

引用: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]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 39(3): 391-403
Citation: MI Yuanzhang, CUI Longzhe, LÜ Kangle. Progress on the adsorption of volatile organic compounds by carbon materials[J]. Journal of Liaocheng University (National Science Edition), 2026, 39(3): 391-403.
文章编号 1672-6634(2026)03-0391-13 DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025100006

碳材料吸附挥发性有机物的研究进展

米元章^{1,2}, 崔龙哲^{1,2}, 吕康乐^{1,2}

(1. 中南民族大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中南民族大学 资源转化与
污染控制国家民委重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 大多数挥发性有机物(VOCs)都具有毒性、致癌性和致畸性,对人类健康和生态环境都有着极大的危害,如何处理 VOCs 迫在眉睫。目前已经有许多 VOCs 处理技术,如燃烧法、吸收法、冷凝法、吸附法和生物法等。其中使用碳材料的吸附法是一种高效经济且应用广泛的方法。介绍了几种用于吸附 VOCs 的代表性碳材料(生物炭、石墨烯、碳纳米管、有序介孔碳和活性炭纤维)的研究进展,并对碳材料吸附 VOCs 的因素(碳材料和 VOCs 的性质以及吸附条件)进行分析。最后对碳材料吸附 VOCs 的现状进行总结并对其未来的发展方向作出展望。

关键词 挥发性有机物; 吸附; 碳材料

中图分类号 X701

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Progress on the adsorption of volatile organic compounds by carbon materials

MI Yuanzhang^{1,2}, CUI Longzhe^{1,2}, LÜ Kangle^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Resources Conversion and Pollution Control of the State Ethnic Affairs Commission, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

Abstract Most volatile organic compounds (VOCs) are toxic, carcinogenic and teratogenic, which are extremely harmful to human health and ecological environment. How to deal with VOCs is imminent. At present, there are many VOCs treatment technologies, such as combustion, absorption, condensation, adsorption and biological methods. Among them, the adsorption method using carbonaceous materials is an efficient, economical and widely used method. In this paper, the progress of several representative carbon materials (biochar, graphene, carbon nanotubes, ordered mesoporous carbon and activated carbon fiber) for VOCs adsorption is introduced, and the factors (the properties of carbon materials and VOCs and adsorption conditions) for VOCs adsorption by carbon materials are analyzed. Finally, the present situation of VOCs adsorption by carbon materials is summarized and its future development direction is prospected.

Keywords volatile organic compounds; adsorption; carbon materials

收稿日期: 2025-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51672312); 湖北省自然科学基金-黄石联合项目(2022CFD001)资助

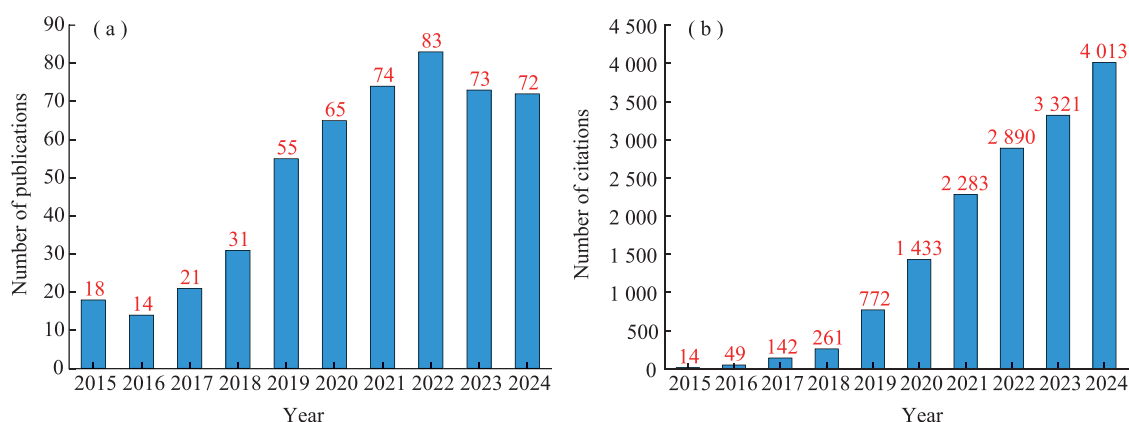
通信作者: 吕康乐, 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向: 环境光催化, E-mail: lvkangle@mail.scuec.edu.cn.

0 引言

挥发性有机化合物(VOCs)是一类具有相似理化性质(如沸点较低、分子量较小、饱和蒸气压较高)的有机物的统称,常温下 VOCs 的蒸发速率高,易挥发。绝大部分 VOCs,如酮、醛和多环芳烃等,都是剧毒和致癌的,长期接触 VOCs 的人可能有患癌症的风险^[1]。在空气质量研究中,VOCs 浓度通常以“ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ”为单位进行量化。尽管其浓度通常较低,但却在大气化学过程中扮演着极为重要的角色,在紫外光照射下可与氮氧化物发生光化学反应,是臭氧和细颗粒物的重要前体物^[2-3],也会对空气中二次气溶胶的形成及其氧化性和辐射平衡等产生影响。

VOCs 的来源十分广泛,总的来说可分为天然源和人为源两大类。自然排放的 VOCs 占 VOCs 的绝大部分,相较而言,人为源 VOCs 排放量较低,仅为前者的百分之几。但随着社会的发展和人类活动的不断增加,人为源的 VOCs 在环境中的比例呈现出上升的趋势,造成的危害也不断变大。天然产生的 VOCs 主要源于植物的生态功能性排放,其中, α -蒎烯、 β -蒎烯和异戊二烯等是最具代表性的物质,这些排放大多数是不可控的。人类日常活动,如驾驶、绘画和建筑施工等,是 VOCs 的重要人为来源^[4]。而燃烧不充分过程和涉及有机产品的挥发散发过程则是人为排放 VOCs 的主要过程,这些 VOCs 的化学成分极为丰富,包括苯、甲苯、二甲苯、甲醛等。其中,交通运输和溶剂使用是 VOCs 最主要的人为排放源,占据了人为排放总量的绝大部分。而石化行业则是汽车尾气和溶剂使用环节 VOCs 排放总量的最大来源。尽管 VOCs 涵盖多种有机化合物,但城市生态系统中的 VOCs 以苯、甲苯、乙苯和二甲苯为主,占比达 60%以上。

由于大多数 VOCs 对人类健康和生态环境都表现出极大的危害性,引起了人们的广泛关注。近年来,科研人员已开发出多种 VOCs 治理技术,包括燃烧法、吸收法、冷凝法、吸附法和生物法等。在众多处理方法中,吸附法因其具有吸附剂和吸附质可回收与再利用的优势,以及其相对低廉的成本和高效的处理能力,被广泛认同为一种高效且经济的解决方案。而碳材料由于具有比表面积大、孔隙结构丰富和吸附容量大等优点,被广泛应用于气体净化,特别是 VOCs 的处理与回收方面。因此,文章在 Web of Science 数据库中检索了过去十年中有关碳材料吸附 VOCs 的研究状况。结果显示,与碳材料吸附 VOCs 相关的研究论文数量[图 1(a)]以及其被引次数[图 1(b)]均呈现出迅猛增长的趋势。这一现象表明,基于碳材料的 VOCs 吸附技术处理 VOCs 的应用前景十分广阔。基于此,文章介绍了几种用于吸附 VOCs 的代表性碳材料(如生物炭、石墨烯等)的研究进展,并对碳材料吸附 VOCs 的因素进行了分析。最后对碳材料吸附 VOCs 的现状进行总结并对其未来的发展方向作出展望。



注:(a) 论文数量;(b) 引用次数年度分布图。

图1 在 Web of Science 数据库中以“VOCs”、“adsorption”和“carbon materials”为关键词检索出的结果

Fig. 1 Results retrieved from the Web of Science database using “VOCs”, “adsorption” and “carbon materials” as keywords

