

# 气提-光催化组合工艺再生饱和吸附甲苯的活性炭

陈宗华<sup>1</sup>, 陈 杰<sup>1</sup>, 汪 琼<sup>1</sup>, 李国玉<sup>1</sup>, 王玉萍<sup>1,2</sup>

(1. 南京师范大学化学与材料科学学院, 江苏 南京 210097)

(2. 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 江苏 南京 210097)

**[摘要]** 以饱和吸附甲苯的活性炭为实验对象, 利用气提-光催化组合工艺对其进行再生, 探究其再生活性炭的最佳工艺条件。考察了光催化反应装置级数、催化剂与活性炭的质量比、气体流量、活性炭投加量、再生次数等对再生过程中甲苯去除率及活性炭再生率的影响。结果表明: 在催化剂与活性炭的质量比为 0.4, 气体流速为 3.5 m<sup>3</sup>/h, 活性炭的投加量为 50 g 时, 采用二级串联气相光催化方式下反应 50 min, 甲苯去除率为 87.11%, 活性炭再生率达到 82.06%。证明了该组合工艺能够对饱和吸附甲苯的活性炭进行有效的光催化再生。

**[关键词]** 光催化, 活性炭, 再生, 甲苯

**[中图分类号]** O69 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2017)04-0080-07

## Gas Stripping-Photocatalysis Combined Process Regenerated Activated Carbon Saturated by Toluene

Chen Zonghua<sup>1</sup>, Chen Jie<sup>1</sup>, Wang Qiong<sup>1</sup>, Li Guoyu<sup>1</sup>, Wang Yuping<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemistry and Materials Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

(2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** The optimum conditions for the combined process of air stripping and photocatalysis were studied by using the activated carbon saturated with toluene as the experimental object. The influences of the series of photocatalytic device, mass ratio of catalyst-activated carbon, gas flow, the addition of activated carbon, regeneration time of activated carbon on the removal efficiency of toluene and the regeneration rate of activated carbon were investigated. The results showed that when the mass ratio of the catalyst and activated carbon was 0.4, the gas flow was 3.5 m<sup>3</sup>/h and the addition of activated carbon was 50 g, the regenerated efficiency of activated carbon saturated with toluene with light irradiation of 50 min was 82.06% and the removal rate of toluene reached 87.11%, respectively. It is also proved that the combined process of air stripping and photocatalysis can effectively regenerate the activated carbon with saturated adsorption of toluene.

**Key words:** photocatalysis, activated carbon, regeneration, toluene

甲苯是一种无色、带特殊芳香味的易挥发有毒液体, 能够长期稳定地存在环境当中<sup>[1]</sup>。人类如果长期处于甲苯的环境中, 会产生各类疾病, 情况严重者会造成死亡<sup>[2-3]</sup>。甲苯在环境中容许存在的浓度不超过 0.2 mg/m<sup>3</sup>, 因此有效控制甲苯在环境中的浓度受到各行业的广泛重视, 尤其是对含有甲苯废气的行业如涂装、印刷、绝缘材料、漆包线、树脂加工、皮革加工等。目前最常用的处理含甲苯、苯废气的方法是活性炭吸附法<sup>[4-6]</sup>。饱和吸附苯、甲苯的活性炭属于危险废弃物, 如果不处理就随意废弃, 不仅会造成活性炭吸附处理成本的大幅提高, 也将对大气环境产生严重的影响。

从环保和经济角度考虑, 研究活性炭经济实用的再生方法是十分必要的<sup>[7]</sup>。目前对甲苯去除及活性炭再生的方法很多, 如热再生法<sup>[8]</sup>、生物再生法<sup>[9]</sup>、溶剂再生法<sup>[10]</sup>、湿式氧化再生法<sup>[11]</sup>、电化学再生法<sup>[12]</sup>、超临界流体再生法<sup>[13]</sup>、超声波再生法<sup>[14]</sup>、光催化再生法等。这些活性炭再生技术普遍存在着活性炭再生效率低和再生成本高的问题<sup>[15-18]</sup>, 比如热再生方法就存在耗能耗时、影响活性炭结构等缺点<sup>[19-20]</sup>。

收稿日期: 2016-09-09.

基金项目: 国家自然科学基金(51578295)、江苏省环保科技专项基金(2013002)。

通讯联系人: 王玉萍, 教授, 研究方向: 纳米半导体光催化材料及其在环境中的应用. E-mail: wangyuping@njnu.edu.cn

由于甲苯易挥发,采用气提等方式可以有效去除吸附在活性炭中的甲苯<sup>[21]</sup>. 气体中的甲苯可以利用气相光催化氧化技术有效去除<sup>[22]</sup>. 但采用气提和光催化的组合工艺再生吸附甲苯的活性炭的研究还未见报道.

