

聚乙烯亚胺(PEI)功能化策略及其在二氧化碳捕集中的研究进展与展望

周 帅, 侯 佳*

四川大学轻工科学与工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年7月5日; 录用日期: 2026年8月5日; 发布日期: 2026年8月13日

摘 要

近年来, 聚乙烯亚胺(PEI)凭借丰富的胺基活性位点、低成本优势以及高效的化学吸附性能, 已成为固态胺基CO₂捕集材料领域的研究热点。然而, 其实际应用仍受制于胺基失活、氧化降解、浸出流失及再生能耗高等关键瓶颈。本文系统梳理了近年来PEI功能化改性的主要策略, 涵盖物理负载与复合、共价接枝、化学结构修饰及绿色合成途径, 并在此基础上, 对该领域未来的发展方向进行了前瞻性展望。

关键词

聚乙烯亚胺(PEI), 固态胺基吸附剂, CO₂捕集, 功能化改性策略

Functionalization Strategy of Polyethyleneimine (PEI) and Its Research Progress and Prospect in Carbon Dioxide Capture and Concentration

Shuai Zhou, Jia Hou*

College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Received: July 5, 2026; accepted: August 5, 2026; published: August 13, 2026

Abstract

In recent years, polyethylenimine (PEI) has become a research hotspot in the field of solid amine-

*通讯作者。

文章引用: 周帅, 侯佳. 聚乙烯亚胺(PEI)功能化策略及其在二氧化碳捕集中的研究进展与展望[J]. 材料科学, 2026, 16(8): 21-29. DOI: 10.12677/ms.2026.168171

based CO₂ capture materials, owing to its abundant amine active sites, low cost, and high chemisorption efficiency. However, its practical application remains constrained by key bottlenecks, including amine deactivation, oxidative degradation, leaching loss, and high regeneration energy consumption. This review systematically summarizes the major strategies for PEI functionalization developed in recent years, covering physical loading and compositing, covalent grafting, chemical structure modification, and green synthesis routes. On this basis, it also provides a forward-looking perspective on the future development directions in this field.

Keywords

Polyethylenimine (PEI), Solid Amine-Based Adsorbents, CO₂ Capture, Functionalization Strategies

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

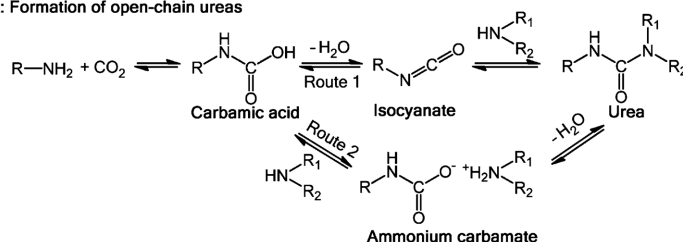
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

Mechanism A: Formation of open-chain ureas



Mechanism B: Formation of cyclic ureas

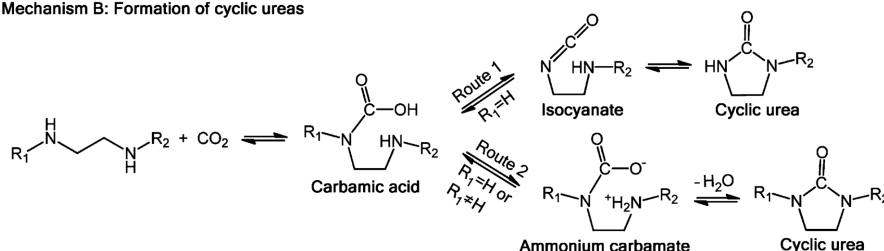


Figure 1. Proposed mechanism for CO₂-induced degradation of supported amines

图 1. CO₂ 诱导支撑胺降解的可能机理

在全球气候变化治理日益紧迫的背景下,降低大气中二氧化碳浓度已成为人类可持续发展的重大命题。国际能源署数据显示,2023 年全球能源相关 CO₂ 排放量再创新高,而钢铁、水泥、化工等工业部门因工艺过程排放特性,被公认为典型的难减排领域[1]。目前,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术被联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估为实现《巴黎协定》温控目标的关键路径之一。然而,CCUS 的规模化部署长期受制于高昂的经济成本,其中捕集环节通常占全流程总成本的 60%~80% [2]。因此,开发兼具高效、低能耗与低成本的新一代捕集材料,成为推动 CCUS 商业化应用的核心突破口。在众多捕集技术中,基于固体吸附剂的分离法因再生能耗低、腐蚀性小且无溶剂挥发等优势受到广泛关注。理想的固体吸附剂需在复杂烟气或超稀释空气环境中保持高吸附容量、高选择性、快速动力学及优异的循环稳定性[3]。而聚乙烯亚胺(PEI)凭借分子链中高密度胺基、合成简便、成本低廉以及对 CO₂ 的高效化学吸附性能,已成为固态胺基吸附剂的研究热点[4]。然而,PEI 在实际应用中仍面临胺基失活(如图 1 所示)、氧

