

商用活性炭对乙酸酯类挥发性有机物的动态吸附

杨旭东¹, 李茜², 汪大闪¹, 田刚¹, 崔龙哲², 赵玉凤^{2*}

(1 武汉旭日华环保科技股份有限公司, 武汉 430030; 2 中南民族大学 a. 资源与环境学院; b. 资源转化与污染控制国家民委重点实验室, 武汉 430074)

摘要 挥发性有机化合物(VOCs)是PM_{2.5}和臭氧污染的重要前体物,其控制排放是降低PM_{2.5}浓度、O₃污染程度的主要途径之一.活性炭吸附法具有能效高、经济环保等优点,是一种应用广泛的VOCs控制方法.以颗粒活性炭(AC)为吸附剂,系统研究了酯类有机化合物的动态吸附行为.结果表明:对于分子结构相似的酯类有机物,活性炭对其饱和吸附量与分子量呈良好的正相关关系,与饱和蒸气压呈负相关关系.动态模拟结果显示:Thomas和Yoon-Nelson模型都能很好地描述酯类有机物在活性炭上的吸附行为,前者对吸附穿透曲线上的拟合程度很高,后者对半饱和时间有较准确的预测.动力学结果表明:活性炭吸附酯类有机物的动力学模型的适用性的顺序为Bangham方程优于伪一级动力学方程,更优于伪二级动力学方程.

关键词 酯类有机化合物;活性炭;动态吸附;动力学模拟

中图分类号 X51 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2025)04-0440-07

doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20240736

Dynamic adsorption of acetate volatile organic compounds by commercial activated carbon

YANG Xudong¹, LI Qian², WANG Dashan¹, TIAN Gang¹, CUI Longzhe², ZHAO Yufeng^{2*}

(1 Wuhan Xurihua Environment & Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430030, China; 2 South-Central Minzu University, a. College of Resources and Environment; b. Key Laboratory of Resources Conversion and Pollution Control of the State Ethnic Affairs Commission, Wuhan 430074, China)

Abstract VOCs are critical precursors of PM_{2.5} and ozone pollution, and controlling their emission is one of the main ways to reduce PM_{2.5} concentration and O₃ pollution. Activated carbon adsorption method is a widely used VOCs control method due to its advantages of high energy efficiency, economy and environmental friendliness. The dynamic adsorption behavior of ester organic compounds was systematically studied using granular activated carbon (AC) as adsorbent. The results showed that for the ester organics with similar molecular structure, the saturated adsorption capacity of ester compounds on AC had a good positive correlation with the molecular weight, and a negative correlation with the saturated vapor pressure. The dynamic simulation results showed that both Thomas and Yoon-Nelson models could well describe the adsorption behavior of ester organics on AC. The former had a high degree of fitting on the adsorption breakthrough curve, and the latter had a more accurate prediction of the semi-saturation time. The kinetic results showed that Bangham equation was better than the pseudo-first order and pseudo-second order equations for fitting the kinetic model of AC adsorption of ester organics.

Keywords ester organic compounds; activated carbon; dynamic adsorption; kinetic simulation

挥发性有机化合物(VOCs)是形成臭氧和二次有机气溶胶(SOA)的重要前体物^[1-2],对生态环境和身体健康危害极大,活性炭吸附法由于能效比高、

经济环保等优点,被认定为是治理VOCs的主流技术之一^[3-4].然而,目前大部分研究针对单组份进行分析,浅析活性炭对某一种吸附质的影响,而对于

收稿日期 2023-06-07 * 通信作者 赵玉凤,研究方向:环境工程,E-mail:zhaoyf@scuec.edu.cn

作者简介 杨旭东(1967-),男,高级工程师,研究方向:挥发性有机物治理及有机溶剂提纯分离,E-mail:yangxudong@xurihua.cn.

基金项目 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CZQ23012)

一类物质之间的关联分析较少.酯类有机化合物作为一类典型的VOCs,在化工、制药、涂料和皮革等工业生产中常作为优质有机溶剂而被广泛使用^[5].但这些有机化合物大多具有低沸点、易挥发的特性,在使用过程中会产生有机废气,大部分废气具有毒性,可通过吸入或经皮肤吸收对操作人员的身体健康造成损害,同时造成环境污染.此外,酯类有机物有易燃性,与空气能形成爆炸性混合物,对生产企业具有安全隐患.

