

# 聚丙烯蜂窝材料的改性和吸附空气污染物性能

黄超强<sup>1,2</sup>, 曾贵峰<sup>1</sup>, 姬文晋<sup>1</sup>, 程高<sup>1</sup>,  
窦永深<sup>3</sup>, 刘三毛<sup>3</sup>, 李永峰<sup>1,2,3\*</sup>

[1. 广东工业大学 轻工化工学院, 广东 广州 510006; 2. 化学与精细化工广东省实验室揭阳分中心(广东省榕江实验室), 广东 揭阳 515200; 3. 佛山市顺德区金磊环保科技有限公司, 广东 佛山 528308]

**摘要:** 以聚丙烯(PP)蜂窝材料(50 mm×25 mm×20 mm)为基底, 在涂覆技术的基础上, 先制备了铝氧化物改性PP蜂窝材料, 并进一步引入Zn<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和Ca<sup>2+</sup>等金属离子进行改性。采用SEM、EDS、BET和FTIR对其进行了表征。考察了PP蜂窝材料孔径、造孔剂(尿素)浓度、金属离子浓度、浸渍时间对铝氧化物和金属离子改性PP蜂窝材料氨气吸附性能的影响, 并对Ca<sup>2+</sup>改性PP蜂窝材料、Fe<sup>3+</sup>改性PP蜂窝材料分别在100 L和30 m<sup>3</sup>实验舱中的连续氨气吸附性能进行了评价。结果表明, 在以孔径2.0 mm的PP蜂窝材料、浓度2.6 mol/L铝溶胶溶液、浓度0.1 mol/L尿素、浓度0.3 mol/L Ca<sup>2+</sup>或Fe<sup>3+</sup>溶液、浸渍涂覆时间为10 min的条件下, 制备的铝氧化物改性PP蜂窝材料比表面积为9.9 m<sup>2</sup>/g, 60 min内氨气饱和吸附容量为22.2 g/L; Ca<sup>2+</sup>改性PP蜂窝材料和Fe<sup>3+</sup>改性PP蜂窝材料60 min内氨气饱和吸附容量分别为27.7和30.0 g/L, 三甲胺的吸附容量分别为12.6和15.3 g/L; 经热处理再生后, 铝氧化物改性PP蜂窝材料、Ca<sup>2+</sup>改性PP蜂窝材料和Fe<sup>3+</sup>改性PP蜂窝材料的氨气吸附性能不变。在100 L实验舱中, Ca<sup>2+</sup>改性PP蜂窝材料10 min内的氨气(18.8 mmol/m<sup>3</sup>)去除率为99.41%, 12次循环使用后氨气(70~100 mmol/m<sup>3</sup>)去除率>90%, 而Fe<sup>3+</sup>改性PP蜂窝材料60 min氨气去除率>95%, 经过3次使用后, 其氨气去除率仍>90%。

**关键词:** 聚丙烯蜂窝; 铝氧化物; 金属离子; 空气污染物; 放大实验; 功能材料

中图分类号: X51; TQ424 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214(2026)01-0094-09

## Modification on polypropylene honeycomb and its adsorption performance for indoor air pollutants

HUANG Chaoqiang<sup>1,2</sup>, ZENG Guifeng<sup>1</sup>, JI Wenjin<sup>1</sup>, CHENG Gao<sup>1</sup>,  
DOU Yongshen<sup>3</sup>, LIU Sanmao<sup>3</sup>, LI Yongfeng<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China; 2. Guangdong Provincial Laboratory of Chemistry and Fine Engineering Jieyang Center, Jieyang 515200, Guangdong, China; 3. Foshan Shunde Kinglei Environment & Technology Co., Ltd., Foshan 528308, Guangdong, China)

**Abstract:** Aluminum oxide and metal ions (Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>)-modified polypropylene (PP) honeycomb materials were prepared by coating technology using PP honeycomb (50 mm×25 mm×20 mm) as substrate, and characterized by SEM, EDS, BET and FTIR. The effects of pore size, concentration of pore-forming agent (urea), concentration of metal ions and impregnation time on ammonia adsorption activity of aluminum oxide and metal ions-modified PP honeycomb materials were analyzed, while the continuous ammonia adsorption performance of Ca<sup>2+</sup>-modified PP honeycomb and Fe<sup>3+</sup>-modified PP honeycomb were evaluated in 100 L and 30 m<sup>3</sup>, respectively. The results showed that under the conditions of impregnation and coating time 10 min, PP honeycomb with pore size 2.0 mm, aluminum sol solution with concentration of 2.6 mol/L, urea with concentration of 0.1 mol/L, Ca<sup>2+</sup> or Fe<sup>3+</sup> solution with a concentration of 0.3 mol/L, the prepared aluminum oxide-modified PP honeycomb exhibited a specific

surface area of 9.9 m<sup>2</sup>/g and an ammonia saturation adsorption capacity of 22.2 g/L within 60 min, while the Ca<sup>2+</sup>-modified PP honeycomb and Fe<sup>3+</sup>-modified PP honeycomb displayed an ammonia adsorption capacities of 27.7 and 30.0 g/L within 60 min, respectively, and a trimethylamine adsorption capacities of 12.6 and 15.3 g/L, respectively. After heat treatment and regeneration, the ammonia adsorption properties of aluminum oxide modified PP honeycomb, Ca<sup>2+</sup>-modified PP honeycomb and Fe<sup>3+</sup>-modified PP honeycomb remained unchanged. In the 100 L experimental chamber, the ammonia (18.8 mmol/m<sup>3</sup>) removal rate of Ca<sup>2+</sup>-modified PP honeycomb within 10 min was 99.41%, and the ammonia (70~100 mmol/m<sup>3</sup>) removal rate for 12 cycles was more than 90%. The ammonia removal rate of Fe<sup>3+</sup>-modified PP honeycomb was > 95% in 60 min, and remained >90% after 3 times of use.

