

活性炭无纺布表面污染物的吸附特性研究

刘艳华, 袁 琪, 李荫堂, 张水香

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 实验研究了活性炭无纺布表面 CO_2 和挥发性有机化合物(VOCs)的吸附特性. 研究表明:在低气流速度条件下,活性炭无纺布能够很好地吸附空气中的 CO_2 , 系统的能耗也低;环境温度对活性炭无纺布表面 CO_2 吸附效率的影响不大,但低空气湿度有利于 CO_2 的吸附;在实验条件下,活性炭无纺布表面 VOCs 的吸附效率与迎风气流中 VOCs 的体积分数无关,与污染源的种类有关;低气流速度有利于 VOCs 的吸附;虽然增加吸附层的层数既有利于活性炭无纺布表面的 CO_2 吸附,也有利于 VOCs 吸附,但实验中当吸附层增加到 3 层以上时,吸附效率随吸附厚度的增加而提高的效果不再明显,而吸附系统的阻力却迅速增大.

关键词: 活性炭;无纺布;吸附特性;污染物

中图分类号: TU834.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)11-1268-05

Adsorption of Air Pollutants on Non-Woven Fabric with Activated Carbon

Liu Yanhua, Yuan Qi, Li Yintang, Zhang Shuixiang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The adsorption behavior of CO_2 and volatile organic compounds (VOCs) on a non-woven fabric loaded with activated carbon was investigated. The experimental results show that lower air velocity is helpful to the adsorption of CO_2 . The effect of temperature on CO_2 adsorption is small, but lower relative humidity is beneficial to the adsorption of CO_2 . The adsorption efficiency of VOCs on the non-woven fabric is independent of the concentration of VOCs at windward side while it is dependent on the type of pollutant sources. And lower air velocity is helpful to the adsorption of VOCs. Increasing the number of adsorption layers can result in an increase in the absorption efficiency of the non-woven fabric for both CO_2 and VOCs while it also increases the resistance of the cleaning system. The absorption efficiency does not increase anymore when the number of the layers is over 3 in the study. Then the suitable thickness of adsorption layer is of significance for high absorption efficiency and low energy cost.

Keywords: non-woven fabric; activated carbon; adsorption; pollutant

据统计,现代人平均有 80%~90% 以上的时间在室内度过,在人员稠密的区域, CO_2 含量经常是一个主要关注的问题.国外大量文献^[1-3] 经过调查、测量后指出,在人员密度高、安装空调、通风效果不好的地方,如商场、教室、列车、餐馆、卧室等,常常出现 CO_2 含量超标的现象,严重的甚至会超标 5 倍以上^[3].国内一些学者也对北京、重庆、上海等地进行了相关的调查^[4,5],结果发现,在这些城市的人员密

集地区同样存在着 CO_2 含量偏高、室内空气质量下降的情况.另外,随着建筑物密闭性的提高和有机合成材料在室内装饰及设备用具方面的广泛应用,挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)^[6] 气体在室内的散发也严重恶化了室内的空气品质.

吸附是气体净化中应用较多的技术,最常见的吸附剂是活性炭^[7].活性炭无纺布是较为新型的吸

附材料,以优质粉状活性炭为吸附材料,采用高分子粘结材料将其载附于无纺布基体之上,具有易于成型、吸附性能好等优点^[8]。目前,国内在活性炭无纺布的性能方面的研究还远远不够,开展该方面的研究是非常必要的。本文实验研究了 CO₂ 和 VOCs 在活性炭无纺布表面的吸附特性,也研究了环境因素对活性炭无纺布吸附特性的影响,指出了活性炭无纺布在空气净化方面应用时要注意的问题。

