

DOI: 10.19666/j.rlfed.202412190

K₂CO₃/聚乙烯亚胺功能化多孔型 TiO₂ 及 CO₂ 捕集性能研究

雷嗣远¹, 王思源¹, 何川¹, 张伟², 王乐乐¹, 汪华²,
刘鹏¹, 陈宝康¹, 周长松³

(1.西安热工研究院有限公司苏州分公司, 江苏 苏州 215153;

2.华能重庆两江燃机发电有限责任公司, 重庆 401120;

3.南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 利用不同质量的 K₂CO₃ 和 PEI 将 TiO₂ 表面功能化并深入研究 CO₂ 的吸附性能和机理; 通过超声浸渍法, 以 K₂CO₃ 和聚乙烯亚胺(PEI)为功能化材料, 以商用选择性催化还原(SCR) 催化剂白胚(多孔型 TiO₂) 为载体成功制备 CO₂ 低温吸附剂; 利用 XRD、DTG、FTIR 和 XPS 表征测试改性吸附剂的理化特性。结果表明: K₂CO₃ 和 PEI 可活化多孔型 TiO₂ 孔隙结构, 并提高表面碱性活性中心的密度, 不仅有助于提升 PEI 和 K₂CO₃ 的容纳能力, 还有利于吸附活性位点的暴露以及 CO₂ 的扩散与吸附; PEI 负载可引入大量活性官能团和碱性胺位点, 对 CO₂ 的吸附容量可达 2.11 mmol/g。通过测量 50%PEI@TiO₂ 吸附剂对 CO₂ 的吸附量以及 Langmuir、Freundlich 吸附等温线模型的拟合发现, CO₂ 以物理吸附为主, 吸附时范德华力起主要作用; CO₂ 最佳吸、脱附温度分别为 50 °C 和 110 °C。循环实验表明, 与 PEI 相比, K₂CO₃ 负载 TiO₂ 更稳定, 30 次循环后 CO₂ 吸附容量下降不超过 10%, 表明以商用 SCR 催化剂白胚为载体的功能化材料有望应用于烟气 CO₂ 低温捕集。

[关键词] 碳捕集; 低温吸附; 功能化; TiO₂ 载体; 循环利用

[引用本文格式] 雷嗣远, 王思源, 何川, 等. K₂CO₃/聚乙烯亚胺功能化多孔型 TiO₂ 及 CO₂ 捕集性能研究[J]. 热力发电, 2025, 54(6): 90-96. LEI Siyuan, WANG Siyuan, HE Chuan, et al. Study on K₂CO₃/PEI functionalized porous TiO₂ and CO₂ capture performance[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(6): 90-96.

Study on K₂CO₃/PEI functionalized porous TiO₂ and CO₂ capture performance

LEI Siyuan¹, WANG Siyuan¹, HE Chuan¹, ZHANG Wei², WANG Lele¹, WANG Hua²,
LIU Peng¹, CHEN Baokang¹, ZHOU Changsong³

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. Suzhou Branch, Suzhou 215153, China;

2.Huaneng Chongqing Liangjiang Gas Turbine Power Generation Co., Ltd., Chongqing 401120, China;

3.School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The TiO₂ surface is functionalized with different concentrations of K₂CO₃ and polyethyleneimine (PEI), and in-depth research on CO₂ adsorption performance and mechanism is conducted. CO₂ low-temperature adsorbent was successfully prepared by ultrasonic impregnation method using K₂CO₃ and PEI as functionalized materials and commercial selective catalytic reduction (SCR) catalyst white embryo (porous TiO₂) as carrier. The physicochemical properties of the modified adsorbents were characterized using X-ray diffraction (XRD), differential thermogravimetry (DTG), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results indicate that, K₂CO₃ and PEI activate the porous structure of TiO₂, enhancing the

修回日期: 2024-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4104000); 西安热工研究院有限公司院自立科技项目(GU-23-TYK20)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2023YFB4104000); Science and Technology Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (GU-23-TYK20)

第一作者简介: 雷嗣远(1984), 男, 硕士, 主要研究方向为烟气碳捕集技术, leisiyuan7@163.com。

通信作者简介: 周长松(1990), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为烟气多污染物协同脱除技术, cszhou@njnu.edu.cn。

density of surface alkaline active sites. This enhancement facilitates the accommodation of PEI and K₂CO₃, exposes adsorption active sites, and promotes CO₂ diffusion and CO₂ adsorption. 50%PEI@TiO₂ introduces numerous active functional groups and alkaline amine sites, achieving a CO₂ adsorption capacity of 2.11 mmol/g. By measuring the CO₂ adsorption by 50%PEI@TiO₂ adsorbent and fitting to Langmuir and Freundlich adsorption isotherm models, it finds that CO₂ is mainly adsorbed physically, and van der Waals force plays a major role during adsorption. The optimal adsorption and desorption temperatures for CO₂ are 50 °C and 110 °C, respectively. The cyclic experiment showed that, compared with PEI, K₂CO₃-loaded adsorbents exhibit greater stability, with a decrease in adsorption capacity of less than 10% after 30 cycles. These findings suggest that functionalized materials based on commercial SCR catalyst TiO₂ pellets hold promise for low-temperature CO₂ capture in industry flue gases.