本研究采用了气提-光催化氧化组合工艺对饱和吸附甲苯的活性炭进行再生处理. 将气提和光催化组合,既可提高催化剂与光接触效率,又有利于活性炭上污染物的迁移,从而提高活性炭的再生效率. 实验考察了气体流量、活性炭质量等工艺条件对活性炭再生率的影响,测定了再生炭的结构和性能及重复使用效果.

## 1 实验部分

### 1.1 饱和吸附甲苯的活性炭处理

将活性炭(分析纯,溧阳竹溪活性炭有限公司)进行研磨、筛分、酸洗、水洗、干燥处理,筛选粒度为 40-60 目的活性炭. 取 50 g 已处理的活性炭,置于 100 mL 甲苯液体中吸附甲苯 24 h,获得饱和吸附液体甲苯的活性炭.

### 1.2 光催化再生活性炭

气提-光催化再生活性炭的实验装置为自制反应装置,如图 1 所示. 光源(汞灯)置于反应器中心,气相脱附和光反应装置为圆柱状结构,石英冷阱与管口使用磨口密封.

活性炭再生过程如下:(1)取一定质量饱和吸附甲苯的活性炭(AC)与  $\text{I-TiO}_2$  (实验室自制,来源及性质详见参考文献[23])催化剂按图 1 所示放置于气-固流化床反应器中;(2)以鼓风机提供气体,对活性炭中甲苯进行脱附,并使  $\text{I-TiO}_2$  催化剂在此气流下形成流化状态;(3)在气流作用下甲苯与  $\text{I-TiO}_2$  催化剂在 12 W 紫外灯的光源下进行光催化,尾气进入吸收池吸收;(4)利用气相色谱分析光催化反应前后气相中甲苯的浓度,计算甲苯去除率. 取不同反应时间的活性炭样品 0.25 g,测定其对亚甲蓝的饱和吸附量评价光催化再生效果.

活性炭样品对亚甲蓝吸附容量测定:具体方法如下,0.25 g 样品加入 50 mL 浓度为 1 000 mg/L 的亚甲蓝溶液中,置于 30 °C 水浴恒温振荡器中,恒温振荡 24 h,整个过程在避光条件下进行. 吸附结束离心并取上层清液,在 665 nm 下用紫外可见分光光度计测定亚甲蓝溶液的吸光度. 活性炭的亚甲蓝吸附量按下式计算:

$$m_1 = \frac{(C_0 - C_1) \times V}{m}, \quad (1)$$

式中,  $m_1$  为活性炭的亚甲蓝单位吸附量 (mg/g);  $C_0$  为亚甲蓝吸附液初始浓度 (mg/L);  $C_1$  为吸附结束后亚甲蓝溶液浓度 (mg/L);  $m$  为活性炭的质量 (g);  $V$  为吸附用亚甲蓝溶液体积 (L).

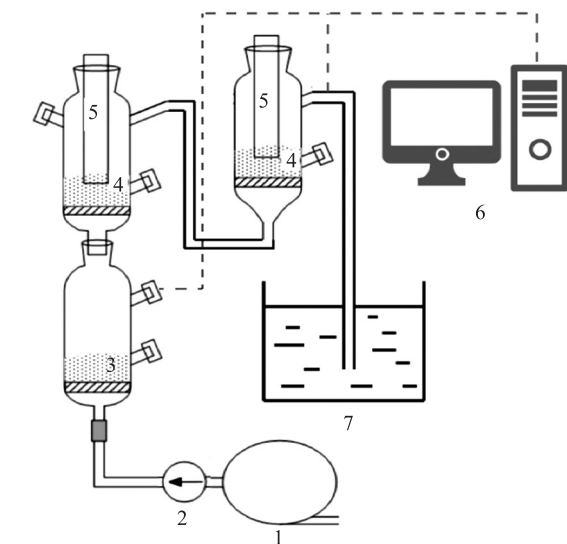
光催化再生效率( $\eta$ )通过下式计算:

$$\eta = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中,  $m_1$  为再生后活性炭的亚甲蓝单位吸附量 (mg/g);  $m_0$  为原始活性炭的亚甲蓝单位吸附量 (mg/g).

