

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第32卷 第12期

Vol.32 No.12

2011

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 (3461)
我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究	王海林, 张国宁, 聂磊, 王宇飞, 郝郑平 (3462)
我国 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策探讨	陈颖, 李丽娜, 杨常青, 郝郑平, 孙汉坤, 李瑶 (3469)
工业固定源 VOCs 治理技术分析评估	栾志强, 郝郑平, 王喜芹 (3476)
工业挥发性有机物排放控制的有效途径研究	江梅, 张国宁, 魏玉霞, 邹兰, 张明慧 (3487)
台湾地区 VOCs 污染控制法规、政策和标准	栾志强, 王喜芹, 郑雅楠, 刘平 (3491)
国外固定源 VOCs 排放控制法规与标准研究	张国宁, 郝郑平, 江梅, 王海林 (3501)
挥发性有机物税收政策对我国经济的影响分析	刘昌新, 王宇飞, 王海林, 郝郑平, 王铮 (3509)
民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征	李兴华, 王书肖, 郝吉明 (3515)
北京及周边地区大气羰基化合物的时空分布特征初探	王琴, 邵敏, 魏强, 陈文泰, 陆思华, 赵越 (3522)
北京市 BTEX 的污染现状及变化规律分析	孙杰, 王跃思, 吴方堃 (3531)
上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析	崔虎雄, 吴迺名, 高松, 段玉森, 王东方, 张懿华, 伏晴艳 (3537)
长沙大气中 VOCs 研究	刘全, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (3543)
佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征	马永亮, 谭吉华, 贺克斌, 程远, 杨复沫, 余永昌, 谭赞华, 王洁文 (3549)
深圳市显著排放 VOCs 的园林植物调查与分析	 黄爱葵, 李楠, Alex Guenther, Jim Greenberg, Brad Baker, Michael Graessli, 白建辉 (3555)
北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析	周裕敏, 郝郑平, 王海林 (3560)
北京城乡结合部空气中挥发性有机物健康风险评价	周裕敏, 郝郑平, 王海林 (3566)
城市污水处理厂恶臭挥发性羰基化合物的排放特征	周咪, 王伯光, 赵德骏, 张春林, 古颖纲 (3571)
城市污水处理厂挥发性卤代有机物的排放特征及影响因素研究	何洁, 王伯光, 刘舒乐, 赵德骏, 唐小东, 邹宇 (3577)
城市污水处理厂恶臭挥发性有机物的感官定量评价研究	刘舒乐, 王伯光, 何洁, 唐小东, 赵德骏, 郭薇 (3582)
植物释放挥发性有机物 (BVOC) 向二次有机气溶胶 (SOA) 转化机制研究	李莹莹, 李想, 陈建民 (3588)
NO ₃ 自由基与 3 种环醚的大气化学反应动力学研究	盖艳波, 葛茂发, 王炜罡 (3593)
3-甲基-3-丁烯基-1-醇与硫酸/过氧化氢混合溶液的吸收反应研究	王天鹤, 刘泽, 葛茂发, 王炜罡 (3599)
水中挥发性有机物的分析方法综评	许秀艳, 朱擎, 谭丽, 梁宵, 张颖, 滕思江 (3606)
新型动态针捕集阱技术分析大气中低浓度的 VOCs	李想, 陈建民 (3613)
大气中总挥发性有机硫化物检测方法的研究	王艳君, 郑晓玲, 何鹰, 张栋, 王保栋 (3617)
全自动阵列离子迁移谱仪连续监测挥发性有机化合物	 周庆华, 仓怀文, 鞠帮玉, 李林, 杜永斋, 陈创, 侯可勇, 李京华, 王卫国, 李海洋 (3623)
膜进样-单光子电离/化学电离-质谱仪在线检测水中 VOCs	 花磊, 吴庆浩, 侯可勇, 崔华鹏, 陈平, 赵无垠, 谢园园, 李海洋 (3628)
工业园区 TVOC 和恶臭的电子鼻检测技术研究	田秀英, 蔡强, 叶朝霞, 郭威, 卢岩文, 张永明 (3635)
电子鼻检测污染土壤中挥发性氯代烃的适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 蔡强, 陈吕军, 张永明 (3641)
工业管道中丙烯酸酯类物质的监测与分析	吴彬, 张红燕, 陆林光 (3647)
硅改性制备疏水性沸石分子筛蜂窝体	王喜芹, 李凯, 魏冰, 栾志强 (3653)
氧化锰八面体分子筛的合成及其对苯催化氧化性能	李东艳, 刘海弟, 陈运法 (3657)
蜂窝状活性炭对 VOCs 的吸-脱附性能研究	韩忠娟, 罗福坤, 李泽清 (3662)
混合气体直接吸附分离回收过程研究	王红玉, 羌宁, 胡瑕 (3667)
生物滴滤降解氯苯废气的实验研究	周卿伟, 朱润晔, 胡俊, 张丽丽, 陈建孟 (3673)
复合吸收技术净化复杂工业有机废气	陈定盛, 岑超平, 唐志雄, 方平, 陈志航 (3680)
烘房 VOCs 废气治理技术路线探析	李泽清, 罗福坤 (3685)
Co ₃ O ₄ 纳米棒的制备及其对气相甲苯的催化氧化	闫清云, 李新勇, 肇启东, 曲振平 (3689)
Si 掺杂 TiO ₂ 纳米管阵列制备、表征及其光催化氧化降解室内典型 VOCs	邹学军, 李新勇, 曲振平, 王疆疆 (3694)
基于现场试验的石油类污染物自然衰减能力研究	贾慧, 武晓峰, 胡黎明, 刘培斌 (3699)
膜分离法处理加油站油气研究	朱玲, 陈家庆, 张宝生, 王建宏 (3704)
机动车加油过程中气液两相流动特性的 CFD 数值模拟	陈家庆, 张男, 王金惠, 朱玲, 尚超 (3710)
《环境科学》第 32 卷 (2011 年) 总目录	(3717)
《环境科学》征稿简则 (3679) 《环境科学》征订启事 (3684) 信息 (3554, 3616, 3622, 3672)	