Key words: carbon capture; low temperature adsorption; functionalization; TiO₂ carrier; recycling utilization

目前,主要的燃烧后碳捕集技术包括化学吸收法^[1]、高温固碳法^[2]和低温吸附法^[3]。其中,低温吸附法可使用固体吸附剂(如沸石、多孔炭)在较低温度(<60 °C)下吸附 CO₂^[4]。刘天祥等^[5]将四乙烯五胺负载在 MCM-41 沸石上进行新型改性,研究载体结构、吸附温度等因素对 CO₂ 吸附性能的影响。雷苏等^[6]利用挤压-滚圆法制备 Na₂CO₃ 吸附剂并测试其对 CO₂ 的低温吸附性能,发现低温吸附法具有较低的能耗和成本,未来发展空间广阔。

传统的低温吸附剂载体因具有不同结晶形态和结构稳定性,机械强度和吸附性能差别较大。未添加钒、钨等催化活性组分的选择性催化还原(SCR)脱硝催化剂白胚(多孔型 TiO₂)具有丰富的多孔结构和良好的机械强度,作为吸附剂载体预期有良好的表现。可通过改性多孔型 TiO₂ 引入特定功能,如酸或碱性位点,从而增强其对特定污染物的吸附选择性^[7-9]。黄彪等^[10]利用多孔型 TiO₂ 微粒作为吸附剂对染料进行吸附处理。陆洋等^[11]利用浸渍法将 CeO₂ 负载在 TiO₂ 表面并用于提高燃煤烟气中汞的吸附容量。

K₂CO₃ 和聚乙烯亚胺(PEI)作为 CO₂ 吸附剂,在环境温度和压力下表现出优异的 CO₂ 吸附性能,并具有低成本和较强的再生能力^[12-14]。目前,将 K₂CO₃ 和 PEI 负载于多孔型 TiO₂ 表面并用于工业烟气中,CO₂ 的吸附脱除尚未见报道。因此,利用不同质量的 K₂CO₃ 和 PEI 将 TiO₂ 表面功能化,并深入研究其 CO₂ 的吸附性能和机理,可为商用 SCR 脱硝催化剂白胚用于烟气捕集 CO₂ 提供新思路和技术支持。

1 实验材料、装置与方法

1.1 实验装置与方法

本研究采用的多孔型 TiO₂ 载体为 Dongfang KWH 生产的 SCR 催化剂白胚,分析纯级 K₂CO₃ 为西安天茂化工有限公司生产,氨水溶液(NH₃·H₂O

质量分数 25%)和无水乙醇由上海麦克林生化科技股份有限公司生产,分析纯级 PEI 为阿拉丁化学试剂有限公司生产。

CO₂ 吸附性能测试在自制固定床实验装置(图 1)上进行。模拟烟气由一定比例的 N₂ (80%)、水蒸气(10%)和 CO₂ (10%) 在混气瓶中混合, N₂ 和 CO₂ 的总流量由质量流量计控制在 1.8 L/min。水蒸气含量由水浴锅调节鼓泡器的温度进行控制。

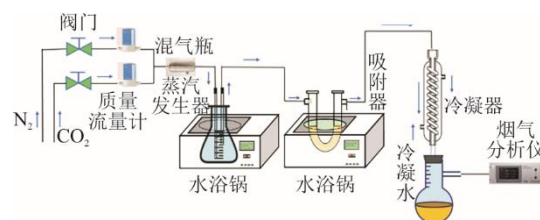


图 1 CO₂ 吸附性能固定床实验装置

Fig.1 The fixed bed for CO₂ adsorption performance test

实验开始前,将 2 g 改性多孔型 TiO₂ 的 CO₂ 吸附剂放入固定床内,吸附后的气体经冷凝后通入 CO₂ 分析仪中在线监测,吸附性能计算公式为:

$$q_a = \frac{Q \times \rho_{\text{CO}_2}}{m_a \times M_{\text{CO}_2}} \times \int_0^t \frac{C_{\text{in}} - C_{\text{out}}}{1 - C_{\text{out}}} \times dt \quad (1)$$

式中: q_a 为吸附剂 CO₂ 吸附量, mmol/g; Q 为混合气体流量, L/min; ρ_{CO_2} 为 CO₂ 密度, kg/cm³; m_a 为吸附剂质量, g; M_{CO_2} 为 CO₂ 摩尔质量, g/mol; t 为吸附时间, s; C_{in} 为 CO₂ 初始体积分数, %; C_{out} 为 CO₂ 吸附后的出口体积分数, %。

1.2 吸附剂改性制备

采用超声浸渍法制备改性 TiO₂ 吸附剂,将 TiO₂ 固体粉末置于氨水溶液以去除 TiO₂ 空隙中的酸性杂质,处理后加入无水乙醇中,在 40 °C 下搅拌 30 min;称取不同质量的 K₂CO₃ 加入上述混合物中,超声浸渍 2 h,然后将上述混合物在 80 °C 下真空干燥 12 h,即制得不同负载量(即 K₂CO₃ 占吸附剂混合物的质

