

# UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的制备及其 甲醛吸附性能研究

房梦迪, 丁佳蓉, 赵爱晨, 胡泽文, 刘 玉\*  
(东北林业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**以巴沙木为载体,通过溶剂热法在木材管道内原位生成 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料;以甲醛为降解目标,对复合材料的甲醛吸附性能进行研究。并借助 XRD、FT-IR、SEM 和热重分析表征手段探讨了材料结构对吸附动力学的影响。结果表明,以木材为载体制备的 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的比表面积和孔径尺寸为木材的 2 倍,且其在 200℃ 以下热稳定性较 UiO-66-NH<sub>2</sub> 材料有明显提高,UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料对甲醛有良好的吸附性能,在 100 min 内对甲醛最高吸附效率为 95.64%,其对甲醛的吸附过程符合准二级动力学模型,主要表现为物理吸附,经颗粒内扩散模型分析,其甲醛的吸附过程以内部扩散为主。

**关键词:**木材;UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood;甲醛;吸附

**中图分类号:**X51

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2024)S2-0269-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.048

## Preparation of UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood composite and study on its performance in formaldehyde adsorption

FANG Meng-di, DING Jia-rong, ZHAO Ai-chen, HU Ze-wen, LIU Yu\*

(Material Science and Engineering College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood composite is generated in situ in a wood pipeline with balsa wood as a carrier via solvothermal method. The adsorption performance of the composite to formaldehyde is studied with formaldehyde as a degradation target, and the influence of the structure of the composite on the adsorption kinetics is explored by means of XRD, FT-IR, SEM and thermogravimetric characterization. It is found that the specific surface area and pore size of UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood composite prepared are twice those of wood. Below 200°C, UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood composite presents a better thermal stability than UiO-66-NH<sub>2</sub> material. The maximum adsorption efficiency of UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood composite to formaldehyde reaches 95.64% within 100 min, and its adsorption process to formaldehyde conforms to the quasi-secondary kinetic model, which is mainly manifested as physical adsorption. It is found by analyzing the intra-particle diffusion model that its formaldehyde adsorption process mainly bases on internal diffusion.

**Key words:** wood; UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood; formaldehyde; adsorption

室内建材与物品散发的有害气体是导致室内空气质量降低的根本原因之一<sup>[1]</sup>。甲醛是挥发性有机物(Volatile Organic Compounds)的重要组成部分,室内主要来源于建材与家装材料,其危害具有毒性强、作用器官多、反应关系复杂等特点<sup>[2]</sup>。

目前甲醛的控制方法主要有吸附法、氧化催化法与生物去除法,吸附法因成本相对较低且吸附材料来源广被高频应用。如活性炭及改性活性炭在甲醛吸附上的良好性能,特别是氨化改性活性炭的甲醛去除性能显著提高<sup>[3]</sup>;Feng 等<sup>[4]</sup>证明石墨烯中同时掺杂 N 原子和 Al 原子后,由弱物理吸附转变为

强化学吸附,使得掺杂石墨烯对甲醛的强吸附区域变大。

金属有机框架(Metal-organic frameworks,简称 MOF)是一类新型的多孔材料,由有机配体和无机金属中心通过配位键构建而成,且具备大孔隙度<sup>[5]</sup>、结构可调<sup>[6]</sup>、理化性质易于改性<sup>[7-8]</sup>,使得 MOF 材料及其衍生物在气体去除方面表现出高竞争力<sup>[9]</sup>。且简单改性即可使得 MOF 材料具备选择吸附性,如 Giasemi 等<sup>[10]</sup>设计并合成了四面体配体 4',4'',4''',4''''-甲烷四乙基四联苯-4-羧酸(H<sub>4</sub>MTBC)的砷(-SO<sub>2</sub>)功能化衍生物(H<sub>4</sub>MTBC-

收稿日期:2024-04-08;修回日期:2024-08-06

基金项目:黑龙江省自然科学基金(联合引导)(LH2023C041)

作者简介:房梦迪(1999-),女,硕士生,研究方向为刨花板 VOC 释放控制技术,fang13137048832@163.com;刘玉(1982-),女,博士,副教授,研究方向为人造板 VOC 释放控制技术,通讯联系人,liuyu820524@126.com。

