

# 活性炭材料的制备及其在 VOCs 吸附中的研究进展

薛浩<sup>1</sup>, 李滨洋<sup>2</sup>, 赵小辉<sup>1</sup>, 刘言正<sup>3,4\*</sup>, 惠延鹏<sup>1</sup>

(1. 栾川龙宇钼业有限公司, 河南 洛阳 471000; 2. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 4. 西安建筑科技大学未来技术学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**系统梳理了吸附机理、制备工艺、影响吸附因素及活性炭再生等研究成果,剖析活性炭微观结构、表面性质、吸附环境等对吸附行为的影响,探究制备原料及工艺对吸附性能的调控作用。研究认为,通过优化制备工艺、改进再生回收技术并加强模型应用,可提升活性炭的选择吸附能力,推动其在复杂 VOCs 治理中的高效应用。

**关键词:**活性炭; 吸附; 挥发性有机化合物; 影响因素; 废气治理

中图分类号: TQ424

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)05-0081-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.015

## Preparation of activated carbon materials and research progress in VOCs adsorption

XUE Hao<sup>1</sup>, LI Bin-yang<sup>2</sup>, ZHAO Xiao-hui<sup>1</sup>, LIU Yan-zheng<sup>3,4\*</sup>, HUI Yan-peng<sup>1</sup>

(1. Luanchuan Longyu Molybdenum Industry Co., Ltd., Luoyang 471000, China; 2. College of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. School of Future Technology, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** This study systematically reviews research achievements in adsorption mechanisms, preparation processes, influencing factors on adsorption, and activated carbon regeneration. It analyzes the effects of the microstructure, surface properties of activated carbon, and adsorption environment on adsorption behavior, and explores the regulatory effects of preparation raw materials and processes on adsorption performance. This study suggests that optimizing preparation processes, improving regeneration and recovery technologies, and strengthening model applications can enhance the selective adsorption capacity of activated carbon and promote its efficient application in complex VOCs treatment.

**Key words:** activated carbon; adsorption; VOCs; influencing factors; waste gas treatment

挥发性有机化合物(VOCs)是一类参与大气光化学反应的关键污染物,其过量排放可引发光化学烟雾、臭氧层破坏等环境问题,并直接威胁人体呼吸与免疫系统。大气中VOCs来源分散、种类多样、组成复杂,目前已检测出的VOCs共有300多种类型<sup>[1]</sup>。为应对VOCs污染,催化氧化、生物降解、吸附等技术被广泛研究。其中,吸附法具有能耗低、吸附再生过程操作简便、运行成本低、不产生有害二次产品等优点,被认为是去除VOCs的主流技术之一。

目前广泛应用的吸附剂包括碳基材料、沸石基材料、有机聚合物和复合材料等,活性炭因高比表面积、可调控的孔隙结构与表面化学性质,且经济易

得,被视为VOCs吸附材料的研究核心。近年来,关于活性炭的研究集中于制备与活化工艺优化、孔隙结构定向调控及功能化改性等方面。然而,针对活性炭再生技术和分子模型应用的系统性综述相对不足,特别是在多技术综合比较及复杂体系分子模型适用性分析方面,尚需进一步深入探讨。本文中聚焦活性炭吸附VOCs领域的前沿动态,系统梳理研究进展,开篇阐释活性炭的微观结构特征、吸附作用机理及制备工艺;继而深入剖析影响活性炭吸附性能的关键要素,同时探讨活性炭再生技术与有机溶剂回收的研究现状;最后阐述模型在活性炭吸附研究中的实践价值。

收稿日期: 2025-06-04; 修回日期: 2026-03-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52470222)

作者简介: 薛浩(1988-),男,学士,工程师,研究方向为矿物加工工程, xuehaotx@126.com; 刘言正(1985-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为环境污染治理, 通讯联系人, liuyan Zheng@xauat.edu.cn。