1 典型的碳材料

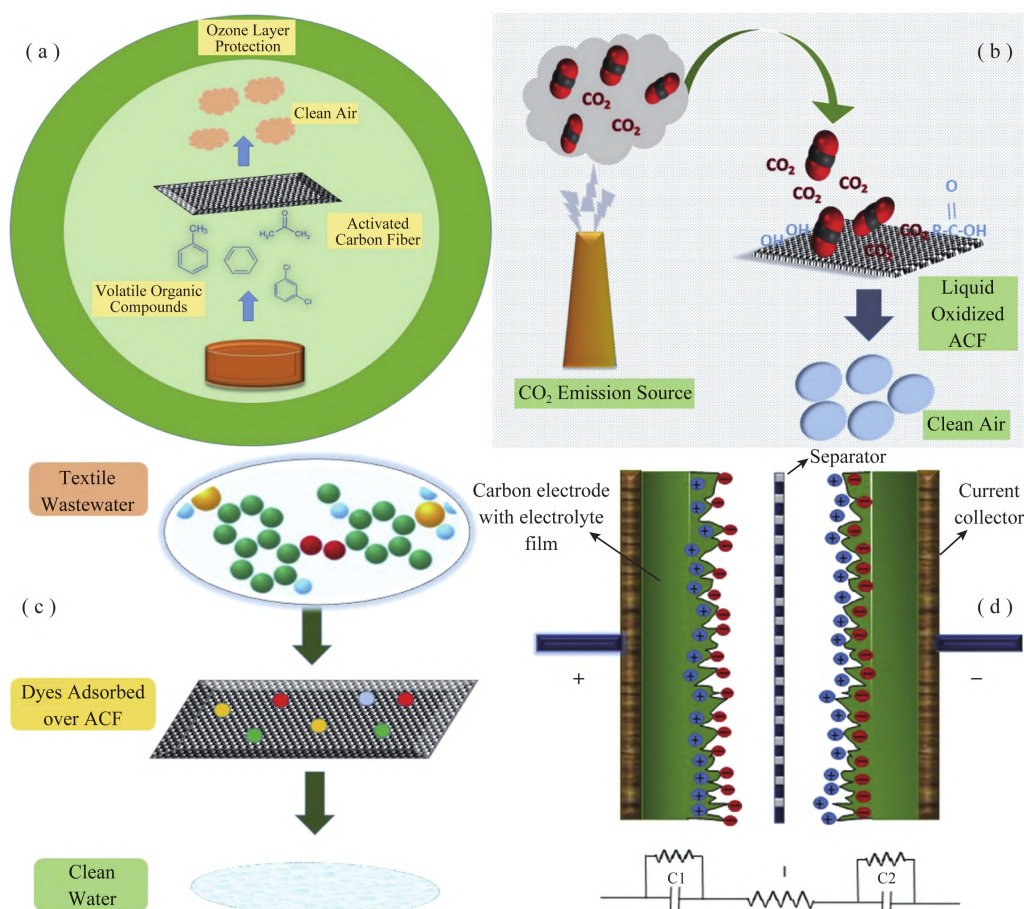
碳材料是一类具有大表面积、高孔隙度和强化学稳定性的吸附材料。其核心优势在于吸附容量大,可高

效吸附 VOCs,同时具备优异的再生性能。基于这些特性,碳材料已受到广泛关注。

传统碳材料以活性炭(AC)为代表。AC 是由有机含碳原料经过碳化和活化处理制得的多孔碳材料。AC 孔隙结构丰富,通常以微孔主导、介孔为辅,对多种分子尺度的 VOCs 均具有优良的吸附性能。同时 AC 的比表面积较大,通常为 $500\sim 1\,500\text{ m}^2/\text{g}$,为 VOCs 的吸附提供了充足的空间和活性位点。此外,AC 的化学稳定性优异,对多种环境条件均具有较好的耐受性,且具备优良的再生性,可在多个周期内重复使用^[5]。由于其出色的吸附能力,AC 在气液净化^[6]、污染气体去除、除臭及水处理方面得到了广泛应用。

1.1 活性炭纤维(ACF)

ACF 是由有机纤维经高温碳化、活化制备而成的碳质材料,相较于传统颗粒活性炭(GAC),其独特的一维纤维结构赋予其多维性能优势:孔径分布均匀且集中,孔径小、以微孔为主(占比 80%以上),可高效吸附小分子 VOCs;比表面积通常为 $1\,000\sim 2\,000\text{ m}^2/\text{g}$,远高于 GAC;密度低,相同体积下重量较 GAC 减少 50%左右;机械强度高,可编织成蜂窝构型等多种结构,对不同场景的适配度高;耐酸碱腐蚀,在 pH 2~12 范围内化学稳定性优异,且具备良好的耐高温性能。得益于上述优势,ACF 在水处理、空气净化和电化学(图 2)等领域应用广泛。



注:ACF 吸附 (a) VOCs、(b) CO_2 、(c) 染料及 (d) 其在电化学双电层电容器制造中的应用示意图。

图 2 ACF 的应用示意图^[7]

Fig. 2 Schematic diagram of ACF application^[7]

由于表面含有较少的含氧官能团,ACF 表现出较弱的极性,因此更倾向于吸附非极性 VOCs。Ge 等人采用磷酸浸渍棉花的方法制备了比表面积为 $1\,283\text{ m}^2/\text{g}$ 的棉基活性炭纤维(CACF),其对苯的吸附容量达 828.46 mg/g ,在工业废气处理、空气净化等场景下表现出巨大的应用潜力,且尤其适合非极性 VOCs 的捕获^[8]。Wu 等人研究了铁改性活性炭纤维对甲苯的吸附-脱附性能及吸附机理。当 ACF 负载 3% 铁并在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧时,饱和吸附量达到 218.12 mg/g ,较未改性样品提高了 24%,其对甲苯的吸附机理主要包括表面吸附($n\text{-}\pi$ 和 $\pi\text{-}\pi$ 相互作用)和孔隙填充^[9]。Kang 等人通过静电纺丝技术合成了表面覆盖着高纵横比氧化锌纳

米刺的复合材料 I@ZnO/ACNFs, 动态穿透测试表明, 0.1 g 的 I@ZnO/ACNFs 对质量分数为 1×10^{-4} 的甲苯的去除率达 99.9%, 优于某些 ZnO 和碳的复合材料, 且在 3 次连续 400 min 的循环中, 每个循环的突破曲线无明显变化, 证明材料拥有良好的可重复使用性^[10]。Bi 等人首先采用硝酸锌、氯化锌、醋酸锌对 ACF 进行超声-真空浸渍改性, 通过超声-真空辅助溶胶-凝胶法在改性 ACF 表面负载二氧化钛(TiO_2), 制备得到 $\text{TiO}_2/\text{ACF-Nc}$ 、 $\text{TiO}_2/\text{ACF-Hc}$ 、 $\text{TiO}_2/\text{ACF-Ac}$ 三种复合材料, 并研究了材料对甲苯的吸附性能, 研究发现, $\text{TiO}_2/\text{ACF-Ac}$ 复合材料对甲苯的吸附性能最佳, 其吸附饱和时间长达 21 h, 吸附容量达 151.2 mg/layer, 显著高于未改性的 ACF^[11]。

通过改性在 ACF 表面引入官能团可调控其极性, 进而增强对极性 VOCs 的吸附性能, 常用的官能团引入方法包括杂原子掺杂、负载其他材料等。Jiang 等人通过真空浸渍和绿色还原法将纳米银颗粒负载在 ACF 表面, 制备得到抗菌 ACF。在最优条件下制备的 Ag@ACF 对大肠杆菌的杀菌率为 91.1%, 表现出优异的抗菌活性, 同时材料也展示出对苯酚优异的吸附能力, 吸附容量达 290 mg/g, 约为原始 ACF 的 1.2 倍^[12]。Awad 等人使用静电纺丝技术制备聚丙烯腈/纤维素纳米晶体活性炭纳米纤维(ACnFs), 并以甲基乙基酮和环己烷作为吸附质测试了 ACnFs 的吸附性能, 二者的最大吸附容量分别达到 1.7 和 1.8 g/g, 显著高于商用活性炭纤维布和 GAC^[13]。不同 ACF 的结构特性及其 VOCs 吸附性能总结于表 1。

表 1 不同 ACFs 的结构特性及其 VOCs 吸附性能

Tab. 1 Structural characteristics and VOCs adsorption performance of different ACFs

材料	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	总微孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/ nm	VOCs	吸附性能	参考文献
CACF-750	1 549.00	0.718 6	0.611 9	1.856	苯	828.46 mg/g	[8]
$\text{Fe}_{0.03}/\text{ACF-500}$	1 175.48	0.580 0	0.290 0	1.150	甲苯	218.12 mg/g	[9]
I@ZnO/ACNFs (0.1 mol/L)	1 146.40	0.502 0	0.440 0	1.750	甲苯	对质量分数为 1×10^{-4} 的甲苯的去除率达 99.9%	[10]
$\text{TiO}_2/\text{ACF-Ac}$	1 163.61	0.530 0		1.810	甲苯	151.20 mg/layer	[11]
Ag@ACF	545.20	0.142 0		1.320	苯酚	290.00 mg/g	[12]
ACnFs	3 497.00	2.620 0	1.040 0	1.102	甲基乙基酮 环己烷	1 700.00 mg/g 1 800.00 mg/g	[13]

1.2 生物炭

生物炭是由生物质在缺氧或限氧条件下、于 300~900 °C 热解形成的富碳多孔材料, 其挥发分含量高、无机物含量低、孔隙结构丰富且价格低廉^[14]。生物炭的前驱体来源广泛, 主要包括农业废弃物(如稻壳、玉米秸秆)、林业剩余物(如阔叶木^[15])以及污泥等。图 3 展示了甲苯和对二甲苯为代表的 VOCs 在原始和改性生物炭中的主要吸附机制。

