

活性炭流化床对 VOCs 的吸附条件及吸附边界曲线的研究

李松原¹, 梁晓恽^{1*}, 林云¹, 吕妍¹, 刘馥雯²

(1. 华东理工大学化工学院, 上海 200030; 2. 华东理工大学资源与环境学院, 上海 200030)

摘要:对球形活性炭流化床在 VOCs 吸附过程中吸附条件的选择进行了分析研究, 分别探究了进气浓度、气体流速、床层高度、床层数对流化床吸附性能的影响。并且进一步比较了流化床和固定床对丙酮、乙酸乙酯、对二甲苯的吸附, 得到不同的固定床-流化床吸附条件边界曲线, 该边界曲线将吸附条件坐标系划分为 2 个区域, 固定床和流化床分别在对应的区域内达到更好的吸附性能, 并通过实验验证了该理论的正确性。边界曲线与 VOCs 的性质有关, 极性越大流化床的操作范围越小。

关键词:活性炭; VOCs; 固定床; 流化床; 吸附边界曲线

中图分类号: TQ424.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)08-0166-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.08.036

Study on adsorption conditions and adsorption boundary condition curve of activated carbon fluidized bed to VOCs

LI Song-yuan¹, LIANG Xiao-yi^{1*}, LIN Yun¹, LV Yan¹, LIU Fu-wen²

(1. School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200030, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200030, China)

Abstract: The selection of adsorption conditions for the adsorption process of VOCs by a spherical activated carbon fluidized bed are analyzed and studied. The effects of the concentration of inlet gas, the flow rate of VOCs, the height of bed and the number of bed layer on the adsorption performance of the fluidized bed are investigated. The fluidized bed is compared with the fixed bed in the adsorption of acetone, ethyl acetate and para-xylene, from which different fixed bed-fluidized bed adsorption boundary condition curves. This boundary condition curve divides the adsorption condition coordinate system into 2 regions and the fixed bed and the fluidized bed can separately achieve better adsorption performance in their corresponding regions. The correctness of the theory is verified by experiments. The boundary condition curve has relationship with characteristics of VOC. The higher polarity of VOC means less operation scope for fluidized bed.

Key words: activated carbon; VOCs; fixed bed; fluidized bed; adsorption boundary condition curve

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是来源于化工、石油、制药产业中的主要污染物, 产生自有机物制备、燃料燃烧、材料加工等过程^[1-2]。VOCs 的治理方式主要有吸附法、吸收法、膜分离法、微生物处理法等^[3-4], 不同的处理方式对应不同的处理需求。在这些处理方法中, 吸附法与其他方法相比具有明显优势^[1-5]。如吸附法可以从 VOCs 中进行选择性吸附; 吸附法的操作更为连续、方便; 在吸附过程中不会造成二次污染; VOCs 在处理后可以回收; 吸附剂在脱附之后还能多次循环利用^[6]。

在过去的几十年中, 人们对不同的吸附剂进行了详细的探究^[7], 其中, 活性炭与活性硅胶、活性氧化铝以及沸石相比, 有着较为丰富的孔隙结构、较大

的比表面积和较大的吸附量^[8-11], 使其成为具有较好性能的吸附剂。

在吸附过程中固定床相对于流化床被更多的使用^[12-15]。然而, 在一定的吸附条件下, 因更高的传递效率^[16-17], 流化床比固定床更加适用。而吸附条件在吸附器类型的选择中起着重要的作用, 能够极大地降低工业上吸附器的选型成本。但在已有的研究中, 这些吸附条件并未被讨论。

因此, 笔者分别探究了多层流化床对不同 VOCs 的吸附性能, 进一步比较了几种 VOCs (丙酮、乙酸乙酯、对二甲苯) 在固定床和流化床中的吸附效果, 得到各 VOC 的固定床-流化床吸附边界曲线, 并验证了曲线的正确性, 从而为 VOCs 吸附床型选择提供参考。

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-06-07

作者简介: 李松原 (1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为活性炭吸附, y30150848@mail.ecust.edu.cn; 梁晓恽 (1973-), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为碳材料应用, 通讯联系人, xyliang@ecust.edu.cn。