## 1 活性炭概述

### 1.1 活性炭 VOCs 的吸附机理

活性炭对 VOCs 的吸附机理是一个多步骤的复杂过程,涉及物理和化学作用的协同效应。首先,VOCs 分子通过浓度梯度驱动从气相主体向活性炭表面扩散,随后进一步向内部孔隙结构迁移,其速率受活性炭的孔隙特性如微孔直径、曲折度影响。当分子到达活性炭表面或孔隙内部时,主要通过物理吸附和化学吸附 2 种机制被固定<sup>[2]</sup>。物理吸附以范德华力为主导,表现为可逆的弱相互作用,其效率取决于活性炭的高比表面积和优化的孔径分布。活性炭对 VOCs 的吸附作用如图 1 所示,微孔通过毛细管凝聚效应优先捕获小分子 VOCs,而中孔则作为扩散通道并辅助吸附较大分子,低温条件和高比表面积可显著提升物理吸附容量<sup>[2]</sup>。化学吸附则依赖于活性炭表面官能团(如羟基、羧基、含氮基团)与极性 VOCs(如甲醛、硫化物)的化学键合,例如羧基通过氢键或酸碱相互作用选择性吸附特定污染物。在多组分 VOCs 共存时,竞争吸附现象显著,分子极性、尺寸和蒸气压差异导致吸附优先级不同,通常低蒸气压或强极性的组分占据优势。综上所述,活性炭的吸附性能是其物理结构特性与表面化学性质共同作用的结果。

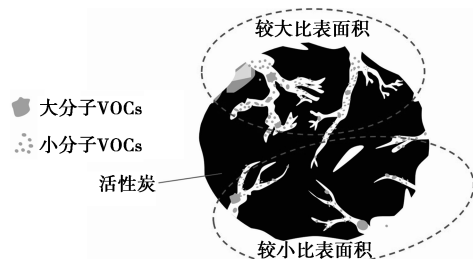


图 1 活性炭吸附 VOCs 示意图

### 1.2 活性炭的制备

活性炭作为一种高效吸附材料,制备工艺的核心在于碳化与活化 2 阶段。随着原料开发与活化技术的创新,活性炭的孔结构调控能力显著提升,吸附性能持续优化。以下从碳化、活化工艺及技术发展进行系统阐述。

#### 1.2.1 碳化阶段

碳化是活性炭制备的预处理过程,核心是通过高温热解将有机原料中的非碳成分以挥发性气体形式脱除,形成富含碳的初始骨架结构。碳化过程中,碳化温度、升温速率以及保温时间是关键参数,直接

影响炭化产物的孔隙率与比表面积。温度的影响很大,炭化温度需严格控制。温度过低时,碳骨架结构松散,孔隙率不足;温度过高则会导致“剥壳效应”,即微孔结构因过度反应而坍塌,比表面积和总孔隙急剧下降。唐凯等<sup>[3]</sup>研究表明,随着炭化温度的增加,制备的氮杂化活性炭催化性能越好,在 700℃ 炭化得到的氮杂化活性炭催化性能最佳。

#### 1.2.2 活化阶段

活化是活性炭孔隙结构优化的核心步骤,通过物理或化学手段进一步扩孔、造孔,显著提升比表面积与吸附性能。根据国际纯理论和应用化学联合会分类,活性炭的孔隙可分为微孔(<2 nm)、中孔(2~50 nm)和大孔(>50 nm),不同孔径在吸附动力学与容量中发挥协同作用:微孔主导高比表面积吸附,中/大孔加速物质传输并吸附大分子。