生物炭的物理化学性质决定了它的吸附性能, 而其物理化学性质又受原料特性和热解条件(如温度、压力等)的影响。因此, 不同的热解条件下得到的生物炭通常表现出较大的差异性。Pan 等人将木质素在不同压力下(-0.1、0 和 0.1 MPa)于 800 °C 热解 3 h 得到了负压生物炭 HNLB、常压生物炭 HALB 和高压生物炭 HELB 三种木质素基生物炭, 并研究了三者的物理化学性质和对苯的吸附能力。研究发现, HNLB 具有最高比表面积(1 577.48 m^2/g)、最大微孔体积(0.695 cm^3/g)、最低平均孔径(1.81 nm)和最好的苯吸附性能, 对苯的最大吸附量达 470.03 mg/g, 高于 HALB、HELB 及常规 AC(约 200~400 mg/g)^[16]。Lin 等人以竹废料为原材料, 通过程序化微波热解工艺制备了高疏水性多孔生物炭, 并将其与传统热解生物炭进行对比。结果表明, 程序化微波热解得到的生物炭表现出比传统热解生物炭更优异的性能: 制备时间短, 仅需 15 min, 传统热解则需 2~4 h; 比表面积达 455.9 m^2/g , 远高于传统热解下的 288.6 m^2/g ; 水接触角 $>150^\circ$, 属于超疏水性材料; 苯吸附量达 136.6 mg/g, 甲苯吸附量达 94.6 mg/g, 优于传统生物炭^[17]。

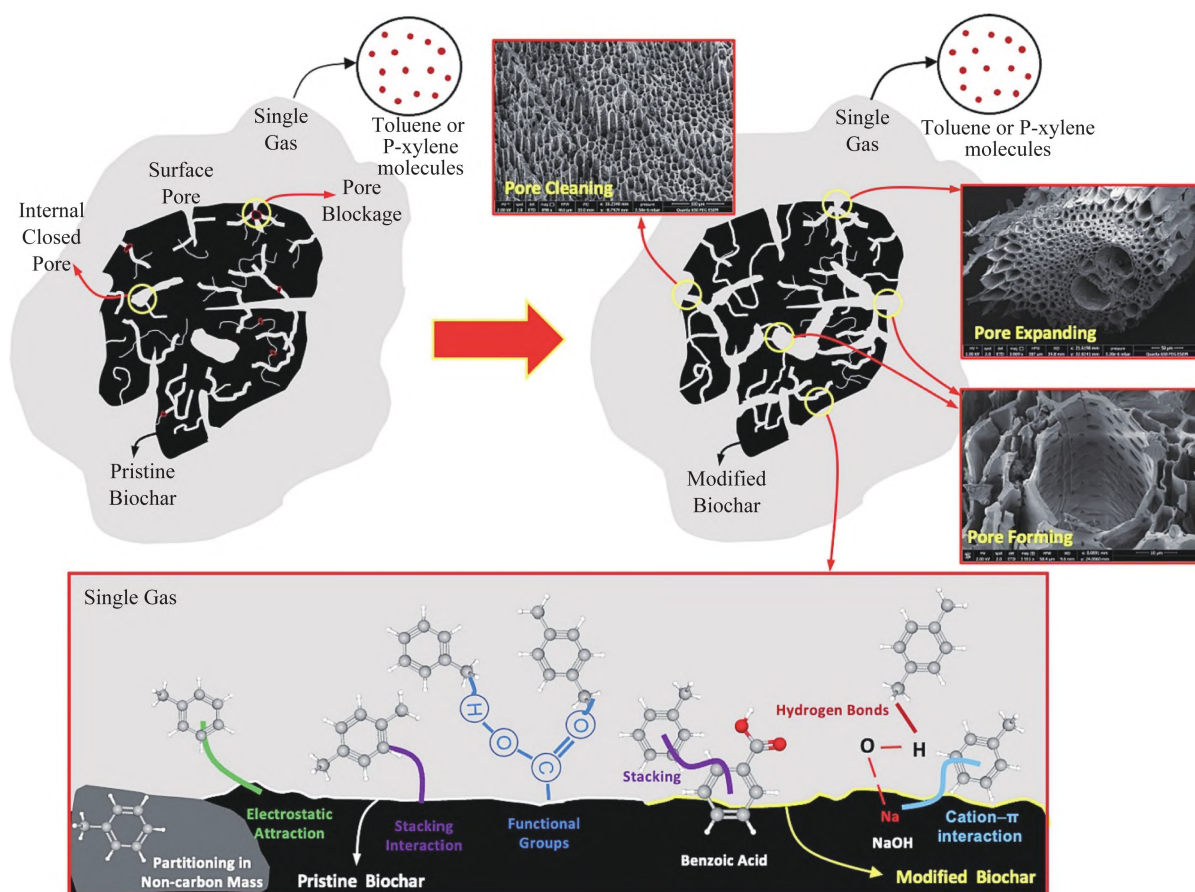


图3 甲苯和对二甲苯在原始和改性生物炭中的主要吸附机制^[15]

Fig. 3 The dominant adsorption mechanisms of toluene and p-xylene in the original and modified biochar^[15]

原始生物炭在吸附效率和选择性方面通常具有一定的局限性,而经过表面改性后吸附性会得到显著改善^[18],Mosleh 等人利用氢氧化钠碱处理加苯甲酸酸化的碱酸协同技术对来源于小麦秸秆和硬木的生物炭进行改性得到了 AWSBA1-3 和 AHWBA1-3 系列生物炭,并研究了其对甲苯和对二甲苯的吸附性能。结果表明,AWSBA1-3 和 AHWBA1-3 的比表面积和孔隙数量都显著增加,且表面出现更多的含氧基团。AWSBA3 和 AHWBA3 的甲苯吸附量分别增至 125.3 和 83.3 mg/g;对二甲苯吸附量更高,为甲苯的 1.1~1.6 倍^[15]。Zhang 等人对玉米秸秆生物炭进行球磨改性,并分别用氨水和双氧水处理得到氮掺杂和氧掺杂的改性生物炭,通过动态吸附实验研究改性生物炭对苯、邻二甲苯、间二甲苯和对二甲苯的吸附性能。实验数据表明,N 掺杂和 O 掺杂的生物炭对苯系 VOCs 的吸附容量显著高于未改性的生物炭,其中,N 掺杂的生物炭表现出最佳的吸附性能,对苯、邻二甲苯、间二甲苯和对二甲苯的吸附容量分别达到 110.49、125.89、120.37 和 130.21 mg/g^[19]。Zaman 等人以尿素作为氮源并采用盐模板法对木基生物炭进行改性,制备了 N 掺杂的介孔生物炭 BUPZ-X(X 为热解温度),并研究了 BUPZ-X 的催化氧化效率及吸附性能。研究发现,BUPZ-900 在 25 °C 的甲苯吸附容量达 283.85 mg/g,显著优于其他样品;BUPZ-600 在低温下的甲苯转化率最高,表现出最高的催化氧化活性^[20]。各种生物炭的结构特性及其对 VOCs 吸附性能总结于表 2。

1.3 碳纳米管(CNTs)

CNTs 是一种典型的一维纳米材料,具有无缝管状结构,拥有独特的电学、力学、物理及化学性能。根据构成 CNTs 的石墨烯片数量的不同,CNTs 可分为单壁碳纳米管(SWCNTs)和多壁碳纳米管(MWCNTs)。SWCNTs 直径 0.4~3 nm,内腔可直接捕获小分子 VOCs;MWCNTs 层间间距 0.34 nm,形成“管中管”限域效应,增强了对甲苯等大分子 VOCs 的吸附。CNTs 通常通过化学气相沉积(CVD)法、固相热解法、催化裂解法、电弧放电法和激光烧蚀法等方法制备。

表 2 不同生物炭的结构特性及其 VOCs 吸附性能

Tab. 2 Structural characteristics and VOCs adsorption performance of different biochars

材料	比表面积 /(m ² · g ⁻¹)	总孔体积 /(cm ³ · g ⁻¹)	总微孔体积 /(cm ³ · g ⁻¹)	平均孔径 /nm	VOCs	吸附性能 /(mg · g ⁻¹)	参考文献
HNLB	1 577. 48	1. 426	0. 695 0	1. 81	苯	470. 03	[16]
BC650Fe(5%)	455. 90				苯	136. 60	[17]
					甲苯	64. 60	
AWSBA3	98. 17	0. 173 6			甲苯	125. 30	[15]
AHWBA3	58. 83	0. 110 4				83. 30	
CN600-N	405. 61	0. 195 9	0. 184 4	1. 94	苯	110. 49	[19]
					邻二甲苯	120. 37	
					间二甲苯	125. 89	
					对二甲苯	130. 21	
BUPZ-900	582. 19	0. 104 0	0. 001 5	4. 15	甲苯	283. 85	[20]