本文选定颗粒活性炭为吸附剂,系统研究其对酯类挥发性有机物的动态吸附.以乙酸乙酯、乙酸乙烯酯、乙酸正丙酯和乙酸丁酯作为酯类有机物的模型分子,在相同吸附条件下,研究相似结构VOCs的物性差别对活性炭吸附行为的影响.结合两种动态吸附模型和三种动力学模型阐述酯类有机化合物在活性炭上的吸附行为.

1 实验方法

1.1 实验材料

本文以活性炭作为吸附剂(宁夏华辉活性炭有限公司),以无烟煤为前驱物制得,其外形为圆柱状,颗粒直径为3 mm,长度为4~8 mm,其性能参数见表1.

选用四种酯类有机物作为吸附质进行吸附实验,乙酸乙酯、乙酸正丙酯和乙酸丁酯购自国药集团化学试剂有限公司,乙酸乙烯酯购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,均为分析纯,其主要理化

性质见表2.

表1 活性炭性能参数

Tab. 1 Parameters of the activated carbon

产品	性能参数					
	CCl ₄ 吸附值/%	碘值/(mg·g ⁻¹)	灰分/%	水分/%	着火点/°C	密度/(g·L ⁻¹)
活性炭	80	1050	12	5	350	400

表2 不同试剂的理化性质

Tab. 2 Physicochemical properties of different reagents

试剂名称	理化性质			
	分子式	分子量	沸点/°C	25 °C饱和蒸气压/kPa
乙酸乙酯	C ₄ H ₈ O ₂	88.11	77.0	14.89
乙酸乙烯酯	C ₄ H ₈ O ₂	86.09	72.5	15.80
乙酸正丙酯	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.13	101.4	4.69
乙酸丁酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	116.16	126.6	1.53

1.2 实验方法

1.2.1 活性炭表征

采用物理吸附仪(JW-BK132F,北京精微高博科技)测定活性炭的比表面积与孔径分布.采用扫描电子显微镜(SEM, Sigma HD, 德国 ZEISS)观测活性炭的形貌特征.采用傅里叶红外光谱仪(FTIR, Nexus470, 美国 Thermo Nicolet)表征活性炭表面的官能团.

1.2.2 实验装置与流程

本文采用如图1所示VOCs吸脱附装置,该装置主要由气体混合系统、固定床吸附系统、升温脱附系统、数据分析监控系统及尾气处理系统五部分组成.

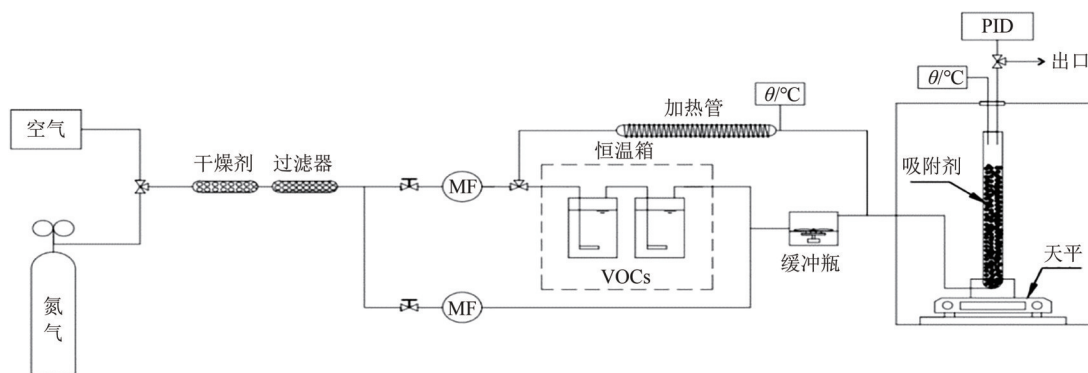


图1 VOCs吸脱附装置图

Fig. 1 Experimental device of adsorption/desorption system

吸附流程:使用高纯氮气(99.99%)作为挥发性有机污染物的载气,气体流量由稳压阀调节并通过电子流量计显示,经气体混合得到一定入口浓度 C_0 的污染物.内径31.1 mm、高度25 cm的吸附柱内填

充一定量的活性炭,污染物由底部进气口进入,由下而上流经固定床,与活性炭发生动态吸附,直至床层吸附饱和.本文将 $C/C_0=10\%$ 作为穿透点^[6],当出口浓度达到入口浓度90%时,认为活性炭已达到

饱和状态.

