

活化时间诱导沥青基活性炭结构演化与吸附性能研究

苏子扬, 吕 垣, 王 宁, 文锡量, 程俊霞*

辽宁科技大学化学工程学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年3月25日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年5月12日

摘 要

活性炭因具有高比表面积、可控孔径分布及优异的化学表面可调性, 是高效吸附挥发性有机物(VOCs)的理想材料。本研究以乙烯焦油沥青(ETP)为原料, 采用预氧化结合水蒸气活化法制备富氧球形活性炭(SAC), 并通过单因素实验探究活化时间对其结构演化与吸附性能的影响。傅里叶变换红外光谱(FT-IR)证实预氧化处理提升了沥青中的含氧官能团含量; 热重分析表明预氧化增强了沥青的热稳定性, 为后续结构调控奠定了基础。X射线衍射(XRD)和拉曼光谱(Raman)结果表明, 当活化时间达到90 min时, 所制备活性炭的缺陷密度为7.64, 层间距 d_{002} 为0.39 nm。高缺陷密度与扩大的层间距产生协同作用, 使得该材料在常温下对甲醇的平衡吸附量达307 mg/g。经历4次再生后, 其脱附率仍保持91.3%。本研究明确了活化时间对沥青基活性炭结构及其VOCs吸附性能之间的构效关系, 为高效VOCs吸附材料的制备工艺优化提供了实验依据。

关键词

沥青基活性炭, 活化时间, 微观结构, VOCs吸附

Study on the Activation Time-Induced Structural Evolution and Adsorption Performance of Pitch-Based Activated Carbon

Ziyang Su, Yuan Lyu, Ning Wang, Xiliang Wen, Junxia Cheng*

Chemical Engineering College, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: March 25, 2026; accepted: April 29, 2026; published: May 12, 2026

*通讯作者。

文章引用: 苏子扬, 吕垣, 王宁, 文锡量, 程俊霞. 活化时间诱导沥青基活性炭结构演化与吸附性能研究[J]. 纳米技术, 2026, 16(2): 32-41. DOI: 10.12677/nat.2026.162005

Abstract

Activated carbon is an ideal material for efficiently adsorbing volatile organic compounds (VOCs) due to its high specific surface area, controllable pore size distribution, and excellent chemical surface tunability. In this study, ethylene tar pitch (ETP) was used as the raw material to prepare oxygen-rich spherical activated carbon (SAC) through a combination of pre-oxidation and steam activation. The influence of activation time on the structural evolution and adsorption performance of the pitch-based activated carbon was systematically investigated via single-factor experiments. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) confirmed that pre-oxidation treatment increased the content of oxygen-containing functional groups in the pitch, while thermogravimetric analysis indicated that pre-oxidation enhanced the thermal stability of the pitch, laying the foundation for subsequent structural regulation. X-ray diffraction (XRD) and Raman spectroscopy results showed that when the activation time reached 90 min, the defect density of the prepared activated carbon was 7.64, with an interlayer spacing (d002) of 0.39 nm. The synergistic effect of high defect density and enlarged interlayer spacing enabled the material to achieve an equilibrium adsorption capacity of 307 mg/g for methanol at room temperature. After four regeneration cycles, the desorption rate remained as high as 91.3%. This study clarifies the structure-activity relationship between activation time and the structure and VOC adsorption performance of pitch-based activated carbon, providing experimental insights for the optimization of preparation processes for efficient VOC adsorption materials.

Keywords

Pitch-Based Activated Carbon, Activation Time, Microstructure, VOCs Adsorption

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当前“双碳”战略与环境治理需求日益增加的双重驱动下，挥发性有机物(VOCs)作为臭氧和细颗粒物的重要前体物，其高效治理是当前大气污染防治领域的紧迫课题[1]。在众多治理技术中，吸附法因操作简便、成本相对低廉而广受应用，其核心在于高性能吸附材料的开发[2]。活性炭因其发达的孔隙结构和可调控的表面化学性质，被公认为最具潜力的 VOCs 吸附剂之一[3]-[5]。