**Key words:** polypropylene honeycomb; aluminum oxides; metal ions; air pollutants; scale-up experiment; function materials

氨和三甲胺是常见的室内空气污染物, 主要来源于建材、家庭日常使用的化学品、办公用品以及人们的日常活动。长期生活在空气污染严重的环境中, 可能会引起人体的不良反应和一系列并发症<sup>[1-3]</sup>。目前, 室内空气净化技术主要有生物净化技术<sup>[4]</sup>、吸附净化技术<sup>[5]</sup>、光催化净化技术<sup>[6]</sup>、等离子体净化技术<sup>[7]</sup>、臭氧净化技术<sup>[8]</sup>等。吸附净化技术具有效率高、成本低、操作简便和环境友好等特点, 在环境保护和资源回收领域发挥着重要作用<sup>[9-10]</sup>。在气态污染控制领域, 整体式吸附净化材料具备较小的风阻和较低的压降, 相较于粉末状材料更受青睐。通常情况下, 整体式吸附净化材料通过在规则的基底结构上固定活性成分, 使其与空气污染物发生化学反应, 从而将有害气体转化为无害的固态物质, 以达到有效捕获并去除空气中污染物的目的。这种设计不仅提升了材料的净化效率, 还有助于简化净化系统的能效和后期维护<sup>[11-12]</sup>。

聚丙烯 (PP) 是热塑性聚合物, 具有机械强度高、耐酸碱腐蚀和价格低廉等优势, 并能够制成蜂窝状结构, 甚至可以根据需要定制不同的孔径和形状, 在工业领域得到了广泛应用<sup>[13]</sup>。近期, 研究发现, 利用金属离子对 PP 材料进行改性可以有效提升其对污染物的吸附和催化性能。例如: NECHIFOR 等<sup>[14]</sup>在 PP 纤维中通过浸渍银-醋酸纤维素获得浸渍膜, 其对异味硫化氢、乙硫醇等恶臭气体的去除效率>95%; van PHAM 等<sup>[15]</sup>以 PP 膜为基底, 利用涂覆技术负载作为催化剂活性组分 Ag/SnO<sub>2</sub>, 也可以有效去除氮氧化物气体; ZHAO 等<sup>[16]</sup>通过对 PP 纤维进行 Fe<sup>3+</sup>改性, 制备了一种高效的磷酸盐吸附剂, 其在连续流动条件下的除磷效率>99%。

近年来, 通过金属离子改性吸附材料在污染治理方面的研究逐渐展开。例如: KHAN 等<sup>[17]</sup>制备了 Cu<sup>2+</sup>负载金属有机框架材料 (Cu<sup>2+</sup>/MIL-100-Fe), 将其用于吸附苯并噻吩, 结果表明, Cu<sup>2+</sup>/MIL-100-Fe 比表面积和孔体积随着 Cu<sup>2+</sup> 的加入而减小, 但吸附

容量逐渐增大, 这归因于苯并噻吩与 Cu<sup>2+</sup> 之间的络合作用; SHI 等<sup>[18]</sup>将经过质量分数 10% 的 HNO<sub>3</sub> 改性后的活性炭与浓度 0.25 mol/L 的 Fe<sup>3+</sup> 溶液按质量比 1 : 10 混合, 制备了复合吸附剂, 尽管比表面积和孔隙结构略有下降, 但总体吸附性能提升约 25%; 皇甫林等<sup>[19]</sup>通过 Ca<sup>2+</sup> 改性 LTA 型沸石, 制得的 Ca-LTA0 具有很强的 CO<sub>2</sub> 捕集能力, 经多次循环吸附/脱附后仍保持优异的吸附能力。

本文拟在 PP 蜂窝材料上负载铝氧化物和金属离子活性组分, 筛选出 PP 蜂窝材料的最佳制备工艺, 制备选择性高、稳定性强且具有高效脱除空气污染物的净化材料, 并进行放大实验, 旨在为改性 PP 材料在家电行业空气净化领域的应用提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 材料、试剂与仪器

PP 蜂窝材料 (50 mm×25 mm×20 mm), 佛山市顺德区金磊环保科技有限公司。

铝溶胶 (质量分数 21%~23%), 德州市晶火技术玻璃有限公司; 无水氯化钙, 分析纯, 天津市致远化学试剂有限公司; CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O、Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 分析纯, 广州化学试剂厂; FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 尿素, 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂。

Phenom Pro X 型飞纳台式扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线能谱仪 (EDS) 一体机, 复纳科学仪器 (上海) 有限公司; Autosorb-iQ 全自动比表面和孔径分布分析仪 (BET), 美国 Quantachrome 公司; Nicolet iS50R 型傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR), 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; AR8500 型氨气检测仪, 深圳市希玛科技股份有限公司。

### 1.2 制备方法

首先, 在 250 mL 烧杯中配制 100 mL 浓度 0~0.7 mol/L 的金属离子盐溶液、浓度 2.6 mol/L 的铝源 (铝溶胶) 溶液、浓度 0.1 mol/L 的尿素造孔剂溶

液,混合均匀得到涂覆浆料;然后,在室温下,将 50 mm×25 mm×20 mm PP 蜂窝材料浸入到涂覆浆料中浸渍 10 min 后,取出,用洗耳球吹扫去除孔道内残留的涂覆液;最后,将涂覆后的样品置于烘箱中,在 100 °C 下干燥 3 h,得到铝氧化物改性及其基础上金属离子改性 PP 蜂窝材料。

### 1.3 表征方法与性能测试

SEM 测试:样品喷金,低位二次电子 (LEI) 模式,工作电流 20  $\mu$ A,电子加速电压 15.0 kV。BET 测试:采用静态吸附法,以  $N_2$  为吸附质,在 77.35 K 下对 0.0800 g 样品进行  $N_2$  吸附-脱附曲线测试,测定样品的比表面积和孔径分布。EDS 测试:对样品表面的元素分布及含量进行测定。FTIR 测试:KBr 压片法,波数范围 4000~400  $cm^{-1}$ ,分辨率 4  $cm^{-1}$ ,扫描次数 32 次。

### 1.4 材料吸附性能测试

商用空气净化器、30  $m^3$  环境试验舱、氨气检测仪的实物图如图 1 所示。

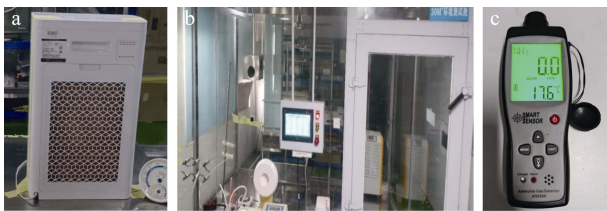


图 1 商用空气净化器 (a)、30  $m^3$  环境试验舱 (b)、氨气检测仪 (c) 实物图

Fig. 1 Physical images of commercial air purifier (a), 30  $m^3$  environmental cabin (b) and ammonia gas detector (c)