1 实验系统与数据处理

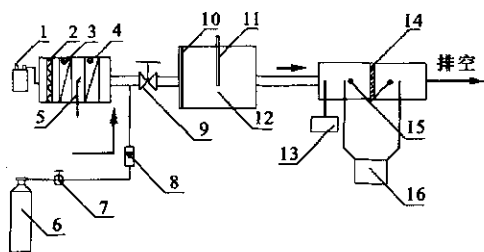
1.1 实验系统

吸附系统原理如图 1 所示,该系统位于某空调环境室中,环境室具有独立的空调系统,可调节环境室内的空气温度、湿度等。

吸附层材料为活性炭无纺布,其特性参数如表 1 所示。吸附层上、下游气流中的 CO₂ 含量、气体的温、湿度和吸附阻力等参数采用德国生产的 testo 350M/XL-454 型测量系统测量,气流速度采用热线式风速仪测量。吸附层上、下游气流中总的挥发性有机化合物(TVOCs)体积分数采用美国生产的 PGM-30 型便携式光离子化 TVOCs 检测仪测量。

表 1 活性炭无纺布的特性参数

附着材料	w(C)/ %	厚度/ mm	质量/ g·m ⁻²	网孔尺寸/ 目	产地
粉状活性炭	50	1	45	200	广州



1: 调压变压器; 2: 空气过滤器; 3: 加热盘管; 4: 冷却盘管; 5: 加湿器; 6: CO₂ 钢瓶; 7: 减压阀; 8: 转子流量计; 9: 流量调节阀; 10: 粗效过滤器; 11: 温湿度探头; 12: 气体混合室; 13: 热线风速计; 14: 吸附层; 15: 浓度测量孔; 16: 压差探头

图 1 CO₂ 吸附实验装置示意图

1.2 数据处理

活性炭无纺布上、下游气流中污染物的体积分数之差与活性炭无纺布上游气流中污染物的体积分数相比为吸附材料对污染物的吸附效率,公式如下

$$\eta = \frac{\Delta\varphi}{\varphi_0} = \frac{\varphi_0 - \varphi_1}{\varphi_0} \quad (1)$$

式中: φ_0 为活性炭无纺布上游气流中污染物的体积分数(ml/m³); φ_1 为活性炭无纺布下游气流中污染物的体积分数(ml/m³)。

1.3 污染源的制备

VOCs 污染源的制备方法是,称取一定质量的油漆,将其均匀喷涂在气体混合室内的石膏板表面,作为 VOCs 污染源。所用油漆的有关参数见表 2。在流动空气作用下,混合箱内 VOCs 含量随时间衰减,当 VOCs 含量衰减到与仪器精度同数量级时为实验结束时刻。衰减污染源可近似模拟室内有机污染源的挥发情况。

CO₂ 污染源如图 1 所示。当工况一定时,系统中 CO₂ 源的含量不随时间变化,为稳定污染源。

表 2 油漆种类与产地

编号	种类	产地
1 [#]	酚醛清漆	陕西
2 [#]	F01-1 酚醛清漆	陕西
3 [#]	醇酸油漆	河北

2 实验结果与分析

2.1 CO₂ 在活性炭无纺布表面的吸附

2.1.1 气流速度的影响 图 2 给出的是气流速度对活性炭无纺布吸附特性的影响曲线。实验条件为:温度 22 ℃;相对湿度 50%;吸附层层数 3 层;CO₂ 入口体积分数为 0.2%;管内气流速度分别为 0.1、0.3 和 0.5 m/s。

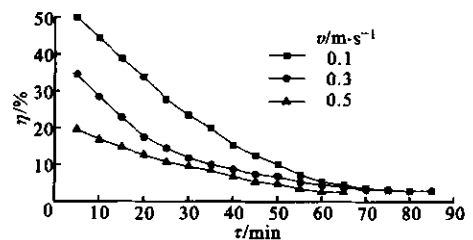


图 2 气流速度对 CO₂ 吸附的影响

从图 2 可以看出,反应开始时活性炭无纺布对 CO₂ 的吸附效率最高,随着吸附时间的延长,活性炭无纺布对 CO₂ 的吸附效率逐渐降低,最后趋于 0。气流速度对活性炭无纺布吸附 CO₂ 的效率影响很大,气流速度比较低时,活性炭无纺布对 CO₂ 的吸附效率很高,当气流速度为 0.1 m/s 时,活性炭无纺布对 CO₂ 的初始吸附效率高达 50%,但随着气流速度的增加,活性炭无纺布对 CO₂ 的吸附效率呈下降

