

活性炭吸附法净化大气中低浓度污染物的效果实验研究

鲁小娟

运城市生态环境局垣曲分局,山西运城 043700

DOI:10.61369/EAE.2025040003

摘要 : 为探究活性炭吸附法对大气中低浓度污染物的净化效能,本研究以低浓度挥发性有机化合物 (VOCs, 以甲苯为代表) 和氮氧化物 (NO_x, 以 NO 为代表) 为目标污染物,通过静态吸附实验与动态吸附实验,系统分析活性炭类型、吸附温度、相对湿度、气体空速等关键因素对吸附效果的影响。实验结果表明:颗粒状椰壳活性炭对低浓度甲苯和 NO 的吸附性能最优,在初始浓度为 5mg/m³、温度 25℃、相对湿度 30%、空速 1000h⁻¹ 条件下,对甲苯和 NO 的吸附效率分别达 96.2% 和 92.8%,饱和吸附量为 286.5mg/g 和 158.3mg/g;温度升高、湿度增大及空速提高均会显著降低吸附效果,其中温度每升高 10℃,吸附效率下降 8%–10%。研究证实,活性炭吸附法对大气低浓度污染物具有高效净化能力,可为实际大气污染治理工程提供实验依据与技术参考。

关键词 : 活性炭吸附; 大气低浓度污染物; 挥发性有机化合物 (VOCs); 氮氧化物 (NO_x); 吸附效率; 饱和吸附量; 穿透曲线

Experimental Study on the Effectiveness of Activated Carbon Adsorption for Purifying Low-Concentration Pollutants in the Atmosphere

Lu Xiaojuan

Yuanqu Branch of Yuncheng Ecological Environment Bureau, Yuncheng, Shanxi 043700

Abstract : To investigate the purification efficiency of activated carbon adsorption for low-concentration pollutants in the atmosphere, this study targeted low-concentration volatile organic compounds (VOCs, represented by toluene) and nitrogen oxides (NO_x, represented by NO). Through static and dynamic adsorption experiments, the study systematically analyzed the influence of key factors such as activated carbon type, adsorption temperature, relative humidity, and gas space velocity on the adsorption effect. The experimental results indicated that granular coconut shell activated carbon exhibited the best adsorption performance for low-concentration toluene and NO. Under conditions of an initial concentration of 5 mg/m³, a temperature of 25 °C, a relative humidity of 30%, and a space velocity of 1000 h⁻¹, the adsorption efficiencies for toluene and NO reached 96.2% and 92.8%, respectively, with saturated adsorption capacities of 286.5 mg/g and 158.3 mg/g. An increase in temperature, humidity, and space velocity significantly reduced the adsorption effect, with the adsorption efficiency decreasing by 8%–10% for every 10°C rise in temperature. The study confirmed that activated carbon adsorption has a highly efficient purification capability for low-concentration atmospheric pollutants, providing experimental evidence and technical references for practical atmospheric pollution control projects.

Keywords : Activated carbon adsorption; Low-concentration atmospheric pollutants; Volatile organic compounds (VOCs); Nitrogen oxides (NO_x); Adsorption efficiency; Saturated adsorption capacity; Breakthrough curve

引言

目前,大气低浓度污染物净化技术主要有吸附法、催化氧化法、生物净化法等。催化氧化法虽净化彻底,但需高温条件(通常300℃以上),能耗高且易产生二次污染;生物净化法成本低、绿色环保,但反应速率慢、受环境因素(温度、湿度)影响大,难以满足高净化效率需求^[1]。而活性炭吸附法因吸附容量大、选择性强、操作简便、成本可控且活性炭可再生,在低浓度污染物净化领域展现出独特优势。然而,现有研究多聚焦于高浓度污染物吸附,针对大气典型低浓度污染物的吸附规律、影响因素及实际应用效能的系统性实验研究仍较缺乏,制约了该技术的工程推广。

一、实验材料与方法

(一) 实验材料

1. 活性炭样品

实验选用 3 种常见类型活性炭：颗粒状椰壳活性炭 (AC-1, 粒径 1~2mm, 比表面积 1250m²/g, 孔隙容积 0.85cm³/g)、柱状煤质活性炭 (AC-2, 粒径 3~5mm, 比表面积 980m²/g, 孔隙容积 0.62cm³/g)、粉末状木质活性炭 (AC-3, 粒径 50~100μm, 比表面积 1100m²/g, 孔隙容积 0.78cm³/g)，均购自某环保材料有限公司。使用前将活性炭置于 105℃烘箱中干燥 24h，去除水分与表面杂质，冷却后密封保存^[2]。