物理活化采用氧化性气体与碳化料在高温下反应,通过选择性刻蚀碳原子生成孔隙<sup>[4]</sup>,优势在于工艺简单、环境友好,但需较高温度和较长活化时间。在气体选择与孔隙调控方面,CO<sub>2</sub> 倾向于生成微孔结构,而水蒸气因反应活性较高,可形成中孔与大孔。目前,新型活化气体的开发成为研究热点。例如,Ruan 等<sup>[5]</sup>以松木屑为原料,采用一步活化法制备富氮活性炭,研究表明,800℃ 的 NH<sub>3</sub>/空气活化是制备高性能活性炭的合适条件。化学活化通过酸性或碱性试剂浸渍原料,通常温度低于物理活化所需的温度,具有产率高、孔结构可控的特点,但需后续清洗以去除残留化学物质。例如 KOH 的高效造孔,KOH 通过刻蚀碳骨架并促进缩聚反应,可制备超高比表面积活性炭。彭超等<sup>[6]</sup>以豆渣为原料,KOH 活化后获得比表面积 3 528.5 m<sup>2</sup>/g 的活性炭,兼具优异 CO<sub>2</sub> 吸附能力与电容性能。

结合物理与化学活化优势,实现多级孔结构设计。然而,目前还没有将这些方法结合起来的标准化程序,因此活化剂和工艺参数的选择还有待优化。Tetteh 等<sup>[4]</sup>指出双活化的主要挑战在于确定理想的活化剂组合和微调参数以实现预期结果,其工艺复杂性与设备成本仍是规模化应用的挑战。

### 1.3 活性炭的改性

活性炭改性主要分为物理改性和化学改性,通过调控孔结构与表面化学性质,可显著提升对 VOCs 的吸附性能。物理改性通过优化孔道结构增强吸附能力;微波法利用热效应重构孔隙与比表面积,碱性耦合微波改性对污染物去除率可达 97.54% 以上<sup>[7]</sup>;热解法经高温调控孔径分布,900℃ 椰壳-污泥

共热解炭对二甲基二硫醚吸附量达 136.3 mg/g<sup>[8]</sup>。物理改性多以优化孔径与表面疏水性实现高效选择性吸附。化学改性主要包括氧化还原、酸碱液相及负载物改性 3 类<sup>[9]</sup>,通过调控表面官能团与活性位点提升吸附性能。氧化还原改性可引入含氧官能团;Hou 等<sup>[10]</sup>采用甘氨酸与氨水改性活性炭,前者提升甲苯穿透吸附容量,后者更利于增大比表面积与饱和吸附量;负载金属/金属氧化物可通过络合作用强化吸附亲和力。未来研究应侧重多方法复合改性与孔结构-官能团精准调控,开发高选择性、可循环再生的功能化活性炭。

## 2 影响活性炭吸附的关键因素

VOCs 吸附过程的效能调控是一个多维度协同作用的复杂体系。影响活性炭吸附性能的关键因素如图 2 所示。吸附效果主要由吸附剂的孔结构与表面特性,以及 VOCs 自身的分子结构、浓度等条件共同决定。

