

DOI: 10.19666/j.rlfed.202505099

# 树脂基空气碳捕集吸附剂性能及吸附动力学研究

张贵泉, 向小凤, 王志超, 蔡 铭, 高 浩, 龙国军, 晋中华, 徐党旗  
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘 要] 基于原位合成工艺制备了一种树脂基固态胺吸附剂, 并探究了相对空气湿度 (30%~90%)、吸附温度 (30~90 °C) 和吸附时间等因素对吸附剂 CO<sub>2</sub> 吸附性能的影响, 同时研究了不同空气湿度下吸附剂的吸附动力学特性。研究表明: 树脂基固态胺吸附剂在空气中的最大 CO<sub>2</sub> 吸附容量达到 2.38 mmol/g, 空气湿度和吸附温度对吸附速率具有显著影响, 当空气湿度高于 50%, 吸附温度处于 25~50 °C 时具有最佳的吸附效率; 该吸附剂表现出很好的吸脱附循环稳定性, 这归因于其出色的耐高温特性。

[关 键 词] 空气碳捕集; 树脂; 吸附剂; 性能; 动力学

[引用本文格式] 张贵泉, 向小凤, 王志超, 等. 树脂基空气碳捕集吸附剂性能及吸附动力学研究[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 104-109. ZHANG Guiquan, XIANG Xiaofeng, WANG Zhichao, et al. Study on adsorption properties and adsorption kinetics of resin-based air carbon capture adsorbents[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 104-109.

## Study on adsorption properties and adsorption kinetics of resin-based air carbon capture adsorbents

ZHANG Guiquan, XIANG Xiaofeng, WANG Zhichao, CAI Ming, GAO Hao, LONG Guojun,  
JIN Zhonghua, XU Dangqi  
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A resin-based solid amine adsorbent was prepared based on in-situ synthesis technology. The effects of air humidity (30%~90%), adsorption temperature (30~90 °C) and adsorption time on the adsorption performance of CO<sub>2</sub> were investigated. Moreover, the adsorption kinetic characteristics of the adsorbents at different air humidities were studied. The results showed that, the maximum CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the resin-based solid amine adsorbents in the air reached 2.38 mmol/g, and the air humidity and adsorption temperature had significant effects on the adsorption rate. The optimal adsorption efficiency was obtained when the air humidity was higher than 50% and the adsorption temperature was 25~50 °C. The adsorbent exhibits very good cycle stability due to its excellent high temperature resistance.

**Key words:** air carbon capture; resin; adsorbent; performance; dynamics

空气直接碳捕集技术 (direct air capture, DAC) 是一种回收利用分布源排放 CO<sub>2</sub> 的技术<sup>[1-2]</sup>, 利用 CO<sub>2</sub> 与固体吸附剂活性位之间的作用力, 直接选择性捕集空气中或 40 Pa 气体分压下低体积分数的 CO<sub>2</sub>, 从而降低大气 CO<sub>2</sub> 体积分数, 是目前最具前

景的碳捕集技术之一<sup>[3-4]</sup>。近年来, 以固体胺改性的吸附剂材料在低体积分数 CO<sub>2</sub> 捕集方面获得广泛研究, 并表现出良好的应用前景。如活性炭、沸石、金属有机框架 (MOFs)、层状双氢氧化物、金属氧化物 (CaO) 等, 掺杂碱基金属碳酸盐、胺基官能

收稿日期: 2025-05-19

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBSF-140); 西安热工院有限公司研发基金资助 (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, 高工, 主要研究方向为碳捕集及储能技术, zhangguiquan@tpri.com.cn.