1 实验材料和方法

1.1 吸附剂和吸附质

沥青基球形活性炭,日本吴羽公司生产,活性炭在使用前被放入120℃烘箱干燥24 h除去空隙中的水,其主要性质如表1所示。

表1 球形活性炭的性质

性质	值
直径/mm	0.59~0.84(90%)
平均直径/mm	0.72±0.02
堆密度/(g·cm ⁻³)	0.60
真密度/(g·cm ⁻³)	1.01
比热/[kJ·(kg·℃) ⁻¹]	1.046
总比表面积(BET, N ₂)/(m ² ·g ⁻¹)	1436
总孔容/(mL·g ⁻¹)	0.636
微孔孔容/(mL·g ⁻¹)	0.551

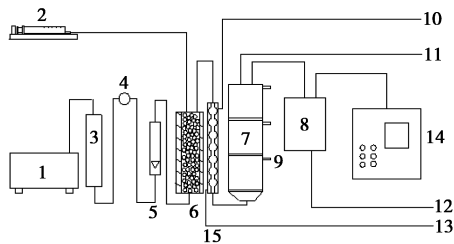
选用丙酮、乙酸乙酯、对二甲苯3种VOC作吸附质,其性质如表2所示。

表2 吸附质性质

VOC	极性	分子质量	沸点/℃
丙酮	2.5	58.1	56.5
乙酸乙酯	4.3	88.1	77.3
对二甲苯	5.4	106.2	138.5

1.2 装置和流程

所用仪器设备如图1所示。



- 1—空压机;2—自动进样器;3—硅胶干燥管;4—减压阀;
5—转子流量计;6—气体发生装置;7—流化床/固定床;
8—气体采样袋;9—压差计;10—冷凝水出口;
11—床体气体出口;12—采样袋气体出口;13—冷凝水入口;
14—气相色谱;15—气体稳定器

图1 实验装置

1.3 实验条件和计算

根据我国关于VOCs的排放标准,对于丙酮的穿透质量分数定为40 μg/g,乙酸乙酯的质量分数为30 μg/g,对二甲苯为25 μg/g,出气质量分数达到穿透质量分数的时间定义为穿透时间 t_b (s),对应的吸附量定义为穿透吸附量 q_b [mg/g(BAC)]。饱和时间 t_s (s)定义为当 C_{out}/C_0 为0.95的时间点,对

应的吸附容量定义为饱和吸附量 q_s [mg/g(BAC)]。通过进气体积 Q (m³/h)、 C_{out} 、 C_0 、 t_b 和 t_s 吸附量的计算式为:

t_b (s)内的穿透吸附量:

$$q_b = [(C_0 \times t_b) / M] Q \quad (1)$$

t_s (s)内的饱和吸附量:

$$q_s = (Q/M) \int_{t_b}^{t_s} (C_0 - C_{out}) dt \quad (2)$$

多层活性炭流化床对丙酮吸附效果研究实验中的实验条件如表3所示。实验得到的穿透时间 t_b (s)和穿透吸附量 q_b [mg/g(BAC)]为实验重点考察的2个参数。

表3 探究流化床吸附效果的实验条件

序号	进气质量分数 $C_0/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	气体流速 $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	床层高度 H/cm	床层数
1	1000	0.34	3.5	3
2	1000	0.34	4.5	3
3	1000	0.34	5.5	3
4	1000	0.34	6.5	3
5	1000	0.34	9.0	3
6	1000	0.51	3.5	3
7	1000	0.75	3.5	3
8	1000	0.93	3.5	3
9	2000	0.34	3.5	3
10	5000	0.34	3.5	3
11	10000	0.34	3.5	3
12	1000	0.34	3.5	1
13	1000	0.34	3.5	2
14	1000	0.34	3.5	4