SO<sub>2</sub>),作为一种新型的非对称结构单元,H<sub>4</sub>MTBC-SO<sub>2</sub>用于网状合成新的新型 Zr/Hf 和 RE MOFs,增加了 MOF 的表面积,得到的 Zr-flu-SO<sub>2</sub> 材料在同等条件下对 CO<sub>2</sub> 的吸附能力增加了 76.6%。Imad 等<sup>[11]</sup>将 UiO-66 材料引入聚醚酰亚胺(PEI)材料,制备出对 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 有良好分离性能的复合材料(MMMs),MMMs 材料主链降解温度为 540~545℃,具有较高热稳定性。基于生物质材料制备 MOF/生物质基复合材料已有显著成果,Zhao 等<sup>[12]</sup>通过将 TiO<sub>2</sub> 涂层沉积在聚酰胺-6 纳米纤维上,形成包括 UiO-66、UiO-66-NH<sub>2</sub> 和 UiO-67 在内的共形 Zr 基 MOF 薄膜,在神经毒剂去除上有良好性能,且 3 次循环后对 DMNP 依然有明显的去除效果。木材作为良好的再生资源,其结构独特,良好的可支撑 MOF 结构的三维材料。TU 等<sup>[13]</sup>在木材中引入 ZIF-8,通过原位沉积法成功制备 ZIF-8/木材复合材料,该材料在去除水污染罗丹明 B 中表现出优异性能,且引入 ZIF-8 后的木材力学性能与阻燃性能都有提高。

通过溶剂热法以巴沙木为基质引入 UiO-66-NH<sub>2</sub>,成功构建 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料,通过表征手段考察了复合材料中 UiO-66-NH<sub>2</sub> 形貌及结构特征,并对其甲醛气体的吸附性能进行测试,通过动力学拟合与颗粒内扩散模型分析其对甲醛吸附的作用机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

巴沙木(拉丁学名:*Ochroma lagopus*,尺寸 5 cm×5 cm×0.2 cm)、氯化锆(ZrCl<sub>4</sub>)、2-氨基对苯二甲酸(NH<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>BDC)、甲醛溶液(AR,100 μg/mL,基质为水,U=5%),麦克林试剂有限公司生产;N,N-二甲基甲酰胺(N,N-Dimethylformamide,别名 DMF)、去离子水、乙醇(EtOH),天津负宇精细化工有限公司生产。

### 1.2 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料制备

取 400 mg ZrCl<sub>4</sub> 和 248 mg NH<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>BDC 溶于 30 mL 的 DMF 中,搅拌至完全溶解,制成 UiO-66-NH<sub>2</sub> 前驱体溶液。将巴沙木木片放入前驱体溶液,于真空干燥箱中真空 1 h。将真空后的溶液与木片转移至 50 mL 反应釜中,在马弗炉中加热到 120℃ 反应 24 h,生成 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料。待温度降至室温,用 DMF 与 EtOH 交替清洗至无前驱体,将复合材料置于 65℃ 烘箱中干燥 24 h。

### 1.3 吸附性能测试

取 400 mL 去离子水,加入 8 mL 甲醛标准溶液(100 μg/mL)制成甲醛溶液,放置于 28℃ 水浴锅中,连接空气气瓶使气体能恒定通过甲醛溶液。取 0.1 g UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料于吸附管中,通过大气采样仪控制气体流速为 0.5 L/min,采样时间间隔为 10 min。采用 GB/T 15516—1995《空气质量 甲醛的测定 乙酰丙酮分光光度法》测定溶液中甲醛剩余量,并计算出 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的甲醛吸附量。

根据 GB/T 15516—1995 测定甲醛标准曲线,如图 1 所示,校准曲线为  $y=0.020\ 90x-0.003\ 96$ 。

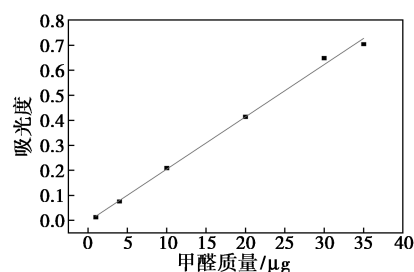


图 1 甲醛标准曲线

### 1.4 表征测试

通过 X 射线衍射仪(X'Pert3 Powder,荷兰)分析 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的物相结构。通过扫描电子显微镜(ZEISS Sigma 300,德国)观察木材导管 UiO-66-NH<sub>2</sub> 形貌。通过傅里叶变换红外光谱仪(FTIR-850,中国)分析 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的官能团。

