

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

序 郝郑平(4503)

南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征 安俊琳,朱彬,李用宇(4504)

天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析 翟增秀,邹克华,李伟芳,王亘,翟友存(4513)

南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析 杨辉,朱彬,高晋徽,李用宇,夏丽(4519)

上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算 崔虎雄(4529)

四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响 韩丽,王幸锐,何敏,郭卫广(4535)

武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策 黄碧捷(4543)

北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究 段菁春,彭艳春,谭吉华,郝吉明,柴发合(4552)

广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价 李雷,李红,王学中,张新民,温冲(4558)

天津某家具城挥发性有机物健康风险评估 张银,王秀艳,高爽(4565)

废旧有机玻璃再生利用行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究 王浙明,徐志荣,叶红玉,许明珠,王晓星(4571)

农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险 谭冰,王铁宇,庞博,朱朝云,王道涵,吕永龙(4577)

电子产品加工制造企业挥发性有机物(VOCs)排放特征 崔如,马永亮(4585)

汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价 曾培源,李建军,廖东奇,涂翔,许玫英,孙国萍(4592)

载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价 陈小开,程赫明,罗会龙(4599)

基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究 何万清,聂磊,田刚,李靖,邵霞,王敏燕(4605)

VOCs 污染场地挖掘过程的环境健康风险评价 房增强,甘平,杨乐,戴子瑜,祁世鸿,贾建丽,何绪文(4612)

挥发性有机物污染场地挖掘过程中污染扩散特征 甘平,杨乐巍,房增强,郭淑倩,于妍,贾建丽(4619)

土壤中苯向大气挥发过程的影响因素和通量特征研究 杜平,王世杰,赵欢欢,伍斌,韩春媚,房吉敦,李慧颖,细见正明,李发生(4627)

土壤组分对四氯乙烯吸附解吸行为的影响 胡林,邱兆富,何龙,窦颖,吕树光,隋倩,林匡飞(4635)

自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律 陈锡超,罗茜,陈虎,魏孜,王子健,许科文(4642)

杭州市典型企业废水中挥发性有机物排放特征及其评价 陈峰,徐建芬,唐访良,张明,阮东德(4649)

维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性 郭斌,律国黎,任爱玲,杜昭,邢志贤,韩鹏,高博,刘淑娅(4654)

新型生物滴滤填料性能评价 梅瑜,成卓韦,王家德,活泼(4661)

微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究 张超,赵梦升,张丽丽,陈建孟(4669)

BF 和 BTf 工艺去除 DCM 性能比较 潘维龙,於建明,成卓韦,蔡文吉(4675)

改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究 王家德,郑亮巍,朱润晔,俞云锋(4684)

转轮吸附法处理有机废气的研究 朱润晔,郑亮巍,毛玉波,王家德(4689)

活性炭吸附有机蒸气性能的研究 蔡道飞,黄维秋,王丹莉,张琳,杨光(4694)

UV-生物过滤联合降解苯乙烯废气的研究 沙昊雷,杨国靖,夏静芬(4701)

蜂窝状 ZSM-5 型分子筛对丙酮和丁酮吸附性能研究 杜娟,栾志强,解强,叶平伟,李凯,王喜芹(4706)

内浮顶油罐“小呼吸”对环境影响过程的分析 吴宏章,黄维秋,杨光,赵晨露,王英霞,蔡道飞(4712)

基于 Tanks 4.0.9d 模型的石化储罐 VOCs 排放定量方法研究 李靖,王敏燕,张健,何万清,聂磊,邵霞(4718)

铜铈复合氧化物上石化行业典型 VOCs 的氧化行为与动力学 陈长伟,于艳科,陈进生,何焜(4724)

KrBr⁺ 准分子灯直接光解一甲胺气体 赵洁,刘玉海,韦连梅,叶招莲,张善端(4734)

异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究 颜鲁春,刘杰民,付慧婷,孙媛,林文辉(4743)

挥发性有机污染物排放控制标准制订中的关键技术问题研究 江梅,张国宁,任春,邹兰,魏玉霞(4747)

挥发性有机污染物排放控制标准体系的建立与完善 江梅,张国宁,邹兰,魏玉霞,张明慧(4751)

我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究 王铁宇,李奇锋,吕永龙(4756)

固定源废气 VOCs 排放在线监测技术现状与需求研究 王强,周刚,钟琪,赵金宝,杨凯(4764)