比较了几种VOC不同条件下在固定床以及流化床中的吸附效果,条件如表4所示。并且分别找到了丙酮、乙酸乙酯、对二甲苯的固定床-流化床吸附边界条件曲线。

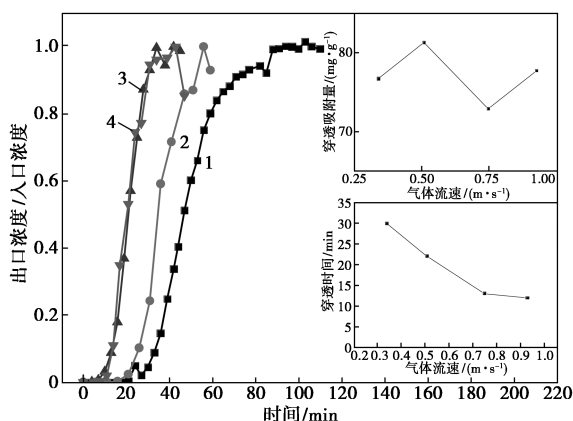
表4 VOCs的边界条件点

吸附质	$C_0/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
丙酮	100	0.68
	200	0.51
	500	0.34
	950	0.13
乙酸乙酯	190	0.68
	520	0.51
	1730	0.34
	2200	0.13
对二甲苯	300	0.68
	850	0.51
	1800	0.34
	2300	0.13

2 结果与讨论

2.1 流化床在不同气体流速下对丙酮的吸附效果

在不同气体流速下流化床对丙酮的吸附穿透曲线以及穿透时间、穿透吸附量的变化情况如图 2 所示。对于实验 1, 当气体流速为 0.34 m/s 时流化床得到最长的穿透时间, 当流速继续增大时, 穿透时间缩小。但在实验 7 中, 流速超过 0.75 m/s 后, 穿透时间只有 12 min 左右, 并且变化不大。因此, 在高气速流化床中, 气体流速已经不是影响流化床达到穿透的主要因素。从图 2 中的插图也可以看出, 穿透吸附量在 72~82 mg/g (BAC) 之间波动, 从而说明气体流速对球形活性炭在流化床中的丙酮吸附量没有明显的影响。这是由于随着流速的增大, 单位时间内单位体积的活性炭接触的丙酮的量增加, 但是接触时间却缩短, 所以穿透吸附量的变化不大。这一结果同气相无机物的吸附相似^[18], 说明仅仅通过增大气体流速并不能提高流化床对丙酮的吸附效率。



1—0.34 m/s; 2—0.51 m/s; 3—0.75 m/s; 4—0.93 m/s

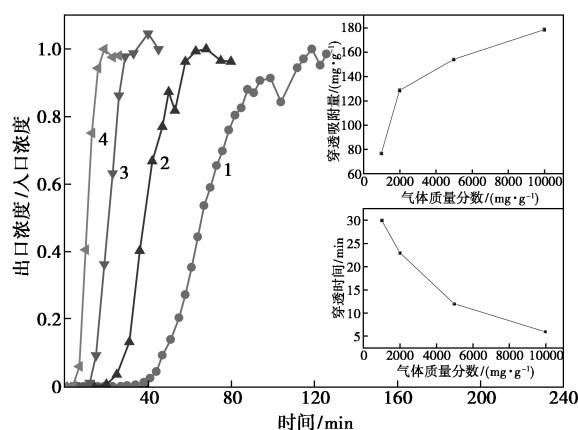
图 2 不同气体流速下流化床对丙酮的吸附穿透曲线、穿透时间、穿透吸附量

注: C_0 为 1 000 $\mu\text{g/g}$, H 为 3.5 cm, S 为 3。

2.2 流化床在不同进气质量分数下对丙酮的吸附效果

在不同进气质量分数下流化床对丙酮的吸附穿透曲线、穿透时间、穿透吸附量的变化情况如图 3 所示。由图 3 可以看出, 在实验 1 条件下, 1 000 $\mu\text{g/g}$ 的丙酮吸附有最长的穿透时间, 并随着质量分数的增大而减小: 进气质量分数从 1 000 $\mu\text{g/g}$ 到 10 000 $\mu\text{g/g}$, 穿透时间从 39 mins 减小到 4 mins, 并且穿透曲线的斜率增大, “传质区” 缩小。从图 3 中也可以看出, 增加进气质量分数可以明显地提高穿透吸附