团等碱性位,通过对吸附材料表面进行化学改性,增加CO<sub>2</sub>捕集活性位点数量,从而提高吸附剂的吸附容量和选择性<sup>[5-8]</sup>。其中,聚乙烯亚胺(PEI)<sup>[8-9]</sup>修饰的多孔材料成为碳捕集材料的研究重点,在低分压下具有较高的CO<sub>2</sub>吸附性、选择性、热稳定性和可再生性。

美国康奈尔大学<sup>[10-11]</sup>针对中空纳米复合材料浸渍PEI和四乙烯五胺(TEPA)后的CO<sub>2</sub>捕集性能进行研究,其CO<sub>2</sub>吸附容量分别达到4.45、5.57 mmol/g(体积分数10% CO<sub>2</sub>,无水)。Heydari-gorji等人<sup>[12]</sup>将聚乙烯亚胺浸渍在不同孔结构的介孔硅材料上,发现低温下短孔道吸附剂具有更好的CO<sub>2</sub>吸附和脱附动力学,吸附量达到205 mg/g(25 °C,体积分数100% CO<sub>2</sub>)。Wang等人<sup>[13]</sup>将聚乙烯亚胺搭载在介孔碳,加入表面活性剂可以改善低温下CO<sub>2</sub>吸附性能,在30 °C下吸附量提高了约29%。研究表明,以硅基和碳基介孔材料为载体负载固态胺制备吸附剂材料,可显著提高其碳捕集性能,但此类载体材料合成工艺复杂,大规模应用受到限制<sup>[14-15]</sup>。

吸附树脂材料具有耐水性强、强度高、不易破损的优点,此类商业化的多孔材料大幅降低了高效固态胺吸附剂的制备成本,在合成碳捕集固态吸附剂方面优势明显<sup>[16-17]</sup>。目前,存在的问题是采用常规手段将有机胺负载于树脂表面,具有活性位点易损耗、吸附剂稳定性较差的缺点<sup>[18-19]</sup>。为此,本研究采用原位合成工艺制备了一种TPRI-RE-24型树脂基固态胺吸附剂,在树脂合成过程中将胺基官能团原位生长于树脂孔道内部,显著抑制了升温脱碳过程中活性位点的流失,大大提高了吸附剂稳定性。本文采用吸附-脱附模拟实验对其空气碳捕集性能、影响因素和吸附动力学进行研究,分析了其在空气碳捕集中应用的可能性。

## 1 吸附容量评价实验内容

首先,将TPRI-RE-24型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,通过恒温湿热箱控制吸附温度和相对空气湿度,吸附剂在空气气氛中(CO<sub>2</sub>体积分数约0.04%)吸附一定时间后置于吸附容量评价装置(图1)中进行升温脱附。吸附剂的吸附容量通过测定CO<sub>2</sub>脱附量计算。具体评价过程为:称量1 g完成吸附的树脂基固态胺吸附剂置于石英反应管内,通入氮气对脱附系统进行吹扫,氮气流量

为500 mL/min;采用TD-400-SH型CO<sub>2</sub>分析仪监测床层出口,待CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>分析仪监测床层出口CO<sub>2</sub>体积分数,通过积分计算获得CO<sub>2</sub>吸附容量。



图1 吸附容量评价装置照片

Fig.1 Photo of the adsorption capacity evaluation device

采用美国Micromeritics公司生产的ASAP 2460型比表面积和孔结构分析表征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Brunauer-Emmett-Teller(BET)方法计算样品的比表面积,由脱附数据计算孔容孔径分布。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4000~400 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,高纯氮气(流量40 mL/min)保护气,测试温度50~400 °C,升温速率10 °C/min。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 空气湿度的影响

TPRI-RE-24型树脂基固态胺吸附剂空气碳捕集吸附容量随空气湿度的变化关系如图2所示。可见,随着空气湿度的增加,吸附剂的吸附容量呈现快速增加的趋势。当空气湿度为50%时吸附容量达到最大值2.38 mmol/g;继续升高空气湿度至80%的过程中,吸附容量趋于平稳;当空气湿度达到90%时吸附容量急剧降低。Xu等人<sup>[20-21]</sup>研究认为,CO<sub>2</sub>在固态胺吸附剂活性位点生成胺基甲酸酯离子,水分的存在推动胺基甲酸酯离子进一步与CO<sub>2</sub>

和水分子反应生成碳酸氢盐,从而提高其吸附容量。可见,适宜的空气湿度有助于 CO<sub>2</sub> 捕集,然而过量的水分子可能堵塞吸附剂的孔道结构,从而抑制 CO<sub>2</sub> 向活性位点的扩散。

