

DOI: 10.19666/j.rlfed.202505100

# 疏水型树脂基固态胺吸附剂制备及 空气碳捕集性能研究

张贵泉<sup>1</sup>, 向小凤<sup>1</sup>, 孙雅萍<sup>2</sup>, 姚建涛<sup>1</sup>, 龙国军<sup>1</sup>, 晋中华<sup>1</sup>, 徐党旗<sup>1</sup>

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;  
2.华能山东石岛湾核电有限公司, 山东 荣成 264312)

**[摘要]**以疏水型油性大孔吸附树脂为载体, 利用不同分子量的聚乙烯亚胺(polyethyleneimine, PEI)修饰多孔材料, 制备了疏水型树脂基固态胺吸附剂; 通过N<sub>2</sub>等温吸附-脱附、红外和热分析等仪器对其比表面积和孔结构、官能团结构、热失重特性等进行表征; 探究了PEI负载量、空气湿度(30%~80%)、吸附时间和多次循环对吸附剂CO<sub>2</sub>吸附性能的影响。研究表明: 疏水型树脂基固态胺吸附剂对于干空气(空气湿度低于50%)中CO<sub>2</sub>具有良好的捕集性能, 30%PEI改性的SD300树脂基固态胺吸附剂在大气环境下吸附1 h即可达到总吸附容量的90%以上, 当PEI的分子量为1 800时吸附剂表现出较高的吸附容量和良好的吸脱附循环稳定性, 这主要归因于较高的孔径尺寸及其出色的耐高温特性。

**[关键词]** 疏水型; 树脂; 固态胺; 吸附剂; 碳捕集

**[引用本文格式]** 张贵泉, 向小凤, 孙雅萍, 等. 疏水型树脂基固态胺吸附剂制备及空气碳捕集性能研究[J]. 热力发电, 2025, 54(12): 109-114. ZHANG Guiquan, XIANG Xiaofeng, SUN Yaping, et al. Preparation of hydrophobic resin-based solid amine adsorbent and its performance of carbon capture in air[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(12): 109-114.

## Preparation of hydrophobic resin-based solid amine adsorbent and its performance of carbon capture in air

ZHANG Guiquan<sup>1</sup>, XIANG Xiaofeng<sup>1</sup>, SUN Yaping<sup>2</sup>, YAO Jiantao<sup>1</sup>, LONG Guojun<sup>1</sup>,  
JIN Zhonghua<sup>1</sup>, XU Dangqi<sup>1</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;  
2. Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co., Ltd., Rongcheng 264312, China)

**Abstract:** The hydrophobic resin-based solid amine adsorbent was prepared by modifying porous materials with different-molecular-weight polyethyleneimine (PEI), by taking hydrophobic oily macroporous adsorbent resin as carrier. The specific surface area, pore structure, functional group structure and thermogravimetric properties of the resin-based solid amine adsorbent were characterized by N<sub>2</sub> isothermal adsorption-desorption, infrared and thermal analysis. The effects of PEI loading, air humidity (30%~80%), adsorption time and multiple cycles on the adsorption performance of CO<sub>2</sub> were investigated. The results show that, the hydrophobic resin-based solid amine adsorbent has good trapping performance for CO<sub>2</sub> in dry air (air humidity is less than 50%). The SD300 resin-based solid amine adsorbent modified by 30%PEI can reach more than 90% of the total adsorption capacity after one hour adsorption in atmospheric environment. When the molecular weight of the PEI is 1 800, it shows high adsorption capacity and good cycle stability of adsorption and desorption, mainly due to the high pore size and its excellent high temperature resistance.

**Key words:** hydrophobic; resin; solid amine; adsorbent; carbon capture

收稿日期: 2025-05-20

基金项目: 陕西省重点研发计划(2023-YBSF-140); 西安热工院研发基金(TD-23-TYK01)

Supported by: Key Research and Development Project of Shaanxi Province (2023-YBSF-140); Research and Development Fund of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TD-23-TYK01)

第一作者简介: 张贵泉(1985), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为碳捕集及储能技术, zhangguiquan@tpri.com.cn.