寻求低成本、高附加值的碳前驱体是推动吸附技术大规模应用的关键[6]-[8]。石油化工行业产生的廉价沥青，来源广泛，碳含量高，是实现“以废治废”绿色循环理念的理想原料[9]。目前，水蒸气物理活化法是制备多孔碳材料的常用技术，它通过汽化反应($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$)选择性刻蚀碳骨架从而造孔[10]。以往研究多集中于探讨活化温度、水蒸气流量等因素的影响[11][12]，而系统性地研究活化时间这一关键动力学参数对沥青基碳材料结构演化规律及其与 VOCs 吸附性能间构效关系的研究尚不充分。

活化时间直接决定了水蒸气与碳基体的反应程度，是影响最终材料孔结构(如比表面积、孔径分布和孔隙体积)的核心因素。时间过短，活化不充分，孔隙未能有效开发；时间过长，则易导致已形成的微孔扩大甚至合并为大中孔，比表面积下降，并造成碳骨架的过度烧失，反而不利于对 VOCs 分子，尤其是小分子 VOCs 的吸附捕获[13]。

鉴于此，本研究以乙烯焦油沥青为原料，系统探究不同活化时间下制备的碳材料在其微观结构、晶

体形态及表面化学性质方面的演变规律。通过静态吸附实验,以典型 VOCs (如甲醇)为探针分子,评估材料的吸附容量与动力学特征,旨在深入揭示活化时间-微观结构-吸附性能三者之间的内在联系,为实现沥青基高性能 VOCs 吸附材料的可控制备提供理论支持与实践指导。

2. 实验部分

2.1. 原料及设备

实验原料:本实验以乙烯焦油沥青(ETP,软化点:280℃,灰分:0.09%)为主要原料,选用聚乙二醇(PEG,化学纯,国药集团化学试剂)作为黏合剂,甲醇作为性能测试介质,实验过程中统一使用去离子水。

样品制备设备:使用 BY-300 型荸荠造粒机(江苏泰州市制造机械二厂)完成沥青粉末的球形化成型;通过 101-00B 型电热恒温鼓风干燥箱(沪越仪器设备厂)实施预氧化处理;采用 OTF-1200X-S 型高温管式炉(合肥科晶材料技术有限公司)进行炭化与活化反应;SRJK-1-9 型管型电阻炉(沈阳市电炉厂)作为辅助加热装置。

材料主要表征仪器:利用 TAQ-500 型热重分析仪研究原料的热稳定性;通过 Nicolet iS10 型扫描电子显微镜观察样品表面形貌;采用 PANalytical B.V.型 X 射线衍射仪分析材料的晶体结构与微晶参数;使用 LabRAM HR Evolution 型拉曼光谱仪表征碳材料缺陷结构。

2.2. 沥青基超级活性炭的制备

将块状沥青研磨成细粉,称取适量样品置于荸荠造粒机中,在 45 r/min 的转速运行下均匀喷洒 10 wt% 聚乙二醇(PEG)溶液,促使沥青粉末黏结成球形颗粒,将其命名为 ARM。

随后进行氧化稳定化处理:将 ARM 转移至鼓风干燥箱中,在空气中以 0.3℃/min 的升温速度程序升温至 360℃,恒温保持 2 h,以获得热稳定性良好的氧化球体,标记为 PA。

接下来进行炭化处理:将 PA 置于管式炉中实施炭化,在氮气氛围下以 5℃/min 的速率升温至 500℃,保温 2 h,随后自然冷却至室温,得到炭化中间体,标记为 CA。

最后进行水蒸气活化:称取适量 CA 样品,在持续氮气环境下以 10℃/min 升温至 800℃,控制水蒸气流量为 1.5 mL/min,并设定不同的活化时间(30、60、90、120 min)进行实验。反应结束后停止通入水蒸气,在氮气保护下冷却至室温,所得产物命名为 SAC-X,其中 t 表示活化时间(min)。

2.3. 静态吸附及再生实验

为评估活性炭样品的吸附与再生性能,本实验静态吸附过程均在 10℃ 下进行,甲醇蒸汽的相对压力控制为 $P/P_0 = 1.0$ (饱和蒸气压状态)。首先将 SAC-t 在 80℃ 真空环境下脱气至质量恒定。随后将 20 mL 的甲醇溶液置于干燥器内静置 24 h,使其达到蒸气饱和状态。准确称取初始质量为 m_1 g 的吸附剂样品,置于含甲醇饱和和蒸气的密闭环境中进行吸附。定期称量样品质量,待其达到吸附平衡后记录饱和质量 m_2 g。根据下式计算平衡吸附量 q (mg/g):

$$q = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 1000 \quad (1)$$

将吸附饱和的样品在 70℃ 条件下热处理 2 h 进行再生,记录再生后质量 m_3 g。随后,重复上述吸附流程,测定再生后的饱和和吸附质量 m_4 g 通过以下两个指标评价再生效果:

