

引用格式:

许克静, 刘向真, 刘语煊, 马一琼, 郝辉, 张智轩, 方志辉, 梁森, 陈小龙, 张峻松. β -苯乙醇在烟草秸秆活性炭上的吸附及缓释性能[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(2): 122–128.

XU K J, LIU X Z, LIU Y X, MA Y Q, HAO H, ZHANG Z X, FANG Z H, LIANG M, CHEN X L, ZHANG J S. Adsorption and sustained release properties of β -phenylethanol using tobacco straw activated carbon[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(2): 122–128.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



β -苯乙醇在烟草秸秆活性炭上的吸附及缓释性能

许克静¹, 刘向真¹, 刘语煊², 马一琼¹, 郝辉¹, 张智轩¹, 方志辉², 梁森², 陈小龙^{1*}, 张峻松²

(1.河南中烟工业有限责任公司, 河南 郑州 450003; 2.郑州轻工业大学烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:以烟草废弃秸秆为碳源, 选择3种活化时间(60、75、90 min), 采用热解活化法制备烟草秸秆活性炭(TSAC60、TSAC75、TSAC90), 利用制备的3种活性炭(TSAC)研究其对 β -苯乙醇的吸附和释放行为, 并采用动力学模型分析孔隙结构对 β -苯乙醇吸附和释放行为的影响。结果表明: 不同活化时间下制备的3种TSAC孔隙结构有差异, 当活化时间从60 min增至90 min时, 微孔率由66.39%降低至24.81%; TSAC对 β -苯乙醇的负载均以物理吸附为主, 准一级动力学模型可较好地描述吸附过程, TSAC60对 β -苯乙醇的平衡吸附率最高, 为101.49%, 但吸附速率常数最小; TSAC负载的 β -苯乙醇热稳定性增加, 其中TSAC60对 β -苯乙醇的缓释效果最明显, Page模型可较好地描述 β -苯乙醇的非等温热释放过程; β -苯乙醇从3种TSAC中释放的过程均符合Korsmeyer–Peppas模型, 等温释放过程均以Fick扩散为主, TSAC60中 β -苯乙醇在35 d时的释放率为27.34%; TSAC中的微孔结构是影响其对 β -苯乙醇吸附和缓释性能的关键因素。

关键词: 烟草秸秆; 活性炭; β -苯乙醇; 吸附; 缓释; 热稳定性; 动力学

中图分类号: TQ424.1⁺9; TS264.3 文献标志码: A 文章编号: 1007–1032(2025)02–0122–07

Adsorption and sustained release properties of β -phenylethanol using tobacco straw activated carbon

XU Kejing¹, LIU Xiangzhen¹, LIU Yuxuan², MA Yiqiong¹, HAO Hui¹, ZHANG Zhixuan¹,
FANG Zhihui², LIANG Miao², CHEN Xiaolong^{1*}, ZHANG Junsong²

(1.China Tobacco Henan Industrial Limited Company, Zhengzhou, Henan 450003, China; 2.College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: Tobacco straw activated carbons(TSAC60, TSAC75, TSAC90) were prepared at three activation times(60, 75, 90 min) by pyrolysis activation method. The adsorption and release behaviors of β -phenylethanol on the three prepared activated carbons(TSAC) were studied, and the influence of pore structure on the adsorption and release behavior of β -phenylethanol was analyzed using a kinetic model. The results showed that the pore structure varied with activation time: microporosity decreased from 66.39%(TSAC60) to 24.81%(TSAC90). Adsorption of β -phenylethanol on TSAC was primarily physical, best fitted by the pseudo-first-order kinetic model, with TSAC60 showing the highest equilibrium adsorption(101.49%) but the lowest rate constant. Non-isothermal heat release analysis indicated enhanced thermal stability, with TSAC60 exhibiting the strongest sustained release, well-described by the Page model. Isothermal release followed the Korsmeyer–Peppas model, dominated by Fickian diffusion; TSAC60 released 27.34% of β -phenylethanol after 35 days. The microporosity of TSAC was the key factor governing adsorption and sustained release performance.

