

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用水安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究

虎雪姣, 卜龙利*, 梁欣欣, 孟海龙

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 实验考察了 Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生效果, 分析了固定床温度场分布及催化剂多次再生后的吸附穿透曲线, 并对 Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂进行了比表面积和表面形貌的表征测试. 研究表明, 微波功率 117 W、空气流速 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 和催化剂用量 800 g 下, 吸附催化剂的微波再生效果良好, 脱附甲苯在催化剂表面被氧化降解并使催化剂恢复吸附能力. 再生时床层温度水平截面上由内向外缓慢降低, 垂直方向从下而上逐渐升高, 并在床层中上部达到最高的 250 ~ 350°C. 6 次吸附穿透曲线和催化剂表征证实, 微波原位再生时催化剂表面存在烧结与团聚现象, 催化剂的比表面积和微孔体积有所减少, 从而缩短了催化剂的穿透时间; 微波再生 2 次后, 催化剂结构趋于稳定, 吸附穿透时间维持在 70 min 左右. 研究发现, 催化剂表面形貌和孔径的变化与床层温度场的分布呈正相关关系.

关键词: Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂; 微波原位再生; 床层温度分布; 穿透曲线; 表征

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3086-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.08.049

Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature

HU Xue-jiao, BO Long-li*, LIANG Xin-xin, MENG Hai-long

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Microwave in-situ regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM catalyst adsorbed toluene, distribution of fixed bed temperature, adsorption breakthrough curves of the catalyst after several regenerations and characterizations of the catalyst by BET and SEM were investigated in this study. The research indicated that regeneration effect of the catalyst adsorbed was excellent under conditions of microwave power 117 W, air flow $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ and catalyst dosage of 800 g. Toluene desorbed was oxidized onto the surface of the catalyst, and the adsorption capacity of the catalyst was recovered simultaneously. Under microwave irradiation, bed temperature decreased slowly from inside to outside in horizontal level, and increased gradually from down to up in vertical level so that the highest temperature reached 250-350°C at the upper sites of the bed. Sintering and agglomeration occurred on the surface of the catalyst in the course of regeneration so that the special surface area and micropore volume of the catalyst were reduced and breakthrough time was shortened, which was verified by six adsorption breakthrough curves and related characteristics of the catalyst. However, the structure of the catalyst was steady after two regenerations, and adsorption breakthrough time was kept at 70 min. The result showed that the changes of surface morphology and pore structure were positively correlated with the distribution of bed temperature.

Key words: Cu-Mn-Ce/ZSM catalyst; microwave in-situ regeneration; distribution of bed temperature; breakthrough curve; characterization

作为大气污染物之一的挥发性有机化合物 (VOCs), 它能够引发酸雨、破坏臭氧层和产生光化学烟雾^[1], 其苯系物和多环芳烃类物质能够引起人类精神疾病、呼吸道疾病甚至癌症^[2], 同时 VOCs 还是 PM_{2.5} 和二次有机气溶胶的前驱物^[3], 它的存在已经越来越严重地威胁到大气环境质量和人类健康. 因此, 大气中 VOCs 的治理成为当前环境保护研究的热点之一.

VOCs 废气治理技术有直接燃烧法、冷凝法、吸收法^[4,5] 和吸附法^[6,7] 等, 吸附法因工艺成熟、操作简单、去除率高而被广泛应用, 尤其是针对大气量、低浓度和没有回收利用价值的 VOCs 废气治

理. 然而, 吸附饱和的吸附剂需要再生才能恢复吸附能力, 目前主要的再生方法有溶剂再生、电化学再生^[8,9]、热再生^[10]、湿式氧化^[11]、超临界流体萃取^[12] 和微波再生^[13] 等. 微波辐照可以引发分子水平的振动和快速的热反应^[14], 其特点是再生时间短、能耗小和设备简便等^[15~21], 因此采用微波原位再生无疑简捷高效. 目前微波再生吸附剂的国内外研究主要针对活性炭^[22~24], 但高温有氧情况下活性炭容易燃烧而引发火灾, 活性炭的微波再生需在惰

收稿日期: 2014-12-23; 修订日期: 2015-03-25

作者简介: 虎雪姣(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制化学, E-mail: 573395868@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: bolongli@xauat.edu.cn

性气体保护下进行,这增加了活性炭的再生成本。分子筛也是一种高效的多孔吸附剂,其主要成分为氧化铝和二氧化硅,因此高温有氧条件下再生不会燃烧,同时分子筛也是性能优异的催化剂载体^[25-27],课题组前期以 5A 分子筛为载体,负载过渡金属 Cu、Mn 和稀土元素 Ce,制备出吸附、吸波型 Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂,研究发现该催化剂微波辅助催化氧化 VOCs 效果良好^[28-34]。相比于直接的催化氧化,吸附-原位再生技术更经济和适用于实际应用,然而吸附饱和催化剂微波原位再生时床层温度场的分布及其对催化剂再生效果影响的研究对该技术的推广至关重要,但目前关于这方面的研究还鲜见报道。