1.2.3 动态吸附模型及吸附动力学模型

为研究活性炭固定床对 VOCs 的吸附行为及反映其动力学特征,本文选取两种动态吸附模型

(Thomas 模型和 Yoon-Nelson 模型)及三种动力学模型(伪一级、伪二级及 Bangham 模型)^[7]对实验数据进行拟合(表 3),探索不同模型对动态吸附行为的适应性并分析活性炭的吸附过程及吸附规律.

表 3 动态吸附模型和动力学模型的方程和参数

Tab. 3 Equations and parameters of the dynamic adsorption models and kinetic models

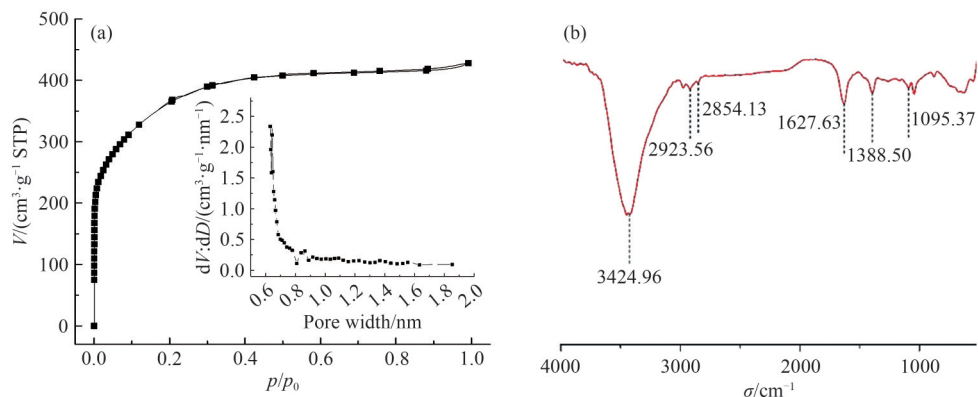
分类	模型	公式	参数
动态吸附模型	Thomas 模型	$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{kq_s m}{Q} - kC_0 t\right)}$	C_t : t 时刻的出口浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ C_0 : 入口浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ q_s : 饱和吸附量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ Q : 气体流量, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ m : 吸附剂质量, g k : 吸附速率常数, $\text{L}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$
	Yoon-Nelson 模型	$t = \tau + \frac{1}{k'} \ln\left(\frac{C_t}{C_0 - C_t}\right)$	k' : 吸附速率常数, min^{-1} τ : 吸附 50% 所需时间, min
吸附动力学模型	伪一级动力学	$q_t = q_s(1 - e^{-k_1 t})$	q_t : t 时刻的吸附量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ q_s : 饱和吸附量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ k_1 : 吸附速率常数, min^{-1}
	伪二级动力学	$q_t = q_s \frac{k_2 q_s t}{1 + k_2 q_s t}$	k_2 : 吸附速率常数, $10^{-6}\cdot\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$ k_3 : 吸附速率常数, $10^{-4}\cdot\text{min}^{-1}$
	Bangham 动力学	$q_t = q_s(1 - e^{-k_3 t^n})$	n : 时间补偿修正系数

2 结果与讨论

2.1 活性炭的表征

从活性炭的氮气吸脱附曲线(图 2(a))可知,该吸附等温曲线为 I 型,在相对低压区($p/p_0 < 0.2$)时,活性炭对氮气的吸附量急剧增加,这主要归功于微孔的吸附填充作用,表明活性炭中存在大量的微孔.同时在中压区($0.45 < p/p_0 < 0.8$)出现了一个很小的回滞环,说明活性炭中还存在少量的介孔.孔径分布图(图 2(a)插图)也能够证实活性炭中的孔主要以微孔为主,微孔率达 78.41%. 测量结果显示活性