### 1.3 甲苯去除率的测定与计算

光催化反应过程中,利用气相色谱检测反应器进、出口处气体中甲苯的浓度. 反应前 60 min 内,每 10 min 取一次样,之后每 20 min 取一次样. 当进、出口处气体浓度相同且浓度很低时,再生反应结束. 为了减少动态实验误差,平行 2-3 次实验并取平均值为实验结果. 利用下式计算甲苯的去除率:



1-鼓风机;2-流量计;3-吸附饱和和活性炭;4-催化剂;5-石英冷阱;6-检测系统;7-吸收池

图 1 气提-光催化反应装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas stripping-photocatalytic reaction equipment

$$\text{去除率 } \theta = \frac{s_1 - s_2}{s_1} \times 100\%, \tag{3}$$

式中,  $s_1$  为光催化反应器进口处气体中甲苯的浓度;  $s_2$  为光催化反应器出口处气体中甲苯的浓度.

2 结果与讨论

2.1 光催化装置串联数目对甲苯去除影响

气相中甲苯的去除率是评价该组合工艺的重要指标. 本实验中由于气体流量较大, 且有机物的光催化降解需要一定的反应时间, 因此我们通过串联光催化反应器来提高气相中甲苯的去除率. 实验选取活性炭质量为 50 g, 气体体积流量为 3.5 m<sup>3</sup>/h, 催化剂与活性炭的质量比为 0.4, 分别测定了一级和二级串联光催化反应器中气相甲苯的去除率, 实验结果如图 2 所示.

从图 2 可见, 反应 50 min 时, 串联二级反应中甲苯的去除率达到 87.11%, 而相同条件下, 一级的去除率为 77.79%. 这可能是由于有机物的光催化降解需要一定时间, 串联二级光催化反应装置中, 催化剂量增加, 甲苯与活性氧化物的接触时间增加, 更有利于甲苯的去除, 也可进一步降低气体中甲苯的浓度. 以下实验均采用二级串联光催化装置进行活性炭再生.

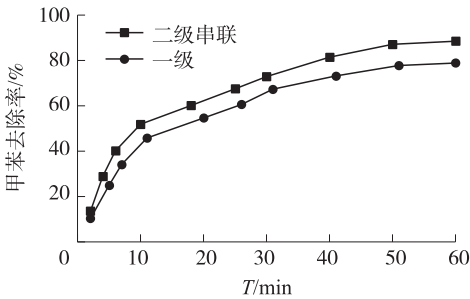


图 2 光催化反应装置级数对甲苯去除影响  
Fig. 2 The effect of number of photocatalytic reactors on the removal efficiency of toluene

2.2 活性炭再生工艺条件探究

2.2.1 催化剂与活性炭的质量比对甲苯去除率和活性炭再生率的影响

图 3 为催化剂与活性炭的不同质量比对气相中甲苯去除率和反应 50 min 活性炭再生效果的影响, 其中活性炭质量 50 g, 气体体积流量 3.5 m<sup>3</sup>/h.

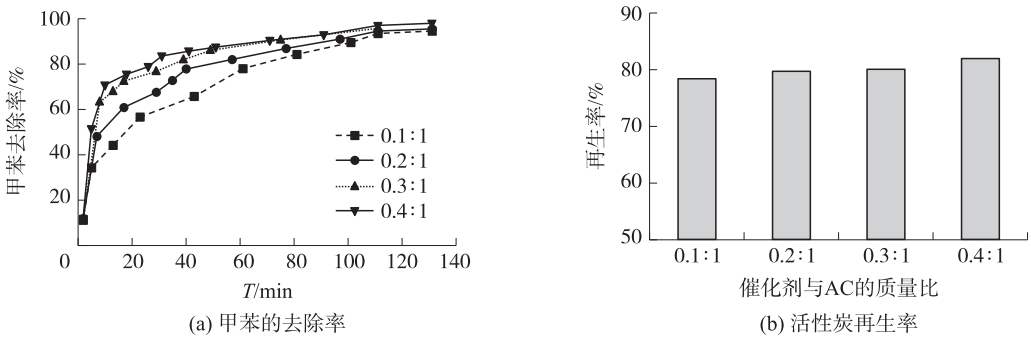


图 3 催化剂与活性炭质量比对甲苯的去除率与活性炭再生率的影响  
Fig. 3 The effect of mass ratio of catalyst-activated carbon on the removal efficiency of toluene and the regeneration rate of activated carbon