2. 目标污染物与实验气体

以甲苯 (分析纯, 纯度≥99.5%) 作为 VOCs 代表, NO 标准气体 (纯度 99.99%, 平衡气为 N₂) 作为 NO_x 代表。实验气体采用动态配气法配制：通过质量流量控制器 (D07-19B, 北京七星华创) 分别控制甲苯蒸汽 (由甲苯液体鼓泡产生)、NO 标准气与洁净空气 (经分子筛干燥、活性炭过滤) 的流量，混合后得到目标污染物浓度为 1~10mg/m³ 的模拟大气，满足低浓度污染物研究需求。

3. 主要仪器设备

实验仪器包括：静态吸附仪 (V-Sorb 2800P, 金埃谱科技)、动态吸附实验装置 (自制, 含气体发生系统、吸附柱、检测系统)、气相色谱仪 (GC-2014, 岛津, 用于甲苯浓度检测)、NO_x 分析仪 (Testo 350, 德图, 用于 NO 浓度检测)、恒温水浴锅 (HH-S4, 金坛大地)、湿度控制器 (HF-100, 上海精宏)、电子分析天平 (FA2004, 上海精密科学仪器)。

(二) 实验方法

1. 静态吸附实验

采用重量法测定活性炭对低浓度污染物的静态吸附量。准确称取 0.5g 活性炭样品置于石英坩埚中，放入静态吸附仪的样品室；将模拟大气 (甲苯 / NO 浓度 5mg/m³) 通入吸附仪，设定温度 (20℃、25℃、30℃、35℃、40℃) 与相对湿度 (20%、30%、40%、50%、60%)，保持压力为常压。每隔 1h 称量活性炭质量变化，直至质量不再增加 (吸附平衡)，根据式 (1) 计算饱和吸附量 (q_e, mg/g)：

$$q_e = \frac{m_1 - m_0 - m_b}{m_0}$$

式中：m₀ 为吸附前活性炭质量 (g)；m₁ 为吸附平衡后活性炭与坩埚总质量 (g)；m_b 为空白实验 (无活性炭时, 坩埚在相同条件下的质量变化, g)，用于扣除气体在坩埚表面的物理吸附误差。每组实验重复 3 次，取平均值。

2. 动态吸附实验

动态吸附实验在自制固定床吸附装置中进行，吸附柱为内径 10mm、高度 150mm 的石英管，装填活性炭 5g (床层高度 80mm)。将模拟大气 (甲苯 / NO 浓度 5mg/m³) 以不同空速 (500h⁻¹、1000h⁻¹、1500h⁻¹、2000h⁻¹) 通入吸附柱，控制温度 25℃、相对湿度 30% (除非特殊说明)。通过气相色谱仪与 NO_x 分析仪实时检测吸附柱出口污染物浓度 (C)，当出口浓度达到进

口浓度的 5% 时，视为吸附穿透，记录穿透时间 (t_b)；当出口浓度达到进口浓度的 95% 时，视为吸附饱和，记录饱和时间 (t_s)。根据式 (2) 计算吸附效率 (η, %)，根据式 (3) 计算动态饱和吸附量 (q_d, mg/g)：

$$\eta = \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \times 100\%$$
$$q_d = \frac{Q \times C_0 \times (t_s - t_0)}{m \times 22.4 \times 10^3} \times M$$

式中：C₀ 为进口污染物浓度 (mg/m³)；Q 为气体流量 (L/min)；t₀ 为实验起始时间 (min)；m 为活性炭质量 (g)；M 为污染物摩尔质量 (甲苯 92g/mol, NO30g/mol)；22.4 为标准状况下气体摩尔体积 (L/mol)。

3. 影响因素实验

为分析单一因素对吸附效果的影响，分别设计以下实验：

(1) 活性炭类型影响：固定温度 25℃、相对湿度 30%、空速 1000h⁻¹、污染物浓度 5mg/m³，对比 AC-1、AC-2、AC-3 的吸附效率与饱和吸附量；

(2) 温度影响：固定活性炭类型为 AC-1、相对湿度 30%、空速 1000h⁻¹、污染物浓度 5mg/m³，设定温度 20℃、25℃、30℃、35℃、40℃，测定吸附效率变化；