量分数分别为40%、50%，下同) K_2CO_3 功能化的 TiO_2 吸附剂，分别记为40% $KC@TiO_2$ 和50% $KC@TiO_2$ 。称取不同质量的PEI加入上述混合物中，超声浸渍2 h，然后将上述混合物在80 °C下真空干燥12 h，即制得不同负载量(即PEI占吸附剂混合物的质量分数分别为40%、50%，下同)PEI功能化的 TiO_2 吸附剂，分别记为40% $PEI@TiO_2$ 和50% $PEI@TiO_2$ 。

1.3 吸附剂表征

利用扫描电子显微镜(JSM-5610LV, 日本)、X射线能量色散光谱仪(Apreo 2S, 美国)、全自动表面积分析仪(Micromeritics ASAP2460, 美国)、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, IS50, 美国)、X射线衍射仪(XRD, Rigaku Ultima IV, 日本)、X射线光电子能谱仪(XPS, PHI 5000 Versaprobe, 日本)、热重分析仪(Pyris 1 TGA, 美国, 30~800 °C, 10 °C/min)测试样品的理化性质。

2 实验结果与讨论

2.1 吸附剂表征

为了揭示改性多孔性 TiO_2 的微观结构，对改性吸附剂进行放大8万倍的电镜扫描，加速电压20 kV, $WD=6.4$ mm, $Signal A=SE2$ ，结果如图2所示。改性后的吸附剂样品颗粒物呈现为多孔疏松状^[15]。表1为改性多孔型 TiO_2 的比表面积与孔结构分析。负载 K_2CO_3 或PEI后的 TiO_2 比表面积随着负载量的增大而减少，平均孔径变化不大，平均孔容有所减小。这主要原因为 K_2CO_3 和PEI本身并非多孔材料，而其负载后大部分选择性地沉积在大孔、介孔中，小部分沉积在微孔孔道内，堵塞了部分微孔，使得平均孔径变化不大但比表面积和孔容减小。改性前后多孔性 TiO_2 的孔径主要分布在介孔(2~50 nm)范围内，有利于功能化物质粘附于通道内并保持孔道通畅，同时可提供用于吸附的活性位点场所。

通过比较改性前、后多孔型 TiO_2 的XRD衍射图谱(图3, 其中 $2\theta \in 10^\circ \sim 90^\circ$ ，扫描速度 $8^\circ/\text{min}$ ，Cu、 $K\alpha$ 辐射长度0.154 nm)发现，所有吸附剂均显示出锐钛矿 TiO_2 的晶体衍射峰(JCPDS card no. 21-1272)，故改性后吸附剂载体晶相并未发生改变。除了50% $KC@TiO_2$ 在 $2\theta=45^\circ$ 、 52° 处存在杂峰，其他衍射峰的形态在改性前、后基本保持不变。主要原因为 K_2CO_3 负载后在 TiO_2 黏膜层不均匀增厚而形成了钾基沉积^[16]。

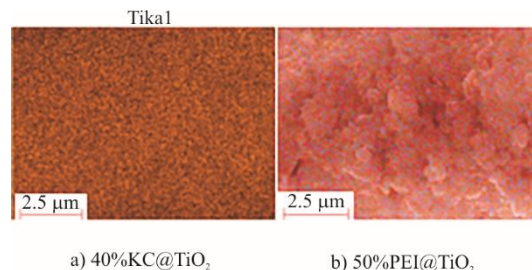


图2 改性多孔型 TiO_2 的SEM及Mapping图像
Fig.2 SEM and Mapping images of modified porous TiO_2

表1 改性多孔型 TiO_2 的比表面积与孔结构分析
Tab.1 Specific surface area and pore structure analysis of modified porous TiO_2

吸附剂种类	BET 比表面积/ ($m^2 \cdot g^{-1}$)	平均孔径/nm	平均孔容积/ ($cm^3 \cdot g^{-1}$)
TiO_2	87.45	17.31	0.292 3
40% $KC@TiO_2$	61.63	17.07	0.240 7
50% $KC@TiO_2$	40.19	18.25	0.219 2
40% $PEI@TiO_2$	72.57	17.34	0.255 9
50% $PEI@TiO_2$	50.36	17.92	0.226 0

