

引用格式: 吕雪龙,齐秋萍,柏广明,等. 球形活性炭和球形树脂对不同 VOCs 的吸脱附特性研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(4):58-64.

LÜ Xuelong, QI Qiuping, BAI Guangming, et al. Study on adsorption and desorption performance of spherical activated carbon and spherical polymer resin for different volatile organic compounds[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(4): 58-64.

球形活性炭和球形树脂对不同 VOCs 的吸脱附特性研究

吕雪龙,齐秋萍,柏广明,朱佳楠,张文睿,梁 鹏

(山东科技大学 化学与环境工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:为探究多级鼓泡流化床吸附工艺中吸附剂的选择依据,本研究选取3种商业球形吸附剂作为实验材料,分别考察乙醇、乙酸乙酯、环己烷和二甲苯在上述吸附剂上的吸脱附行为,比较分析了吸附剂不同理化性质对吸附特性的影响。实验结果表明:吸附剂孔道结构和表面官能团都会影响吸附质的动态吸附特性,具有更大微孔容积、更小微孔分布的吸附剂对吸附质的动态吸附性能更好;吸附剂的表面官能团类型会对不同吸附质的吸附产生影响。对于实验所考察的4种吸附质,3种吸附剂在脱附温度达到160 °C后均可脱附完全,符合实际应用要求。本研究工作对多级鼓泡流化床吸附工艺的开发及吸附剂的选择具有指导意义。

关键词:球形吸附剂;吸脱附特性;孔径;表面化学性质;挥发性有机化合物

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-3767(2019)04-0058-07

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.04.008

Study on adsorption and desorption performance of spherical activated carbon and spherical polymer resin for different volatile organic compounds

LÜ Xuelong, QI Qiuping, BAI Guangming, ZHU Jia'nan, ZHANG Wenrui, LIANG Peng

(College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: To explore the selection basis of adsorbents in the multistage bubbling fluidized bed adsorption process, this study selected three commercial spherical adsorbents as materials for experiments, investigated the adsorption and desorption behavior of ethanol, ethyl acetate, cyclohexane and xylene on these adsorbents respectively, and a comparative analysis of the effect of different physical and chemical properties of adsorbents on the adsorbates is accomplished. The results indicate that both the pore structure and surface functional groups of adsorbents affect the dynamic adsorption performance of adsorbates, and this performance on adsorbents with larger pore volume and smaller pore distribution is better. The type of surface functional groups of the adsorbents can affect the adsorption performance of different volatile organic compounds (VOCs). Among the four adsorbates examined in the experiment, three can be completely regenerated when the desorption temperature reaches 160 °C, which meets the practical

收稿日期:2019-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(21776164);山东省重大基础研究计划项目(ZR2017ZC0633)

作者简介:吕雪龙(1994—),男,山西晋城人,硕士研究生,主要从事环境材料方面的研究。

梁 鹏(1976—),男,山西长治人,教授,博士生导师,主要从事能源及环境材料方面的研究,本文通信作者。

E-mail: liangpeng202@hotmail.com

application requirements. This study is of major significance especially for the development of multistage bubbling fluidized bed adsorption process and the selection of adsorbent.

Key words: spherical adsorbent; adsorption and desorption performance; pore size; surface chemistry; VOCs

挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)是源于许多工业生产过程的常见空气污染物。不同污染源排放的气相 VOCs 对环境产生巨大的影响,VOCs 也是引起神经系统病变、癌症和基因突变的重要因素^[1-2]。因此,近年来越来越多的生态环境法规要求对 VOCs 的排放进行控制。常见的 VOCs 处理技术主要有冷凝、吸收、吸附、催化氧化、热氧化和生物降解等^[3-4]。其中吸附技术被认为是处理中低浓度 VOCs 的首选,可通过吸附剂再生实现回收利用^[5-6]。多级鼓泡流化床吸附工艺具有处理能力大、能耗低、运行成本低等优势,对于大风量低浓度工业有机废气的吸附处理极具应用价值^[7-8]。而选择合适的吸附剂是成功应用鼓泡流化床吸附技术的首要前提。在众多的吸附材料中,球形吸附剂机械强度高、流动性好、压降小,适用于多级鼓泡流化床吸附工艺^[9]。

