

Optimization of Thermal Regeneration Process for Pore Recovery and Thermal Stability of Spent Activated Carbon in Spray-booth VOC Abatement

Zihao Guo Mei Lu Xinyi Gao Yingdie Zheng Jiaxing Hong Manman Jiang Neng Yu
Yiliang Lu*

Zhejiang Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310007, China

Abstract

This study systematically investigates the thermal desorption (300–600°C, 1–3 h) of waste coal-based granular activated carbon (AC) saturated with C8 aromatic VOCs (ethylbenzene, o-xylene, and 1-ethenyl-3-methylenecyclopentene) from spray-coating exhaust. Results indicate that complete VOC removal is achieved even under mild conditions (300°C, 1 h), accompanied by the disappearance of the tar cracking peak (350–750°C) in TG analysis, with residual mass increasing from 10.8% to over 90%. However, pore structure recovery exhibits significant time dependence. Although the highest weight loss rate (30.4%) occurs at 500°C for 2 h, the specific surface area (SSA) remains limited at 358 m²/g. Extending the treatment to 3 h at 500 °C significantly enhances microporosity (96.2% proportion), total pore volume (0.54 cm³ g⁻¹), and SSA (1037 m² g⁻¹). SEM, XRD, and FTIR analyses confirm sharp pore edges, optimal microcrystalline rearrangement, and a clean surface under these conditions. Considering weight loss, porosity restoration, thermal stability, and energy consumption, 500°C for 3 h is identified as the optimal condition for pore recovery. For industrial applications, 500°C with 2.5–3 h is recommended as a balanced window between regeneration efficiency and operational cost, providing scalable insights for recycling VOC-adsorbed activated carbon in emission control.

Keywords

spent granular activated carbon; thermal desorption; C8 aromatics; pore recovery

基于孔隙恢复与热稳定性的废活性炭热再生工艺优化

郭子豪 卢梅 高心怡 郑英蝶 洪家兴 姜曼曼 俞能 鲁奕良*

浙江省环境科技股份有限公司, 中国·浙江 杭州 310007

摘 要

以吸附喷涂废气C8芳烃(乙苯、邻二甲苯、1-乙烯基-3-亚甲基环戊烯)的废煤基颗粒活性炭(spent GAC)为对象,系统研究300–600°C、1–3 h热脱附参数对其污染物脱除与孔隙性能的影响。结果表明:300°C-1 h即可完全脱除特征VOCs, TG中350–750°C焦油裂解峰消失,残留质量由10.8%升至>90%;但孔隙恢复具有时间依赖性,500°C-2 h虽失重率最高(30.4%),比表面积仅358 m² g⁻¹。延长恒温时间至3 h,微孔比例升至96.2%,总孔容达0.54 cm³ g⁻¹,比表面积恢复至1037 m² g⁻¹,SEM、XRD与FTIR证实孔隙边缘锐利、微晶重排最佳且表面洁净。综合失重、孔隙、热稳定性与能耗,500°C-3 h为“孔隙恢复最佳”条件,工业现场可选取500°C-2.5 h或3 h作为兼顾再生活性与运行成本的最优工艺参数,为VOCs治理用活性炭循环利用提供直接放大依据。

关键词

废颗粒活性炭;热脱附;C8芳烃;孔隙恢复

【基金项目】浙江省生态环境科研项目(项目编号:2023HT0034);浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(项目编号:2023C03127)。

【作者简介】郭子豪(1992–),男,中国山西人,博士,从事固废资源化利用研究。

【通讯作者】鲁奕良(1977–),男,中国浙江绍兴人,本科,高级工程师,从事固体废物治理研究。

1 引言

随着中国制造业集群迅速发展,喷涂、印刷、半导体等工序排放的有机废气(VOCs)已成为区域臭氧和细颗粒物的重要前驱体^[1]。活性炭吸附因操作简单、能耗低、适用范围广,被公认为工业废气末端治理的首选技术^[2,3]。然而,活性炭饱和后若直接废弃,既产生大量危废^[4],又显著增加企业运营成本^[5];且VOCs在微孔内易聚合或化学吸附,造