化降解、浸出流失、扩散阻力增大及再生能耗高等瓶颈[5], 严重制约其循环稳定性与规模化应用前景。基于上述挑战, 本综述拟系统梳理近年来 PEI 功能化改性的主要策略, 涵盖物理负载与复合、共价接枝、化学结构修饰及绿色合成途径[6]-[9], 并探讨其在改善吸附性能与稳定性方面的作用机制, 以期为高性能固态胺基 CO₂ 吸附材料的设计与开发提供参考。

2. PEI 的功能化策略与合成方法

为突破上述瓶颈, 研究者发展了物理负载、共价接枝、化学结构修饰及绿色合成等多种功能化策略(如图 2 所示), 通过将 PEI 与多孔载体复合或调控其分子结构, 力求在吸附容量、选择性、动力学、稳定性与经济性之间实现综合优化。下文将系统梳理各类策略的研究进展及其代表性成果。

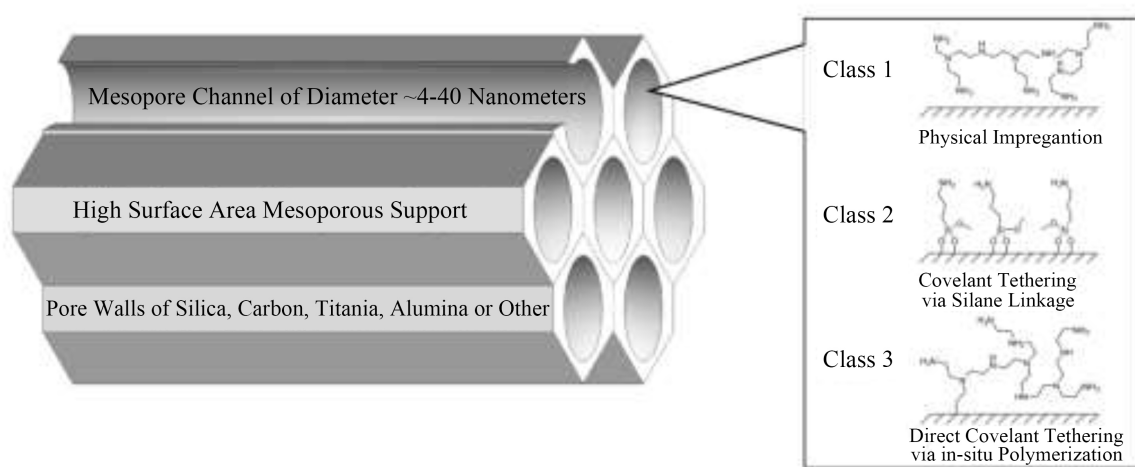


Figure 2. The three subclasses of amine-based materials [27]

图 2. 胺基材料的三种类型[27]

2.1. 物理负载与复合

物理负载因其操作简便、适用性广, 成为目前 PEI 功能化研究中应用最为广泛的策略。该方法的实质在于借助毛细管效应和物理吸附作用, 将 PEI 引入多孔载体的孔道内部, 其中湿浸渍法是最具代表性的实施方式, 其典型流程为: 将载体浸渍于 PEI 溶液中, 经溶剂蒸发后使 PEI 沉积于孔道内。为在提高负载量的同时缓解传质扩散阻力, 研究人员通常选用具有大孔容及三维互通孔道结构的载体[10]。

2012 年, Sung 等[11]将 PEI 负载于多孔芳香骨架材料 PAF-5 中, 利用 PEI 乙烯基与 PAF-5 苯环之间的 C-H $\cdots\pi$ 相互作用实现稳定固载。所制得的 PEI (40 wt%)@PAF-5 复合材料在 313 K、0.15 atm CO₂ 条件下, 吸附容量达 11.1 wt%, CO₂/N₂ 选择性高达 2160, 为同期报道的最高值。循环测试显示, 该材料在 313 K 下 20 min 内可吸附 10.8 wt% 的 CO₂, 并在 343 K 下 10 min 内实现完全脱附, 体现出优异的吸附动力学和较低的再生能耗。该工作将 PEI 引入到多孔有机聚合物体系, 为后续载体工程研究提供了重要参考。

在此基础上, 研究者进一步关注载体孔结构及化学性质对吸附性能的影响。2021 年, Meng 等人[12]对比了二氧化硅、氧化铝、活性炭及聚合物树脂 HP20 等载体, 发现载体性质显著影响 PEI 的负载量、胺效率及循环耐久性。其中, HP20 因丰富的大孔结构, 在 303 K 下吸附容量达 4.18 mmol/g, 30 次循环后容量损失仅约 1%。而二氧化硅在高温再生时易生成尿素导致性能衰退, 聚合物树脂则具有更好的热稳定性。该研究强调, 载体选型对吸附剂整体性能的重要性。在载体类型差异被证实为关键性能调控因素之后, 研究者进一步将关注点聚焦于载体形态对 PEI 分散行为的影响。2023 年, Li 等人[13]系统考察了不