本文以典型 VOCs——甲苯为吸附对象,研究固定床反应器中 Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生效果,优化条件下考察床层温度场的分布,分析催化剂结构与吸附性能的变化,并对再生过程中脱附甲苯的微波辅助催化氧化产物和降解途径进行了推测。

1 材料与实验方法

1.1 材料与仪器

钙型 5A 分子筛, $\Phi 3 \sim 5$ mm 球形颗粒,天津科密欧化学试剂开发中心;甲苯、硝酸铜、硝酸锰,分析纯,天津福晨化学试剂厂;硝酸铈,分析纯,上海山浦化工有限公司。

电子天平,FA/JA 型,上海民桥精密科学仪器有限公司;恒温水浴振荡器,THZ-82 型,金坊市丹阳门石英玻璃厂;电热鼓风干燥箱,101-3AB 型,天津市泰斯特仪器有限公司;马弗炉,SX-4-10 型,北京科伟永兴仪器有限公司;500 μ L 微量进样器,上海高鸽工贸有限公司;MCL-2 型微波实验装置,四川大学无线电系;气相色谱仪,6890N 型,美国安捷伦科技公司。

1.2 催化剂制备与表征

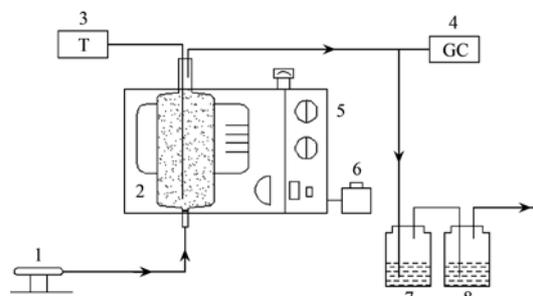
吸附吸波型 Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂的制备采用传统浸渍法^[28],按 5A 分子筛:铜:锰:铈质量比为 20:1:1:0.33^[29],将 5A 分子筛 800 g 浸入 1 600 mL 的硝酸铜、硝酸锰及硝酸铈混合溶液中,混合液室温下 150 $r \cdot \min^{-1}$ 振荡 6 h,电炉加热蒸干浸渍液,烘箱内 106 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥 12 h,马弗炉中 500 $^{\circ}\text{C}$ 高温下焙烧 4 h,冷却后即可制得所需催化剂。

催化剂比表面积及孔径分布采用北京金埃谱公司 V-Sorb 2800P 型物理吸附仪测定,表面形貌采用

日本电子株式会社 JSM-6510LV 型扫描电镜予以观察。

1.3 实验装置与方法

实验装置如图 1 所示,Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂装填于直径 110 mm、高 150 mm 和壁厚 3 mm 的石英固定床反应器内,反应器垂直置于功率连续可调的 MCL-2 型微波装置中,测温与进气装置等按图 1 连接并检查系统气密性。实验首先进行气态甲苯的催化剂吸附,吸附饱和后启动微波装置进行原位再生,出口气体通过气相色谱仪定量测定甲苯浓度,尾气经甲醇溶液和碱液依次吸收净化后排空,以防止二次大气污染^[35]。图 2 为催化剂原位再生时床层温度测量点的分布,床层温度由热电偶测温装置进行测定。



1. 空气泵; 2. 石英反应器; 3. 热电偶温度计; 4. 气相色谱; 5. 微波发生器; 6. 变压器; 7. 甲醇溶液; 8. 碱吸收液

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Experimental apparatus

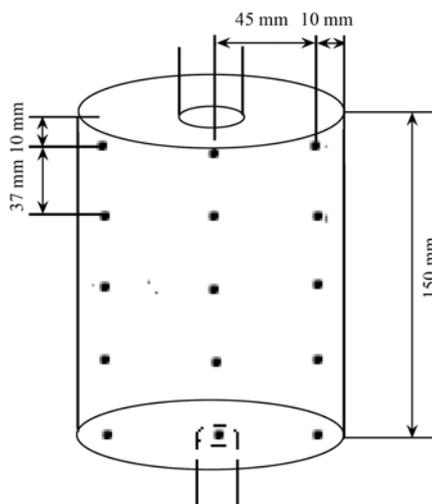


图 2 反应器内温度测量点示意

Fig. 2 Schematic of measuring points of temperature in reactor

1.4 分析方法

气相色谱定量分析甲苯的操作条件为:柱箱温度以 20 $^{\circ}\text{C} \cdot \min^{-1}$ 的速度由 100 $^{\circ}\text{C}$ 升至 180 $^{\circ}\text{C}$ 并保留 3

min,汽化室温度为 190℃,检测器温度 300℃;载气为氮气,进样量 300 μL ,分流模式进样,分流比 50:1.