直接空气碳捕集(direct air carbon capture, DAC)法是在持续运行模式下从大气中捕集 CO<sub>2</sub><sup>[1-2]</sup>, 可长期、高效地减少大气中的温室气体含量, 主要有溶液吸收法、固体吸附法、膜分离法等<sup>[3-4]</sup>。而吸附分离法是低含量 CO<sub>2</sub> 捕集的重要技术, 具有再生能耗低、吸附床层压降低、操作简单等优点<sup>[5-6]</sup>。吸附分离法利用吸附剂对气体组分在温度或压力变化时吸附能力不同的特性实现 CO<sub>2</sub> 分离。如变温吸附法是利用固态胺吸附剂的平衡吸附量随着温度的升高而降低的原理, 在常温下吸附而在高温下解吸附的吸附分离方法。变压吸附法利用吸附剂对混合气体中各组分吸附性能的差异, 通过周期性压力变化实现气体分离<sup>[7-8]</sup>。目前, 研究较多的 CO<sub>2</sub> 吸附剂有活性炭、沸石、金属有机框架(MOFs)、层状双氢氧化物、金属氧化物(CaO)和胺改性材料等<sup>[9-10]</sup>。

然而单一属性的物理吸附剂具有选择性差、吸附剂不耐水、过程能耗高等缺点, 因此研究人员多通过负载有机胺(如四乙基五胺(TEPA)或聚乙烯亚胺(PEI)等)提高吸附剂对 CO<sub>2</sub> 的吸附容量和选择性, 其中伯胺和仲胺是 CO<sub>2</sub> 吸附的主要活性点位<sup>[11-12]</sup>。Ishibashi 等人<sup>[13]</sup>利用沸石分子筛的双塔真空变压-变温吸附耦合工艺对烟道气中 CO<sub>2</sub> 进行吸附分离, CO<sub>2</sub> 回收率达到 90%。江南等<sup>[14]</sup>模拟计算沸石的四塔真空变温吸附分离干烟道气中的 CO<sub>2</sub>, 可获得 CO<sub>2</sub> 纯度 97.54%, CO<sub>2</sub> 回收率为 96.79%。梁辉等<sup>[15]</sup>利用沸石的五步循环真空变温变压耦合吸附工艺分离烟道气中的 CO<sub>2</sub>, 在 90~150 °C、 $3 \times 10^3$  Pa 条件下, 吸附可获得 CO<sub>2</sub> 纯度在 90% 以上。文献<sup>[16-18]</sup>研究表明, 树脂材料具有耐水性强、强度高、不易破损的特点, 在合成碳捕集固态吸附材料方面展现出特有的优势。

然而, 现有研究报道的树脂材料均为亲水性树脂, 空气需具有较高的湿度才能保证其颗粒强度、吸附容量和循环稳定性, 当空气湿度降低时其空气碳捕集能力显著降低<sup>[19-20]</sup>。与之相比, 疏水树脂基体避免了空气湿度对其碳捕集性能的影响, 同时降低了由于吸附水造成的额外再生能耗。针对现有树脂基二氧化碳吸附剂的诸多缺点及不足, 本研究以疏水型油性大孔吸附树脂为载体, 采用液相浸渍法, 以聚乙烯亚胺(PEI)修饰多孔材料, 制备了疏水型树脂基固态胺吸附剂, 并通过表征手段和吸附-脱附模拟实验对其物化性质、空气碳捕集性能、影响因素和稳定性进行研究。

## 1 实验部分

### 1.1 树脂基固态胺吸附剂制备

疏水型树脂基固态胺吸附剂的制备采用 SD300 型油性苯乙烯骨架的芳香族大孔吸附树脂为基体, PEI 为改性剂。PEI 分子量分别为 300、1 800, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司提供。制备前首先将 SD300 树脂置于 70 °C 真空干燥箱内保持 6 h 除去吸附的水分。采用液相浸渍法制备树脂基固态胺吸附剂, 制备过程如下: 1) 称取一定质量的 PEI 溶解于 50 mL 无水甲醇中, 40 °C 恒温水浴中搅拌至完全溶解; 2) 然后, 加入一定质量干燥的 SD300 大孔吸附树脂, 继续恒温搅拌 2 h, 充分浸渍后, 在旋转蒸发器中缓慢旋蒸, 水浴温度为 70 °C; 3) 最后, 将树脂基固态胺吸附剂置于 70 °C 真空干燥箱内保持 3 h 除去残存甲醇溶剂。树脂基固态胺吸附剂的 PEI 负载质量分数为 20%~50%, 制备的树脂基固态胺吸附剂分别命名为 xPEI-y/SD300, 其中 x 为材料的 PEI 负载量, y 为 PEI 的分子量。