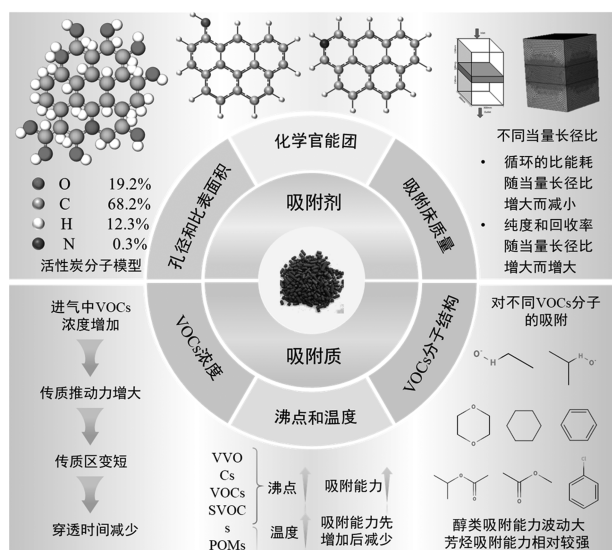


图 2 影响活性炭吸附的关键因素

### 2.1 吸附剂

#### 2.1.1 孔径和比表面积

孔隙结构决定着吸附电位,从而导致吸附容量的变化。活性炭的孔结构主要为微孔和介孔,且以微孔为主<sup>[11]</sup>。在分子大小相匹配的情况下,活性炭孔径的分布越均匀、孔的形状越规则,则活性炭吸附效果越好。当活性炭孔径略大于 VOCs 分子直径时,孔道内表面与吸附质分子间的作用力处于最佳范围,此时可形成稳定的物理吸附态。然而,当孔径远大于吸附质粒径时,吸附质分子在孔道内的吸附势能显著降低,此时孔道仅作为通道承担传质功

能。在进行外表面吸附时,吸附速率与比表面积呈正相关<sup>[11]</sup>。活性炭的比表面积直接决定吸附能力的上限,典型活性炭的比表面积范围为 500~3 000 m<sup>2</sup>/g,其中微孔贡献约 90%以上的表面积。

#### 2.1.2 化学官能团

活性炭的表面化学结构同样也会对吸附效果产生影响。活性炭表面存在不同类型和数量的含氧官能团,对表面极性和亲疏水性产生不同的效果。对于非极性或弱极性的 VOCs,与表面极性弱的活性炭结合能力更强。反之,增加活性炭表面的酸性含氧官能团数量是提升极性 VOCs 吸附效率的有效途径之一。An 等<sup>[12]</sup>的研究表明,对于丙酮和甲醇,官能团如羧基和氨基的加入可以降低阈值压力,使吸附更容易释放,而羟基和氢则具有相反的作用。VOCs 的饱和吸附量与表面化学官能团的密度呈现显著的线性正相关,其吸附性能随官能团数量的增多而明显提高。

#### 2.1.3 吸附床质量

活性炭吸附床质量代表着活性炭的用量。吸附床质量的增加能够提供更大的比表面积和更多的吸附活性位点,让活性炭与吸附质充分接触,从而提高吸附效率。在一定的吸附质浓度和吸附温度条件下,根据吸附等温线原理,吸附床质量增加,吸附剂能够吸附的吸附质总量增加,即吸附容量增加。Chen 等<sup>[13]</sup>实验表明,在 5% 的小剂量下,VOCs 的吸附效果较低,为 8.72%,而在 50% 的大剂量下,VOCs 的吸附效果超过 45%。此外,吸附床质量还会影响吸附动力学过程。在质量较大的吸附床中,活性炭颗粒之间的孔隙结构和扩散路径更为复杂,吸附质分子在吸附床中的扩散阻力相对增加,从而使吸附达到平衡所需时间延长。

### 2.2 吸附质

#### 2.2.1 VOCs 的分子结构

吸附质粒径尺寸与吸附剂孔径间存在有效匹配关系,尺寸较大的 VOCs 分子表现出较低的体积吸附容量。活性炭微孔结构对大分子的筛分效应更显著,在分子尺寸接近孔隙直径时,会产生“分子捕获”现象,反而提升吸附效率。除 VOCs 的粒径大小外,VOCs 的形状对吸附也有很大影响。例如邻二甲苯、间二甲苯和对二甲苯虽然在横截面积上近乎相等,但是由于二甲苯分子中甲基侧链的位置不同导致吸附质分子产生了不同的分子形状<sup>[1]</sup>。VOCs 的极性也是影响活性炭吸附的另一个关键因素。通过比较甲苯和氯苯的吸附实验发现,吸附剂对氯