趋势,当气流速度增加到 0.5 m/s 时,活性炭无纺布对 CO_2 的初始吸附效率已降至 20% 左右。这说明,如果将活性炭无纺布应用于室内空调器净化设备,必须考虑通过空调设备的风量,即气流速度对活性炭无纺布的吸附特性的影响。气流速度低有利于活性炭无纺布对 CO_2 的吸附,但过小的风速对空调设备制冷或者制热效果会有一定的影响。

2.1.2 温度的影响 温度对活性炭无纺布的 CO_2 吸附特性的影响如图 3 所示。其实验条件为:相对湿度为 50%;吸附层层数为 3 层; CO_2 入口体积分数为 0.2%;管内气流速度为 0.1 m/s;温度分别为 18、22 和 26 $^{\circ}\text{C}$ 。可以看出,在实验范围内温度对活性炭无纺布吸附 CO_2 的能力影响很小。当温度为 18、22 和 26 $^{\circ}\text{C}$ 时,活性炭无纺布对 CO_2 的初始吸附效率分别为 50.00%、49.95% 和 48.87%,总体变化不大,吸附达到饱和的时间分别为 53、50 和 49 min,相差不大。

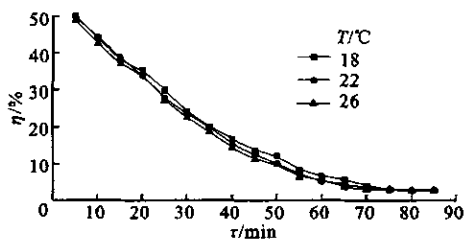


图 3 温度对 CO_2 吸附的影响

由大量研究可知,温度对吸附材料的吸附性能有影响,主要影响吸附质的扩散速率和吸附平衡。提高温度能够提高扩散速率,从而缩短达到平衡的时间,但提高温度将降低吸附剂对吸附质的最终吸附量。由于本实验所研究的温度范围很窄,仅在 18 和 26 $^{\circ}\text{C}$ 之间,因此温度变化对活性炭无纺布的 CO_2 吸附特性的影响不大。这也说明活性炭无纺布在该温度范围内的吸附特性比较稳定。

如将该活性炭无纺布用于室内空调器或者空调系统,在不同季节,如果室内温度满足我国《室内空气质量标准》所规定的 16~28 $^{\circ}\text{C}$,其吸附性能随温度的变化不会发生较大的改变,吸附性能稳定,实用效果比较好。因此从实用温度的角度出发,活性炭无纺布是比较理想的空调环境空气净化材料。

2.1.3 相对湿度的影响 相对湿度对吸附特性的影响如图 4 所示。实验条件为:温度为 22 $^{\circ}\text{C}$;吸附层层数为 3 层; CO_2 入口体积分数为 0.2%;管内气流速度为 0.1 m/s;改性溶液质量分数为 5%。