同形貌二氧化硅载体——硅纳米球(SNP)、硅纳米片(SNH)及硅纳米管(SNT)——对 PEI 分散状态及 CO₂ 吸附性能的调控作用。结果表明, SNP 凭借其大孔结构, 使 PEI 主要限域于孔道内部, 10 次循环后吸附容量仅下降 3.27%; SNH 有利于 PEI 形成均匀薄层, 显著提升 CO₂ 扩散速率; 而 SNT 因孔道限域效应较弱, PEI 易发生团聚, 导致性能劣化。其中, SNP 在 60 wt% PEI 负载量下, CO₂ 吸附容量达 3.68 mmol/g, 再生能耗低至 1.775 GJ/ton, 展现了最优的综合性能。与此同时, Moon 等人[14]通过小角中子散射、固态核磁共振及分子动力学模拟, 揭示了短链聚乙二醇(PEG)与 PEI 共浸渍于 SBA-15 中的作用机制。研究发现, PEG 优先占据孔壁硅羟基位点, 将 PEI 从壁面束缚中“释放”出来, 同时 PEG 穿插于 PEI 团聚体中, 形成富含 PEG 的区域, 为 CO₂ 扩散提供快速通道。该改性策略在低温条件下仍能保持高胺效率, 显著降低 CO₂ 脱附温度, 为低能耗直接空气捕集材料的设计提供了分子层面的新见解。

综上所述, 物理负载策略兼具合成简便、成本低廉、负载量高及吸附容量大等优势, 但仍面临胺浸出、扩散限制及热导性差等挑战。未来研究需借助载体工程与添加剂调控等手段, 在保持高吸附性能的同时进一步提升材料的循环稳定性与热传导能力, 以推动其实际应用进程。

2.2. 共价接枝功能法

共价接枝功能法是通过形成牢固的化学键(如硅氧烷键、酰胺键、氨基甲酸酯键)将 PEI 分子链锚定于载体表面, 是解决胺浸出问题的最有效途径, 其中硅基载体的接枝研究最为成熟[15]。以介孔二氧化硅(SBA-15、MCM-41)为例, 其表面丰富的硅羟基(-Si-OH)可作为锚定位点。典型接枝流程分为两步: 首先, 利用 3-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)等硅烷偶联剂与硅羟基发生水解缩合反应, 形成 Si-O-Si 共价键, 在载体表面引入氨基丙基(-C₃H₆-NH₂)“分子手臂”, 得到氨基化 SBA-15-NH₂; 随后, 通过环氧基功能化交联剂(如 1,2-环氧丁烷、环氧氯丙烷或双官能团环氧树脂 EGDGE), 其一端环氧基与 SBA-15-NH₂ 的伯胺反应, 另一端与 PEI 链上的伯/仲胺发生开环反应, 形成稳定的 C-N 键, 从而将 PEI “拴”于载体表面。通过调控反应物的化学计量比, 可精确控制 PEI 的接枝密度与分子层厚度。

为了提升固体胺吸附剂的稳定性与抗氧化性的性能。Shi 等人[16]通过创新的共价接枝策略, 将 PEI 固载于介孔有机聚合物 P (DVB-D)表面, 显著增强了材料在真实烟气条件下的长性能。该研究以 1,4-丁二醇二缩水甘油醚(BDDE)为桥联剂, 利用其环氧基与 PEI 胺基的开环反应构建共价连接, 并同步引入羟基官能团。所制得的 P (DVB-D)@B-41.2% PEI 在 50℃、50%相对湿度下对 CO₂ 的吸附容量达 4.53 mmol/g, 且在较宽的温度(30℃~90℃)与 CO₂ 浓度(5%~30%)范围内保持优异性能。与物理浸渍对照材料相比, 该共价接枝吸附剂展现出卓越的循环稳定性(50 次循环后容量无明显下降)和抗氧化能力(50℃、5% O₂ 中暴露 48 h 后仍保留 80.5%的初始吸附容量)。固态核磁共振与红外光谱分析揭示, 其抗氧化性能的提升源于接枝过程中引入的羟基抑制了 PEI 链中尿素类物质的生成。吸附动力学符合 Avrami 分数阶模型与颗粒内扩散模型, 表明 CO₂ 吸附受多步扩散与表面反应共同控制。该研究为设计兼具高容量、强稳定性和抗氧化性的固体胺吸附剂提供了重要参考。

此外, Shen, X.等人[17]报道的 PEI 功能化纳米氧化铝吸附剂亦值得关注。如图 3 所示, 通过老化-醇洗工艺调控载体孔结构并保留路易斯酸位点, 诱导 PEI 自发交联与电子转移, 该材料在纯 CO₂ 气氛中吸附容量达 195 mg/g, 50 次循环后平均失活率仅 0.14%, 其优异的抗尿素化性能源于 N-Al 键合作用有效抑制了伯胺脱水副反应。值得注意的是, 该材料已实现吨级生产, 兼具高吸附容量与优异循环稳定性, 展现出良好的工业应用前景。

在新型载体拓展方面, Li, H.等人[18]则报道了一种基于聚乙烯亚胺功能化共价有机框架(COF)吸附剂。该团队首先合成了亚胺连接的 COF-709, 继而通过芳香亲核取代实现键氧化与多胺共价接枝。傅里叶变换红外光谱、元素分析与固态核磁共振全面表征证实了连锁氧化与胺安装过程的化学完整性。吸附