炭的比表面积(S_{BET})为 $1248.3 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,总孔容体积为 $0.66 \text{ m}^3\cdot\text{g}^{-1}$,其中微孔空体积为 $0.52 \text{ m}^3\cdot\text{g}^{-1}$,最可几孔径为 0.64 nm .活性炭的 FT-IR 光谱如图 2(b)所示.由图 2(b)可见:在 3425 cm^{-1} 处的峰可归属于—OH 基团的伸缩振动,在 2924 和 2854 cm^{-1} 处的谱峰归属于饱和烷基中 C—H 的对称和反对称伸缩振动.在 1628 cm^{-1} 附近的吸收峰可归属于活性炭骨架中 C=C 键的伸缩振动吸收, 1388 cm^{-1} 附近的峰对应于不对称和对称的 COO—振动, 1095 cm^{-1} 处的峰可归属于 $\text{CH}_2\text{—O—CH}_2$ 中的 C—O 伸缩振动.这说明 AC 表面存在羟基、羧基等官能团.扫描电镜显示(图 3):活



(a) 氮气吸脱附曲线; (b) 红外谱图

图 2 活性炭的氮气吸脱附曲线和红外谱图

Fig. 2 N_2 adsorption-desorption isotherms and FTIR spectrum of AC

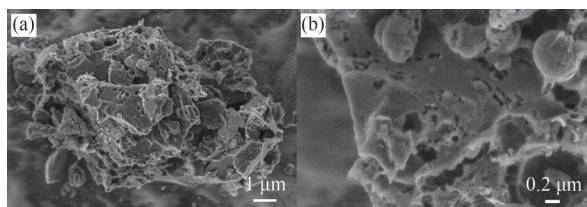


图3 活性炭SEM图像

Fig. 3 SEM images of AC

活性炭表面质地松散、粗糙、凹凸不平,含有较多的孔隙,孔隙结构发达,呈无规则形状分布。

2.2 活性炭对酯类有机物的吸附效果

在相近入口浓度及相同气体流速、床层高度下,探究不同酯类VOCs(乙酸乙酯、乙酸乙烯酯、乙酸正丙酯、乙酸丁酯)对活性炭动态吸附的影响。由

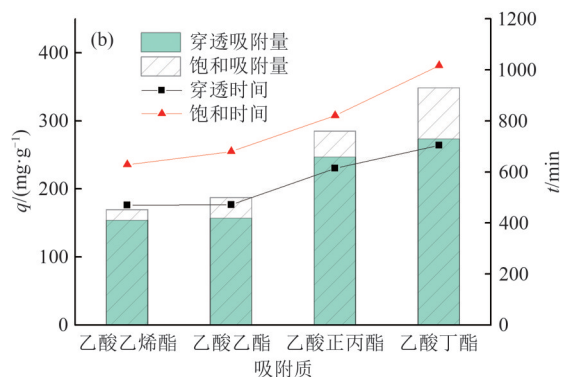
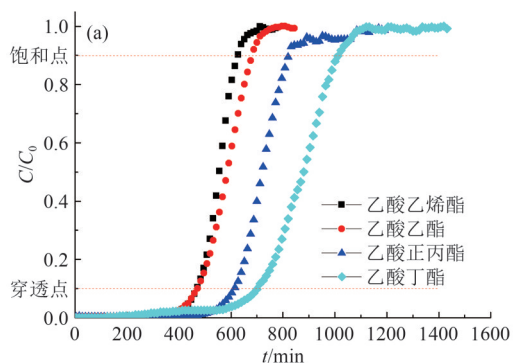


图4 活性炭对酯类VOCs的动态吸附曲线

Dynamic adsorption curves of AC to ester VOCs

表4 活性炭对不同酯类VOCs吸附实验数据

Tab. 4 Adsorption experimental data of AC with different ester VOCs

VOCs	入口浓度 C_0 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	穿透点 时间 t_b /min	穿透点 吸附量 q_b / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	饱和 时间 t_s /min	饱和 吸附量 q_s / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
乙酸乙酯	5.82	472	157.1	680	187.3
乙酸乙烯酯	5.70	470	154.0	628	169.4
乙酸正丙酯	6.40	614	246.9	820	284.9
乙酸丁酯	6.25	704	273.3	1016	348.4

