

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峥, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翱, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究

张璐¹, 严建华¹, 杜长明², 陆胜勇¹, 李晓东^{1*}

(1. 浙江大学热能工程研究所能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275)

摘要: 利用直流双阳极等离子体实验装置熔融固化处理不同组成的模拟医疗废物. 研究了医疗废物熔融过程中重金属的迁移特性、熔渣的重金属浸出特性以及实验系统对医疗废物的处理效果. 结果表明, 经熔融处理得到的熔渣均呈典型的玻璃质结构, 微观结构紧密、光滑且无空隙; 所采用的等离子体对医疗废物中重金属有很好的固化效果, 固化率在 68.5% ~ 89.4% 之间; 重金属 Cd 的浸出浓度低于仪器最低检测限, 无法检出, Ni、Cr、Zn、Cu 和 Pb 在熔渣中浸出浓度均远低于国家规定的毒性浸出标准. 说明热等离子体技术是一种处理医疗废物的有效手段.

关键词: 热等离子体; 玻璃固化; 模拟医疗废物; 重金属; 毒性浸出试验

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2104-06

Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma

ZHANG Lu¹, YAN Jian-hua¹, DU Chang-ming², LU Sheng-yong¹, LI Xiao-dong¹

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The simulated medical wastes with different feed compositions were vitrified in a thermal plasma reactor, the core of which was a DC double anode plasma torch. The purpose of this study was directed towards the mobility characteristics of heavy metals contained during the vitrification process, the leaching behavior of heavy metals in the vitrified slag and the effectiveness of vitrification were investigated. Results indicated that the morphology of vitrified slag was amorphous state which showed the mostly glassy slag of SiO₂ and the microstructure of slag was very compact. This thermal plasma could be effectively utilized for encapsulation of heavy metal in wastes, as the vitrification ratio was between 68.5% - 89.4%. Toxicity characteristic leaching procedure results showed that the slag had an excellent resistance against leaching of heavy metal ions. Except that the leaching concentration of Cd was lower than the detecting limit, those of Ni, Cr, Zn, Cu and Pb were much lower than that specified in relevant national standards. These results indicate that, with the proper feed compositions, the thermal plasma disposition is an alternative technology with a highly efficiency to dispose medical wastes.

Key words: thermal plasma; vitrification; simulated medical wastes; heavy metal; toxicity characteristic leaching procedure

医疗废物具有直接或者间接感染性、毒性及其他危害性, 已被列入“国家危险废物名录”. 逐步严格的卫生管理规定和公众对传染病的日益关注, 使得对医疗废物的无害化、减量化处置越来越重要. 目前, 医疗废物的无害化处理方式主要可以分为消毒法、填埋法和焚烧法及新兴的等离子体法、电弧炉处理法、微波-高温高压蒸汽处理法及液态合金处理法等^[1]. 由于产生源的不同, 医疗废物的种类有很多. 医疗废物的种类对于处理技术的选择有着很重要的影响. 比如, 传统的焚烧法不适合用来处理不可燃废物, 需要进行预处理, 焚烧后的残余物需要进一步的处理后才能进行填埋^[2], 填埋场的负担不能得到有效地减轻. 热等离子技术作为一种近年来在工业中得到广泛应用的技术, 具有更高的温度和能量密度, 在处理混合形式的废物时有着诸多优势, 相对于其他处理方式, 在减重、减容、消解有机污染物、重金属稳固化及处理周期方面具有明显优势, 最终产物可

以实现玻璃化进一步进行资源化利用, 因此备受关注.