性能测试表明, 在 25℃、400 ppm CO₂ 的模拟空气中, 该材料在干燥条件下的 CO₂ 容量为 0.48 mmol/g, 在 75%相对湿度下提升至 1.24 mmol/g, 其容量与吸附速率均与环境湿度呈强正相关, 机制与固态核磁共振揭示的 CO₂ 吸附路径一致。得益于 C-S 键的化学稳定性, 多胺共价接枝于 COF 孔道内有效防止了胺损失与水解, 该材料在模拟直接空气捕集条件下经 10 次吸附-脱附循环后未见容量衰减, 展现出优异的循环稳定性。

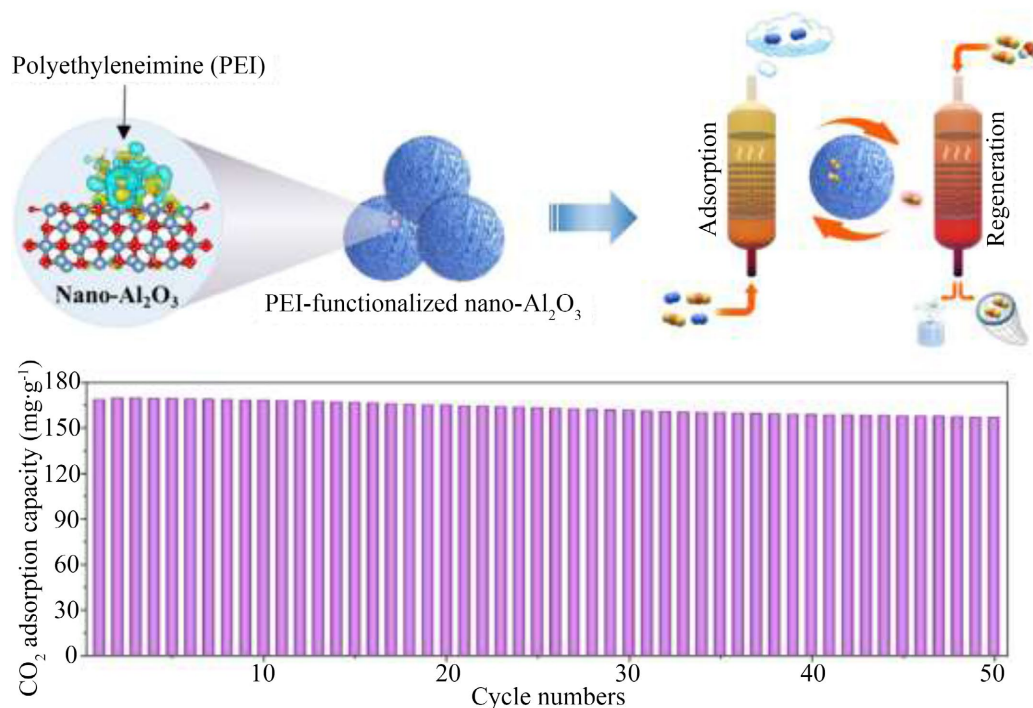


Figure 3. (A) CO₂ adsorption-regeneration test of four amine-functionalized adsorbents over 10 consecutive TSA cycles. (B) FT-IR spectra of the fresh (dash line) and post-cycling (solid line) amine-functionalized adsorbents (adsorption at 40% CO₂ + 60% Ar, 90°C, 30 min; desorption at 100% CO₂, 165°C, 15 min). (C) The formation path and stable structure of the crosslinking for 60%PEI@Al₂O₃

图 3. (A) 四种胺功能化吸附剂在连续 10 个变温吸附(TSA)循环中的 CO₂ 吸附-再生测试。(B) 新鲜(虚线)和循环后(实线)胺功能化吸附剂的 FT-IR 光谱(吸附条件: 40% CO₂ + 60% Ar, 90°C, 30 min; 脱附条件: 100% CO₂, 165°C, 15 min)。(C) 60%PEI@Al₂O₃ 交联结构的形成路径及其稳定结构

总体而言, 共价接枝策略在稳定性提升方面优势显著: 化学键的引入有效抵抗水热循环和蒸汽再生过程中的胺流失, 延长吸附剂寿命; 通过控制偶联反应, 可精确调控 PEI 的覆盖度、层厚与分布, 有利于优化孔道扩散与胺基利用率; 同时, PEI 被固定后可能以更伸展的构象存在, 减少了胺基的无效团聚, 使更多活性位点暴露于 CO₂。然而, 该策略亦面临核心挑战: 合成工艺复杂且成本较高, 通常涉及多步反应、敏感试剂(如硅烷偶联剂)及严格的无水无氧条件, 不利于规模化生产; 接枝过程可能消耗部分伯/仲胺, 降低理论吸附位点数, 同时接枝层可能堵塞微孔与较小介孔, 影响 CO₂ 传质速率; 此外, 不同载体表面化学性质差异较大, 需开发定制化接枝方案, 普适性较差。