脱附率 Z_1 反映再生过程中用甲醇的脱除效率:

$$Z_1 = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (2)$$

再生脱附率 Z_2 表征再生后样品的吸附能力恢复程度:

$$Z_2 = \frac{m_4 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (3)$$

3. 基本性能分析

3.1. 收率分析

在 800℃、水蒸气流量为 1.5 mL/min 的条件下, 设置不同活化时长(30、60、90、120 min)考察其对活性炭收率的作用, 结果如图 1 所示。

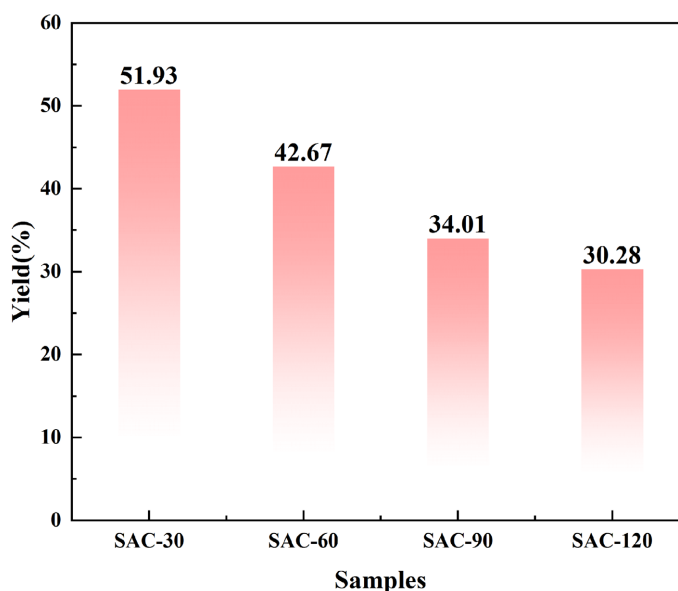


Figure 1. Relationship between activation time and yield
图 1. 活化时间与收率的关系

在图中可以看出, 随着活化时间的延长, 产物收率呈逐步下降趋势: 当活化时间 30 min 时, 收率可达 51.93%; 而延长至 120 min 后, 收率仅为 30.28%。这一现象的本质在于, 活化时间的增加会强化水蒸气与碳基体的刻蚀反应, 导致碳骨架的消耗也随之加剧, 孔隙结构进一步拓宽, 从而引起样品质量显著下降, 最终表现为产物收率的持续降低。

3.2. 热重分析

图 2 展示了 ETP (原样乙烯焦油沥青) 以及 PA (预氧化后沥青) 的热重曲线。结果显示, PA 在约 50℃ 处出现低温失重小峰, 这是由于物理吸附水与轻组分挥发。随着温度升高, ETP 在约 480℃ 处形成尖锐的主失重峰, 而 PA 的主失重峰宽化且后移至约 550℃, 峰值强度显著降低。

这一差异表明, 预氧化处理使沥青分子链引入含氧官能团并形成交联结构, 有效抑制了高温下的剧烈热解, 提升了热稳定性与热解过程中的可控制性。

3.3. 红外分析

利用红外光谱(FTIR)对沥青球(ARM)与预氧化样品(PA)的分子结构进行解析, 如图 3 所示。

根据图 3 分析, 在 1200~980 cm^{-1} 波数范围内, 沥青原料 ARM 的吸收峰无明显特征, 峰形平缓且强

度较弱；而经预氧化处理后的 PA 样品在 1170 cm^{-1} 附近出现明显的特征吸收峰，该峰归属于 C-O-C 键的伸缩振动，表明预氧化过程在沥青分子中引入了含氧官能团，且主要以醚键形式存在。这一结构变化能够显著影响沥青材料的表面化学性质。