气相色谱-三重四极杆质谱联用仪(GC-MS/MS, Agilent, USA)定性分析再生时甲苯氧化产物,参数设置为:载气(氮气,99.999%)流速 1.2 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;色谱柱 HP-5MS(325℃,30 $\text{m}\times 250\ \mu\text{m}\times 0.25\ \mu\text{m}$),进样口温度 270℃,手动进样不分流恒流模式下运行,进样量 1 μL .质谱离子源温度 230℃,离子源电压 -70 eV,扫描范围(m/z) 50 ~

450.升温程序为:起始温度 35℃,保持 2 min;然后以升温速率 15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 250℃,保持 7 min.

2 结果与讨论

2.1 微波原位再生时的参数影响

吸附饱和催化剂再生时的条件参数有微波功率、空气流速和催化剂用量,实验首先考察了参数变化对催化剂再生效果和床层温度的影响,结果如图 3 所示.

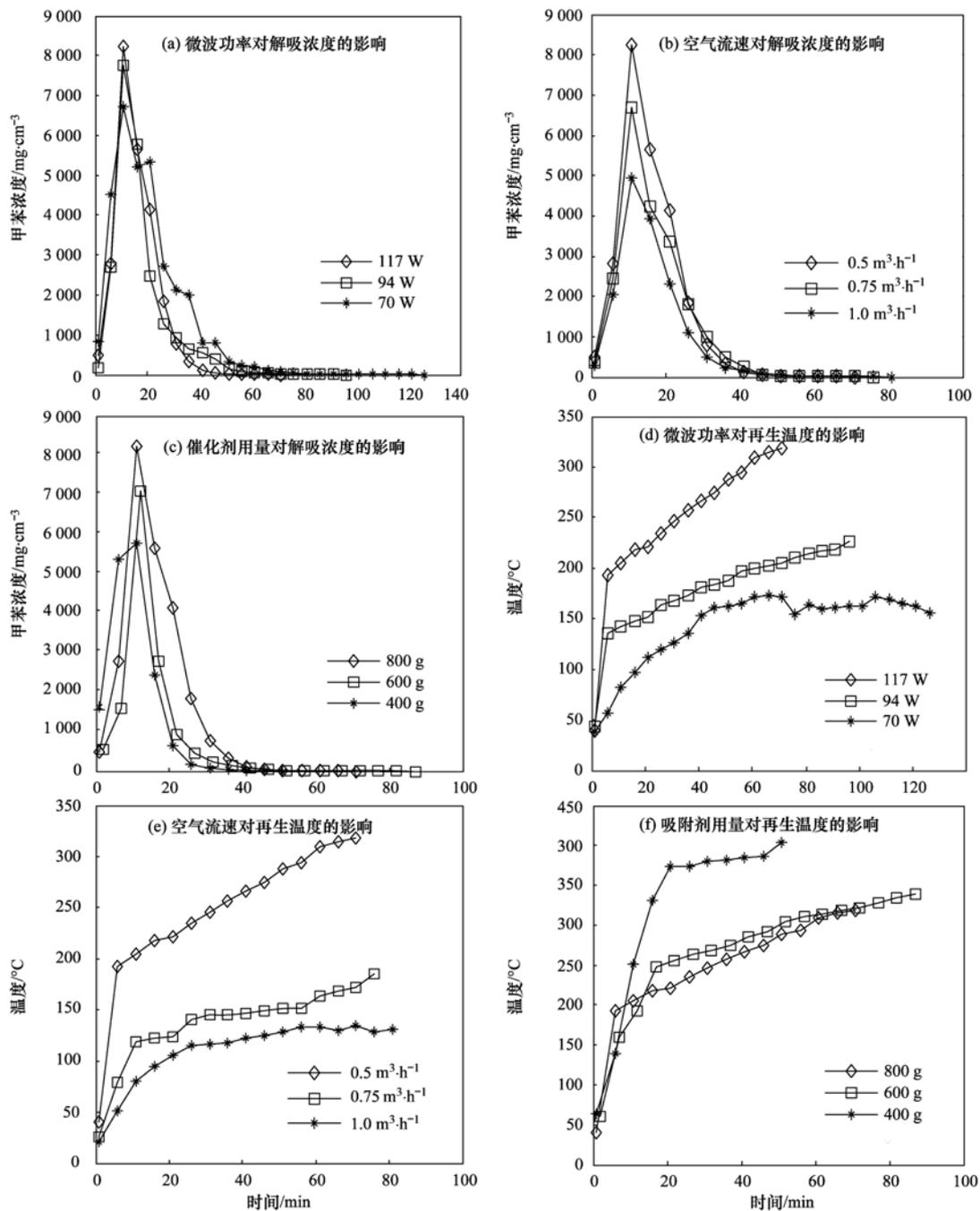


图 3 不同参数条件变化对催化剂再生效果的影响

Fig. 3 Effects of different parameters on catalyst regeneration

图 3(a) 为吸附剂用量 800 g、空气流速 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下,不同微波功率辐照时出口气体中甲苯浓度的变化情况. 可以看出,微波辐照初期,甲苯迅速解吸而使得出口浓度急剧升高,此时解吸量大于降解量,再生 10 min 时浓度达到最高值;此后随着解吸量的减少和氧化降解量的增加甲苯浓度又迅速下降,再生 50 min 后出口甲苯浓度几乎为零,吸附催化剂再生完成. 相比于功率 70 W 和 94 W,117 W 提供的能量更多,催化剂吸波后迅速升温,10 min 时床层温度 [图 3(d)] 接近 200°C ,30 min 达到 230°C . 此前有研究报道了微波辅助催化氧化甲苯的 T_{95} 为 230°C ^[32],因此高温既有利于甲苯的脱附,也有利于其催化氧化,同时也缩短了再生时间.