在美国、法国、日本和台湾, 已经建成了一些基于热等离子体技术的处理装置, 并已有商业化运行^[3,4]. 热等离子体高温熔融炉能把垃圾高温热解、燃烧及灰渣在 1 400℃ 以上熔融 2 个过程结合起来, 不但可以处理城市固体垃圾^[5], 而且还能有效地处理传统垃圾焚烧炉不能处理的特种垃圾, 同时还能有效抑制二噁英类毒性物质的形成, 废物经热等离子体高温熔融后变成玻璃状固体. Tzeng 等^[6]利用直流热等离子体实验装置对核废

收稿日期: 2011-08-03; 修订日期: 2011-09-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2011CB201500); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA06Z336, 2007AA061302); 能源清洁利用国家重点实验室开放基金项目 (ZJUCEU2009008)

作者简介: 张璐 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为热等离子体处理固体废物, E-mail: 20927121@zju.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lixd@zju.edu.cn

料进行无害化处理,得到具有高附加值的熔渣. Chu 等^[7]利用非转移弧热等离子体对玻璃钢、刺网及废玻璃按不同比例混合的废物进行玻璃化处理,并进一步处理制取微晶玻璃. Chen 等^[8]利用直流热等离子体实验系统对飞灰中的重金属和二噁英进行了有效固化和降解. Kim 等^[9]利用热等离子体技术对按不同比例混合的飞灰和污泥进行了熔融固化. Chu 等^[10]初步研究了 100 kW 非转移弧热等离子体实验系统处理医疗废物的可行性,但对熔渣特性、重金属固化及迁移特性方面的研究较少.

本研究针对我国中等城市医疗废物的主要构成,模拟一定的医废组成,采用由本实验室自行开发研制的双阳极直流等离子发生器为核心的热等离子体高温熔融炉^[11~15],对模拟医疗废物进行熔融处理,分析了熔渣的特性、重金属固化及迁移特性等,以评估其熔融减容化、无害化及资源化效果.

表 1 用于热等离子炉熔融的模拟医疗废物的组成/%
Table 1 Composition of SMW used in plasma furnace/%

组分	w (橡胶及塑料)	w (织物)	w (纸类)	w (棉竹)	w (玻璃)	w (金属)	w (其它) ¹⁾
SMW _{1/4}	50	17	5	5	14.4	3.6	5
SMW _{1/5}	50	17	5	5	15	3	5

1) 其它表示塑料及橡胶、织物、纸类、绵竹等可燃物的混合物

1.2 实验装置

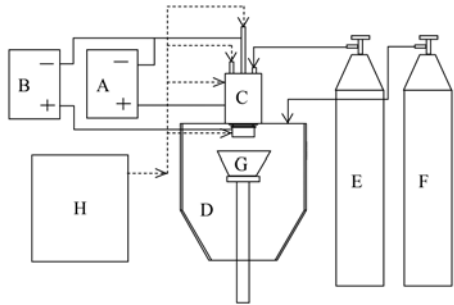
热等离子体高温熔融装置如图 1 所示. 该实验装置主要由双阳极等离子体喷枪、等离子体直流电源组 U_1 和 U_2 、高温熔融反应炉、供气系统、水冷系统及尾气处理系统组成. 本系统的核心装置是置于炉膛顶部的直流双阳极喷枪,它区别于常见的等离子喷枪,沿着阴极轴线分布有 2 个阳极,在工作时各有 1 组电源加载运行,双阳极结构可以起到增长和稳定电弧、提高电弧强度和减小电弧工作噪音的作用. 在 2 个阳极和阴极这 3 个喷枪的关键部件上均有一路水冷循环,以减缓喷枪的高温腐蚀,从而确保喷枪的稳定工作和延长使用寿命.

加载在等离子喷枪上的电源为经由三相交流电整流得到的直流电源,主要工作参数如下: U_1 的空载电压为 45 V,输出电流为 50 ~ 215 A; U_2 的空载电压为 85 V,输出电流为 50 ~ 215 A. 等离子体的工作气体主要为氩气、氮气或氮氩混合气体,在工作时气体流量为 10 ~ 20 L·min⁻¹. 本系统用于熔融医疗废物时的工作载气为氩气,体积流量为 10 ~ 15 L·min⁻¹, U_1 的工作电压约为 15 V,输出电流为 100 A; U_2 的工作电压为 50 V,输出电流为 100 A. 在稳