成脱附不完全、吸附容量衰减,进一步加剧环境风险。因此,开发高效、低能耗的现场再生方法,实现活性炭循环利用,是“双碳”目标下破解 VOCs 治理链成本与环保矛盾的核心瓶颈。

热再生凭借脱除效率高、工艺成熟而受到最多关注。研究表明:温度、保温时间和气氛是决定孔隙恢复与吸附性能的核心变量;低温段 ($< 300^{\circ}\text{C}$) 可脱除低沸点 VOCs,中温段 ($300\text{--}500^{\circ}\text{C}$) 有利于焦油裂解, $> 500^{\circ}\text{C}$ 则伴随微孔烧蚀风险。然而,现有研究多聚焦单一温度或经验时间,对不同 VOCs 的差异化脱附行为及结构-热学参数耦合机制缺乏系统数据,导致工程放大时“高能耗、低恢复”问题突出。

针对上述空白,本文以喷涂废气用废煤基颗粒活性炭为对象,通过 GC-MS 精准识别表面吸附质,结合 TG、BET、SEM、XRD 与 FTIR 等多尺度表征,系统探究 $300\text{--}600^{\circ}\text{C}$ 、 $1\text{--}3\text{ h}$ 热脱附参数对污染物脱除效率、孔隙结构恢复、热稳定性及微晶有序度的影响规律,明确兼顾能耗与性能的最优再生窗口,为工业 VOCs 治理用活性炭现场再生提供可直接放大的工艺依据和理论支撑。

2 实验部分

2.1 试验材料与设备

吸附饱和和煤质颗粒活性炭 (spent GAC), 取自中国浙江省衢州市浙江开山压缩机有限公司,用于吸附喷涂废气。原炭为烟煤基颗粒炭 ($\phi 4\text{ mm}$), 经蒸汽活化制得。

7890B 型三重四级杆气相色谱质谱联用仪, 美国 Agilent 公司; OTF-1200X 型管式炉, 合肥晶科材料技术有限公司; JW-BK 型静态氮吸附仪, 北京精微高博仪器有限公司; SU8010 型冷场发射扫描电子显微镜, 日立株式会社; TG209F3 型热重分析仪, 德国耐驰仪器公司; D8 Advance 型 X 射线衍射仪, 德国 Bruker 公司; Nicolet 6700 型傅里叶红外光谱仪, 美国 Thermo Fisher Nicolet 公司;

2.2 废气吸附用颗粒活性炭热脱附试验

称取定量废活性炭置于刚玉舟转移至管式炉内, 以 $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 升温速率加热至 $300\text{--}600^{\circ}\text{C}$, 保持恒温 $1\text{--}3\text{ h}$ 。全程保持 300 mL/min 气流速率 N_2 , 试验前预吹扫 1 h 。

2.3 分析方法

采用固相萃取-气相色谱-质谱联用, 对活性炭所吸

附污染物进行定性分析。将样品在 100°C 条件下孵育 30 min ; 进样口温度设定为 250°C , 采用分流进样方式, 分流比为 $20:1$ 。载气 (通常为氦气) 的流速控制在 3 mL/min 。色谱分离采用 HP-5MS 色谱柱 ($30\text{ m} \times 250\mu\text{m} \times 0.25\mu\text{m}$) 进行, 初始柱温为 40°C , 保持 5 min 。随后, 以 8°C/min 的速率升温至 220°C , 保持 3 min ; 再以 15°C/min 的速率升温至 300°C , 保持 3 min 。质谱检测过程中, 采用 70 eV 的电子轰击能量, 质量扫描范围设定为 $35\text{ 至 }450\text{ amu}$, 以实现目标化合物的定性和定量分析。