催化剂微波原位再生时通入空气的作用有二:一是带出解吸物,二是为催化氧化提供氧气,空气流速变化的影响见图 3(b) 和图 3(e). 可以看出,在微波功率 117 W 和催化剂用量 800 g 条件下,图 3(b) 的浓度变化趋势及原因与图 3(a) 相似,气速越小,出口浓度峰值越大,同时床层温度也越高. 分析认为,空气流速增大,甲苯浓度被稀释而减小,但提供了更充足的氧气而使甲苯氧化降解完全;另外,空速增大,带走的热量也增多,从而降低床层温度,又不利于催化氧化反应的进行. 因此,低空气流速可延长甲苯在床层的停留时间,从而有利于甲苯的降解和催化剂的再生.

微波功率 117 W 和空气流速 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下,不同催化剂用量的实验结果如图 3(c) 和图 3(f) 所示. 可以看出,800 g 催化剂再生初期解吸出的甲苯浓度最高,这与其吸附的甲苯量最大有关,随后浓度迅速下降,解吸甲苯被氧化分解,40 min 后催化剂再生完成. 由于催化剂负载的铜、锰具有催化活性而能促进氧化反应^[36],同时铈又具有一定的储氧、释氧能力,在氧化还原反应中存在 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ 的相互转化,可向活性相提供氧并改善活性位间的电子传递,从而进一步提高了催化剂的催化活性^[34]. 虽然 400 g 催化剂再生时的床层温度高于 600 g 和 800 g,但过高的温度容易造成催化剂烧结而不利于催化剂重复使用,800 g 的床层温度已大于甲苯的 T_{95} 值,因此可保证甲苯的氧化降解.

2.2 床层温度场的分布特性

通过 2.1 节的实验研究,选择微波功率 117 W,空气流速 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 和催化剂用量 800 g 作为优化再生条件,在此基础上考察了吸附饱和和催化剂再生时床层温度场的分布,结果如图 4 所示.

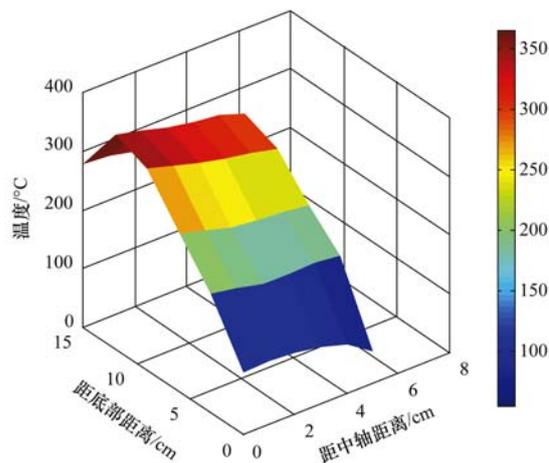


图 4 催化剂床层温度分布

Fig. 4 Distribution of bed temperature

由图 4 可知,在床层垂直截面上,从下向上床层温度逐渐升高,并在中上层部位达到最大值,上层出口处温度又有所下降. 分析认为:一方面,微波在加热催化剂的过程中伴随着载气不断吹扫,热量从下向上流动而导致下低上高的温度分布,同时由于下层和上层直接与冷空气和外部环境接触而出现最低温度和温度下降的现象;另一方面,随着床层温度的升高,甲苯氧化反应加剧,氧化放热量增大,进一步加大了下低上高温度分布的趋势. 由图 4 可见,下层至中下层温度在 $150 \sim 200^\circ\text{C}$,吸附甲苯以解吸为主并伴随一定量的氧化降解,同时一些甲苯分子依旧附着在催化剂上;中层至上层温度在 $250 \sim 350^\circ\text{C}$,达到了微波辅助催化氧化甲苯 T_{95} 的温度^[32],甲苯催化氧化反应充分进行.

床层水平截面上,中心点处温度最高,距离中心点越远温度越低,呈现出内高外低的温度梯度. 一方面,微波对催化剂床层是内外同时加热,而外层与低温的微波腔体接触(空气透波缘故),从而形成温差而导致热量从内向外扩散;另一方面,颗粒催化剂填充床的“壁流效应”使得外层气流量大于内层,从而带走更多热量,进一步加剧了内高外低的温度分布.

2.3 再生催化剂稳定性分析

为探究催化剂微波原位再生后的吸附性能及重复利用效果,对催化剂进行了 7 次吸附与 6 次再生实验,图 5 和表 1 分别为再生催化剂的 7 次吸附穿透曲线和穿透时间.