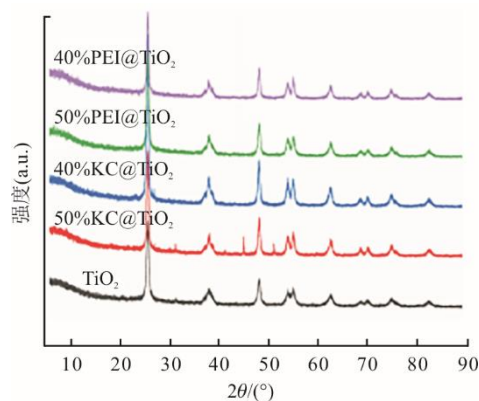


图3 改性多孔型 TiO_2 的XRD衍射图谱
Fig.3 XRD diffraction patterns of modified porous TiO_2

改性多孔型 TiO_2 的红外光谱表征如图4所示。相比 TiO_2 位于 2900 、 1500 cm^{-1} 的吸收峰， K_2CO_3 负载 TiO_2 增加了位于 471 、 1086 、 1681 cm^{-1} 的吸收峰，而PEI负载 TiO_2 增加了位于 458 、 1086 、 3431 cm^{-1} 的吸收峰。其中， 1086 cm^{-1} 处的强吸收峰可归属于 $C=O$ 拉伸振动引起^[17]。 471 cm^{-1} 处的吸收峰可归属于 $O-H$ 的平面外弯曲振动引起^[18]。证实了改性后多孔型 TiO_2 上含氧官能团的存在，且 $-C=O$ 和 $-OH$ 的出现表明多孔型 TiO_2 在活化过程中因加羧基化和羟基化使得表面碱性活性位点增加，从而具有更强的 CO_2 吸附性能。图5为50% $KC@TiO_2$ 吸附剂表面氧元素能谱图，射线源为 Al 靶 $K\alpha$ 射线，能量为 1486 eV。可以看出，吸附剂表面结合氧同时包含 $C=O$ 和 $-OH$ 形态氧，这与红外光谱分析相符^[19-20]。

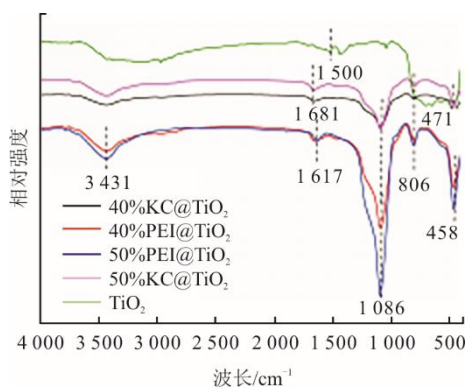


图4 改性多孔型 TiO₂ 的红外光谱图
Fig.4 Infrared spectra of modified porous TiO₂

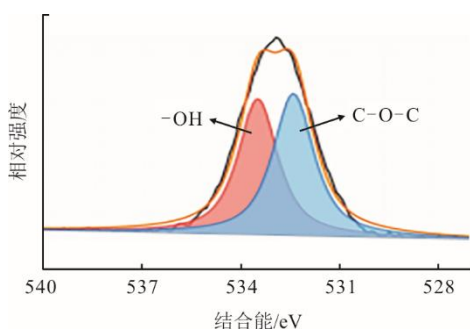


图5 KC@TiO₂ 吸附剂表面氧元素 XPS 能谱
Fig.5 XPS energy spectrum of elemental oxygen on the surface of KC@TiO₂ adsorbent

改性多孔型 TiO₂ 的热重分析 DTG 分析如图 6 所示。

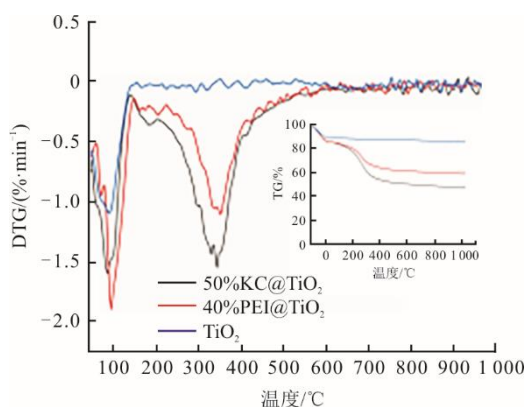


图6 改性多孔型 TiO₂ 的 DTG 分析
Fig.6 DTG analysis of modified porous TiO₂

测试气氛为 N₂, 升温速率 10 °C/min。对于未改性 TiO₂, 其在 1000 °C 以内的质量损失可以忽略不计, 表明该材料具有优异的热稳定性, 适合用作吸附剂载体。在 130 °C 以内, 吸附剂有 1 个微弱的失重峰, 其质量降低约 10%, 这主要是由于预吸附的水和 CO₂ 的挥发^[21]。在 130~350 °C, K₂CO₃ 和 PEI 负载后的吸附剂出现明显的失重峰, 失重率仅

为 1.2~1.5%/min, 主要为 K₂CO₃ 和 PEI 在吸附剂中的挥发和分解造成, 且 PEI 的分解温度略高于 K₂CO₃ ^[22]。此外, 在 CO₂ 吸附和脱附温度范围内 (30~120 °C), 吸附剂没有明显的分解, 表明制备的吸附剂亦具有良好的热稳定性。