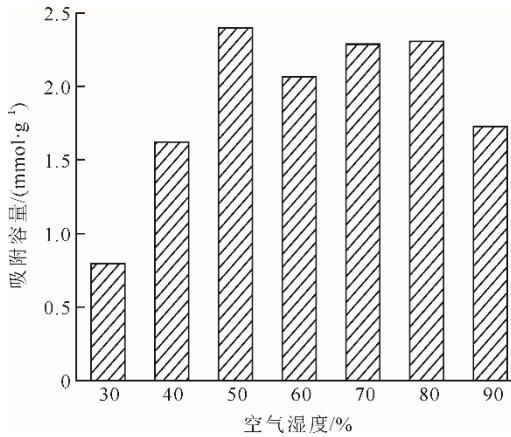


图2 吸附容量随空气湿度的变化关系  
Fig.2 Change of adsorption capacity with air humidity

## 2.2 吸附时间的影响

在空气湿度 50%、温度 25 °C 条件下,考察 TPRI-RE-24 型树脂基固态胺吸附剂在不同吸附时间下的吸附容量,结果如图 3 所示。由图 3 可见:随着吸附时间的增加,吸附容量整体呈上升趋势,当吸附时间低于 8 h 时吸附容量随吸附时间几乎呈线性增长,可见此时空气中 CO<sub>2</sub> 向活性位点的扩散速率成为碳捕集的控制因素;当吸附时间超过 8 h 后,吸附容量增加速率显著降低,此时吸附剂内部活性位点数量减少,CO<sub>2</sub> 与活性位点的吸附成为碳捕集的控制因素。

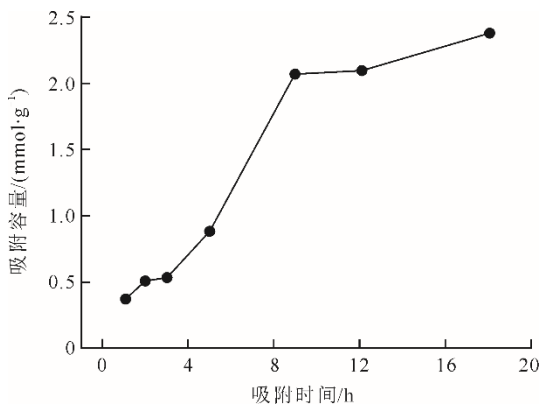


图3 吸附容量随吸附时间的变化关系  
Fig.3 Change of adsorption capacity with time

## 2.3 吸附温度的影响

控制相对空气湿度为 50%,分别在 25、40、50、60 °C 的吸附温度下吸附 1 h 后,TPRI-RE-24 吸附

剂对空气中 CO<sub>2</sub> 的吸附容量分别为 0.36、0.48、0.51、0.20 mmol/g。随着温度的升高,吸附容量呈现先升高后降低的变化趋势,并在 50 °C 获得最大值。随着吸附温度升高,CO<sub>2</sub> 在吸附剂孔道内的扩散速度及其与活性位点的反应速率大大提高;然而,有机胺与 CO<sub>2</sub> 的可逆化学反应是放热反应,温度过高会抑制有机胺活性位点与 CO<sub>2</sub> 的反应,因此当温度高于 50 °C 后,脱附过程占据主导地位,CO<sub>2</sub> 吸附容量降低<sup>[22]</sup>。

## 2.4 吸附动力学分析

对于 CO<sub>2</sub> 捕集,吸附剂不仅要具有较高的吸附能力,而且要具有较快的吸附速度,从而达到节能的目的。研究发现,空气湿度对 TPRI-RE-24 吸附剂的 CO<sub>2</sub> 吸附速率具有极大的影响,图 4 为不同空气湿度下在 1~3 h 内碳捕集量随吸附时间的变化关系。在考察的时间范围内,吸附容量随吸附时间呈线性增长;随着空气湿度从 50% 增加至 90%,吸附速率显著提高;当空气湿度为 90% 时,1 h 即可达到 0.91 mmol/g 的吸附容量。

