

吸附气相甲醛活性炭的选型研究*

林莉莉¹ 邱兆富¹ 韩晓琳¹ 叶兴长² 刘友良² 张 巍^{1#} 应维琪¹

(1. 华东理工大学资源与环境工程学院, 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237;

2. 上海兴长活性炭有限公司, 上海 201803)

摘要 随着室内空气甲醛污染问题的日益凸显, 便捷的活性炭甲醛吸附技术具备了巨大的应用前景。虽然已有大量文献报道了活性炭吸附空气中甲醛的有效性, 但由于在实际应用中不同类型活性炭对甲醛的吸附性能差异较大, 故而相应的选型研究仍有进一步开展的必要。通过静态吸附和动态穿透实验, 对椰壳、果壳、煤质和木质 4 种材质的活性炭进行了气相甲醛吸附研究。结果表明, 活性炭对甲醛的吸附符合 Freundlich 等温吸附方程。穿透实验中, 椰壳炭表现出了最好的吸附性能, 实际吸附容量和吸附容量利用率分别可达到 9.88 mg/g 和 84.37%。在一定粒径范围内, 小颗粒的活性炭具有较高的吸附能力, 但粒径过小也会降低吸附效果, 在本研究考察条件下, 20~40 目的椰壳炭是吸附甲醛的最佳选择。

关键词 活性炭 甲醛 炭型 粒径 吸附容量

Selecting activated carbon for removing formaldehyde from air LIN Lili¹, QIU Zhao-fu¹, HAN Xiaolin¹, YE Xingchang², LIU Youliang², ZHANG Wei¹, YING Weichi¹. (1. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237; 2. Shanghai Xingchang Activated Carbon Co., Ltd., Shanghai 201803)

Abstract: With the popularity of interior decoration, formaldehyde has become an important source of indoor pollution. Although the feasibility of formaldehyde removal by activated carbon has been proven in many publications, but selecting activated carbon for removing formaldehyde from air is still meaningful due to the great difference in capacities of different type of activated carbons for formaldehyde. The static adsorption and dynamic breakthrough experiments were conducted with four types of activated carbons (coconut shell, fruit shell, coal and wood based carbons) to investigate their removal capacities for formaldehyde from air. The results showed that activated carbon adsorption of formaldehyde fit the Freundlich isotherm equation. Coconut shell based carbon showed best adsorptive capacity in the breakthrough experiment (its actual adsorptive capacity and adsorptive capacity utilization reached 9.88 mg/g and 84.37% respectively). The smaller particle size of activated carbon results in higher adsorption capacity, but too small particle size can also lead to the decline of adsorptive capacity. In this study, coconut shell based carbon of 20-40 mesh size has the best capacity for removing formaldehyde from air.

Keywords: activated carbon; formaldehyde; carbon type; particle size; adsorptive capacity

随着我国经济的飞速发展, 各类室内装修越来越普及, 据 2012 年的统计, 我国建筑装饰行业的总产值达到了 2.63 万亿元, 贡献了国家年度 GDP 的 5.06%^[1]。但大量的建筑装修也导致了室内空气污染问题的日益加剧, 据统计有 70% 的病症与室内污染相关, 90% 以上的幼儿白血病都是由室内的污染气体所引起的^[2]。可以认为室内空气污染是继“煤烟型”、“化学烟雾型”污染之后的第三个标志性的空气污染时期。常见的室内空气污染物包括甲醛、苯系物、氨气等, 而甲醛因来源广泛、毒性

大、污染时间长等已成为首要的室内污染物, 其中美国职业卫生阈值中将甲醛列为 2A 类化合物——可疑人类致癌物^[3]。目前对室内甲醛的处理方法主要有空气交换法、植物净化法、吸附法和化学法, 较处理室内甲醛的其他技术而言, 吸附法具有简便易行、效果良好、成熟可靠等优势, 故得到了普遍的推广应用。颗粒活性炭(GAC)作为应用最为广泛的常用吸附剂, 凭借其巨大的比表面积和丰富的孔隙结构, 对甲醛具有良好的吸附性能, 在室内空气污染物防治领域已经得到了广泛的应

第一作者: 林莉莉, 女, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事大气环境污染控制研究。* 通讯作者。

* 上海市自然科学基金资助项目(No. 11ZR409400); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. WB1014038)。