活性炭的再生率主要取决于甲苯的逸出效率, 催化剂与活性炭的质量比增加主要影响气体中甲苯的浓度. 从图 3(b)发现, 随着催化剂与活性炭质量比的增加, 活性炭再生率略有增加. 当催化剂与活性炭质量比为 0.4 时, 活性炭再生率为 82.06%. 由图 3(a)可以看出, 当催化剂与活性炭质量比在 0.3 以下时, 随着催化剂与活性炭质量比增加, 甲苯的去除率增加; 催化剂与活性炭质量比为 0.3 及以上时, 甲苯去除率基本相同. 这可能是由于从活性炭上脱附的甲苯在气流作用下首先进入一级光催化反应装置进行光降解, 未能降解的甲苯进一步进入二级光催化装置降解. 在紫外光下 TiO<sub>2</sub> 光催化氧化降解有机物, 实质上是一种自由基反应. 增加催化剂的投加量, 光照产生的自由基增多, 光催化反应效率提高<sup>[24]</sup>.

2.2.2 气体流量对甲苯去除率和活性炭再生率的影响

气体流量对活性炭上甲苯脱附效率及活性炭的结构有重要影响, 选取合适的气体流量是必要的. 实验比较了不同气体流量对气相中甲苯去除率和反应 50 min 活性炭再生效果的影响, 结果如图 4 所示, 其

中活性炭质量 50 g, 催化剂与活性炭的质量比 0.4.

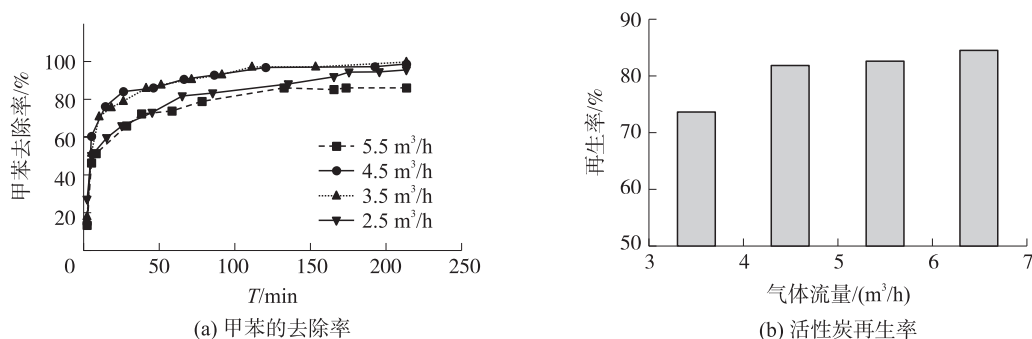


图 4 气体流量对甲苯的去除率和活性炭再生率的影响

Fig. 4 The effect of gas flow on the removal efficiency of toluene and the regeneration rate of activated carbon

从图 4(a) 可见,适当地增加气体流量,可以提高甲苯的去除率;但当气体流量过大时,甲苯的去除率反而降低. 这主要是由于气体流量较大时,甲苯与催化剂接触时间缩短,气体中部分甲苯来不及被光降解被气流带出,所以虽然气体流量增加,甲苯的去除率降低. 从图 4(b) 可见,增加气体流量有利于活性炭上甲苯的脱附,但继续增加气提流量,活性炭的再生率增加不明显. 这是因为气体流量增加有利于活性炭的流化和活性炭内部有机物的逸出;但进入活性炭深处微孔的甲苯不易脱附,气体流量的增加对这部分甲苯的逸出影响不大. 因此,气体流量需要控制在适当范围内.

### 2.2.3 活性炭的投加量对甲苯去除率和活性炭再生率的影响

图 5 为加入反应装置中活性炭的质量对气相中甲苯去除率和反应 50 min 活性炭再生效果的影响. 实验中催化剂与活性炭质量比为 0.4、气体流量为 3.5 m³/h.

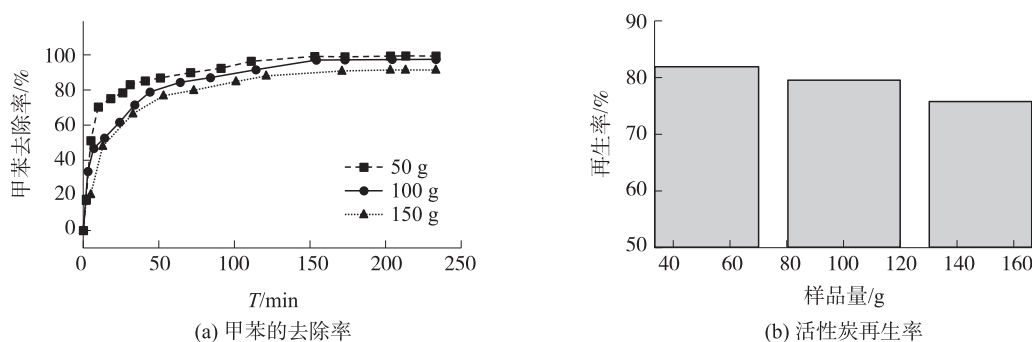


图 5 样品投加量对甲苯的去除率和活性炭再生率的影响

Fig. 5 The effect of dosing quantity of activated carbon on the removal efficiency of toluene and the regeneration rate of activated carbon