### 1.5 吸附动力学拟合

为确定 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的吸附动力学特性,选用 Lagergren 准一级动力学方程、Ho 准二级动力学方程以及颗粒内扩散方程对动力学数据进行拟合分析并阐述吸附机理,其方程式如下:

$$q_t = q_e \{1 - \exp[-(k_1/2.303)t]\} \quad (1)$$

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + (1/q_e)t \quad (2)$$

$$q_t = K_d t^{0.5} + C \quad (3)$$

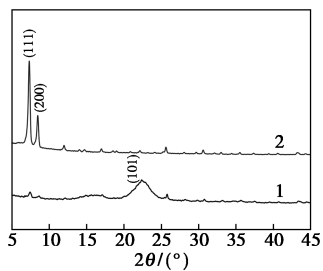
式中: $q_t$  为  $t$  时刻的吸附量,mg/g; $q_e$  为吸附质的平衡吸附量,mg/g; $k_1$  为准一级吸附速率常数, $\text{min}^{-1}$ ; $k_2$  为准二级吸附速率常数, $\text{min}^{-1}$ ; $K_d$  为颗粒内扩散速率常数, $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{min}^{0.5})$ ; $C$  为常数,mg/g。

## 2 结果与讨论

### 2.1 X 射线衍射分析

UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料及 UiO-66-NH<sub>2</sub>

的 XRD 图谱如图 2 所示。



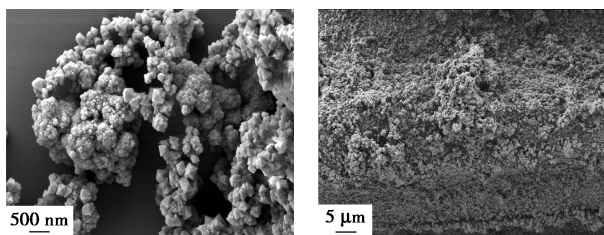
1—UiO-66-NH<sub>2</sub>; 2—UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood

图 2 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料及 UiO-66-NH<sub>2</sub> 的 XRD 图谱

由图 2 可以看出,制备所得 UiO-66-NH<sub>2</sub> 材料在  $2\theta$  为  $7.4^\circ$  和  $8.5^\circ$  处可观察到 (111)、(200) 晶面的特征峰<sup>[14-15]</sup>,与 UiO 系列材料的主要特征相符合。在制备的 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料图谱中除了 UiO-66-NH<sub>2</sub> 的特征峰外,还可观察到纤维素 (101) 晶面 ( $2\theta = 22.3^\circ$ ),证明 UiO-66-NH<sub>2</sub> 成功地与木材发生了复合,并且木材的晶面结构得以保留。

## 2.2 扫描电镜分析

UiO-66-NH<sub>2</sub>、UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料 SEM 图如图 3 所示。从图 3(a) 中可以看出,纯 UiO-66-NH<sub>2</sub> 材料呈无规则无形状分布,可以清晰地观察到 UiO-66-NH<sub>2</sub> 材料典型的八面体形状。从图 3(b) 中可以看出,与木材结合后,UiO-66-NH<sub>2</sub> 材料进入了木材的导管内部,这种导管内部的存在显示了 UiO-66-NH<sub>2</sub> 与木材之间的有效结合。证明了 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的形成。



(a) UiO-66-NH<sub>2</sub>

(b) UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood

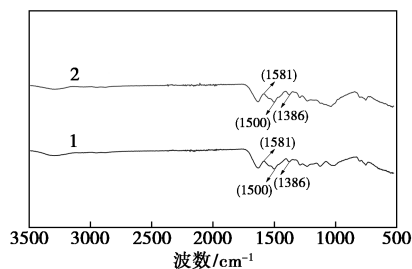
复合材料

图 3 UiO-66-NH<sub>2</sub>、UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料 SEM 图

## 2.3 傅里叶红外分析

通过傅里叶红外光谱仪探究了 UiO-66-NH<sub>2</sub> 材料及其与木材的复合材料的化学结构,如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,2 种材料在  $3\ 100\sim\ 3\ 500\ \text{cm}^{-1}$  范围内为 N—H 伸缩振动带,表明—NH<sub>2</sub> 基团的存