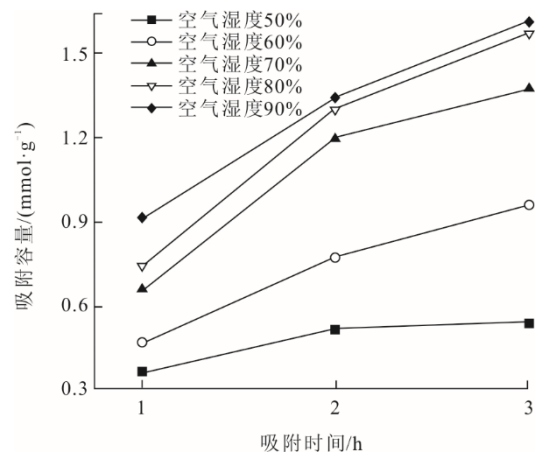


图4 不同空气湿度下吸附容量随时间的变化关系  
Fig.4 Change of adsorption capacity with time at different air humidities

为了进一步比较空气湿度对 TPRI-RE-24 吸附剂吸附性能的影响,分别考察了不同空气湿度下的反应动力学行为。假设 TPRI-RE-24 吸附剂上碳捕集反应遵循拟一级反应动力学规律,即:

$$\ln(1/(1-x))=k(t-t_0) \quad (1)$$

式中:  $x$  为吸附率,即实际吸附量占总吸附容量的比值;  $k$  为反应速率常数,  $\text{h}^{-1}$ ;  $t$  为吸附时间,  $\text{h}$ ;  $t_0$  为反应诱导期,  $\text{h}$ 。在相同空气湿度下,以  $\ln(1/(1-x))$  为纵坐标,  $t$  为横坐标作图,采用线性回归方法得到  $\ln(1/(1-x))$  与  $t$  的关系,结果如图 5 所示。由图 5 可

见,在较宽的吸附时间范围内, $\ln(1/(1-x))$ 与 $t$ 呈现较好的线性关系,因此 TPRI-RE-24 吸附剂上碳捕集反应基本遵循拟一级反应动力学规律。

根据  $\ln(1/(1-x))$  与  $t$  的线性关系求出不同空气湿度下 TPRI-RE-24 吸附剂上碳捕集反应的拟一级动力学反应速率常数  $k$ , 结果见表 1。由表 1 可见,随反应空气湿度的升高,  $k$  逐渐增大,当空气湿度为 80% 时  $k$  获得最大值,继续提高空气湿度为 90% 时  $k$  降低。

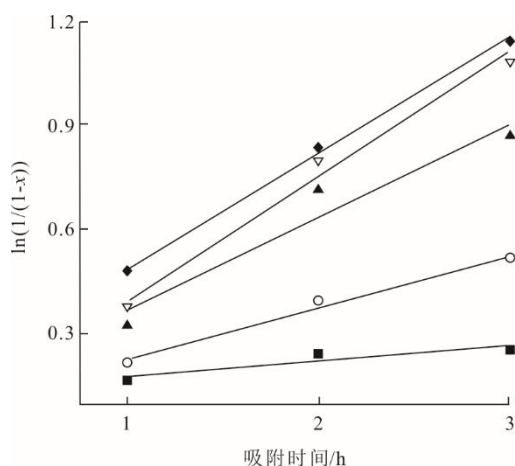


图 5 不同空气湿度下碳捕集拟一级反应动力学关系  
Fig.5 Pseudo first order reaction kinetics of carbon capture at different air humidities

表 1 TPRI-RE-24 吸附剂碳捕集反应动力学参数  
Tab.1 Kinetic parameters for carbon capture on the TPRI-RE-24 adsorbent

空气湿度/%	$k/(\times 10^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$
50	4.5
60	14.8
70	27.0
80	35.7
90	33.0

## 2.5 循环稳定性

针对 TPRI-RE-24 吸附剂开展了 8 次吸附/脱附循环实验。实验条件为:在湿度 50%、温度 25 °C 的空气中吸附 18 h 后,在氮气氛围下 90 °C 脱附 1 h,如此重复数次,结果如图 6 所示。由图 6 可见,吸附剂的首次吸附容量为 2.38 mmol/g,经过多次循环实验吸附剂的吸附容量略有波动,循环 8 次后吸附容量仍可达到 2.23 mmol/g,仅降低了 6.3%,表明该吸附剂可长期应用。

