

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°C）可脱除低沸点 VOCs，中温段（300–500°C）有利于焦油裂解，> 500°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 300–600°C、1–3 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（Φ 4 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°C min⁻¹ 升温速率加热至 300–600°C，保持恒温 1–3 h。全程保持 300 mL/min 气流速率 N₂，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 分钟；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（30m × 250μm × 0.25μm）进行，初始柱温为 40°C，保持 5 分钟。随后，以 8°C /min 的速率升温至 220°C，保持 3 分钟；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 至 450 amu，以实现对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 1–2 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°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° min⁻¹，扫描范围为 5° – 80°，铜靶材，功率为 40 kV × 40 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 C₈H₁₀ 分子骨架，沸点介于 136–144 °C，分子尺寸约 0.6–0.7 nm，与活性炭微孔孔径 (< 2 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 300–600°C、1–3 h 热脱附后的

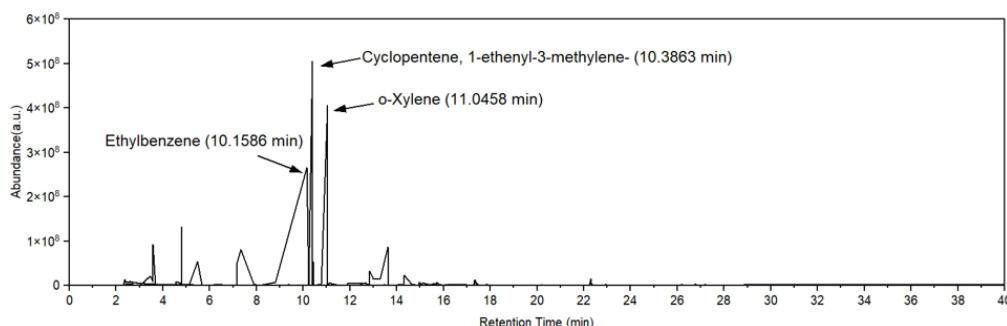


图 1 废颗粒活性炭表面 VOCs 的 GC-MS 总离子流图

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。

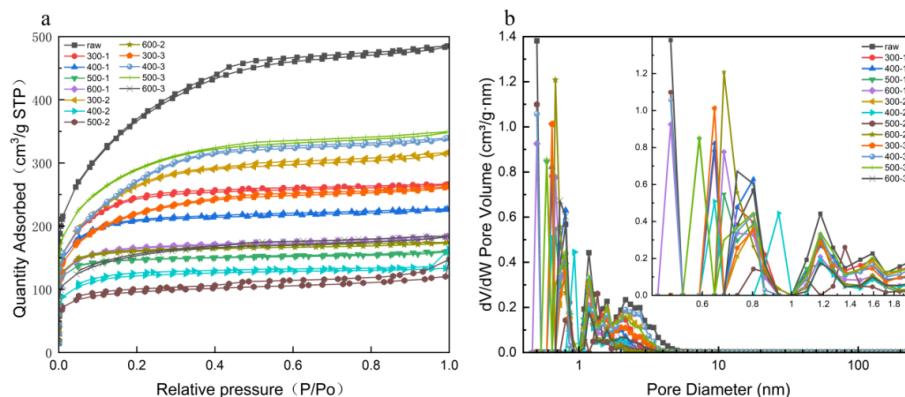
图2 废活性炭及其再生样品的(a) N₂ 吸附 - 脱附等温线 (77 K) 和 (b) 孔径分布曲线

表3 热再生颗粒活性炭的孔隙结构参数

Sample	$S_{\text{BET}} (\text{m}^2 \text{ g}^{-1})$	$S_{\text{mic}}^{\text{a}} (\text{m}^2 \text{ g}^{-1})$	$S_{\text{mic}}/S_{\text{BET}}(\%)$	$V_T^{\text{b}} (\text{cm}^3 \text{ g}^{-1})$	$V_{\text{mic}}^{\text{c}} (\text{cm}^3 \text{ g}^{-1})$	$V_{\text{mic}}/V_T(\%)$	$D_a^{\text{d}} (\text{nm})$
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; ②100–300°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; ③350–750°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-乙基-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; ②350–750°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, 证实孔内焦炭已被有效清除, 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。