#### 1.4.1 静态法测试

在静态吸附装置中滴加氨水,并密封装置,让氨水在室温下自然扩散至充满装置。后续的吸附实验均在室温下进行,称重并记录吸附剂样品的初始质量 ( $m_0$ , g),然后将吸附剂样品放置于静态吸附装置中,再次密封装置后开始静态吸附测试。每隔 10 min,重新称重并记录吸附样品的质量 ( $m_t$ , g)。根据式 (1) 计算吸附剂的单位体积氨水静态吸附容量 (g/L):

$$\text{氨水静态吸附容量} = (m_t - m_0) / V \quad (1)$$

式中:  $V$  为吸附剂样品体积, L。

采用上述同样方法和步骤,使用纯水代替氨水,得到吸附剂单位体积纯水静态吸附容量 (g/L)。根据式 (2) 计算吸附剂单位体积氨气静态吸附容量 (g/L):

$$\text{氨气吸附容量} = A(\text{氨水}) - A(\text{纯水}) \quad (2)$$

式中:  $A(\text{氨水})$  和  $A(\text{纯水})$  分别为吸附剂单位体积氨水静态吸附容量和纯水静态吸附容量, g/L。

#### 1.4.2 动态法测试

动态法吸附评价使用 100 L 密封舱或 30  $m^3$  环

境试验舱,在室温下对氨气分子进行实时动态净化性能测试。

首先,制备尺寸为 40 mm×400 mm×20 mm 的金属离子改性 PP 蜂窝材料用于 100 L 密封舱;尺寸 310 mm×240 mm×20 mm 的金属离子改性 PP 蜂窝材料用于 30  $m^3$  密封舱。然后,在密封舱内放置加热器、氨气检测仪和空气净化测试装置。测试进行前,将含有待测氨气分子的标准溶液盛放在加热器上,利用加热器加热使氨气分子充分挥发,均匀扩散在密封舱内。当氨气浓度稳定后,开启空气净化测试装置,并使用氨气检测仪实时检测密封舱/环境舱内的氨气分子的浓度。氨气的初始浓度为 18.8 mmol/ $m^3$ 。后续测试中,氨气的初始浓度设置为 70~100 mmol/ $m^3$ 。根据式 (3) 计算氨气去除率 (%):

$$\text{氨气去除率} / \% = (c_0 - c_1) / c_0 \times 100 \quad (3)$$

式中:  $c_0$ 、 $c_1$  分别为氨气的初始浓度和净化后浓度, mmol/ $m^3$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铝氧化物改性 PP 蜂窝材料性能分析

#### 2.1.1 铝氧化物活性层的影响

铝溶胶作为结构助剂能够增强不同原料之间的黏结作用,并在热处理后形成氧化物,提高材料的比表面积,增加表面活性位点<sup>[20]</sup>。图 2 为 PP 蜂窝材料和铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的静态氨气吸附性能测试结果。

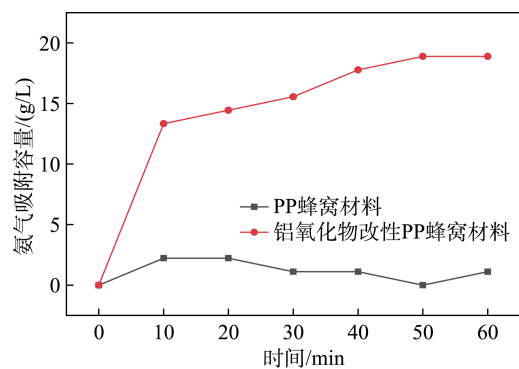


图 2 PP 蜂窝材料和铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能

Fig. 2 Ammonia adsorption performance of PP honeycomb and aluminum oxide-modified PP honeycomb

从图 2 可以看出,相较于 PP 蜂窝材料,铝氧化物改性 PP 蜂窝材料对氨气的吸附容量明显提升,60 min 内氨气吸附容量从 1.1 g/L 提升至 18.8 g/L。

图 3 为 PP 蜂窝材料和铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的 SEM 图。

从图 3 可以看出,PP 蜂窝材料的结构简单且表面光滑 (图 3a~c),铝氧化物改性 PP 蜂窝材料表面

因形成涂覆层而变得粗糙(图 3d~f), 这有利于吸附性能的提高。

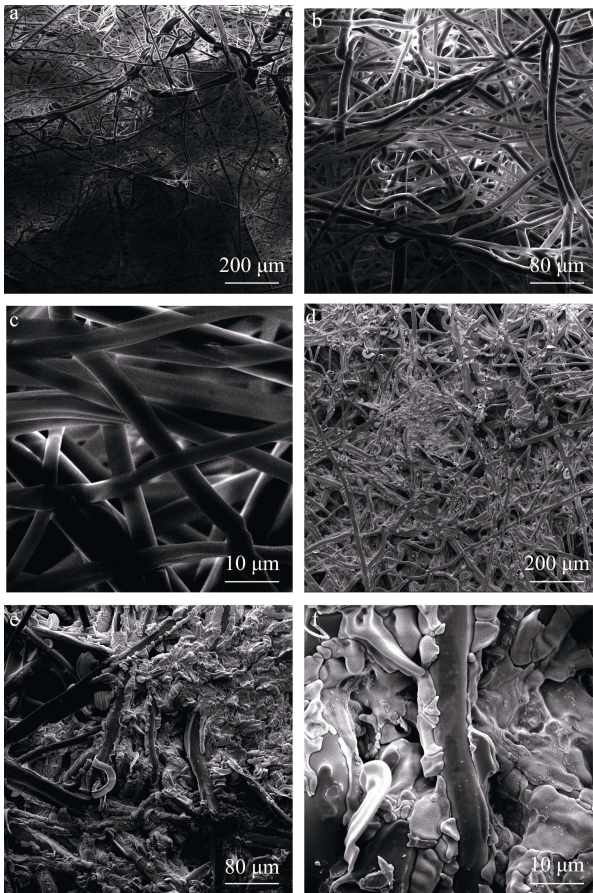


图 3 PP 蜂窝材料 (a~c) 和铝氧化物改性 PP 蜂窝材料 (d~f) 在不同放大倍数下的 SEM 图

Fig. 3 SEM images of PP honeycomb (a~c) and aluminum oxide-modified PP honeycomb (d~f)

表 1 为 PP 蜂窝材料和铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的表面 EDS 分析结果。

表 1 PP 蜂窝材料和铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的表面 EDS 分析

Table 1 Surface EDS analysis of PP honeycomb and aluminum oxide-modified PP honeycomb

样品	质量分数/%		
	C	O	Al
PP 蜂窝材料	100.00	—	—
铝氧化物改性 PP 蜂窝材料	15.69	47.77	36.54

注：“—”代表未检出，下同。

从表 1 可见, 铝氧化物改性 PP 蜂窝材料表面具有铝和氧元素, 说明 PP 表面形成了铝氧化物的涂覆层。根据  $n(\text{Al}) : n(\text{O}) = 1 : 2$ , 可以推测上述铝氧化物可能是  $\text{Al}(\text{OOH})$ 。

表 2 为 PP 蜂窝材料和铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的结构参数。

表 2 PP 蜂窝材料和铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的表面结构参数

Table 2 Surface structural parameters of PP honeycomb and aluminum oxide-modified PP honeycomb

样品	结构参数	
	BET 比表面积/( $\text{m}^2/\text{g}$ )	孔容/( $\text{mm}^3/\text{g}$ )
PP 蜂窝材料	1.9	1.0
铝氧化物改性 PP 蜂窝材料	4.1	4.0