## 2.6 树脂基固态胺吸附剂表征结果

图 7 为 TPRI-RE-24 吸附剂的  $\text{N}_2$  吸附/脱附表征结果。由图 7 可见:TPRI-RE-24 吸附剂的  $\text{N}_2$  吸

附/脱附等温线表现为 II 型特征;由孔径分布曲线可知,该吸附剂的孔径分布在 2~30 nm 内,孔道主要由介孔和大孔组成; $\text{N}_2$  吸附/脱附等温线上 H3 型回滞环特征证明了狭缝型介孔的存在。通过拟合计算得知,TPRI-RE-24 吸附剂的比表面积为 4.4  $\text{m}^2/\text{g}$ ,总孔体积为 0.03  $\text{cm}^3/\text{g}$ ,平均孔径为 2.4 nm,明显低于常规树脂材料,可能是由于有机胺活性组分占据了大量的孔隙结构<sup>[22]</sup>。

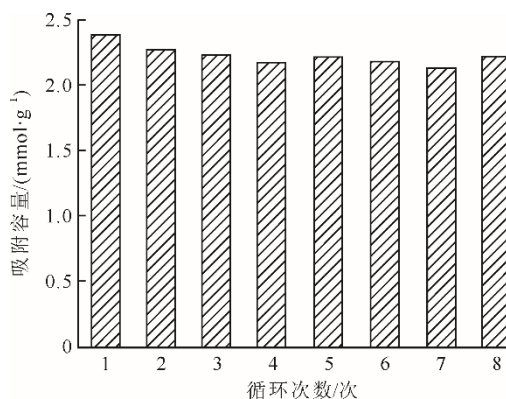


图 6 TPRI-RE-24 吸附剂循环稳定性  
Fig.6 Cycle stability of the TPRI-RE-24 adsorbent

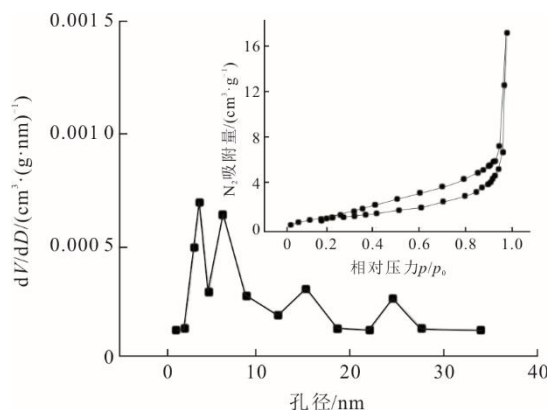


图 7  $\text{N}_2$  吸附/脱附等温线和孔径分布曲线  
Fig.7 The  $\text{N}_2$  adsorption/desorption isotherms and pore size distributions

图 8 为 TPRI-RE-24 吸附剂的傅里叶变换红外光谱。由图 8 可见,TPRI-RE-24 吸附剂的傅里叶变换红外光谱分别在 702  $\text{cm}^{-1}$  和 815  $\text{cm}^{-1}$  处检测到芳香族 C-H 键的弯曲振动吸收峰,在 1 450  $\text{cm}^{-1}$  处检测到芳香族- $\text{CH}_2$ -键的弯曲振动吸收峰,在 2 920  $\text{cm}^{-1}$  处检测到 C-H 键的伸缩振动吸收峰,均归属于聚苯乙烯树脂<sup>[23-24]</sup>。其次,在 1 570  $\text{cm}^{-1}$ 、3 286  $\text{cm}^{-1}$  和 3 356  $\text{cm}^{-1}$  处分别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  $\text{cm}^{-1}$  处检测到归属于 C-N 键的对称伸缩振动特征峰,证明吸附剂上存在胺基基团<sup>[25]</sup>。