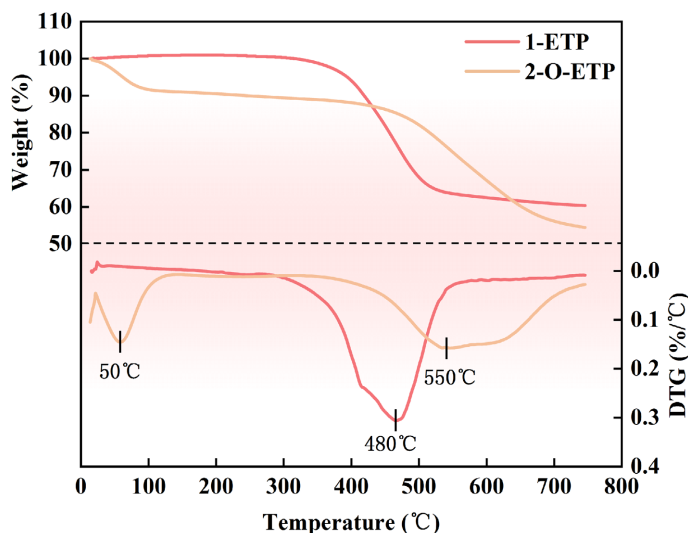


Figure 2. Thermogravimetric curves of ETP and PA

图 2. ETP 和 PA 热重曲线

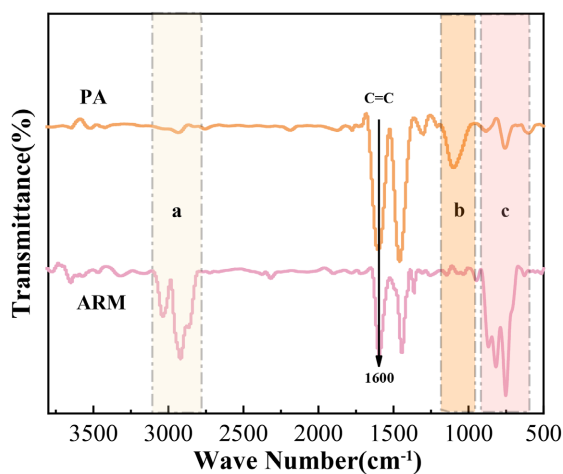


Figure 3. Infrared spectrum of the samples

图 3. 样品红外谱图

在 $3100\sim 2700\text{ cm}^{-1}$ 范围内(对应于芳香环外烷基的 C-H 振动), PA 样品的吸收峰强度显著减弱, 说明在预氧化过程中芳香环侧链的 C-H 键发生断裂。此外, 在 $500\sim 900\text{ cm}^{-1}$ 的指纹区(通常反映苯环取代模式的变化), 经过预氧化处理后, 该区间的谱图特征由原本的复杂取代转变为简单取代模式, 进一步证实预氧化不仅引入了含氧基团, 还伴随着芳香环外侧链的断裂, 甚至可能发生芳香环之间的聚合反应。

3.4. 活化时间对活性炭微晶结构的影响

采用 Raman 探究活化时间对于活性炭微晶结构的调控作用, 如图 4。

拉曼光谱中, G 峰对应理想石墨晶体的有序结构, 而 $D_1\sim D_4$ 峰均归为碳微晶的缺陷峰: D_1 峰反映碳

微晶面内杂原子导致的石墨烯层边缘缺陷, D_2 峰对应碳微晶排列不规整引发的表面层缺陷, D_3 峰源于无定形碳的非晶结构, D_4 峰则与类多烯造成的无序碳相关。通过缺陷峰总面积($D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5$)与 G 峰的比值 I_{All}/I_G 可表征碳微晶的缺陷程度, 该比值越大, 说明碳微晶的无序性越强(表 1)。各样品的拉曼光谱的分峰拟合结果见图 5。

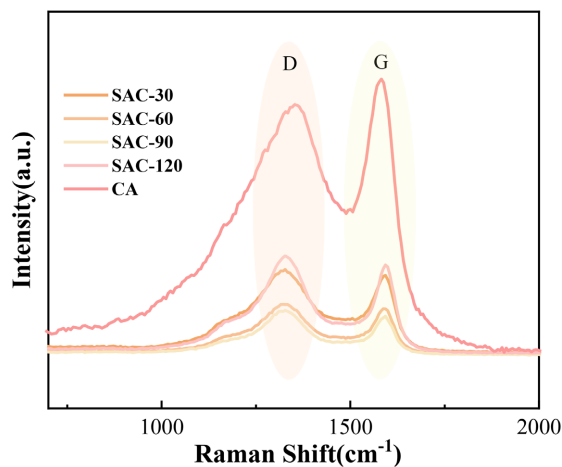


Figure 4. Raman spectra of samples at different activation times
图 4. 不同活化时间下样品的 Raman 谱图