2.3. 化学结构修饰

化学结构修饰策略直接对 PEI 分子本身进行化学改性, 通过引入特殊官能团或构建新分子结构, 以赋予材料更优异的综合性能。常用方法是将 PEI 部分胺基与长链烷基环氧、氟代化合物或芳香族酰氯反应, 以降低材料表面能、提高疏水性和抗氧化能力。以 1,2-环氧丁烷功能化为例, Choi 等人[19]通过调控

环氧丁烷与 PEI 胺基的比例, 如图 4 所示合成了系列功能化聚合物 nEB-PEI, 并负载于自制大孔二氧化硅微球上。该载体采用喷雾干燥法制备, 具有高孔容($1.7 \text{ cm}^3/\text{g}$)与优良水热稳定性。表征结果表明, 功能化反应选择性将伯胺转化为仲胺, 并引入吸电子基团与空间位阻效应, 显著降低了 CO_2 吸附热, 从而在纯 CO_2 气氛、 120°C 再生条件下实现超过 99% 的 CO_2 脱附率。在模拟烟气($15\% \text{ CO}_2$ 、 $3\% \text{ H}_2\text{O}$)的连续 90 次温度摆动吸附循环中, 优化样品 0.37EB-PEI/ SiO_2 保持 2.2 mmol/g 的高工作容量, FT-IR 分析证实其有效抑制了尿素形成与胺基氧化降解。该工艺无需昂贵模板剂与复杂纯化步骤, 已实现 20 kg 级放大制备, 并在中试流化床中展示了良好的机械稳定性与连续运行性能, 为面向实际烟气条件的胺基吸附剂设计与规模化应用提供了重要参考。

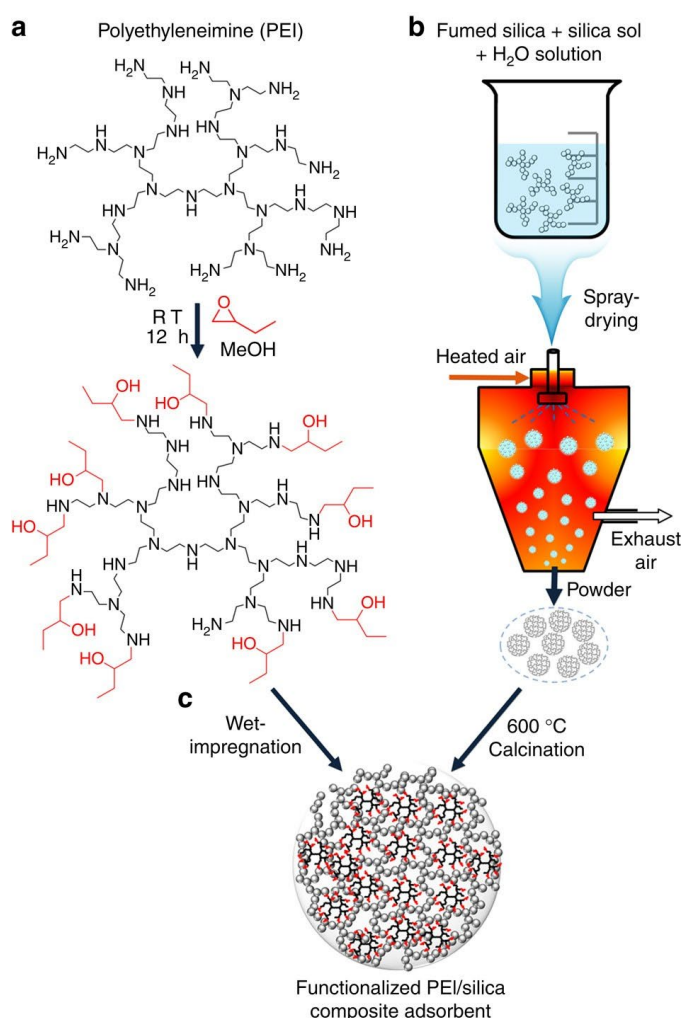


Figure 4. Synthesis of EB-PEIs-based CO_2 adsorbents

图 4. 合成 EB-PEIs 的 CO_2 吸附剂

2024 年, Shaikh 等人[20]系统研究了环氧化物及缩水甘油醚功能化 PEI 在超低浓度 CO_2 捕集(如直接空气捕获)中的性能。该工作通过将不同链长的环氧化物与缩水甘油醚 PEI 反应, 制备系列功能化聚合物, 并负载于介孔氧化铝载体。研究发现, 功能化虽略微降低了 CO_2 吸附容量, 但显著提高了材料在干燥与潮湿条件下的氧化稳定性, 尤其是当功能化侧链的碳/氧链长达到 8 个原子以上时, 抗氧化降解性能最佳。此外, 含额外醚键的缩水甘油醚功能化 PEI 表现出比环氧化物功能化样品更低的 CO_2 脱附温度, 有利于