实际工程中,当出口浓度 c_t 为进口浓度 c_0 的 5% 时,可认为吸附床被穿透;当出口浓度 c_t 为进口浓度 c_0 的 95% 时,则认为吸附床达到饱和^[33]. 由图 5 和表 1 可以看出,随着再生次数的增加,催化剂

表 1 再生催化剂的 6 次穿透时间

Table 1 Six breakthrough time of the regenerated catalyst

穿透曲线次数	0	1	2	3	4	5	6
穿透时间/min	100	80	70	70	70	60	70

吸附穿透时间逐渐减少;再生 2 次后,催化剂的吸附穿透时间保持在 70 min 左右. 分析认为,前 2 次再生时,催化剂孔结构会因床层的高温而发生改变,同时床层底部低温处的催化剂存在甲苯吸附与脱附的平衡,因此吸附穿透时间下降明显;再生 2 次后,催化剂结构受高温的影响变小,底层催化剂的吸附也趋于稳定,因此 3~6 次的吸附穿透时间几乎不变而稳定在 70 min,与初始催化剂的吸附能力相比下降了 30%.

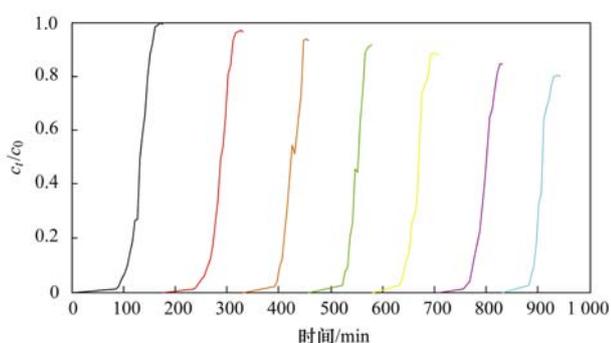


图 5 吸附-再生催化剂 7 次吸附穿透曲线

Fig. 5 Seven adsorption-breakthrough curves of the adsorption-regeneration catalyst

2.4 甲苯降解产物分析

催化剂微波原位再生时,尾气经甲醇溶液和碱液吸收净化后排空,甲醇吸收液氮吹浓缩后进行 GC-MS/MS 测试以定性分析甲苯的降解产物,其目的是了解甲苯的降解途径及产物毒性,结果如图 6 所示.

可以看出,吸收液中含有一定浓度的甲苯,同时苯甲醛和苯甲酸也被检测出. 由于毒性更强的苯等中间产物没有检测到,而甲苯的氧化产物苯甲醛和

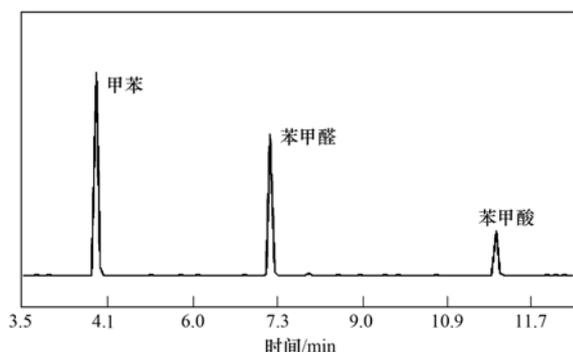


图 6 甲醇吸收液总离子色谱图

Fig. 6 Total ion chromatogram of methanol absorbing liquid

苯甲酸毒性较甲苯更小,因此催化剂再生过程中尾气毒性减小,经有机溶剂和碱液吸收后可达标排放. 通空气条件下,催化剂上负载的 Cu^{2+} 被还原为 Cu^+ , Mn^{4+} 被还原为 Mn^{3+} 、 Mn^{2+} , 金属价态的转换提供了电子的转移;同时 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 的转化增强了催化剂储氧、释氧的能力,使得富氧情况下活性物质对电子的利用极大提高,很好地促进了甲苯的催化氧化^[33]. 甲苯降解途径如图 7 所示,甲苯首先被氧化成苯甲醛,进而氧化为苯甲酸,最终被降解成 CO_2 和 H_2O .

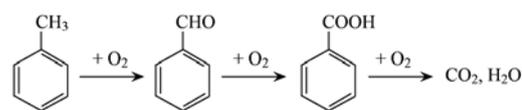


图 7 甲苯降解途径

Fig. 7 Degradation pathway of toluene

2.5 催化剂表征

为揭示再生催化剂吸附性能变化的原因,实验对再生催化剂进行了比表面积及孔径测试,结果如表 2 所示.