2.3 VOCs物性对活性炭吸附性能的影响

VOCs的分子量、饱和蒸气压、分子动力学直径等特性的综合作用,导致不同有机气体与活性炭的结合力不同,最终体现在吸附性能上的差异^[10-11]。结合对VOCs的理化性质的分析,对吸附平衡的影响进一步评价。由图5可知:活性炭对有机气体的饱和吸附量与分子量、沸点呈良好的正相关关系,与饱和蒸气压呈负相关关系。

通常情况下,对于结构相似的VOCs,活性炭对其吸附量与吸附质分子的分子量呈正相关关系。

图4和表4可知:活性炭对乙酸乙酯、乙酸乙烯酯、乙酸正丙酯、乙酸丁酯的穿透时间分别为472、470、614、704 min,乙酸乙烯酯的穿透时间最短,最快达到饱和。活性炭对乙酸丁酯($348.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)的饱和吸附量最大,约是乙酸乙酯($187.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 1.86倍。活性炭对乙酸丁酯的优异吸附可能归因于乙酸丁酯的分子结构中烷基的比例更大,对疏水表面的活性炭有更大的亲和力^[8]。由图4可见:活性炭对乙酸乙酯的吸附性能略低于乙酸乙酯,可能由于不饱和键的存在对分子极性有所影响所致。乙酸乙酯的极性略大于乙酸乙酯,而活性炭是一种非极性物质,对较弱极性的乙酸乙酯表现出更高的饱和吸附量^[9]。

活性炭在其有限的吸附点位,当吸附相同数量的吸附质分子时,分子量大的吸附质因其单分子重量大,表现出饱和吸附量较大;另一方面,活性炭与分子量大的吸附质之间的相互作用力更大,大分子量吸附质易于吸附。饱和蒸气压本质上是描述单组分体系气液两相平衡时具备的特征,与物质的沸点、相对挥发度等相关。活性炭对有机气体的吸附为动态过程,吸附质饱和蒸气压越大,沸点越低,有机气体在被吸附的同时越容易挥发脱附离开活性炭表面,难以稳定的被吸附在活性炭孔隙间^[12]。

2.4 动态吸附模型

为研究活性炭对酯类有机物的吸附性能,采用Thomas、Yoon-Nelson模型对吸附穿透曲线进行拟合,结果见图6。Thomas吸附模型是基于Langmuir吸附理论和二级反应动力学模型研究动态吸附穿透曲线的经典模型^[13-14],假定没有轴向扩散的理想模型,可用于对吸附剂材料的最大吸附容量进行预测。Yoon-Nelson动态吸附模型是Yoon和Nelson^[15]开发出的一个半经验模型,它不需要考虑吸附剂、吸附

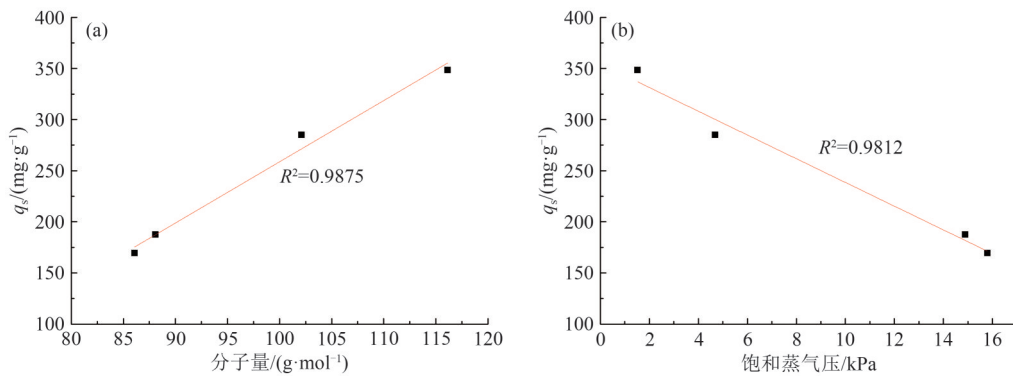
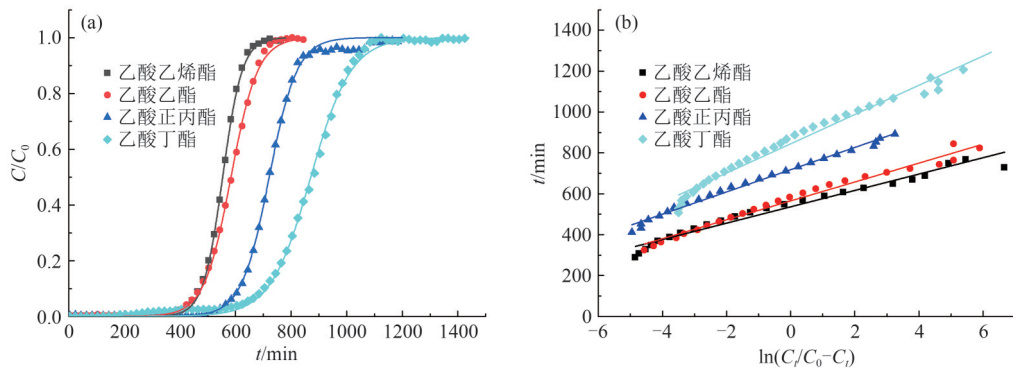