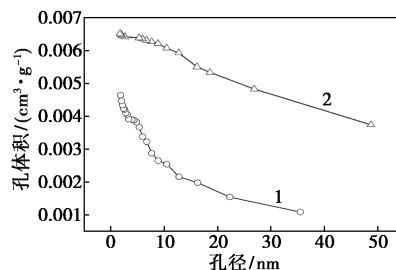
1—UiO-66-NH<sub>2</sub>; 2—UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood

图 4 UiO-66-NH<sub>2</sub>、UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料 FT-IR 图谱

在<sup>[16]</sup>。UiO-66-NH<sub>2</sub> 中的配体为 2-氨基对苯二甲酸,这是一种氨基功能化的对苯二甲酸,主要由芳香羧酸组成。在  $1\ 581\ \text{cm}^{-1}$  处,观察到来自羧酸盐中 C—O 键的振动峰,进一步确认了配体的存在。在  $1\ 500\ \text{cm}^{-1}$  处的小峰来自苯环中的 C=C 双键,而  $1\ 386\ \text{cm}^{-1}$  处观察到的峰值则是来自 H<sub>2</sub>BDC-NH<sub>2</sub> 配体羧基中 COO—的吸收峰<sup>[17]</sup>。这些特征峰证实了 UiO-66-NH<sub>2</sub> 材料的特征官能团。

## 2.4 孔隙结构分析

通过氮气吸脱附实验研究了木材、UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的孔隙结构,并由 BJH 模型计算得到孔径分布曲线如图 5 所示,其孔结构参数如表 1 所示。从图 5、表 1 中可以看出,未处理木材的孔径尺寸主要集中在  $0\sim\ 10\ \text{nm}$  内,最大孔径尺寸低于  $40\ \text{nm}$ ;UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的孔径尺寸分布在  $5\sim\ 15\ \text{nm}$ ,最大孔径尺寸高于  $40\ \text{nm}$ 。UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的比表面积和孔径都较于未处理木材有所增加。这主要是由于具有高比表面积的 UiO-66-NH<sub>2</sub> 多孔材料在木材的宏观孔隙结构中的填充使得材料微-介观孔隙比例进一步增加。且比表面积的增加为复合材料提供了更多的吸附活性位点,增加了与吸附物质接触的表面积;孔径的增加使得被吸附物质能够更轻松地进入和扩散到



1—UiO-66-NH<sub>2</sub>; 2—UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood

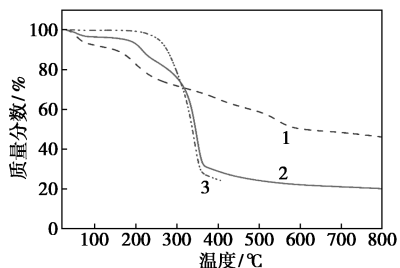
图 5 UiO-66-NH<sub>2</sub>、UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料孔径分布曲线

表 1 吸附材料的孔结构参数

样品	比表面积/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	孔容/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	孔径/ nm
未处理木材	2.0446	0.006152	13.2040
UiO-66-NH <sub>2</sub> /wood	3.8194	0.007641	25.6073

材料的内部,有助于减少扩散路径和质量传递阻力,提高吸附过程的效率和速率。

木材、UiO-66-NH<sub>2</sub>、UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料在氮气氛围下以 10℃/min 的升温速率自 40℃ 升至 800℃ 的热重曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,木材在 200~380℃ 失重明显,质量损失为 74.18%,主要来自木质素部分热解、结构性水分的蒸发。UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 材料在 40~100℃ 有较明显失重,质量损失为 3.5894%,其主要来自于残留的部分 DMF 与水分;在 200~380℃ 质量损失明显为持续的失重区域,高温使—NH<sub>2</sub> 和金属节点之间的键断裂,导致结构的解离和挥发,以及高温使得木材的纤维素、半纤维素等组分也开始分解。UiO-66-NH<sub>2</sub> 的失重阶段主要分为两段:40~100℃ 的失重主要来源于 DMF 与水分残留;100~600℃ 失重主要是高温破坏了有机配体与金属的连接键。UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 的热稳定性在 300℃ 以下较 UiO-66-NH<sub>2</sub> 有显著提高。



1—木材;2—UiO-66-NH<sub>2</sub>;3—UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood

图 6 木材、UiO-66-NH<sub>2</sub>、UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料热重曲线