量, 从 76.32 mg/g BAC 提高到 178.61 mg/g BAC, 但是增长趋势在不断减小。这是由于高的进气质量分数推动了活性炭微孔中气态丙酮的冷凝, 从而得到了较高的吸附量。但活性炭中的吸附位有限, 所以穿透吸附量的增加也渐趋平缓。虽然采用大的进气质量分数能够得到相对大的吸附量, 但穿透时间也被缩短。在流化床吸附的实际应用中, 穿透时间过短会增加活性炭吸脱附循环量, 不仅增加了成本, 而且降低了活性炭的性能以及流化床整体的工作效率。因此, 在 VOCs 吸附应用中, 探讨进气质量分数和气体流速对于选择正确的床体十分关键。



1—1 000 $\mu\text{g/g}$; 2—2 000 $\mu\text{g/g}$; 3—5 000 $\mu\text{g/g}$; 4—10 000 $\mu\text{g/g}$

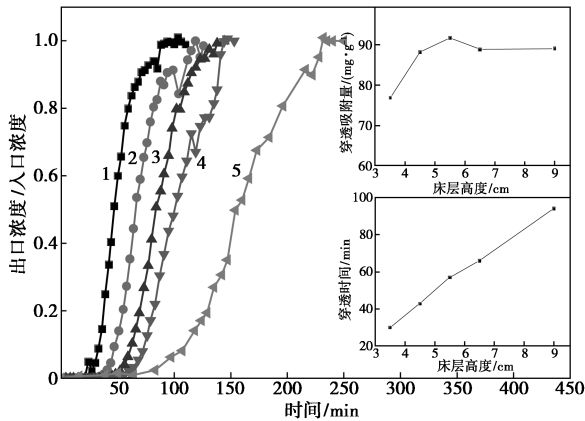
图 3 不同进气质量分数下流化床对丙酮的吸附穿透曲线、穿透时间、穿透吸附量

注: V 为 0.34 m/s, H 为 3.5 cm, S 为 3。

2.3 流化床在不同床层高度下对丙酮的吸附效果

不同床层高度下流化床对丙酮的吸附穿透曲线以及穿透时间、穿透吸附量变化情况如图 4 所示。为了达到更高的床层高度而不改变床体结构, 加入了不同质量的球形活性炭。可以预见的是, 随着活性炭质量和床层高度的增加, 流出床的穿透时间也增加。然而, 由图 4 可以看出, 单位质量活性炭的穿透吸附量随着床层高度增加而增加, 在 5.5 cm 处达到峰值 91.64 mg/g (BAC), 但随着床层高度继续增加, 单位质量活性炭的穿透吸附量始终保持在 90.00 mg/g (BAC) 左右没有明显的波动。这是由活性炭床层高度、压降的变化导致的, 更深的床层高度提供了更大的吸附表面, 同时延长了活性炭和丙酮的接触时间^[19], 提高了穿透吸附量和穿透时间。由于活性炭吸附位有限, 虽然床层压降从 5.5 cm 到 9.0 cm 一直在增大, 活性炭的单位吸附量没有明显变化。因此, 在流化床的 VOCs 吸附中, 不同的 VOCs 存在着不同的适宜床层高度, 从而得到相对

较高的单位吸附量。对于丙酮的吸附,在本实验条件下,高于4.5 cm的床层高度能够得到较高的吸附量。



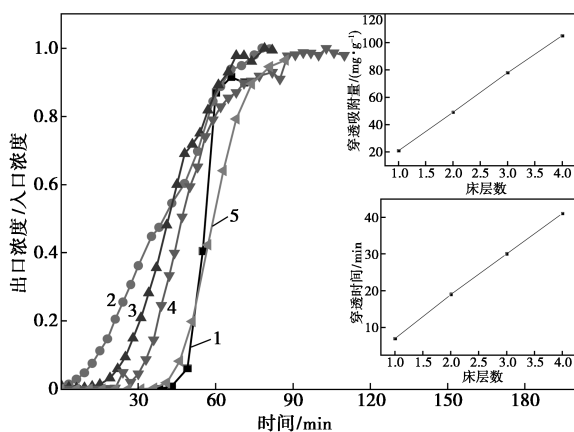
1—3.5 cm; 2—4.5 cm; 3—5.5 cm; 4—6.5 cm; 5—9.0 cm