凭借其一维纳米结构、大比表面积及独特的物理化学性质,CNTs 已被证明在 VOCs 吸附领域有巨大的应用前景。Jang 等人合成了 CNTs 海绵并将其作为气相色谱中 9 种痕量 VOCs 的预浓缩器,结果表明,材料对体积分数为 $36 \times 10^{-9} \sim 63 \times 10^{-9}$ 的九组分 VOCs 混合物的富集因子为 88(苯)至 323(甲苯、间二甲苯),脱附效率超过 96.5%,两次脱附后残留量低于 3.5%,检测限低至 $0.9 \times 10^{-9} \sim 2.6 \times 10^{-9}$,相比直接进样灵敏度提升了 200~300 倍,且在含二氧化氮和氨气的污染环境中,CNTs 海绵对芳香族 VOCs 的富集能力未受显著影响,证明 CNTs 海绵作为预浓缩材料在检测痕量芳香族 VOCs 中的应用潜力巨大^[21]。Yoosefian 等人采用密度泛函理论(DFT)中的 WB97XD 泛函和 6-311+G(d, p)基组来研究钯掺杂 SWCNTs (Pd/SWCNT-V)对 VOCs 如乙腈、苯乙烯和全氯乙烯的吸附能力,计算结果表明,Pd/SWCNT-V 对乙腈、苯乙烯和全氯乙烯的吸附能分别为-0.94、-1.27 和-0.54 eV,显著高于-0.5 eV 的物理吸附阈值,表现出强化学吸附,证明了 Pd/SWCNT-V 作为高效 VOCs 吸附剂的潜力^[22]。

基于 CNTs 表面易于改性的特点,人们开发了多种改性技术来增强其性能。Cheng 等人通过控制不同的沉积条件,使用 CVD 法在碳气凝胶表面生长 CNTs,以增强其对 VOCs 的吸附性能。结果表明,改性样品对邻二甲苯和邻二氯苯的最大吸附量分别为 145.0 和 178.3 mg/g,相较于原始样品分别提升了 30%和 35%。且经过 10 次再生循环后,性能仅分别下降了 7.9%和 5.6%^[23]。Wang 等人采用溶胶-凝胶法对 MWCNTs 进行改性,使二氧化锡与 MWCNTs 复合并掺杂铜离子得到了四种样品:M(纯化 MWCNTs)、M+Cu、M+Sn、M+Sn+Cu,利用静态吸附法测试了不同条件下的甲苯吸附性能,吸附实验显示,双金属改性显著提升吸附性能,M+Sn+Cu 的吸附效果最佳,吸附量与浓度和温度负相关,低温低浓度下吸附效果更好,25℃时 M+Sn+Cu 的饱和吸附量达 37.4 mg/g,是 M+Sn 的两倍,同时发现 SnO₂ 增强物理吸附,Cu 促进化学吸附,且由于甲苯分子较大,可能受限于 SnO₂ 的表面位阻,因此 Cu 的化学吸附作用更关键^[24]。

表 3 不同 CNTs 的 VOCs 吸附性能

Tab. 3 VOCs adsorption performance of different CNTs

材料	VOCs	吸附性能	参考文献
CNTs 海绵	苯、甲苯等 9 种 VOCs	对九组分 VOCs 混合物的富集因子为 88(苯)至 323 (甲苯、间二甲苯)	[21]
Pd/SWCNT-V	乙腈、苯乙烯和全氯乙烯	对乙腈、苯乙烯和全氯乙烯的吸附能分别为-0.94、-1.27 和-0.54 eV,表现出强化学吸附	[22]
CNTs-CAs	邻二甲苯、邻二氯苯	对邻二甲苯和邻二氯苯的最大吸附量分别为 145.0 和 178.3 mg/g,相较于原始样品分别提升了 30%和 35%	[23]
M+Sn+Cu	甲苯	25℃时的饱和吸附量达 37.4 mg/g,是 M+Sn 的两倍	[24]
PAN/CNTs	二甲苯	吸附效率为 90%左右,比纯 PAN 提升了 30%左右	[25]

Xie 等人以静电纺丝技术为基础,制备了聚丙烯腈/CNTs(PAN/CNTs)复合纳米纤维,并以二甲苯为吸附质研究了纯 PAN 和 PAN/CNTs 的吸附性能。VOCs 吸附实验表明,纯 PAN 纤维对二甲苯的吸附能力有限,仅为 58.6%至 60.6%,PAN/CNTs 复合材料的吸附效率明显提升,达 86.9%至 91.1%,表明 CNTs 的引入能够提高 PAN 纤维膜对 VOCs 的吸附效果^[25]。不同 CNTs 的 VOCs 吸附性能总结于表 3。

1.4 石墨烯

石墨烯是由单层碳原子以 sp^2 杂化形成的二维蜂窝状晶体,由于其独特的二维单原子层结构,石墨烯展现出超高的比表面积、卓越的化学稳定性以及优异的机械性能,这些特性使其能够有效吸附包括染料、有机物、污染气体及重金属离子在内的多种污染物。石墨烯的制备方法众多,其中最常见的是 CVD 法、超声分散法、外延生长法及氧化还原法等。图 4 展示了氧化石墨烯的二甲苯吸附机制。

石墨烯、改性石墨烯以及石墨烯基复合材料在气体吸附方面性能优异,在污染治理和空气净化等领域中皆有应用。Cheng 等人利用近红外激光照射法,成功在聚丙烯(PP)织物上形成激光诱导多孔氧化石墨烯涂层,进而制备出氧化石墨烯和 PP 的复合材料 L-GO,并对其进行了吸附实验以评估 L-GO 对 VOCs 的吸附性能。结果表明,L-GO 的二甲苯吸附容量达到 804 mg/g,同时 L-GO 的 VOCs 吸附速率高,在 30 s 时,L-GO 涂层的吸附率可达 98.8%,且在 60 min 后仍能保持 >98.5%的高吸附率,高于商业 AC^[26]。Nguyen 等人利用热剥离与分步氢氧化钾实现了石墨烯孔结构的精准调控,制备了具有大量微/介孔的热剥离氧化石墨烯(TEGO),BET 测试显示 TEGO 的

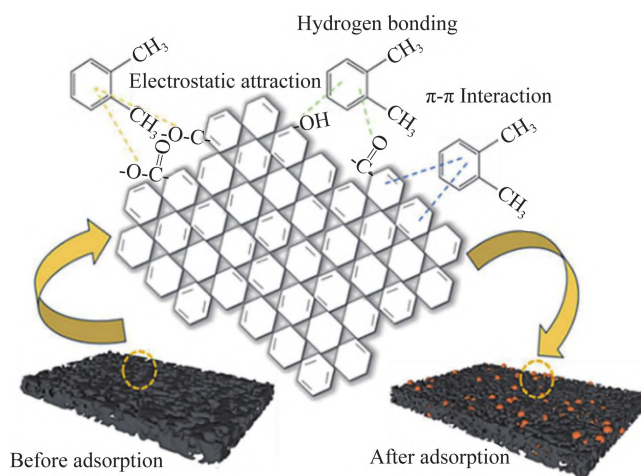


图 4 二甲苯在氧化石墨烯上的吸附机理^[26]

Fig. 4 Adsorption mechanism of xylene on oxidized graphene^[26]

氮气吸附等温线为 IV 型,比表面积达 $1\,261\text{ m}^2/\text{g}$,孔体积 $0.76\text{ cm}^3/\text{g}$ 。VOCs 吸附实验显示 TEGO 在初始 15 min 内对 BTX(苯、甲苯和邻二甲苯)的去除率达 $(88\pm 2)\%$,而后 60 min 即达到吸附平衡,TEGO 对邻二甲苯的最终去除率高达 $(98\pm 2)\%$,优于传统 AC;TEGO 对 BTX 的吸附容量为 $3.31\sim 3.68\text{ g/g}$ (误差士

表 4 不同石墨烯材料的结构特性及其 VOCs 吸附性能

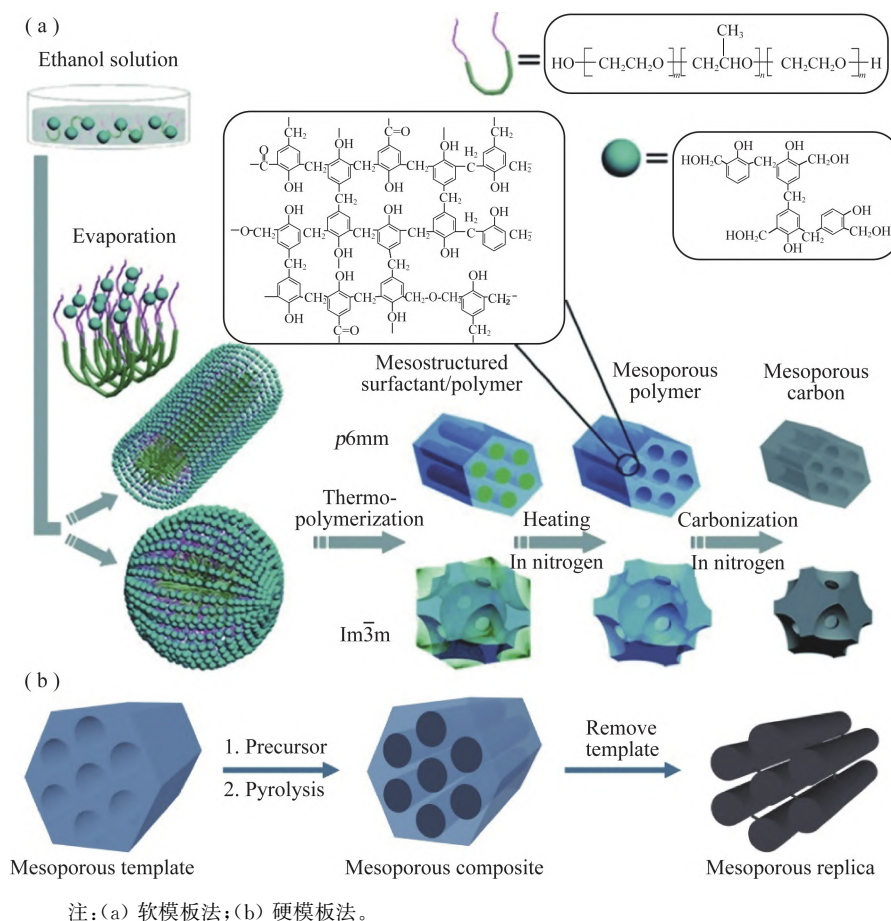
Tab. 4 Structural characteristics and VOCs adsorption performance of different graphene materials