### 1.2 吸附剂表征

采用美国 Micromeritics 公司生产的 ASAP2460 型比表面积和孔结构分析仪开展 N<sub>2</sub> 等温吸附-脱附表征, 测量材料的比表面积和孔结构使用低温 N<sub>2</sub> (77 K) 测试, 使用 BET (brunauer emmett teller) 方法计算样品的比表面积, 由脱附数据计算孔径分布。采用德国 Bruker 公司生产的 Vextex 70 型傅里叶变换红外光谱仪进行红外光谱测试, 扫描范围 4 000~400 cm<sup>-1</sup>, KBr 压片, 分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>。采用瑞士 METTLER 公司生产的 TGA/DSC3 型热分析仪进行热重分析, 采用高纯氮气 (40 mL/min) 作为保护气, 测试温度 50~400 °C, 升温速率 10 °C/min。

### 1.3 吸附剂评价

首先采用恒温湿热箱模拟大气环境进行二氧化碳吸附, 然后采用吸附容量评价装置(图 1)进行升温脱附, 通过测定脱附二氧化碳的质量计算其吸附容量。将树脂基固态胺吸附剂置于真空干燥箱中 40 °C 真空干燥 6 h, 然后将吸附剂置于恒温湿热箱中, 控制恒温湿热箱的温度和湿度调整吸附环境, 吸附一定时间后, 将吸附剂置于吸附容量评价装置进行升温脱附。称量 1 g 完成吸附的树脂基固态胺吸附剂置于内径 9 mm 的石英反应管内, 通入氮气对脱附系统进行吹扫, 氮气流量为 500 mL/min; 采用二氧化碳分析仪监测床层出口, 待二氧化碳体积

分数检测值降为零后,认为系统内空气排空;启动加热系统对树脂基固态胺吸附剂进行加热,由 25 °C 升温至 90 °C 后恒温 1 h,加热速率为 5 °C/min;采用 TD600S-CO<sub>2</sub> 型二氧化碳分析仪(北京天地首和科技发展有限公司,测量范围 0~50 000 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,测量精度 1 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)监测床层出口二氧化碳体积分数,通过积分计算获得二氧化碳吸附容量。

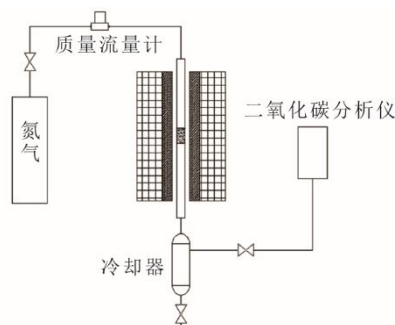


图 1 吸附容量评价装置工艺流程

Fig.1 Process flow of the adsorption capacity evaluation device

## 2 结果与讨论

### 2.1 树脂基固态胺吸附剂表征结果

图 2 为不同 PEI 负载量树脂基固态胺吸附剂的 N<sub>2</sub> 吸附等温线和孔径分布曲线。由图 2 可见,SD300 树脂的 N<sub>2</sub> 吸附等温线表现为 II 型特征,孔径分布在 2~15 nm,以介孔为主。随着 PEI 的负载和负载量的增加,树脂基固态胺吸附剂的 N<sub>2</sub> 吸附量显著降低,各吸附剂的孔径分布范围无明显变化,但是孔体积急剧减小。当负载量为 40% 和 50% 时,吸附剂的 N<sub>2</sub> 吸附等温线基本重合,表明当负载量达到 40% 时,SD300 的孔隙被 PEI 填充饱和,过多的 PEI 分子无法进入孔道内部,仅分布于外表面<sup>[21]</sup>。

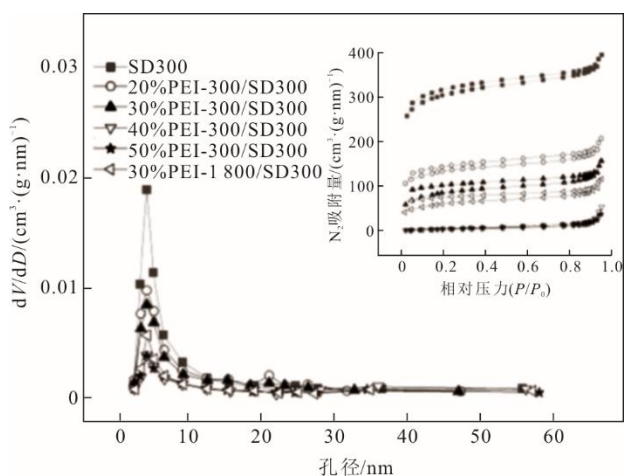


图 2 N<sub>2</sub> 吸附/脱附等温线和孔径分布曲线

Fig.2 The N<sub>2</sub> adsorption/desorption isotherms and pore size distributions