用^[4-5]。室内低浓度甲醛以及工业上高浓度甲醛尾气的处理,均可采用活性炭吸附^[6-7]。

虽然活性炭对空气中甲醛的去除性能明显优于 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、分子筛等其他吸附剂^[8],然而不同材质的活性炭对甲醛的吸附性能不尽相同,这是由于不同活性炭具有不同的孔径分布和表面化学性质^[9-10]。有研究表明,椰壳炭中带有大量微孔,比较适合吸附小分子;用煤化程度比较低的褐煤和泥煤生产的活性炭带有比较多的中孔,较为适合吸附大分子及催化剂的添载^[11]。对空气中的甲醛这类小分子而言,椰壳炭的吸附效果可能要优于煤质炭^[12]。另一方面,活性炭的表面化学性质由炭表面含有的一些化学官能团所决定。含氮基团和含氧基团会对甲醛的吸附性能产生影响,当含酚羟基更多或氮碳比(N/C)更大时,活性炭对甲醛的吸附能力越好^[13]。除了以上两点之外,活性炭的颗粒粒径也对甲醛去除性能产生影响。董春欣^[14]通过颗粒活性炭与粉末活性炭吸附甲醛的对比研究,发现粉末活性炭的吸附量要低于颗粒活性炭。但有关活性炭粒径的大小对甲醛吸附性能所产生影响的研究,鲜有文献报道。本研究旨在通过静态吸附和动态穿透实验,评价颗粒活性炭的炭型和粒径等因素对气相甲醛的吸附性能的影响;通过测定不同材质的活性炭对气相甲醛的吸附容量,了解孔径分布等对活性炭吸附甲醛的性能影响,通过比较各种粒径活性炭颗粒在穿透实验中的性能,评价活性炭吸附气相甲醛的最佳粒径范围,以期对空气中甲醛的活性炭吸附技术应用开发提供支持。

1 材料与方法

1.1 材料

甲醛、乙酰丙酮、乙酸铵、盐酸、氢氧化钠、碘、碘化钾、碘酸钾、淀粉溶液、硫代硫酸钠、无水硫酸铜等,均为分析纯;采用的活性炭炭型有:椰壳炭Ⅰ、椰壳炭Ⅱ、木质炭、果壳炭和煤质炭,其中木质炭为化学活化法制得,而其余炭型均由物理活化法制得。

1.2 装置仪器

密闭实验箱 $0.75\text{ m} \times 0.75\text{ m} \times 1.0\text{ m}$; QC-2 型大气采样仪; 720 型紫外/可见分光光度计。

1.3 静态吸附实验

静态吸附容量实验流程如图 1 所示。一定量的 37% (质量分数) ~ 40% 的甲醛水溶液,经过进样口注入气密性良好的有机玻璃密闭箱体内部,通过风扇促进自然挥发,在 12 h 内形成浓度分布均匀的甲

醛气体。实验开始后,甲醛气体随着箱体顶部出气管经干燥管去除气体中的水分,再进入活性炭吸附柱进行吸附,吸附后的气体通过箱体上方的进气口回流至箱体中,形成封闭循环。取样测定时,将箱体上方的进气管连接至大气采样仪中,进行甲醛浓度检测。气体浓度采用乙酰丙酮分光光度法^[15]在 413 nm 下进行测定。实验条件如下:室温保持在 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$; 甲醛气体初始质量浓度为 $20\sim 65\text{ mg/m}^3$; 活性炭投加量选定在 0.5 g 左右,粒径大小为 $20\sim 40$ 目;以无水硫酸铜为干燥剂,蒸馏水为吸收液;气体流量为 0.5 L/min 。

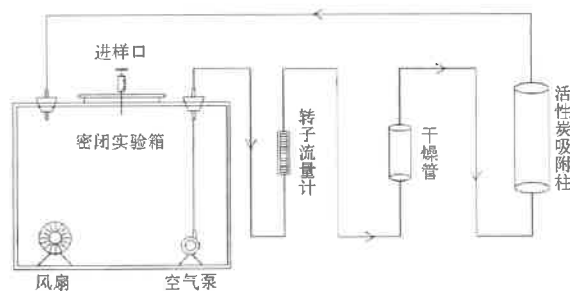


图 1 静态吸附实验流程

Fig. 1 The flow diagram of static adsorption experiments

甲醛的吸附容量计算见式(1):

$$q_e = (c_0 - c_e) \times V / M \quad (1)$$

式中: q_e 为活性炭吸附容量, mg/g ; c_0 为密闭箱内甲醛初始质量浓度, mg/m^3 ; c_e 为气体甲醛平衡质量浓度, mg/m^3 ; V 为密闭箱体体积大小, m^3 ; M 为活性炭用量, g 。

q_e 和 c_e 的关系采用 Freundlich 吸附等温模型进行拟合:

$$q_e = K_f c_e^{1/n} \quad (2)$$

式中: K_f 和 $1/n$ 为 Freundlich 方程常数,表征吸附剂对吸附质的吸附性能。

1.4 动态穿透实验

动态穿透装置主要包括 3 个关键部分:甲醛发生装置、活性炭吸附柱和甲醛吸收装置,如图 2 所示。甲醛发生装置位于恒温水浴箱中,空气经净化管后通过在一定浓度的甲醛溶液中鼓泡获得浓度较为恒定的甲醛气体,经干燥管后进入缓冲瓶,待浓度均匀后进入活性炭吸附柱,出气口的甲醛气体进入装有吸收液(蒸馏水)的甲醛吸收装置。炭型选择的动态穿透实验条件如下:室温保持在 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,活性炭投加量为 0.5 g 左右,进气甲醛质量浓度为 $34\sim 40\text{ mg/m}^3$,采样器流速为 1.0 L/min ,吸收液体积为 50 mL,采样时间为 5 min,停留时间为 $0.05\sim 0.17\text{ s}$ 。