混合气体直接吸附分离回收过程研究

王红玉, 羌宁*, 胡瑕

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:以精密陶瓷制造过程中排放的甲苯和异丙醇混合气体为目标气体, 采用 4 段活性炭吸附柱串联吸附实验方式研究了混合组分气体直接吸附分离回收的可行性. 结果表明, 异丙醇和甲苯这 2 种物性具有一定差异的物质在吸附床的长度方向存在明显的分层吸附现象. 在表观气速 $0.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、异丙醇与甲苯入口浓度分别为 $477 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $746 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、吸附柱总长为 26 cm 条件下, 通气吸附 798 min 时, 0~10 cm 长度段炭层吸附甲苯量为 $184.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 吸附异丙醇量为 $0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 而 21~26 cm 长度段炭层吸附甲苯量为 $0.92 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 吸附异丙醇量为 $91.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 通过分段再生回收分别得到了纯度 99% 以上的甲苯和异丙醇回收液. 弱吸附质异丙醇在吸附过程中存在气相浓度增浓现象, 该现象导致实验条件下部分活性炭层区域对异丙醇的吸附量提高了 27% 以上. 通过多段串联吸附、分段再生回收的方式可以实现混合气体的直接吸附分离回收.

关键词:活性炭; 吸附; 混合气体; 分离; 回收

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)12-3667-06

Process of Adsorption and Separating Recovery Solvents from Vapor Mixture Directly

WANG Hong-yu, QIANG Ning, HU Xia

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Experiment on process feasibility of adsorption and separating recovery of organic compounds directly from waste gas was conducted with the activated carbon column train consists of 4 units in serial. Isopropyl alcohol and toluene vapor mixture was used as target gas, which are the common constituents of the gas emitted from fine ceramic manufacture. The experimental results showed obvious adsorption stratification phenomena along the activated carbon column length for the vapor mixture. Under the condition of superficial gas velocity of $0.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, inlet concentration of $477 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $746 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ for isopropyl alcohol and toluene respectively, 26 cm total carbon packing length of the four column serial train, when the adsorption time reached 798 min, the adsorption capacities for toluene and isopropyl alcohol are $184.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and $0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively in 0-10 cm section, and $0.92 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and $91.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively in 21-26 cm section, liquids with over 99% purity of isopropyl alcohol and toluene were recovered separately from the two end columns of the carbon column train. There is a gaseous concentration amplifier zone in the carbon column for the weaker adsorbate, isopropyl alcohol, which make the adsorption capacity of isopropyl alcohol increase over 27% in part of the down flow zone in this experiment. It is possible to directly recover the pure solvent liquid separately from the vapor mixture by the way of a serial adsorption column with separating stage recovering.

Key words: activated carbon; adsorption; vapor mixture; separation; recovery

挥发性有机物(VOCs)是继颗粒物、 SO_2 和 NO_x 之后受到关注的又一大类大气污染物. 许多 VOCs 属于有毒有害物质, 同时, 排放到大气中的 VOCs 也是光化学烟雾和导致灰霾天气的细微颗粒物等二次污染物的前驱物质^[1,2].

吸附回收已被广泛应用于工业生产过程中的原料气或有机废气的分离、回收和净化^[2~6]. 近 20 年来的研究开发主要集中在变压吸附^[7,8]、新型吸附材料^[9~12]、再生方法^[13~17]及吸附过程分析、模拟^[18~21]等方面, 在净化回收混合组份污染气体时, 吸附回收所得到回收产物是有机混合物, 往往需进一步分离才能重新利用. 已有的对混合气体的吸附过程研究主要涉及吸附容量及过程分析^[22~31]、模型预测等^[32~34], 有关低浓度混合气体的直接吸附分离

回收工艺的研发报道很少. 本研究以精密陶瓷制造过程排放的甲苯和异丙醇混合气体作为目标气体, 采用多级串联活性炭柱进行直接吸附分离回收的工艺研究, 探索混合物质气体直接吸附分离回收的可行性, 以期混合组份有机污染气体的净化回用开发一条更低能耗的工艺途径.