1 材料与方法

1.1 实验样品的制备

医疗废物尚未有统一的定义与分类标准,成分复杂,产量和各组分比例会随时间与地点的变化而产生较大的波动. 选取具有代表性的中等城市的医疗废物构成作为模拟医疗废物制备的主要依据,其中塑料与橡胶为 50% 左右,织物为 20% 左右,玻璃为 7% ~ 54%,纸类为 2% ~ 11%,棉竹为 1% ~ 8%,金属为 1% ~ 15%,其他为 0% ~ 20%^[1]. 基于目前对医疗废物物理组成研究的不统一性以及不可燃组分对熔渣特性的影响较大^[10],表 1 为实验所选用的 2 种模拟医疗废物(simulated medical wastes, SMW)的组成. 其中,SMW_{1/4}、SMW_{1/5}分别指不可燃组分中金属和玻璃质量比为 1:4、1:5 的模拟医疗废物,玻璃主要是输液瓶所使用的钠钙玻璃,金属是由医用不锈钢和医用铝制品按质量比 1:1 混合制备.



A. 第 1 组电源 U_1 ; B. 第 2 组电源 U_2 ; C. 等离子体炬;
D. 熔融炉; E. 氩气钢瓶; F. 氧气钢瓶; G. 坩埚; H. 水冷系统

图 1 热等离子体高温熔融装置

Fig. 1 Diagram of DC plasma jet furnace

定工作状态下,电弧长度约为 10 ~ 15 cm,电弧的宏观温度可以达到 1 400 ~ 1 500℃.

1.3 实验方法

称取模拟医疗废物 30 g 放入熔融炉的坩埚中,进行熔融处理. 开启等离子体发生器,调节等离子体装置操作参数,使等离子放电电弧处于稳定运行状态. 同时向熔融反应炉内通入氧气,使模拟医废中可燃组分能够完全燃烧. 实验熔融处理 20 min 后,拿出坩埚,熔渣在室温下自然冷却,并对熔渣特性进行

分析研究.

模拟医疗废物和熔渣中重金属含量的分析方法参照 USEPA METHOD 3050, 采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 混合酸液进行消解处理, 然后利用原子吸收光谱仪进行测量. 熔渣的主要组成成分由 X 射线能量色散谱仪 (EDX) GENESIS4000 型测得, 并用 X 射线衍射仪 (XRD) X'Pert Pro 型分析熔渣的晶相组成. 同时, 熔渣的毒性浸出方法 (TCLP) 浸出液中的重金属浓度由原子吸收光谱仪测得.

2 结果与分析

2.1 模拟医疗废物中重金属含量

模拟医疗废物中重金属含量见表 2. 由表 2 可知, $\text{SMW}_{1/4}$ 、 $\text{SMW}_{1/5}$ 中重金属含量最高的均是 Cr、Ni, 其余重金属含量都相对较少. 这是由模拟医疗废物组分特点决定的, 本实验模拟医疗废物中金属组分为不锈钢和铝制品, 而不锈钢中 Cr、Ni 的含量很高. 可知, 研究熔融过程中的重金属迁移特性是非常必要的.

表 2 模拟医疗废物中重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 2 Heavy metals content in SMW/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

重金属	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
$\text{SMW}_{1/4}$	3 587.7	5 614.6	6.5	8.1	1.8	5.0
$\text{SMW}_{1/5}$	3 252.2	5 219.9	8.5	8.8	2.0	5.5

2.2 熔渣的理化特性

2.2.1 熔渣的宏观特征及微观表面特性

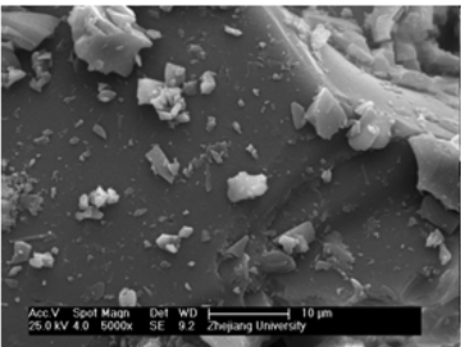
自然冷却后的熔渣非常坚硬, 表面结构致密, 色泽光亮, 外观形态如图 2 所示. 从中可以观察到 2 种熔渣的外观形貌均呈现类似玻璃状物质外观特征.