石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估 牟桂芹,隋立华,郭亚逢,马传军,杨文玉,高阳(4771)

植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展 谢军飞,李延明(4779)

基于动态 CGE 的挥发性有机污染物 VOCs 排放预测和控制研究 刘昌新,王宇飞,郝郑平,王铮(4787)

《环境科学》第34卷(2013年)总目录 (4792)

《环境科学》征订启事(4717) 《环境科学》征稿简则(4742) 信息(4528, 4626, 4693, 4700)

改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究

王家德, 郑亮巍, 朱润晔*, 俞云锋

(浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310014)

摘要: 系统地考察了改性 13X 沸石分子筛(M-13X)蜂窝转轮对甲苯废气的吸附性能, 探讨了运行参数和进气参数对转轮吸附的影响规律. 结果表明, M-13X 分子筛具有良好的抗湿性, 转速、再生风温度过高或过低均会降低系统去除率, 合适的浓缩比应兼顾效率与能耗. 对于进气浓度 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 进气流速 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的甲苯废气, 推荐运行参数为再生风温度 180°C , 转速 $2.8 \sim 5 \text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$, 浓缩比 $8 \sim 12$, 在该运行参数下去除效率均维持在 90% 以上. 该研究为 M-13X 蜂窝转轮工业应用提供设计经验及运行参数, 对于高浓度废气, 应控制较低的进气流速, 同时加快转速、提高脱附热量以满足去除效果.

关键词: 吸附; 蜂窝吸附转轮; 甲苯; 改性分子筛; 有机废气

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4684-05

Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves

WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, YU Yun-feng

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The removal of toluene from waste gas by Honeycomb Adsorption Rotor with modified 13X molecular sieves was systematically investigated. The effects of the rotor operating parameters and the feed gas parameters on the adsorption efficiency were clarified. The experimental results indicated that the honeycomb adsorption rotor had a good humidity resistance. The removal efficiency of honeycomb adsorption rotor achieved the maximal value with optimal rotor speed and optimal generation air temperature. Moreover, for an appropriate flow rate ratio the removal efficiency and energy consumption should be taken into account. When the recommended operating parameters were regeneration air temperature of 180°C , rotor speed of $2.8\text{--}5 \text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$, flow rate ratio of $8\text{--}12$, the removal efficiency kept over 90% for the toluene gas with concentration of $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and inlet velocity of $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The research provided design experience and operating parameters for industrial application of honeycomb adsorption rotor. It showed that lower empty bed velocity, faster rotor speed and higher temperature were necessary to purify organic waste gases of higher concentrations.

Key words: adsorption; honeycomb adsorption rotor; toluene; modified molecular sieve; organic waste gas

吸附是当前广泛使用的有机废气污染控制技术之一, 适合大风量、低浓度有机废气净化, 常与催化燃烧、等离子体氧化、冷凝等技术联用, 有固定床吸附、移动床吸附、转轮吸附和流化床吸附等类型^[1-3], 其中转轮吸附源于美国 Bryant 于 1950 年发明的转轮除湿技术, 目前已有若干用于废气处理的研究和应用报道^[4-6].

近年来, 沸石分子筛因其多孔性的硅酸铝骨架结构, 又具择形选择性、耐高温、不可燃及良好的热稳定性等优点^[7-9], 被大量应用于转轮吸附^[10-13]. 由于普通分子筛是强极性材料, 吸水性强, 因此需要通过高温水热等方法对分子筛进行疏水改性, 同时配合酸碱洗以提高硅铝比, 从而提高其疏水性能^[14-16]. 而蜂窝结构的开发与利用不仅有效解决了传统颗粒吸附剂气流速度小、压降大等缺陷, 而且扩大了气固相接触面积、改善了气体扩散效率^[17].

除吸附材料外, 影响转轮装置吸附性能的因素

还包括转轮运行参数和进气参数. Yosuke 等^[18]认为, 一定范围内进气负荷的变化可通过转速、浓缩比、再生风温度等转轮运行参数调节, 以维持预定的性能; Lin 等^[11]将蜂窝转轮应用于 TFT-LCD 产业废气处理, 当处理高排放浓度时, 将入流速度降至 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 浓缩比降至 8, 转速增至 $6.5 \text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$, 再生风温度升至 $220 \sim 220^\circ\text{C}$, 系统去除效率可达 90% 以上; Hisashi 等^[17]指出最佳转速由再生风热容量与吸附剂热容量平衡决定.