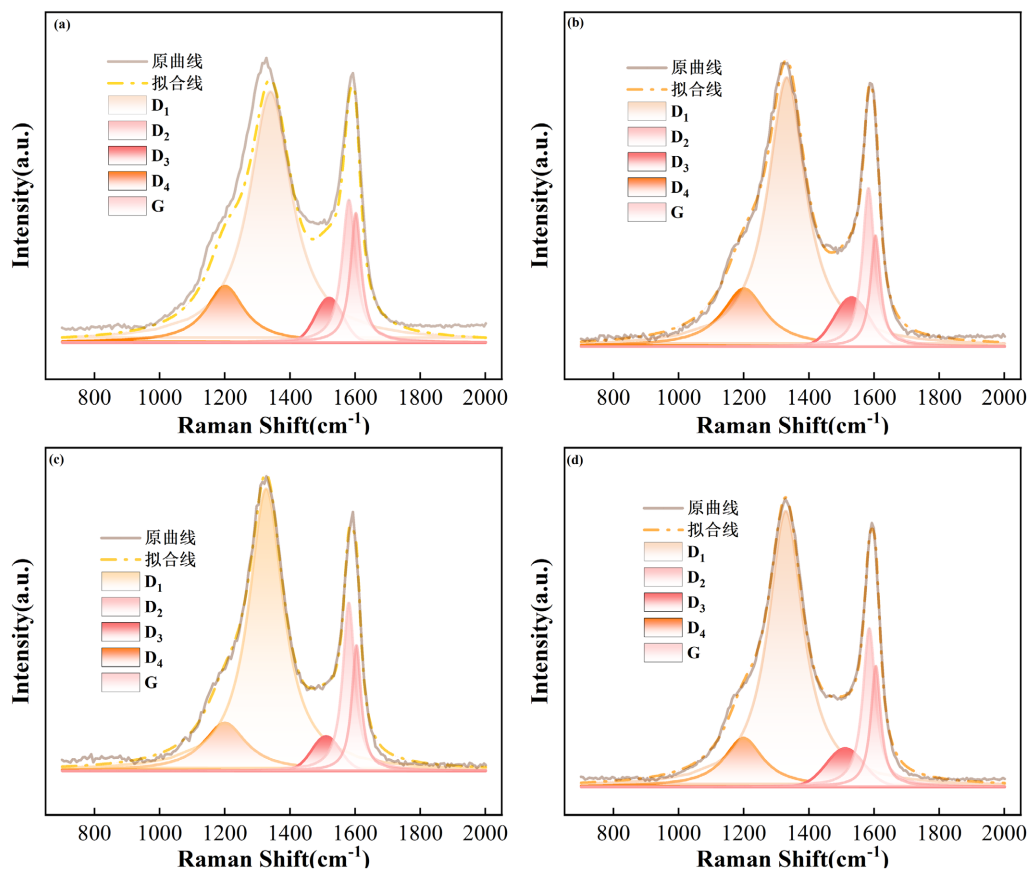


Figure 5. Raman peak fitting diagrams for (a) SAC-30, (b) SAC-60, (c) SAC-90, and (d) SAC-120
图 5. (a) SAC-30, (b) SAC-60, (c) SAC-90 和 (d) SAC-120 的 Raman 分峰拟合图

从图 5 可见, 不同活化时间样品的拉曼峰形虽然相近, 但与炭化料(CA)差异显著, 说明活化时间是改变碳微晶结构组成的关键因素。

Table 1. Area ratios of roman characteristic peaks to G peak for different CA samples

表 1. 不同 CA 样品拉曼特征峰与 G 峰的比值

样品	I_{D1}/I_G	I_{D2}/I_G	I_{D3}/I_G	I_{D4}/I_G	I_{All}/I_G
SAC-30	4.12	0.50	0.31	1.05	5.98
SAC-60	5.11	0.58	0.60	1.23	7.53
SAC-90	4.66	0.59	0.33	0.96	6.54
SAC-120	4.63	0.60	0.48	0.89	6.61