近年来,众多研究者对球形吸附剂的吸附性能及其影响因素进行了考察。Tagliavini 等^[10]以一种新型的聚合物基球形活性炭作为吸附剂考察了其对类固醇微污染物的吸附性能。结果显示,与常规的颗粒活性炭相比,球形活性炭吸附剂具有较高的疏水性和较大的比表面积,对类固醇类污染物具有更快的吸附速率和更高的净化效率。刘凤玲等^[11]研究了不同特征的多孔碳对 CO₂ 的吸附,结果表明 CO₂ 的饱和吸附容量受到微孔孔容和材料中氮含量的共同影响,多孔炭微孔孔容及表面氮含量的增加有利于低浓度 CO₂ 的吸附。常远等^[12]考察了 3 种聚苯乙烯基树脂吸附剂对二甲苯、乙酸乙酯、丙酮和正己烷的静态吸附和对乙酸乙酯的动力吸附,结果显示 3 种吸附剂对 4 种有机分子均有较大的静态吸附容量,且微孔容积越大吸附容量越大。同时,微孔的存在也有助于提高乙酸乙酯的动力吸附性能。但对其他 3 种吸附质的动力吸附并未考察,也没有对除孔道结构外其他影响吸附性能的因素进行探究。为了能够在统一的实验条件下,详细探究吸附剂的理化性质对不同类型 VOCs 在其上的吸附性能的影响规律,为多级鼓泡流化床吸附工艺中球形吸附剂的选取提供依据,选取 3 种商业球形吸附剂作为实验材料,在自制的固定床评价装置中比较了多种 VOCs 分子在不同吸附剂上吸脱附性能的差异,详细分析了吸附剂孔道结构和表面官能团等对不同 VOCs 分子吸脱附特性的影响。本研究结果可为多级鼓泡流化床吸附工艺的开发,特别是针对不同类型 VOCs 吸附剂的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 吸附剂和吸附质

本研究使用的球形吸附剂是购自国内某公司的沥青基球形活性炭(pitch-based spherical activated carbon, PSAC)、酚醛基球形树脂(phenolic-based spherical polymer resin, PSPR)和二乙烯苯基球形树脂(divinylbenzene-based spherical polymer resin, DSPR)。其堆积密度分别为 611、312 和 381 kg/m³。使用前,将吸附剂在真空烘箱中 160 °C 处理 12 h 并置于干燥器中保存。

本研究选用 4 种具有不同极性、动力学直径和沸点的 VOCs 分子作为测试组分,其分子动力学直径及其他理化参数如表 1 所示。

1.2 吸附剂表征

采用美国麦克公司 ASAP2460 气体吸附分析仪测定 3 种吸附剂的 BET 比表面积和孔径分布。吸附剂的热重分析是采用法国赛特拉姆公司的 LABSYS EVO TG-DTA/DSC 在气速为 20 mL/min 的 N₂ 气氛下以 0.1 °C/min 的升温速率进行的。

表 1 4 种吸附质的理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of four adsorbates

吸附质	乙醇	乙酸乙酯	环己烷	二甲苯
沸点/°C	80	77	81	138
摩尔质量/(g/mol)	46.07	88.11	84.16	106.17
分子极性	4.3	4.4	0.1	2.5
动力学直径/nm	0.49	0.67	0.60	0.68