1 材料与方法

1.1 实验原料

实验采用市售煤质颗粒活性炭, 粒径 $\Phi 4 \text{ mm}$,

收稿日期: 2011-05-04; 修订日期: 2011-07-29

作者简介: 王红玉(1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气与室内污染控制, E-mail: qianan_why@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: tj1926@126.com

长度 4 ~ 8 mm 不等,其碘值为 900 ~ 1 050 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,四氯化碳吸附值为 45% ~ 65%, 1.3 ~ 10.1 nm 孔径的微孔比表面积占总比表面积的 99.87%,其体积占微孔总体积的 98.99%. 采用 BET 方法测得该煤质活性炭的总比表面积为 $(923.5918 \pm 10.7203) \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,总孔容为 $0.626936 \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. 考虑到实际回收过程中使用的活性炭通过再生循环回用,本实验中的活性炭均为 180℃ 热气体再生炭. 模拟目标混合气体所用的甲苯和异丙醇均为化学纯,其与吸附有关的部分参数见表 1.

表 1 有机溶剂相关参数

Table 1 Characteristic of the solvents used in the experiment

类型	沸点 /℃	密度 / $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$	摩尔容积 / $\text{mL} \cdot \text{mol}^{-1}$
甲苯	110.6	0.866	106.2
异丙醇	82.5	0.785	75.6

1.2 测试方法

有机气体浓度采用气相色谱仪 GC7890F 测定. 检测条件:柱温 60℃,汽化室温度 120℃. 检测室温度 200℃. 所用气体为高纯氮气、氢气和高纯空气. 分离柱为 AT. SE-54 15 m × 0.25 m × 0.33 μm 毛细管柱.

1.3 实验流程及装置

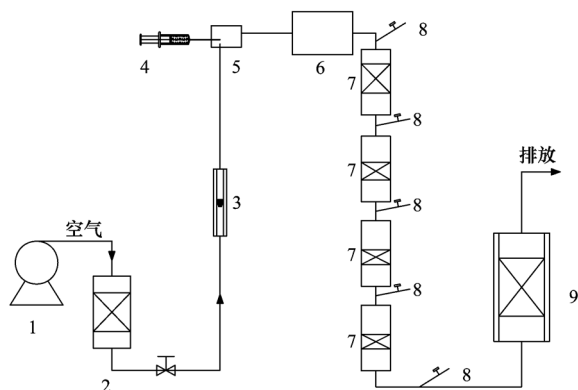
气体吸附实验流程如图 1 所示,系统主要分为 3 个部分:配气系统、恒温吸附系统、检测系统.

环境空气通过干燥净化预处理后通过流量计计量调节,与微型注射计量泵一起通过挥发室配制出所需浓度的气体,经过缓冲器混合均匀后,以设定的流量和浓度进入吸附系统. 吸附温度控制在 20℃. 吸附系统由 4 段不锈钢吸附柱串联而成,每段装填不同高度的活性炭层,形成累计长度分别为 10、16、21 和 26 cm 吸附层,可同时得到不同高度的穿透曲线. 吸附完成后的各不锈钢单元通过热气体循环再生系统(如图 2)分别再生,可得到相应的吸附层长度区间所吸附气体的再生回收液.

2 结果与讨论

2.1 单组分吸附穿透

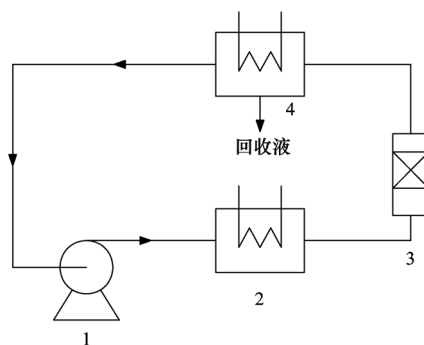
实验首先测定了异丙醇、甲苯单一组分气体通过不同长度活性炭吸附层时吸附穿透曲线. 试验气体流量为 $3 \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,表观气速为 $0.42 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 异丙醇入口浓度分别为 $498 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1\,104 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,甲苯入口浓度为 $534 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 10 cm 活性炭吸附层出口处的单组分气体浓度曲线如图 3 所示.



1. 气泵; 2. 空气干燥器; 3. 流量计; 4. 计量注射泵; 5. 挥发室; 6. 混合缓冲器; 7. 吸附单元; 8. 采样口; 9. 尾气处理单元

图 1 吸附实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of adsorption unit



1. 循环气泵; 2. 加热器; 3. 脱附单元; 4. 冷凝器

图 2 脱附实验装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of hot gas desorption unit