采用静态氮吸附仪 (JWBK, 北京精微高博科技有限公司) 测定样品的比表面积及孔径结构, 样品在 105°C 下烘干 24 h , 采用 Brunauer Emmett Teller (BET) 和密度泛函理论 (DFT) 计算颗粒炭的比表面积及孔径参数; 采用冷场发射扫描电子显微镜观察样品的微观形态, 用导电胶将样品固定在样品台上, 喷金 $1\text{--}2$ 次增强导电性, 工作电压 3.00 kV ; 采用热重分析 (TG) 评估样品在加热过程中的热稳定性和失重特性, 样品在氮气气氛下, 以 $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 的速率从室温加热至 800°C ; 使用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析样品的晶体结构, 扫描速度为 $5^{\circ}\text{ min}^{-1}$, 扫描范围为 $5^{\circ}\text{--}80^{\circ}$, 铜靶材, 功率为 $40\text{ kV} \times 40\text{ mA}$; 使用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 鉴定样品表面存在的官能团。

3 结果与讨论

3.1 废颗粒炭表面 VOCs 定性分析

图 1a 为废颗粒活性炭固相萃取-气相色谱-质谱联用 (SPE-GC-MS) 总离子色谱图 (TIC), 共检出 3 个主要峰, 保留时间分别位于 10.158 min 、 10.386 min 及 11.046 min 。结合 NIST 17 标准谱库比对, 其匹配度均 $> 90\%$, 依次鉴定为乙苯 (ethylbenzene, CAS 100-41-4)、1-乙烯基-3-亚甲基环戊烯 (1-ethenyl-3-methylene-cyclopentene, CAS 61142-07-2) 和邻二甲苯 (o-xylene, CAS 95-47-6), 其组分、分子量、沸点等性能如表 1 所示。三种化合物均含有 C_8H_{10} 分子骨架, 沸点介于 $136\text{--}144^{\circ}\text{C}$, 分子尺寸约 $0.6\text{--}0.7\text{ nm}$, 与活性炭微孔孔径 ($< 2\text{ nm}$) 匹配良好, 因此在工业废气捕集过程中被高效吸附。

3.2 热脱附工艺对废颗粒活性炭质量的影响

表 2 给出了废活性炭经 $300\text{--}600^{\circ}\text{C}$ 、 $1\text{--}3\text{ h}$ 热脱附后的

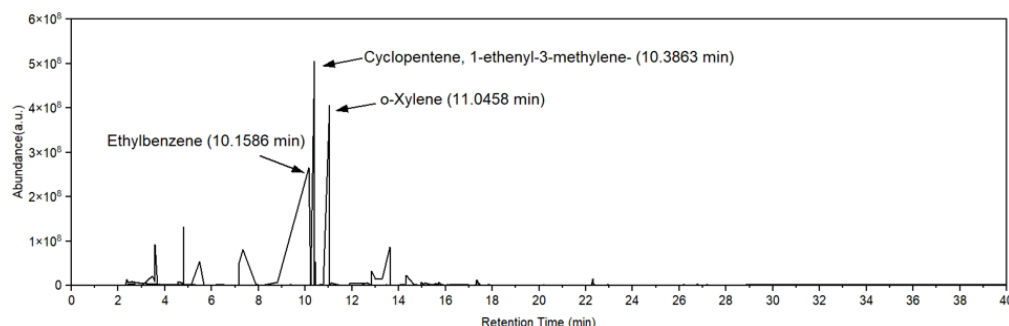


图 1 废颗粒活性炭表面 VOCs 的 GC-MS 总离子流图

表 1 吸附质组分及其性质

保留时间	化合物	匹配度	分子式	分子尺寸 (nm)	沸点 (℃)
10.1586	乙苯 (Ethylbenzene)	99.3	C ₈ H ₁₀	0.7-0.9	136
10.3863	1- 乙烯 -3- 亚甲基环戊烯 (Cyclopentene,1-ethenyl-3-methylene-)	92.7	C ₈ H ₁₀	0.8-1.0	149
11.0458	邻二甲苯 (o-Xylene)	99.0	C ₈ H ₁₀	0.7-0.9	144