从图 5 可见,随着活性炭投加量增大,甲苯去除率和活性炭再生率均下降. 这是因为,一方面随着活性炭投加量增多,进入气体中甲苯的量增加,在相同催化剂质量下,催化剂由光照产生的自由基数量一定,投加量越多,甲苯的浓度越高,被降解的百分率越小,因此活性炭甲苯的光催化降解效率降低;另一方面,在一定的流量下活性炭投加量增多将导致其流化程度减小,使得甲苯从活性炭中脱附的时间变长,活性炭再生率降低.

### 2.2.4 再生次数对甲苯去除率和活性炭再生率的影响

图 6 为不同再生次数甲苯去除率和反应 50 min 活性炭再生效果的影响,实验条件是活性炭质量 50 g, 催化剂与活性炭的质量比 0.4, 气体体积流率 3.5 m³/h.

从图 6 可见,随着再生次数的增加,甲苯去除率和活性炭的再生率变化不大,经过 10 次循环,反应 50 min 后活性炭的再生率可达 78.76%、甲苯的去除率下降 14% 左右. 这可能是因为活性炭物理吸附取决于其孔结构<sup>[25]</sup>,在芳香烃吸附研究中,吸附在活性炭上的甲苯大部分位于大孔与中孔中,少量进入微孔. 大孔和中孔中的甲苯在气提中易脱附,而微孔中的活性炭不易进也不易出. 在多次循环中,微孔逐渐被塞满,此时气提作用对活性炭的再生率达到平衡,所以几次重复后,活性炭再生率基本相同<sup>[26]</sup>.



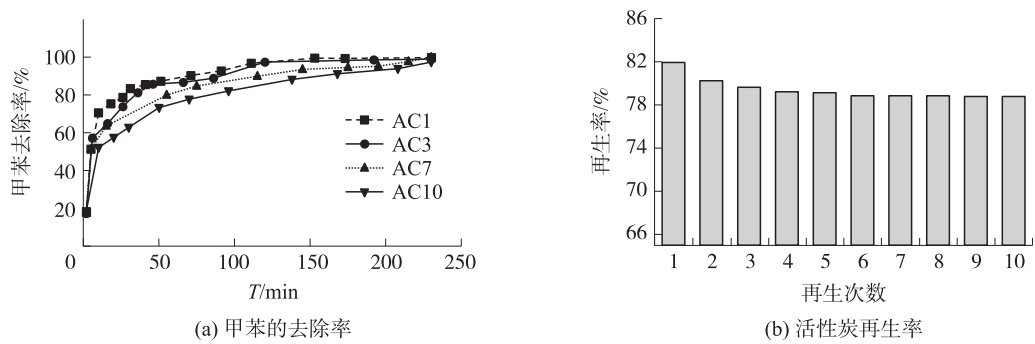


图 6 再生次数对甲苯的去除率和活性炭再生率的影响

Fig. 6 The effect of regeneration frequencies on the removal efficiency of toluene and the regeneration rate of activated carbon

2.3 再生炭的表征

2.3.1 不同条件再生前后活性炭的傅立叶红外光谱分析

对经过不同条件再生后的活性炭进行傅立叶红外光谱测定,结果如图 7 所示.

从图 7 可以看出,未光催化的活性炭的红外谱图上面有着明显的甲苯的峰,其中  $1\,647\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,558\text{ cm}^{-1}$  归属于 C=C 的伸缩振动; $1\,382\text{ cm}^{-1}$  归属于 C—H 键的伸缩振动; $958\text{ cm}^{-1}$ ,  $993\text{ cm}^{-1}$  和  $796\text{ cm}^{-1}$  对应 C—H 的弯曲振动,在催化剂和活性炭的质量比为 0.2 及以上、气体流速大于  $3.5\text{ m}^3/\text{h}$ 、活性炭的处理量在  $100\text{ g}$  以下,再生次数为 8 次及以下,均未出现甲苯的特征峰,说明活性炭上的甲苯已经被去除. 活性炭在再生 8 次以上有较小的 C=C 伸缩振动的峰出现,可能是因为随着再生次数的增加,活性炭微孔中的甲苯不易被脱附,并随着循环次数增加逐渐积累产生的. 红外光谱的实验结果与亚甲蓝法测定的活性炭再生率的结果一致.