材料	结构特性	VOCs	吸附性能	参考文献
L-GO	表面为松散多孔结构,比表面积达 $336.7\text{ m}^2/\text{g}$,孔隙尺寸在微米级且分布均匀	二甲苯	二甲苯吸附容量达到 804 mg/g ,30 s 时,L-GO 吸附效率达 98.8%,且在 60 min 后仍大于 98.5%	[26]
TEGO	呈现“蓬松”的层状结构,孔密度比原始材料显著增加,比表面积 $1\,261\text{ m}^2/\text{g}$,孔体积 $0.76\text{ cm}^3/\text{g}$,微孔占主导	BTX	15 min 内对 BTX 的去除率达 $(88\pm 2)\%$,60 min 内达到吸附平衡,TEGO 对邻二甲苯的最终去除率高达 $(98\pm 2)\%$;TEGO 对 BTX 的吸附容量为 $3.31\sim 3.68\text{ g/g}$	[27]
石墨烯复合无纺布	GNPs 均匀分布于纤维表面,硅胶粘合后形成稳定复合结构;硅胶强化后接触角提升至 146.5° ,远高于未改性织物(128.7°)	甲苯、苯、二甲苯	甲苯、苯、二甲苯的去除率分别为 78%、86%和 77%	[28]
CGO	三种材料均表现出多孔结构,并包含各种大小	苯、二甲苯、四氯化碳、正己烷、甲苯	CGO 对 5 种 VOCs 的吸附量范围为 $126\sim 166\text{ mg/g}$,显著高于 SGO($82\sim 146\text{ mg/g}$)和 PGO($74\sim 144\text{ mg/g}$),且 CGO 对甲苯的吸附量(166 mg/g)接近部分商业 AC 水平	[29]
SGO	小的孔隙,比表面积分别为 $76.448, 69.296$ 和 $72.653\text{ m}^2/\text{g}$ (对应 CGO、SGO 和 PGO),			
PGO	孔径分别为 $2.28, 2.02$ 和 1.81 nm ,孔体积分别为 $0.064, 0.048$ 和 $0.053\text{ cm}^3/\text{g}$			

0.02 g/g),显著高于常规 AC(通常~1.5 g/g)和部分有机金属框架(MOF)^[27]。Thi 等人将石墨烯纳米片超声分散于乙醇,浸渍无纺布后以硅胶粘合剂固定得到了一种同时兼顾过滤颗粒物和 VOCs 的新过滤材料,材料的甲苯去除率为 78%,优于未改性无纺布(63%),对苯、二甲苯的去除率分别达 86%和 77%,且经 4 次水洗循环后,VOCs 去除效率仅下降 5%,表明复合材料耐久性高^[28]。Mishra 等人利用三种不同的生物质废弃物作为石墨前驱体,通过改进的 Hummers 法合成了 SGO、PGO 和 CGO 三种氧化石墨烯,并评估其对苯、二甲苯、四氯化碳、正己烷和甲苯的吸附性能。实验显示 CGO 对 5 种 VOCs 的吸附性能最佳,吸附量为 126~166 mg/g,显著高于 SGO(82~146 mg/g)和 PGO(74~144 mg/g),且 CGO 对甲苯的吸附量(166 mg/g)接近部分商业 AC 水平^[29]。不同石墨烯材料的结构特性及其 VOCs 吸附性能总结于表 4。

1.5 有序介孔碳(OMC)

OMC 首先由 Ryoo 及其同事使用有序介孔二氧化硅作为硬模板制备而来^[30]。但这种硬模板法存在一些严重的问题,如需要硬模板、合成效率低、成本高等。为了解决这些问题,人们以酚醛树脂作为碳源、二氧化硅作为三嵌段共聚物、表面活性剂作为结构导向剂开发出了软模板法^[31-32],硬模板法与软模板法的制备流程如图 6 所示。



注:(a) 软模板法;(b) 硬模板法。

图 5 合成 OMC 的示意图^[33]

Fig. 5 Schematic diagram of synthesizing OMC^[33]

由于 OMC 表现出的优越性能,如低电阻率、高比表面积、可调的孔隙结构等,OMC 最初被用于能量储存和催化领域^[32,34]。除此之外,OMC 在污染物处理中也表现出巨大的潜力,如重金属离子去除、有机染料去除、VOCs 吸附、抗生素选择性吸附^[35]等。Hou 等人通过实验和分子模拟的方法,探讨了 OMC 对萘的吸附性能。实验显示,随着孔径从 2 nm 增加到 8 nm,制备的 OMC 对萘的吸附量先增加后减小,孔径为 4 nm 的 OMC 的吸附量最高,达到了 1 284 mg/g。萘与甲苯、丙酮或水的共吸附实验表明,OMC 对萘具有良好的吸附选择性,在低浓度甲苯和丙酮以及高相对湿度的存在下,OMC 对萘的吸附性能几乎不受影响^[36]。

Liu 等人采用浸涂法结合溶剂蒸发诱导自组装策略,制备了一层由石墨纤维支撑的 OMC 薄膜并将其作为固相微萃取涂层,分析了其对 VOCs 的萃取性能。研究发现,OMC700 纤维对 BTEX(苯、甲苯、乙苯和二甲苯)、PAHs(萘、蒽、菲、荧蒽和芘)等非极性 VOCs 表现出高灵敏度,萃取效率显著优于商业涂层;二者的萃取效率是商用聚二甲基硅氧烷的 2.0~5.5 倍和 2.6~3.8 倍。因 OMC350 纤维表面相对亲水,具有大量极性基团,因此更适合萃取极性氯酚类^[37]。Lian 等人研究了 OMC 的纹理参数和表面特性对 BTEX 吸附性能的影响。通过硼酸增加 OMC 的孔径和比表面积,并使用柠檬酸引入含氧功能基团,使其总吸附容量达到 142 mg/g,比原始 OMC 提高 40.5%,显著提升了其对 BTEX 的吸附能力,含氧功能基团(如羧基和羟基)的增加是吸附性能提升的主要原因^[38]。Konggidinata 等人以蔗糖为碳源,通过硬模板法制备了 OMC,并对 OMC 的 BTEX 吸附性能进行了研究。结果表明,OMC 的 BTEX 总吸附容量达到了 101 mg/g,比商用 AC 高出 27%,不同芳烃的吸附容量从高到低依次为二甲苯、乙苯、甲苯和苯,此外还发现对 BTEX 的吸附过程是物理吸附、吸热且自发的^[39]。Gao 等人通过限域生长法将钛簇锚定在 OMC 孔道内,再原位生长 NH₂-MIL(Ti)-125 晶体,形成“疏水外壳-微孔 MOF 内核”的复合结构[NH₂-MIL(Ti)-125@OMC],发现 NH₂-MIL(Ti)-125@OMC 在 P/P₀=0.001 的低压下对甲苯吸附容量达 3.86 mmol/g,是纯 NH₂-MIL(Ti)-125 (0.52 mmol/g)的 7.4 倍,同时在 80%相对湿度下,材料的甲苯工作容量是纯 MOF 的 1.5 倍^[40]。不同 OMC 的结构特性及其 VOCs 吸附性能见表 5。

表 5 不同 OMC 的结构特性及其 VOCs 吸附性能

Tab. 5 Structural characteristics and VOCs adsorption performance of different OMCs