吸附剂的表面官能团(如酚羟基、内酯基和羧基等)由 Boehm 滴定法确定^[13]。

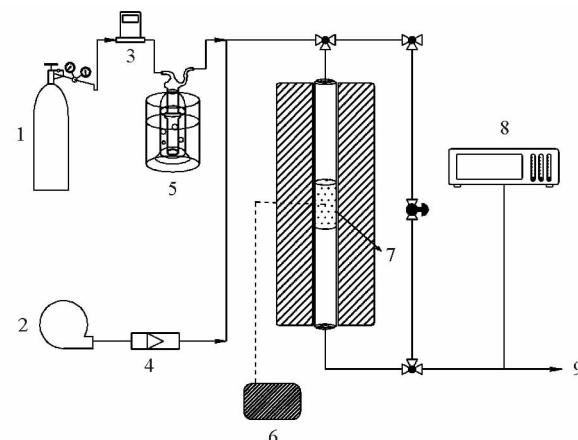
1.3 吸附测试

图 1 所示的固定床实验装置用于考察不同 VOCs 在吸附剂上的动态吸附行为。该装置由风机、水浴鼓泡单元、吸附器和检测单元组成。在适当温度下用高纯氮气在装有纯溶剂的鼓泡罐中鼓泡获得高浓度有机废气,通过调节鼓泡气和稀释气的流率得到不同浓度的有机废气进入吸附管。实验前,将吸附剂装入内径 50 mm 的吸附管内,床层高度控制在 80 mm。实验中,不同浓度的有机废气从上而下通过吸附管进行吸附测试,控制吸附管温度为 30 °C,气体流率为 3.84 m³/h。使用带有火焰离子化检测器(fire ionization detector, FID)的 SP-9790II 型氢火焰气相色谱仪分析气体进出口浓度。通过绘制进口浓度和出口浓度随时间变化规律得到不同操作条件的穿透曲线。

2 结果与讨论

2.1 三种球形吸附剂的表征

图 2 显示了 3 种吸附剂氮气吸脱附等温线和相应的孔径分布。如图 2(a)所示,3 种吸附剂的吸附等温线均为第 I 类吸附等温线。在相对压力较低时($P/P_0 < 0.1$),N₂ 吸附量迅速增加,表明这 3 种材料中均存在较多微孔,且微孔容积大小顺序为 DSPR > PSAC > PSPR,这与其微孔容积的计算结果一致。此外,两种树脂吸附剂在较高相对压力下观察到了代表毛细凝聚现象的吸附回滞环,表明两种树脂中存在一定量的中、大孔。而活性炭则几乎完全是微孔。图 2 (b)显示了 3 种吸附剂的孔径分布,结合表 2 可知,3 种吸附剂都具有较大的微孔容积。PSAC、PSPR 和 DSPR 的平均孔径分别为 1.86、2.32 和 2.22 nm。而 DSPR 具有最大的比表面积和总孔容积。



1—氮气;2—干空气;3—质量流量计;4—流量计;5—水浴鼓泡罐;
6—温度控制;7—吸附剂;8—气相色谱分析仪;9—废气放空

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

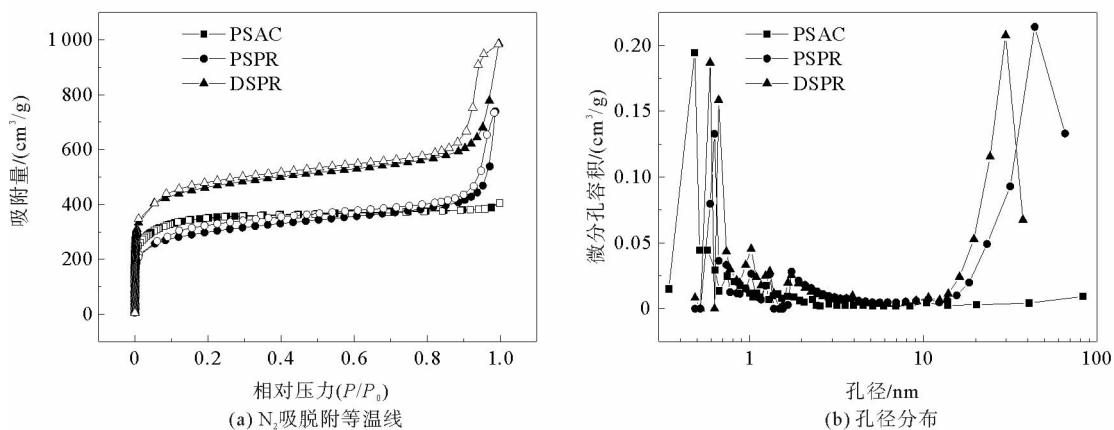


图 2 3 种吸附剂的 N₂ 吸脱附等温线和孔径分布

Fig. 2 Nitrogen adsorption and desorption isotherms and pore size distribution of the three adsorbents