2.2 CO₂ 吸脱附性能

2.2.1 CO₂ 的吸附容量

改性多孔型 TiO₂ 对 CO₂ 吸附容量曲线如图 7 所示。与未改性 TiO₂ 相比, 负载 K₂CO₃ 和 PEI 后的吸附剂对 CO₂ 吸附容量均有明显提升。这主要归功于 K₂CO₃ 和 PEI 活化了 TiO₂ 载体孔隙结构, 促进了 CO₂ 扩散, 并提高了表面碱性活性中心的密度, 从而增强了其与 CO₂ 的结合力^[23]。负载 K₂CO₃ 和 PEI 后, TiO₂ 表面孔隙被活性组分填充, 孔隙减小, 孔径接近 CO₂ 的动力学直径, 更有利于 CO₂ 在孔道中的扩散和吸附。实验结果表明, 随着负载 K₂CO₃ 和 PEI 负载量增多, 与其发生反应的 CO₂ 随之增多。相同活性物质负载量情况下, PEI 可提供更多的碱性胺位点, 具有更大的 CO₂ 吸附容量, 可达 2.11 mmol/g, 优于钾钠基负载 Al₂O₃ 或分子筛吸附剂(最佳条件下 CO₂ 吸附容量仅为 0.15~1.65 mmol/g), 有效提升了 CO₂ 吸附性能^[6,24-25]。

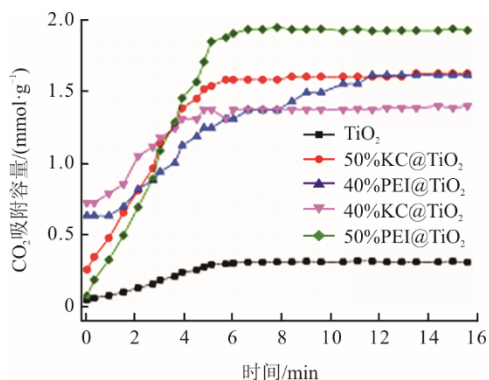


图7 50 °C 下改性多孔型 TiO₂ 对 CO₂ 的吸附容量
Fig.7 Adsorption capacity of modified porous TiO₂ for CO₂ at 50 °C

2.2.2 温度的影响

研究温度对 CO₂ 的吸附影响, 结果如图 8 所示。由图 8 可见: 随着温度的升高, 4 种吸附剂对 CO₂ 的吸附量呈现先增后减的趋势; 在 50 °C 时, 吸附容量达到最大。低温下 CO₂ 吸附过程受到动力学控制, 随着温度升高, CO₂ 扩散能力增强, 吸附速率加快。PEI 负载吸附剂尤为明显, 这是由于 PEI 的黏度随着温度升高而减小, 有利于暴露更多碱性胺位点。然而, 随着温度进一步升高至 80 °C, 尽管有更多的胺活性

位点可用,但由于CO₂吸附过程中大量放热,高温开始抑制反应,导致CO₂吸附能力降低。此外,低温环境下适合吸附CO₂的微孔孔径随温度升高而增大,进而减少了吸附CO₂的微孔数量,导致吸附能力降低。

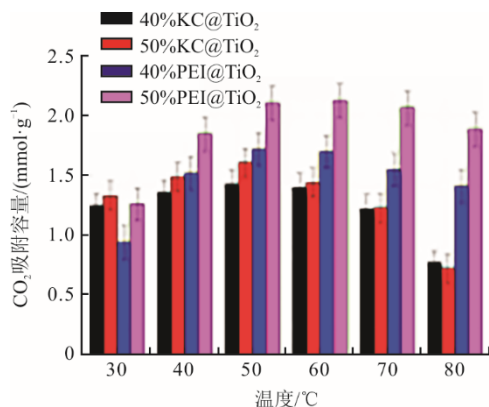


图8 温度对改性多孔型TiO₂吸附CO₂容量的影响
Fig.8 Effect of temperature on CO₂ adsorption capacity of modified porous TiO₂

2.2.3 SO₂的影响

研究了不同SO₂体积分数对CO₂的吸附影响,结果如图9所示。由图9可见,烟气中SO₂的存在会抑制CO₂吸附,且SO₂体积分数越高,CO₂的吸附容量下降越明显。这主要是因为酸性更强的SO₂气体和CO₂存在竞争吸附。郭百合等^[26]研究发现,与CO₂分子相比,SO₂分子中的S原子外s轨道电子更加活跃,使得p轨道及O原子轨道外电子活性均有所增强,与吸附剂表面活性O原子外轨道能带重叠,导致SO₂会优先吸附在吸附剂表面的O顶位,并将CO₂分子推离吸附剂表面。

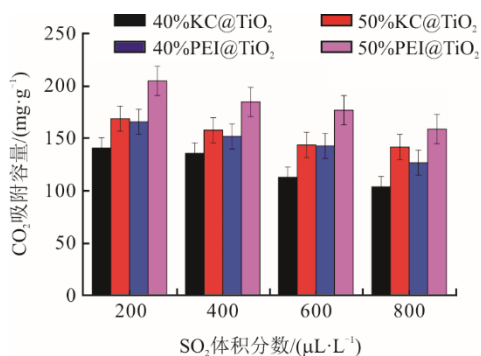


图9 SO₂体积分数对改性多孔型TiO₂吸附CO₂容量的影响
Fig.9 Effect of SO₂ volume fraction on CO₂ adsorption capacity of modified porous TiO₂