从表 2 可以看出, PP 蜂窝材料的 BET 比表面积为  $1.9 \text{ m}^2/\text{g}$ , 孔容为  $1.0 \text{ mm}^3/\text{g}$ , 表明 PP 蜂窝材料表面光滑, 空隙结构相对简单。而铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的比表面积升至  $4.1 \text{ m}^2/\text{g}$ , 同时孔容提升至  $4.0 \text{ mm}^3/\text{g}$ , 表明铝氧化物改性可以有效增加 PP 蜂窝材料的比表面积和孔容。

### 2.1.2 浸渍涂覆时间的影响

图 4 为不同浸渍时间 (10 和 160 min) 对铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的静态氨气吸附容量的影响。

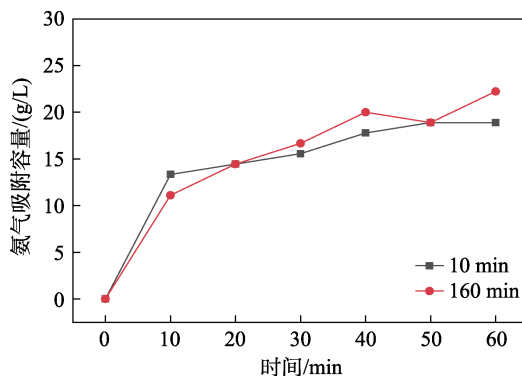


图 4 不同浸渍涂覆时间制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能

Fig. 4 Ammonia adsorption performance of aluminum oxide-modified PP honeycomb materials with different impregnation coating times

从图 4 可以看出, 浸渍时间的长短对铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的静态氨气吸附容量的影响不大。考虑到制备工艺的简易性, 后续实验中铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的制备均采用 10 min 的浸渍涂覆时间。

### 2.1.3 PP 蜂窝材料孔径的影响

材料的孔径大小对气态污染物在材料中的扩散具有显著影响。图 5 为不同孔径 (1.5、2.0 和 4.0 mm) PP 蜂窝材料经铝氧化物改性后的氨气吸附性能。

从图 5 可以看出, 孔径为 2.0 mm 的 PP 蜂窝材料制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能最佳。这可能是因为, 该孔径的 PP 蜂窝材料经铝氧化物改性后, 气体扩散阻力适中, 增加了气体污染物与材料的接触时间, 导致氨气吸附性能最优。因此, 选择孔径为 2.0 mm 的 PP 蜂窝材料作为基底材料进行后续实验。

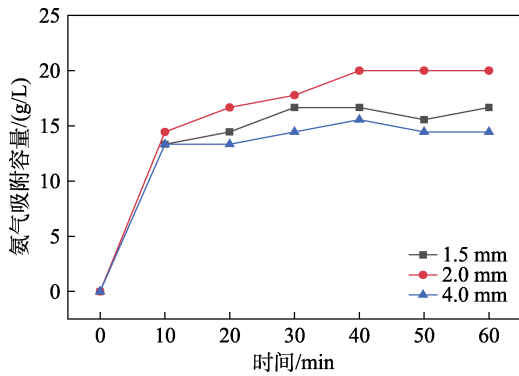


图 5 不同孔径 PP 蜂窝材料经铝氧化物改性后的氨气吸附性能

Fig. 5 Ammonia adsorption performance of aluminum oxide-modified PP honeycomb materials with different pore sizes

### 2.1.4 造孔剂的影响

尿素具有易挥发、沸点低、化学稳定性好等特点。与 PP 蜂窝材料相互作用后,由于尿素的分解温度相对较低,在热处理过程中能够分解并逸出,产生孔隙,因此被广泛用作造孔剂<sup>[21]</sup>。图 6 为有无造孔剂对制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能的影响。

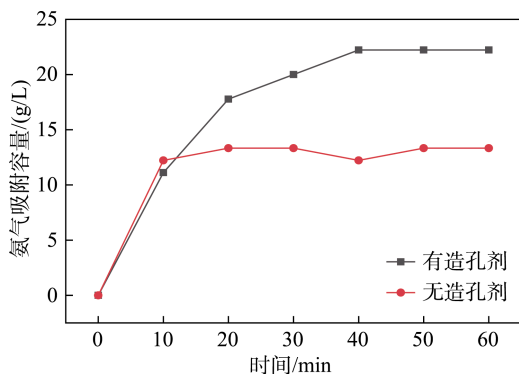


图 6 有无造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能

Fig. 6 Ammonia adsorption performance of aluminum oxide-modified PP honeycomb materials with or without pore forming agent

从图 6 可以看出,加入造孔剂前后,铝氧化物改性 PP 蜂窝材料,60 min 的氨气吸附容量从 13.3 g/L 增加至 22.2 g/L,表明造孔剂的加入可以提升铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能。

图 7 为添加造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的 SEM 图。

从图 7 可以看出,加入造孔剂后的样品相比于未加入造孔剂的样品,展现出更多的 PP 纤维。在造孔剂投料量为 0.1 mol/L 的条件下,分解的尿素并不会对 PP 纤维表面的涂层造成破坏,反而能够使 PP 蜂窝表面的铝氧化物活性层变得更为疏松多孔,使部分

被活性层厚厚掩盖的 PP 纤维基底能够显露出来。

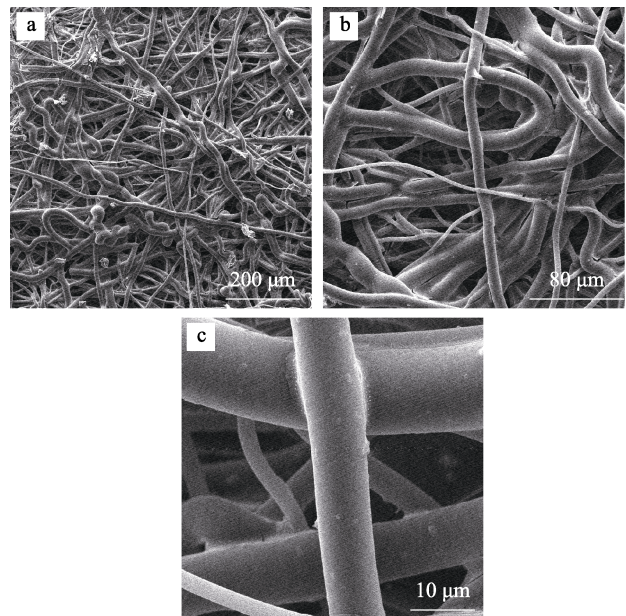


图 7 添加造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料在不同放大倍数下的 SEM 图

Fig. 7 SEM images of aluminum oxide-modified PP honeycomb materials obtained with adding pore forming agent at different magnifications

表 3 为有无添加造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的表面 EDS 分析结果。

表 3 有无添加造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的表面 EDS 分析

Table 3 Surface EDS analysis of aluminum oxide-modified PP honeycomb materials obtained without or with adding pore forming agent

铝氧化物改性 PP 蜂窝材料	质量分数/%			
	C	O	Al	N
无造孔剂	15.69	47.77	36.54	—
有造孔剂	45.81	34.66	16.72	2.81