收稿日期: 2024–03–27

修回日期: 2024–05–20

基金项目: 河南中烟工业有限责任公司科研项目(AW2022024)

作者简介: 许克静(1988—), 男, 安徽淮南人, 博士, 助理研究员, 主要从事烟用香料的研究与开发, kjxu_hnzy@163.com; *通信作者, 陈小龙, 博士, 农艺师, 从事烟叶原料技术研究, cxlou119@163.com

Keywords: tobacco straw; activated carbon; β -phenylethanol; adsorption; sustained release; thermal stability; dynamics

多孔材料吸附法是一种简便有效的香料缓释方法,该方法利用多孔材料的微纳孔隙结构作为储香空间,通过弱相互作用力来吸附储存香料分子,并可通过外界环境调变实现控制香味物质的缓释^[1-2]。介孔二氧化硅、分子筛、多孔碳及金属有机框架材料等均可用于挥发性香料的吸附与缓释^[3-5],其中活性炭因其比表面积和孔隙结构调控度大、价格低廉和安全性高等优点成为众多研究者关注的对象^[6-8]。

热解活化法^[9-10]是制备多孔活性炭的重要方法之一,许多研究者围绕活性炭的香料吸附性能开展了研究。王明锋等^[11]对比了苯乙醇在XF型活性炭与其他4种多孔材料上的脱附活化能,发现XF型活性炭对苯乙醇具有较高的吸附结合力。陈功等^[12]以蚕沙为碳源,通过一步合成法制备了Fe掺杂的高石墨化多孔生物炭材料Fe/Z-ASE,并分析了苯乙醇和茴香醚在其上的吸附和缓释动力学行为。李智宇等^[13]以葡萄糖为碳化剂对SY1型炭改性,探究碳化温度对活性炭表面孔隙结构、酸性基团含量及苯乙醇吸附性能的影响,发现改性能够改变多孔炭对苯乙醇的吸附储存性能。这些研究表明,制备活性炭的碳源及热解活化条件对材料的吸附、缓释性能有显著影响。

中国烟草生产加工中产生大量的废弃秸秆生物质,农林废弃生物质是一类制备活性炭的重要碳源。本研究中,采用热解活化法制备烟草秸秆基活性炭,通过工艺参数调变控制活性炭孔隙结构,并探究活性炭对挥发性香料 β -苯乙醇的吸附和缓释性能的影响,以期烟草废弃资源价值化利用和挥发性香料的缓控释与应用提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料和主要试剂

供试烟草秸秆采自云南玉溪,洗去表面沙土杂质后在日光下晾晒20 d使其干燥。主要试剂如下:氢氧化钾(KOH),分析纯,天津市大茂化学试剂厂产品; β -苯乙醇,色谱纯,百灵威科技有限公司产

品;去离子水,娃哈哈集团有限公司产品。

1.2 多孔活性炭的制备

采用电子天平(EL204型, Mettler-Toledo仪器(上海)有限公司)称取5 g烟草秸秆粉末与10 g KOH分散于50 mL去离子水中,在50 °C下磁力搅拌,使活化剂充分溶解并与烟草秸秆粉末混合均匀,浸渍12 h后过滤取出烟草秸秆粉末,置于105 °C电热恒温鼓风干燥箱(BC2-140型,郑州利研仪器设备有限责任公司)中干燥。将干燥后的样品置于管式高温烧结炉(OTF-1200X型,合肥科晶材料技术有限公司),通入N₂排除空气,将管式炉以10 °C/min升温至800 °C活化,并保持一定时间(60、75、90 min)后关闭加热。待管式炉温度降至室温后,取出活性炭样品,用去离子水抽滤洗涤(SHZ-D(III)型循环水式多用真空泵,郑州利研仪器设备有限责任公司),至中性,干燥后制得烟草秸秆活性炭(TSAC),活化时间为60、75、90 min的样品分别记为TSAC60、TSAC75、TSAC90。

1.3 多孔活性炭的表征

采用BET分析仪(ASAP 2460 3.00型比表面积及孔隙度分析仪, Micromeritics)对TSAC的孔隙结构进行表征,以高纯度氮气为介质,在-195.8 °C下测量TSAC的吸附及脱附等温线,通过BET模型、t-plot模型和密度泛函理论(DFT)分别计算TSAC的比表面积、孔容和孔径分布。

1.4 活性炭对 β -苯乙醇的吸附动力学研究

1.4.1 吸附试验

采用静态吸附法研究活性炭对 β -苯乙醇的吸附行为。在干燥皿(直径210 mm)的底部倒入150 mL β -苯乙醇;取一定质量的活性炭平铺于直径25 mm的具盖称量瓶内,开盖置于干燥皿上层;将干燥皿密封并置于60 °C烘箱中恒温吸附,在30、60、90、120、180、240、360、480、720、960、1 200、1 440 min时加盖取出称量瓶称重,计算吸附率并绘制吸附率