图 3 显示了采用 Boehm 滴定法对 3 种吸附剂的表面含氧官能团种类及含量的测定结果。如图所示,

PSAC 吸附剂表面上的含氧官能团含量最少,为 0.41 mmol/g,其中羧基、内酯基和羟基的含量分别为 0.12、0.18 和 0.11 mmol/g。PSPR 表面上的含氧官能团含量较 PSAC 略多,总量为 0.73 mmol/g,其中羧基、内酯基和羟基的含量分别为 0.38、0.17 和 0.18 mmol/g。DSPR 的表面含氧官能团含量最多为 1.70 mmol/g,其中羧基、内酯基和羟基的含量分别为 0.59、0.62 和 0.49 mmol/g。表面含氧官能团差异对其吸脱附特性产生的影响将在后文中讨论。

2.2 固定床动态吸附实验

图 4 显示了在进气浓度 26.8 mmol/m³ 和气速 0.55 m/s 条件下,乙醇、乙酸乙酯、环己烷和二甲苯在 3 种吸附剂上的吸附穿透曲线。可见对所选 4 种吸附质的穿透时间顺序均为 PSAC > DSPR > PSPR。为了更好地比较 3 种吸附剂对不同吸附质的动态吸附性能,表 3 对比了穿透时间、穿透吸附容量和饱和吸附容量等数据。其中,穿透吸附容量和饱和吸附容量分别由式(1)和式(2)计算得到:

$$q_a = \frac{C_{in}QM}{m} \int_0^{t_a} \left(1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}\right) dt, \quad (1)$$

$$q_e = \frac{C_{in}QM}{m} \int_0^{t_e} \left(1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}\right) dt. \quad (2)$$

其中: C_{in} 为进气浓度, mmol/m³; C_{out} 为出气浓度,

mmol/m³; Q 为总的气体体积流率, L/min; M 为吸附质的摩尔质量, g/mol; m 为吸附剂的质量, g; t_a 为发生穿透, 即 $C_{out}/C_{in}=5\%$ 的时间, min; t_e 为吸附饱和, 即 $C_{out}/C_{in}=95\%$ 的时间, min; q_a 为穿透吸附容量, g/g; q_e 为饱和吸附容量, g/g。

由表 3 中动态饱和吸附容量数据可见,3 种吸附剂对 4 种吸附质的动态饱和吸附容量符合 DSPR > PSAC > PSPR 的顺序,这与其微孔容积顺序是一致的,说明微孔容积的大小是影响饱和吸附量的主要因素^[14]。实际应用中为确保废气净化效率,相比动态饱和吸附容量,研究穿透吸附容量更有意义。从表 3 数据可知,3 种吸附剂对不同吸附质的穿透吸附容量与饱和吸附容量数据不存在相关性,这主要归因于不同类型吸附剂对几种吸附质的捕获能力不同。Everett 和 Powl^[15] 研究发现,尺寸更小的孔具有更高的吸附势,能够更牢固的捕获气体分子。从 3 种吸附剂的 BJH 孔径分布可知,PSAC 具有最小的微孔,DSPR 次之,PSPR 的微孔孔径最大,这就导致了 3 种吸附剂穿透吸附容量的不同。对乙醇和二甲苯而言,PSAC 吸附剂因其较大的吸附势拥有最大的穿透吸附容量,DSPR 次之,PSPR 的穿透吸附容量最小。而对于乙酸乙酯而言,DSPR 具有比活性炭大得多的穿透吸附容量,其原因是 DSPR 孔道表面具有大量的羧基和内酯基官能团,极大的增强了其对含氧分子乙酸乙酯的吸附能力。环己烷在 PSAC 上的穿透吸附容量略低于 DSPR,这可能是由于吸附剂吸附势和微孔容积共同影响导致的。