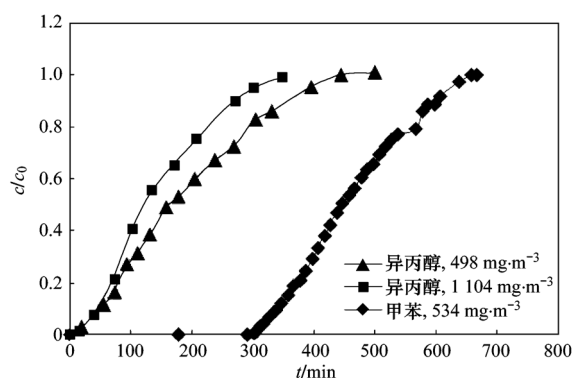


图 3 单组分气体吸附穿透浓度曲线

Fig. 3 Breakthrough curves of single isopropyl alcohol and toluene gas

从图 3 可见,对于异丙醇和甲苯单组分气体吸附而言,在基本相同的吸附条件下,甲苯气体的穿透时间远大于异丙醇,表明活性炭对甲苯的吸附能力

要大于异丙醇,实验得到入口浓度为 $498 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的异丙醇饱和和吸附容量为 $72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,入口浓度为 $534 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的甲苯饱和和吸附容量为 $207 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 可以确定,在异丙醇、甲苯混合体系中,异丙醇为弱吸附质,而甲苯为强吸附质. 2 种物质的活性炭吸附性能上差异为吸附分离提供了可能性^[22,23,35].

对于相同长度的吸附段而言,异丙醇入口浓度高时,穿透饱和时间变短,但吸附容量变大. 实验得到入口浓度为 $1104 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时异丙醇气体的饱和和吸附容量为 $156 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与入口浓度为 $498 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时的饱和和吸附容量相比,基本上符合低浓度条件下的亨利定律.

2.2 混合气体吸附分离过程

在表观风速 $0.42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下,进行了异丙醇、甲苯入口浓度分别为 $c_{10} = 477 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $c_{20} = 746 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的混合混合气体吸附穿透实验. 分别在活性炭层累计长度为 10、16、21 和 26 cm 处测定了污染气体组分随时间的变化情况.

甲苯和异丙醇混合气体在 10 cm 长度处的吸附穿透曲线如图 4 所示. 该曲线较好地反应了混合气体吸附理论模型^[33] 的 4 个阶段.

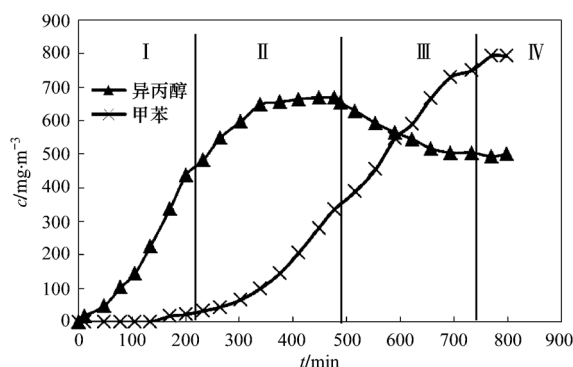


图 4 10 cm 长度处的吸附穿透曲线

Fig. 4 Concentration profile of mixed gas at 10 cm length

在第一阶段,吸附能力较弱的异丙醇先穿透,出口浓度随时间增加,甲苯未穿透;第二阶段,甲苯开始穿透,异丙醇出口浓度持续增大到超过入口浓度,达到并稳定在最大浓度;第三阶段异丙醇出口浓度开始缓慢下降,甲苯出口浓度继续随时间增加;第四阶段,甲苯、异丙醇出口浓度与入口浓度基本一致. 异丙醇和甲苯混合气体体系的吸附穿透现象与其他研究者对其它混合气体体系的结果报道一致^[23,25,29,31].

由图 4 还可知,由于异丙醇、甲苯在活性炭上吸附能力的差异,导致吸附能力强的甲苯主要被吸附

在活性炭床层的上游段,而吸附能力较弱的异丙醇因竞争吸附效应而主要被吸附在活性炭层的下游段,从而提供了在吸附过程中二者分离的可能性.

图 5 为甲苯和异丙醇混合气体在不同吸附层长度处的穿透曲线. 从图 5 中可见,以浓度 $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 为限值,在 264 min 时甲苯基本被吸附在上游的 10 cm 炭层内,在 554 min 时,甲苯基本被吸附在上游的 16 cm 炭层内;而在 733 min 时,甲苯基本被吸附在上游的 21 cm 炭层内. 而对于异丙醇而言,上游的 10 cm 炭层在前 233 min 处于吸附阶段,而此后由于甲苯的竞争吸附作用进入置换脱附阶段,590 min 时基本结束了脱附阶段. 16 cm 长度处在 339 min 为吸附和脱附的转折点,此后在实验结束前一直处于脱附阶段. 而对 21 cm 和 26 cm 长度处分别在 410 min 和 516 min 时刻进入脱附阶段. 从以上分析可知,在实验进行的 798 min 内,0 ~ 10 cm 长度段的炭层中主要吸附物为甲苯,而 16 ~ 21 cm 段和 21 ~ 26 cm 段应主要以异丙醇为主,后续的回收再生实验结果也验证了该情况.