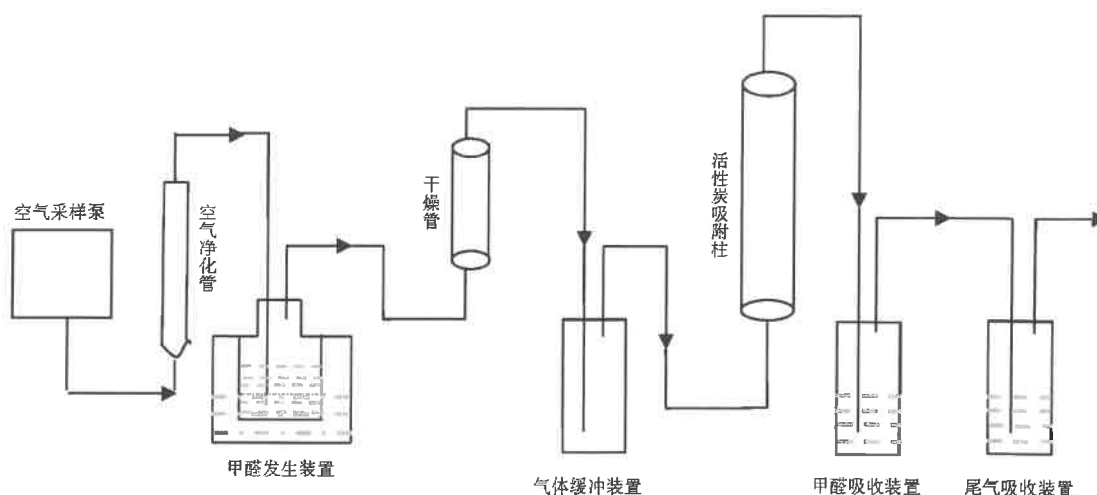


图2 动态穿透实验流程

Fig. 2 The flow diagram of breakthrough experiments

检测方法为乙酰丙酮分光光度法。

2 结果与讨论

2.1 活性炭的理化性质表征

一般认为活性炭的四氯化碳值在一定程度上说明了活性炭对气相小分子物质的吸附性能^[16]。从表1可知,木质炭的四氯化碳值最大,其次是椰壳炭和果壳炭,说明这几类炭型存在较为丰富的中微孔,对气相甲醛的吸附性能可能较好。然而除了活性炭孔隙结构之外,表面化学性质也对甲醛吸附性能具有影响。化学活化过程会造成活性炭表面官能团发生催化分解,改变活性炭表面化学性质,从而影响其对有机物的处理性能^[17]。所以化学活化法得到的木质炭虽然具备较高的四氯化碳值,也有可能会在甲醛吸附性能上逊于其他炭型。

表1 活性炭的四氯化碳值
Table 1 The carbon tetrachloride indicator for the activated carbon samples

炭型	四氯化碳值/%
椰壳炭 I	62.19
椰壳炭 II	52.50
果壳炭	62.17
煤质炭	44.35
木质炭	100.30

2.2 活性炭吸附甲醛的静态实验

2.2.1 接触时间对吸附容量的影响

为考察接触时间对活性炭甲醛去除性能的影响,在炭量为 0.5 g,活性炭粒径为 20~40 目条件下测定了椰壳炭 I、果壳炭、木质炭和煤质炭在 2、5、8、11 h 时对气相甲醛的吸附容量,如图 3 所示。随着接触时间的增加,活性炭对气相甲醛的吸附