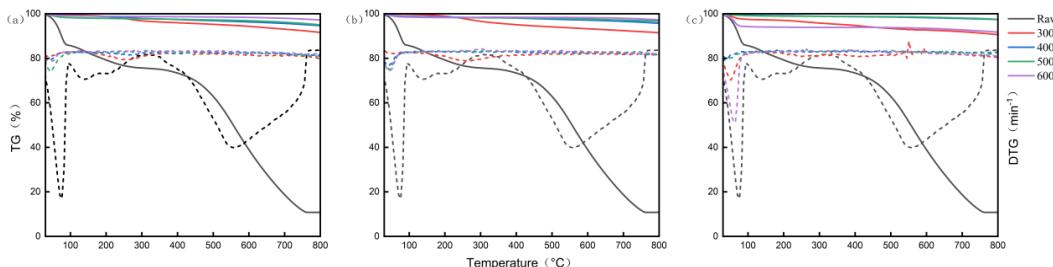


图3 废活性炭及其再生样品的热重曲线

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, 狹缝状微孔初步暴露, 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。

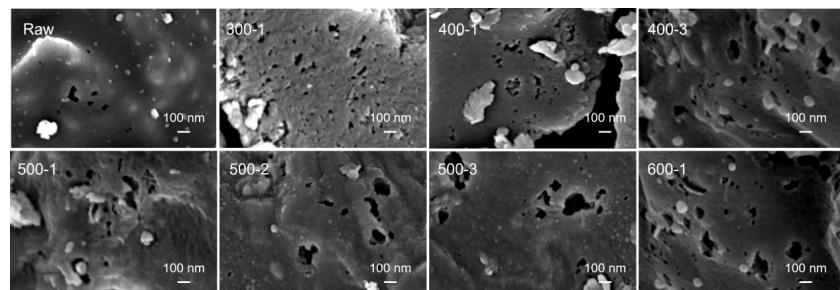


图4 废活性炭及热再生样品的表面微观形貌

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，说明灰分以无定形状态存在，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C=O， 1620 cm^{-1} 肩峰为芳环C=C， 880 – 750 cm^{-1} 为芳环C-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C-O-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。

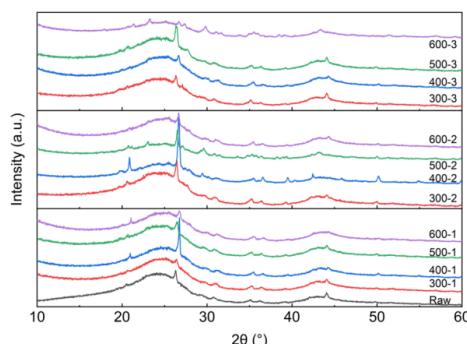


图5 废活性炭及其热再生样品的XRD谱图

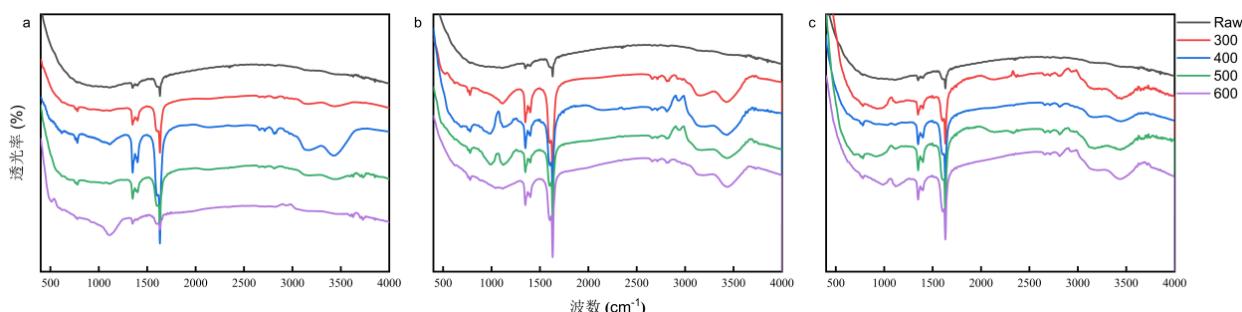


图6 废活性炭及热再生样品的FTIR光谱 (a: 1 h, b: 2 h, c: 3 h)

4 结语

本研究系统考察了热脱附温度(300–600°C)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°C -1 h即可彻底脱除乙苯、邻二甲苯等特征 VOCs, TG 中 350–750°C 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°C -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°C -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°C -3 h 为“孔隙恢复最佳”条件,500°C -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°C -2.5 h(中间值优化)或

500°C -3 h,以兼顾再活性、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.