苯的吸附量高于甲苯,这主要是因为氯苯属于极性分子,吸附剂首先通过孔隙吸附作用优先吸附氯苯<sup>[14]</sup>。

### 2.2.2 沸点

根据吸附理论,物质挥发性与沸点呈负相关关系:沸点越低的物质挥发性越强,越易从液态转为气态。常温下,高沸点 VOCs 倾向于保持液态存在,其蒸气压较低导致气相浓度有限,但活性炭对这类物质的吸附能力反而更强,原因在于高沸点分子间作用力更显著,更易被吸附剂表面捕获。反之,低沸点 VOCs 分子具有更高的动能,在吸附剂表面的脱附行为更活跃,导致其在活性炭上的吸附容量较低。有研究表明,在空间结构类似的情况下,沸点略高的吸附质也会具有较高的吸附量<sup>[15]</sup>。然而,高沸点的吸附质对于活性炭的解吸能力则要弱于低沸点吸附质。

## 2.3 吸附环境

### 2.3.1 温度

活性炭吸附设备通常要求废气温度低于 40℃, 25℃左右的吸附条件较好。在达到饱和吸附容量之前,温度越高, VOCs 分子的运动能力越强,活性炭吸附 VOCs 分子所需的范德华力越大,吸附容量越低,从而使吸附效率降低。除此之外,温度的升高可能会导致活性炭表面化学官能团数量减少,使活性炭吸附能力降低。加热活性炭可以去除表面化学官能团,消除表面化学官能团对吸附的影响。但当活性炭吸附了一定量的 VOCs 时,可能会因温度的升高使 VOCs 发生脱附<sup>[16]</sup>。

### 2.3.2 湿度

水蒸气在吸附过程中的存在使得其无法被忽视,由于水分子与 VOCs 竞争碳材料孔隙中的吸附位点,吸附过程受到抑制。Liu 等<sup>[17]</sup>的研究利用 Thomas 模型来比较丙酮和正癸烷的吸附能力,发现水蒸气和 VOCs 分子之间存在竞争性吸附,湿度越高则吸附能力下降得越多。王艳等<sup>[18]</sup>开展了不同湿度条件下活性炭对碘甲烷吸附能力的研究。发现活性炭疏水改性可降低吸水率,削弱水分子的竞争吸附作用,同时增加碘甲烷结合的活性位点、增强化学吸附性能,这一结果证实,疏水改性有利于提升活性炭的吸附效能。

### 2.3.3 VOCs 浓度

VOCs 浓度在活性炭对 VOCs 的吸附中也有着重要影响。在其他条件一定时,随着 VOCs 浓度的增加,活性炭吸附容量也随之增加。这是因为在较

高 VOCs 浓度下, VOCs 分子与活性炭表面的接触机会增多,从而增加了吸附的可能性。高浓度的 VOCs 可能会使活性炭的吸附位点更快被占据,从而导致更快达到饱和状态。而低浓度的 VOCs 则需要更长的时间才能使吸附剂达到饱和。在低 VOCs 浓度下,活性炭吸附容量会受到初始水蒸气含量的影响。Jia 等<sup>[14]</sup>研究结果表明,初始水蒸气会降低 12 种 VOCs 的吸附能力和分配系数,尤其是在低 VOC 浓度下。值得注意的是,当 VOCs 浓度较低时,吸附穿透时间可能会延长,即吸附效率降低。

## 3 活性炭吸附剂的资源回收技术

### 3.1 活性炭再生技术

根据吸附物的类型,废弃活性炭被归类为固体废物甚至危险固体废物,对其进行填埋或焚烧是常见的处理处置手段<sup>[19]</sup>。然而,填埋和焚烧易造成环境二次污染,对废弃活性炭进行再生处理不仅能对活性炭重复利用,减少购买新活性炭的成本,还最大限度避免了环境污染的转移。