从表 3 可以发现,铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的表面不但出现了归属于造孔剂尿素分解后残留的 N 元素,而且归属于 PP 基底的 C 元素含量也显著提升,说明造孔剂提升了 PP 表面铝氧化物活性层的涂覆均匀性和多孔性。

图 8 为有无造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附-脱附等温线和孔径分布曲线。

从图 8 可以看出,添加造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的吸附量显著提升,主要归因于材料内部孔径 2~10 nm 的介孔结构显著增多。因此,相较无造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料,添加造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的比表面积从 4.1 m<sup>2</sup>/g 提升到 9.9 m<sup>2</sup>/g。

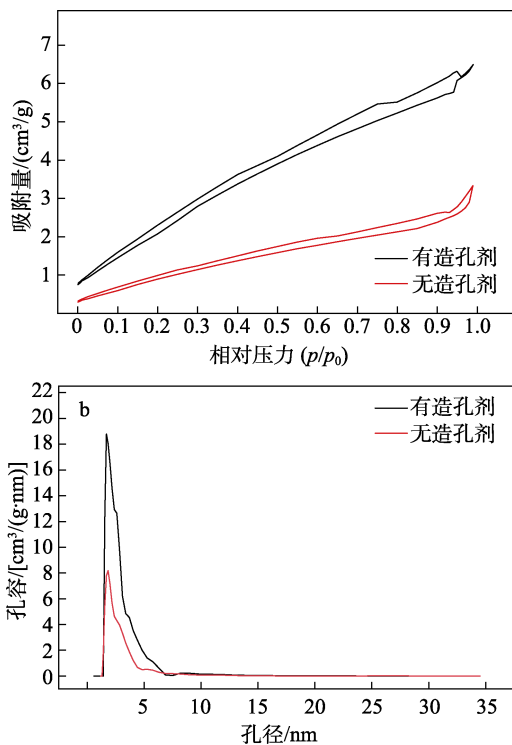


图 8 有无造孔剂制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线 (a) 和孔径分布曲线 (b)  
 Fig. 8 N<sub>2</sub> adsorption-desorption isothermal curves (a) and pore size distribution curves (b) of aluminum oxide-modified PP honeycomb materials with and without pore-forming agent

2.1.5 重复使用性能分析

图 9 为铝氧化物改性 PP 蜂窝材料热处理再生 (即在 100 °C 下干燥 2 h) 后的氨气吸附性能。

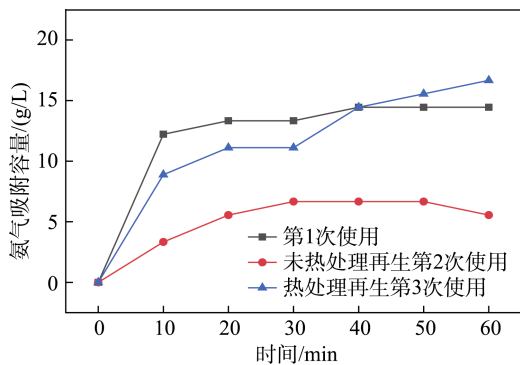


图 9 热处理再生对铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能的影响  
 Fig. 9 Effect of thermal treatment regeneration on ammonia adsorption performance of aluminum oxide-modified PP honeycomb

从图 9 可以看出, 经热处理再生后的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能与初次使用时基本相同, 而未进行热处理再生的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料则表现出显著的氨气吸附性能下降。结果表明, 热处理再生能够有效恢复材料的氨气吸附性能, 使其具备良好的重复使用能力。

图 10 为铝氧化物改性 PP 蜂窝材料在氨气吸附前、吸附后和热处理再生后的 FTIR 谱图。

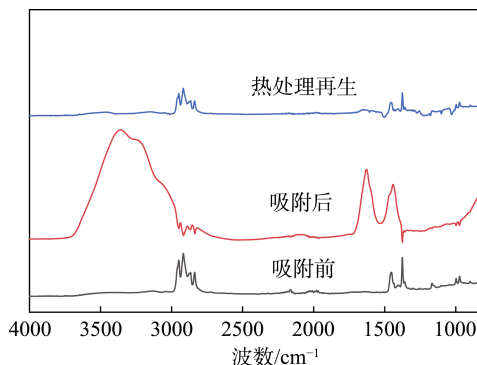


图 10 铝氧化物改性 PP 蜂窝材料吸附前、吸附后和热处理再生后的 FTIR 谱图  
 Fig. 10 FTIR spectra of aluminum oxide-modified PP honeycomb before and after adsorption, as well as treated by thermal treatment regeneration

从图 10 可以看出, 3600~3000 和 1627 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰分别为铝氧化物改性 PP 蜂窝材料吸附的空气中少量水分导致的弯曲振动和伸缩振动<sup>[22]</sup>。同时, 其吸附氨气后出现了明显的 N—H 特征峰, 分别位于 1630 和 1430 cm<sup>-1</sup> 处, 归属于配位氨在 Lewis 酸位点上的不对称变形和在 Brønsted 酸位点上吸附的铵离子不对称变形<sup>[23]</sup>。在较高波数范围 (3200 cm<sup>-1</sup>) 内, 还可以检测到 N—H (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NH<sub>3</sub>、NH<sub>2</sub>) 带。热处理再生后, 这些基团保持不变, 进一步表明, 经热处理再生后的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料基本没有损坏, 与其热处理再生后吸附性能变化不大的结果对应。

2.2 金属离子改性 PP 蜂窝材料性能分析

2.2.1 金属离子类型的影响

图 11 为经浓度 0.1 mol/L 的金属离子 (Zn<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>) 涂覆液浸渍制备的金属离子改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能。

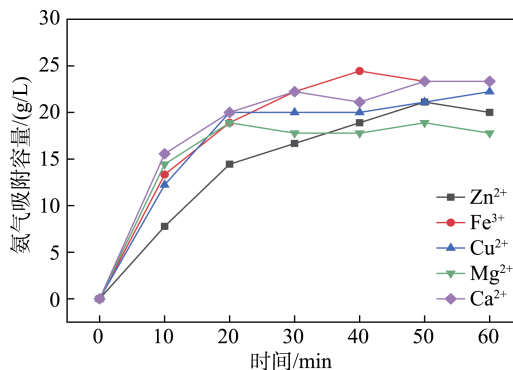


图 11 不同类型金属离子改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能  
 Fig. 11 Ammonia adsorption performance of PP honeycomb materials modified with different types of metal ions

从图 11 可以看出, Mg<sup>2+</sup> 改性 PP 蜂窝材料的吸

附效果较差,而  $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料吸附性能最佳,在 60 min 内,两者对氨气的吸附容量均达到 23.3 g/L。与未加金属离子改性的 PP 蜂窝材料相比, $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附容量提升幅度不大,这可能与金属离子的加入量过低有关。