树脂基固态胺吸附剂的孔隙结构参数列于表 1。由表 1 可知:SD300 树脂的比表面积为 1 213 m<sup>2</sup>/g,孔体积为 0.64 cm<sup>3</sup>/g,在负载 PEI 后,比表面积和孔体积分别降至 516 m<sup>2</sup>/g 和 0.33 cm<sup>3</sup>/g 以下,表明 PEI 分子被成功浸渍到 SD300 树脂内部,占据了原有的孔道结构;随着 PEI 负载量从 20% 增加至 40%,树脂基固态胺吸附剂的比表面积逐级降为 17 m<sup>2</sup>/g,孔体积降为 0.09 cm<sup>3</sup>/g;继续提高 PEI 负载量至 50%,比表面积和孔体积无明显变化,表明树脂孔道结构几乎被完全堵塞,已经接近 SD300 树脂负载 PEI 的上限。另一方面,SD300 树脂的平均孔径为 2.10 nm,随着 PEI 负载量的增加,树脂基固态胺吸附剂的平均孔径呈现先升高后降低的趋势,并在负载量 30% 时获得最大值。可见,PEI 分子首先将较小的孔道堵塞,导致平均孔径提高,当 PEI 负载量达到 40% 时,孔道几乎被完全堵塞,导致平均孔径减小。值得注意的是,当负载量均为 30% 时,PEI 分子量为 300 的吸附剂比表面积和孔体积均高于 PEI 分子量为 1 800 的吸附剂,而平均孔径数值恰好相反。这可能是由于高分子量 PEI 分子具有更大的体积,导致孔道堵塞更为严重。

表 1 树脂基固态胺吸附剂孔隙结构参数

Tab.1 Pore structural parameters of the resin-based solid amine adsorbent

试样名称	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔体积/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm
SD300	1 213	0.64	2.10
20%PEI-300/SD300	516	0.33	2.59
30%PEI-300/SD300	319	0.25	3.18
40%PEI-300/SD300	17	0.09	2.03
50%PEI-300/SD300	18	0.06	1.31
30%PEI-1 800/SD300	226	0.19	3.33

图 3 为树脂基固态胺吸附剂的傅里叶变换红外光谱。如图 3 所示,SD300 大孔树脂的傅里叶变换红外光谱分别在 702 cm<sup>-1</sup> 和 815 cm<sup>-1</sup> 处检测到芳香族 C-H 键的弯曲振动吸收峰,在 1 450 cm<sup>-1</sup> 和 1 490 cm<sup>-1</sup> 处检测到芳香族-CH<sub>2</sub>-键的弯曲振动吸收峰,在 2 835 cm<sup>-1</sup>、2 925 cm<sup>-1</sup> 处检测到 C-H 键的反对称伸缩振动和对称伸缩振动吸收峰,均归属于聚苯乙烯树脂<sup>[22-23]</sup>。其次,分别在 1 581 cm<sup>-1</sup>、3 286 cm<sup>-1</sup> 和 3 356 cm<sup>-1</sup> 处检测到归属于伯胺基 N-H 键的弯曲振动、N-H 键的非对称和对称伸缩振动特征峰,在 1 317 cm<sup>-1</sup> 处检测到归属于 C-N 键的对称伸缩振动特征峰,证明了吸附剂上胺基基团的存在<sup>[24]</sup>。1 230~1 030 cm<sup>-1</sup> 内的吸收峰归属为伯胺和仲胺 C-N 键伸缩振动<sup>[25]</sup>。当 PEI 负载量高于 30%

时,  $1490\text{ cm}^{-1}$  处归属于芳香族- $\text{CH}_2$ -键的弯曲振动吸收峰被遮蔽, 表明此时部分 PEI 分子已包覆于树脂颗粒外表面。