(3) 湿度影响：固定活性炭类型为 AC-1、温度 25℃、空速 1000h⁻¹、污染物浓度 5mg/m³，设定相对湿度 20%、30%、40%、50%、60%，测定吸附效率变化；

(4) 空速影响：固定活性炭类型为 AC-1、温度 25℃、相对湿度 30%、污染物浓度 5mg/m³，设定空速 500h⁻¹、1000h⁻¹、1500h⁻¹、2000h⁻¹，测定吸附效率与穿透时间变化。

二、实验结果与分析

(一) 活性炭类型对吸附效果的影响

不同类型活性炭对低浓度甲苯和 NO 的吸附性能对比结果如表 1 所示。由表可知，AC-1 (椰壳活性炭) 的吸附性能最优，对甲苯和 NO 的饱和吸附量分别为 286.5mg/g 和 158.3mg/g，吸附效率分别为 96.2% 和 92.8%；AC-3 (木质活性炭) 次之；AC-2 (煤质活性炭) 最差^[3]。

表 1 不同类型活性炭的吸附性能 (25℃、30% RH、1000h⁻¹、5mg/m³)

活性炭类型	甲苯饱和吸附量 (mg/g)	甲苯吸附效率 (%)	NO 饱和吸附量 (mg/g)	NO 吸附效率 (%)	穿透时间 (min, 甲苯 / NO)
AC-1	286.5	96.2	158.3	92.8	480/360
AC-2	198.7	85.4	102.5	81.3	320/240
AC-3	245.2	91.8	135.7	88.6	420/300

分析原因：AC-1 的比表面积 (1250m²/g) 与孔隙容积 (0.85cm³/g) 最大，且其孔隙结构以微孔 (孔径 < 2nm) 为主，而甲苯 (分子直径 0.58nm) 与 NO (分子直径 0.31nm) 分子尺寸较小，可高效进入微孔内部，与活性炭表面发生范德华力吸附；AC-2 虽为柱状结构，机械强度高，但比表面积较小，且存在部分中孔 (2~50nm)，对小分子污染物的吸附选择性较差；AC-3 为粉末状，虽比表面积较大，但颗粒间易团聚，导致气体流通阻

力增大，实际吸附位点利用率降低，因此吸附性能略低于 AC-1。后续实验均以 AC-1 为研究对象^[4]。

（二）温度对吸附效果的影响

温度对 AC-1 吸附甲苯和 NO 的影响结果如图 1 所示。由图可知，随着温度从 20℃ 升高至 40℃，甲苯吸附效率从 98.5% 降至 82.3%，NO 吸附效率从 95.1% 降至 78.6%，饱和吸附量同步下降（甲苯：302.1mg/g→245.8mg/g；NO：168.5mg/g→132.7mg/g）。活性炭对低浓度污染物的吸附属于物理吸附，物理吸附是放热过程（ $\Delta H < 0$ ），根据勒夏特列原理，温度升高会抑制吸附反应进行。同时，温度升高会加快污染物分子的热运动速度，使其更容易克服活性炭表面的吸附势能垒，从吸附位点脱附，导致吸附平衡向脱附方向移动，最终表现为吸附效率与饱和吸附量下降。此外，温度升高还会降低气体在活性炭孔隙中的扩散速率，进一步削弱吸附效果^[5]。

（三）相对湿度对吸附效果的影响

相对湿度（RH）对 AC-1 吸附性能的影响。当 RH 从 20% 增至 60% 时，甲苯吸附效率从 97.8% 降至 88.5%，NO 吸附效率从 94.2% 降至 85.3%，且湿度越高，下降速率越快。水分子与污染物分子在活性炭表面存在竞争吸附。活性炭表面含有少量含氧官能团（如羟基、羧基），这些基团具有亲水性，会优先吸附水分子，占据部分吸附位点；同时，水分子会在活性炭微孔内形成氢键网络，阻碍污染物分子向微孔内部扩散，尤其对于极性较弱的甲苯分子，竞争吸附作用更显著。当 RH 超过 40% 后，活性炭表面的水分子层逐渐饱和，竞争吸附加剧，导致吸附效率快速下降^[6]。因此，在实际应用中，需控制进气湿度低于 40%，或对进气进行预干燥处理。