容量逐渐上升,且上升幅度随着接触时间的增加逐渐缩小。当接触时间为 11 h 时,吸附容量达到最高,说明吸附反应达到了平衡,故将接触时间设定为 11 h。

2.2.2 炭型对吸附容量的影响

为考察不同炭型对活性炭吸附甲醛性能的影响,在炭量为 0.5 g,接触时间为 11 h,甲醛初始质量浓度为 20~65 mg/m³ 条件下对椰壳 I、果壳炭、煤质炭和木质炭这 4 种不同材质的活性炭进行了气相甲醛静态吸附实验。图 4 显示了甲醛平衡浓度与吸附容量的关系符合 Freundlich 吸附等温方程。椰壳炭 I 与果壳炭的 Freundlich 吸附等温线相近,在甲醛平衡质量浓度为 40 mg/m³ 的情况下,椰壳炭 I、果壳炭、煤质炭和木质炭的平衡吸附容量分别为 12.46、13.33、9.03、7.17 mg/g。同时从表 2 可见,4 种活性炭的等温线斜率 1/n 均在 0.5~2.0,说明活性炭吸附气相甲醛反应较为容易进行。从表 1 可知,椰壳炭 I 和果壳炭之所以对甲醛表现出较好的吸附性能,是由于两者微孔较多。然后具有最高四氯化碳值的木质炭却是吸附甲醛性能最低的炭型,其原因可能有如下两点:第一,活性炭表面化学性质的影响。甲醛作为极性小分子有机物,其与活性炭的吸附反应更多地是发生在活性炭表面官能团上,而四氯化碳是非极性有机物,吸附以范德华力为主要作用力^[18]。磷酸化学活化过程中可能会降低酚羟基和含氮基团等活性炭表面化学基团的数量,这将导致活性炭对甲醛吸附性能的降低。第二,吸附两种化合物的孔径范围也略有差异。四氯化碳的分子直径

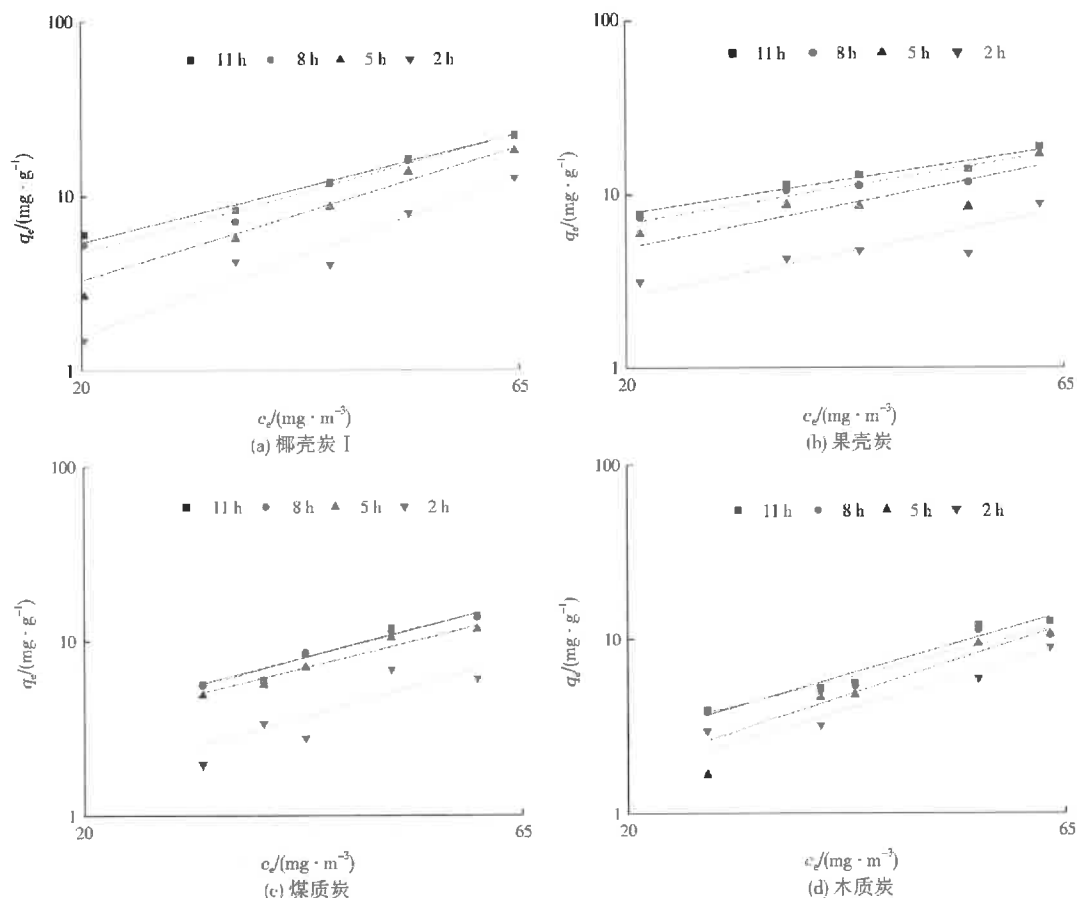


图3 接触时间对吸附容量的影响
Fig. 3 Effect of contacting time on adsorption isotherms of formaldehyde