图4 不同床层高度下流化床对丙酮的吸附穿透曲线、穿透时间、穿透吸附量

注: C_0 为 $1\ 000\ \mu\text{g/g}$, V 为 $0.34\ \text{m/s}$, S 为 3 。

2.4 流化床在不同床层数下对丙酮的吸附效果

不同床层数下流化床对丙酮的吸附穿透曲线以及穿透时间、穿透吸附量变化情况如图5所示。从图5中可以看出,随着床层数的增加,穿透时间延长,流化床的吸附穿透曲线斜率明显增大并且十分接近固定床的吸附穿透曲线(Fixed bed)。从图5也可以看出,穿透时间和穿透吸附量都随床层数增加而增加;当床层数从1增加到4,穿透吸附量从 $22.75\ \text{mg/g}$ (BAC) 增加到 $106.00\ \text{mg/g}$ (BAC),穿透时间从 $7\ \text{min}$ 增加到 $42\ \text{min}$,这2项数值都十分



1—3层固定床; 2—1层流化床; 3—2层流化床;
4—3层流化床; 5—4层流化床

图5 不同床层数下流化床对丙酮的吸附穿透曲线、穿透时间、穿透吸附量

注: C_0 为 $1\ 000\ \mu\text{g/g}$, V 为 $0.34\ \text{m/s}$, H 为 $3.5\ \text{cm}$ 。

接近固定床 ($115.92\ \text{mg/g}$ (BAC), $46\ \text{min}$), 流化床的吸附效果随着床层数增加而提高,并且接近固定床吸附。这是由气固接触状态的变化造成的。床层数越多,每层活性炭的床层深度越小,从而降低了返混和气泡对吸附的影响,并且有利于VOC在流化床中的均布,促进了气固接触。对于多层流化床吸附,除去最顶端的那层活性炭,下面各层在吸附穿透时都达到了饱和,因此,最顶端的活性炭床层相当于固定床的传质区,其长度相当于传质区长度,层数越多传质区长度越短,传质阻力越小,吸附效果越好。因此,4层流化床的穿透吸附量和穿透时间都远高于1层流化床并略低于固定床。

2.5 固定床-流化床吸附条件边界曲线

假设在相同的床体参数下,存在一些吸附条件,在这些条件下,固定床和流化床对VOCs有着相近的吸附性能,也就是相近的穿透时间和穿透吸附量。这些吸附条件之间应该存在着线性或者非线性的关系,并能拟合成固定床-流化床吸附条件边界曲线。

2.5.1 固定床-流化床吸附条件边界曲线的定义

丙酮、乙酸乙酯、对二甲苯的吸附边界曲线如图6所示。坐标中的任一点都对应着不同的吸附条件。实线是由流化床和固定床的吸附对比拟合得到的,固定床和流化床在实线所对应的条件下,可以得到基本相同的吸附穿透时间和穿透吸附量,曲线拟合公式: $y = A \cdot \exp(-x/B) + b$ 拟合数据如表5所示。而在实线与虚线围成的区域里,流化床能够达到更好的吸附效果、更长的穿透时间和更大的穿透吸附