可以看出,低湿度有利于活性炭无纺布对 CO_2

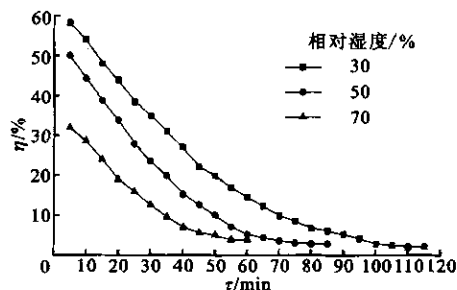


图 4 相对湿度对 CO_2 吸附的影响

的吸附,当相对湿度为 30% 时,活性炭无纺布对 CO_2 的初始吸附效率高达 58%,饱和时间为 70 min。但是,随着空气湿度的增加,活性炭无纺布对 CO_2 的吸附效率下降。当空气的相对湿度增加到 70% 时,活性炭无纺布对 CO_2 的初始吸附效率已降到 32% 左右,饱和时间降到 34 min。 CO_2 在活性炭无纺布上的吸附主要是物理吸附,水分的存在会减少活性炭的吸附容量。水对有机物在活性炭上的吸附有抑制作用。在吸附时,吸附剂表面的水分会使气流中要去除的成分的扩散先通过水分,然后到达炭表面。水分中的扩散比气相中慢,水分的存在降低了吸附速度。当空气湿度比较小时,这种抑制作用并不明显,但随着湿度的增加,它的影响不容忽视。

2.2 VOCs 的吸附

图 5 给出的是油漆种类对 VOCs 吸附的影响,实验条件为:吸附温度 20 $^{\circ}\text{C}$;相对湿度 45%;吸附层厚度 3 层;管内气体流速 0.1 m/s。图中还给出了各组实验数据的拟合曲线(直线),其最大拟合误差为 1%。拟合线的斜率反映的是活性炭无纺布对 VOCs 的吸附效率。该拟合结果说明:活性炭无纺布对不同种类油漆所散发的 VOCs 的吸附效率不同,其中对 1# 油漆的 VOCs 的吸附效率最高,约为 66%,对 3# 油漆所散发出的 VOCs 的吸附效率最低,约为 52%。另外还可以看出,在 VOCs 的整个吸附过程中(在实验的时间范围内),活性炭无纺布对某特定油漆所散发的 VOCs 的吸附效率不变。从图 5 还可以看出,活性炭无纺布上游气流中的 VOCs 含量是控制活性炭吸附量的最重要因素。活性炭无纺布对 VOCs 的吸附量随上游气流中 VOCs 含量的增大而增加。

图 6 给出的是气流速度对 VOCs 吸附的影响,实验用污染源为 2# 油漆,温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 45%,吸附层厚度 3 层,气流速度分别取 0.1、0.3 和 0.5 m/s。图中还给出了各工况的数据拟合结果。可以看出,气流速度对活性炭无纺布吸附 VOCs 特性

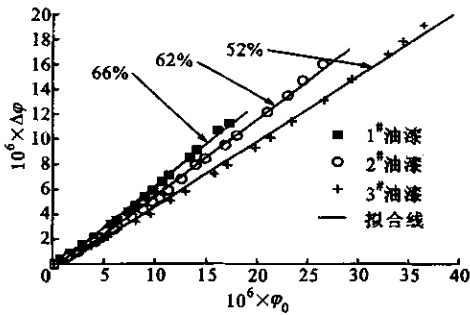


图 5 油漆种类对 VOCs 吸附的影响

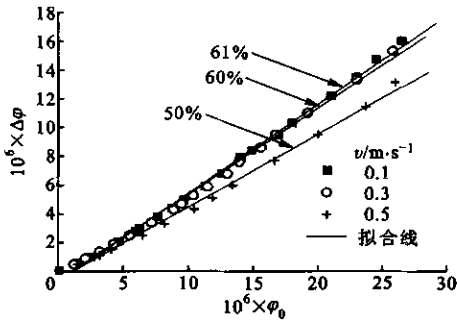


图 6 气流速度对 VOCs 吸附的影响

的影响很大. 具体分析如下: ①随着气流速度的增加, 活性炭无纺布对 VOCs 的吸附效率下降; ②活性炭无纺布吸附效率下降的幅度与气流速度有关, 当上游气流速度取 0.1 或 0.3 m/s 时, 气流速度对 VOCs 吸附效率的影响不大, 此时活性炭无纺布的吸附效率在 60%~61% 之间, 但是当气流速度增加到 0.5 m/s 后, 活性炭无纺布对 VOCs 的吸附效率下降很多, 此时的吸附效率仅为 50%. 可见对活性炭无纺布而言, 低气流速度有利于 VOCs 的吸附.