材料	结构特性	VOCs	吸附性能	参考文献
OMC-4	具有有序的孔通道、理想的孔径和较窄的孔径分布,表面较为粗糙,比表面积为 373 m ² /g,总孔体积为 0.36 cm ³ /g,孔径为 4 nm	萘	对萘的吸附量达 1 284 mg/g	[36]
OMC700	具有高度有序的二维六方介孔结构,比表面积为 757.7 m ² /g,孔径为 3.5 nm,表面疏水性强	BTEX PAHs	BTEX 萃取效率是商用 PDMS 的 2.0~5.5 倍, PAHs 萃取效率是商用 PDMS/DVB 的 2.6~3.8 倍	[37]
OMC-2NC	氧含量增加到 23.5%,含氧官能团数量增加,表面变得无序,比表面积、孔隙体积和平均孔径均下降	BTEX	总吸附容量 142 mg/g,苯、甲苯、乙苯、二甲苯的吸附容量分别为 12.7、32.9、37.7 和 58.7 mg/g,比原始 OMC 提高 40.5%	[38]
OMC	孔排列均匀,孔径分布较宽,比表面积为 1 276 m ² /g,孔体积为 1.79 cm ³ /g,孔径为 5.99 nm	BTEX	总吸附容量 101 mg/g,比商用 AC 高出 27%	[39]
NH ₂ -MIL(Ti)-125@OMC	拥有均匀分散的微孔-介孔复合结构;比表面积为 1 018 m ² /g,孔体积为 0.83 cm ³ /g,水接触角为 112°	甲苯	对甲苯吸附容量达 3.86 mmol/g,是纯 MOF(0.52 mmol/g)的 7.4 倍;在 80%RH 下的甲苯工作容量是纯 MOF 的 1.5 倍	[40]

2 碳材料吸附 VOCs 的过程

2.1 碳材料吸附 VOCs 的机理

VOCs 在碳材料上的吸附分为物理吸附和化学吸附两种类型,碳材料的比表面积、孔隙结构等主导物理吸附过程,表面官能团主导化学吸附。

物理吸附是碳材料吸附 VOCs 过程的主要作用过程,绝大部分的物理吸附都以孔隙填充的方式发生在微孔中。VOCs 分子进入微孔后,孔壁对其施加来自多个方向的范德华力,不同方向的范德华力叠加从而产生极强的吸附势场,因此微孔的体积和分布是决定碳材料吸附容量的关键指标。同时介孔和大孔可以促进 VOCs 分子的扩散,使其更容易进入微孔,进而间接促进 VOCs 的物理吸附过程。袁等人从孔隙结构、表面化学特性等方面比较了 VOCs 治理实际工况中选用的国产活性炭(GC-ACs)和进口活性炭(JK-ACs),并研究了二者的丙酮吸附行为。结果表明,两种 AC 存在显著的结构与性能差异,JK-ACs 因更高的比表面积、丰

富的微孔及总孔容,其丙酮动态饱和吸附量高达 248.8 mg/g,显著高于 GC-ACs(62.3 mg/g),表明微孔数量与分布的差异是造成其吸附性能差异的关键因素^[41]。

化学吸附表现为碳材料表面官能团与 VOCs 分子发生更强的化学作用。官能团的引入改变了碳材料表面的极性与静电势^[42],使得碳材料与 VOCs 分子间的相互作用更强,即官能团通过与 VOCs 分子形成氢键、增强 π - π 相互作用或静电相互作用的方式,增强碳材料对 VOCs 的吸附能,进而增强碳材料的化学吸附过程。Su 等人通过 DFT 计算结合实验验证的方式研究了磷掺杂 AC 对甲醇和甲苯的吸附,DFT 计算显示 P 掺杂后甲醇的吸附能由最初的一28.257 kJ/mol 提高到-74.065 kJ/mol,甲苯的吸附能也提高到-49.984 kJ/mol,这是因为磷官能团与甲醇分子中的羟基形成了稳定的氢键,此外 C—O 键也能与甲醇分子的极性部分发生静电相互作用,这二者的共同作用使得甲醇的吸附能大幅提高,同时由于甲苯苯环通过 π - π 堆积作用,与磷官能团中的氧和磷原子产生相互作用,甲苯的吸附能也得以提高^[43]。丁等人采用不同浓度硝酸对 AC 进行改性,并研究了改性 AC 对不同极性 VOCs 的吸附过程。结果显示,NAC-1 对甲醛、丙酮、甲苯及二甲苯的吸附能力较改性前显著提升,其中对甲醛的平衡吸附量提高了 153.9%,这主要归因于硝酸改性在 AC 表面引入的含氧官能团通过增强氢键、酸碱相互作用等化学吸附过程,显著提高了 NAC-1 对极性分子的选择性吸附能力^[44]。

2.2 影响碳材料吸附 VOCs 过程的因素

吸附是吸附剂与吸附质相互作用的过程,因此碳材料和 VOCs 的特性对 VOCs 的吸附过程都有显著的影响。

碳材料的物理化学性质是影响 VOCs 吸附的关键因素之一,主要包括:(1) 比表面积:通常来说,比表面积越大,碳材料提供的吸附活性位点越多,从而吸附能力越强^[45-47]。但比表面积并非越大越好,过高的比表面积可能会导致临界效应,此时微孔占比过高会导致扩散阻力增大,进而使得材料的吸附容量降低。比表面积虽为关键参数,但其作用需结合孔隙结构和表面官能团综合考量。Zhang 等人利用不同比例的淀粉和 ZnCl_2 直接活化得到了一系列的多孔淀粉基碳 PSC-X,发现虽然 PSC-2 的比表面积($2\,721\text{ m}^2/\text{g}$)远大于 PSC-1($1\,974\text{ m}^2/\text{g}$),但 PSC-2 的甲苯吸附容量(364.01 mg/g)略低于 PSC-1(375.11 mg/g),它归因于 PSC-1 较高的氧官能团含量为甲苯提供了化学吸附位点^[48]。(2) 孔隙结构:根据孔直径的不同,一般将碳材料的孔分为窄微孔、微孔、介孔和大孔。大多数 VOCs 分子尺度较小,处于微孔甚至窄微孔水平,因此微孔被认为在吸附过程中起主导作用。然而微孔和窄微孔占比过大的碳材料已被证明不是最佳的吸附材料,在吸附过程中,VOCs 分子在孔隙中的扩散同等重要,因此还需一定比例的介孔来促进 VOCs 的扩散过程^[47]。Zhao 等人研究了不同孔隙结构的咖啡渣基 AC 对 1,2-二氯乙烷(1,2-DCE)和氯苯(CB)的吸附性能,发现超微孔对吸附 1,2-DCE 非常有益,此外,含有适量介孔的多级多孔结构和大比表面积共同促进了 1,2-DCE 的吸附。同时发现超微孔也对吸附 CB 非常有益,但在低压下使得吸附阻力变大,尽管如此,多级多孔结构、大比表面积和孔体积却弥补了这一不足,因为多级多孔结构促进了 CB 的扩散转移^[49]。(3) 表面官能团:碳材料表面官能团的数量和种类会对碳材料的化学特性产生显著影响。原料的性质和不同的改性方法会对碳材料表面的官能团种类和数量产生巨大影响,而不同类型的官能团对不同种类的 VOCs 亲和力不同,如含氧官能团可以通过形成氢键来增强对醛类、酮类 VOCs 的吸附^[47,50]。Zhou 等人研究了原始 AC 和 P 掺杂 AC 对甲醇的吸附性能,发现原始 AC 的静态吸附容量为 7.6 mmol/g 低于 P 掺杂 AC 最高 10.1 mmol/g 的吸附容量,表明 P 官能团的掺入增强了甲醇与 AC 表面的相互作用,同时 DFT 计算显示原始 AC 的吸附能为一27.7 kJ/mol,而 P 掺杂 AC 的最高吸附能达到了一91.9 kJ/mol,是原始 AC 的 3 倍,这一结果也证明 P 官能团对于促进甲醇与 AC 表面相互作用的积极意义^[51]。

VOCs 本身的性质也会影响吸附过程,主要包括:(1) 分子大小和结构:不同大小和结构的 VOCs 分子在碳材料孔道中迁移扩散能力不同,进而影响其吸附效果。不同尺度的 VOCs 和不同直径的孔隙表现出不同的匹配度,小分子 VOCs 与微孔、窄微孔表现出更高的适配度,而大分子更容易进入介孔中^[47]。同时因为空间位阻效应的存在,分子量较大或结构较复杂的 VOCs 在孔道中的扩散更加困难,更难以进入微孔,从而影响其整体吸附效率^[52]。Konggidinata 等人发现 OMC 对 BTEX 的吸附容量从高到低依次为二甲苯、乙

苯、甲苯、苯,推测是因为分子量越大,疏水性增强,更易被 OMC 的介孔吸附;苯分子最小,易进入微孔但吸附位点有限;二甲苯因体积较大,主要停留在介孔中,吸附容量更高^[39]。(2) 极性:未经改性的原始碳材料表面官能团含量较少,往往表现出弱极性或非极性,因此弱极性或非极性 VOCs 与其亲和力更高。强极性 VOCs 与水分子之间会产生竞争吸附,水分子占据一部分吸附位点,因而原始碳材料对强极性 VOCs 的吸附性能较差。官能团的引入会改变碳材料的表面极性同时提供吸附活性位点,极性 VOCs 可与这些活性位点发生相互作用,从而增强对极性 VOCs 的吸附能力^[53]。Li 等人发现在干燥条件下 AC 对弱极性甲苯的吸附容量比强极性 1,2-二氯乙烷高,推测是因为甲苯与石墨化碳表面的 π - π 相互作用更强,而 1,2-二氯乙烷则依赖极性相互作用。同时根据等量吸附热差异分析得出甲苯/水蒸气选择性高达 69,1,2-二氯乙烷/水蒸气选择性仅 12,甲苯与 AC 的 π - π 相互作用与水蒸气无直接竞争,而 1,2-二氯乙烷的极性使其易与水分子的氢键作用产生竞争^[54]。