由表 2 可知,再生催化剂的比表面积、孔体积和平均孔径均小于新制备催化剂,且随着再生次数的增加而显著减小,表明微波原位再生对催化剂孔结构有明显的影响. 从中可见,无论一次再生或六次再生后的催化剂,其比表面积、孔体积和平均孔径值在整个反应器内从下层至中层均逐渐增大,中上层突然变小而上层最大. 分析认为,下层催化剂由于甲苯的吸附而其值最小;随着床层温度从下至上的升高,甲苯解吸和降解增强,因此中下层和中层催化剂的比表面积、孔体积和平均孔径逐渐升高;中上层甲苯氧化降解反应完全并放出大量反应热,此处床层温度达到最高,催化剂结构受温度的影响最明显,可能存在表面烧结、孔塌陷和活性组分团聚等现象,从而导致孔结构参数的下降;上层催化剂温度有所降低(见图 4),其高温负面作用的影响减少,但足够的温度仍可保证甲苯的脱附与氧化,因此具有最大的比表面积、孔体积和平均孔径值.

为进一步揭示催化剂结构受温度变化的影响,实验对新制备催化剂和再生催化剂的表面形貌进行了观察,结果如图 8.

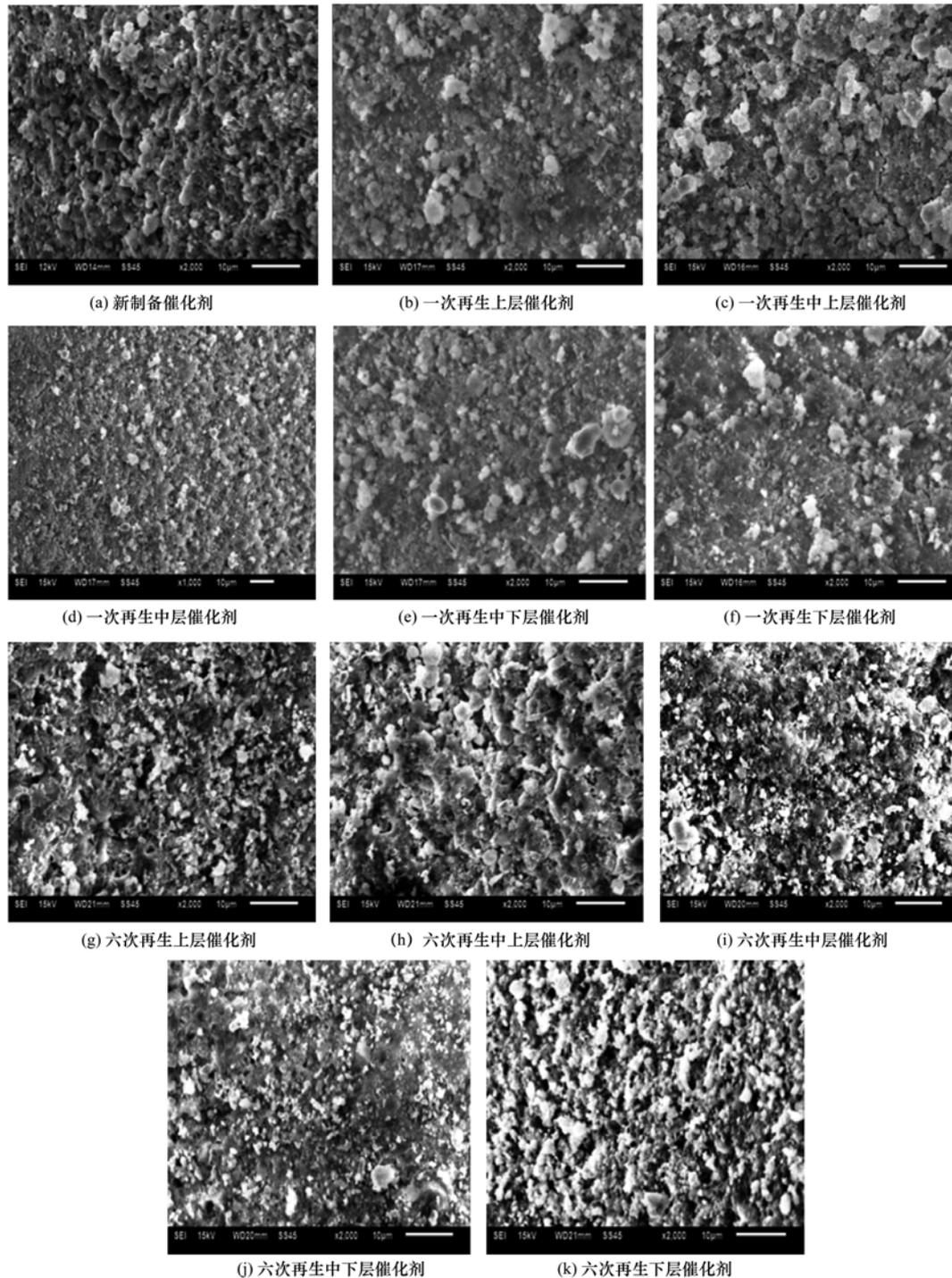


图 8 再生催化剂扫描电镜图

Fig. 8 SEM images of regenerated catalyst

由图 8 可知,新制备催化剂[图 8(a)]表面颗粒分布比较均匀. 一次再生后,图 8(b)表面形貌与新制备催化形貌差别甚小,表明活性组分颗粒在微波辐照下未发生移动与团聚;图 8(c)表面有裂缝和轻微烧结现象,空隙较少且微孔数量明显减少,推测是中上层温度过高引起结构的改变和催化活性组分的移动;图 8(d)和图 8(e)表面略显致密,因受微波