外观特征表明, 医疗废物经过等离子体高温熔融处理后能够很好地形成致密的熔渣. Chu 等^[10]的研究表明, 重力的作用下, 金属含量较多的医疗废物经热等离子体熔融后得到明显分离的玻璃体熔渣和金属块; 金属含量较少时得到没有分离的均质玻璃熔渣. $\text{SMW}_{1/4}$ 、 $\text{SMW}_{1/5}$ 中金属含量较少, 实验结果与其相一致.

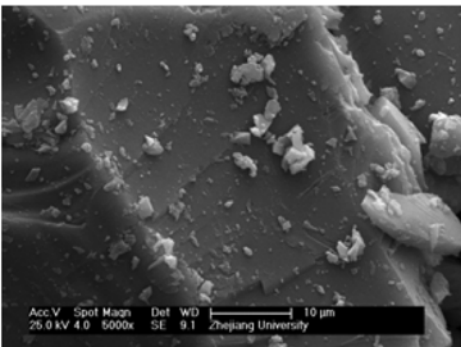


图 2 熔渣的外观特征
Fig. 2 Shape of vitrified slag

为了进一步地了解熔渣的表面特征, 将 $\text{SMW}_{1/4}$ 、 $\text{SMW}_{1/5}$ 的熔渣磨成粉末状, 利用具有高放大倍率的场发射电子扫描电镜 (SEM) 来研究熔渣的微观形貌特征, 见图 3. 由于熔渣的硬度很高, 可塑性较弱, 因此很难把熔渣的颗粒磨得很细. 在放大倍数为 5 000 的图片中可以看到, 还有一些颗粒的尺寸 $>10\text{ }\mu\text{m}$, 并且从中可以看出经过等离子体高温熔融处理后, 熔渣的表面是非常光滑的, 2 种医疗废物的熔渣显示出非常致密的表面结构. 说明医疗废物经过等离子体高温熔融固化处理后, 会形成非常致密的结构特征.



(a) $\text{SMW}_{1/4}$ 渣的 SEM



(b) $\text{SMW}_{1/5}$ 渣的 SEM

图 3 熔渣的 SEM 分析 (放大 5 000 倍)

Fig. 3 SEM of vitrified slag

2.2.2 熔渣的 XRD 分析及机械特性研究

熔渣的晶相结构 XRD 分析见图 4, 从中可见

$\text{SMW}_{1/4}$ 、 $\text{SMW}_{1/5}$ 的熔渣晶相结构类似, 均只有一个晶相 (MgFeAlO_4) 存在, 其他显示为无定形结构特

征,说明在空气中缓慢冷却的过程中,给部分晶体提供了一定的生成时间^[16],同时冷却速率对结晶行为也有一定的影响^[17].在玻璃熔体中, Al_2O_3 作为中间体氧化物,当碱金属或碱土金属氧化物提供“游离氧”时, Al^{3+} 能转化成 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 进入到 $[\text{SiO}_4]$ 的四面体网络结构中,使网络结构趋向紧密^[18].从结构上进一步表明医疗废物经等离子体高温熔融处理后的熔渣具有比较典型的玻璃态结构特征,从而也使医疗废物熔融产品的资源化利用如微晶玻璃成为可能^[19].

熔渣要实现资源化利用,首先要具备类似工业材料的一般基本机械特性.本研究采用阿基米德法测量熔渣的密度特性,并利用维氏硬度计和抗弯强度测试仪分别测量熔渣的维氏硬度和抗弯强度.各测量结果列于表3,从中可知, $\text{SMW}_{1/4}$ 熔渣密度为 $2.60\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,大于 $\text{SMW}_{1/5}$ 熔渣的密度 $2.52\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,这与Chu等^[10]的结论即熔渣密度随金属成分的提高而增大相一致.抗弯强度、抗压强度、维氏硬度等机械性能没有明显的变化规律.熔渣密度与普通钠钙硅玻璃的密度($2.5\sim 2.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)基本一致,其它机械性能参数跟玻璃态物质也很相近.这充分表明,本实验中的医疗废物熔渣呈现为玻璃状物质,熔渣产品资源化再利用研究更更具实用价值.