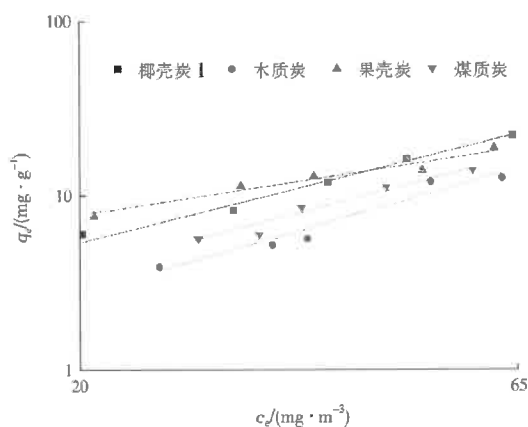


图4 4种活性炭对甲醛的吸附等温线
Fig. 4 Adsorption isotherms of 4 active carbon samples for formaldehyde

为 $0.60 \text{ nm}^{[19]}$ (分子量为 153.8), 而甲醛分子直径为 $0.45 \text{ nm}^{[20]}$ (分子量为 30.0)。按照立体效应, 分子直径应和表征的活性炭孔径之间呈现一定的倍数关系 ($1.3 \sim 6.0$ 倍)^[21], 则四氯化碳值可能更多表征了一部分大于 2 nm 的中孔数量。一般以材质划分, 木质炭的中大孔确比其他材质的活性炭丰富, 故

其较高的四氯化碳值并不能代表其能更好地吸附分子尺寸更小的甲醛。本研究中, 椰壳炭 I 与果壳炭对甲醛的吸附效果较好, 煤质炭次之, 而化学活化的木质炭的吸附能力较差。

2.3 活性炭吸附甲醛的穿透实验

2.3.1 炭型选择对吸附性能的影响

为评价不同种类活性炭对气相甲醛的实际处理性能, 在炭量为 0.5 g , 活性炭粒径为 $20 \sim 40$ 目, 甲醛进气质量浓度为 $34 \sim 40 \text{ mg/m}^3$, 气体流速为 1.0 L/min 条件下进行了 4 种活性炭的穿透实验。从图 5 可以得出, 椰壳炭 I 和果壳炭的穿透曲线上升趋势平衡, 而木质炭的穿透曲线初期上升速度最快, 4 种活性炭吸附性能的优劣排序为: 椰壳炭 I > 果壳炭 > 煤质炭 > 木质炭。可以看出在穿透实验中, 椰壳炭体现出了比果壳炭更好的性能, 除此之外, 其他几类活性炭的性能同静态吸附得到的吸附容量大小顺序一致。

由静态吸附实验结果得出的 Freundlich 等温线可知, 以穿透实验中椰壳炭 I、果壳炭、煤质炭

表2 4种活性炭穿透实验运行结果
Table 2 Results of adsorptive experiment runs of the 4 active carbon samples

炭型 (20~40目)	加炭量/g	甲醛进气质量浓度 /(mg·m ⁻³)	空床停留时间/s	实际吸附量 ¹⁾ /mg		K_f /(mg ^{1-1/n} ·L ^{1/n} ·g ⁻¹)
				$c/c_{in}=0.10$	$c/c_{in}=0.50$	
椰壳炭 I	0.501	37.65	0.058	1.31	4.95	143.4
果壳炭	0.503	34.46	0.060	1.06	3.97	838.3
煤质炭	0.502	39.96	0.061	0.80	3.01	86.5
木质炭	0.504	36.14	0.170	0.41	2.31	41.0

炭型 (20~40目)	1/n	相关系数 R^2	理论吸附容量 ³⁾ /(mg·g ⁻¹)	吸附容量利用率 ⁴⁾ /%	
				$c/c_{in}=0.10$	$c/c_{in}=0.50$
椰壳炭 I	1.21	0.99	11.71	22.33	84.37
果壳炭	0.75	0.92	11.74	17.95	67.23
煤质炭	1.26	0.96	9.04	17.63	66.33
木质炭	1.40	0.91	6.27	12.97	73.10

注: ¹⁾指以穿透曲线的积分面积计算得出的穿透实验中活性炭对甲醛的实际吸附量; ²⁾穿透实验中吸附柱出气甲醛浓度(c)和进气甲醛浓度(c_{in})的比值; ³⁾指以各次穿透实验的进气浓度作为平衡浓度,由各炭型相对应的 Freundlich 等温式计算得到的理论吸附容量; ⁴⁾由实际吸附量计算活性炭的实际吸附容量,将其除以理论吸附容量得到的百分比。