本研究选用的 3 种吸附剂,材料主体或前驱体中均含有大量的苯环结构,对非极性分子尤其是具有苯环结构的气体分子表现出较强的吸附能力。乙醇具有最小的分子结构,在吸附剂上的吸附能最小,且较高的极性也限制了吸附剂对其的吸附,故乙醇在 3 种吸附剂上的穿透吸附容量和饱和吸附容量最小^[16]。乙酸乙酯分子中具有一 C=O 结构,能够与吸附剂表面的苯环形成共轭 π 键,促进了其在吸附剂表面的吸附能力^[17],这就解释了乙酸乙酯在 3 种吸附剂上的动态吸附容量优于环己烷的现象。而对于两种树脂型吸附剂,表面具有较多亲水性的含氧官能团,从而提高了其对乙酸乙酯的吸附能力。

表 2 3 种吸附剂的孔道结构参数

Tab. 2 Textural parameters of the three adsorbents

吸附剂	PSAC	PSPR	DSPR
BET 比表面积/(m ² /g)	1 345	1 021	1 660
平均孔径/nm	1.86	2.32	2.22
总孔容/(cm ³ /g)	0.63	1.15	1.34
微孔孔容/(cm ³ /g)	0.54	0.49	0.74

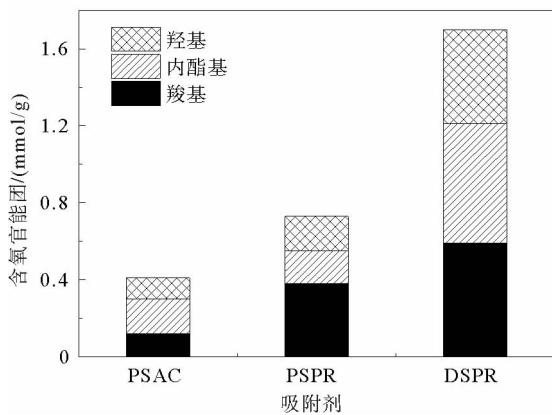


图 3 3 种吸附剂的表面含氧官能团组成

Fig. 3 Surface functional groups of the three adsorbents

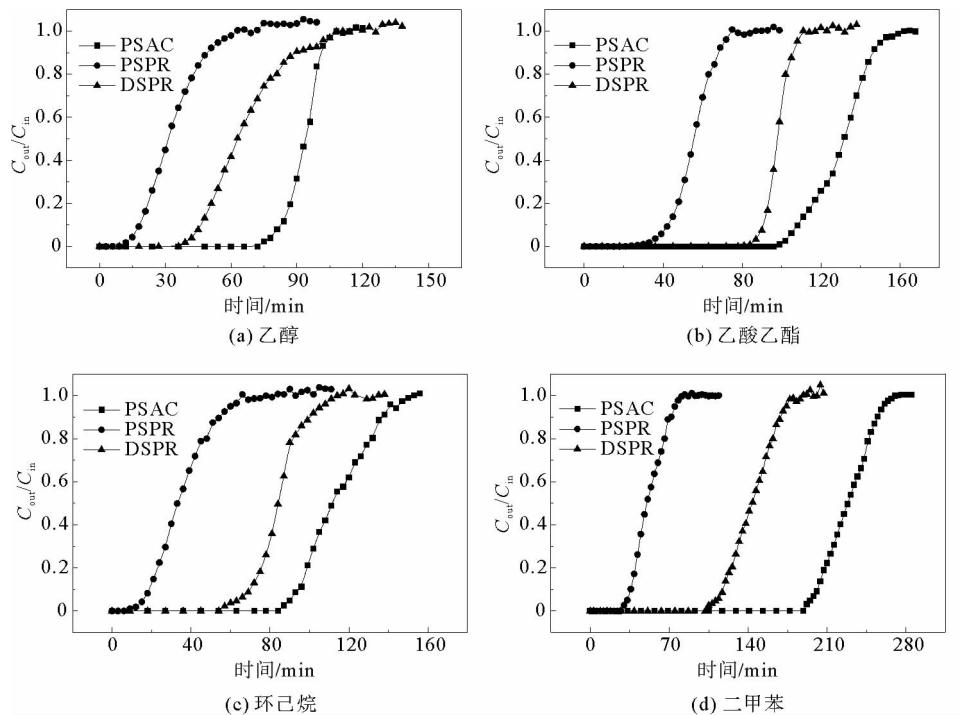


图4 吸附质在3种吸附剂上的穿透曲线