本实验在前期改性分子筛吸附性能研究的基础上^[19], 制作改性 13X 沸石分子筛(M-13X)蜂窝转轮吸附装置, 以气态甲苯为模拟污染物, 考察转轮运行参数和进气气体参数对吸附性能的影响规律.

收稿日期: 2013-01-25; 修订日期: 2013-03-20

作者简介: 王家德(1968~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为有机废气污染控制, E-mail: jdwang@zjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhurunye@zjut.edu.cn

1 材料与方法

1.1 吸附材料及试剂

吸附材料: 13X 分子筛, 由上海沸石分子筛有限公司提供; 改性 13X 沸石分子筛 (M-13X), 由景德镇亿弘工业陶瓷研究所提供. 表 1、表 2 为两种吸附材料的分子组成及孔结构参数. 吸附质: 分析纯

表 2 分子筛孔结构参数

Table 2 Porous structural parameters of adsorbents

吸附材料	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	$V_{\text{总孔容}}/\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$	$V_{\text{微孔孔容}}/\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$	微孔比率 $\varphi/\%$	平均孔径 D/nm
13X 分子筛	415.17	0.30	0.15	50	2.91
M-13X 分子筛	414.36	0.31	0.12	39	2.98

1.2 吸附性能测定

图 1 为 13X 和 M-13X 分子筛在不同湿度下的穿透曲线, 从中可知, M-13X 分子筛具有更长的穿透时间和更大的穿透吸附量, 同时表现出良好的疏水性能. 因此本实验采用将 M-13X 分子筛作为转轮吸附基质.

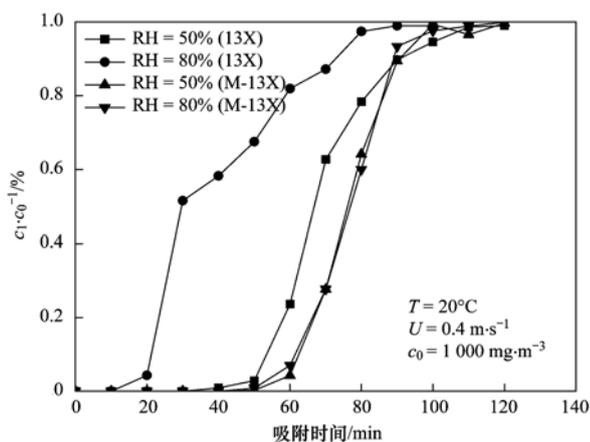


图 1 M-13X 分子筛与 13-X 分子筛在不同湿度下的穿透曲线

Fig. 1 Breakthrough curves of M-13X and 13X under different relative humidity

1.3 转轮吸附装置

如图 2 所示, 吸附转轮包括吸附区、脱附区、冷却区. 随着转轮转动, 吸附剂周期性地进行了吸附、再生和冷却, 实现有机废气净化. 转轮参数见表 3.

表 3 转轮参数

Table 3 Parameters of the honeycomb rotor adsorber

转轮属性	参数
转轮直径/mm	320
转轮厚度/mm	400
面积比/吸附: 脱附: 冷却	10: 1: 1
吸附材料	M-13X 分子筛
吸附材料密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	500
蜂窝结构孔密度/ $\text{孔} \cdot \text{in}^{-2}$	100
蜂窝结构孔隙率/ $\%$	0.64

甲苯, 由衢州巨化集团提供.

表 1 分子筛分子组成/ $\%$

Table 1 Molecular composition of adsorbents

吸附材料	Si	Al	Ca	Mg
13X 分子筛	21.68	16.97	7.47	2.10
M-13X 分子筛	38.93	5.75	0.27	0.13

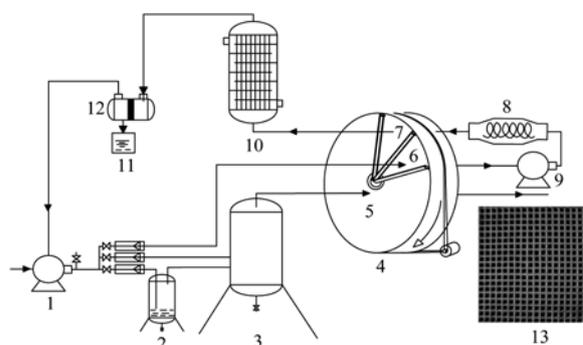


图 2 蜂窝转轮实验装置

Fig. 2 Experimental apparatus of the honeycomb rotor adsorber

1.4 分析方法

采用 Agilent 6980GC 气相色谱仪测定转轮吸附区进出口甲苯废气浓度. 色谱柱为 HP-Innowax 毛细管柱 ($30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.5 \mu\text{m}$); 汽化室、检测器 (FID) 和柱子温度分别为 210 、 100 、 90°C , 柱流量 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样量 $800 \mu\text{L}$; 载气为 N_2 , 总流量为 $33.4 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 分流比为 $30:1$; 氢气流量和空气流量分别为 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 转轮运行参数对吸附性能的影响