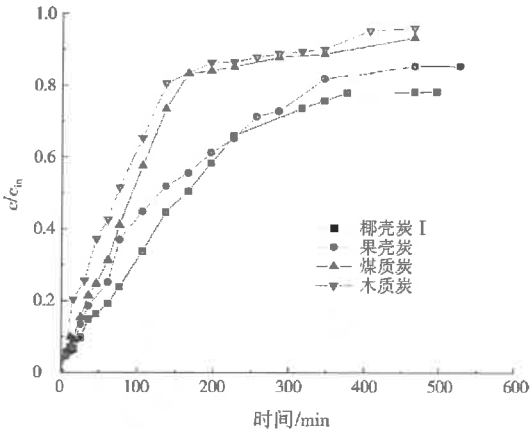


图5 4种活性炭穿透曲线

Fig. 5 Formaldehyde breakthrough profiles of 4 adsorbents and 木质炭的进气浓度(表2所示)作为平衡浓度时,该4种活性炭对甲醛的理论平衡吸附容量分别为11.71、11.74、9.04、6.27 mg/g。当 $c/c_{in}=0.10$ 时,4种活性炭的动态吸附容量利用率均较低,分别为22.33%、17.95%、17.63%和12.97%。但当 c/c_{in} 提升到0.50时,4种活性炭的吸附容量利用率则分别为84.37%、67.23%、66.33%和73.10%,均有大幅度的提升。这说明在放宽出气甲醛浓度上限标准的情况下,活性炭对甲醛的吸附容量可被高度利用,其中吸附性能最高的椰壳炭 I 的实际吸附容量达到了9.88 mg/g,吸附容量利用率达84.37%。在4种炭型中椰壳炭 I 的吸附容量及其吸附容量利用率均较高,是吸附甲醛的最佳选择;而吸附容量最低的木质炭,在 $c/c_{in}=0.50$ 时吸附容量利用率高于果壳炭和煤质炭。这是由于木质炭中孔较为丰富,而中大孔在甲醛吸附过程中仅仅作通道作用,可

使甲醛以更快的速度进入内表面,从而更快地达到平衡^[22]。

2.3.2 粒径大小对吸附性能的影响

活性炭粒径大小往往会对其实际甲醛处理性能产生影响,故而以椰壳炭 II 为例,在炭量为0.5 g,甲醛进气质量浓度为39~48 mg/m³,气体流速为1.0 L/min 条件下考察了6种不同粒径时的气相甲醛穿透曲线。从图6可知,20~40目与12~40目时曲线的上升趋势最为平缓,8~20目、6~12目次之,而4~8目和原粒径的上升趋势较快。若以 $c/c_{in}=0.70$ 计,20~40目、12~40目、8~20目的有效吸附时间均大于200 min,而6~12目、4~8目和原粒径在200 min内就已基本失效。表3列出了相应穿透实验中的甲醛吸附量,随着粒径的减小,活性炭对甲醛的吸附性能呈增强的趋势。这是由于对于一定质量的活性炭,外部扩散速度与颗粒直径成反比,故粒

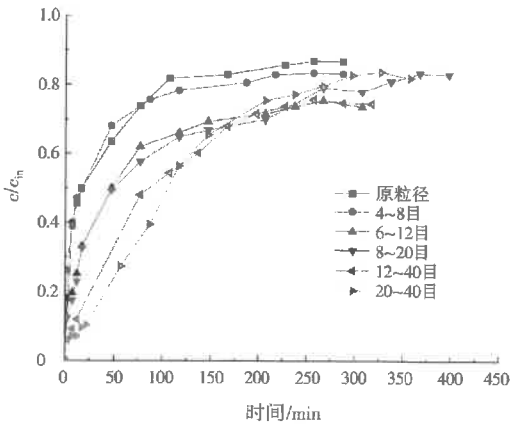


图6 不同粒径活性炭对甲醛的穿透曲线

Fig. 6 Formaldehyde breakthrough profiles of adsorbents with different particle size