Fig. 4 Breakthrough curves of adsorbates on the three adsorbents

表3 4种吸附质在3种吸附剂上的动态吸附数据

Tab. 3 Dynamic adsorption data of four adsorbates on the three adsorbents

吸附质	PSAC				PSPR				DSPR			
	t_a/min	t_e/min	$q_a/(\text{g/g})$	$q_e/(\text{g/g})$	t_a/min	t_e/min	$q_a/(\text{g/g})$	$q_e/(\text{g/g})$	t_a/min	t_e/min	$q_a/(\text{g/g})$	$q_e/(\text{g/g})$
乙醇	79	103	0.065	0.076	15	55	0.024	0.051	43	102	0.057	0.087
乙酸乙酯	104	150	0.163	0.204	37	71	0.114	0.171	88	108	0.225	0.25
环己烷	90	141	0.135	0.172	15	60	0.044	0.102	63	106	0.153	0.203
二甲苯	195	260	0.369	0.432	33	75	0.122	0.194	112	174	0.345	0.441

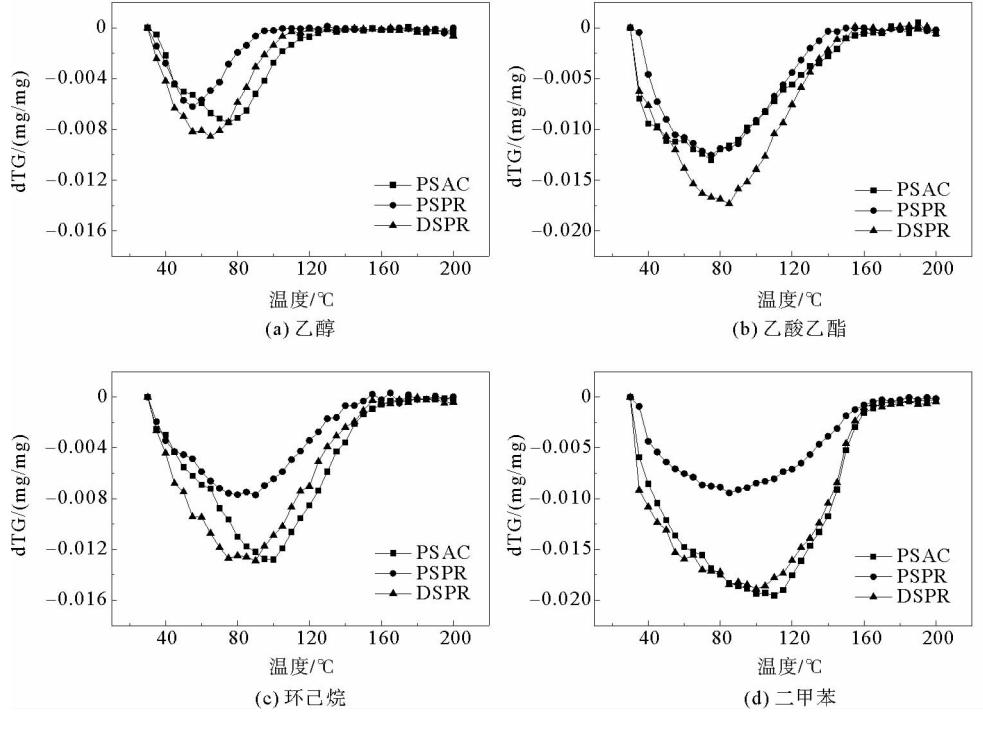
不同吸附质的传质区长度可用来比较其在吸附床层中的吸附速率, 传质区越短, 传质和吸附速率越快。传质区长度的计算公式^[18]为:

$$L_{ma} = L \frac{t_e - t_a}{t_e} \quad (3)$$

其中: L_{ma} 为传质区的长度, mm; L 为床层总长度, mm; t_a 为发生穿透, 即 $C_{\text{in}}/C_{\text{out}}=5\%$ 的时间, min; t_e 为吸附饱和, 即 $C_{\text{in}}/C_{\text{out}}=95\%$ 的时间, min。表4显示了3种吸附剂床层的传质区长度数据。可见PSAC对除乙酸乙酯外的几种 VOCs 分子具有最短的传质区长度。DSPR 大量的表面含氧官能团和发达的中、大孔结构都极大地提高了其对乙酸乙酯的吸附速率。因此, 对于废气中含有多种 VOCs 的工况而言, 具有较大堆积密度的 PSAC 吸附剂综合性能最优; 对于单一 VOCs 的废气工况而言, 应根据吸附剂和吸附质的匹配性进行选择。

2.3 程序升温脱附实验

由于吸附剂的加热脱附是装置运行费用的主要部分^[19],因此在多级鼓泡流化床工艺应用中,不仅需要考虑吸附剂对气体分子的吸附性能,还需要明确其脱附特性。图 5(a-d)分别显示了乙醇、乙酸乙酯、环己烷、二甲苯在 3 种吸附剂上的程序升温脱附曲线。由图 5(a)、5(c)和 5(d)可见,PSAC 的脱附峰最先出现,结合前文的讨论可知 PSAC 的吸附势最小,PSAC 的吸附势最大,故出现脱附峰值对应的温度顺序为 PSAC > DSPR > PSPR。乙酸乙酯在 3 种吸附剂上的程序升温脱附曲线如图 5(b)所示,可见 PSPR 的脱附峰最先出现,然后是 PSAC 的脱附峰,DSPR 的脱附峰最后出现。表明乙酸乙酯在 DSPR 上的吸附能最大,这主要是因为 DSPR 孔道表面大量的羧基和内酯基官能团极大地提高了其对乙酸乙酯的吸附能力。虽然对于不同的吸附质而言,3 种吸附剂脱附峰温有所不同,但在温度达到 160 °C 左右时都可以实现完全脱附,这在实际应用中是经济可行的。



注:dTG 是单位质量吸附剂的质量损失(mg/mg)

图 5 吸附质在 3 种吸附剂上的程序升温脱附曲线

Fig. 5 Temperature-programmed desorption curves of adsorbates on the three adsorbents

3 结论

本研究选取的 3 种吸附剂均有较大的微孔容积,表面含氧官能团的含量有较大差异。动态吸附实验结果表明,乙醇、乙酸乙酯、环己烷和二甲苯 4 种 VOCs 分子在 3 种吸附剂上的饱和吸附容量顺序均为 DSPR > PSAC > PSPR,与其微孔容积顺序一致。DSPR 吸附剂表面大量的羧基和内酯基官能团提高了其对乙酸乙酯的穿透吸附容量,而对于乙醇和二甲苯则宜采用微孔发达的 PSAC 吸附剂。传质区长度的计算结果表明,除乙酸乙酯外的其他 VOCs 分子在 PSAC 吸附剂床层上的传质区长度最短,具有最快的吸附速率。程序升温脱附实验结果显示,对于乙醇、环己烷和二甲苯,3 种吸附剂的脱附峰温度顺序均为 PSAC > DSPR >

表 4 4 种吸附质在固定床上的传质区长度

Tab. 4 Length of the mass transfer zone of the four adsorbates on the fixed bed

吸附剂	L_{ma} /mm			
	乙醇	乙酸乙酯	环己烷	二甲苯
PSAC	18.6	24.5	28.9	15.6
PSPR	58.2	38.3	60.0	44.8
DSPR	46.3	14.8	32.5	28.5

PSPR。而对于乙酸乙酯,受吸附剂表面官能团的影响,3种吸附剂的脱附峰温度顺序为DSPR>PSAC>PSPR。当脱附温度达到160℃时,3种吸附剂上的吸附质分子均能实现完全脱附。研究结果可为多级鼓泡流化床吸附工艺的开发,特别是针对不同类型 VOCs 吸附剂的选择提供理论依据。

参考文献:

- [1] QIU K Q, YANG L X, LIN J M, et al. Historical industrial emissions of non-methane volatile organic compounds in China for the period of 1980—2010[J]. Atmospheric Environment, 2014, 86: 102-112.
- [2] ZHANG X Y, GAO B, CREAMER A E, et al. Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 338: 102-123.
- [3] 李淑芳,朱佳楠,吕雪龙,等. TiO₂-分子筛/波纹型陶瓷纤维整体式催化剂的制备及其对气相甲苯光催化性能研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(3):35-42.
LI Shufang, ZHU Jianan, LÜ Xuelong, et al. Preparation of TiO₂-zeolites/corrugated paper catalysts and their photoexcitation property for gaseous toluene[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(3): 35-42.
- [4] CHEN J, CHEN X, CHEN X, et al. Homogeneous introduction of CeO_y into MnO_x-based catalyst for oxidation of aromatic VOCs[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, 224: 825-835.
- [5] ROMERO-ANAYA A J, LILLO-RODENAS M A, LINARES-SOLANO A. Activation of a spherical carbon for toluene adsorption at low concentration[J]. Carbon, 2014, 77: 616-626.
- [6] TEFERA D T, HASHISHO Z, PHILIPS J H, et al. Modeling competitive adsorption of mixtures of volatile organic compounds in a fixed-bed of beaded activated carbon[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(9): 5108-5117.
- [7] SCHONY G, DIETRICH F, FUCHS J, et al. A multi-stage fluidized bed system for continuous CO₂ capture by means of temperature swing adsorption: First results from bench scale experiments[J]. Powder Technology, 2017, 316: 519-527.
- [8] MOHANTY C R, ADAPALA S, MEIKAP B C. Removal of hazardous gaseous pollutants from industrial flue gases by a novel multi-stage fluidized bed desulfurizer[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1/2/3): 427-434.
- [9] WANG Q, LIANG X Y, ZHANG R, et al. Preparation of polystyrene-based activated carbon spheres and their adsorption of dibenzothiophene[J]. New Carbon Materials, 2009, 24(1): 55-60.
- [10] TAGLIAVINI M, ENGEL F, WEIDLER P G, et al. Adsorption of steroid micropollutants on polymer-based spherical activated carbon (PBSAC)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 337: 126-137.
- [11] 刘凤玲,卢霞,刘杰,等. 不同特性的多孔炭对CO₂的吸附研究[J]. 中国环境科学,2014,34(6):1404-1409.
LIU Fengling, LU Xia, LIU Jie, et al. CO₂ adsorption on porous carbons with different characteristics[J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1404-1409.
- [12] 常远,郑家乐,都林,等. 流化床用树脂基球形活性炭及其 VOCs 吸附性能[J]. 过程工程学报,2018,18(5):1112-1118.
CHANG Yuan, ZHENG Jiale, DU Lin, et al. Polymer-based spherical active carbon and its VOCs adsorption performance for fluidized bed application[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(5): 1112-1118.
- [13] BOEHM H P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons[J]. Carbon, 1994, 32(5): 759-769.
- [14] LASHAKI M J, FAYAZ M, NIKNADDAF S, et al. Effect of the adsorbate kinetic diameter on the accuracy of the Dubinin-Radushkevich equation for modeling adsorption of organic vapors on activated carbon[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 241(1): 154-163.
- [15] EVERETT D H, POWL J C. Adsorption in slit-like and cylindrical micropores in the Henry's law region: A model for the microporosity of carbons[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases, 1976, 72: 619-636.
- [16] 蒋剑春. 活性炭应用理论与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2010:3-17.
- [17] GAO Y X, LIU K, KANG R X, et al. A comparative study of rigid and flexible MOFs for the adsorption of pharmaceuticals: Kinetics, isotherms and mechanisms[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 359: 248-257.
- [18] 郭坤敏,谢自立,叶振华,等. 活性炭吸附技术及其在环境工程中的应用[M]. 北京:化学工业出版社,2016:131-151.
- [19] ZHANG W B, SUN C G, SNAPE C E, et al. Process simulations of post-combustion CO₂ capture for coal and natural gas-fired power plants using a polyethyleneimine/silica adsorbent[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017, 58: 276-289.