（四）空速对吸附效果的影响

空速（气体体积流量与活性炭床层体积的比值）对吸附效果的影响如表 2 所示。随着空速从 500h⁻¹ 增至 2000h⁻¹，甲苯穿透时间从 600min 缩短至 240min，NO 穿透时间从 450min 缩短至 180min，吸附效率也从 97.5%/94.8% 降至 90.2%/87.5%。

表 2 不同空速下的吸附性能（25℃、30% RH、5mg/m³）

空速 (h ⁻¹)	甲苯穿透时 间 (min)	甲苯吸附效率 (%)	NO 穿透时间 (min)	NO 吸附效率 (%)
500	600	97.5	450	94.8
1000	480	96.2	360	92.8
1500	360	93.8	270	90.1
2000	240	90.2	180	87.5

参考文献

- [1] 环境保护部. 2022 年中国大气环境质量公报 [R]. 北京: 中国环境出版社, 2023.
- [2] 王鹏, 李娜, 张磊. 大气低浓度 VOCs 净化技术研究进展 [J]. 环境工程学报, 2021, 15 (5): 1456–1468.
- [3] 李刚, 赵静, 王丽. 椰壳活性炭对低浓度甲苯的吸附性能研究 [J]. 环境科学, 2020, 41 (3): 1289–1296.
- [4] 郝吉明, 马广大, 王书肖. 大气污染控制工程 (第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2019: 234–256.
- [5] Zhang Y, Li J, Wang H. Adsorption of low-concentration NO on activated carbon modified by ammonia: Experimental and theoretical study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 445: 130689.
- [6] 刘敏, 陈勇, 周俊. 温度和湿度对活性炭吸附 NO_x 的影响机制 [J]. 中国环境科学, 2022, 42 (8): 3567–3574.
- [7] 国家环境保护总局. 大气污染物综合排放标准 (GB 16297–1996) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [8] 张艳, 刘勇, 孙凯. 空速对固定床活性炭吸附低浓度 NO 的影响 [J]. 环境科学学报, 2023, 43 (2): 189–196.

空速反映气体在吸附床层中的停留时间，空速越低，气体停留时间越长（500h⁻¹ 时停留时间约 7.2min, 2000h⁻¹ 时约 1.8min），污染物分子有更充足的时间扩散至活性炭微孔内部，与吸附位点充分结合，因此穿透时间更长、吸附效率更高^[7]；反之，空速过高时，气体停留时间过短，部分污染物分子未来得及被吸附就随气流流出吸附柱，导致穿透时间缩短、吸附效率下降。但空速过低会导致吸附装置处理量减小，实际应用中需在处理量与吸附效率间平衡，建议空速控制在 1000–1500h⁻¹^[8]。

三、实际应用建议

基于实验结果，对活性炭吸附法净化大气低浓度污染物的实际应用提出以下建议：

1. 活性炭选型：优先选用颗粒状椰壳活性炭，其比表面积大、微孔发达，对 VOCs 和 NO_x 吸附性能最优；若处理含尘废气，需在吸附柱前增设除尘装置，防止活性炭孔隙堵塞。
2. 工况调控：控制进气温度 20–30℃、相对湿度 20%–40%，空速 1000–1500h⁻¹，可实现最佳吸附效果；若进气湿度较高，需增设除湿装置（如转轮除湿机），降低水分子竞争吸附作用。
3. 再生与更换：当吸附效率下降至 80% 以下时，需对活性炭进行再生处理（如热空气再生，温度 120–150℃），再生后吸附性能可恢复至初始值的 90% 以上；活性炭经 3–5 次再生后，吸附容量显著下降，需及时更换。
4. 联用技术：对于高浓度或多组分污染物，可采用“预处理（除尘、除湿）+ 活性炭吸附 + 催化氧化”联用技术，活性炭吸附浓缩低浓度污染物后，再通过催化氧化法将其彻底降解，提高净化效率与活性炭使用寿命。

研究成果验证了活性炭吸附法净化大气低浓度污染物的可行性与高效性，为实际大气污染治理工程提供了实验依据与技术参考。未来研究可进一步聚焦活性炭改性技术（如负载金属氧化物、石墨烯等），提升其对极性污染物的吸附选择性与再生性能；同时开展多组分污染物（如甲苯 – NO–SO₂ 混合气体）的吸附实验，探究竞争吸附机制，为复杂大气环境下的应用提供更全面的理论支持。