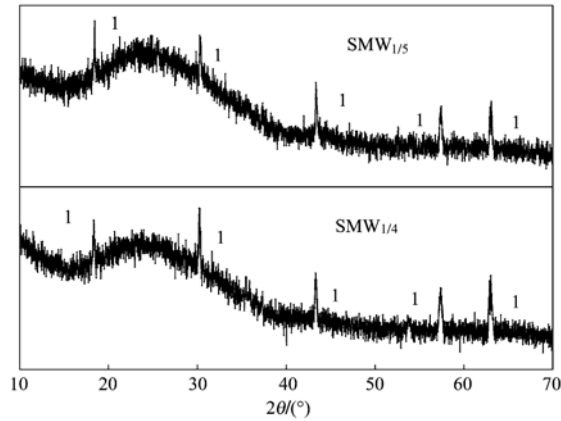


图4 熔渣的晶相结构(1-MgFeAlO_4)
Fig. 4 XRD analysis of vitrified slag

表3 熔渣机械特性

Table 3 Mechanical properties of vitrified slag				
机械特性	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	抗弯强度 /MPa	抗压强度 /MPa	维氏硬度 /GPa
$\text{SMW}_{1/4}$ 熔渣	2.60	74	176	4.23
$\text{SMW}_{1/5}$ 熔渣	2.52	61	185	4.18

2.3 熔渣的主要组成成分及重金属分析
2.3.1 熔渣的主要组成成分

图5给出了利用能谱分析仪进行分析测试 $\text{SMW}_{1/4}$ 熔渣主要组成的结果.能谱分析表明熔渣的主要组成为O、Si、Na、Al和Ca,其中Si、Na和Ca主要来自于钠钙玻璃,Al主要来自于金属中的医用铝制品.从图5中可以知道,O和Si的含量占了76.53%,再结合图4中XRD分析,可以进一步确认等离子体高温熔融处理后的熔渣为玻璃状物质,且其主要成分为 SiO_2 .对 $\text{SMW}_{1/5}$ 的熔渣分析与其相类似.

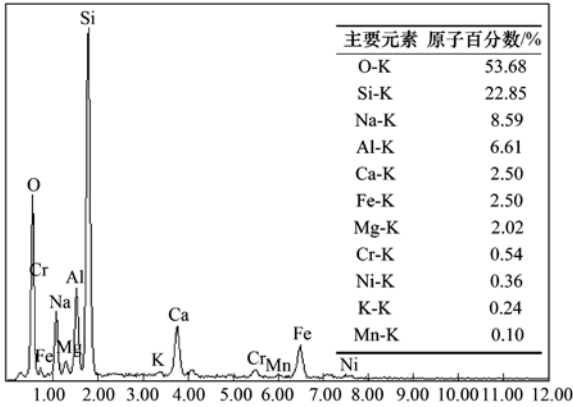


图5 $\text{SMW}_{1/4}$ 熔渣的主要组成
Fig. 5 Major composition of $\text{SMW}_{1/4}$ derived slag

2.3.2 熔渣重金属迁移特性分析

重金属的熔融挥发特性是一个非常复杂的过程.垃圾中的有机氯、无机氯的含量,熔融气氛,金属种类等对其都会有影响.因此对所得熔渣中的重金属含量进行检测是必要的.检测结果见表4.

表4 熔渣中重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Heavy metals content in vitrified slag/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						
重金属	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
$\text{SMW}_{1/4}$ 熔渣	3 887.28	7 324.84	12.265	8.181	2.297	8.462
$\text{SMW}_{1/5}$ 熔渣	3 367.63	6 559.50	10.334	9.786	2.261	6.858

为了方便研究等离子体熔融医废过程中的重金属的迁移特性,在此处定义固化率^[20]作为评估在此过程中的重金属迁移特性的指标.固化率定义如下:

$$R = \frac{M_{\text{slag}} \times C_{\text{slag}}}{M_{\text{SMW}} \times C_{\text{SMW}}}$$

式中, R 是SMW中重金属的固化率; M_{slag} 是熔渣的质量,mg; C_{slag} 是熔渣中的重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; M_{SMW} 是模拟医废的质量,mg; C_{SMW} 是SMW中的重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.计算结果见表5,从表中可以看出,熔渣中各种重金属的固化率均比较高($68.5\%\sim 89.4\%$ 之间),即医废经熔融后绝大部分的重金属都固化在熔渣中,尤其是Ni、Cd、Pb的固化率均