2.1.1 浓缩比

转轮通过吸附-脱附以获得低流量的浓缩气体, 因此浓缩比是转轮性能的一个重要指标, 定义为进气流量与再生风流量的比值 F , 表示为方程:

$$F = \beta_p U_p / \beta_r U_r$$

式中, β_p 、 U_p 为吸附区面积及流速, β_r 、 U_r 为脱附区

面积及再生风流速^[17].

图3为不同浓缩比下的甲苯去除率,稳定进气流速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、进气浓度 $100\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、进气温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度RH 50%、转速 $3.5\text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$ 、再生风温度 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$.当浓缩比从6提高至18时,再生风量相应的减小为原来的三分之一,这大大降低了后续单元的处理负荷,但再生风量的减小意味着脱附总热量的减小,同时再生风扩散速率及热传递因素亦随着再生风速的减小而降低,导致脱附区后端局部热量不足,影响了吸附剂再生及系统净化效率,因此甲苯去除率从98.2%降至88%.

低浓缩比虽然可以保证高去除效率,但增加再生风量的同时也增加了脱附能耗,而且浓缩气体的浓度亦随着脱附风量的增加而降低.如图3,当浓缩比从14减少至6时,甲苯的出口浓度仅从 $4.7\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低到 $1.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,但浓缩后的甲苯浓度从 $1345\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $576\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,如此低的浓度不利于后续燃烧或冷凝单元处理.因此,在确保系统设定的去除率前提下,合理选择浓缩比是至关重要的.工程应用上,浓缩比应兼顾效率与能耗,对于高浓度废气,可选择低浓缩比以确保去除率;而对于低浓度废气,适当选择高浓缩比有利于系统整体能效比提高.

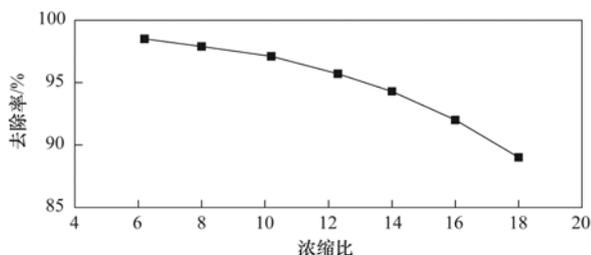


图3 浓缩比对去除率的影响

Fig. 3 Effect of the flow rate ratio on the removal efficiency

2.1.2 转轮转速

吸附与脱附在转轮运行周期中是同步进行的,两者互为影响并共同决定转轮的去除效率,而转速的大小意味着吸附和脱附时间长短.图4为不同转速下的甲苯去除率,稳定进气流速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、进气浓度 $100\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、进气温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度RH = 50%、再生风温度 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、浓缩比14.当转速从 $2.2\text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$ 提高到 $3.5\text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,甲苯去除率从85.4%升至96.1%,表明在该转速区间去除率随转速的提高而提高,这是因为当转速过低时,吸附区停留时间过长而造成吸附质(污染物)穿透,因此提高转速加快了吸附剂的更替,确保吸附剂在穿透前离开吸附区.

而在 $3.5\sim 6.5\text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$ 转速区间,甲苯去除率随着转速的提高而降至90%以下,这可能是因为转速过高,脱附区停留时间过短,再生时间不足造成脱附不完全,进而影响吸附效率.

因此,最佳转速本质上是吸附和脱附时间的控制,以实现转轮去除率最大.实际应用时,因受多因素影响,转轮转速为配合其他参数变化可控制在一区间值.如图4,当转速 $2.6\sim 5.5\text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,系统去除率变化较小且均能维持在90%以上,因此该转速区间均可作为该条件下的操作参数.