### 2.5 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的甲醛吸附性能

UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料对初始质量浓度为 12.8 μg/L 的甲醛气体的吸附结果如图 7 所示。

由图 7 可知,UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料在对甲醛去除过程中呈现出随时间变化的动态特性,UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料在前 100 min 对甲醛去除速度较高,100 min 时甲醛吸附量为 6.92 mg/g,这是因为 UiO-66-NH<sub>2</sub> 的加入提高了材料的比表面积,增加了活性位点使得甲醛分子被吸附在 UiO-

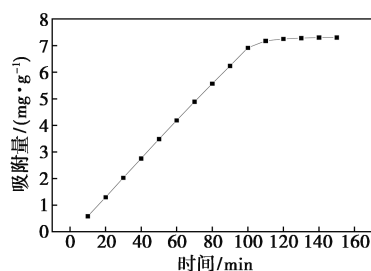
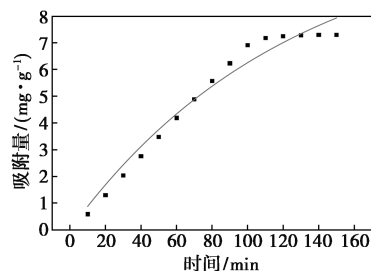


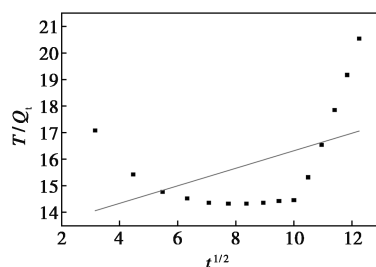
图 7 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料对甲醛的吸附量

66-NH<sub>2</sub> 的表面与微孔内;随着吸附扩散的进行,甲醛分子的扩散降低,在 100~150 min 逐渐达到吸附平衡;复合材料在吸附反应进行到 150 min 时吸附量为 7.3 mg/g,UiO-66-NH<sub>2</sub> 表面和孔道内的甲醛浓度达到了稳定状态,吸附和解吸的速率达到了动态平衡。

UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料吸附甲醛的准一级和准二级吸附动力学拟合结果分别如图 8 和表 2 所示。从图 8、表 2 中可以看出,UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料对甲醛的吸附过程复合准一级动力学拟合,甲醛分子在 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的吸附过程属于物理吸附,即分子间的非共价吸附。采用颗粒内扩散模型对甲醛分子在 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料内的吸附过程进行描述,结果如图 9 和表 3 所示。从图 9 和表 3 中可以看出,UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的颗粒内扩散常数变化规律为  $K_{d2} > K_{d1} > K_{d3}$ ,表明甲醛在 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料内部的吸附过程主要以内部扩散为主,其次是外部扩散,最后少量以孔隙扩散被吸附。



(a) 准一级吸附动力学



(b) 准二级吸附动力学

图 8 准一级动力学和准二级吸附动力学曲线

表 2 准一级和准二级动力学方程拟合参数

样品	准一级动力学		
	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	$k_1/min^{-1}$	$R^2$
UiO-66-NH <sub>2</sub> /wood	11.29964	0.00350	0.97392
样品	准二级动力学		
	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	$k_2/min^{-1}$	$R^2$
UiO-66-NH <sub>2</sub> /wood	0.07684	512.86872	0.21248

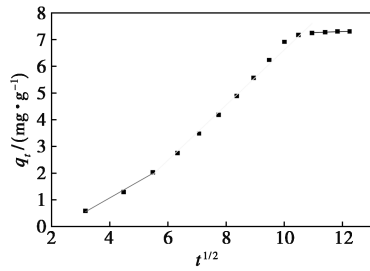


图 9 内扩散拟合

表 3 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 的颗粒内扩散模型拟合参数

样品	第 1 阶段		
	$K_{d1}$	$C_1$	$R^2$
UiO-66-NH <sub>2</sub> /wood	0.6208	-1.4087	0.9927
样品	第 2 阶段		
	$K_{d2}$	$C_2$	$R^2$
UiO-66-NH <sub>2</sub> /wood	1.0328	-3.7138	0.9914
样品	第 3 阶段		
	$K_{d3}$	$C_3$	$R^2$
UiO-66-NH <sub>2</sub> /wood	0.0394	6.8281	0.8704