在 80% 以上. 主要原因在于随着氧气的浓度的提高,使得氯化反应受到阻碍,重金属的挥发受到抑制,重金属绝大部分以高熔点的氧化物形式存在于熔渣中;另一方面,在高温状态下,模拟医疗废物中的重金属与 SiO_2 、 Al_2O_3 之间会发生反应,形成稳定的不易挥发的化合物,同样限制了重金属的挥发^[21]. 实验结果表明等离子体高温熔融医疗废物过程中,对医废中重金属的固化效果明显,且绝大部分重金属被固化在熔渣中而没有挥发造成二次污染.

表 5 熔渣的固化率/%

重金属	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
SMW _{1/4} 熔渣	73.8	88.8	77.9	68.5	85.4	86.5
SMW _{1/5} 熔渣	73.7	89.4	86.1	79.1	80.9	87.9

2.4 熔渣重金属的浸出特性

重金属的毒性浸出方法采用美国环保署(EPA)制定的标准方法 TCLP. TCLP 浸取条件:选取浸取液(本实验选用醋酸溶液, $\text{pH} = 2.88 \pm 0.05$),采取的液固比为 20:1,振荡器的转速为 $(30 \pm 2) \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,振荡时间为 $(18 \pm 2) \text{ h}$. 振荡浸泡后通过孔径为 $0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的滤膜进行过滤,将滤液用原子吸收光谱仪进行分析.

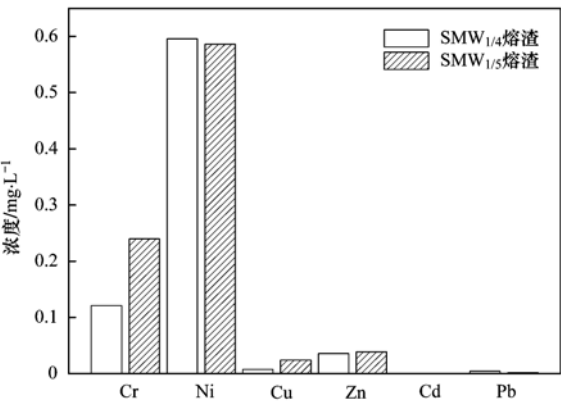


图 6 熔渣的重金属浸出特性

Fig. 6 Leaching behavior of heavy metals in vitrified slag

熔渣中的重金属浸出特性见图 6. 从中可以看到,SMW_{1/4}、SMW_{1/5}的熔渣中重金属 Cd 均未能监测到,低于仪器最低检测限. 重金属 Ni、Cr、Zn、Cu、Pb 在 SMW_{1/4}熔渣中浸出

浓度从高到低依次为 0.5957 、 0.1212 、 0.0346 、 0.0075 、 $0.0045 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 在 SMW_{1/5}熔渣中为 0.5863 、 0.2396 、 0.0388 、 0.0241 、 $0.0014 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浸出浓度远远低于国家环境保护部规定的

毒性浸出鉴别标准值^[22]. 结合表 5,结果表明经过等离子体高温熔融处理后的熔渣重金属固化效果很好.

综上所述,利用直流双阳极等离子体装置对 2 种模拟医疗废物直接进行熔融固化,得到均质玻璃体熔渣. 熔渣密度随着模拟医废中重金属含量的提高而增大,且熔渣的密度和机械性能参数与玻璃态物质很相近. 熔渣中重金属固化率比较高,其重金属浸出浓度远远低于国家的毒性浸出标准. 充分表明,熔渣产品资源化再利用研究更具实用价值.

3 结论

(1)模拟医疗废物经等离子体高温熔融后的熔渣具有非常致密的结构,呈现出典型的玻璃态特征,且熔渣密度和其它机械性能参数跟玻璃态物质也很相近.

(2)等离子体装置熔融处理医疗废物,其中各重金属的固化率在 $68.5\% \sim 89.4\%$ 之间,大部分被固化在熔渣中.