2.3 吸附层厚度的影响

2.3.1 对 CO₂ 吸附的影响 吸附层厚度对 CO₂ 吸附特性的影响如图 7 所示. 实验条件为: 温度为 22 ℃; 相对湿度为 50%; CO₂ 入口体积分数为 0.2%; 管内气流速度为 0.1 m/s. 可以看出, 吸附层层数对吸附特性的影响较大, 随着吸附层层数的增加, 同一时刻吸附效率总体呈上升的趋势. 吸附层层数分别为 1 层、3 层、5 层时, 初始吸附效率分别是 36%、50%、59%, 吸附达到饱和的时间分别是 29、50、58 min. 尽管增加厚度可以提高吸附效率, 延长饱和时间, 但在实际应用中, 不能一味地增加吸附层层数或厚度, 因为当吸附层厚度达到一定时(本实验中为 3 层), 吸附效率提高的幅度很小, 而厚度增加所引起的阻力增加值却很大. 因此, 必须综合考虑效率增量和阻力增量之间的关系. 在本实验中, 3 层吸附层可

以取得比较好的吸附效果, 而且能耗较小.

2.3.2 对 VOCs 吸附的影响 图 8 给出的是不同吸附层厚度条件下吸附层上、下游气流中 VOCs 的体积分数之差与吸附层上游气流中 VOCs 的体积分数之间的变化关系. 实验油漆为 2# 油漆, 环境温度为 20 ℃, 相对湿度为 45%, 吸附层上游气体流速为 0.1 m/s, 吸附层厚度分别为 1 层、3 层和 5 层. 可以看出: 吸附层越厚, 活性炭无纺布对 VOCs 的吸附效率越高. 当吸附层厚度为 1 层时, 活性炭无纺布对 VOCs 的吸附效率为 48%, 吸附层厚度增加到 5 层后, 活性炭无纺布对 VOCs 的吸附效率增加到 62%. 但是, 当吸附层增加到 3 层以上时, 活性炭无纺布对 VOCs 的吸附效率基本保持不变. 如图 8 所示, 吸附层为 3 层时的吸附效率与吸附层为 5 层的吸附效率相同, 均在 62% 左右. 这说明在实验条件下, 3 层吸附层就可以达到比较好的 VOCs 脱除效果, 无节制地增加吸附厚度以求提高污染物的吸附效率是不必要的.

表 3 给出的是不同吸附层厚度条件下, 吸附层厚度对系统压降的影响. 可以看出, 吸附层厚度越厚, 吸附层的阻力就越大, 阻力与吸附层厚度成正比关系. 因而从系统节能的角度出发, 吸附层厚度不能

表 3 吸附层厚度对系统压降的影响

厚度/层	压降/Pa	
	CO ₂ 吸附	VOCs 吸附
1	1.225	1.160
3	3.851	3.531
5	5.814	5.979

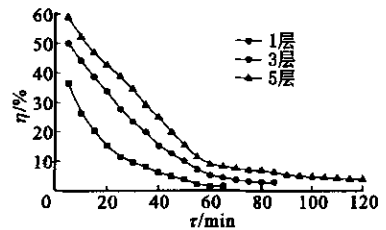


图 7 吸附层厚度对 CO₂ 吸附的影响

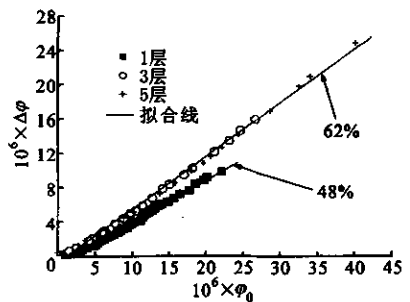


图 8 吸附层厚度对 VOCs 吸附的影响

过大. 在实际应用中,要根据具体情况选择使用合适的吸附层厚度.

3 结 论

(1)在低气流速度条件下,活性炭无纺布能够很好地吸附空气中的 CO₂,环境温度对活性炭无纺布表面 CO₂ 吸附效率的影响不大,但低空气湿度有利于 CO₂ 的吸附.