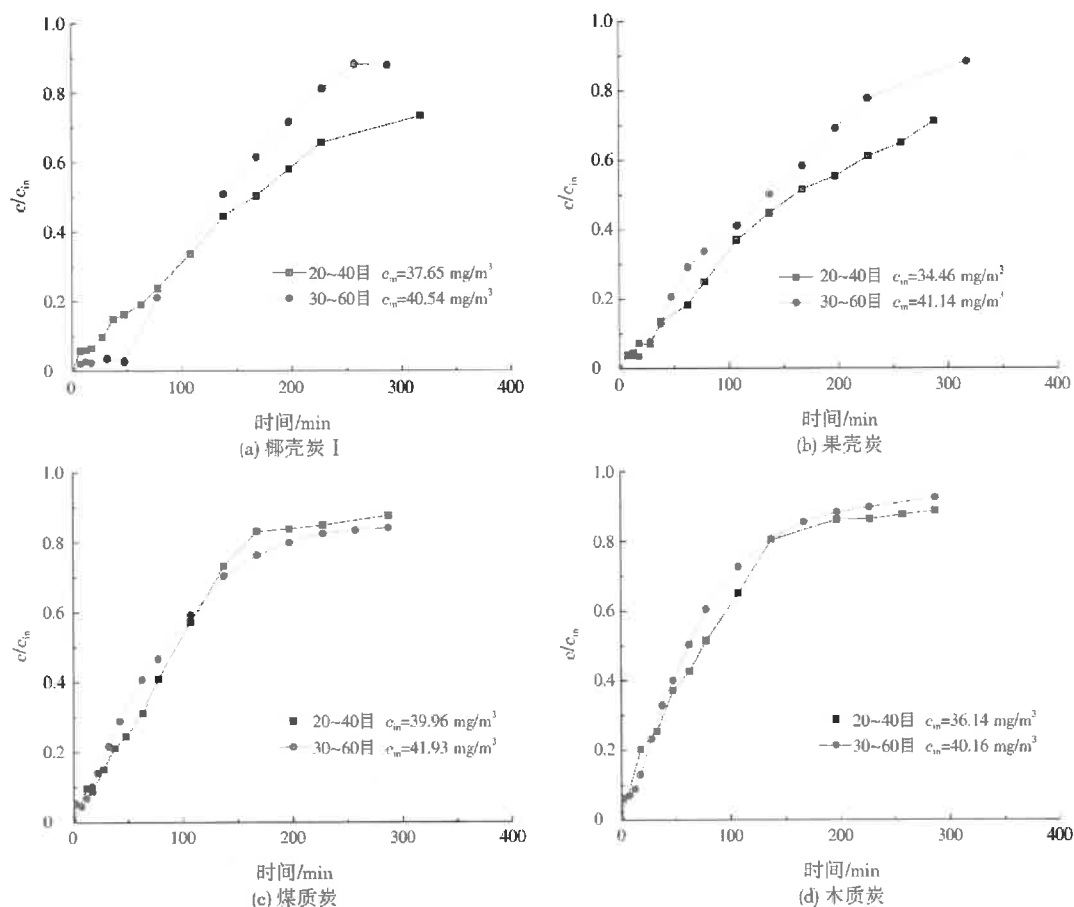


图7 20~40、30~60目粒径的4种活性炭穿透曲线
Fig. 7 Formaldehyde breakthrough profiles of 4 active carbon of 20-40 mesh and 30-60 mesh

表3 不同粒径活性炭的甲醛吸附容量
Table 3 The adsorptive capacities of adsorbents with different particle size

粒径大小	c_m /($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	停留时间 /s	270 min时吸附容量 /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
原粒径 (5 000~8 000 μm)	39.59	0.062	5.01
4~8目 (2 360~4 750 μm)	47.16	0.062	5.78
6~12目 (1 400~3 350 μm)	47.81	0.057	9.03
8~20目 (830~2 360 μm)	46.12	0.052	9.45
12~40目 (380~1 400 μm)	46.79	0.056	11.08
20~40目 (380~830 μm)	42.60	0.062	10.87

径越小,扩散速度越快。同时也发现,12~40目的甲醛吸附容量却要略高于20~40目,这可能是由于气相分子的外部扩散速度还与气体浓度成正比,故而在平均粒径相近的情况下会出现这种外部浓度高,吸附性能更好的现象。但从图6可以明显看出,在穿透初期(100 min内),20~40目对甲醛的吸附性

能还是要明显优于12~40目。

虽然小颗粒的活性炭具有较大的比表面积,但活性炭的粒径并非越小越好。在炭量为0.5 g,甲醛进气质量浓度为34~42 mg/m^3 ,气体流速为1.0 L/min条件下将20~40、30~60目活性炭的气相甲醛穿透曲线进行了比较分析,结果见图7。在初始阶段,30~60目的活性炭表现出较好的吸附性能,若以 $c/c_m=0.05$ 为穿透点,椰壳炭I和果壳炭的穿透时间分别为50、20 min;煤质炭次之,穿透时间为10 min;而木质炭上升趋势较快,5 min之内已达穿透点。而20~40目的4种活性炭在实验一开始时便已穿透。但随着时间的延长,20~40目活性炭便体现出了最佳的吸附效果。甲醛浓度与活性炭的吸附容量呈正相关,4种活性炭在各自粒径为20~40目实验时甲醛浓度均低于30~60目,但20~40目的活性炭对甲醛的吸附容量仍均略大于30~60目。

在实验进行230 min时,椰壳炭I、果壳炭、煤质炭和木质炭在粒径为30~60目时的吸附量分别为

11.53、9.63、8.08、6.98 mg/g;在20~40目时的吸附量则略高,分别为11.68、9.76、8.41、7.00 mg/g。造成以上现象的原因可能是由于活性炭粒径过小后,活性炭吸附床中气体传质效率变差,故而实际应用中对于活性炭颗粒的选取具有一定的下限。

3 结论

(1) 活性炭对气相甲醛具备良好的吸附性能,符合Freundlich等温线模型。静态吸附容量实验表明,以40 mg/m³作为平衡质量浓度时,椰壳炭I、果壳炭、煤质炭和木质炭的平衡吸附容量分别为12.46、13.33、9.03、7.17 mg/g。