沥青经过预氧化与炭化后, 其轻组分大量挥发, 分子缩聚过程中产生的孔隙与裂隙为后续水蒸气活化提供了反应通道和活性位点。在活化 30 min 时, 水蒸气优先侵蚀炭材料表面[14], 进一步扩大原有缺陷, I_{All}/I_G 值(5.98)保持在较高水平, 表明无序结构仍然占主导。随着活化时间延长至 60 min 时, 水蒸气对碳骨架的刻蚀作用持续加深, I_{All}/I_G 值升至 7.53; 继续延长至 90 min 时, 该值回落到 6.54, 显示出缺陷密度的进一步增加。然而, 当活化时间达到 120 min 时, I_{All}/I_G 数值虽然略有升高(6.61), 但仍呈现出回落趋势。这一变化可归因于活化过程中同时发生的两个竞争性过程: 一方面, 水蒸气不断与碳反应, 造成新的缺陷; 另一方面, 在高温作用下, 碳微晶边缘区域发生结构重排, 部分缺陷被“修整”, 碳骨架趋于有序。在较长的活化时间下, 碳结构的有序化速率逐渐超过水蒸气的活化造孔速率, 从而导致 I_{All}/I_G 值回落。该结果表明, 活化过程中 I_{All}/I_G 值的演变受到缺陷生成与碳结构有序重整之间动态平衡的调控。

同时采用 XRD 分析不同活化时间下活性炭的晶体结构, 图 6 显示各样品在 $2\theta = 24^\circ$ 和 43° 处出现衍射峰——002 峰和 100 峰。对比 CA, 活化后样品的 002 峰向低角度偏移, 说明碳片层间距(d_{002})有所拓宽, 其具体参数如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 活化时长对于碳层结构存在显著调控作用: 在 30~120 min 范围内, 碳片层间距 d_{002} 呈现先扩张后收缩的特征, 这一变化对应水蒸气刻蚀对片层间作用力的动态调控; 而芳香片层堆积数 N 与单层芳香环缩合数 n , 相较于活化温度作用下的结构参数, 整体处于更低水平。

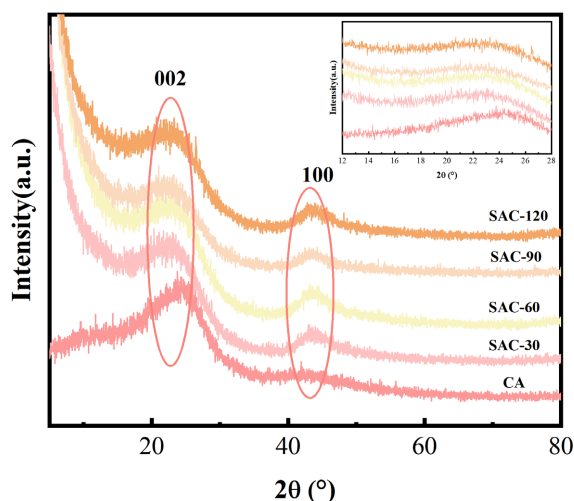


Figure 6. XRD spectra of samples at different activation times

图 6. 不同活化时间下样品的 XRD 谱图

这一差异的本质在于作用机制的分异：温度升高通过强热效应实现炭层的深度烧蚀，其对碳结构的改性具有“穿透性”；而活化时间的延长则是通过水蒸气对炭料表层的渐进式侵蚀，在拓展孔隙结构的同时，削弱了表层炭的有效堆积面积，进而弱化了芳香片层的堆叠效应和芳香环的缩合程度。

Table 2. Characteristic XRD data parameters

表 2. XRD 特征数据参数

Sample	d_{002}/nm	L_c/nm	L_a/nm	N	n
CA	0.3619	1.1221	0.5611	4.1003	5.3801
SAC-30	0.3820	0.9401	0.6502	3.4610	3.8330
SAC-60	0.3849	1.0027	0.5856	3.6053	4.1594
SAC-90	0.3907	0.9435	0.5058	3.4148	3.7315
SAC-120	0.3833	0.8707	0.7013	3.2716	3.4251