吸附过程中,环境条件的变化也会对 VOCs 的吸附效果产生影响:(1) 温度:对于大多数碳材料来说,VOCs 的吸附主要归因于物理吸附,属于放热过程,因此低温时更有利于吸附。随着温度升高,VOCs 的蒸气压增大,分子运动也更加剧烈,从而降低其在固体表面的吸附能力。Zhang 等人发现当温度从 25 °C 上升到 45 °C 时,微波生物炭对甲苯和邻二甲苯的吸附容量分别从 75.8 和 63.0 mg/g 下降到 68.4 和 55.0 mg/g,这是因为微波生物炭吸附 VOCs 是通过物理相互作用发生的,作为放热反应,这在较低温度下是有利的^[55]。此外,温度变化还会影响碳材料的结构和性能,较高温度可能导致碳材料的孔隙结构坍塌或官能团的分解,从而影响其吸附行为。(2) 湿度:气体中水分子的存在会与 VOCs 产生竞争吸附,占据 VOCs 的吸附位点,从而降低碳材料的吸附效率,这种情况对于某些亲水性 VOCs 来说尤为明显。一方面,水分子中的羟基会与碳材料表面的含氧官能团发生氢键相互作用,占据吸附位点。另一方面,水分子吸附焓高于多数亲水性 VOCs,在同等条件下将会被优先吸附。同时水分子的扩散速率较大,可在吸附初期快速占据孔道。Wang 等人研究了不同相对湿度条件下咖啡渣基活性炭 BAC 对甲苯的吸附能力,发现随着相对湿度从 0% 增加到 80% 会导致 BAC 的饱和吸附容量单调下降,从 536 mg/g 降低到 230 mg/g,下降了 57%,同时,10% 穿透时间从 380 min 减少到 91 min,下降了 76%。这些发现表明,水分子的存在会降低 BAC 的吸附能力,这种下降归因于水分子占据甲苯的吸附位点^[56]。

3 结论

VOCs 不仅对环境造成严重污染,还对人类健康构成威胁。因此,开发有效的去除 VOCs 的方法至关重要。近年来,碳材料因其优良的物理化学性质而受到广泛关注,成为 VOCs 吸附的主要材料之一。本文综述了几种新型碳材料,如 ACFs、生物炭、CNTs、石墨烯及其衍生物以及 OMC 的 VOCs 吸附性能。此外,还讨论了影响碳材料吸附 VOCs 的因素,例如碳材料的性质、VOCs 的性质及吸附的环境条件等。从所讨论的内容可以得出结论:(1) 原始的碳材料表现出的吸附性能相对较弱,且更适合吸附非极性 VOCs,对极性 VOCs 的吸附能力较弱,而经过改性后则能显著改善这种情况。(2) 碳材料的 VOCs 吸附过程受到其形态结构和表面官能团的巨大影响。通常而言,具有大比表面积和小孔径的吸附剂更有利于提高吸附效率。此外,官能团对 VOCs 的吸附作用则与 VOCs 本身的极性密切相关。(3) 碳材料的种类、VOCs 的特性以及操作的环境条件都会影响 VOCs 的吸附过程。

尽管碳材料在吸附 VOCs 方面已经表现出了巨大的应用潜力,但要实现大规模的工业应用仍需进一步的技术革新和突破,仍有一些问题需要考虑:(1) 需通过适当的改性方法提高材料的吸附性能。吸附剂应具备较大的吸附容量和较快的吸附速率,以便快速高效地去除 VOCs,而利用某些物理、化学方法对碳材料进行改性可以使其拥有优秀的吸附性能。除此之外,材料的选择性也需要考虑,选择性好的材料对于去除特定 VOCs 具有极大的优势。(2) 选择具有长期稳定性的材料。吸附剂应该有足够好的物理、化学性能,从而在工业应用过程中能够保持其吸附性能,抵抗物理和化学降解。拥有良好再生性能的吸附剂有助于降低成本和减少废弃物产生。因此,吸附剂的再生能力也是一个重要考虑因素。(3) 降低材料的环境影响。吸附剂的再生过程可能会产生副产品,这些副产品的处理与处置必须符合环境法规要求,以避免对环境造成二次污

染。(4) 提高材料的成本效益。碳材料的选择应考虑其成本,包括原料获取、加工和生产过程中的费用。高成本可能会限制其在工业中的应用。除了材料本身的成本外,处理和维护吸附系统的总成本也应纳入考虑,包括能耗、操作和维护费用等。

参 考 文 献

- [1] 贾震震,李一鸣,郑智宏,等. 柔性高比表静电纺碳纳米纤维制备及其吸附 VOCs 性能研究[J]. 材料导报, 2024, 38(18): 243-250.
- [2] 杨旭东,李茜,汪大闪,等. 商用活性炭对乙酸酯类挥发性有机物的动态吸附[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2025, 44(4): 440-460.
- [3] 许秋飞,沈振萍,严勇,等. VOCs 走航与固定源监控联动的大气臭氧污染溯源分析与反演[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 456-460.
- [4] WANG H L, NIE L, LI J, et al. Characterization and assessment of volatile organic compounds (VOCs) emissions from typical industries[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(7): 724-730.
- [5] 寇永康,党小庆,曹利,等. 氧化镁掺杂改性活性炭的制备及其对彩板印刷 VOCs 废气的吸附性能及机理[J]. 环境工程学报, 2024, 18(6): 1559-1569.
- [6] 熊烨栋,柯权力,黄康康,等. 活性炭对 VOCs 的吸附性能与其特征值之间的关系[J]. 中国环境科学, 2024, 44(8): 4193-4201.
- [7] HASSAN M F, SABRI M A, FAZAL H, et al. Recent trends in activated carbon fibers production from various precursors and applications-a comparative review[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2020, 145: 104715.
- [8] GE Y Y, AKPINAR I, LI Z Y, et al. Porous structured cotton-based ACF for the adsorption of benzen[J]. Chemosphere, 2021, 282: 131110.
- [9] WU W J, CHENG K, HU Y Y, et al. Adsorption and desorption mechanism of toluene gas by iron modified activated carbon fiber[J]. Chemical Physics, 2024, 580: 112240.
- [10] KANG S M, PARK D H, HWANG J. Hierarchical ZnO nano-spines grown on a carbon fiber seed layer for efficient VOC removal and airborne virus and bacteria inactivation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 424: 127262.
- [11] BI Y X, SUN E C, ZHANG S, et al. Synergistic effect of adsorption and photocatalysis for the degradation of toluene by TiO₂ loaded on ACF modified by Zn(CH₃COO)₂[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(40): 57398-57411.
- [12] JIANG L, JIA Z Q, XU X, et al. Preparation of antimicrobial activated carbon fiber by loading with silver nanoparticles[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 633: 127868.
- [13] AWAD R, HAGHIGHAT MAMAGHANI A, BOLUK Y, et al. Synthesis and characterization of electrospun PAN-based activated carbon nanofibers reinforced with cellulose nanocrystals for adsorption of VOCs[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 410: 128412.
- [14] 任鹏锟,仲兆平,张小霓,等. 污泥-木屑基活性炭的制备及其对苯系 VOCs 的吸附性能[J]. 化工进展, 2025, 44(6): 3031-3040.
- [15] MOSLEH M H, RAJABI H. NaOH-benzoic acid modified biochar for enhanced removal of aromatic VOCs[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 330: 125453.
- [16] PAN Z F, QI G D, ZHANG X Y, et al. Lignin-based hierarchical porous biochar prepared from negative pressure pyrolysis enhanced CO₂ and VOCs adsorption[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 345: 127398.
- [17] LIN J H, XU Z B, ZHANG Q Z, et al. Enhanced adsorption of aromatic VOCs on hydrophobic porous biochar produced via microwave rapid pyrolysis[J]. Bioresource Technology, 2024, 393: 130085.
- [18] 李俊学,李玲一,张莉,等. 锆基吸附剂去除水体中磷酸盐的研究进展[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2025, 44(3): 307-318.
- [19] ZHANG X Y, MIAO X D, XIANG W, et al. Ball milling biochar with ammonia hydroxide or hydrogen peroxide enhances its adsorption of phenyl volatile organic compounds (VOCs)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123540.
- [20] ZAMAN M W U, DATTATRAY PHULE A, ELKAE S, et al. Excellent adsorption and catalytic oxidation of toluene facilitated by metal-free nitrogen-doped mesoporous biochar[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 353: 128378.
- [21] JANG Y, BANG J, SEON Y S, et al. Carbon nanotube sponges as an enrichment material for aromatic volatile organic compounds[J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1617: 460840.
- [22] YOOSEFIAN M, AYOUBI E, ATANASE L I. Palladium-doped single-walled carbon nanotubes as a new adsorbent for detecting and trapping volatile organic compounds: a first principle study[J]. Nanomaterials, 2022, 12(15): 2572.
- [23] CHENG J H, CHENG X X, WANG Z Q. Microstructure regulation and enhanced VOC removal performance of carbon aerogels by surface carbon nanotube grown[J]. Science of the Total Environment, 2024, 931: 172803.
- [24] 王雪,建伟伟,陆毅,等. Cu 和 Sn 改性多壁碳纳米管对 VOCs 气体的吸附[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2021, 41(5): 44-49.
- [25] 谢立成,姜艳,张志军,等. 静电纺丝制备 PAN/CNTs 复合纤维及其 VOCs 吸附性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(2): 44-48.