质量损失率 (Δm)。 Δm 随温度升高整体呈增大趋势,但不同保温时间下的响应规律存在差异。当保温时间固定为 1 h 时, Δm 由 300℃ 的 18.82 % 升至 500℃ 的 22.21%, 增幅 3.4 个百分点; 继续升高至 600℃, Δm 反而略降至 21.04 %, 表明 500℃ 附近已基本完成可挥发 / 可热解组分的脱除, 继续升温对总质量损失贡献有限, 但可能引发炭骨架轻微烧蚀或微孔坍塌, 导致质量损失趋于稳定甚至略有回落。

表 2 热再生温度与保温时间对废活性炭质量损失率的影响

样品编号	热脱附前质量 (g)	热脱附后质量 (g)	质量损失率 Δm (%)
GAC-300-1	50.042	40.623	18.82%
GAC-400-1	50.003	39.547	20.91%
GAC-500-1	50.024	38.915	22.21%
GAC-600-1	50.033	39.508	21.04%
GAC-300-2	50.052	41.499	17.09%
GAC-400-2	50.034	39.405	21.24%
GAC-500-2	50.006	34.819	30.37%
GAC-600-2	50.009	38.924	22.17%
GAC-300-3	50.036	40.202	19.65%
GAC-400-3	50.030	39.142	21.76%
GAC-500-3	50.026	39.133	21.77%
GAC-600-3	50.010	39.517	20.98%

比较同一温度水平可发现, 保温时间由 1 h 延长至 3 h 时, Δm 变化并不单调。例如在 500℃ 条件下, Δm 在 2 h 达到最大 (30.37 %), 继续延时至 3 h 略有回落 (21.77 %), 呈单峰趋势。该现象说明: 2 h 内, 以易挥发及中等沸点 VOCs 的脱附 / 热解为主, 质量持续下降; 2 h 后, 残留难挥发组分已极少, 继续保温主要引起微孔壁炭的轻度烧蚀, 生成少量轻质气体逸出, 但同时部分热解焦在孔口再沉积, 使总质量损失率反而略有回落。

综合比较, 500℃ -2 h 条件下 Δm 达到最大值 30.37 %, 表明该参数可最大限度去除吸附质。上述结果不仅证实了温度与时间是热脱附过程的决定性因素, 也为后续孔隙结构演变及吸附性能恢复机理研究提供了质量基准。

3.3 热脱附颗粒炭孔隙结构分析

图 2 给出了再生前后样品的 N₂ 吸附 - 脱附等温线及孔径分布; 表 3 汇总了对应的比表面积、孔容及微孔率。原始废 GAC 虽拥有 1325 m² g⁻¹ 的高比表面积, 但微孔贡献率仅 30.9%, V_T 达 0.75 cm³ g⁻¹, 表明长期工业运行使高沸点有机物优先堵塞微孔, 介孔 / 大孔相对保存完整。随着再生温度由 300℃ 升至 600℃ (1 h), S_{BET} 呈先降后稳趋势: 300℃ 处理即可驱除大部分中 - 低沸点堵塞物, 微孔比例骤升至 90.6%, V_{mic}/V_T 由 22.5% 增至 83.7%; 400~500℃ 阶段残留高沸物进一步脱除, 但导致孔隙轻度收缩, 总表面积降至 578 m² g⁻¹; 600℃ 时过度烧蚀与再沉积达到平衡, S_{BET} 小幅回升至 623 m² g⁻¹, 微孔比例仍保持 88%。保温时间的影响更为显著: 以 500℃ 为例, 1 → 2 → 3 h 的 S_{BET} 呈 578 → 358 → 1037 m² g⁻¹ 的“V”形变化, 对应 V_T 由 0.25 → 0.19 → 0.54 cm³ g⁻¹, 微孔比例最终高达 96.2%, 说明 0~2 h 以脱附 - 热解清除为主, 2~3 h 残留焦油炭化并充当“原位活化剂”, 微扩孔效应使微孔体积与比表面积同步回升; 类似趋势在 300℃ -3 h 与 400℃ -3 h 亦得到验证。dV/dW 分布显示, 所有再生样品的最可几孔径稳定在 1.70~1.75 nm, 平均孔径由 2.27 nm 降至 1.7~2.1 nm, 证明热再生过程以“清除堵塞 + 微扩孔”为核心, 未显著扩大至介孔 / 大孔区。综合来看, 500℃ -3 h 兼具最高微孔比例 (96.2 %)、适中比表面积 (1037 m² g⁻¹) 及最大孔容 (0.54 cm³ g⁻¹), 兼顾“污染物零残留”与“孔隙高恢复”的再生平衡点, 可为后续 VOCs 再吸附提供充足的活性位点。