2.2.4 CO₂的脱附性能

CO₂吸附后的脱附性能是评价吸附剂是否适合工业推广应用的重要指标。因此,以50%PEI@TiO₂

吸附剂为例在90~130 °C进行脱附实验,结果如图10所示。由图10可见:尽管在100 °C下CO₂可以在25 min左右完成脱附,但脱附速率较为缓慢;随着温度升至110 °C,CO₂的脱附速率显著加快,可在8 min内完成脱附。随着温度进一步升高,虽然CO₂的脱附速率加快,但活性物质的挥发或分解损失也随之增加,不利于长期循环使用,因此最佳脱附温度在110 °C左右。

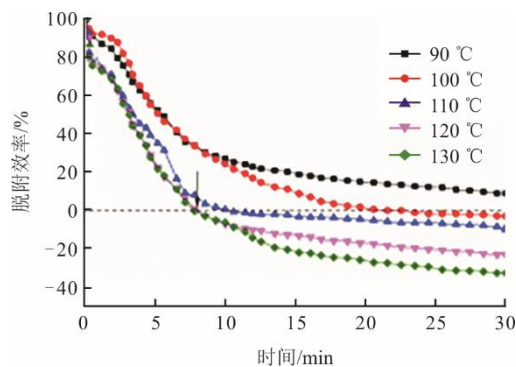


图10 不同温度下50%PEI@TiO₂对CO₂的脱附效率
Fig.10 Desorption efficiency of CO₂ by 50%PEI@TiO₂ at different temperatures

2.2.5 CO₂的吸附等温线

为了反映CO₂分子与吸附剂表面之间的相互作用强度和吸附平衡的情况,以50%PEI@TiO₂为例在不同进气体积分数条件下(3%~10%)测试吸附剂对CO₂的吸附量,在此基础上对吸附剂进行Langmuir、Freundlich吸附等温线模型的拟合,确定用于描述该体系吸附行为的适当模型,从而评估吸附材料对CO₂的吸附选择性^[27-28],结果如图11所示。

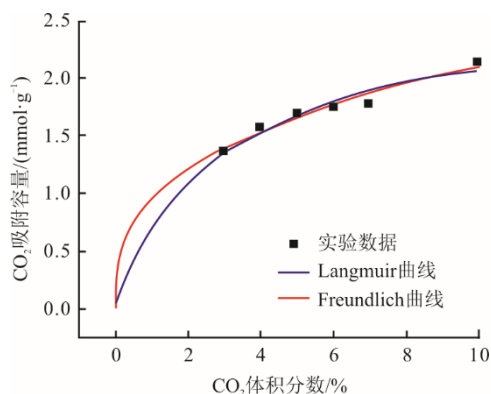


图11 CO₂的吸附等温线
Fig.11 Adsorption isotherm of CO₂

Langmuir吸附等温方程主要适用于吸附剂表面均匀的单分子层吸附过程,而Freundlich吸附等温方程主要适用于不均匀吸附剂表面的非理想吸附过程。方程的数学表达式为:

$$q_e = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (2)$$

$$q_e = K_F C^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中： q_e 为平衡吸附量； q_m 为单分子层饱和吸附量； C 为被吸附气体的平衡CO₂体积分数； K_L 为Langmuir常数，是吸附物质在固体表面上的吸附能力的度量； K_F 为Freundlich常数，也可认为是相对吸附容量； n 为代表吸附剂吸附强度的常数。

表2为CO₂吸附等温线模型拟合参数。从表2可以看出，Freundlich方程的拟合效果（ $R^2=0.997$ ）优于Langmuir方程的拟合效果（ $R^2=0.919$ ），说明在此吸附过程中吸附剂表面为不均匀的非理想吸附过程，而非仅为单分子层吸附过程^[29]。从Freundlich模型拟合出的参数值可以看出， n 值为2.13，研究认为当 $n>1.0$ 时有利于吸附。此外， n 还可以作为吸附线性偏差的1个度量，用于验证吸附类型，一般认为当 n 等于1.0时为线性吸附过程， n 大于1.0时为物理吸附过程， n 小于1.0时为化学吸附过程^[30]。CO₂以物理吸附为主，吸附时起主要作用的为范德华力，而非化学键力^[31]。

表2 CO₂ 吸附等温线模型拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of CO₂ adsorption isotherm model

模型	R ²	参数
Langmuir	0.919	$q_m=111.89$, $K_L=0.00289$
Freundlich	0.997	$n=2.13$, $K_F=7.27500$

注：R²为衡量模型对数据的拟合程度，越接近1说明模型预测能力越强。

2.2.6 CO₂的循环吸附

为了更准确地评价改性多孔型TiO₂吸附剂，分别在50℃吸附温度和110℃脱附温度下对50%KC@TiO₂和50%PEI@TiO₂吸附剂进行吸附CO₂的多次循环稳定性测试，结果如图12所示。