图5 吸附质物性与活性炭吸附量关系

Fig. 5 Relationship between adsorbent properties and adsorption capacity of AC



(a) Thomas 模型; (b) Yoon-Nelson 模型

图6 动态吸附模型拟合曲线

Fig. 6 Dynamic adsorption model fitting curves

质以及吸附床层等特征指数,可预测实验吸附速率和半饱和时间.且因其模型的简单性,在单一吸附体系中得到广泛应用^[16].

由图6和表5可知:从相关系数 R^2 来看,Thomas模型拟合度高于Yoon-Nelson模型.Thomas模型适于

描述活性炭对酯类有机物的穿透吸附曲线,拟合吸附值与实验值存在一定差距,但其整体变化趋势大致相同.Yoon-Nelson模型拟合度较低,但其预测半饱和时间与实验值非常相近,因此模型在实际应用中也有一定的工业价值.

表5 吸附动力学模型拟合参数

Tab. 5 Fitting parameters of adsorption kinetic models

吸附质	Thomas 模型				Yoon-Nelson 模型			
	k	$q_s/(mg \cdot g^{-1})$		R^2	k'	t/min		R^2
		拟合值	实验值			拟合值	实验值	
乙酸乙酯	0.0036	271.70	187.3	0.9993	0.0216	565	588	0.9763
乙酸乙烯酯	0.0050	252.48	169.4	0.9997	0.0250	536	556	0.9786
乙酸正丙酯	0.0031	369.22	284.9	0.9987	0.0184	718	720	0.9927
乙酸丁酯	0.0022	435.26	348.4	0.9988	0.0140	844	880	0.9741

模型中吸附动力学常数体现传质阻力大小, k 值越高,其传质阻力越大,吸附量越小.两种模型拟合的 k 值均表现出乙酸乙烯酯>乙酸乙酯>乙酸正丙酯>乙酸丁酯,则乙酸乙烯酯的传质阻力最大,乙酸丁酯的传质阻力最小,与实验结果的饱和吸附量得到验证.

2.5 吸附动力学拟合

为研究活性炭对酯类 VOCs 的吸附动力学特

性,采用伪一级、伪二级动力学和 Bangham 吸附速率方程对其吸附数据进行拟合(图7和表6).伪一级动力学模型是基于固体吸附量最为常见的模型,模型规定吸附速率与吸附势成正比,主要用于描述物理吸附过程.伪二级动力学模型主要用于描述物理和化学复合吸附过程.Bangham 模型用于描述固定床的动态吸附过程,常被用来描述孔道扩散机理,可以确定吸附质的控速步骤是否是孔内扩散^[17].