随时间变化的曲线。每个活性炭样品重复3次。

1.4.2 吸附动力学模型拟合

参照文献[14-15],利用准一级动力学、准二级动力学和颗粒内扩散模型(Weber-Morris II模型)对活性炭吸附 β -苯乙醇的过程进行动力学拟合。

1.5 活性炭负载的 β -苯乙醇的释放动力学研究

1.5.1 非等温释放试验与拟合

采用热重分析仪(SDT Q600型,TA公司)对被活性炭吸附前后的 β -苯乙醇进行热重分析,研究 β -苯乙醇的非等温脱附释放行为。被TSAC60、TSAC75、TSAC90吸附的 β -苯乙醇分别记为 β -苯乙醇@TSAC60、 β -苯乙醇@TSAC75、 β -苯乙醇@TSAC90。活性炭样品用量为20 mg左右;气氛为氮气;升温速率为15 °C/min,温度从室温升至800 °C。根据结果绘制热失重(TG)和微分热重(DTG)曲线。参照文献[16-17],利用非等温干燥动力学模型分析 β -苯乙醇的非等温释放过程。

1.5.2 等温释放试验与拟合

将达到吸附平衡的活性炭置于干燥皿中,在30 °C室温下考察活性炭负载的 β -苯乙醇的释放行为。分别在1、3、5、7、10、14、21、28、35 d时从干燥皿中取出活性炭样品称重,测定活性炭中残留的香料含量,计算释放率并绘制释放率随时间变化的曲线。

参照文献[18-19],结合零级释放、一级释放、Higuchi与Korsmeyer-Peppas模型对活性炭负载的 β -苯乙醇的释放行为进行动力学拟合。

1.6 数据统计分析

运用SPSS 27.0对数据进行相关性分析;运用Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 TSAC的孔隙结构

根据IUPAC吸附等温线分类方法^[20-21],TSAC60、TSAC75、TSAC90的 N_2 吸附-脱附等温线特征呈现典型的I型和IV型等温线的复合型吸附行为,低压时吸附量随着相对压力的增加迅速增加,在相对压力为0.4-0.9时出现了H4滞后环,且在相对压力接近1.0时

等温线出现上翘,说明这3种活性炭孔隙结构丰富,均具有丰富的微孔和介孔,并具有一定量的大孔(图1)。从图1还可以看出,TSAC75和TSAC90的 N_2 平衡吸附量较为接近,TSAC60的 N_2 平衡吸附量最低。

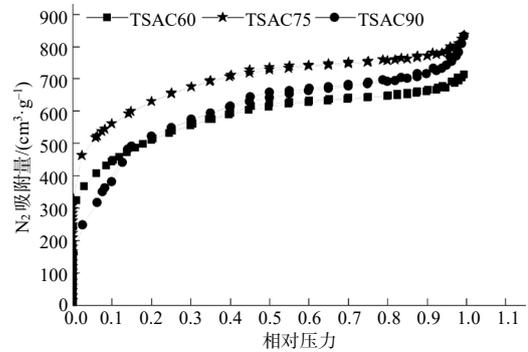
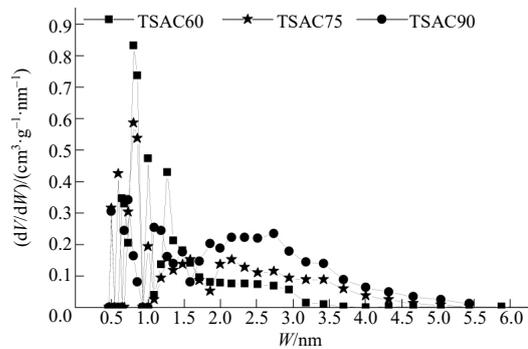


图1 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭的 N_2 吸附-脱附等温线

Fig.1 N_2 adsorption desorption isotherms of tobacco straw activated carbon at the three activation times

从图2可知,TSAC60的孔隙结构丰富,其微孔孔径主要分布在0.6~1.6 nm,且含量高于较长活化时间的TSAC,存在一定量的2.0~3.0 nm的介孔;TSAC75的微孔孔径主要分布在0.5~0.9 nm,介孔孔径主要集中在2.0~4.0 nm;TSAC90的微孔含量较低,2.0~4.0 nm的介孔含量高。



W 孔径; V 孔体积。

图2 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭的DFT孔径分布

Fig.2 DFT pore size distribution of tobacco straw activated carbon at the three activation times

从表1可知,TSAC75、TSAC60、TSAC90的比表面积依次减小,平均孔径则依次增大;随活化时间延长,微孔面积、微孔体积和微孔率均逐渐下降,而介孔面积逐渐增加,TSAC60的微孔面积、微孔体积和微孔率均最大,这表明过长的活化时间使孔融合扩大,导致微孔含量降低而介孔含量增多。