降低再生能耗。该研究为设计兼具高稳定性与低能耗的固体胺吸附剂提供了重要参考, 强调了在超稀释 CO₂ 捕获过程中平衡吸附容量、氧化稳定性与脱附能耗的重要性。

总体而言, 化学结构修饰从分子层面解决了 PEI 的部分固有缺陷, 如提升耐候性、调节亲疏水平衡、降低再生温度, 并可与其他功能分子产生协同效应, 实现物理吸附与化学吸附的双重增益, 提升综合性能。然而, 该策略亦面临诸多挑战: 高分子改性反应通常副产物较多, 产物结构不均一, 精确控制与表征困难; 修饰反应消耗部分活性胺基, 需精细权衡引入新功能与保留 CO₂ 反应位点之间的关系; 同时, 许多改性试剂昂贵, 且新化学结构的长期热化学稳定性仍有待验证, 存在诸多不确定性因素。

2.4. 绿色合成路径

绿色合成途径旨在从源头上降低 PEI 功能化过程的环境负荷, 主要围绕以下方向展开: 其一, 尽量避免使用甲苯、DMF 等有毒有机溶剂, 探索在水相中实现 PEI 的负载或接枝反应; 其二, 采用木质纤维素、壳聚糖等生物质衍生的多孔碳或硅材料作为载体, 并辅以生物基或低毒性交联剂与改性剂; 其三, 开发室温或近室温条件下的功能化方法, 以降低合成过程的能耗[21]-[23]。

He 等人[24]报道了一种绿色、简便的一步法策略, 用于制备聚乙烯亚胺修饰氧化石墨烯(PEI-GO)颗粒。该方法以水为唯一溶剂, 通过注射泵将 GO 水溶液滴入 PEI 水溶液中, 于液-液界面即时形成均匀凝胶颗粒, 并采用冷冻干燥技术保持其多孔结构完整, 全程避免了有机溶剂的使用与高温处理。所制 PEI-GO 材料在 75℃ 下 CO₂ 吸附容量最高达 128.1 mg/g, 经 5 次循环后容量保持率超过 91%, 展现出良好的可再生性与稳定性。该合成工艺条件温和、步骤简单、溶剂绿色且颗粒形貌可控, 符合绿色化学中减少有害物质使用、采用安全溶剂的原则, 为开发环境友好的固态胺基 CO₂ 捕集材料提供了新途径。

同年, Wang 和 Okubayashi [25]针对传统物理浸渍法中 PEI 堵塞孔道导致比表面积严重下降的问题, 提出了一种基于戊二醛交联的聚乙烯亚胺-纤维素复合气凝胶(PCC)。该研究通过溶胶-凝胶、水解及交联反应构筑三维多孔气凝胶结构, 以戊二醛为交联剂将 PEI 共价固定于纤维素骨架。所得材料在氮含量高达 17.4% 时仍保持 234.2 m²/g 的比表面积, 在 25℃、纯干 CO₂ 条件下吸附容量达 2.31 mmol/g, 吸附过程符合准二级动力学模型, 且受表面扩散与颗粒内扩散共同控制。经 10 次吸附-脱附循环后, 材料仍保持 93% 的初始吸附容量, 表现出良好的循环稳定性。该工作表明, 通过化学交联构建多孔有机骨架可同时实现高胺负载、高比表面积与良好的结构稳定性, 为高效可再生固体胺吸附剂的开发提供了新思路。

2020 年, Wang 等人[26]则报道了一种基于脱木质素木材负载 PEI 的高强度介孔复合材料。该研究通过 NaClO₂ 处理天然木材去除木质素, 得到具有分级介孔结构的脱木质素木材载体(比表面积 44.3 m²/g), 随后采用湿浸渍法将 PEI 负载于木材孔道中。当 PEI 负载量为 49 wt% (样品 P49) 时, 材料在 120℃ 下 CO₂ 吸附容量达 2.96 mmol/g, CO₂/N₂ 理想选择性高达 114, 且循环 10 次后仍保持 82% 的初始吸附容量。机理研究表明, 低 PEI 负载时吸附以物理吸附为主, 高负载时则转变为化学吸附主导, 符合准二级动力学模型。此外, 由于 PEI 与纤维素羟基间的氢键作用, P49 的杨氏模量高达 756 MPa, 显著优于文献中多数纤维素基多孔材料。该工作为开发兼具高选择性、高吸附容量与优异机械性能的生物基 CO₂ 吸附剂提供了新思路。

总体而言, 绿色合成途径在环境友好性方面优势显著: 水相合成与生物质载体的使用有效减少了合成过程对环境 and 操作人员的危害, 同时降低了材料制备环节的碳足迹, 是未来实现 CCUS 技术真正“绿色化”的关键一环。然而, 该策略亦面临诸多挑战: 生物质载体的孔径、结构规整度与纯度通常不及合成材料, 可能制约吸附剂的最终性能; 同时, 相关研究尚处于起步阶段, 工艺优化与放大规律仍有待深入探索。