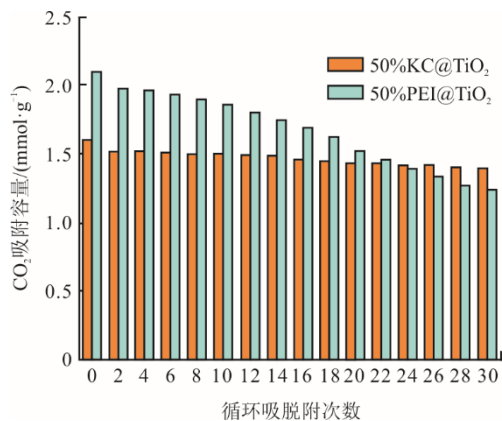


图12 改性多孔型 TiO₂ 对 CO₂ 的循环吸脱附性能

Fig.12 Cyclic adsorption and desorption performance of modified porous TiO₂ on CO₂

由图12可见：第1、2次循环时2种吸附剂对CO₂的吸附容量与初始吸附容量相比均有所下降，这是由于CO₂的不完全脱附所致；50%KC@TiO₂的吸附容量更加稳定，30次循环后吸附容量下降不超过10%，表明K₂CO₃负载吸附剂具有理想的循环吸附稳定性。22次循环后PEI负载TiO₂对CO₂的吸附性能开始低于K₂CO₃负载TiO₂，这主要是由于活性胺的黏度较弱，相对于K₂CO₃多次循环后的更易从载体剥离脱落。

3 结论

1) 相较于K₂CO₃，PEI可提供更多的碱性胺位点，因此具有更大的CO₂吸附容量，可达2.11 mmol/g。改性多孔型TiO₂对CO₂的最佳吸脱附温度分别为50℃和110℃。

2) 循环实验发现，相较于PEI，K₂CO₃负载吸附剂的吸附性能更稳定，30次循环后吸附容量下降不超过10%，表明以商用SCR催化剂白胚为载体的CO₂吸附剂具有理想的循环稳定性和良好的应用前景。

[参考文献]

- [1] 王金意, 牛红伟, 刘练波, 等. 燃煤电厂烟气新型CO₂吸收剂开发与工程应用[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 54-61.
WANG Jinyi, NIU Hongwei, LIU Lianbo, et al. Development and engineering application of new absorption solvent for CO₂ capture from flue gas of coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 54-61.
- [2] LIU S, RAO L, YANG P, et al. Superior CO₂ uptake on nitrogen doped carbonaceous adsorbents from commercial phenolic resin[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 93: 109-116.
- [3] IBRAHIM M H, ELNAAS M H, ZHANG Z, et al. CO₂ capture using hollow fiber membranes: A review of membrane wetting[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(2): 963-978.
- [4] WANG H, WANG H, LIU G, et al. In-situ pyrolysis of taihu blue algae biomass as appealing porous carbon adsorbent for CO₂ capture: role of the intrinsic N[J]. Science of the Total Environment, 2021, 771(8): 145424.
- [5] 刘天祥, 李蓉, 李晶莹, 等. 胺功能化沸石吸附剂载体的结构性质对CO₂吸附性能的影响[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2840-2850.
LIU Tianxiang, LI Rong, LI Jingying, et al. Effect of structural properties of amine functionalized zeolite adsorbents support on CO₂ adsorption performance[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2840-2850.
- [6] 雷苏, 曾鹏鑫, 王鹏, 等. Na₂CO₃基吸附剂颗粒制备及其脱碳性能[J]. 化工进展, 2019, 38(8): 3562-3571.
LEI Su, ZENG Pengxin, WANG Peng, et al. Investigation on granulation and CO₂ uptake of Na₂CO₃-based sorbent pellets[J]. Chemical Industry and