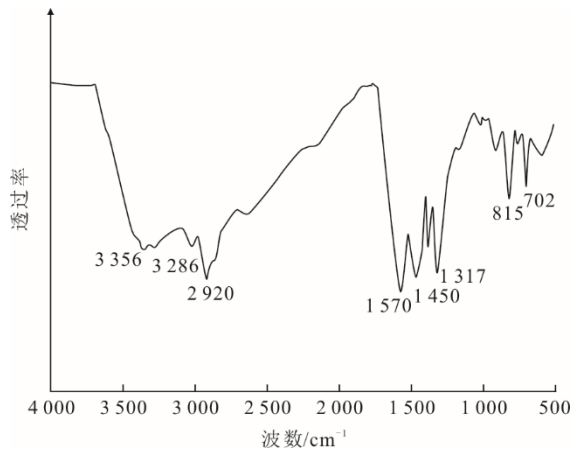


图 8 吸附剂红外谱图  
Fig.8 Infrared spectra of the adsorbent

图 9 为 TPRI-RE-24 吸附剂的热失重曲线。由图 9 可以看出,在考察的温度范围内 TPRI-RE-24 吸附剂呈现 2 个失重阶梯。10 mg 吸附剂在 50~120 °C 内失重 10%,应该是吸附剂上水分和 CO<sub>2</sub> 的脱附过程;当温度升至 350 °C,吸附剂再次发生失重现象,这主要归因于树脂基体和有机胺的分解。可见,本研究制备的 TPRI-RE-24 型树脂基固态胺吸附剂热分解温度高于 350 °C,证明其具有很好的吸附/脱附循环稳定性,适用于变温吸附碳捕集工艺。

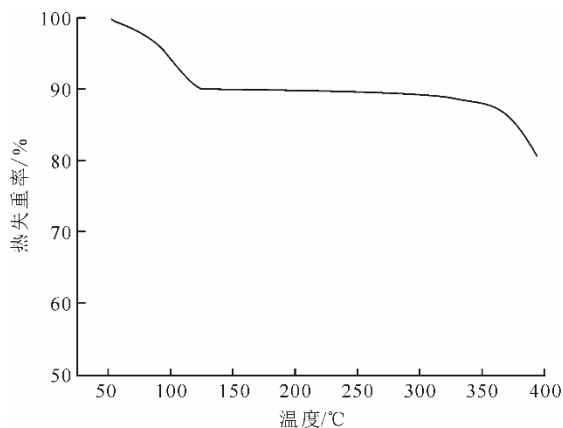


图 9 吸附剂热失重曲线  
Fig.9 Thermogravimetric curve of the adsorbent

### 3 结 论

采用原位合成工艺制备的 TPRI-RE-24 型树脂基固态胺吸附剂表现出良好的空气碳捕集性能,在空气湿度高于 50%、吸附温度 25~50 °C 环境下,吸附 8 h 以上最高可获得 2.38 mmol/g 的 CO<sub>2</sub> 吸附容量。空气湿度对吸附剂的吸附速率具有显著影响,成为短期碳捕集速率的动力学控制因素,当空气湿度为 80% 时吸附速率常数获得最大值。该吸附剂的