影响甚小,床层温度不会造成催化剂表面结构的改变;图 8(f)表面变得致密,孔隙缩小,推测可能是由于床层温度过低,甲苯解吸和催化氧化反应进行不彻底,催化剂表面和孔道内附着甲苯分子所致. 六次再生后,图 8(g)催化剂表面有粘连现象,微孔数量变少且变小,推测是多次再生后,空气将甲苯降解产物带入到上层部分,并不断累积所致;图 8(h)表

表 2 不同层面催化剂再生后的比表面积和孔结构参数

Table 2 Specific surface area and pore structure parameters of regenerated catalyst in different layers

类型	层面	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	微孔比表面积 /m ² ·g ⁻¹	孔体积 /m ³ ·g ⁻¹	微孔体积 /m ³ ·g ⁻¹	平均孔径 /nm
新制备		120.011	110.038	0.485	0.083	23.236
一次再生后	上层	117.913	109.709	0.461	0.071	22.861
	中上层	58.407	30.626	0.368	0.034	18.191
	中层	92.017	80.552	0.472	0.058	20.528
	中下层	62.069	46.982	0.425	0.043	18.571
	下层	24.604	16.982	0.225	0.023	8.317
六次再生后	上层	52.173	34.752	0.126	0.011	18.898
	中上层	18.308	12.420	0.111	0.008	14.484
	中层	24.475	19.603	0.146	0.016	16.570
	中下层	20.410	14.016	0.115	0.008	13.397
	下层	15.086	10.794	0.107	0.004	5.179

面烧结现象严重,推测是反复进行微波原位再生后,床层高温引起活性组分的移动与团聚;图 8(i)也存在轻微的团聚现象;图 8(j)表面形貌变化不明显,可能是因为多次再生后,低温未引起催化剂活性组分的移动,并且吸附甲苯量相对于下层来说少一些;图 8(k)表面突出而聚集,可能是因温度低,多次再生后甲苯的不断吸附积累所致。表面形貌的观察验证了高温对反应器中上层催化剂结构的影响,对表 2 的数据给出了有力的支持。

3 结论

(1)实验研究表明,微波原位再生可使吸附饱和和催化剂在短时间内恢复吸附能力而多次重复使用,催化剂再生的同时可实现 VOCs 的催化氧化降解。

(2)固定床反应器温度场呈现内高外低和下低上高的梯度分布,低温不利于甲苯的解吸但对催化剂结构不会产生影响,微波再生时的高温可导致催化剂表面烧结与团聚,从而降低其比表面积、孔体积与平均孔径;六次再生后,催化剂的吸附能力下降约 30%。

(3)降解产物分析表明,一部分解吸甲苯被直接带入吸收液,另一部分被催化氧化降解为苯甲醛与苯甲酸,并进一步彻底氧化为 CO₂ 和 H₂O,降解过程中未出现毒性更大的中间产物。

(4)虽然微波原位再生催化剂效果良好,但也在反应器床层下部催化剂再生不彻底的缺点,能否通过改变催化剂在反应床层内的位置而提高再生效果,还有待进一步地研究。

参考文献:

[1] Tang W X, Wu X F, Liu G, *et al.* Preparation of hierarchical

layer-stacking Mn-Ce composite oxide for catalytic total oxidation of VOCs [J]. *Journal of Rare Earths*, 2015, **33**(1): 62-69.

[2] Abdelouahab-Reddam Z, El Mail R, Coloma F, *et al.* Platinum supported on highly-dispersed ceria on activated carbon for the total oxidation of VOCs [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2015, **494**: 87-94.

[3] Boron A, Gilman J B, Kuster W C, *et al.* Emission ratios of anthropogenic volatile organic compounds in northern mid-latitude megacities: Observations versus emission inventories in Los Angeles and Paris [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2013, **118**(4): 2041-2057.

[4] 赵扬,何璐红,刘斌杰. 吸收法处理 VOCs 工业废气的研究进展[J]. *山东化工*, 2014, **43**(5): 78-79.

[5] 王力超,马堂文,赵明玉. 吸收法处理玉米深加工过程异味气体的实验研究[J]. *环境保护科学*, 2014, **40**(5): 57-60.

[6] Kim K J, Ahn H G. The effect of pore structure of zeolite on the adsorption of VOCs and their desorption properties by microwave heating [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2012, **152**: 78-83.

[7] 陆豪,吴祖亮,高翔. 吸附法净化挥发性有机物的研究进展[J]. *环境工程*, 2013, **31**(3): 93-97.

[8] 傅宝林,郭建维,钟选斌,等. 含油废水吸附饱和和活性炭纤维的电化学再生[J]. *化工学报*, 2013, **64**(9): 3250-3255.