表 1 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭的微观特征参数

Table 1 Microscopic characteristic parameters of tobacco straw activated carbon at the three activation times

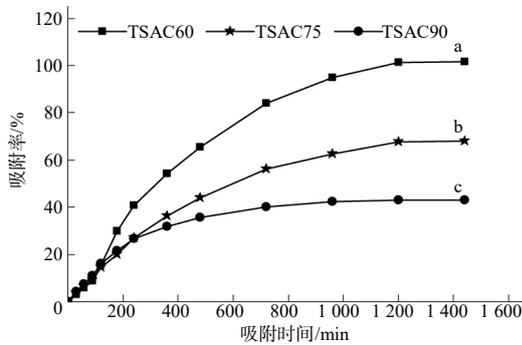
活性炭	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	微孔面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	介孔面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	微孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	微孔率/ %	平均孔径/ nm
TSAC60	(1 980.91±130.76)b	(1 720.75±132.26)a	(260.16±1.50)c	(1.22±0.01)b	(0.81±0.01)a	(66.39±0.16)a	(2.45±0.04)b
TSAC75	(2 274.12±161.50)a	(1 407.64±163.32)b	(866.48±1.82)b	(1.29±0.01)a	(0.53±0.01)b	(41.09±0.25)b	(2.27±0.07)c
TSAC90	(1 871.91±75.13)b	(909.85±76.40)c	(962.06±1.27)a	(1.29±0.01)a	(0.32±0.01)c	(24.81±0.90)c	(2.75±0.02)a

注：同列不同字母表示活性炭间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.2 TSAC对 β -苯乙醇的吸附行为分析

2.2.1 吸附曲线对比分析结果

从图3可知，3种活性炭对 β -苯乙醇的平衡吸附率差异明显，随TSAC活化时间增加，平衡吸附率显著降低，TSAC60对 β -苯乙醇的平衡吸附率最大，



图中不同字母表示活性炭对 β -苯乙醇吸附平衡时的吸附率的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图3 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭对 β -苯乙醇的吸附曲线

Fig.3 Adsorption curves of tobacco straw activated carbon for β -phenylethanol at the three activation times

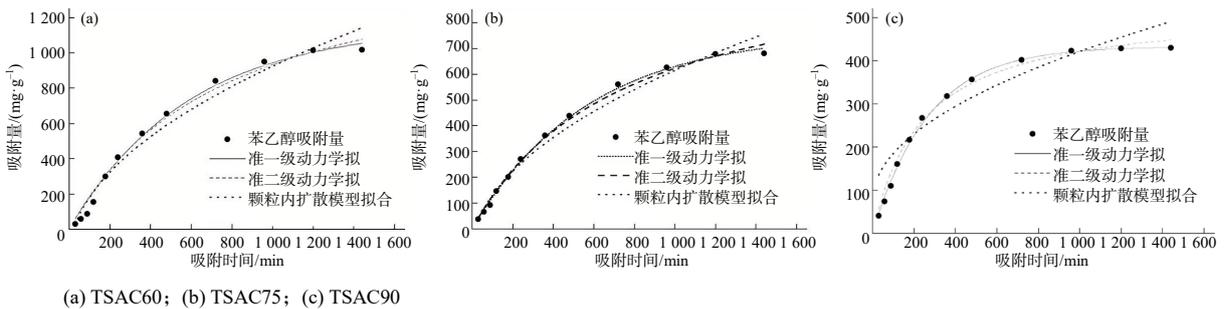


图4 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭负载 β -苯乙醇的吸附动力学曲线

Fig.4 Adsorption kinetics curves of tobacco straw activated carbon loaded with β -phenylethanol at the three activation times

表2 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭负载 β -苯乙醇的吸附动力学参数

Table 2 Adsorption kinetic parameters of tobacco straw activated carbon loaded with β -phenylethanol at the three activation times

活性炭	准一级动力学模型			准二级动力学模型			内扩散模型		
	$q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_1/(\text{min}^{-1})$	R^2	$q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_2/(\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1})$	R^2	$k_3/(\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})^{-1})$	C	R^2
TSAC60	1 150.03	0.003 9	0.992 4	1 658.68	5 861 056.62	0.986 6	34.32	-161.60	0.972 1
TSAC75	761.59	0.004 0	0.995 6	1 088.42	1 723 573.54	0.991 3	22.38	-93.03	0.975 1
TSAC90	432.90	0.008 5	0.997 6	524.12	592 379.61	0.988 2	10.95	75.15	0.935 2