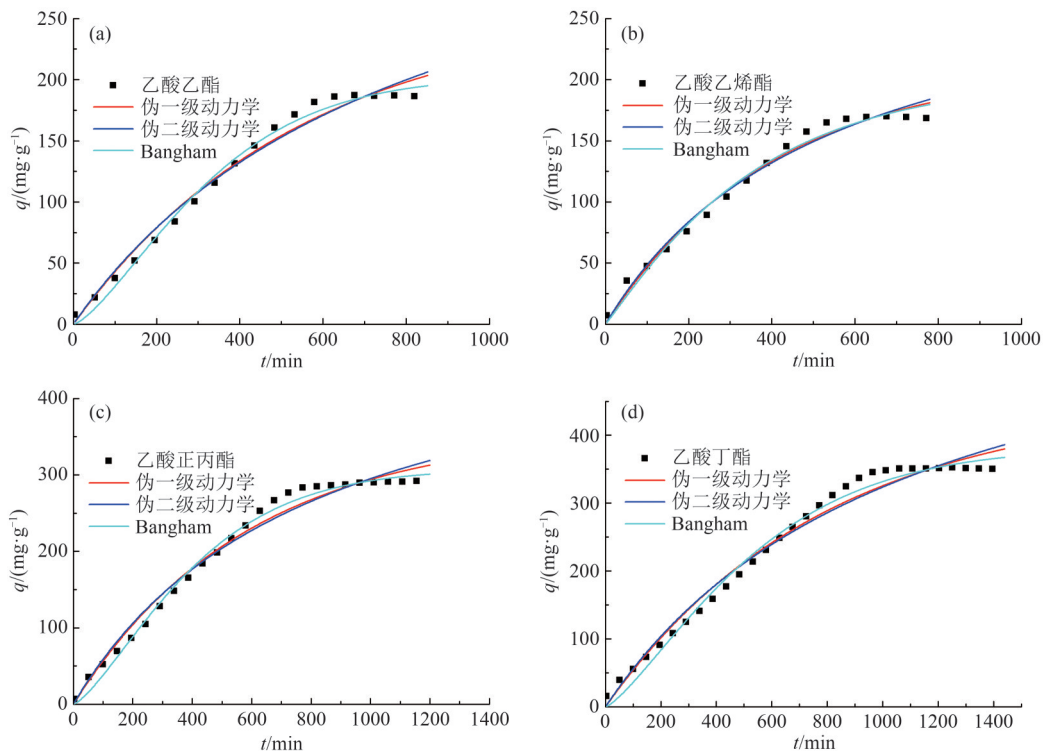


图 7 伪一级、伪二级和 Bangham 吸附动力学拟合

Fig. 7 Adsorption kinetic fitted by pseudo-first order, pseudo-second order and Bangham equations

从拟合效果来看,模型适用性: Bangham>伪一级>伪二级动力学. 与其他动力学拟合相比, Bangham 方程预测的饱和吸附量与实验值非常接

近,且相关系数 R^2 最高,说明活性炭对酯类 VOCs 的吸附行为符合 Bangham 吸附速率方程. 活性炭吸附酯类 VOCs 是以物理吸附为主的孔道扩散.

表 6 吸附动力学拟合参数

Tab. 6 Fitting parameters for adsorption kinetics

不同模型	参数	不同吸附质			
		乙酸乙酯	乙酸乙烯酯	乙酸正丙酯	乙酸丁酯
伪一级动力学	$q_s / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	258.29	211.30	358.71	451.82
	k_1 / min^{-1}	0.0018	0.0025	0.0170	0.0013
	R^2	0.9811	0.9828	0.9807	0.9808
伪二级动力学	$q_s / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	408.49	313.52	534.19	687.51
	$k_2 / [10^{-6} \text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}]$	2.931	5.801	2.310	1.293
	R^2	0.9774	0.9796	0.9744	0.9760
Bangham 动力学	$q_s / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	202.29	199.74	307.25	381.48
	$k_3 / 10^{-4} \text{min}^{-1}$	2.642	17.700	2.526	2.376
	n	1.399	1.076	1.359	1.311
	R^2	0.9917	0.9832	0.9911	0.9882

注:乙酸乙酯、乙酸乙烯酯、乙酸正丙酯、乙酸丁酯的饱和吸附量($q_{s, \text{exp}}$)分别为 187.3、169.4、284.9、348.4 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