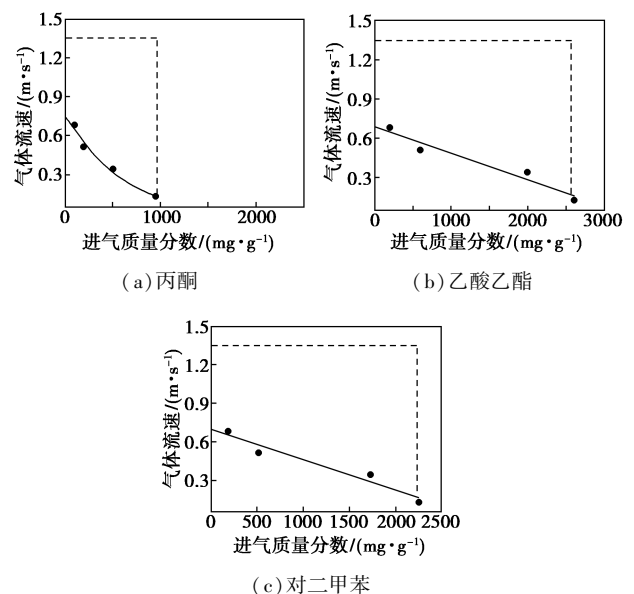


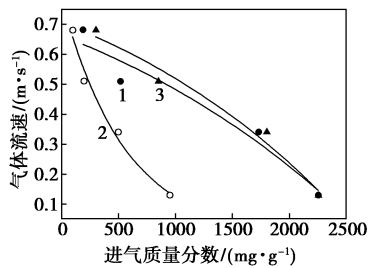
图6 丙酮、乙酸乙酯、对二甲苯的固定床-流化床吸附条件边界曲线

量,该区域定义为“流化床区”;而除“流化床区”的其他区域定义为“固定床区”,在该区域内固定床能够达到更好的吸附效果。虚线为流化床的限制条件:纵线代表计算得出最小流化速度 0.13 m/s 对应的质量分数^[21],横线代表计算得出的最大流化速度 1.35 m/s,对于本实验中使用的球形活性炭,流化床只能在 0.13~1.35 m/s 的范围内操作。

表 5 固定床-流化床吸附条件边界曲线的拟合结果

固定床-流化床 吸附条件边界曲线	A	B	b	R ²
丙酮	0.84	657.50	-0.07	0.98
乙酸乙酯	2.25	8304.12	-1.54	0.92
对二甲苯	-0.94	-4733.24	1.67	0.96

利用相同的方法探究了乙酸乙酯和对二甲苯的固定床-流化床吸附条件边界曲线,如图 6(b)和 6(c)所示,实线和虚线将坐标系分为“固定床区”和“流化床区”,与丙酮的情况类似。但是丙酮边界曲线下的区域面积远小于另外 2 种 VOC,如图 7 所示,说明丙酮有着与乙酸乙酯和对二甲苯相比相对小的“流化床区”。该现象是由于 VOCs 之间不同物性造成的,丙酮具有 3 种 VOC 中最大的极性,而对二甲苯的极性最小。对于固定床与流化床吸附效果的比较,吸附高极性的 VOC 时,“流化床区”更小,流化床适宜的吸附条件范围更窄,应用性更弱。而吸附极性较弱的 VOC,“流化床区”更大,流化床适宜的吸附条件范围更宽,应用性更强。



1—乙酸乙酯;2—丙酮;3—乙酸乙酯

图 7 不同 VOCs 的固定床-流化床吸附条件边界曲线

2.5.2 固定床-流化床吸附条件边界曲线的验证

为了验证固定床-流化床吸附条件边界曲线,对乙酸乙酯进行了吸附对比试验,结果如图 8 所示。在图 8 中,在边界曲线上取 3 个点(三角形),在这些条件下流化床与固定床吸附效果大致相同;在三角点的两侧分别取 3 组圆点,分别为:(700 μg/g,

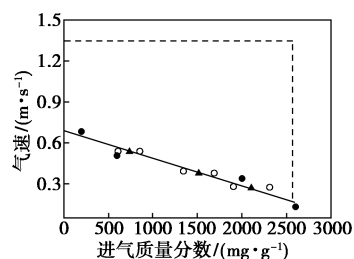
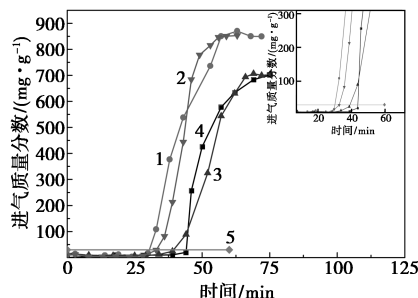
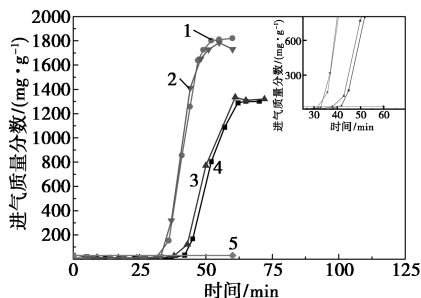