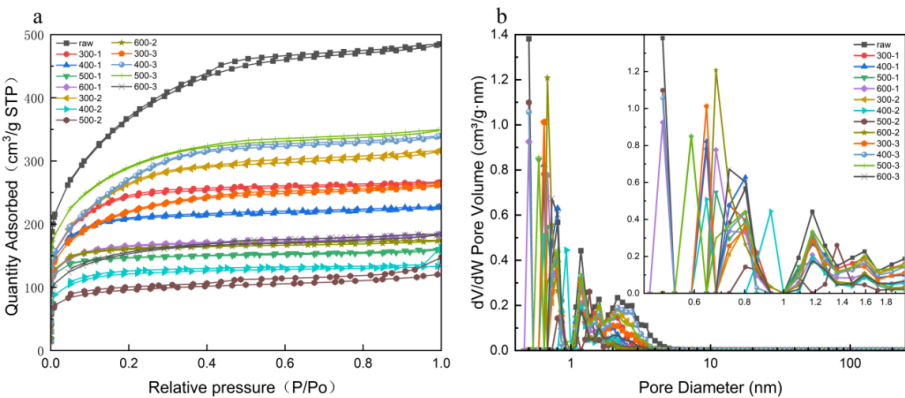


图 2 废活性炭及其再生样品的 (a) N₂ 吸附 - 脱附等温线 (77 K) 和 (b) 孔径分布曲线

表 3 热再生颗粒活性炭的孔隙结构参数

Sample	S_{BET} ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	$S_{\text{mic}}^{\text{a}}$ ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	$S_{\text{mic}}/S_{\text{BET}}$ (%)	V_{T}^{b} ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	$V_{\text{mic}}^{\text{c}}$ ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	$V_{\text{mic}}/V_{\text{T}}$ (%)	Da^{d} (nm)
Raw	1325.12	409.46	30.90%	0.75	0.17	22.51%	2.27
GAC-300-1	898.32	813.61	90.57%	0.41	0.35	83.74%	1.72
GAC-400-1	778.42	686.94	88.25%	0.35	0.28	80.36%	1.81
GAC-500-1	577.68	523.48	90.62%	0.25	0.20	81.81%	1.83
GAC-600-1	622.90	549.10	88.15%	0.28	0.22	78.24%	1.83
GAC-300-2	956.01	727.42	76.09%	0.49	0.32	65.74%	1.75
GAC-400-2	451.69	390.71	86.50%	0.25	0.16	63.78%	2.05
GAC-500-2	358.13	275.22	76.85%	0.19	0.11	57.90%	2.08
GAC-600-2	615.93	556.27	90.31%	0.27	0.22	82.18%	2.24
GAC-300-3	787.03	755.75	96.03%	0.41	0.36	88.94%	2.06
GAC-400-3	988.00	948.53	96.00%	0.53	0.47	89.63%	2.07
GAC-500-3	1037.02	997.19	96.16%	0.54	0.48	89.46%	2.08
GAC-600-3	550.42	516.81	93.89%	0.28	0.24	83.90%	2.13

注：a 微孔表面积；b 总孔体积；c 微孔体积；d 平均孔径

3.4 热脱附颗粒炭热性能分析

图 3 为废活性炭及其再生样品在 30–800 °C 范围内的 TG 与 DTG 曲线。废炭的失重过程明显分为三个阶段：① < 100 °C 失重约 15%，对应微孔内吸附水及低沸点溶剂挥发；② 100–300 °C 出现一个弱 DTG 峰，质量进一步降低约 10%，此阶段与吸附的乙苯、邻二甲苯等 C8-芳烃（沸点 136–144 °C）的脱附和初步热解行为相一致；③ 350–750 °C 呈现主要失重峰，失重显著（约 65%），最终残留质量仅 10.81%，该区间失重对应于高聚合焦油发生 C–C 键和 C–H 键断裂、缩合芳构化反应，并伴随大量 CH₄、H₂ 及轻质烃的释放。