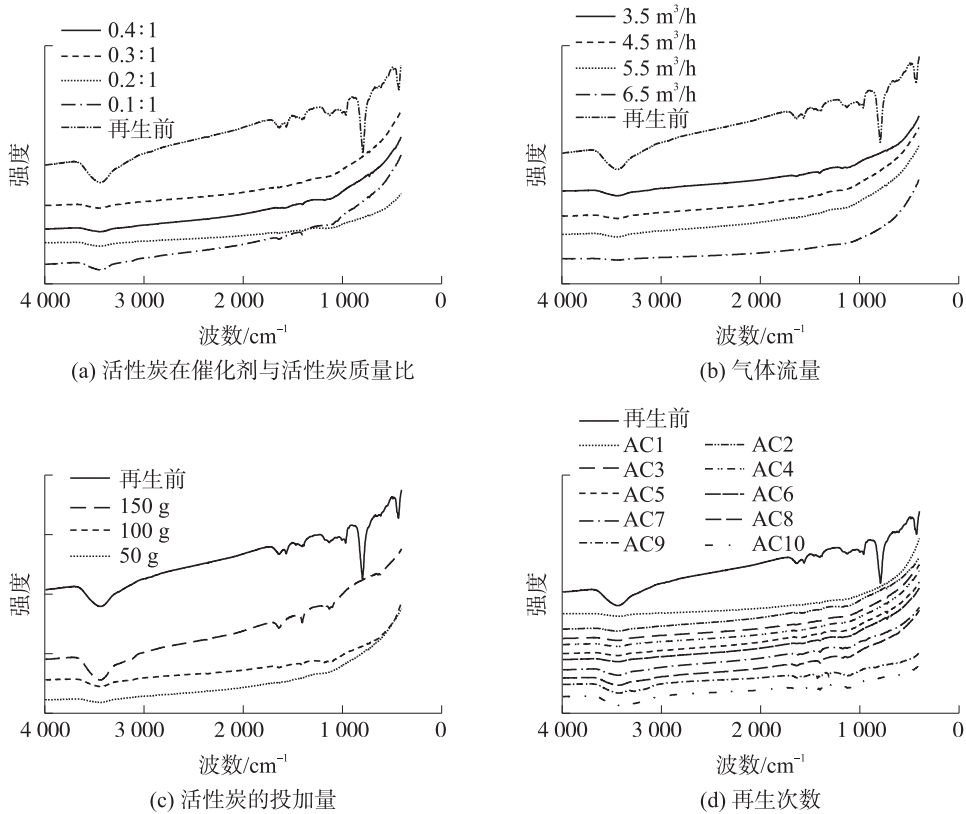


图 7 不同条件再生后的活性炭样品的红外光谱图

Fig. 7 FTIR spectra of activated carbon regenerated by different conditions

2.3.2 再生炭的  $\text{N}_2$  吸附-脱附分析

对再生活性炭进行  $\text{N}_2$  吸附-脱附测定,根据 BET 原理,将实验数据进行线性拟合处理后可得到样品的比表面积和孔结构尺寸. 实验结果见图 8.

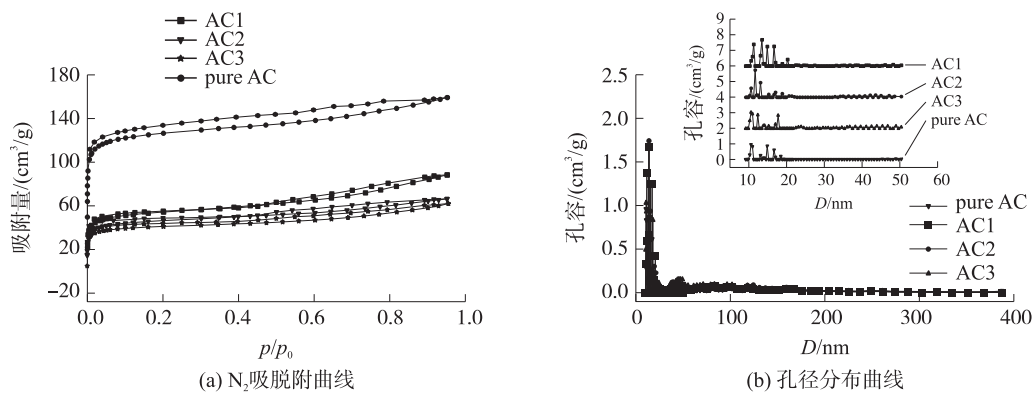


图 8 不同活性炭样品的 N<sub>2</sub> 吸脱附曲线和孔径分布曲线

Fig. 8 N<sub>2</sub> absorption-desorption isotherms and pore size distribution curves of activated carbon samples