(2)在实验条件下,活性炭无纺布表面 VOCs 的吸附效率与上游气流中 VOCs 的含量无关,但与污染源的种类有关. 低气流速度同样有利于 VOCs 的吸附.

(3)增加吸附层层数,可以提高活性炭无纺布对 CO₂ 和 VOCs 的吸附效率,但当吸附层层数增加到一定值后,吸附效率和饱和时间的增加幅度不大. 在实验条件下,3 层吸附层比 5 层更为经济实用.

参考文献:

[1] Lee Shun Cheng, Guo Hai, Li Wai Ming. Inter-comparison of air pollutant concentrations in different indoor environments in Hong Kong[J]. Atmospheric

Environment,2002,36 (12): 1 929-1 940.
 [2] Chow W K. Ventilation of enclosed train compartments in Hong Kong[J]. Applied Energy, 2002, 71 (3): 161-170.
 [3] Lee S C, Chang M. Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong [J]. Chemosphere, 2000,41(1): 109-113.
 [4] 成通宝,江 亿. 商业建筑室内空气污染控制研究[J]. 制冷与空调, 2001, 1 (4): 21-27.
 [5] 肖 勇,吴祥生,熊学艺. 重庆地区商场 CO₂ 浓度测试[J]. 重庆大学学报, 2002, 25 (8): 21-24.
 [6] 张少梅,沈晋明. 室内挥发性有机化合物(VOC)污染的研究[J]. 洁净与空调技术,2003 (3): 1-4.
 [7] Park S J, Kim K D. Adsorption behaviors of CO₂ and NH₃ on chemically surface-treated activated carbons [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 212(1): 186-189.
 [8] Mannsbart G, Christopher B R. Long-term performance of nonwoven geotextile filters in five coastal and bank protection projects[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997 (15): 207-221.

(编辑 王焕雪)

《机械科学与技术》2005 年第 1 期目录选登

1. 基于产品数据管理系统的设计制造信息集成 刘文安,乔立红(1)
2. 基于过滤定向搜索的 Job-Shop 调度算法及评价 王世进,周炳海,奚立峰,等(22)
3. 一种新型的神经网络及其在智能质量诊断分析中的应用 乐清洪,朱名铨,王润孝(30)
4. 一种面向对象的 Petri 网及其应用研究 于振华,蔡远利(38)
5. 转动刚体上柔性悬臂梁的动力学建模与仿真 肖建强,章定国(45)
6. MEMS 微梁粘附"突陷"静力分析 田文超,贾建援(48)
7. 不同材料的准分子激光微细加工机制 刘 莹,温诗铸(62)
8. 卫星结构优化设计的建模问题 陈昌亚,郑晓亚,姜晋庆(66)
9. 旋转运动柔性悬臂梁的动力特性及振动主动控制研究 蔡国平,洪嘉振(70)

《机械科学与技术》2005 年第 2 期目录选登

1. 大型覆盖件应变分布测量与缺陷分析 项辉宇,钟约先,吴伯杰,等(127)
2. 基于 STL 文件的实体分割算法研究 赵吉宾,刘伟军,王越超(131)
3. 单榫头叶片精锻三维热力耦合有限元模拟 蔡 旺,杨 合,刘郁丽,等(135)
4. 一种神经康复机器人的研制 王耀兵,季林红,黄靖远(139)
5. 智能车辆导航控制器参数选取与鲁棒性分析 马 雷,王荣本,赵东标(146)
6. 基于模糊因子法的模糊智能桁架结构动力特性分析 马 娟,陈建军,高 伟(151)
7. 利用 Taylor 变换的结构动力学边界条件识别 高跃飞,姜节胜,张永强,等(155)
8. 内嵌于 UG 的基于特征的 CAPP 系统 程筱胜,廖文和,黄 翔(165)
9. 松动-碰摩耦合故障转子系统振动特性分析 张 靖,闻邦椿(182)