经 300 °C 热脱附后，样品三个失重阶段基本消失，TG 曲线在 150 °C 附近进入平缓平台，特别是 350–750 °C 区间主峰完全消失，表明低温热再生已足以有效脱除全部可挥发性污染物，800 °C 残留质量显著提升至 91.7%。随再生温度升

高，残留质量依次增至 94.7%（400 °C）、95.1%（500 °C）和 97.3%（600 °C），所有再生样品 DTG 曲线几乎无特征峰。结果证实：① 废炭表面吸附的乙苯、1- 乙烯 -3- 亚甲基环戊烯、邻二甲苯等 VOCs 在 ≥ 300 °C 再生段已被彻底脱除；② 350–750 °C 区间原本显著的焦油裂解峰（约 65% 失重）被完全消除，表明高聚合碳质沉积物已提前热解并随载气排出；③ 残留质量随热处理温度升高而增大，主要与无机灰分解减少及无定型碳微烧蚀程度降低有关。延长热脱附时间也能增加残留质量，说明更长处理时间有利于残余焦油充分扩散并被裂解清除，减少 TG 测试过程中的烧蚀损失。

综上，热再生后样品在 350–750 °C 区间主失重峰完全消失，残留质量均 > 90%，且随温度与时间增加而稳步提高；DTG 曲线趋于平直，证实孔内焦碳已被有效清除，骨架炭热稳定性显著增强，为后续安全储存与循环吸附提供了热学支持。

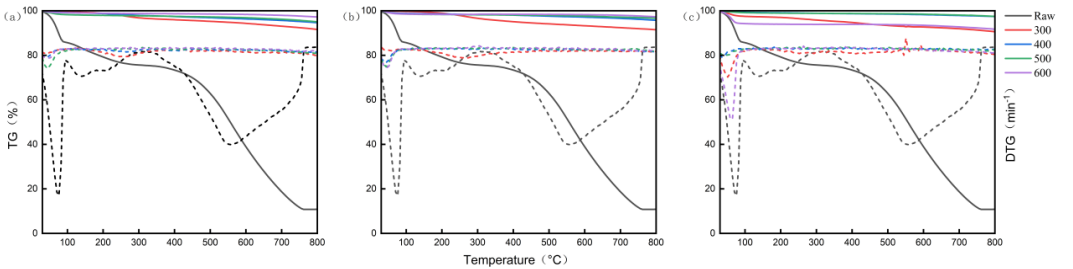


图 3 废活性炭及其再生样品的热重曲线

3.5 热脱附颗粒炭热微观形貌观察

废活性炭及经 300–600 °C 热再生 1–3 h 后的 SEM 微观形貌图（标尺 100 nm）。Raw 样品表面孔隙完全堵塞。经 300 °C 处理 1 小时的样品（300-1）中，狭缝状微孔初步暴露，但孔隙边缘仍被炭质碎片包围；延长热处理时间后，孔壁清晰度提高，微孔密度增加，这与 BET 测试结果中微孔占比跃升至 96% 一致。

在 400 °C 系列中，孔隙结构清晰度逐渐增加，微孔排列

规整，残留颗粒减少；500 °C 处理 1 小时的样品（500-1）孔隙结构最为清晰，局部出现合并形成的介孔；延长处理时间至 2–3 小时，表面残留少量炭粒，微孔熔融生成介孔，证实延长恒温时间可通过“原位活化”实现微孔扩张而不破坏骨架结构。500 °C -3 h 样品表面干净，孔隙边缘清晰。600 °C 系列则表现出过度烧蚀特征，孔壁变薄、边缘圆钝，部分微孔烧蚀融合生成介孔，表面趋于平整化，这与 BET 测试显示的孔体积下降和平均孔径增加的结果相吻合。