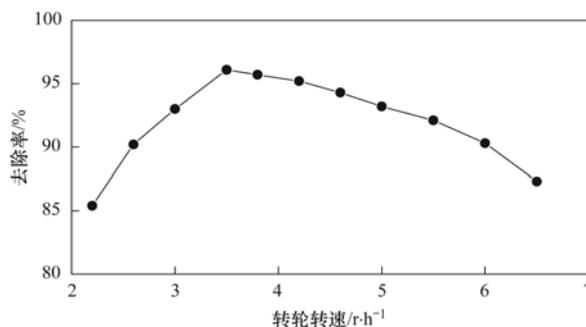


图4 转速对去除率的影响

Fig. 4 Effect of rotation speed on the removal efficiency

2.1.3 再生风温度

吸附剂的解析再生存在一个特征温度(最低清洗温度),高于该温度可以获得更快的解析速率同时消耗更小的脱附风量^[20].图5为不同再生风温度下的甲苯去除率,稳定进气流速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、进气浓度 $100\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、进气温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度RH = 50%、转速 $3.5\text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$ 、浓缩比14.当再生风温度从 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,甲苯去除率从72.3%升至96.1%,说明再生风温度的提高加快了解析速率,甲苯脱附更完全,有利于吸附剂在吸附区的吸附行为.而当再生风温度从 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,甲苯去除率开始呈下降趋势,这可能是由于再生风温度过高而受冷却区降温能力限制,余热无法在冷却区有效降温,以致吸附区仍处于“高温”状态,影响吸附效率.因此,在本实验条件下,再生风温度设定为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是比较合适的.

2.2 进气参数对转轮吸附性能的影响

2.2.1 进气湿度

实际工程中,有机废气一般都含有水分,部分相对湿度甚至达到80%^[7].因此抗湿性是衡量吸附性能的重要指标之一.

在上述确定的优化转轮操作参数下,考察了进气湿度对转轮吸附系统去除率的影响.如图6所

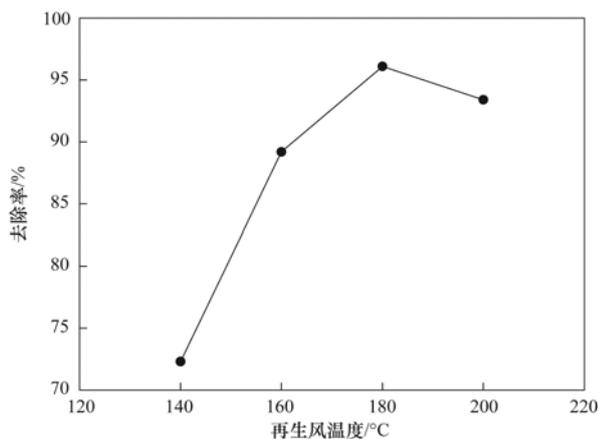


图 5 再生风温度对去除率的影响

Fig. 5 Effect of regeneration air temperature on the removal efficiency

示, 稳定进气浓度 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、流速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、进气温度 25°C 、脱附温度 180°C 、浓缩比 14、转速 $3.5 \text{ r} \cdot \text{h}^{-1}$, 当进气相对湿度从 40% 提高到 80% 时, 甲苯去除率始终保持在 96% 以上, 表明高硅铝比微孔骨架结构的 M-13X 分子筛具有较高的疏水性能, 转轮因此具有良好的抗湿性。

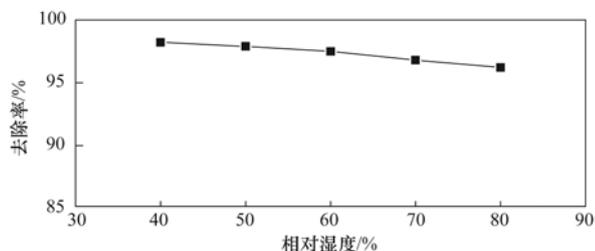


图 6 相对湿度对去除率的影响

Fig. 6 Effects of relative humidity on the removal efficiency

2.2.2 进气浓度

图 7 为进气浓度对转轮运行的影响. 控制进气流速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、进气温度 25°C 、相对湿度 RH 50%, 转轮转速 $3.5 \text{ r} \cdot \text{h}^{-1}$ 、浓缩比 14、脱附温度 180°C . 当甲苯浓度从 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 提高到 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 转轮对甲苯的去除量从 $50.9 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加 $114.2 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$, 这是由于甲苯浓度增加, 加大了气固相间传质推动力, 使得传质过程得到加强, 吸附量随着吸附速率的提高而增加. 但同时系统去除效率随着浓度的提高而下降, 当浓度提高至 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 甲苯去除率下降至 81.3%, 这是由于浓度的提高加快了传质区移动速度, 缩短了吸附床穿透时间^[13], 另一个可能的原因是增加的吸附负荷已经超出了该脱附条件下的处理能力^[18]. 因此提高转速、加快吸附剂的更替, 同时提高脱附温度是确保高浓度废气去除率的有效

途径.