图 8 固定床-流化床吸附条件边界曲线的验证



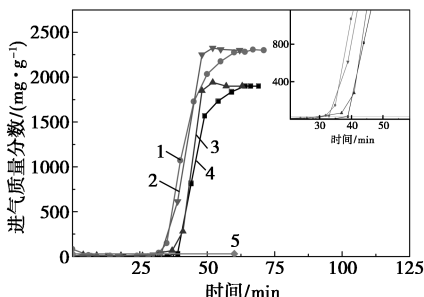
1—850 μg/g 固定床吸附;2—850 μg/g 流化床吸附;
3—700 μg/g 流化床吸附;4—700 μg/g 固定床吸附;
5—30 μg/g 排放标准

(a) 750 μg/g, 0.51 m/s 条件点处的实验验证



1—1700 μg/g 固定床吸附;2—1700 μg/g 流化床吸附;
3—1300 μg/g 流化床吸附;4—1300 μg/g 固定床吸附;
5—30 μg/g 排放标准

(b) 1500 μg/g, 0.34 m/s 条件点处的实验验证



1—2300 μg/g 固定床吸附;2—2300 μg/g 流化床吸附
3—1900 μg/g 流化床吸附;4—1900 μg/g 固定床吸附
5—30 μg/g 排放标准

(c) 210 μg/g, 0.21 m/s 条件点处的实验验证

图 9 在 3 个条件点下对固定床-流化床吸附条件边界曲线的验证

注:S 为 3,H 为 3.5 cm。

0.51 m/s), (850 $\mu\text{g/g}$, 0.51 m/s); (1 300 $\mu\text{g/g}$, 0.34 m/s), (1 700 $\mu\text{g/g}$, 0.34 m/s); (1 900 $\mu\text{g/g}$, 0.21 m/s), (2 300 $\mu\text{g/g}$, 0.21 m/s)。按照边界曲线的定义,左边的圆点(700 $\mu\text{g/g}$, 0.51 m/s), (1 300 $\mu\text{g/g}$, 0.34 m/s), (1 900 $\mu\text{g/g}$, 0.21 m/s)的条件下,固定床得到更长的穿透时间。而在右侧的圆点条件下,流化床得到更长的穿透时间。不同条件下对固定床-流化床吸附条件边界曲线的验证结果如图9所示。

比较了在“固定床区”内,点(750 $\mu\text{g/g}$, 0.51 m/s)条件下,流化床和固定床对乙酸乙酯的吸附效果,结果如图9(a)所示。结果表明,固定床的确能够达到更长的穿透时间,而流化床在“流化床区”内,点(850 $\mu\text{g/g}$, 0.51 m/s)条件下达到更长的穿透时间。图9(b)、图9(c)均得到了相同的结果,这些结果可以作为支撑固定床-流化床吸附条件边界曲线可行性的依据。

3 结论

对球形活性炭流化床在VOCs吸附过程中吸附条件的选择进行研究,分别得到了适合流化床吸附操作的气体流速、进气质量分数、床层高度和床层数。基于以上的实验结果,假设吸附边界条件存在,在这些条件下,固定床和流化床能够达到基本相同的吸附性能。实验进一步比较了二者对丙酮、乙酸乙酯、对二甲苯的吸附,分别得到对应该3种VOCs的固定床-流化床吸附条件边界曲线,该边界曲线将吸附条件坐标系划分为“固定床区”和“流化床区”,固定床和流化床分别在对应的区域内得到更大的穿透吸附量和更长的穿透时间,并通过实验验证了该理论的正确性。对于不同的VOCs,固定床-流化床吸附条件边界曲线并不相同,与有机物本身的性质有关,极性较大的VOC具有较小的“流化床区”,也就是较小的流化床吸附条件范围。该曲线在VOCs吸附的实际应用中,对于床型和吸附条件的选择起到指导或参考作用。