4. 沥青基活性炭吸附性能的研究

4.1. 活化时间对吸附性能的影响

图 7 呈现了所制备的活性炭在常温下静态甲醇吸附量的影响。活化 30 min 时，甲醇吸附量处于较低水平(126.3 mg/g)；随着活化时间延长至 60 min，吸附量呈现显著向上的趋势(218.9 mg/g)；当活化时间达到 90 min 时，吸附量达到实验体系的最大值(307.1 mg/g)；而活化时间达到 120 min 时，吸附量反而呈现下降的趋势(240.6 mg/g)。

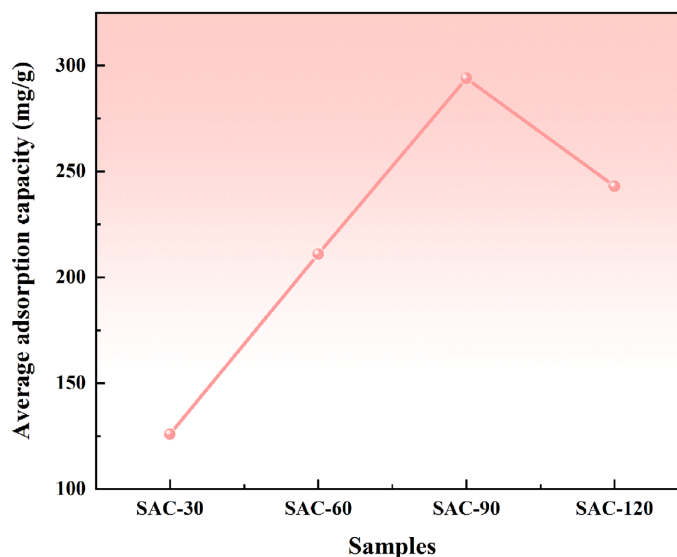


Figure 7. Equilibrium adsorption capacity of the sample at ambient temperature

图 7. 样品在常温下的平衡吸附量

从活性炭的微观结构演变角度分析，活化时间的 30 min，水蒸气优先与炭材料中的无定形碳发生刻蚀反应，由此形成的结构缺陷构成了吸附活性位点。然而，由于反应时间较短，缺陷数量有限，其吸附容量相对较低。随着活化时间延长至 60~90 min，水蒸气对炭骨架的刻蚀向纵深发展，活性炭的缺陷密度显著增加，层间距(d_{002})相应增大。该结构演变通过协同作用拓展了吸附活性位点与扩散通道，从而促使

吸附容量逐步升高[15]。当活化时间达到 120 min 后, 过度刻蚀导致部分孔隙转化为大孔结构[16], 使得材料的有效吸附比表面积下降, 吸附活性位点减少, 最终表现为吸附性能的减弱。

因此, 在本实验条件下, 活化时间为 90 min 是兼顾活性炭收率以及吸附性能的最适宜的活化时间。

4.2. 活性炭的再生性能分析

选取吸附性能最优的 SAC-90 样品, 开展循环吸附与脱附的再生性能测试, 如表 3 所示。

结果显示, 该样品展现出极为优异的循环再生性能, 首次循环即达到了 284.4 mg/g 的饱和吸附量, 脱附率为 97.2%, 初步体现了材料出色的再生脱附能力。经 4 次循环吸附-脱附后, 样品吸附量仍保持在 230 mg/g 以上, 脱附率稳定在 91.3%。总之, 样品仅出现轻微的性能衰减, 这表明材料凭借稳定的碳骨架与发达的孔隙结构具备着优异的长期循环稳定性。

Table 3. Methanol adsorption and regeneration performance indicators of SAC-90

表 3. SAC-90 对甲醇吸附及再生性能指标

循环次数	循环吸附容量(mg/g)	吸附率(%)	脱附量(mg/g)	再生效率(%)
0	307.1	-	294.5	95.9
1	284.4	92.6	276.4	97.2
2	278.4	90.8	264.0	94.8
3	254.2	87.7	245.0	93.2
4	232.2	84.5	212.0	91.3