3. 总结与展望

综上所述, PEI 基固态胺 CO₂ 吸附剂的性能优化已从单一物理负载演进为物理负载、共价接枝、化学结构修饰与绿色合成协同并用的多策略体系。物理负载操作简便、载体适配广、载量高, 但面临胺流失、扩散受限及导热差等瓶颈; 共价接枝以化学键锚定 PEI, 显著提升循环稳定性和抗热老化能力, 但工艺复杂、成本高, 且可能降低孔容与胺基利用率; 化学结构修饰从分子层面调控 PEI 功能, 利于降低再生能耗、增强抗氧化性和亲疏水平衡, 但需在引入新基团与保留 CO₂ 反应位点间精细权衡; 绿色合成(水相、生物质载体、室温工艺)降低碳足迹与安全风险, 但生物质基材料的结构规整度与长期稳定性尚不及传统载体, 放大技术待突破。因此, 未来开发多级孔结构载体(如介孔-大孔复合), 结合 PEG 等助剂共浸渍, 同时提升胺分散性、传质效率与热导率, 从物理负载层面突破扩散与热管理瓶颈。

展望未来, 可从以下方向深入探索: 一是载体工程与添加剂协同, 开发多级孔结构(如介孔-大孔复合)并引入 PEG 等助剂, 以改善胺分散性、传质效率和热导率, 从物理负载端破解扩散与热效应难题; 二是可控接枝与位点保护, 设计动态共价键或可逆锚定方式, 在保证接枝牢固的同时减少孔道堵塞, 并结合接枝后胺基保护-脱保护技术提高活性位点利用率; 三是分子设计与功能集成, 借助计算模拟预测最优改性路径, 定向引入抗氧化基团(如受阻酚)或调控仲/叔胺比例, 实现低再生焓与高稳定性的平衡; 四是生物质载体结构强化与连续化工艺, 通过模板法或原位组装提升孔隙规整性, 并发展挤出成型、喷雾干燥等规模化制备技术, 推动绿色合成材料从实验室走向实际应用。此外, 建议同步开展全生命周期评价(LCA)与多策略耦合研究, 系统比较不同路线的综合能耗与碳排放, 为工业化选型提供数据支撑。

参考文献

- [1] IEA (2024) CO₂ Emissions in 2023. IEA. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
- [2] Inner Mongolia University, *et al.* (2026) Global CO₂ Capture to Fall Short of 530 Million Tons Even with Accelerated Technological Development. Global Energy Association. <https://globalenergyprize.org/en/2026/04/06/global-co2-capture-to-fall-short-of-530-million-tons-even-with-accelerated-technological-development/>
- [3] Zentou, H., Hoque, B., Abdalla, M.A., Saber, A.F., Abdelaziz, O.Y., Aliyu, M., *et al.* (2025) Recent Advances and Challenges in Solid Sorbents for CO₂ Capture. *Carbon Capture Science & Technology*, **15**, Article ID: 100386. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100386>
- [4] Raeisi-Chehraz, Z., Bahmanzadegan, F., Hemmati, A. and Ghaemi, A. (2026) A Comprehensive Review on Advanced Zeolite-Polymer Architectures for High-Performance CO₂ Capture. *Carbon Capture Science & Technology*, **19**, 100627. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2026.100627>
- [5] Al-Absi, A.A., Ogungbenro, A.E., Benneker, A.M. and Mahinpey, N. (2024) Review of Polyethylenimine through Ring-Opening Polymerization Reactions and Its Application in CO₂ Capture. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**, Article ID: 112739. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112739>
- [6] Nam, S., Kim, T. and Hwang, J. (2025) Controlling Host-Guest Interactions in Poly(Ethylenimine) Impregnated Silica Adsorbents for CO₂ Capture. *International Journal of Energy Research*, **2025**, Article ID: 5807422. <https://doi.org/10.1155/er/5807422>
- [7] Varghese, A.M. and Karanikolos, G.N. (2020) CO₂ Capture Adsorbents Functionalized by Amine-Bearing Polymers: A Review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **96**, Article ID: 103005. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103005>
- [8] Kaur, J., Singh, S.K., Gupta, R.K., Bhunia, H., Dubey, K.A. and Chaudhari, C.V. (2025) Recent Developments in Polymeric Adsorbents for CO₂ Capture. *ChemistrySelect*, **10**, e202405495. <https://doi.org/10.1002/slct.202405495>
- [9] Chen, Y., Lin, G. and Chen, S. (2020) Preparation of a Solid Amine Microspherical Adsorbent with High CO₂ Adsorption Capacity. *Langmuir*, **36**, 7715-7723. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03694>
- [10] Ji, Z., Jayakumar, S., Limpo, C.M.A., Madhav, A., Trubyanov, M., Zhang, P., *et al.* (2026) 3D Interconnected Pore Networks Enable Superior Volumetric CO₂ Uptake in Amine-Functionalized Nanoporous Carbon for Direct Air Capture. *Carbon Capture Science & Technology*, **19**, Article ID: 100600. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2026.100600>
- [11] Sung, S. and Suh, M.P. (2014) Highly Efficient Carbon Dioxide Capture with a Porous Organic Polymer Impregnated