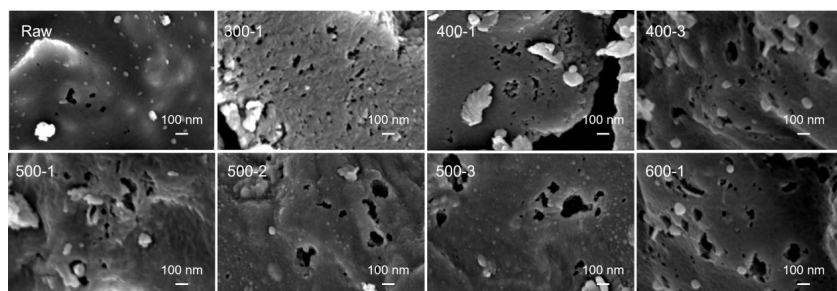


图4 废活性炭及热再生样品的表面微观形貌

3.6 热脱附颗粒炭热 XRD 分析

图5给出废炭及300–600℃再生1–3 h样品的XRD谱图。所有样品在 $2\theta \approx 23^\circ$ 和 43° 处分别出现宽化的(002)和(100)衍射峰,为典型乱层石墨结构,无杂质晶相。与Raw炭相比,300℃再生后峰形无明显变化,仅背底强度略降,表明低温段仅脱除部分低沸点有机物,对微晶结构影响有限。随再生温度升高,400–500℃系列(002)峰高增加、半高宽减小,峰位略向高角移动,表明焦油裂解后微晶层间束缚减弱,局部石墨片层趋于规整;500℃-3 h样品峰形最锐,说明污染物脱除最彻底,微晶重排程度最高。继续升温至600℃,峰形再次宽化,暗示过度热蚀在微晶边缘引入新缺陷,层间有序度下降。(100)面衍射强度随保温时间延长而增强,反映面内六元环缩合程度提高,与BET微孔比例升至96%一致。全谱未出现 CaCO_3 、 SiO_2 等无机杂质峰,说明灰分以无定形态存在,对碳骨架衍射无干扰。XRD结果从晶体学角度证实:500℃-3 h为最优再生条件,温度过高则导致微晶重新无序,与孔隙恢复规律一致,为后续高

吸附性能提供结构依据。

3.7 热脱附颗粒炭热 FTIR 分析

图6给出Raw炭及300–600℃再生1–3 h样品的FTIR谱图。Raw炭在 3430 cm^{-1} 出现宽-OH峰, 2925 、 2855 cm^{-1} 为 $-\text{CH}_2/-\text{CH}_3$ 伸缩, 1715 cm^{-1} 为 $\text{C}=\text{O}$, 1620 cm^{-1} 肩峰为芳环 $\text{C}=\text{C}$, 880 – 750 cm^{-1} 为芳环 $\text{C}-\text{H}$ 面外弯曲,与GC-MS检出的C8芳烃一致。300℃处理后,有机峰强度显著降低, 3430 cm^{-1} 峰变窄,表明低沸点污染物已大量脱除。随温度升高, 2925 、 1715 、 880 cm^{-1} 峰逐渐消失;至500℃谱线趋于平直,仅余 1620 cm^{-1} 弱峰(骨架芳环)和 1100 cm^{-1} 附近 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 醚键,说明污染物基本清除。保温时间由2 h延至3 h, 3430 cm^{-1} 峰进一步减弱,证实延长恒温有利于深层-OH及氢键水的去除。全程未出现硝基、磺酸基等新峰,表明热脱附无外来官能团引入,表面化学得以恢复。FTIR从分子层面验证:热脱附可彻底去除含氧、含氢有机碎片,与TG、BET结果互为印证,为再生炭高吸附性能提供表面化学保障。