- [26] CHENG J F, TANG S Q, LIN Z X, et al. Wearable textile with laser-induced hydrophilic porous graphene oxide coating for rapid adsorption of volatile organic compounds[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 648: 159073.
- [27] VO T T N, LIM S T, KIM J H, et al. Nanostructured micro/mesoporous graphene: removal performance of volatile organic compounds [J]. *RSC Advances*, 2022, 12(23): 14570-14577.
- [28] THI H P N, THI K T P, TRAN N T, et al. Graphene-integrated nonwoven polypropylene fabric for simultaneous filtering of particulate matter and volatile organic compounds[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2023, 14(2): 479-486.
- [29] MISHRA R, KUMAR A, SINGH E, et al. Synthesis of graphene oxide from biomass waste: characterization and volatile organic compounds removal[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 180: 800-807.
- [30] RYOO R, JOO S H, JUN S. Synthesis of highly ordered carbon molecular sieves via template-mediated structural transformation[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1999, 103(37): 7743-7746.
- [31] LIANG C D, HONG K L, GUIOCHON G A, et al. Synthesis of a large-scale highly ordered porous carbon film by self-assembly of block copolymers[J]. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2004, 43(43): 5785-5789.
- [32] LU A H, SPLIETHOFF B, SCHÜTH F. Aqueous synthesis of ordered mesoporous carbon via self-assembly catalyzed by amino acid [J]. *Chemistry of Materials*, 2008, 20(16): 5314-5319.
- [33] LIANG Z J, HONG Z B, XIE M Y, et al. Recent progress of mesoporous carbons applied in electrochemical catalysis[J]. *New Carbon Materials*, 2022, 37(1): 152-179.
- [34] HUANG Y, CAI H Q, FENG D, et al. One-step hydrothermal synthesis of ordered mesostructured carbonaceous monoliths with hierarchical porosities[J]. *Chemical Communications*, 2008, (23): 2641-2643.
- [35] HU X Y, ZHANG H C, GENG J X, et al. Insights on size-exclusion effect of ordered mesoporous carbon for selective antibiotics adsorption under the interference of natural organic matter[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 458: 141440.
- [36] HOU S Y, TANG Y L, ZHU T L, et al. Adsorptive removal of gas phase naphthalene on ordered mesoporous carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 436: 129208.
- [37] LIU B, HAO Y Q, WANG L X, et al. Ordered mesoporous carbon in solid-phase microextraction for analysis of volatile organic compounds in water samples[J]. *Analytical Methods*, 2019, 11(29): 3741-3749.
- [38] LIAN Q Y, KONGGIDINATA M I, AHMAD Z U, et al. Combined effects of textural and surface properties of modified ordered mesoporous carbon (OMC) on BTEX adsorption[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 377: 381-390.
- [39] KONGGIDINATA M I, CHAO B, LIAN Q Y, et al. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for adsorption of BTEX onto Ordered Mesoporous Carbon (OMC)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 336: 249-259.
- [40] GAO Z, WANG J X, MUHAMMAD Y, et al. Hydrophobic shell structured NH₂-MIL(Ti)-125@mesoporous carbon composite *via* confined growth strategy for ultra-high selective adsorption of toluene under highly humid environment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022; 432: 134340.
- [41] 袁金玉, 朱东瑶, 黄子豪, 等. 活性炭的丙酮吸附性能与热稳定性及自燃机制研究[J/OL]. *煤炭转化*, 2025, [2025-10-21]. <https://link.cnki.net/urlid/14.1163.TQ.20251021.1158.002>.
- [42] ERGUN M E, KOYUNCU F, ISTEK A, et al. Utilization of orange peel waste for activated carbon production and its application in particleboard for formaldehyde emission reduction[J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2025, 19(3): 690-704.
- [43] SU C Q, JIANG W T, GUO Y, et al. Rational molecular design of P-doped porous carbon material for the VOCs adsorption[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2025, 79: 155-163.
- [44] 丁佳蓉, 陈小枫, 胡泽文, 等. 硝酸改性活性炭对 VOCs 的吸附性能研究[J]. *化工环保*, 2026, 46(1): 65-71.
- [45] 张历云, 周卫海, 冯广婧, 等. 松塔基多孔碳的制备及其染料吸附性能和电化学储能性能研究[J]. *曲阜师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(2): 87-92.
- [46] 孙晓丽, 袁金秀, 张姗姗, 等. 蔬菜藤衍生制备高性能锂离子电池硬碳负极材料[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2021, 35(3): 290-296.
- [47] YE Q Q, CHEN Y Y, LI Y Z, et al. Management of typical VOCs in air with adsorbents: status and challenges[J]. *Dalton Transactions*, 2023, 52(35): 12169-12184.
- [48] ZHANG H, YANG Z X, CAO E P, et al. Direct activation and hydrophobic modification of biomass-derived hierarchical porous carbon for toluene adsorption under high humidity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 490: 151817.
- [49] ZHAO Z Y, WU W Q, LI W P, et al. Adsorption recovery of chlorinated volatile organic compounds on coffee ground-based activated carbon of tunable porosity[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 354: 129271.
- [50] ZHU L L, SHEN D K, LUO K H. A critical review on VOCs adsorption by different porous materials: species, mechanisms and modification methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 122102.

(下转第 424 页)

- [15] MUELLER M, BANDL C, KERN W, et al. Surface-immobilized photoinitiators for light induced polymerization and coupling reactions[J]. *Polymers*, 2022, 14(3): 608.
- [16] YANG M M, WANG Y H, LI H Y, et al. Preparation and properties of UiO-66 based hybrid materials via surface initiated metal-free ATRP[J]. *European Polymer Journal*, 2024, 202: 112612.
- [17] ZHANG X, LV D, LIU Z, et al. Engineering a chitosan-encapsulated PDA/Fe₃O₄@cenosphere composite for dual adsorption of microplastics and organic dyes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 333: 148966.
- [18] NOTHLING M D, BAILEY C G, FILLBROOK L L, et al. Polymer grafting to polydopamine free radicals for universal surface functionalization[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, 144(15): 6992-7000.
- [19] GUO K, WANG Y, FENG Z X, et al. Recent development and applications of polydopamine in tissue repair and regeneration biomaterials[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2024: 859-881.
- [20] WAN R T, YU J W, QUAN Z Y, et al. A reusable, healable, and biocompatible PEDOT: PSS hydrogel-based electrical bioadhesive interface for high-resolution electromyography monitoring and time-frequency analysis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 490: 151454.
- [21] LI H, CAO J, WAN R T, et al. PEDOTs-based conductive hydrogels: design, fabrications, and applications[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(7): e2415151.
- [22] 俞青芬, 吴永林, 李一凡, 等. 基于多巴胺的杂化膜界面优化及其气体分离性能强化[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(5), 30-37.
- [23] MAYADUNNE R T A, JEFFERY J, MOAD G, et al. Living free radical polymerization with reversible Addition-Fragmentation chain transfer (RAFT polymerization): approaches to star polymers[J]. *Macromolecules*, 2003, 36(5): 1505-1513.
- [24] KÜTAHYA C, WANG P, LI S J, et al. Carbon dots as a promising green photocatalyst for free radical and ATRP-based radical photopolymerization with blue LEDs[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(8): 3166-3171.

(责任编辑:蒲锡鹏)

(上接第 403 页)

- [51] ZHOU C K, GUO Y, SU C Q, et al. Quantitative analysis on chemical influence of modified activated carbon in TSA/PSA for methanol via alterable phosphorus functional groups and stable structure[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 657: 159721.
- [52] YANG X, ZHONG H T, ZHANG W G, et al. Progress in adsorptive removal of volatile organic compounds by zeolites[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2023, 23(5): 220442.
- [53] LI X Q, ZHANG L, YANG Z Q, et al. Adsorption materials for volatile organic compounds (VOCs) and the key factors for VOCs adsorption process: a review[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 235: 116213.
- [54] LI J J, CHENG T Y, WU H, et al. CO₂-assisted synthesis of graphitic resin-based activated carbon for ultrahigh selective adsorption of VOCs under humid conditions[J]. *Fuel*, 2023, 353: 129157.
- [55] ZHANG X Y, XIANG W, MIAO X D, et al. Microwave biochars produced with activated carbon catalyst: characterization and sorption of volatile organic compounds (VOCs)[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 827: 153996.
- [56] WANG S, XU J Y, ZHANG J J, et al. Facile synthesis of natural stearic acid modified carbon adsorbent for toluene adsorption under high humidity conditions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 344: 127269.

(责任编辑:蒲锡鹏)