### 2.2.2 金属离子浓度的影响

图 12 为经不同浓度 (0.1、0.3、0.4、0.5、0.7 mol/L) 的  $\text{Ca}^{2+}$ 涂覆液浸渍制备的金属离子改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能。

从图 12 可以看出,当  $\text{Ca}^{2+}$ 浓度为 0.3 mol/L 时,制备的金属离子改性 PP 蜂窝材料表现出最佳的吸附性能,氨气的吸附容量达到 27.7 g/L。进一步提高  $\text{Ca}^{2+}$ 浓度并未带来金属离子改性 PP 蜂窝材料吸附性能的显著提升。因此,选择浓度为 0.3 mol/L 的  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料可以实现最优吸附效果。

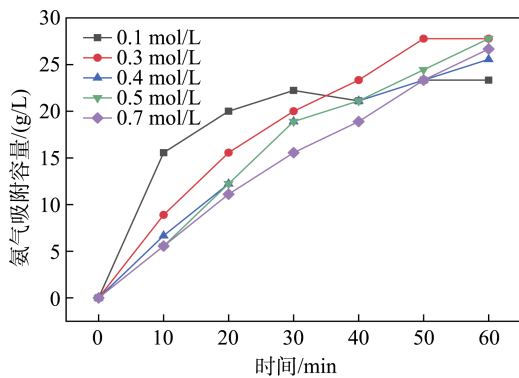


图 12 不同  $\text{Ca}^{2+}$ 浓度改性 PP 蜂窝材料的氨气吸附性能  
Fig. 12 Ammonia adsorption performance of PP honeycomb materials modified with different  $\text{Ca}^{2+}$  concentrations

### 2.2.3 重复使用性能分析

可再生或可重复利用性是衡量一种产品商用价值的重要标准,因此尝试对同一个经浓度 0.3 mol/L  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料,采用 100 °C 热处理 2 h 的方式进行再生,并再次用于静态吸附活性测试,探究其重复利用效果。图 13 为  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料热处理再生的重复使用性能测试结果。

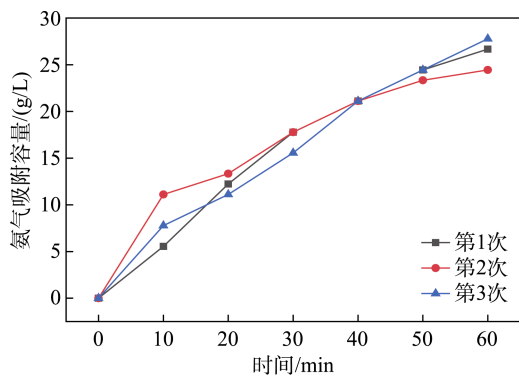


图 13  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料的重复使用性能  
Fig. 13 Repeatability performance of  $\text{Ca}^{2+}$ -modified PP honeycomb

从图 13 可以看出,3 次重复使用的氨气吸附性能几乎保持一致,表明  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料可以通过热处理再生实现重复使用。

### 2.2.4 对不同类型气态污染物的吸附性能分析

图 14 为由  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 浓度均为 0.3 mol/L 制备的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料对氨气、甲硫醇、甲苯和三甲胺的吸附性能。

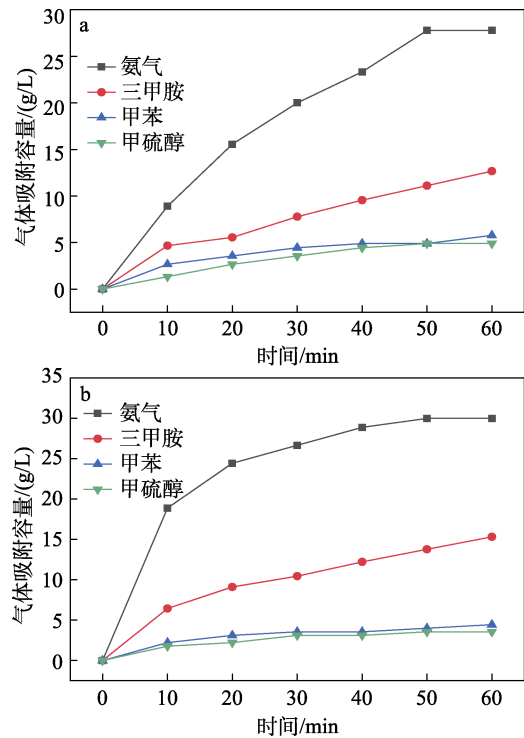


图 14  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料 (a) 和  $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料 (b) 对不同类型气态污染物的吸附性能  
Fig. 14 Adsorption performance of  $\text{Ca}^{2+}$ -modified PP honeycomb (a) and  $\text{Fe}^{3+}$ -modified PP honeycomb (b) for different types of gaseous pollutants

从图 14 可以看出,  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料和  $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料对氨气和三甲胺均具有优异的吸附效果,对氨气的吸附容量最高分别为 27.7 和 30.0 g/L,对三甲胺的最高吸附容量分别为 12.6 和 15.3 g/L。从图 14 还可以看出,  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料和  $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料对甲苯和甲硫醇的吸附性能较弱。

## 2.3 改性 PP 蜂窝材料放大应用分析

### 2.3.1 100 L 环境舱

图 15 为  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料在 100 L 环境舱内多次重复使用脱除氨气的动态循环测试结果。

从图 15 可以看出,第 1 次使用时,  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料 10 min 内的氨气 (18.8 mmol/m<sup>3</sup>) 去除率达到了 99.41%,显示出显著的脱除效果。后续测试中,随着使用次数的增加,氨气 (70~100 mmol/m<sup>3</sup>) 去除率略有下降,但始终 >90%。表明  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料不仅能有效脱除氨气,还具有良好的稳定性和重复使用性。

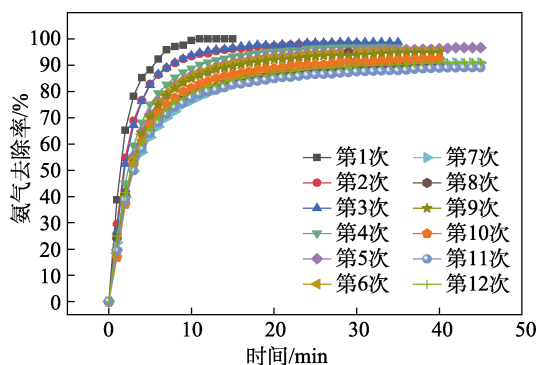


图 15  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料在 100 L 环境舱内多次重复使用脱除氨气的动态循环性能

Fig. 15 Dynamic cycling performance of  $\text{Ca}^{2+}$ -modified PP honeycomb for ammonia removal in 100 L environmental chamber after repeated use