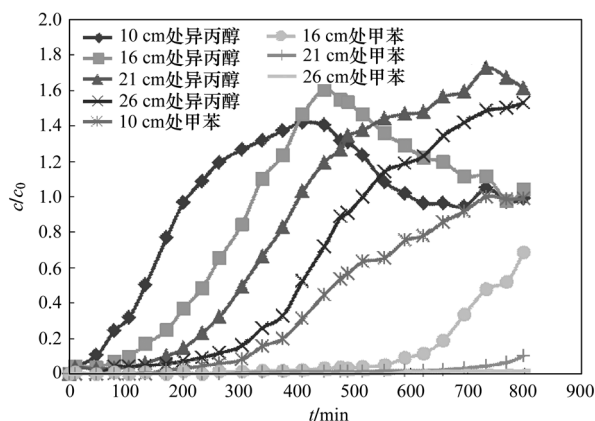


图 5 不同长度处混合气体吸附穿透曲线

Fig. 5 Breakthrough profile of mixed gas at different length

2.3 混合气体分离效果

应用软件 Origin 7.5 对图 5 的混合气体吸附穿透曲线进行积分计算,得出长度方向上各活性炭床层对异丙醇和甲苯吸附量的情况,结果如表 2 所示. 对各吸附单元段通过热气体循环回收系统再生后得到的回收液进行了组分分析,各段回收液中异丙醇、甲苯的质量百分比情况如图 6 所示.

得到的回收液全部都是甲苯,而在 21 ~ 26 cm 的长度上,由于强吸附质甲苯在长度 21 cm 处基本没有穿透,所以该段回收液中异丙醇的含量高达 99%. 本实验过程实现了通过串联活性炭柱吸附、不

表 2 不同长度位置的活性炭吸附层对异丙醇、
甲苯的吸附量情况

Table 2 Adsorption capacity of adsorption unit to isopropyl
alcohol and toluene

吸附柱区段/cm	异丙醇/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	甲苯/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
0~10	0.0	184.5
10~16	49.2	110.1
16~21	96.6	27.0
21~26	91.2	0.92

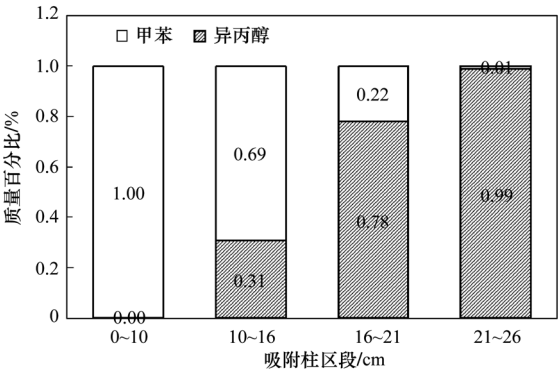


图 6 回收液中异丙醇、甲苯的质量百分比
Fig. 6 Percentages of isopropyl alcohol and toluene
in the recovery liquid

同床层长度区间分别脱附的方式将甲苯、异丙醇直接吸附分离回收的结果. 后续的实验将进一步研究相关的工艺参数问题.

2.4 混合吸附对异丙醇吸附容量变化

在混合气体吸附实验过程中, 弱吸附质异丙醇在不同床层长度处均出现了出口浓度大于进口浓度的现象. 不同长度处的出口与进口浓度的比值情况如表 3 所示.

表 3 混合气体吸附中异丙醇不同长度处浓度变化情况
Table 3 Concentration changes of isopropyl alcohol in
the mixed gas adsorption

累积吸附段 长度/cm	达到 c_0 时间 /min	达到 $c_{\max}$ 时间 /min	$c_{\max}/c_0$
10	233	410	1.42
16	339	448	1.61
21	410	733	1.73

由表 3 可见, 随着吸附床层高度的增加, $c_{\max}/c_0$ 呈现逐渐增大的趋势, 本实验期间, 21 cm 处的最大值达到了入口浓度的 1.73 倍. 这种现象主要是由活性炭表面对不同的有机物吸附结合常数不同引起的. 有机气体在活性炭表面的吸附过程实际上是一个吸附和解吸相平衡的过程, 当吸附能力强的有机气体达到一定浓度后必然对吸附能力弱的有机气体

的吸附位点形成竞争性结合, 使得吸附能力弱的有机气体解吸量大于吸附量, 从而在局部形成弱吸附质气相浓度高于其进气浓度的现象, 其表现在穿透曲线上即为浓度“增浓”现象^[25,26,29,33]. 预计进一步增加床层长度后, 异丙醇的 $c_{\max}/c_0$ 将继续增大到某一极限值, 且该极值与混合气体成分的特性及浓度比例有关. 由于混合气体的总浓度穿透曲线中, 各长度出口浓度始终是小于入口浓度, 如图 7 所示, 且入口混合气体总浓度与异丙醇浓度的比值为 2.56, 因此初步推断, 本实验中 $c_{\max}/c_0$ 将不会大于 2.56.