[9] You X Y, Chai L Y, Wang Y Y, *et al.* Regeneration of activated carbon adsorbed EDTA by electrochemical method [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, **23**(3): 855-860.

[10] Shah I K, Pre P, Alappat B J. Effect of thermal regeneration of spent activated carbon on volatile organic compound adsorption performances[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, **45**(4): 1733-1738.

[11] Alejandro S, Valdés H, Manéro M H, *et al.* Oxidative regeneration of toluene-saturated natural zeolite by gaseous ozone: The influence of zeolite chemical surface characteristics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **274**: 212-220.

[12] Sánchez-Vicente Y, Cabañas A, Renuncio J A R, *et al.*

- Supercritical fluid extraction of peach (*Prunus persica*) seed oil using carbon dioxide and ethanol [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2009, **49**(2): 167-173.
- [13] Duan X H, Srinivasakannand C, Qu W W, *et al.* Regeneration of microwave assisted spent activated carbon: process optimization, adsorption isotherms and kinetics [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2012, **53**: 53-62.
- [14] Menéndez J A, Inguanzo M, Pis J J. Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge[J]. *Water Research*, 2002, **36**(13): 3261-3264.
- [15] Liu Q S, Zhang T, Li N, *et al.* Modification of bamboo-based activated carbon using microwave radiation and its effects on the adsorption of methylene blue [J]. *Applied Surface Science*, 2010, **256**(10): 3309-3315.
- [16] Çaliskan E, Bermúdezc J M, Parra J B, *et al.* Low temperature regeneration of activated carbons using microwaves: Revising conventional wisdom [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **102**: 134-140.
- [17] Zhang L Q, Jiang H T, Ma C Y, *et al.* Microwave regeneration characteristics of activated carbon for flue gas desulfurization[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2012, **40**(11): 1366-1371.
- [18] Foo K Y, Hameed B H. A rapid regeneration of methylene blue dye-loaded activated carbons with microwave heating[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012, **98**: 123-128.
- [19] 吴慧英, 黄晟, 周万能. 微波再生载苯酚活性炭过程中再生产物分析[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(4): 1699-1704.
- [20] 张声洲, 夏洪应, 张利波, 等. 改性热解炭吸附水体中苯胺的热力学及动力学研究[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(3): 1209-1213.
- [21] 常仁芹, 周瑛, 卢哈锋, 等. 微波加热脱附回收 Y 分子筛吸附的酮类有机分子[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(12): 5399-5405.
- [22] 张立强, 崔琳, 王志强, 等. 微波再生对活性炭循环吸附 SO₂ 的影响[J]. *燃料化学学报*, 2014, **42**(7): 890-896.
- [23] 张志辉, 郑天龙, 王孝强, 等. 活性炭吸附处理锂电池厂含酯废水及微波再生实验[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 644-649.
- [24] 王晓燕, 许振成, 刘芸, 等. 海绵铁还原耦合活性炭吸附-微波再生技术降解甲基橙[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(6): 2093-2099.
- [25] 李慧芳, 徐海, 赵勤, 等. 几种分子筛对甲醛气体吸附性能的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2014, **33**(1): 122-126.
- [26] 王粟, 岳琳, 郭建博, 等. FePMo₁₂催化电化学反应降解染料废水的研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1843-1849.
- [27] 黄海凤, 戎文娟, 顾勇义, 等. ZSM-5 沸石分子筛吸附-脱附 VOCs 的性能研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(12): 3144-3451.
- [28] 王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 等. 碳化硅协同分子筛负载型催化剂微波辅助催化氧化甲苯性能[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 43-51.
- [29] 张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 等. 微波加热下苯的催化氧化性能研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2759-2765.
- [30] Bo L L, Liao J B, Zhang Y C, *et al.* CuO/zeolite catalyzed oxidation of gaseous toluene under microwave heating [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, **7**(3): 395-402.
- [31] 刘海楠, 卜龙利, 王晓晖, 等. 二氧化钛复合型催化剂制备及其微波辅助催化氧化甲苯性能[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(6): 1720-1727.
- [32] 卜龙利, 刘海楠, 王晓晖, 等. 不同加热方式下催化氧化甲苯的性能研究[J]. *环境化学*, 2013, **32**(8): 1524-1531.
- [33] 卜龙利, 杨力, 孙剑宇, 等. 双组分 VOCs 的催化氧化及动力学分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3302-3308.
- [34] 卜龙利, 张钰彩, 王晓晖, 等. 微波辅助催化氧化苯高性能催化剂实验研究[J]. *燃料化学学报*, 2012, **40**(7): 878-885.
- [35] GB 16297-1996, 大气污染物综合排放标准[S].
- [36] 张广宏, 季生福, 万会军, 等. 铜锰基 SBA-15 催化剂的制备及其甲苯燃烧消除的催化性能[J]. *北京化工大学学报*, 2008, **35**(1): 5-10.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行