5. 结论

以乙烯焦油沥青为原料制备了性能优异的活性炭, 探究活化时间对于材料微观结构演化及甲醇吸附以及再生性能的影响规律。改变活化时间可以精准调控碳材料的微观结构, 随着活化时间的延长, 呈现微观结构缺陷及碳微晶间层间距出现规律性的变化, 其中活化时间为 90 min 时的材料微观结构与吸附性能匹配度最优, 此时结构缺陷程度达到了 7.64。 d_{002} 为 0.39 nm, 对甲醇的平衡吸附容量达到了 307.1 mg/g。本研究实现了工业废弃物乙烯焦油沥青的高值化利用, 为 VOCs 吸附材料的制备提供了参考。

基金项目

辽宁科技大学研究生科技创新项目 2025 年(LKDYC202514), 辽宁科技大学大学生创新创业项目(2026 年)。

参考文献

- [1] 欧阳宇航, 陈英. 回收涤纶制备多孔碳材料及其吸附性能[J]. 印染, 2024, 50(2): 62-67.
- [2] 吴倩芳, 黄才洋, 李赛赛, 等. 废弃物木屑制备多孔碳材料及亚甲基蓝吸附性能研究[J]. 功能材料, 2023, 54(5): 5141-5147.
- [3] 米元章, 崔龙哲, 吕康乐. 碳材料吸附挥发性有机物的研究进展[J/OL]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 1-15. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=x5ZT7qxuO_oSJCY3XRhaVzBvTqLUNoJRhpy3CKmV9jwqugH-eNI18X_GkJxbS2vfPFRUIO6E1kdASnWZm4yHx0m8x5Pb4zxjLxAv3P7auXYiz-mkamd1rHRK0kxWSR14O2XzTqY5IZwLdceVlfCKtxLZKWZ0Ntu5O7giv3GN05L7brXh0QuilbsHDP11Z-9FCmXLmphVS3cQ&uniplatform=NZKPT&captchaId=ae928d0e-613c-45dc-83d3-8a3e13e0a297, 2026-01-04.
- [4] 王之春. 高效吸附剂在工业废水 VOCs 去除中的应用研究[J]. 清洗世界, 2025, 41(12): 127-129.
- [5] 薛浩, 李滨洋, 赵小辉, 等. 活性炭吸附法处理选矿废水 VOCs 废气的研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 11-20+203.

-
- [6] 钟安定, 虞育杰, 黄睿, 等. 面向 CO₂ 捕集的生物质衍生多孔碳构筑的研究进展[J]. 中国材料进展, 2025, 44(8): 710-719.
- [7] 杨春亮. 壳聚糖基功能碳材料构筑及其二氧化碳吸附与转化研究[D]: [博士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2025.
- [8] Mosquera, J.E., Delevingne, L., Delbecq, F., Daouk, E., Drelich, A., Saleh, K., *et al.* (2025) Synthesis and Optimization of Biobased Carbon Adsorbent Monoliths from Chitosan-Polybenzoxazine for Efficient CO₂ Capture. *RSC Advances*, **15**, 6783-6793. <https://doi.org/10.1039/d5ra00110b>
- [9] 孔顺利. 非常规石油沥青质制备碳基吸附材料及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [10] 尹银梅. 煤沥青基多孔碳材料制备及 CO₂ 吸附性能研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [11] 李景煜. 弱黏煤基活性炭孔结构调控机制及方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [12] 尹玉磊. 糠醛渣清洁制备生物炭/活性炭的研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [13] Bai, Y., Lv, P., Yang, X., Gao, M., Zhu, S., Yan, L., *et al.* (2018) Gasification of Coal Char in H₂O/CO₂ Atmospheres: Evolution of Surface Morphology and Pore Structure. *Fuel*, **218**, 236-246. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.105>
- [14] Lee, B., Kim, Y., Lee, H. and Kim, B. (2024) Preparation and Characterization of Pitch-Derived Activated Carbon Pellet for Butane Adsorption. *Carbon Letters*, **34**, 691-701. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00650-9>
- [15] 沈曾民, 张学军. 沥青氧化纤维制备活性炭纤维过程中孔隙结构的变化[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2000(1): 31-34.
- [16] Liu, Z., Ling, L., Qiao, W. and Liu, L. (1999) Effect of Hydrogen on the Mesopore Development of Pitch-Based Spherical Activated Carbon Containing Iron during Activation by Steam. *Carbon*, **37**, 2063-2066. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(99\)00058-5](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(99)00058-5)