热分解温度高于 350 °C,证明其具有很好的吸附/脱附循环稳定性,适用于变温吸附碳捕集工艺。

#### [参 考 文 献]

- [1] ZHOU C. Knowledge mapping, research hotspots and theoretical framework of “dual-carbon” policy[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2023, 25(4): 94-112.
- [2] RIDUAN S N, ZHANG Y. Recent developments in carbon dioxide utilization under mild conditions[J]. Dalton Transactions, 2010, 39(14): 3347-3357.
- [3] 张育新, 王灿, 舒文祥. 二氧化碳的还原及其利用研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(2): 944-956.  
ZHANG Yuxin, WANG Can, SHU Wenxiang. Research progress of carbon dioxide reduction and utilization[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(2): 944-956.
- [4] 王鼎, 张杰, 杨伯伦, 等. 直接空气捕集 CO<sub>2</sub> 典型工艺分析及技术经济研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(增刊 1): 215-221.  
WANG Ding, ZHANG Jie, YANG Bolun, et al. Research progress of typical process analysis and techno-economic research on direct air capture of carbon dioxide[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(Suppl.1): 215-221.
- [5] 王一茹, 宋小三, 水博阳, 等. 胺功能化介孔二氧化硅捕集 CO<sub>2</sub> 的研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(增刊 1): 536-544.  
WANG Yiru, SONG Xiaosan, SHUI Boyang, et al. Progress in amine-functionalized mesoporous silica for CO<sub>2</sub> capture[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(Suppl.1): 536-544.
- [6] 宋珂琛, 崔希利, 邢华斌. 二氧化碳直接空气捕集材料与技术研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1152-1162.  
SONG Kechen, CUI Xili, XING Huabin. Progress on direct air capture of carbon dioxide[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1152-1162.
- [7] KAMRAN U, PARK S J. Chemically modified carbonaceous adsorbents for enhanced CO<sub>2</sub> capture: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 290: 125776.
- [8] PETROVIC B, GORBOUNOV M, SOLTANI S M. Influence of surface modification on selective CO<sub>2</sub> adsorption: a technical review on mechanisms and methods[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2021, 312: 110751.
- [9] WU B, LIU F Q, LUO S W, et al. Carbonaceous materials-supported polyethylenimine with high thermal conductivity: a promising adsorbent for CO<sub>2</sub> capture[J]. Composites Science and Technology, 2021, 208: 108781.
- [10] QI G, WANG Y, ESTEVEZ L, et al. High efficiency nanocomposite sorbents for CO<sub>2</sub> capture based on amine-functionalized mesoporous capsules[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(2): 444-452.
- [11] QI G, FU L, CHOI B H, et al. Efficient CO<sub>2</sub> sorbents based on silica foam with ultra-large mesopores[J]. Energy & Environmental Science, 2012, 5(6): 7368-7375.
- [12] HEYDARI-GORJI A, YANG Y, SAYARI A. Effect of the pore length on CO<sub>2</sub> adsorption over amine-modified mesoporous silicas[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(9): 4206-4210.
- [13] WANG J, WANG M, ZHAO B, et al. Mesoporous carbon-

- supported solid amine sorbents for low-temperature carbon dioxide capture[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(15): 5437-5444.
- [14] YANG G, WANG Q, KUWAHARA Y, et al. A mini-review on carbon and silicon-based yolk-shell structured catalysts for CO<sub>2</sub> conversion: design, advantages, and challenges[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5): 110439.
- [15] 雷婷, 喻树楠, 周昶安, 等. 吸附法碳捕集固体胺吸附剂成型技术研究进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(12): 6213-6225.  
LEI Ting, YU Shunan, ZHOU Chang'an, et al. Research progress on the shaping technology of solid amine adsorbents for CO<sub>2</sub> capture by adsorption method[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(12): 6213-6225.
- [16] 余青霓, 斯文婷, 杨彬, 等. 密闭空间低浓度CO<sub>2</sub>固态胺吸附剂长寿命评价[J]. *化工学报*, 2015, 66(9): 3692-3697.  
YU Qingni, SI Wenting, YANG Bin, et al. An assessment of life-cycle on solid amine for adsorbing low-concentration CO<sub>2</sub> in confined spaces[J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(9): 3692-3697.
- [17] UDDIN K, PAL A, SAHA B B. Improved CO<sub>2</sub> adsorption onto chemically activated spherical phenol resin[J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2020, 41: 101255.
- [18] 孙孟展, 裴文. Merrifield 树脂在固相有机合成中的应用研究进展[J]. *有机化学*, 2007, 27(9): 1069-1077.  
SUN Mengzhan, PEI Wen. Progress in application of merrifield resin in solid phase organic synthesis[J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2007, 27(9): 1069-1077.
- [19] LIU X, QIU X, SUN X, et al. Preparation and kinetic study of organic amine-loaded ion-exchange resin as CO<sub>2</sub> adsorbents[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021, 40(1): e13476.
- [20] XU X C, SONG C S, BRUCE G M, et al. Influence of moisture on CO<sub>2</sub> separation from gas mixture by a nanoporous adsorbent based on polyethylenimine-modified molecular sieve MCM-41[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005, 44: 8113-8119.
- [21] 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: 13834-13842.
- [22] 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.
- [23] MENG Y, JU T T, MENG F Z, 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.
- [24] 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.
- [25] 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.

(责任编辑 杨嘉蕾)