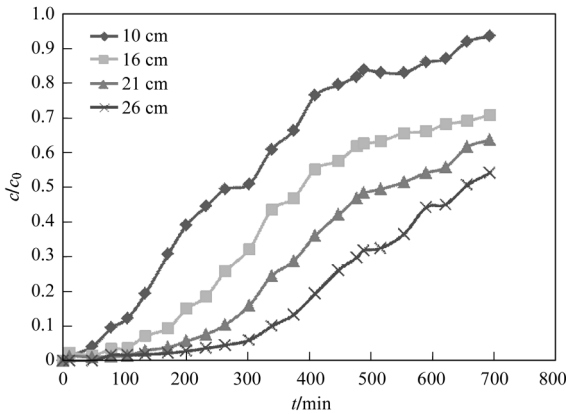


图 7 混合气体总浓度穿透曲线
Fig. 7 Breakthrough curve of total concentration for mixed gas

通常情况下吸附容量将随入口浓度的升高而增加. 如前所述, 弱吸附性气体因强吸附性气体的置换脱附作用可能在吸附床的局部区域形成高于其入口气相浓度的区域, 从而增大该区域的吸附容量. 从图 6 和表 2 可知, 本实验过程中, 16~21 cm 和 21~26 cm 吸附段的异丙醇平均吸附量分别达到了 $96.6 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $91.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 与异丙醇浓度为 $498 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时的 $72 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 相比, 分别增大了 34% 和 27%. 从回收工艺角度考虑, 提高吸附剂对吸附质的吸附容量, 对降低回收过程的能耗具有非常重要的意义.

3 结论

(1) 在甲苯和异丙醇混合气体吸附体系中, 甲苯为强吸附质, 异丙醇为弱吸附质.

(2) 通过多段吸附单元串联方式可以实现具有一定物性差异的混合气体直接吸附分离回收. 在表观气速 $0.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 混合气体入口异丙醇、甲苯浓度分别为 $477 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $746 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 条件下, 分别通过对 26 cm 长度吸附层的上游段和下游段的热再

生回收得到了含量在 99% 的甲苯和异丙醇回收液。

(3) 弱吸附质异丙醇在吸附过程中气相浓度存在超过入口浓度的峰值区间,且峰值浓度有随吸附层长度增高的趋势。该现象有利于吸附床下游床层对弱吸附质吸附容量的提高。本实验中,下游吸附段中异丙醇的平均吸附容量与入口浓度的平衡吸附容量相比提高了 27% 以上。

参考文献:

- [1] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [2] Jimenez J L, Canagaratna M R, Donahue N M, *et al.* Evolution of organic aerosols in the atmosphere [J]. Science, 2009, **326**(5959): 1525-1529.
- [3] Robert H P, Don W G, James O M. Perry's Chemical Engineers' Handbook[M]. (7th edition). McGraw-Hill Companies. Inc., 2001.
- [4] 叶振华. 化工吸附分离过程[M]. 北京: 中国石化出版社, 1992.
- [5] Ghoshal A K, Manjare S D. Selection of appropriate adsorption technique for recovery of VOCs; an analysis [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2002, **15**(6): 413-421.
- [6] Shonnard D R, Hiew D S. Comparative environmental assessments of VOC recovery and recycle design alternatives for a gaseous waste stream [J]. Environmental Science and Technology, 2000, **34**(24): 5222-5228.
- [7] Subramanian D, Ritter J A. Equilibrium theory for solvent vapor recovery by pressure swing adsorption; analytical solution for process performance [J]. Chemical Engineering Science, 1997, **52**(18): 3147-3160.
- [8] Kostroski K P, Wankat P C. High recovery cycles for gas separations by pressure-swing adsorption [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2006, **45**(24): 8117-8133.
- [9] Agnihotri S, Rood M J, Rostam-Abadi M. Adsorption equilibrium of organic vapors on single-walled carbon nanotubes [J]. Carbon, 2005, **43**(11): 2379-2388.
- [10] Das D, Gaur V, Verma N. Removal of volatile organic compound by activated carbon fiber [J]. Carbon, 2004, **42**(14): 2946-2962.
- [11] Menard D, Py X, Mazet N. Activated carbon monolith of high thermal conductivity for adsorption processes improvement part A: Adsorption step [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, **44**(9): 1029-1038.
- [12] Yamauchi H, Kodama A, Hirose T, *et al.* Performance of VOC abatement by thermal swing honeycomb rotor adsorbers [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007, **46**(12): 4316-4322.
- [13] Hashisho Z, Rood M, Botich L. Microwave-swing adsorption to capture and recover vapors from air streams with activated carbon fiber cloth [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(17): 6851-6859.
- [14] Luo L, Ramirez D, Rood M J, *et al.* Adsorption and electrothermal desorption of organic vapors using activated carbon adsorbents with novel morphologies [J]. Carbon, 2006, **44**(13): 2715-2723.
- [15] Emamipour H, Hashisho Z, Cevallos D, *et al.* Steady-state and dynamic desorption of organic vapor from activated carbon with electrothermal swing adsorption [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(14): 5063-5069.
- [16] Bonjour J, Clausse M, Meunier F. A TSA process with indirect heating and cooling; parametric analysis and scaling-up to practical sizes [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, **44**(9): 969-977.
- [17] Nastaj J F, Ambrozek B, Rudnicka J. Simulation studies of a vacuum and temperature swing adsorption process for the removal of VOC from waste air streams [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, **33**(1): 80-86.
- [18] Ko D H, Kim M, Moon I, *et al.* Analysis of purge gas temperature in cyclic TSA process [J]. Chemical Engineering Science, 2002, **57**(1): 179-195.
- [19] 尤涛, 张爱丽, 周集体. 甲酚异构体在活性炭上的吸附与解吸平衡特性[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1744-1748.
- [20] Dobruskin V K. Micropore structure of activated carbons and predictions of adsorption equilibrium [J]. Carbon, 2002, **40**(7): 1003-1010.
- [21] Ramirez D, Qi S Y, Rood M J. Equilibrium and heat of adsorption for organic vapors and activated carbons [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(15): 5864-5871.
- [22] Wood G O. A review of the effects of covapors on adsorption rate coefficients of organic vapors adsorbed onto activated carbon from flowing gases [J]. Carbon, 2002, **40**(5): 685-694.
- [23] Lillo-Ródenas M A, Fletcher A J, Thomas K M, *et al.* Competitive adsorption of a benzene-toluene mixture on activated carbons at low concentration [J]. Carbon, 2006, **44**(8): 1455-1463.
- [24] Vahdat N. Theoretical study of the performance of activated carbon in the presence of binary vapor mixtures [J]. Carbon, 1997, **35**(10-11): 1545-1557.
- [25] 朱正双, 李立清, 郜豫川, 等. 多组分有机气体吸附性能与吸附剂选择性分析[J]. 天然气化工, 2008, **33**(2): 47-51.
- [26] Lee S W, Cheon J K, Park H J, *et al.* Adsorption characteristics of binary vapors among acetone, MEK, benzene, and toluene [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2008, **25**(5): 1154-1159.
- [27] 金一中, 徐灏, 谢裕坛. 活性炭吸附苯、甲苯废气的研究[J]. 高校化学工程学报, 2004, **18**(2): 258-263.
- [28] 王长林. 颗粒活性炭表面改性技术净化多组分挥发性有机废气的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [29] 高华生, 王大会, 叶芸春等. 空气湿度对低浓度有机蒸气在活性炭上吸附平衡的影响 [J]. 环境科学学报, 2002, **22**(2): 194-198.
- [30] 吴家全. 多组分气体混合物在多孔固体上吸附平衡研究