热再生是应用最广泛的再生方法,在热空气、惰性气体或水蒸气压下,通过热解、解吸、碳化及氧化脱除吸附物实现活性炭再生,按加热方式可分为热空气再生、氮气再生、水蒸气再生及微波加热再生等<sup>[19]</sup>。任思达等<sup>[20]</sup>采用热空气物理脱附再生吸附甲苯废气的商用活性炭,结果显示多次热再生虽会造成孔道坍塌与颗粒堆积,再生完全后吸附时间仍可达新炭的 96.6%。Zhang 等<sup>[21]</sup>在 300℃、100 mL/min 氮气吹扫 30 min 条件下研究黄铁矿改性对活性炭热脱附再生的影响,发现 10 次再生后改性炭初始吸附容量优于未改性炭。除热再生外,高级氧化、电化学、超声波等非热再生技术仍处于实验阶段。Zhang 等<sup>[22]</sup>采用氯化铁负载活性炭复合材料,基于高级氧化再生,中性条件下对莠去津、2,4-二氯苯酚、亚甲基蓝及氧氟沙星的再生效率分别为 71.5%、86.4%、93.7% 和 100%,显著优于传统芬顿氧化。Qu 等<sup>[23]</sup>研究表明超声频率越高再生效果越好,多次再生后活性炭强度仍保持在新鲜炭的 90% 以上。

当前活性炭再生技术面临能耗高、效率低和性能衰减等核心挑战。热再生需降低能耗,化学再生要减少二次污染,新兴技术亟待提升处理效率。分子层面的再生机理研究将是实现技术突破的关键。

### 3.2 有机溶剂回收技术

在 VOCs 治理体系中, VOCs 末端若采用焚烧氧

化处理会造成资源的浪费,同时焚烧过程中还会有其他污染物和碳的排放。高价值VOCs具有较高的经济效益,可用于工艺生产,目前应用最多的是冷凝回收技术。冷凝技术一般与蒸气脱附技术联用,脱附气将被吸附的有机物脱附解析出来,并带入冷凝器冷凝产生有机溶剂便于回收(图3)。冷凝法由于受制冷温度的限制,VOCs的回收效率受到制约。Li等<sup>[24]</sup>为了克服传统冷凝回收系统的缺点而设计的VOC-DCR系统,VOC回收率可达到99.97%,能耗为35.67 kW。为了回收高浓度的VOCs溶剂,真空辅助脱附技术展现出显著增效潜力。Huang等<sup>[25]</sup>开发的真空-加热组合系统在压力<10 kPa条件下,通过分子自由程扩大效应使溶剂扩散速率提升85%,同时降低脱附温度20~30℃,特别适用于高分子质量溶剂的低温高效回收。有机溶剂脱附回收技术需平衡效率与成本。蒸气脱附简单但耗能,热氮气成本高,真空法节能但复杂。核心问题在于高沸点溶剂效率低、混合溶剂分离难。

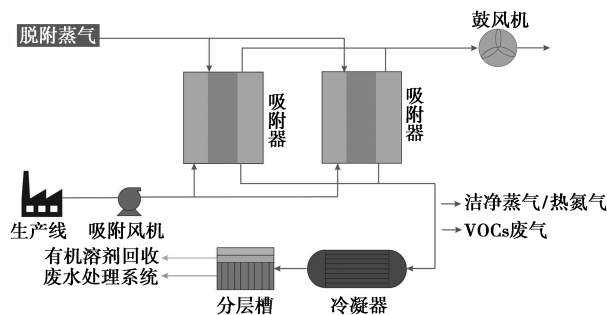


图3 活性炭吸附-蒸气脱附-冷凝回收工艺流程

#### 4 模型在活性炭吸附的应用

为深入剖析吸附热力学与动力学特性,研究人员采用多元数学模型及分子模拟技术系统探究吸附机理、优化工艺参数并预测吸附性能。巨正则系综蒙特卡洛法(grand canonical monte carlo, GCMC)是吸附模拟常用的蒙特卡洛方法,已被用于研究小分子烷烃、水蒸气、 $H_2$ 、CO等气体在活性炭模型中的吸附等温线、等量吸附热等行为。与GCMC方法不同,分子动力学(molecular dynamics, MD)以牛顿运动方程为物理基础,可计算吸附质在吸附剂孔道内的扩散系数等动力学数据。Moradi等<sup>[26]</sup>利用MD模拟活性炭吸附硫化氢,结果表明增加氯分子的数量会导致平衡吸附能力下降。量子化学模拟以求解薛定谔方程为核心,计算量大,仅适用于小体系。密度泛函理论(density functional theory, DFT)是量子化