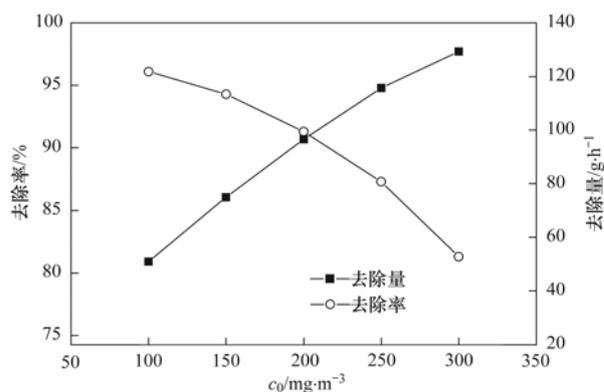


图 7 进气浓度对去除率的影响

Fig. 7 Effect of inlet concentration on the removal efficiency

2.2.3 进气流速

图 8 考察了进气流速对去除效率的影响. 控制进气温度 25°C 、相对湿度 RH 50%, 转速 $3.5 \text{ r} \cdot \text{h}^{-1}$ 、再生风温度 180°C 、浓缩比 14, 进气浓度分别选定 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 当 $c_0 = 100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 进气流速从 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 甲苯去除率尽管略有下降, 但仍维持在 96% 以上; 当 $c_0 = 300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 同样的进气流速增幅, 甲苯去除率从 97% 下降至 81.3%, 且这种下降呈加速态势, 特别是当进气流速大于 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 甲苯去除率从 91.7% 快速降至 81.3%. 这说明, 进气流速对吸附的影响随进气浓度的提高而增大. 因此对于高浓度有机废气, 控制低进气流速是十分必要的。

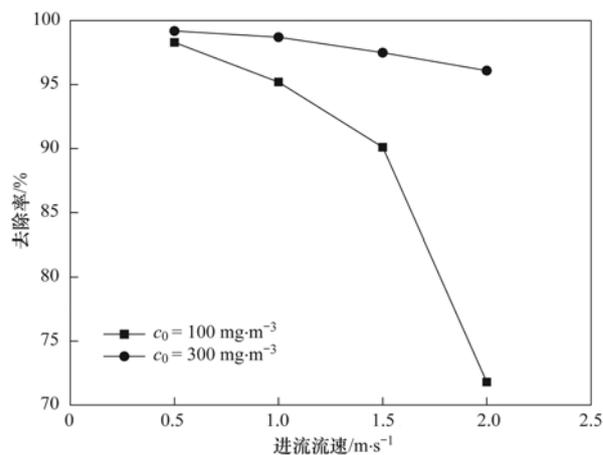


图 8 进气流速对去除率的影响

Fig. 8 Effect of inlet velocity on the removal efficiency

3 结论

(1) M-13X 分子筛的高硅铝比结构使得转轮具有良好的抗湿性。

(2) 转速、再生风温度过高或过低均影响系统去除率,而合适的浓缩比应兼顾效率与能耗,因此适宜的控制值可以实现污染物经济、高效去除。

(3) 对于进气浓度 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 进气流速 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的甲苯废气,推荐运行参数为再生风温度 180°C , 转速 $2.8 \sim 5 \text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$, 浓缩比 $8 \sim 12$, 在该运行参数下去除效率均高于 90% 。

(4) 进气流速对转轮的影响随进气浓度的提高而增大,针对高浓度废气,应控制低进气流速,同时加快转速、提高再生温度和再生风量以满足转轮的去除效率。

参考文献:

- [1] 栾志强, 郝郑平, 王喜芹. 工业固定源 VOCs 治理技术分析评估[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3476-3486.
- [2] Parmar G R, Rao N N. Emerging control technologies for volatile organic compounds [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2008, **39**(1): 41-78.
- [3] 席劲瑛, 武俊良, 胡洪营, 王灿. 工业 VOCs 气体处理技术应用状况调查分析[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(11): 1955-1960.
- [4] Yoo Y J, Kim H S, Han M H. Toluene and MEK adsorption behavior of the adsorption system using honeycomb adsorption rotor[J]. Separation Science and Technology, 2005, **40**(8): 1635-1651.
- [5] Mitsuma Y, Ota Y, Hirose T. Performance of thermal swing honeycomb VOC concentrators [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1998, **31**(3): 482-484.
- [6] Yamauchi H, Kodama A, Hirose T. Design and operation of adsorptive honeycomb rotor VOC concentrators and improvement of performance by high temperature regeneration [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2008, **34**(2): 217-223.
- [7] 周春何, 卢哈锋, 曾立, 等. 沸石分子筛和活性炭吸附/脱附甲苯性能对比[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(4): 38-41, 44.
- [8] Guillennot M, Mijoin J, Mignard S, et al. Adsorption of tetrachloroethylene (PCE) in gas phase on zeolites of faujasite type: influence of water vapour and of Si/Al ratio [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2008, **111**(1-3): 334-342.
- [9] Serrano D P, Calleja G, Botas J A, et al. Characterization of adsorptive and hydrophobic properties of silicalite-1, ZSM-5, TS-1 and beta zeolites by TPD techniques [J]. Separation and Purification Technology, 2007, **54**(1): 1-9.
- [10] Chang F T, Lin Y L, Bai H L, et al. Adsorption and desorption characteristics of semiconductor volatile organic compounds on the thermal swing honeycomb zeolite concentrator[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, **53**(11): 1384-1390.
- [11] Lin Y C, Chang F T. Optimizing operating parameters of a honeycomb zeolite rotor concentrator for processing TFT-LCD volatile organic compounds with competitive adsorption characteristics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **164**(2-3): 517-526.
- [12] Yang J, Chen Y F, Gao L M, et al. Development and field-scale optimization of a honeycomb zeolite rotor concentrator/recuperative oxidizer for the abatement of volatile organic carbons from semiconductor industry [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(1): 441-446.
- [13] Chang F T, Bai H L, Pei B S. Performance study of thermal swing honeycomb zeolite absorber for VOCs treatment application [J]. Environmental Protection of Taiwan, 2005, **28**(1): 95-109.
- [14] 徐如人, 庞文琴. 分子筛与多孔材料化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 420-460.
- [15] 王喜芹, 李凯, 魏冰, 等. 硅改性制备疏水性沸石分子筛蜂窝体[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3653-3656.
- [16] Meininghaus C K W, Prins R. Sorption of volatile organic compounds on hydrophobic zeolites [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2000, **35-36**: 349-365.
- [17] Hisashi Y C, Akio K M, Tsutomou H, et al. Performance of VOC abatement by thermal swing honeycomb rotor absorbers[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, **46**(12): 4316-4322.
- [18] Yosuke M, Sinsuke T, Gen I, et al. Optimization of rotor-type solvent recovery system for low concentration solvent (optimization with gas concentration, flow rate change and adsorption deterioration) [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2006, **32**(6): 477-483.
- [19] Yu Y F, Zheng L W, Wang J D. Adsorption behavior of toluene on modified 1X molecular sieves[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, **62**(10): 1227-1232.
- [20] Yang R T. 吸附法分离气体[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991. 176-177.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (4503)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China	AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu (4504)
Pollution Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Downtown	ZHAI Zeng-xiu, ZOU Ke-hua, LI Wei-fang, <i>et al.</i> (4513)
Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer	YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (4519)
Estimation of the Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Shanghai in Spring	CUI Hu-xiong (4529)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from the Typical Anthropogenic Sources in Sichuan Province	HAN Li, WANG Xing-rui, HE Min, <i>et al.</i> (4535)
Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City	HUANG Bi-jie (4543)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs During Winter Haze in Beijing	DUAN Jing-chun, PENG Yan-chun, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (4552)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China	LI Lei, LI Hong, WANG Xue-zhong, <i>et al.</i> (4558)