### 3 结论

通过溶剂热法以巴沙木为载体成功制备了 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料,并对甲醛气体吸附性能进行研究,得出结论如下:

(1)木材的天然结构使得制备的 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料热稳定性较 UiO-66-NH<sub>2</sub> 材料有显著提高,同时 UiO-66-NH<sub>2</sub> 的引入使 UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料的比表面积与平均孔径有较大提高。

(2)UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料对甲醛气体的吸附效率为 95.6429%,通过吸附动力学拟合表明,UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料对甲醛吸附过程符合准一级动力学模型,为物理吸附;颗粒内扩散模型拟合表明,UiO-66-NH<sub>2</sub>/wood 复合材料对甲醛的吸附过程以内部扩散为主,相关拟合参数为 0.9927,部分甲醛在外部扩散过程中被吸附,微量甲醛为孔隙扩散过程被吸附。

### 参考文献

- [1] 周中平,赵寿堂,朱立,等.室内污染检测与控制[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [2] 杨振洲,蔡同建.室内甲醛的危害及其预防[J].中国公共卫生,2003,19(6):765-768.
- [3] Kang Y, Jo H, Jang M, et al. A brief review of formaldehyde removal through activated carbon adsorption[J]. Applied Sciences, 2022, 12(10):5025.
- [4] Feng C, Zhuo Y, Hu P. Research on adsorption enhancement of formaldehyde over transition-sensitive carbon materials for fast purification[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76:107353.
- [5] Farha O K, Eryazici I, Jeong N C, et al. Metal-organic framework materials with ultrahigh surface areas: Is the sky the limit? [J]. Journal of the American Chemical Society, 2012, 134(36):15016-15021.
- [6] Makiura R, Motoyama S, Umemura Y, et al. Surface nano-architecture of a metal-organic framework [J]. Nat Mater, 2010, 9(7):565-571.
- [7] Dashti A, Bahrololoomi A, Amirkhani F, et al. Estimation of CO<sub>2</sub> adsorption in high capacity metal-organic frameworks: Applications to greenhouse gas control [J]. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 2020, 41:101256.
- [8] Wang S M, Mu X T, Liu H R, et al. Pore-Structure control in metal-organic frameworks (MOFs) for capture of the greenhouse gas SF<sub>6</sub> with record separation [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2022, 61(33):e202207066.
- [9] Dong A, Chen D, Li Q, et al. Metal-organic frameworks for greenhouse gas applications[J]. Small, 2023, 19(10):e2201550.
- [10] Giasemi K, Angeli D B K M, Tsangarakis T S H O. Remarkable structural diversity between Zr/Hf and rare-earth MOFs via ligand functionalization and the discovery of unique (4,8)-c and (4,12)-connected frameworks [J]. Journal of the American Chemical Society, 2020, 142:15986.
- [11] Imad M, Castro-Muñoz R, Bernauer M, et al. Zr-based metal-organic framework UiO-66/Ultem® 1000 membranes for effective CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> separation[J]. Chemical engineering & technology, 2023, 46(10):2046-2053.
- [12] Zhao J, Lee D T, Yaga R W, et al. Ultra-fast degradation of chemical warfare agents using MOF-nanofiber kebabs [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2016, 55(42):13224-13228.
- [13] Tu K, Puértolas B, Adobes V M, et al. Green synthesis of hierarchical metal-organic framework/wood functional composites with superior mechanical properties [J]. Advanced Science, 2020, 7(7):1902897.
- [14] Ghalei B, Sakurai K, Kinoshita Y, et al. Enhanced selectivity in mixed matrix membranes for CO<sub>2</sub> capture through efficient dispersion of amine-functionalized MOF nanoparticles [J]. Nature Energy, 2017, 2(7):17086.
- [15] Xu Y M, Japip S, Chung T. UiO-66-NH<sub>2</sub> incorporated dual-layer hollow fibers made by immiscibility induced phase separation (12PS) process for ethanol dehydration via pervaporation [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 595:117571.
- [16] Kandiah M, Usseglio S, Svelle S, et al. Post-synthetic modification of the metal-organic framework compound UiO-66 [J]. Journal of Materials Chemistry, 2010, 20(44):9848.
- [17] Kandiah M, Nilsen M H, Usseglio S, et al. Synthesis and stability of tagged UiO-66 Zr-MOFs [J]. Chemistry of Materials, 2010, 22(24):6632-6640. ■