学中计算分子性质的常用方法,对多电子体系处理具有重要意义。Zhang等<sup>[27]</sup>利用DFT模拟研究了官能团对活性炭吸附VOCs的影响,结果显示3种官能团吸附能力顺序为HD>PR>PD,主要作用为氢键,吸附强度由活性炭表面最大静电势(ESP)决定。

模型模拟无需依赖实验,在预测VOCs吸附行为上优势显著,蒙特卡洛、分子动力学、量子化学模拟等方法各具特点,均在吸附研究中发挥重要作用。但目前定量描述吸附动力学仍存在较大挑战,主要因吸附机制与分子动力学特性关联尚不明确,严重制约了对吸附过程的精准调控。实现高效经济吸附系统的设计,关键在于精确预测吸附容量。未来需深入揭示吸附机制与分子动力学的内在关系,优化模拟方法以更准确表征吸附动力学过程。

#### 5 结论

本研究构建了活性炭吸附VOCs的全链条研究框架,系统阐明吸附机理、制备改性、影响因素、资源回收及模型应用。结果表明,活性炭吸附为物理化学协同作用,其性能可通过原料、工艺及改性实现定向调控;吸附效果受孔径、官能团、吸附质性质及温湿度等条件共同影响。再生技术中,热再生应用成熟但存在结构破损、能耗较高等问题,非热再生效率仍需提升,脉冲蒸气脱附等新工艺可显著提高溶剂回收率。模拟在吸附预测中优势明显,但吸附动力学定量描述受机理与分子动力学关联不明的限制。

针对活性炭对多组分VOCs选择性吸附不足的问题,研究指出3大突破方向:精准调控表面官能团与孔径以增强匹配性;开发再生-回收协同工艺降低能耗、提升纯度;融合分子模拟与机器学习构建多组分吸附预测模型。上述成果为实现复杂VOCs体系的高效吸附与资源化回收提供理论与技术支撑。

#### 参考文献

- [1] Zhang X, Gao B, Creamer A E, et al. Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 338: 102-123.
- [2] Chen Z, Kirlikovali K O, Idrees K B, et al. Porous materials for hydrogen storage [J]. Chem, 2022, 8(3): 693-716.
- [3] 唐凯, 司焱光, 韩召席, 等. 蓝藻基氮杂化活性炭制备及催化5-羟甲基糠醛氧化合成二甲酰基咪唑 [J]. 精细化工, 2026, 43(2): 371-378.
- [4] Tetteh I K, Issahaku I, Tetteh A Y. Recent advances in synthesis, characterization, and environmental applications of activated car-