注： q_e 吸附平衡时的香料吸附量； k_1 一级吸附速率常数； k_2 二级吸附速率常数； k_3 颗粒内扩散速率常数； C 涉及边界层与厚度的常数。

为101.49%。结合TSAC的孔隙结构特征可见，微孔面积或体积越大，TSAC对 β -苯乙醇的平衡吸附率就越大。由吸附曲线变化的斜率看，虽孔隙结构特征差异明显，但3种TSAC在前120 min内的吸附速率基本一致。3种TSAC负载 β -苯乙醇的吸附过程均表现为前期吸附速率较快，随吸附时间增加吸附速率逐渐降低，200 min后TSAC90的吸附速率明显降低，并趋于吸附平衡。由此可见，微孔特征是影响TSAC对 β -苯乙醇吸附率的主要因素，推测TSAC吸附 β -苯乙醇的过程可能主要是物理吸附。

2.2.2 吸附动力学拟合结果

从图4和表2可知，3种活化时间制备的TSAC对 β -苯乙醇的吸附过程均与准一级动力学模型符合度高，决定系数(R^2)均大于0.99，说明3种TSAC负载 β -苯乙醇的过程以物理吸附为主；TSAC90的一级吸附速率常数(k_1)最大，说明其对 β -苯乙醇具有更快的吸附速率，但吸附速率高并不意味着平衡吸附量也大。

2.3 TSAC对β-苯乙醇的缓释性能分析

2.3.1 非等温释放性能

从图5可以看出,β-苯乙醇在室温至140 °C区间连续失重直至挥发完全,其挥发速率快,失重温度区间窄;TSAC吸附β-苯乙醇时的失重曲线明显区别于β-苯乙醇的,其表现为较慢的失重速率和较宽的失重温度区间,表明TSAC对β-苯乙醇具有不同程度的缓释效果,但不同活化时间的TSAC对β-苯乙醇的缓释效果有差异,β-苯乙醇@TSAC60达最大失重速率时的温度最高,为217 °C,β-苯乙醇@TSAC75和β-苯乙醇@TSAC90的较为接近,分别

为151、150 °C,且β-苯乙醇@TSAC60的失重温度区间较宽,整体介于50~450 °C。

从表3可见,非等温Page模型对β-苯乙醇释放过程的拟合 R^2 较高。Page模型拟合下β-苯乙醇@TSAC60、β-苯乙醇@TSAC75、β-苯乙醇@TSAC90中β-苯乙醇的释放活化能(E)依次降低,这说明β-苯乙醇从TSAC60中扩散释放所需能量高;TSAC60负载β-苯乙醇的热稳定性优于TSAC75和TSAC90的,说明微孔率更高的活性炭负载的β-苯乙醇的热稳定性更好。另外, E 均小于20 kJ/mol,也进一步表明TSAC对β-苯乙醇的吸附属于物理吸附。

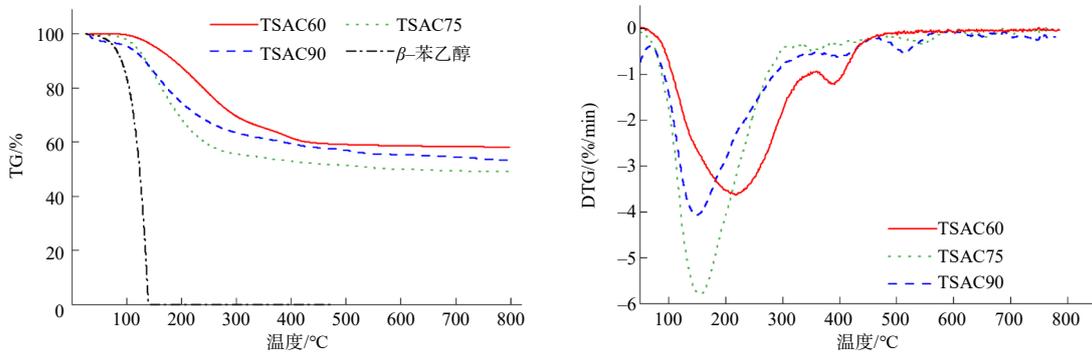


图5 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭负载的β-苯乙醇的TG和DTG曲线

Fig.5 TG and DTG curves of tobacco straw activated carbon loaded with β-phenylethanol at the three activation times