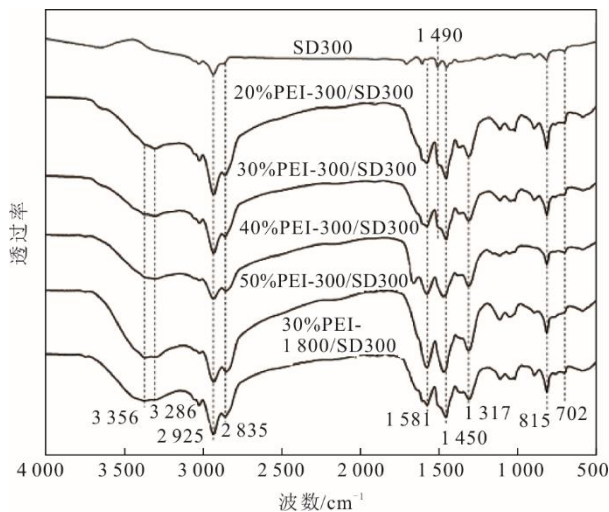


图3 吸附剂红外谱  
Fig.3 Infrared spectra of the adsorbent

图4为树脂基固态胺吸附剂的热失重曲线和失重速率曲线。可以看出, SD300树脂升温至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近开始失重, 表明此时树脂基体开始分解。20%PEI-300/SD300吸附剂升温至 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近, 即开始失重, 随着温度升高失重速率增加。30%PEI-300/SD300、50%PEI-300/SD300和30%PEI-1800/SD300吸附剂均在 $50\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内呈现2个失重阶梯, 第一失重梯度起始点为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 归属为吸附剂上水分和 $\text{CO}_2$ 的脱附过程<sup>[21]</sup>。30%PEI-300/SD300和50%PEI-300/SD300吸附剂在 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近开始出现第二个失重梯度, 归因于PEI-300分子的气化脱附<sup>[26]</sup>。30%PEI-1800/SD300吸附剂在升温至 $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 开始出现第二失重梯度, 明显高于30%PEI-300/SD300的 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 表现出更好的热稳定性。

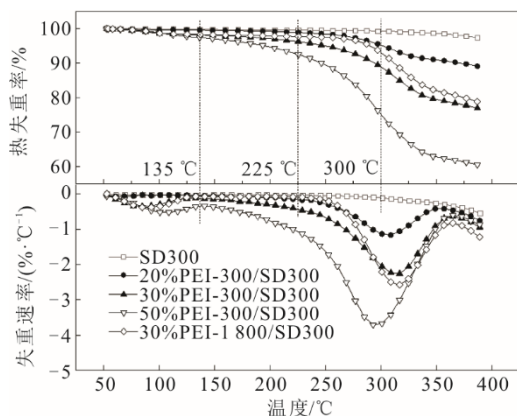


图4 吸附剂热失重和失重速率曲线  
Fig.4 Thermogravimetric and derivative thermogravimetric curves of the adsorbents

## 2.2 不同负载量下树脂基固态胺的 $\text{CO}_2$ 吸附性能

在空气湿度30%大气中常温吸附18h的吸附条件下, 不同PEI分子量和负载量对SD300树脂基固态胺吸附剂性能的影响如图5所示。由图5可见, 未负载的SD300树脂也有一定的碳捕集能力, 但是对空气中 $\text{CO}_2$ 的吸附容量仅为 $0.08\text{ mmol/g}$ 。随着PEI负载量的增加, 吸附容量显著提高, 当PEI(分子量为300)负载量为30%时, 吸附剂获得最大吸附容量 $1.25\text{ mmol/g}$ ; 进一步增加PEI负载量后吸附剂性能呈现降低趋势, 可能是由于过量的有机胺堵塞了树脂孔道, 抑制了 $\text{CO}_2$ 分子向孔道内胺基基团的扩散, 导致大量的胺基无法被利用<sup>[27]</sup>。考察了不同PEI分子量对吸附剂性能的影响, 发现同在负载量30%条件下, 随着PEI分子量从300提高至1800, 吸附剂的吸附容量从 $1.25\text{ mmol/g}$ 减小至 $0.85\text{ mmol/g}$ , 是由于高分子量PEI分子具有更大的体积, 导致树脂基固态胺吸附剂孔道结构堵塞较为严重。

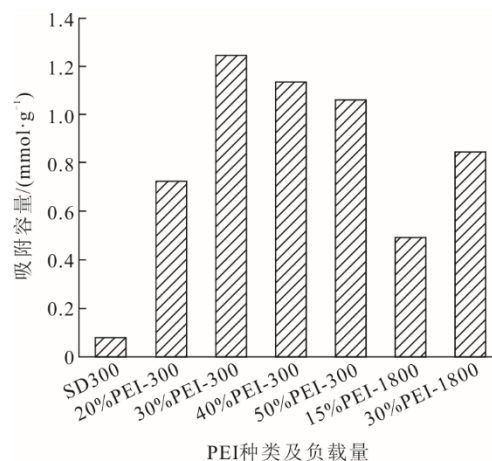


图5 吸附容量随PEI负载量的变化  
Fig.5 Change of adsorption capacity with PEI loading

## 2.3 吸附湿度的影响

常温空气吸附18h后30%PEI-300/SD300吸附剂的吸附容量随空气湿度的变化曲线如图6所示。由图6可见: 在空气湿度为30%时, 吸附剂获得最大吸附容量 $1.25\text{ mmol/g}$ , 随着在空气湿度增加至50%吸附容量略有降低, 但仍可达到 $1.21\text{ mmol/g}$ ; 继续升高空气湿度至70%, 吸附剂的吸附容量快速下降为 $0.95\text{ mmol/g}$ 。因此, 30%PEI-300/SD300吸附剂表现出较好的干空气碳捕集性能。由于SD300为疏水型油性树脂, 并不具备吸附水分子的官能团, 当空气中水分含量过高时水分子会占据大量胺基基团, 导致大量的胺基无法被有效利用。