- Engineering Progress, 2019, 38(8): 3562-3571.
- [7] RISHIKA N, VELVIZHI G. Synergistic adsorption and kinetic studies of heterostructured g-C₃N₄/TiO₂ nano-photocatalyst under visible light for enhanced CO₂ reduction[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, 31(2): 2495-2510.
- [8] HU Y, LIU Y, FU W, et al. Efficiency and mechanism of enhanced norfloxacin removal using amorphous TiO₂-modified biochar[J]. Environmental Pollution, 2024, 351: 124027.
- [9] 唐仲恺, 段玖祥, 魏晗, 等. CeO₂-WO₃/TiO₂ 同时催化脱除氮氧化物与氯苯研究[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 125-131.
TANG Zhongkai, DUAN Jiuxiang, WEI Han, et al. Synergistic catalytic removal of nitrogen oxides and chlorobenzene by CeO₂-WO₃/TiO₂[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 125-131.
- [10] 黄彪, 郑莉娜, 秦妍, 等. 多孔型 TiO₂ 微粒的制备及其对离子型染料的吸附[J]. 纺织学报, 2023, 44(11): 167-175.
HUANG Biao, ZHENG Lina, QIN Yan, et al. Preparation of porous TiO₂ particles and their adsorption for ionic dyes[J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(11): 167-175.
- [11] 陆洋, 周劲松, 周启昕, 等. CeO₂/TiO₂ 吸附剂煤气脱汞产物的浸出规律[J]. 化工进展, 2023, 42(7): 3875-3883.
LU Yang, ZHOU Jinsong, ZHOU Qixin, et al. Leaching mechanism of Hg-absorption products on CeO₂/TiO₂ sorbents in syngas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(7): 3875-3883.
- [12] LI R, HU X, HUANG L, et al. Dynamic intermediate-temperature CO₂ adsorption performance of K₂CO₃-promoted layered double hydroxide-derived adsorbents[J]. Molecules, 2024, 29(6): 1192.
- [13] YANG Z, GUO X, ZHANG G, et al. One-pot synthesis of high N-doped porous carbons derived from a N-rich oil palm biomass residue in low temperature for CO₂ capture[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(6): 4875-4887.
- [14] PI W, CHEN H, GUO Y, et al. Carbon dioxide adsorption capacity of porous carbon after polyamine impregnation under different pore structures and temperatures[J]. Chemica Engineering Journal, 2024, 485: 150025.
- [15] CHOWDHURY N, CHOI H. Photocatalytic degradation of perfluorooctanoic acid on Pb-doped TiO₂ coated with reduced graphene oxide[J]. Water Environment Research, 2023, 95(5): e10871.
- [16] YU Q, LI Y, ZHANG Q, et al. Synthesis of 1, 2-propanediamine via reductive amination of isopropanolamine over Raney Ni under the promotion of K₂CO₃[J]. Chemical Papers, 2019, 73(8): 2019-2026.
- [17] GUO Y, TAN C, SUN J, et al. Porous activated carbons derived from waste sugarcane bagasse for CO₂ adsorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 381: 122736.
- [18] HAMEED K. Preparation and characterization of activated carbon from sunflower seed oil residue via microwave assisted K₂CO₃ activation[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 9794-9799.
- [19] LIU Q, SHI Y, ZHENG S, et al. Amine-functionalized low-cost industrial grade multi-walled carbon nanotubes for the capture of carbon dioxide[J]. Journal of Energy Chemistry, 2014, 23(1): 111-118.
- [20] LI M, XIAO R. Preparation of a dual pore structure activated carbon from rice husk char as an adsorbent for CO₂ capture[J]. Fuel Processing Technology, 2019, 186: 35-39.
- [21] CHEN C, PARK D W, AHN W S. CO₂ capture using zeolite 13X prepared from bentonite[J]. Applied Surface Science, 2014, 292: 63-67.
- [22] SABOUNI R, KAZEMIAN H, ROHANI S. Microwave synthesis of the CPM-5 metal organic framework[J]. Chemical Engineering & Technology, 2012, 35(6): 1085-1092.
- [23] JI Y L, SONG H P, CHENG F Q, et al. Study of solid amine CO₂ sorbents based on the modified fly ash[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 448/453: 174-177.
- [24] 刘燕燕, 徐樑, 宋凯, 等. 负载型 K₂CO₃/5A 吸附剂的碳酸化反应特性研究[J]. 化学工程, 2018, 46(7): 12-16.
LIU Yanyan, XU Liang, SONG Kai, et al. Carbonation characteristics of supported K₂CO₃/5A adsorbent[J]. Chemical Engineering, 2018, 46(7): 12-16.
- [25] 刘飞, 祁志福, 方梦祥, 等. 用于烟气二氧化碳捕集的有机胺挥发性研究进展[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 33-43.
LIU Fei, QI Zhifu, FANG Mengxiang, et al. Research progress of amine volatility for carbon dioxide capture from flue gas[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 33-43.
- [26] 郭百合, 李艳红, 张靖超, 等. SO₂ 对 K₂CO₃ 吸附 CO₂ 性能影响的实验及 DFT 机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 659-669.
GUO Baihe, LI Yanhong, ZHANG Jingchao, et al. Experimental and DFT mechanism study on the effect of SO₂ on CO₂ adsorption performance by K₂CO₃[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 659-669.
- [27] WANG X, FENG J, CAI Y, et al. Porous biochar modified with polyethyleneimine (PEI) for effective enrichment of U(VI) in aqueous solution[J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 134575.
- [28] FATIMA S S, BORHAN A, AYOUB M, et al. Modeling of CO₂ adsorption on surface-functionalized rubber-seed shell activated carbon: isotherm and kinetic analysis[J]. Processes, 2023, 11(10): 2833.
- [29] KUANG Y, ZHANG Z, WU D. Synthesis of graphene oxide/polyethyleneimine sponge and its performance in the sustainable removal of Cu(II) from water[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 151258.
- [30] AZIMI E B, BADIEI A, GHASEMI J B. Efficient removal of malachite green from wastewater by using boron-doped mesoporous carbon nitride[J]. Applied Surface Science, 2019, 469: 236-245.
- [31] ZOU W, GAO B, OK Y, et al. Integrated adsorption and photocatalytic degradation of volatile organic compounds (VOCs) using carbon-based nanocomposites: a critical review[J]. Chemosphere, 2019, 218: 845-859.

(责任编辑 杨嘉蕾)