金烧结处理工序. 重庆大学学报, **2010**, 33(11): 84-88
Yang J., Wen J., Liu Q. C., et al. Fundamental research of hazard-free treatment for MSW incineration fly ash by metallurgical sintering. Journal of Chongqing University, **2010**, 33(11): 84-88 (in Chinese)