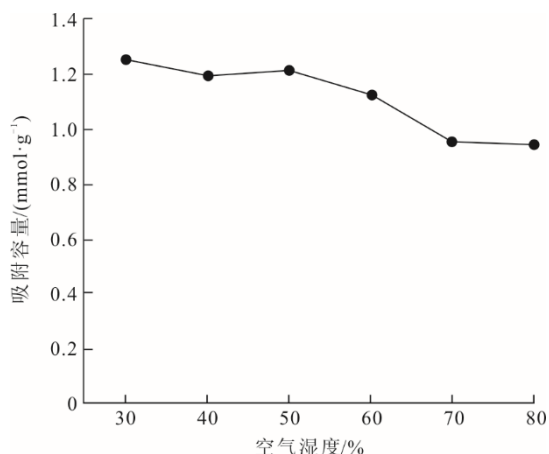


图 6 30%PEI-300/SD300 吸附容量随空气湿度的变化  
Fig.6 Change of adsorption capacity with air humidity

## 2.4 吸附时间的影响

在空气湿度 50%、温度 25 °C 条件下分别考察了 30%PEI-300/SD300 和 30%PEI-1 800/SD300 的吸附容量随吸附时间的变化, 结果如图 7 所示。吸附 1 h 时, 30%PEI-300/SD300 的吸附容量即可达到 1.11 mmol/g, 当吸附时间延长至 8 h 后获得最大吸附容量 1.23 mmol/g, 即达到吸附饱和状态。与之相比 30%PEI-1 800/SD300 吸附剂吸附 1 h 后吸附容量为 0.83 mmol/g, 随着吸附时间的增加, 吸附容量整体呈上升趋势, 当吸附时间为 8 h 时吸附容量达到饱和, 吸附容量为 0.88 mmol/g。可见, PEI 负载改性的 SD300 树脂基固态胺吸附剂具有快速捕集 CO<sub>2</sub> 的性能, 1 h 吸附容量即可达到总吸附容量的 90% 以上, 适用于连续循环碳捕集工艺。

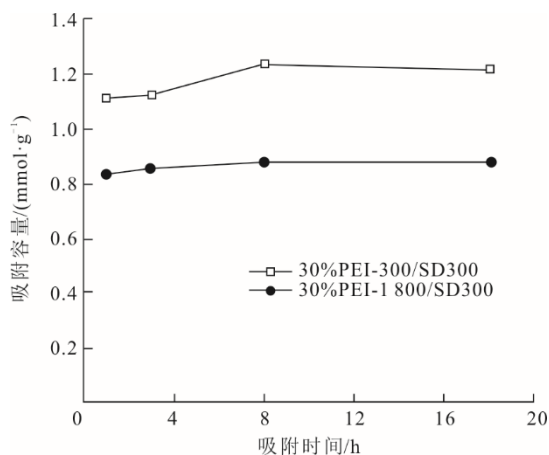


图 7 吸附容量随吸附时间的变化  
Fig.7 Change of adsorption capacity with time

## 2.5 循环稳定性

在空气湿度 50%、温度 25 °C 条件下分别考察吸附剂 30%PEI-300/SD300 和 30%PEI-1 800/SD300 的吸附/脱附循环稳定性, 单次吸附时间 3 h, 结果如

图 8 所示。经过多次循环, 30%PEI-300/SD300 的吸附容量呈逐次降低的趋势, 经过 5 次循环后, 吸附容量从 1.04 mmol/g 快速降至 0.67 mmol/g, 失效率达到 35.6%。与之相比, 30%PEI-1 800/SD300 经过 5 次循环后吸附容量无明显降低, 表明该吸附剂具有更优的循环稳定性。30%PEI-1 800/SD300 并未出现有机胺改性常规分子筛出现的脲化失活现象, 主要归因于高分子量 PEI 的热稳定性和载体的疏水特性<sup>[28]</sup>。