3 结语

本文研究相似结构 VOCs 在活性炭上的吸附行为,考察碳链长度(乙酸丁酯、乙酸正丙酯和乙酸乙酯)和不饱和键(乙酸乙酯和乙酸乙烯酯)对活性炭吸附酯类有机物的行为特性.在相同吸附条件下进行动态吸附实验,分析吸附性质与吸附行为的关

系,利用动态模型和吸附动力学方程对数据进行拟合.结果表明:对于分子结构相似的酯类有机物,吸附性能差异性主要归因于分子量、沸点和饱和蒸气压.活性炭对有机气体的饱和吸附量与分子量呈正相关,而与饱和蒸气压呈负相关.不饱和键的存在,导致乙酸乙烯酯的极性略大于乙酸乙酯,活性炭对弱极性的乙酸乙酯表现出更高的饱和吸附量.

Thomas 模型对吸附穿透曲线拟合程度高,可对活性炭吸附有机物的饱和和吸附量进行预测;Yoon-Nelson 模型对半饱和时间有较准确的预测;且二者拟合吸附速率常数大小均与实验结果相一致.动力学模型 Bangham 对活性炭吸附酯类有机物的拟合度优于伪一级和伪二级,表明活性炭对酯类 VOCs 以物理吸附为主.

参 考 文 献

- [1] 许秋飞,沈振萍,严勇,等. VOCs 走航与固定源监控联动的大气臭氧污染溯源分析与反演[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 456-460.
- [2] 栾志强,王喜芹,李京芬. 助力打好大气污染防治攻坚战 VOCs 治理工作快速发展[J]. 中国环保产业, 2022: 17-18.
- [3] YANG C, MIAO G, PI Y, et al. Abatement of various types of VOCs by adsorption/catalytic oxidation: A review [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 370: 1128-1153.
- [4] ZHANG X, 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.
- [5] LIU H, YU Y, SHAO Q, et al. Porous polymeric resin for adsorbing low concentration of VOCs: Unveiling adsorption mechanism and effect of VOCs' molecular properties [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 228: 115755.
- [6] LEE M H, VIKRANT K, YOUNIS S A, et al. Chemisorption of hydrogen sulfide by metal-organic frameworks and covalent-organic polymers based on experimental/theoretical evaluation [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 250: 119486.
- [7] ANG T N, YOUNG B R, TAYLOR M, et al. Breakthrough analysis of continuous fixed-bed adsorption of sevoflurane using activated carbons [J]. Chemosphere, 2020, 239: 124839.
- [8] USHIKI I, UENO Y, TAKISHIMA S, et al. Adsorption equilibria of ester VOCs (ethyl and butyl acetates) on activated carbon in supercritical CO₂: Measurement and modeling by the Dubinin-Astakhov equation [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2022, 189: 105719.
- [9] 税永红. 活性炭吸附法在挥发性有机物治理中的应用研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2020, 37: 125-132, 124.
- [10] 许伟,刘军利,孙康. 活性炭吸附法在挥发性有机物治理中的应用研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(4): 1223-1229.
- [11] LI X, ZHANG L, YANG Z, et al. Adsorption materials for volatile organic compounds (VOCs) and the key factors for VOCs adsorption process: A review [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 235: 116213.
- [12] 吕浩,马修卫,侯勇,等. 活性炭喷射耦合布袋除尘脱除燃煤烟气有机污染物[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 503-510.
- [13] HAN R, WANG Y, ZHAO X, et al. Adsorption of methylene blue by phoenix tree leaf powder in a fixed-bed column: experiments and prediction of breakthrough curves [J]. Desalination, 2009, 245(1/3): 284-297.
- [14] THOMAS H C. Heterogeneous ion exchange in a flowing system [J]. Journal of the American Chemical Society, 1944, 66(10): 1664-1666.
- [15] YOON Y H, NELSON J H. Application of Gas Adsorption Kinetics I. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life [J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 1984, 45(8): 509-516.
- [16] 邓卓. 活性炭纸基吸附材料的制备及其对碳氢化合物的吸附特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [17] 顾永正,张永生,张振森,等. 燃煤飞灰汞吸附动力学及其模型研究[J]. 热力发电, 2015, 44(12): 11-18.

(责编&校对 刘钊)