从图 8(a) 可见,再生后的活性炭的结构没有改变只是吸附量减小,增加再生次数,对结构没有影响;从孔径分布曲线(图 8b)可以看出,再生炭的孔隙结构基本没有变化,利用 BET 方程和 BJH 法计算的活性炭和再生炭的比表面积和孔结构参数列于表 1. 由表 1 可知,随着再生次数的增加,再生炭的比表面积、孔容和孔径略有减小,这可能是因为活性炭微孔中残留的微量甲苯和甲苯的分解产物堵塞所致.

2.4 组合工艺再生饱和吸附甲苯活性炭的机理探究

我们认为组合工艺再生活性炭可分为下列几个步骤进行:首先甲苯在气流作用下,从活性炭的表面和内部脱附,该过程中可能存在着少量脱附出来的甲苯重新被活性炭吸附;其次脱附出来的甲苯在气流作用下进入光催化反应器并与催化剂接触;而催化剂在光源的作用下产生空穴,空穴与气体中的 O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等发生一系列反应生成·OH;气相中的甲苯在·OH 作用下最终被分解为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等无害物质<sup>[27]</sup>. 图 9 为气提-光催化组合工艺中活性炭再生的机理示意图.

该组合方法将流体力学和纳米技术相结合,为吸附挥发性组分的活性炭提供了一个新的再生工艺.

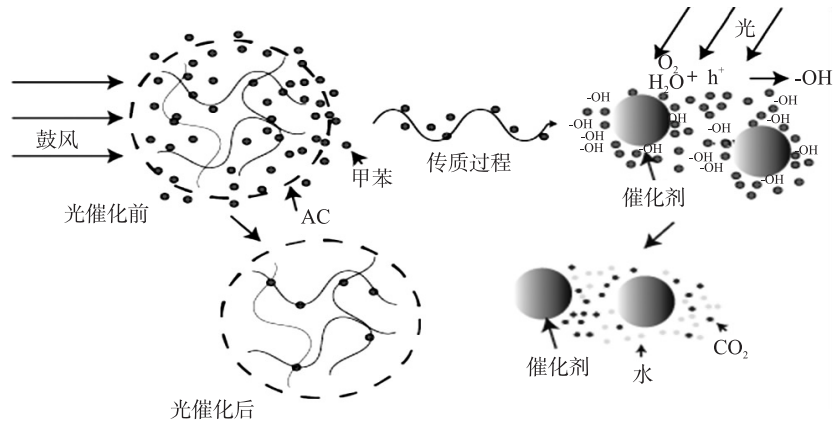


图 9 组合工艺再生饱和和吸附甲苯的活性炭机理示意图

Fig. 9 Schematic illustration of the regeneration mechanism of activated carbon saturated with toluene

3 结论

气提-光催化组合工艺可以再生饱和吸附甲苯的活性炭. 50 g 饱和吸附甲苯活性炭,在催化剂与活性炭的质量比为 0.4、气体流量为 3.5 m<sup>3</sup>/h、反应 50 min,气相中甲苯去除率可达到 87.11%和活性炭再生率达到 82.06%. 活性炭投入量增加或气体流速增加都影响甲苯的去除率和活性炭的再生率;经过 10 次循环实验表明,该方法再生的活性炭可以反复使用.