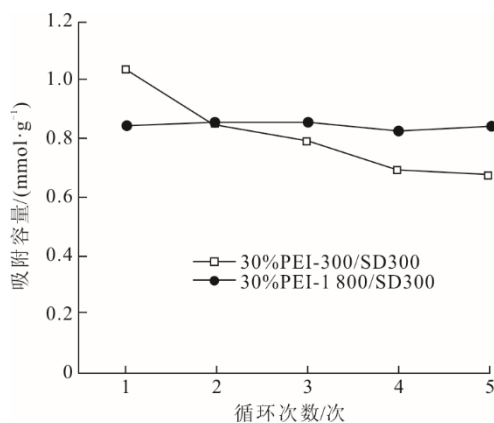


图 8 吸附剂循环稳定性  
Fig.8 Cycle stability of the adsorbent

## 3 结 论

以疏水型油性树脂为基体制备的树脂基固态胺吸附剂表现出良好的干空气碳捕集性能, 在空气湿度低于 50% 环境下可以实现 CO<sub>2</sub> 的快速捕集, 吸附 1 h 即可达到总吸附容量的 90% 以上, 适用于连续循环变温碳捕集工艺。30%PEI 负载改性的 SD300 吸附剂可获得最大 CO<sub>2</sub> 吸附容量, 归因于 PEI 分子在 SD300 孔道内适宜的分布情况, 既保证了吸附剂具有较高的胺基基团, 又保留了 CO<sub>2</sub> 分子扩散通道。高分子量的 PEI 具有更大的分子体积, 导致吸附剂孔道堵塞更为严重, 在一定程度上降低了吸附容量, 但同时显著提高了其高温循环稳定性。

### [参 考 文 献]

- [1] ZHU P, WU Z Y, ELGAZZAR A, et al. Continuous carbon capture in an electrochemical solid-electrolyte reactor[J]. Nature, 2023, 618(7967): 959-966.
- [2] CASTEL C, BOUNACEUR R, FAVRE E. Membrane processes for direct carbon dioxide capture from air: Possibilities and limitations[J]. Frontiers in Chemical Engineering, 2021, 3: 668867.
- [3] SCHELLEVIS M, JACOBS T, BRILMAN W. CO<sub>2</sub> capture from air in a radial flow contactor: batch or continuous operation[J]. Frontiers in Chemical Engineering, 2020, 2: 596555.
- [4] LIU Y, LUCAS E, SULLIVAN I, et al. Challenges and opportunities in continuous flow processes for electro-