### 2.3.2 30 m<sup>3</sup> 环境舱

图 16 为  $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料在 30 m<sup>3</sup> 环境舱内多次重复使用脱除氨气的动态循环测试结果。

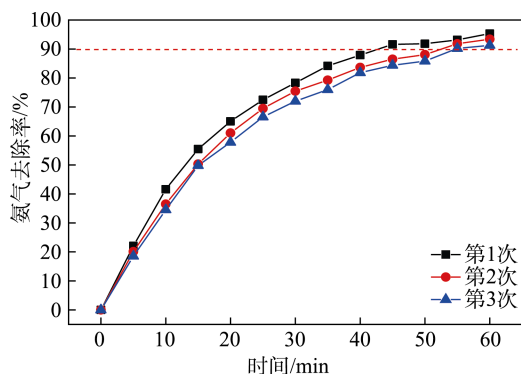


图 16  $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料在 30 m<sup>3</sup> 环境舱内多次重复使用脱除氨气的动态循环性能

Fig. 16 Dynamic cycling performance of  $\text{Fe}^{3+}$ -modified PP honeycomb for ammonia removal in 30 m<sup>3</sup> environmental chamber after repeated use

从图 16 可以看出, 在第 1 次使用中,  $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料 60 min 氨气去除率 >95%, 经过 3 次使用后, 其氨气去除率仍 >90%, 表现出优异的稳定性和可重复使用效果。

## 3 结论

采用 PP 蜂窝材料, 通过涂覆技术分别制备了铝氧化物和金属离子改性 PP 蜂窝材料, 考察其氨气吸附性能。

(1) 选用孔径 2.0 mm 的 PP 蜂窝材料、浓度 2.6 mol/L 的铝溶胶溶液、浓度 0.1 mol/L 造孔剂尿素、浸渍涂覆时间为 10 min, 制备的铝氧化物改性 PP 蜂窝材料比表面积为 9.9 m<sup>2</sup>/g, 60 min 内氨气饱和吸附容量为 22.2 g/L, 经热处理再生后, 铝氧化物改性 PP 蜂窝材料氨气吸附性能效果不变。

(2) 选用孔径 2.0 mm 的 PP 蜂窝材料、浓度 0.3 mol/L 的  $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Fe}^{3+}$ 溶液、浓度 0.1 mol/L 造孔剂尿素、浸渍涂覆时间为 10 min, 制备的  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料和  $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料 60 min 内氨气饱和吸附容量为 27.7 和 30.0 g/L, 三甲胺的吸附容量 12.6 和 15.3 g/L, 经热处理再生后, 其吸附性能效果不变。

(3) 在 100 L 实验舱中,  $\text{Ca}^{2+}$ 改性 PP 蜂窝材料 10 min 内的氨气 (18.8 mmol/m<sup>3</sup>) 去除率为 99.41%, 12 次循环使用的氨气 (70~100 mmol/m<sup>3</sup>) 去除率 >90%。 $\text{Fe}^{3+}$ 改性 PP 蜂窝材料 60 min 氨气去除率 >95%, 经过 3 次使用后, 其氨气去除率仍 >90%。

### 参考文献:

- [1] KRAAKMAN N J R, GONZ LEZ-MART N J, P REZ C, *et al.* Recent advances in biological systems for improving indoor air quality[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 20: 363-387.
- [2] HU J Y (胡旌钰), LI R (李茹), FENG Y (冯燕). Research progress on classification of indoor air pollutants and purification technologies[J]. *Contemporary Chemical Industry (当代化工)*, 2022, 51(2): 418-422.
- [3] SARAGA D E, QUEROL X, DUARTE R M, *et al.* Source apportionment for indoor air pollution: Current challenges and future directions[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 900: 165744.
- [4] MATA T M, MARTINS A A, CALHEIROS C S, *et al.* Indoor air quality: A review of cleaning technologies[J]. *Environments*, 2022, 9(9): 118.
- [5] WANG S, NAM H, GEBREEGZIABHER T B, *et al.* Adsorption of acetic acid and hydrogen sulfide using NaOH impregnated activated carbon for indoor air purification[J]. *Engineering Reports*, 2020, 2(1): e12083.
- [6] LEDERER S, BENFER S, BLOH J, *et al.* Development of photocatalytically active anodized layers by a modified phosphoric acid anodizing process for air purification[J]. *Corrosion and Materials Degradation*, 2022, 4(1): 18-30.
- [7] YAN Y (闫妍), GAO Y N (高亚楠), LI Q W (李其玮), *et al.* Synergistic disinfection effect of plasma and nano-TiO<sub>2</sub> photocatalyst on indoor air[J]. *Chinese Journal of Disinfection (中国消毒学杂志)*, 2022, 39(2): 83-86.
- [8] DAI J L (戴久丽), JIA H Y (贾惠言), ZHOU X (周潇), *et al.* Study on the impact of ozone air purification technology on growth performance and economic benefits of pigs[J]. *China Swine Industry (中国猪业)*, 2023, 18(3): 85-89.
- [9] LU S, LIU Q, HAN R, *et al.* Potential applications of porous organic polymers as adsorbent for the adsorption of volatile organic compounds[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 105: 184-203.
- [10] SAARELA T, LAFDANI E K, LAUR N A, *et al.* Biochar as adsorbent in purification of clear-cut forest runoff water: Adsorption rate and adsorption capacity[J]. *Biochar*, 2020, 2: 227-237.
- [11] POUR S E, MAMAGHANI A H, HASHISHO Z. Modeling of adsorption process on monolith adsorbents: A mini-review[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 354: 128846.
- [12] SUN S, VIKRANT K, VERMA S, *et al.* Diaminopropane-appended activated carbons for the adsorptive removal of gaseous formaldehyde using a portable indoor air purification unit[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 653: 992-1005.
- [13] WU R, YANG G, LI S, *et al.* Experimental study on the effects of matrix suction on shear properties of polypropylene fiber