## [参考文献]

- [1] AGUADO S, POLO A C, BERNAL M A, et al. Removal of pollutants from indoor air using zeolite membranes[J]. Journal of membrane science, 2004, 240(1/2): 159–166.
- [2] MO J, ZHANG Y, YANG R. Novel insight into VOC removal performance of photocatalytic oxidation reactors[J]. Indoor air, 2005, 15(4): 291–300.
- [3] 周烈兴, 彭金辉, 钱天才, 等. 活性炭对甲苯的吸附及其等温线预测[J]. 化学反应工程与工艺, 2011, 27(2): 187–192.
- [4] 许柱, 李宝荣, 宁永森, 等. 活性炭吸附室内常见气体污染物的研究进展[J]. 轻工科技, 2015, 12: 114–116.
- [5] BAUR G B, YURANOV I, KIWI M L. Activated carbon fibers modified by metal oxide as effective structured adsorbents for acetaldehyde[J]. Catalysis today, 2015, 249: 252–258.
- [6] WANG G, DOU B J, ZHANG Z S, et al. Adsorption of benzene, cyclohexane and hexane on ordered mesoporous carbon[J]. Journal of environmental sciences, 2015, 30: 65–73.
- [7] FOO K Y, HAMEED B H. A cost effective method for regeneration of durian shell and jackfruit peel activated carbons by microwave irradiation[J]. Chemical engineering journal, 2012, 193: 404–409.
- [8] GUO D S, SHI Q T, HE B B, et al. Different solvents for the regeneration of the exhausted activated carbon used in the treatment of coking wastewater[J]. Hazard Mater, 2011, 186: 1 788–1 793.
- [9] 孟志国, 王金生, 付磊, 等. 湿式过氧化物氧化法处理苯酚丙酮废水研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(4): 571–574.
- [10] FURUYA E, SATO K, KATAOKA T, et al. Amount of aromatic compounds adsorbed on inorganic adsorbents[J]. Separation and purification technology, 2004, 39(1/2): 73–78.
- [11] 杨爽, 江洁, 张雁秋. 湿式氧化技术的应用研究进展[J]. 环境科学与管理, 2005, 30(4): 88–90.
- [12] DUAN F, LI Y P, CAO H B, et al. Activated carbon electrodes: electrochemical oxidation coupled with desalination for wastewater treatment[J]. Environmental sciences, 2015, 125: 205–211.
- [13] TAKAHASHI N, USHIKI I, HAMABE Y, et al. Measurement and prediction of desorption behavior of five volatile organic compounds (acetone, n-hexane, methanol, toluene, and n-decane) from activated carbon for supercritical carbon dioxide regeneration[J]. Journal of supercritical fluids, 2016, 107: 226–233.
- [14] 周键, 王三反, 陈霞. 超声波再生颗粒活性炭的试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(4): 143–147.
- [15] LI X W, ZHANG X S, WANG H, et al. Capacitive deionization regeneration as a possible improvement of membrane regeneration method for absorption air-conditioning system[J]. Applied energy, 2016, 171: 405–414.
- [16] SHENDE R V, MAHAJANI V V. Wet oxidative regeneration of activated carbon loaded with reactive dye[J]. Water management, 2002, 22: 73–83.
- [17] 张立强, 蒋海涛, 马春园, 等. 烟气脱硫活性炭微波再生特性的实验研究[J]. 燃料化学学报, 2012(11): 1 366–1 371.
- [18] 陈维芳, 林淑英, 程明涛. 表面活性剂改性活性炭对高氯酸盐的吸附和再生[J]. 中国环境科学, 2012(3): 461–466.
- [19] AHMARUZZAMAN M. Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: a review[J]. Advance in colloid and interface, 2008, 143(2): 48–67.
- [20] PIMENTA A C D, KILDUFF J E. Oxidative coupling and the irreversible adsorption of phenol by graphite[J]. Journal of colloid and interface science, 2006, 293(2): 278–289.
- [21] 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): 1 699–1 704.
- [22] 殷永泉, 郑艳, 苏元成, 等. 气相甲苯光催化降解反应动力学及机理[J]. 过程工程学报, 2009, 9(3): 536–540.
- [23] SHI Q, JIANG C Y, WANG Y P, et al. Preparation and characterization of PVA-I complex doped mesoporous TiO<sub>2</sub> by hydrothermal method[J]. Applied surface science, 2013, 273(5): 769–775.
- [24] 崔丹丹, 蒋剑春, 孙康, 等. 竹活性炭负载二氧化钛光催化降解水溶液中甲醛的研究[J]. 功能材料, 2011, 42(B06): 438–441.
- [25] 宋磊, 陈家元, 冯利, 等. 中孔结构对活性炭吸附卷烟烟气中有机物的影响[J]. 环境科学学报, 2014(2): 349–354.
- [26] 王占营, 刘应书, 李子宜, 等. 乙二酸和苯甲酸在活性炭上的脱附行为[J]. 化工学报, 2015, 66(10): 4 016–4 023.
- [27] KUMAR S G, DEVI L G. Review on modified TiO<sub>2</sub> photocatalysis under UV/visible light: selected results and related mechanisms on interfacial charge carrier transfer dynamics[J]. Journal of physical chemistry A, 2011, 115: 13 211–13 241.

[责任编辑: 顾晓天]