- bons and other carbon derivatives [J]. *Carbon Trends*, 2024, 14: 100328.
- [5] Ruan W, Wang Y, Liu C R, *et al.* One-step fabrication of N-doped activated carbon by  $\text{NH}_3$  activation coupled with air oxidation for supercapacitor and  $\text{CO}_2$  capture applications [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 168: 105710.
- [6] 彭超, 李长旭, 杨美婵, 等. 豆渣基生物质一步活化制备高性能多孔活性炭及其应用研究 [J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(12): 66-68.
- [7] Fallahpour N, Ebrahimi B. Basic and microwave modification processes to produce new activated carbon adsorbents based on *Pistacia atlantica* *Kurdica* nuts as carbonaceous raw material; A comparative study on the adsorption and elimination of acid blue 113 [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2024, 209: 272-282.
- [8] Peng D, Zhou G, An K, *et al.* Critical review on the adsorption of taste and odor compounds by activated carbon: Influencing factors, modifications methods, mechanism [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 507: 160677.
- [9] 王正, 毛以朝, 杨清河, 等. 改性活性炭吸附芳烃的研究进展 [J]. *应用化工*, 2023, 52(12): 3406-3417.
- [10] Hou B, Zhao Y, Sun W, *et al.* Glycine based modification of activated carbons for VOCs adsorption [J]. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2021, 7: 100126.
- [11] Yang X, Yi H, Tang X, *et al.* Behaviors and kinetics of toluene adsorption-desorption on activated carbons with varying pore structure [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 67: 104-114.
- [12] An Y, Fu Q, Zhang D, *et al.* Performance evaluation of activated carbon with different pore sizes and functional groups for VOC adsorption by molecular simulation [J]. *Chemosphere*, 2019, 227: 9-16.
- [13] Chen W, Zhao H, Xue Y, *et al.* Adsorption effect and adsorption mechanism of high content zeolite ceramics on asphalt VOCs [J]. *Materials*, 2022, 15(17): 6100.
- [14] Jia L, Shi J, Long C, *et al.* VOCs adsorption on activated carbon with initial water vapor contents: Adsorption mechanism and modified characteristic curves [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 731: 139184.
- [15] Huang S C, Chung T W, Wu H T. Effects of molecular properties on adsorption of six-carbon VOCs by activated carbon in a fixed adsorber [J]. *ACS Omega*, 2021, 6(8): 5825-5835.
- [16] 吴思聪. 活性炭热氮气循环脱附涂装 VOCs 规律及其再生特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [17] Liu Y, Peyravi A, Dong X, *et al.* Effect of microstructure in mesoporous adsorbents on the adsorption of low concentrations of VOCs: An experimental and simulation study [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 458: 131934.
- [18] 王艳, 梁晓烽. 改性树脂基活性炭对高湿度碘甲烷吸附性能研究 [J]. *炭素技术*, 2025, 44(1): 58-65.
- [19] Wang Y, Wu G, Zhang Y, *et al.* The deactivation mechanisms, regeneration methods and devices of activated carbon in applications [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 476: 143751.
- [20] 任思达, 梁文俊, 张依铭, 等. 工业炉窑 VOCs 废气吸附-脱附-催化一体化净化技术研究 [J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(5): 48-55.
- [21] Zhang H, Zhu L, Pan Z, *et al.* Exploring the mechanisms of enhanced activated carbon's toluene adsorption and regeneration by utilizing inherent pyrite in coal [J]. *Fuel*, 2025, 386: 134224.
- [22] Zhang Q, Zhang M, Li T, *et al.* FeOCl-confined activated carbon for improving intraparticle Fenton-like oxidation regeneration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 442: 130026.
- [23] Qu J, Dang X, Cao L, *et al.* Highly efficient regeneration of VOCs-saturated activated carbon by vacuum-thermal treatment [J]. *Applied Surface Science*, 2024, 672: 160792.
- [24] Li X, Ma J, Ling X. Design and dynamic behaviour investigation of a novel VOC recovery system based on a deep condensation process [J]. *Cryogenics*, 2020, 107: 103060.
- [25] Huang S Y, Lee G B, Park J E, *et al.* Removal and recycling of volatile organic compounds (VOCs) adsorbed on activated carbons using in situ vacuum systems [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(12): 7827-7836.
- [26] Moradi H, Azizpour H, Bahmanyar H, *et al.* Molecular dynamics simulation of  $\text{H}_2\text{S}$  adsorption behavior on the surface of activated carbon [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2020, 118: 108048.
- [27] Zhang S, Chen Q, Hao M, *et al.* Effect of functional groups on VOCs adsorption by activated carbon: DFT study [J]. *Surface Science*, 2023, 736: 122352. ■