- chemically mediated carbon capture[J]. *iScience*, 2022, 25(10): 105153
- [5] 何凯武, 唐思扬, 刘长军, 等. 有机胺功能化介孔固体吸附剂吸附分离 CO<sub>2</sub> 性能研究[J]. *化工学报*, 2018, 69(9): 3887-3895.  
HE Kaiwu, TANG Siyang, LIU Changjun, et al. Performance of amine functionalized mesoporous adsorbents for CO<sub>2</sub> adsorption[J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(9): 3887-3895.
- [6] WANG X, SONG J, CHEN Y, et al. CO<sub>2</sub> absorption over ion exchange resins: the effect of amine functional groups and microporous structures[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(38): 16507-16515.
- [7] OTERO A C, RODRIGUEZ D M, FIOL B G, et al. Variable-temperature IR spectroscopic and theoretical studies on CO<sub>2</sub> adsorbed in zeolite K-FER[J]. *Chemphyschem: A European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, 2011, 12(8): 1435-1443.
- [8] 刘博文, 邓帅, 李双俊, 等. 变温吸附碳捕集系统能效性能实验研究[J]. *化工学报*, 2020, 71(增刊 1): 382-390.  
LIU Bowen, DENG Shuai, LI Shuangjun, et al. Experimental investigation on energy-efficiency performance of temperature swing adsorption system for CO<sub>2</sub> capture[J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(Suppl.1): 382-390.
- [9] 唐朝春, 王顺藤, 黄从新, 等. 介孔金属有机框架材料吸附水中重金属离子研究进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(6): 3263-3278.  
TANG Chaochun, WANG Shunteng, HUANG Congxin, et al. Research progress on adsorption of heavy metal ions in water by mesoporous metal organic framework materials[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(6): 3263-3278.
- [10] ZHU Q L, XU Q. Metal-organic framework composites[J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(16): 5468-5512.
- [11] YAN H, ZHANG G, LIU J, et al. Investigation of CO<sub>2</sub> adsorption performance of amine impregnated adsorbents using amine-support matching strategies[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 310: 123178.
- [12] CHOI W, PARK J, KIM C, et al. Structural effects of amine polymers on stability and energy efficiency of adsorbents in post-combustion CO<sub>2</sub> capture[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 408: 127289.
- [13] ISHIBASHI M, OTA H, AKUTSU N, et al. Technology for removing carbon dioxide from power plant flue gas by the physical adsorption method[J]. *Energy Conversion and Management*, 1996, 37(6/8): 929-933.
- [14] 江南, 刘冰, 唐忠利, 等. 真空变温吸附捕集干烟道气中 CO<sub>2</sub> 的模拟研究[J]. *化工学报*, 2019, 70(10): 4032-4042.  
JIANG Nan, LIU Bing, TANG Zhongli, et al. Simulation study on CO<sub>2</sub> capture from dry flue gas by temperature vacuum swing adsorption[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(10): 4032-4042.
- [15] 梁辉, 刘振, 王璐, 等. 13X-APG 沸石真空变压变温耦合工艺吸附捕集烟道气中 CO<sub>2</sub>[J]. *过程工程学报*, 2010, 10(2): 249-255.  
LIANG Hui, LIU Zhen, WANG Lu, et al. Capture of CO<sub>2</sub> from flue gases by a combined process of vacuum and temperature swing adsorption using 13X-APG zeolite[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2010, 10(2): 249-255.
- [16] MARTÍN C F, PLAZA M G, GARCIA S, et al. Microporous phenol-formaldehyde resin-based adsorbents for pre-combustion CO<sub>2</sub> capture[J]. *Fuel*, 2011, 90(5): 2064-2072.
- [17] LUIZ K C, NILANTHA P W, AIMÉ S E, et al. Enhancement of CO<sub>2</sub> adsorption on phenolic resin-based mesoporous carbons by KOH activation[J]. *Carbon*, 2013, 65: 334-340.
- [18] 赵蓓蓓, 王际童, 王梅, 等. 树脂基固态胺吸附剂室温下对低浓度 CO<sub>2</sub> 的吸附性能研究[J]. *环境科学学报*, 2014(11): 2892-2898.  
ZHAO Beibei, WANG Jitong, WANG Mei, et al. Ambient temperature sorption of low-concentration carbon dioxide on resin-based solid amine sorbents[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014(11): 2892-2898.
- [19] MAHMOUD P, SUSANA G, MERCEDES M. CO<sub>2</sub> capture by ion exchange resins as amine functionalised adsorbents[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 331: 335-342.
- [20] XU C, ZHANG Y, PENG Y, et al. Degradation characteristics and utilization strategies of a covalent bonded resin-based solid amine during capturing CO<sub>2</sub> from flue gas[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 331: 125621.
- [21] 孟园, 林莉, 陈哲红, 等. 树脂基固态胺吸附材料的选择性 CO<sub>2</sub> 吸附性能[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(9): 4343-4350.  
MENG Yuan, LIN Li, CHEN Zhehong, et al. Selective CO<sub>2</sub> adsorption performance of resin-based solid amine adsorbents[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(9): 4343-4350.
- [22] MENG Y, JU T, MENG F, et al. Insights into the critical role of abundant-porosity supports in polyethylenimine functionalization as efficient and stable CO<sub>2</sub> adsorbents[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13: 54018-54031.
- [23] BAI G, HAN Y, DU P, et al. Polyethylenimine (PEI)-impregnated resin adsorbent with high efficiency and capacity for CO<sub>2</sub> capture from flue gas[J]. *New Journal of Chemistry*, 2019, 43: 18345-18354.
- [24] YOO C J, NARAYANAN P, JONES C W. Self-supported branched poly (ethyleneimine) materials for CO<sub>2</sub> adsorption from simulated flue gas[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7: 19513-19521.
- [25] 王冬梅, 曹金丽, 张怡, 等. 红外光谱法研究聚乙烯亚胺的结构[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(10): 199-200.  
WANG Dongmei, CAO Jinli, ZHANG Yi, et al. The structure characterization of polyethylenimine via FTIR[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(10): 199-200.
- [26] 马英楠, 何兴艳, 唐少华, 等. MOFs/PEI 混合基质膜的制备及 CO<sub>2</sub> 分离性能研究[J]. *化学工业与工程*, 2023, 40(3): 84-95.  
MA Yingnan, HE Xingyan, TANG Shaohua, et al. Preparation and CO<sub>2</sub> separation performance of MOFs/PEI mixed matrix membranes[J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2023, 40(3): 84-95.
- [27] LOU F, ZHANG A, ZHANG G, et al. Enhanced kinetics for CO<sub>2</sub> sorption in amine-functionalized mesoporous silica nanosphere with inverted cone-shaped pore structure[J]. *Applied Energy*, 2020, 264: 114637.
- [28] ABDELHAMID S, ALIAKBAR H G, YONG Y. CO<sub>2</sub>-induced degradation of amine-containing adsorbents: reaction products and pathways[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(33): 13834-13842.

(责任编辑 杨嘉蕾)