- [D]. 天津:天津大学,2006.
- [31] Chiang Y C, Chiang P C, Huang C P. Effects of pore structure and temperature on VOC adsorption on activated carbon [J]. Carbon, 2001, **39**(4): 523-534.
- [32] Wood G O. Review and comparisons of D/R models of equilibrium adsorption of binary mixtures of organic vapors on activated carbons [J]. Carbon, 2002, **40**(3): 231-239.
- [33] Vahdat N, Swearingen P M, Johnson J. Adsorption prediction of binary-mixtures on adsorbents used in respirator cartridges and air-sampling monitors [J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 1994, **55**(10): 909-917.
- [34] 李立清,朱正双,秦映心,等. 两组分有机气体等温吸附模拟与传热传质分析[J]. 中国电机工程学报,2008,**28**(26):46-52.
- [35] 陈良杰. 颗粒活性炭对多组分有机气体的吸附研究[D]. 北京:北京化工大学,2007.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping(3461)
Study on Control and Management for Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) in China	
.....	WANG Hai-lin, ZHANG Guo-ning, NEI Lei, <i>et al.</i> (3462)
Countermeasures for Priority Control of Toxic VOC Pollution	CHEN Ying, LI Li-na, YANG Chang-qing, <i>et al.</i> (3469)
Evaluation of Treatment Technology of Volatile Organic Compounds for Fixed Industrial Resources	LUAN Zhi-qiang, HAO Zheng-ping, WANG Xi-qin(3476)
Emission Control Way of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, WEI Yu-xia, <i>et al.</i> (3487)
Regulations and Policies for Control of Volatile Organic Compounds and the Emission Standards in Taiwan	
.....	LUAN Zhi-qiang, WANG Xi-qin, ZHENG Ya-nan, <i>et al.</i> (3491)
Study on Foreign Regulations and Standards of Stationary Sources VOCs Emission Control	ZHANG Guo-ning, HAO Zheng-ping, JIANG Mei, <i>et al.</i> (3501)
VOCs Tax Policy on China's Economy Development	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, WANG Hai-lin, <i>et al.</i> (3509)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emitted from Biofuel Combustion in China	LI Xing-hua, WANG Shu-xiao, HAO Ji-ming(3515)
Spatial and Temporal Variations of Ambient Carbonyl Compounds in Beijing and Its Surrounding Areas	
.....	WANG Qin, SHAO Min, WEI Qiang, <i>et al.</i> (3522)
Analysis on Status Pollution and Variation of BTEX in Beijing	SUN Jie, WANG Yue-si, WU Fang-kun(3531)
Characteristics of Ambient VOCs and Their Role in O ₃ Formation; A Typical Air Pollution Episode in Shanghai Urban Area	
.....	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, GAO Song, <i>et al.</i> (3537)
Observation and Study on Atmospheric VOCs in Changsha City	LIU Quan, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (3543)
Characteristics of Volatile Organic Compounds During Haze Episode in Foshan City	
.....	MA Yong-liang, TAN Ji-hua, HE Ke-bin, <i>et al.</i> (3549)
Investigation on Emission Properties of Biogenic VOCs of Landscape Plants in Shenzhen	
.....	HUANG Ai-kui, LI Nan, Alex Guenther, <i>et al.</i> (3555)
Pollution and Source of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area in Beijing	
.....	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3560)
Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3566)
Source Emission Characteristics of Malodorous Volatile Organic Carbonyls from a Municipal Sewage Treatment Plant	
.....	ZHOU Mi, WANG Bo-guang, ZHAO De-jun, <i>et al.</i> (3571)
Source Emission Characteristics and Impact Factors of Volatile Halogenated Organic Compounds from Wastewater Treatment Plant	
.....	HE Jie, WANG Bo-guang, LIU Shu-le, <i>et al.</i> (3577)
Quantification Assessment of the Relationship Between Chemical and Olfactory Concentrations for Malodorous Volatile Organic Compounds	