- reinforced unsaturated clay[J]. *Materials*, 2022, 15(22): 8223.
- [14] NECHIFOR A C, COTORCEA S, BUNGĂU C, *et al.* Removing of the sulfur compounds by impregnated polypropylene fibers with silver nanoparticles-cellulose derivatives for air odor correction [J]. *Membranes*, 2021, 11(4): 256.
- [15] van PHAM V, NGUYEN P H, NGUYEN Q X, *et al.* NO<sub>x</sub> treatment's photocatalytic activity using the Ag/SnO<sub>2</sub>/polypropylene [J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2024, 60(5): 1477-1482.
- [16] ZHAO S, WANG F, ZHOU R, *et al.* Fabrication of recyclable Fe<sup>3+</sup> chelated aminated polypropylene fiber for efficient clean-up of phosphate wastewater[J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2023, 17(7): 840-852.
- [17] KHAN N A, JHUNG S H. Low-temperature loading of Cu<sup>+</sup> species over porous metal-organic frameworks (MOFs) and adsorptive desulfurization with Cu<sup>+</sup>-loaded MOFs[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 237: 180.
- [18] SHI Z L, LIU F M, YAO S H. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using activated carbon loaded with Fe(III) oxide[J]. *New carbon materials*, 2011, 26(4): 299-306.
- [19] HUANGFU L (皇甫林), SHANG B (尚波), LI F Y (李方园), *et al.* K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Ce<sup>3+</sup> modified titanium slag-derived LTA-type zeolite and its CO<sub>2</sub> adsorption performance[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2024, 41(8): 1-18.
- [20] YUAN J, ZHAO K, CAI T, *et al.* One-step dip-coating of uniform γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers on cordierite honeycombs and its environmental applications[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(13): 14384-14390.
- [21] WEN Q, CHEN H, WEI J, *et al.* Preparation of nitrogen-doped porous carbon by urea-formaldehyde resin for the construction of membrane adsorption reactor to remove refractory pollutant[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 282: 120105.
- [22] AZEEZ S, SHENBAGARAMAN R. Fourier transform infrared spectroscopy in characterization of bionanocomposites[M]. *Characterization Techniques in Bionanocomposites*, Elsevier, 2025: 209-207.
- [23] LI W, SIRILUMPEN M, YANG R T. Selective catalytic reduction of nitric oxide by ethylene in the presence of oxygen over Cu<sup>2+</sup> ion-exchanged pillared clays[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1997, 11(3): 347-363.

(上接第 41 页)

- [7] MOHSEN A, MORTEZA S, MAHDI P C. Improving antifouling performance of PAN hollow fiber membranes using surface modification method[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2015, 55: 42-48.
- [8] NAZRI N A M, LAU W J, ISMAIL A F, *et al.* Performance of PAN-based membranes with graft copolymers bearing hydrophilic PVA and PAN segments in direct ultrafiltration of natural rubber effluent[J]. *Desalination*, 2015, 358: 49-60.
- [9] XU J, XU Z L. Poly(vinyl chloride) (PVC) hollow fiber ultra-filtration membranes prepared from PVC/additives/solvent [J]. *Journal of Membranes Science*, 2002, 208(1/2): 203-212.
- [10] BEHBOUDI A, JAFARZADEH Y, YEGANI R. Enhancement of antifouling and antibacterial properties of PVC hollow fiber ultrafiltration membranes using pristine and modified silver nanoparticles[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(2): 1764-1773.
- [11] LI Y J, HU X M, WU Z H, *et al.* Review of liquid-liquid hollow fiber membrane contactor for ammonia recovery from wastewater: Membrane, feed and receiving solution[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(5): 113515.
- [12] DING X B, WANG F, LIN G M, *et al.* The enhancement of separation performance of hollow fiber membrane modules: From the perspective of mem-branes and membrane modules structural optimization design[J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 280: 119106.
- [13] PAGLIERO M, KHAYET M, GARCÍA-PAYO C, *et al.* Hollow fibre polymeric membranes for desalination by membrane distillation technology: A review of different morphological structures and key strategic improvements[J]. *Desalination*, 2021, 516: 115235.
- [14] GUGOUCH F, WAHID A, BOUHSISS H, *et al.* Comparison of the thermal behavior of HDPE thermo-plastic polymer with CPVC[J/OL]. *Materials Today: Proceedings*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.049>.
- [15] LIU S H, CHU Y J, TANG C, *et al.* High-performance chlorinated polyvinyl chloride ultrafiltration membranes prepared by compound additives regulated non-solvent induced phase separation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 612: 118434.
- [16] KHTIBARI A, EN-NAJI A, KARTOUNI A, *et al.* Mechanical behavior and damage analysis of the chlorinated polyvinyl chloride (CPVC)[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2023, 47: 855-862.
- [17] YANG Q (杨泉), ZHAO B B (赵宝宝), WANG Z (王震), *et al.* Effect of polymer concentration on the structure and performance of chlorinated polyvinyl chloride plate ultrafiltration membranes[J]. *China Plastics Industry (塑料工业)*, 2022, 50: 125-131, 156.
- [18] CHEN G J, YANG Y Y, KANG D D, *et al.* Enhanced performances of chlorinated polyvinyl chloride (CPVC) ultrafiltration membranes by styrene-maleic anhydride copolymer[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 258(2): 118043.
- [19] LU W J, SHI D Q, ZHANG H M, *et al.* Advanced poly(vinyl pyrrolidone) decorated chlorinated polyvinyl chloride membranes with low area resistance for vanadium flow battery[J]. *Journal of Membranes Science*, 2021, 620: 118947.
- [20] XU K Y (徐凯杨), QIAN J H (钱建华), SUN L Y (孙丽颖), *et al.* Research on hydrophilic modification of chlorinated polyvinyl chloride (CPVC)/polyvinyl butyral (PVB) resin blend membranes [J]. *Advanced Textile Technology (现代纺织技术)*, 2022, 30: 178-185.
- [21] FAN Y R (范洋瑞), QIAN J H (钱建华), XU K Y (徐凯杨), *et al.* Interfacial polymerization modification of chlorinated polyvinyl chloride/polyvinyl butyral blend membrane[J]. *Journal of Textile Research (纺织学报)*, 2023, 44: 33-41.
- [22] ZHANG C (张晨), ZHANG Q (张琪), CHEN S Y (陈淑怡), *et al.* Effect of glucose on performance of composite chlorinated polyvinyl chloride nanofiltration membranes and membranes application in dye/salt fractionation[J/OL]. *Journal of Donghua University: Natural Science (东华大学学报: 自然科学版)*, 2024, 1-10[2024-06-28]. <https://doi.org/10.19886/j.cnki.dhdz.2024.0008>. DOI: 10.19886/j.cnki.dhdz.2024.0008.
- [23] LI Z H (李泽辉), CUI H (崔恒), WANG J (王军). Preparation of CPVC composite nanofiltration membranes and its application in simulated RB5 dye wastewater treatment[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress (化工进展)*, 2021, 40(S1): 456-465.
- [24] ZHAO S, WANG Z, WANG J X, *et al.* PSf/PANI nanocomposite membrane prepared by *in situ* blending of PSf and PANI/NMP[J]. *Journal of Membranes Science*, 2011, 376(1/2): 83-95.
- [25] YANG H (杨行), LIU S H (刘圣慧), JI S F (冀世锋), *et al.* Preparation and characterization of polyethersulfone/sulfonated polysulfone flat-sheet membrane by reverse thermally induced phase separation method[J]. *Polymer Materials Science & Engineering (高分子材料科学与工程)*, 2020, 36: 15-22.
- [26] LIU Y Q (刘源骞), CHEN Y B (陈英波), XU L Z (许林哲), *et al.* Preparation and properties of polyether sulfone/modified UiO-66 blended ultrafiltration membrane[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2024, 41(11): 2413-2422.