- with Polyethylenimine. *Journal of Materials Chemistry A*, **2**, 13245-13249. <https://doi.org/10.1039/c4ta02861a>
- [12] Meng, Y., Ju, T., Meng, F., Han, S., Song, M. and Jiang, J. (2021) Insights into the Critical Role of Abundant-Porosity Supports in Polyethylenimine Functionalization as Efficient and Stable CO₂ Adsorbents. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 54018-54031. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c17132>
- [13] Li, W., Fu, D. and Pan, J. (2023) Adsorption of CO₂ in Flue Gas by Polyethylenimine-Functionalized Adsorbents: Effects of the Support Morphology and Dispersion Mode of Amines. *Energy & Fuels*, **37**, 15879-15895. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c02384>
- [14] Moon, H.J., Carrillo, J.M.Y., *et al.* (2024) Underlying Roles of Polyol Additives in Promoting CO₂ Capture in PEI/Silica Adsorbents. *ChemSusChem*, **17**, e202400967.
- [15] Kassab, H., Maksoud, M., Aguado, S., Pera-Titus, M., Albela, B. and Bonnevot, L. (2012) Polyethylenimine Covalently Grafted on Mesoporous Silica for CO₂ Capture. *RSC Advances*, **2**, 2508-2516. <https://doi.org/10.1039/c2ra01007k>
- [16] Shi, H., Zhang, H., Gao, Y., Yang, J. and Chen, J. (2024) Co-Grafting of Polyethyleneimine on Facilely Synthesized Mesoporous P(DVB-D) for Highly Effective CO₂ Adsorption and Enhanced Oxidation Resistance. *Separation and Purification Technology*, **345**, Article ID: 126983. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126983>
- [17] Shen, X., Yan, F., Zeng, Z., Wang, P., Xie, F., Sun, X., *et al.* (2024) Efficient and Stable CO₂ Capture Using a Scalable and Spontaneous Cross-Linking Amine-Functionalized Nano-Al₂O₃ Adsorbent. *Journal of Materials Chemistry A*, **12**, 2697-2707. <https://doi.org/10.1039/d3ta06456e>
- [18] Li, H., Zhou, Z., Ma, T., Wang, K., Zhang, H., Alawadhi, A.H., *et al.* (2024) Bonding of Polyethylenimine in Covalent Organic Frameworks for CO₂ Capture from Air. *Journal of the American Chemical Society*, **146**, 35486-35492. <https://doi.org/10.1021/jacs.4c14971>
- [19] Choi, W., Min, K., Kim, C., Ko, Y.S., Jeon, J.W., Seo, H., *et al.* (2016) Epoxide-Functionalization of Polyethyleneimine for Synthesis of Stable Carbon Dioxide Adsorbent in Temperature Swing Adsorption. *Nature Communications*, **7**, Article No. 12640. <https://doi.org/10.1038/ncomms12640>
- [20] Shaikh, S., Didas, S.A., Sakwa-Novak, M.A. and Jones, C.W. (2024) Glycidyl Ether-Functionalized Poly(Ethylenimine)-Impregnated Sorbents for CO₂ Capture from Ultradilute Sources. *ACS Applied Polymer Materials*, **6**, 9110-9119. <https://doi.org/10.1021/acsapm.4c01454>
- [21] Chen, S., Chen, B., Wang, X., Liu, H. and Chen, S. (2025) Fabrication of a Solid Amine Microspherical Adsorbent with High CO₂ Adsorption Capacity via Water-in-Water Emulsion Templating. *ACS Applied Polymer Materials*, **7**, 923-931. <https://doi.org/10.1021/acsapm.4c03328>
- [22] Zhang, C., Zhang, D., Zhang, X., Tian, Y. and Wang, L. (2024) Core-Membrane Microstructured Amine-Modified Mesoporous Biochar Templated via ZnCl₂/KCl for CO₂ Capture. *Frontiers in Energy*, **18**, 863-874. <https://doi.org/10.1007/s11708-024-0964-2>
- [23] Andreoli, E. and Barron, A.R. (2015) Effect of Spray-Drying and Cryo-Milling on the CO₂ Absorption Performance of C₆₀ Cross-Linked Polyethyleneimine. *Journal of Materials Chemistry A*, **3**, 4323-4329. <https://doi.org/10.1039/c4ta06936f>
- [24] He, Y., Xia, Y., Zhao, J., *et al.* (2019) One-Step Fabrication of PEI-Modified GO Particles for CO₂ Capture. *Applied Physics A*, **125**, Article No. 160. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2435-x>
- [25] Wang, C. and Okubayashi, S. (2019) Polyethyleneimine-Crosslinked Cellulose Aerogel for Combustion CO₂ Capture. *Carbohydrate Polymers*, **225**, Article ID: 115248. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115248>
- [26] Wang, C., Biswas, S.K. and Okubayashi, S. (2020) Polyethylenimine-Impregnated Mesoporous Delignified Wood with High Mechanical Strength for CO₂/N₂ Selective Adsorption. *ACS Applied Nano Materials*, **3**, 5499-5508. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c00799>
- [27] Danckwerts, P.V. (1979) The Reaction of CO₂ with Ethanolamines. *Chemical Engineering Science*, **34**, 443-446. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(79\)85087-3](https://doi.org/10.1016/0009-2509(79)85087-3)