参考文献

- [1] Khan F I, Ghoshal A K. Removal of volatile organic compounds from polluted air [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, 13(6): 527-545.
- [2] 李守信, 金平, 张文智, 等. 采用活性炭纤维吸附装置回收VOC的优点分析[J]. *化工环保*, 2004, 24(s1): 274-276.
- [3] Kirkeskov L, Witterseh T, Funch L W, et al. Health evaluation of volatile organic compound (VOC) emission from exotic wood products [J]. *Indoor Air*, 2009, 19(1): 45-57.
- [4] Cha C Y, Carlisle C T. Microwave process for volatile organic compound abatement [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2001, 51(12): 1628-41.
- [5] Wang B. Development in research of technology for purifying volatile organic compounds from exhaust gases [J]. *Techniques & Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 12(1): 23-30.
- [6] Ruhl M J. Recover VOCs via adsorption on activated carbon [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1993, 89: 7(7): 37-41.
- [7] 郭贤权, 孙越, 徐家毅, 等. 空气净化吸附剂的制备及其吸附性能研究 [J]. *离子交换与吸附*, 1998(6): 533-539.
- [8] Shepherd A. Activated carbon adsorption for treatment of VOC emissions [C]. Presented at the 13th Annual EnviroExpo, Boston, 2001.
- [9] Lee M G, Lee S W, Lee S H. Comparison of vapor adsorption characteristics of acetone and toluene based on polarity in activated carbon fixed-bed reactor [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2006, 23(5): 773-778.
- [10] Popescu M, Joly J P, Carré J, et al. Dynamical adsorption and temperature-programmed desorption of VOCs (toluene, butyl acetate and butanol) on activated carbons [J]. *Carbon*, 2003, 41(4): 739-748.
- [11] Huang Z H, Kang F, Zheng Y P, et al. Adsorption of trace polar methyl-ethyl-ketone and non-polar benzene vapors on viscose rayon-based activated carbon fibers [J]. *Carbon*, 2002, 40(8): 1363-1367.
- [12] Tirza L P Dantas, Luna F M T, Jr I J S, et al. Carbon dioxide-nitrogen separation through adsorption on activated carbon in a fixed bed [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 169(1): 11-19.
- [13] Mulgundmath V P, Jones R A, Tezel F H, et al. Fixed bed adsorption for the removal of carbon dioxide from nitrogen: Break-through behaviour and modelling for heat and mass transfer [J]. *Separation & Purification Technology*, 2012, 85(6): 17-27.
- [14] Nikolajsen K, Kiwi-Minsker L, Renken A. Structured fixed-bed adsorber based on zeolite/sintered metal fibre for low concentration VOC removal [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2006, 84(7): 562-568.
- [15] Boyadzhiev K, Pantofchieva L, Khristov I. Sulfur dioxide adsorption in a fixed bed of a synthetic anionite [J]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2000, 34(2): 141-144.
- [16] 段文立, 宋文立, 罗灵爱. 两段循环流化床吸附有机气体实验 [J]. *过程工程学报*, 2004, 4(3): 210-214.
- [17] Zhang S, Xiao R, Zheng W. Comparative study between fluidized-bed and fixed-bed operation modes in pressurized chemical looping combustion of coal [J]. *Applied Energy*, 2014, 130(5): 181-189.
- [18] Raganati F, Ammendola P, Chirone R. CO₂ adsorption on fine activated carbon in a sound assisted fluidized bed; Effect of sound intensity and frequency, CO₂ partial pressure and fluidization velocity [J]. *Applied Energy*, 2014, 113(1): 1269-1282.
- [19] Chiang B C, Wey M Y, Yang W Y. Control of incinerator organics by fluidized bed activated carbon adsorber [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2000, 126(11): 985-992.
- [20] Jianmin Ding, Dimitri Gidaspow. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow [J]. *AIChE Journal*, 2010, 36(4): 523-538. ■