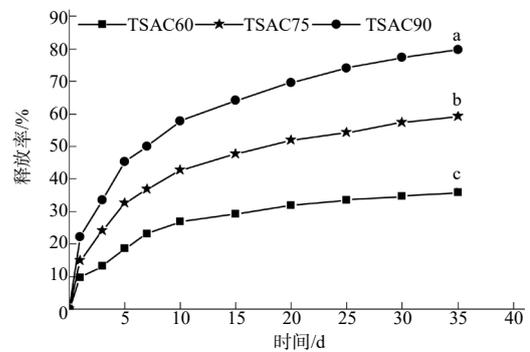
表3 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭负载的β-苯乙醇的非等温干燥动力学模型参数

Table 3 Non isothermal drying kinetics model parameters of tobacco straw activated carbon loaded with β-phenylethanol at the three activation times

非等温干燥模型	活性炭	R^2	$E/(kJ \cdot mol^{-1})$
Page	TSAC60	0.999 0	10.55
	TSAC75	0.999 9	5.17
	TSAC90	0.999 6	1.07
Henderson	TSAC60	0.998 7	-14.75
	TSAC75	0.999 3	-14.34
	TSAC90	0.999 4	-10.49
Logarithmic	TSAC60	0.998 7	14.96
	TSAC75	0.999 5	15.95
	TSAC90	0.999 4	10.06

2.3.2 等温释放性能

从图6可见,30 °C室温环境下,3种TSAC负载的β-苯乙醇的释放率差异明显,各样品的等温释放率高低顺序与图3中的吸附率相反;随TSAC活化时间增加,释放率增加,在35 d时TSAC60中β-苯乙醇的释放率仅为27.34%,显著低于TSAC75和TSAC90的,这表明30 °C恒温条件下TSAC60对β-苯乙醇的滞留性能较好,能够延缓其在贮存过程中的损失。

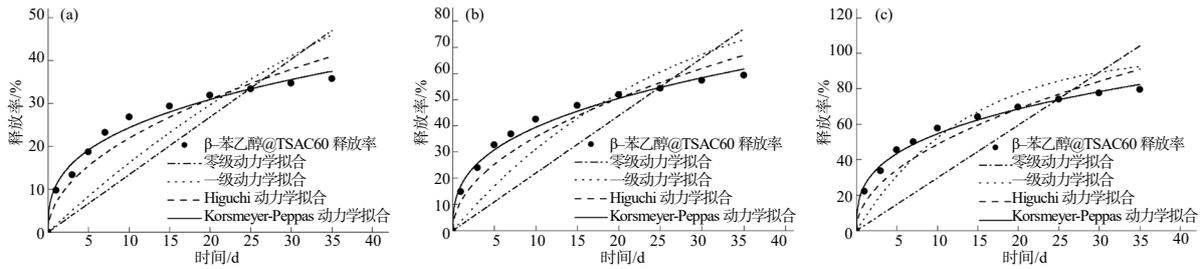


图中不同字母表示35 d时活性炭负载的β-苯乙醇的释放率的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图6 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭负载的β-苯乙醇的等温释放曲线

Fig.6 Isothermal release curves of tobacco straw activated carbon loaded with β-phenylethanol at the three activation times

从图7和表4可见,TSAC中β-苯乙醇的等温释放过程更符合Korsmeyer–Peppas模型,拟合 R^2 均在0.97以上,表明Korsmeyer–Peppas模型可较好地描述β-苯乙醇从TSAC中的释放过程;Korsmeyer–Peppas模型的扩散常数(n)均低于0.45,表明3种TSAC对β-苯乙醇的等温缓释过程均以Fick扩散为主,TSAC中的孔道扩散为其限速性环节。



(a) TSAC60; (b) TSAC75; (c) TSAC90

图7 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭负载的 β -苯乙醇的等温释放动力学拟合

Fig.7 Isothermal release kinetics fitting of tobacco straw activated carbon loaded with β -phenylethanol at the three prepared times

表4 3种活化时间下的烟草秸秆活性炭负载的 β -苯乙醇的等温释放动力学模型参数

Table 4 Isothermal release kinetics model parameters of tobacco straw activated carbon loaded with β -phenylethanol at the three activation times

活性炭	零级动力学模型		一级动力学模型		Higuchi动力学模型		Korsmeyer-Peppas动力学模型		
	k_4	R^2	k_5	R^2	k_6	R^2	k_7	R^2	n
TSAC60	1.34	0.309 4	0.017	0.501 2	6.92	0.915 9	11.01	0.979 7	0.34
TSAC75	2.20	0.362 0	0.037	0.694 8	11.30	0.933 7	17.38	0.987 0	0.35
TSAC90	2.97	0.252 3	0.074	0.808 6	15.37	0.907 4	25.62	0.991 0	0.32