Health Risk Assessment of VOCs from a Furniture Mall in Tianjin	ZHANG Yin, WANG Xiu-yan, GAO Shuang (4565)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Recycled Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Industry	WANG Zhe-ming, XU Zhi-rong, YE Hong-yu, <i>et al.</i> (4571)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, PANG Bo, <i>et al.</i> (4577)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory	CUI Ru, MA Yong-liang (4585)
Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings	ZENG Pei-yuan, LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, <i>et al.</i> (4592)
Index Assessment of Airborne VOCs Pollution in Automobile for Transporting Passengers	CHEN Xiao-kai, CHENG He-ming, LUO Hui-long (4599)
Study on the Chemical Compositions of VOCs Emitted by Cooking Oils Based on GC-MS	HE Wan-qing, NIE Lei, TIAN Gang, <i>et al.</i> (4605)
Health-based Risk Assessment in the Excavating Process of VOCs Contaminated Site	FANG Zeng-qiang, GAN Ping, YANG Le, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Gaseous Pollutants Distribution During Remedial Excavation at a Volatile Organic Compound Contaminated Site	GAN Ping, YANG Yue-wei, FANG Zheng-qiang, <i>et al.</i> (4619)
Factors Affecting Benzene Diffusion from Contaminated Soils to the Atmosphere and Flux Characteristics	DU Ping, WANG Shi-jie, ZHAO Huan-huan, <i>et al.</i> (4627)
Effects of Soil Compositions on Sorption and Desorption Behavior of Tetrachloroethylene in Soil	HU Lin, QIU Zhao-fu, HE Long, <i>et al.</i> (4635)
Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes	CHEN Xi-chao, LUO Qian, CHEN Hu, <i>et al.</i> (4642)
Characteristics and Evaluation of Volatile Organic Compounds Discharge in Typical Enterprise Wastewater in Hangzhou City	CHEN Feng, XU Jian-fen, TANG Fang-liang, <i>et al.</i> (4649)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production	GUO Bin, LÜ Guo-li, REN Ai-ling, <i>et al.</i> (4654)
Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4661)
Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation	ZHANG Chao, ZHAO Meng-sheng, ZHANG Li-li, <i>et al.</i> (4669)
Removal Characteristics of DCM by Biotrickling Filter and Biofilter	PAN Wei-long, YU Jian-ming, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (4675)
Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves	WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (4684)
Treatment of Organic Waste Gas by Adsorption Rotor	ZHU Run-ye, ZHENG Liang-wei, MAO Yu-bo, <i>et al.</i> (4689)
Study on Adsorption Properties of Organic Vapor on Activated Carbons	CAI Dao-fei, HUANG Wei-qiu, WANG Dan-li, <i>et al.</i> (4694)
Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration	SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen (4701)
Adsorption Characteristics of Acetone and Butanone onto Honeycomb ZSM-5 Molecular Sieve	DU Juan, LUAN Zhi-qiang, XIE Qiang, <i>et al.</i> (4706)
Analysis of the Distribution of VOCs Concentration Field with Oil Static Breathing Loss in Internal Floating Roof Tank	WU Hong-zhang, HUANG Wei-qiu, YANG Guang, <i>et al.</i> (4712)
Study on the Quantitative Estimation Method for VOCs Emission from Petrochemical Storage Tanks Based on Tanks 4.0.9d Model	LI Jing, WANG Min-yan, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (4718)
Oxidation Behavior and Kinetics of Representative VOCs Emitted from Petrochemical Industry over CuCeO _x Composite Oxides	CHEN Chang-wei, YU Yan-ke, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (4724)
Direct Photolysis of Methylamine Gas by KrBr* Excilamp	ZHAO Jie, LIU Yu-hai, WEI Lian-mei, <i>et al.</i> (4734)
Study on the Relationship Between Odor Intensity and Components Concentrations of Odor Mixture	YAN Lu-chun, LIU Jie-min, FU Hui-ting, <i>et al.</i> (4743)
Study on Key Technical Problems in the Development of Volatile Organic Pollutants Emission Standards	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, REN Chun, <i>et al.</i> (4747)
Establishment and Improvement of Emission Control Standard System of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZOU Lan, <i>et al.</i> (4751)
Characteristics and Countermeasures of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China	WANG Tie-yu, LI Qi-feng, LÜ Yong-long (4756)
Status and Needs Research for On-Line Monitoring of VOCs Emissions from Stationary Sources	WANG Qiang, ZHOU Gang, ZHONG Qi, <i>et al.</i> (4764)
Evaluation of Treatment Technology of Odor Pollution Source in Petrochemical Industry	MU Gui-qin, SUI Li-hua, GUO Ya-feng, <i>et al.</i> (4771)
Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants	XIE Jun-fei, LI Yan-ming (4779)
Study of VOCs Emission Prediction and Control Based on Dynamic CGE	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (4787)

《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)

2013年12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行