(3)等离子体熔融处理后得到的熔渣具有非常好的抗重金属浸出能力. Cd 的浸出浓度已低至无法检出, Ni、Cr、Zn、Cu 和 Pb 在熔渣中浸出浓度均远远低于国家规定的毒性浸出标准,可满足熔渣的资源化再利用.

参考文献:

[1] 肖志伟. 医疗废物典型组分物理化学特性认识及其热解焚烧特性的基础研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

[2] Gidarakos E, Petrantonaki M, Anastasiadou K, et al. Characterization and hazard evaluation of bottom ash produced from incinerated hospital waste [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **172**(2-3): 935-942.

[3] Venkatramani N. Industrial plasma torches and applications [J]. Current Science, 2002, **83**(3): 254-262.

[4] Bonizzoni G, Vassallo E. Plasma physics and technology: industrial applications [J]. Vacuum, 2002, **64**(3-4): 327-336.

[5] Vaidyanathan A, Mulholland J, Ryu J, et al. Characterization of fuel gas products from the treatment of solid waste streams with a plasma arc torch [J]. Journal of Environmental Management, 2007, **82**(1): 77-82.

[6] Tzeng C C, Kuo Y Y, Huang T F, et al. Treatment of radioactive wastes by plasma incineration and vitrification for final disposal [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, **58**(1-3): 207-220.

[7] Chu J P, Chen Y T, Mahalingam T, et al. Plasma vitrification and re-use of non-combustible fiber reinforced plastic, gill net and waste glass [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **138**(3): 628-632.

- [8] Chen M Z, Meng Y D, Shi J B, *et al.* DC arc plasma furnace melting of waste incinerator fly ash [J]. Plasma Science and Technology, 2009, **11**(1): 62-65.
- [9] Kim H I, Park D W. Characteristics of fly ash/sludge slags vitrified by thermal plasma [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2004, **10**(2): 234-238.
- [10] Chu J P, Hwang I J, Tzeng C C, *et al.* Characterization of vitrified slag from mixed medical waste surrogates treated by a thermal plasma system [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, **58**(1-3): 179-194.
- [11] 潘新潮, 马增益, 王勤, 等. 等离子体技术在处理垃圾焚烧飞灰中的应用研究 [J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1114-1118.
- [12] Wang Q, Yan J H, Tu X, *et al.* Thermal treatment of municipal solid waste incinerator fly ash using DC double arc argon plasma [J]. Fuel, 2009, **88**(5): 955-958.
- [13] Wang Q, Yan J H, Chi Y, *et al.* Application of thermal plasma to vitrify fly ash from municipal solid waste incinerators [J]. Chemosphere, 2010, **78**(5): 626-630.
- [14] Tu X, Wang Q, Yu L, *et al.* Diagnostic of novel atmospheric plasma source and its application to vitrification of waste incinerator fly ash [J]. Energy & Fuels, 2008, **22**(5): 3057-3064.
- [15] 王勤, 严建华, 潘新潮, 等. 利用热等离子体熔融垃圾焚烧飞灰 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2011, **45**(1): 141-145.
- [16] 王勤. 利用热等离子体熔融垃圾焚烧飞灰制备微晶玻璃的实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [17] Francis A A, Rawlings R D, Boccaccini A R. Glass-ceramics from mixtures of coal ash and soda-lime glass by the peturgic method [J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, **21**(12): 975-980.
- [18] 安春国, 蒋旭光, 李春雨, 等. 医用玻璃的熔融特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, **29**(20): 92-98.
- [19] Colombo P, Brusatin G, Bernardo E, *et al.* Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2003, **7**(3): 225-239.
- [20] Chiang K Y, Hu Y H. Water washing effects on metals emission reduction during municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash melting process [J]. Waste Management, 2010, **30**(5): 831-838.
- [21] 孙路石, 陆继东, 李敏, 等. 垃圾焚烧中 C_d 、 P_b 、 Z_n 挥发行为的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, **24**(8): 157-161.
- [22] 潘新潮. 直流热等离子体技术应用于熔融固化处理垃圾焚烧飞灰的试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人