注: k_4 零级释放速率常数; k_5 一级释放速率常数; k_6 Higuchi释放速率常数; k_7 Korsmeyer-Peppas释放速率常数; n 扩散常数。

2.4 TSAC的孔隙结构与吸附缓释性能间的关系分析

由表5可知, 活性炭对 β -苯乙醇吸附平衡时的吸附率与微孔面积、微孔率呈现正相关, 相关系数(r)分别为0.98和1.00。结合吸附率变化趋势可知, 微孔结构越丰富, 活性炭吸附平衡时的吸附量就越高。 β -苯乙醇的释放率与微孔面积、微孔率呈现负相关, r 分别为-0.97和-1.00; β -苯乙醇的释放率与介孔面积呈现正相关($r=0.96$)。 β -苯乙醇脱附活化能与微孔面积、微孔率呈正相关, r 分别为0.98和1.00, 这也与TG/DTG及热释放动力学分析结果一致, 微孔含量越高, 活性炭负载的 β -苯乙醇脱附所需活化能就越高, 释放率就越低。

表5 TSAC的孔隙结构与吸附缓释性能间的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between pore structure and adsorption and sustained release properties of tobacco straw activated carbon

吸附缓释性能	相关系数			
	比表面积	微孔面积	介孔面积	微孔率
β -苯乙醇吸附率	0.18	0.98	-0.95	1.00*
β -苯乙醇释放率	-0.14	-0.97	0.96	-1.00**
β -苯乙醇脱附活化能	0.19	0.98	-0.95	1.00*

注: “*”“**”分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。

3 结论与讨论

本研究以烟草废弃秸秆为碳源, 通过热解活化

法制备了3种烟草秸秆活性炭, 这3种活性炭孔隙结构有所差异, 其中微孔孔径随活化时间的增加, 进一步扩大并向介孔或大孔转变, 微孔率逐渐降低, 这与李春阳等^[22]制备紫茎泽兰基活性炭及陆云婷等^[23]制备木质素基活性炭的研究结果一致。3种活性炭对 β -苯乙醇的负载均以物理吸附为主, 准一级动力学模型更好地描述了活性炭对 β -苯乙醇的吸附过程, 即外部传质阻力对吸附过程起主要控制作用。TSAC60吸附平衡时 β -苯乙醇的吸附率为101.49%, 其吸附性能明显优于其他2种活性炭的。

基于热重技术的非等温释放分析结果显示, β -苯乙醇负载至活性炭后热稳定性明显提高, 3种活性炭负载的苯乙醇的热稳定性差异较大, β -苯乙醇@TSAC60达最大失重速率时的温度最高, 为217 °C, 明显高于其他2种的, 且 β -苯乙醇@TSAC60的失重温度区间较宽, 这表明TSAC60对 β -苯乙醇具有最好的缓释效果, 可能是由于其具有更高比例的微孔结构, 特别是孔径略大于 β -苯乙醇香料分子直径(0.802 nm)的微孔, 相邻孔壁的势能场叠加, 使得吸附力更强。非等温干燥动力学分析结果显示, Page模型可较好地描述 β -苯乙醇的非等温热释放过程, 3种活性炭中苯乙醇的脱附活化能均小于20 kJ/mol, 表明3种活性炭对于 β -苯乙醇的吸附过程均属于物理吸附。

等温释放动力学结果表明, 在室温条件下活性

炭对 β -苯乙醇的释放过程均更符合Korsmeyer-Peppas模型,且均以Fick扩散为主,与非等温干燥动力学结果一致,活化能越低的活性炭,释放率越高,TSAC60负载的 β -苯乙醇的释放更缓慢且稳定。与文献[13-14,24-25]报道的各类活性炭相比,TSAC均具有较好的负载能力和缓释效果,表明所制备出的烟草秸秆活性炭可以作为优良的多孔吸附材料和缓释材料应用于挥发性香料的贮存和控释。

相关性分析结果显示,活性炭负载 β -苯乙醇的性能主要受微孔结构的影响,吸附量、释放率及脱附活化能均与微孔率呈显著相关,且微孔结构越丰富,活性炭吸附平衡时的吸附量就越高,这与崔倩等^[26]的研究结论相似。

参考文献:

- [1] BAE Y S, SNURR R Q. Development and evaluation of porous materials for carbon dioxide separation and capture[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(49): 11586-11596.
- [2] 刘宇航,周珠贤,江黎明,等. 氨基修饰的铝基金属有机框架材料对香料的吸附和缓控释[J]. *中国科学:化学*, 2019, 49(4): 607-612.
- [3] ZHANG B, HUANG J X, LIU K X, et al. Biocompatible cyclodextrin-based metal-organic frameworks for long-term sustained release of fragrances[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(43): 19767-19777.
- [4] 丁莎,邓婷,崔雨琪,等. 基于介孔二氧化硅微球的挥发性香料负载和缓释研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(1): 18-25.
- [5] 何嘉杰,朱保昆,吴家灿,等. H β 分子筛表面改性对香叶基丙酮香料吸附力的影响[J]. *离子交换与吸附*, 2017, 33(5): 463-471.
- [6] 张劲斌,罗英涛,王芳平,等. 氧化石墨烯/沥青焦复合活性炭孔结构与性能评价研究[J]. *炭素技术*, 2020, 39(6): 59-63.
- [7] 梁森,张明建,鲁端峰,等. 热解温度对竹粉炭理化结构及燃烧性能的影响[J]. *化工进展*, 2020, 39(1): 278-286.
- [8] 崔雨琪,邓婷,丁莎,等. 聚乳酸-活性炭-异戊酸乙酯复合膜的制备及其缓释性能[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(6): 664-669.
- [9] 平丹,黄思光,张冠铭,等. 废旧轮胎热解炭资源化利用研究进展[J]. *轻工学报*, 2022, 37(6): 119-126.
- [10] 谢腾,赵立欣,姚宗路,等. 农业生物质与塑料共热解技术进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(10): 5306-5315.
- [11] 王明锋,熊智勇,刘娟,等. β -苯乙醇在不同类型多孔材料上的脱附活化能[J]. *中国烟草学报*, 2014, 20(2): 34-38.
- [12] 陈功,武煜翔,卢真保,等. 苯乙醇和茴香醚在含Fe蚕沙基生物碳材料的储香与释放性能研究[J]. *化工学报*, 2020, 71(12): 5628-5635.
- [13] 李智宇,者为,周叶燕,等. 葡萄糖改性对活性炭吸附与脱附 β -苯乙醇性能的影响[J]. *中国烟草学报*, 2018, 24(1): 1-5, 13.
- [14] 常春,王胜利,郭景阳,等. 不同热解条件下合成生物炭对铜离子的吸附动力学研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(7): 2491-2502.
- [15] 杨静,沈健,石薇薇. Cu- β /SBA-15的吸附脱硫性能及吸附动力学[J]. *精细化工*, 2017, 34(10): 1153-1160.
- [16] CHEN D Y, ZHANG Y, ZHU X F. Drying kinetics of rice straw under isothermal and nonisothermal conditions: a comparative study by thermogravimetric analysis[J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(7): 4189-4194.
- [17] 范浩,马培勇,张俊,等. 高水分毛竹废弃物非等温干燥特性及其动力学[J]. *可再生能源*, 2019, 37(12): 1745-1750.
- [18] 陈婉毓,陈葵,纪利俊,等. 海藻酸钠/脲醛树脂复合微胶囊的缓释动力学特性[J]. *精细化工*, 2019, 36(11): 2267-2272, 2335.
- [19] 周红军,林粤顺,李舒静,等. 席夫碱锌改性介孔硅对毒死蜱的吸附与缓释[J]. *化工学报*, 2018, 69(5): 2272-2281.
- [20] 李兵,薛建明,许月阳,等. SO₂在活性炭上的吸附平衡、动力学及热力学研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(10): 2100-2106.
- [21] 张哲冷,杨正红. 微介孔材料物理吸附准确性分析的理论与实践[J]. *催化学报*, 2013, 34(10): 1797-1810.
- [22] 李春阳,张利波,夏洪应,等. H₃PO₄活化紫茎泽兰制备活性炭及其性能研究[J]. *材料导报*, 2016, 30(14): 49-52.
- [23] 陆云婷,倪明江,吴荣兵,等. KOH活化对焦炭孔隙结构以及导电特性影响[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(7): 1448-1452.
- [24] ZHANG J S, FANG Z H, WANG L, et al. Comparative analysis of adsorption and release properties of β -phenylethanol on two kinds of activated carbon[J]. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2023, 18(3): 961-974.
- [25] 卢真保,胡武,孙胜南. β -苯乙醇-活性炭颗粒的制备及其卷烟滤嘴加香效应的研究[J]. *山东化工*, 2018, 47(12): 22-24.
- [26] 崔倩,王岸楠,陈再明,等. 液化残渣基CO₂吸附剂的制备与性能优化[J]. *化工进展*, 2023, 42(12): 6620-6630.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正