(2) 穿透实验表明,椰壳炭是实际吸附甲醛较为理想的炭型。其实际吸附容量和吸附容量利用率分别可达到9.88 mg/g和84.37%。

(3) 四氯化碳值并不能作为活性炭吸附甲醛性能的准确评判指标,活性炭对甲醛的吸附受到了其孔径分布和表面化学性质两方面的综合影响。

(4) 20~40目活性炭是吸附甲醛较为理想的粒径。在类型相同的情况下,小颗粒的活性炭对甲醛表现出了较好的吸附效果。但粒径并非越小越好,在本实验条件下,20~40目的活性炭对甲醛的吸附性能要优于30~60目。

参考文献:

- [1] 中国建筑装饰协会行业发展部. 2012年中国建筑装饰行业发展报告[EB/OL]. (2013-04-15) [2013-08-26]. <http://jiaju.people.com.cn/n/2013/0415/c151264-21138565.html>.
- [2] World Health Organization. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 88. Formaldehyde, 2-butoxyethanol and 1-tert-butoxy-2-propanol[M]. Lyon: World Health Organization, 2006.
- [3] World Health Organization. Concise international chemical assessment document[M]. Geneva: World Health Organization, 2002.
- [4] LONG C, LI Y, YU W, et al. Removal of benzene and methyl ethyl ketone vapor: comparison of hypercross linked polymeric adsorbent with activated carbon[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 203/204: 251-256.
- [5] SALIH H H, PATTERSON C L, SORIAL G A, et al. The fate and transport of the SiO₂ nanoparticles in a granular activated carbon bed and their impact on the removal of VOCs[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 193: 95-101.
- [6] LI J, LI Z, LIU B, et al. Effect of relative humidity on adsorption of formaldehyde on modified activated carbons[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, 16(6): 871-875.
- [7] YOSHIKA S, ATSUSHI N. Removal of formaldehyde from indoor air by passive type air-cleaning materials[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(11): 2001-2007.
- [8] 曾立伟. 活性炭的改性及其对甲醛气体脱除性能的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [9] 黄流雅, 胡娟, 张巍, 等. 颗粒活性炭吸附去除水中三氯乙烯的研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(9): 34-39.
- [10] 梅凡民, 傅成诚, 杨青莉, 等. 活性炭表面酸性含量官能团对吸附甲醛的影响[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(3): 18-22.
- [11] 徐海云. 室内空气中甲醛清除材料的研制及评测[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [12] WEN Q B, LI C, CAI Z H, et al. Study on activated carbon derived from sewage sludge for adsorption of gaseous formaldehyde[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 942-947.
- [13] SONG Y, QIAO W M, YOON S H, et al. Removal of formaldehyde at low concentration using various activated carbon fibers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 106(4): 2151-2157.
- [14] 董春欣. 改性活性炭吸附室内甲醛影响因素研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2008.
- [15] GB/T 15516—1995, 乙酰丙酮分光光度法[S].
- [16] GB/T 7702.13—1997, 煤质颗粒活性炭试验方法 四氯化碳吸附率的测定[S].
- [17] 司崇殿, 郭庆杰. 活性炭活化机理与再生研究进展[J]. 中国粉体技术, 2008, 14(5): 48-52.
- [18] 王文超. 改性活性炭吸附甲醛的研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2007.
- [19] BRANTON P J, SING K S W, WHITE J W. Adsorption of carbon tetrachloride and nitrogen by 3.4 nm pore diameter siliceous MCM-41[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions, 1997, 93(13): 2337-2340.
- [20] 杨燕, 李永华, 罗忠富, 等. 聚丙烯复合材料气味吸附剂的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2012, 41(3): 30-33.
- [21] 张巍, 应维琪, 常启刚, 等. 水处理活性炭吸附性能指标的表征与应用[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 289-294.
- [22] 汤进华, 梁晓晖, 龙东辉, 等. 活性炭孔结构和表面官能团对吸附甲醛性能影响[J]. 炭素技术, 2007, 26(3): 21-25.

编辑: 陈泽军 (修改稿收到日期: 2013-09-28)

(上接第18页)

(2) 本次PM₁₀手工采样分析与连续监测系统比对测试研究工作比较完备, 测试现场PM₁₀平均质量浓度变化范围(36.6~267.7 μg/m³)较大, 比对测试结果的代表性较强。因此, PM₁₀连续监测系统“参比方法比对测试”评价指标设置建议已经被我国组织编制的《环境空气颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})连续自动监测系统技术要求及检测方法》(HJ 653—2013)采纳, 作为该项标准的一部分内容发布实施。

参考文献:

- [1] HJ/T 193—2005, 环境空气质量自动监测技术规范[S].
- [2] HJ/T 194—2005, 环境空气质量手工监测技术规范[S].

编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2013-08-09)