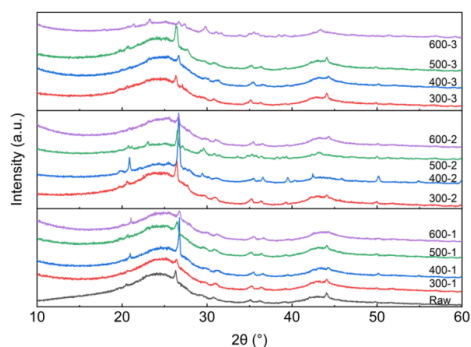


图5 废活性炭及其热再生样品的XRD谱图

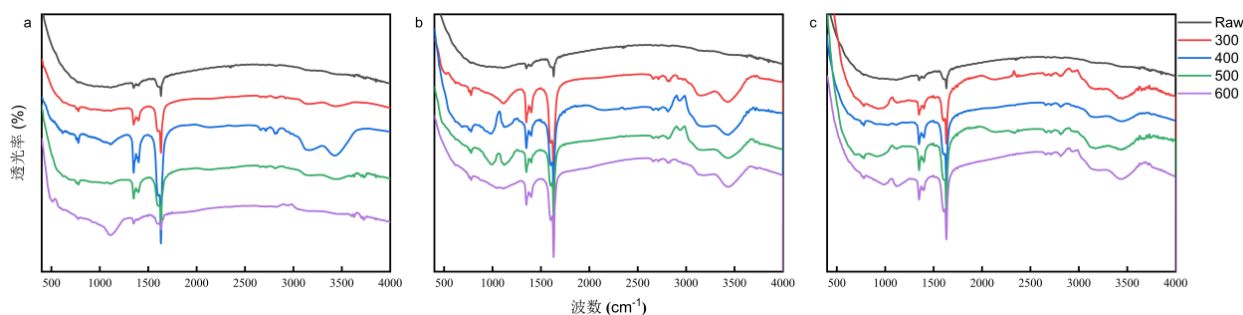


图6 废活性炭及热再生样品的FTIR光谱(a: 1 h, b: 2 h, c: 3 h)

4 结语

本研究系统考察了热脱附温度（300–600℃）与保温时间（1–3 h）对吸附 C8 芳烃废颗粒活性炭理化性能的影响，结果表明：300℃ -1 h 即可彻底脱除乙苯、邻二甲苯等特征 VOCs，TG 中 350–750℃ 焦油裂解峰随之消失，残留质量由 10.8% 升至 > 90%，证实污染物脱除阶段可在较低能耗下完成；然而，孔隙恢复呈现明显的时间依赖性，500℃ -2 h 虽获得最大失重率（30.37%），却比表面积降至 358 m²/g，延长至 3 h 后微孔比例升至 96.2%，总孔容达 0.54 cm³/g，BET 面积恢复至 1037 m²/g，实现最佳孔隙重建；SEM、XRD 与 FTIR 联合证实，500℃ -3 h 孔缘锐利、无沉积，微晶重排度最高，表面官能团恢复洁净，炭骨架热稳定性优异；综合失重、孔隙、热稳定性与能耗四项指标，500℃ -3 h 为“孔隙恢复最佳”条件，500℃ -2 h 可作为“脱除效率最高”的参考节点，工业放大推荐采用 500℃ -2.5 h（中间值优化）或

500℃ -3 h，以兼顾再生活性、机械强度与运行成本。本研究为喷涂、印刷等行业废活性炭的现场再生及 VOCs 治理提供了可直接放大的工艺参数与理论依据。

参考文献

- [1] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(1): 48-55.
- [2] 马堂文. 活性炭吸附技术在重点行业 VOCs 治理中的应用研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(11): 183-185.
- [3] 徐遵主, 金小贤, 张纪文, 等. 工业 VOCs 治理用活性炭生产与应用研究进展[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(6): 78-82.
- [4] A-T Hoang, Kumar S, Lichtfouse E, et al. Remediation of heavy metal polluted waters using activated carbon from lignocellulosic biomass: An update of recent trends[J]. Chemosphere, 2022, 302134825.
- [5] 周红阳, 周逸寰, 张连秀, 等. VOCs 在活性炭中的堆积: 形成机制及影响因素[J]. 化工进展, 2023, 42(11): 5969-5980.