.....	LIU Shu-le, WANG Bo-guang, HE Jie, <i>et al.</i> (3582)
Study on Transformation Mechanism of SOA from Biogenic VOC Under UV-B Condition	LI Ying-ying, LI Xiang, CHEN Jian-min(3588)
Kinetic Studies on the Gas-phase Reactions of NO ₃ Radicals with Three Cyclic Ethers	GAO Yan-bo, GE Mao-fa, WANG Wei-gang(3593)
Uptake of 3-methyl-3-buten-1-ol into Aqueous Mixed Solution of Sulfuric Acid and Hydrogen Peroxide	WANG Tian-he, LIU Ze, GE Mao-fa, <i>et al.</i> (3599)
An Overview on Analytical Method of Volatile Organic Compounds in Water	XU Xiu-yan, ZHU Qing, TAN Li, <i>et al.</i> (3606)
Determination of Low Concentration VOCs in Air by a Newly Designed Needle Trap Device	LI Xiang, CHEN Jian-min (3613)
Research on Determination of Total Volatile Organic Sulfur Compounds in the Atmosphere	
.....	WANG Yan-jun, ZHENG Xiao-ling, HE Ying, <i>et al.</i> (3617)
Automatic Continuous Monitoring of Volatile Organic Compounds Using Ion Mobility Spectrometer Array	
.....	ZHOU Qing-hua, CANG Huai-wen, JU Bang-yu, <i>et al.</i> (3623)
Development of a Membrane Inlet-Single Photon Ionization/Chemical Ionization-Mass Spectrometer for Online Analysis of VOCs in Water	
.....	HUA Lei, WU Qing-hao, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (3628)
Detection of TVOC and Odor in Industrial Park Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, YE Zhao-xia, <i>et al.</i> (3635)
Applicability of an Electronic Nose for Detection of Volatile Chlorinated Hydrocarbons in Soil	
.....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (3641)
Test and Analysis of Acrylic Acid Ester in Industry Pipelines	WU Bin, ZHANG Hong-yan, LU Lin-guang(3647)
Preparation of Honeycombed Monolithic Zeolite and Hydrophobic Modification with SiCl ₄	WANG Xi-qin, LI Kai, WEI Bing, <i>et al.</i> (3653)
Synthesis of Manganese Oxide Octahedral Molecular Sieve and Their Application in Catalytic Oxidation of Benzene	LI Dong-yan, LIU Hai-di, CHEN Yun-fa(3657)
Adsorption-Desorption Performance of Honeycomb-Shaped Activated Carbon	HAN Zhong-juan, LUO Fu-kun, LI Ze-qing(3662)
Process of Adsorption and Separating Recovery Solvents from Vapor Mixture Directly	WANG Hong-yu, QIANG Ning, HU Xia(3667)
BTF Performance Treating a Chlorobenzene-Contaminated Gas Stream	ZHOU Qing-wei, ZHU Run-ye, HU Jun, <i>et al.</i> (3673)
Purification of Complicated Industrial Organic Waste Gas by Complex Absorption	CHEN Ding-sheng, CEN Chao-ping, TANG Zhi-xiong, <i>et al.</i> (3680)
Analysis of the Treatment Technology Pathway of VOCs Released from Oven	LI Ze-qing, LUO Fu-kun(3685)
Fabrication of Co ₃ O ₄ Nanorods and Its Catalytic Oxidation of Gaseous Toluene	YAN Qing-yun, LI Xin-yong, ZHAO Qi-dong, <i>et al.</i> (3689)
Preparation, Characterization of Si Doped TiO ₂ Nanotubes and Its Application in Photocatalytic Oxidation of VOCs	
.....	ZOU Xue-jun, LI Xin-yong, QU Zhen-ping, <i>et al.</i> (3694)
Research of the Natural Attenuation Capacity of Oil Pollutants Based on <i>in-situ</i> Experiment	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (3699)
Experimental Research of Oil Vapor Pollution Control for Gas Station with Membrane Separation Technology	
.....	ZHU Ling, CHEN Jia-qing, ZHANG Bao-sheng, <i>et al.</i> (3704)
CFD Numerical Simulation onto the Gas-Liquid Two-Phase Flow Behavior During Vehicle Refueling Process	
.....	CHEN Jia-qing, ZHANG Nan, WANG Jin-hui, <i>et al.</i> (3710)

《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)

2011年12月15日 32卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Founded in 1976)

Vol. 32 No. 12 Dec. 15, 2011

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