

amine CO₂ capture absorption

文献综述报告

近5年论文

生成时间：2026年04月17日

一、研究背景

碳捕集与封存（CCS）技术是应对全球气候变化、减少温室气体排放、实现低碳未来的核心手段之一。在众多碳捕集方法中，基于胺类溶剂的化学吸收法因其技术成熟度高、适用性广而被视为当前最具代表性的燃烧后 CO₂捕集（PCC）主流技术。该方法利用烟气与胺溶液在吸收塔中充分接触，CO₂与胺发生可逆化学反应被吸收；饱和的富液随后进入解吸塔（汽提塔），通过加热释放出高浓度 CO₂并使胺溶液再生循环使用。单乙醇胺（MEA）作为基准溶剂被广泛采用，但其存在固有缺陷：再生所需热量大（通常超过 3.5 GJ/t CO₂）、易氧化降解、对设备腐蚀性强，显著推高了运行成本，制约了大规模工业部署。为克服上述瓶颈，研究界从多个方向展开了系统性探索。在溶剂配方层面，研究者通过混合伯胺、仲胺、叔胺、空间位阻胺及促进剂（如哌嗪 PZ）的方式，尝试综合各类胺的吸收速率快和再生能耗低的优点；相变吸收剂、深共晶溶剂（DES）和非水溶剂体系作为新型溶剂路线也正受到广泛关注。在过程强化层面，热集成汽提、富液分流、低温解吸以及利用废弃矿物（如飞灰）进行矿化再生等策略被提出并验证，显示出显著降低能耗的潜力。在建模与优化层面，速率基模型、热力学状态方程（如 SAFT- γ Mie、CPA、电解质 NRTL）、机器学习方法（ANN、RSM）和分子动力学模拟被广泛用于指导溶剂筛选和工艺参数优化。与此同时，低温捕集和固体吸附等替代技术也在持续发展中，但胺基液相吸收在近期仍具有综合优势。总体而言，当前领域的核心矛盾在于：高吸收性能与低再生能耗之间天然存在权衡，如何同时实现高 CO₂负荷、快吸收速率和低解吸能耗，是驱动该领域持续创新的根本动力。

核心干货提炼

1. 【最核心的权衡：吸得紧 vs 放得快】想象用强力胶水和普通双面胶捕蚊子——强力胶粘得牢，但你想把蚊子取出来时也很费劲；双面胶好撕，但粘不住飞快的蚊子。胺类溶剂面临同样的两难：伯胺（如 MEA）与 CO₂ 反应快、吸得紧，但解吸时也需要大量热量来“撬开”氨基甲酸酯键；叔胺（如 MDEA）解吸容易、能耗低，但吸收速率太慢。这就是该领域最根本的权衡关系。基于此，论文 5 的技术经济分析给出了迄今最清晰的量化结论：PZ/MDEA 体系以 31.43 \$/t CO₂ 的成本在三种混合胺方案中胜出，而纯 MEA 基工艺成本更高；论文 35 的模拟数据则显示，三元混合溶剂 5%TETA+5%PZ+20%MDEA 比工业 MEA 溶剂的捕获成本低 27.33%。核心逻辑是：用快反应胺（PZ、TETA）负责加速吸收，用低焓胺（MDEA）负责降低再生热，分工协作打破单一溶剂的瓶颈。

2. 【混合胺配方推荐：三元胺体系是性价比最高的升级路径】现有文献普遍证明，从单胺→双胺→三胺是一条可验证的性能提升路径。这背后的原理是“功能互补”——不同胺分子在溶液中扮演不同角色：快反应胺负责抓住 CO₂，空间位阻胺负责把 CO₂“松散”地保存（便于释放），促进剂负责在两者之间“传递”CO₂（哌嗪的穿梭效应，论文 10）。具体推荐：对于水溶液体系，论文 2 确认 MEA-2DMA2M1P-AMP（1:2:2）三胺体系的 CO₂ 平衡溶解度和解吸性能均优于 5 M MEA 基准；论文 30 的填料塔实验显示，AMP-PZ-MEA（0.95:3.55:1.5，6M）和（0.95:3.55:2.5，7M）的整体传质系数 KG_{av} 分别比 5M MEA 高约 1.5 倍和 2.5 倍，CO₂ 去除效率分别提升 17.34% 和 17.63%；论文 12 则表明，0.3+2+2 mol/L MEA+BEA+AMP 三元溶剂结合固体催化剂的再生热负荷仅为 5M MEA 的 32.9%。

3. 【非水溶剂与相变体系：能耗压缩的“新赛道”，但黏度是拦路虎】用非水有机溶剂（如 PEG200、DMF、磺胺等）替代水作为溶剂基质，好比把水换成更“懒”的液体——水沸点低，加热驱赶 CO₂ 时大量蒸汽也被带走浪费，而有机溶剂沸点高、蒸发损失小，解吸能耗天然就低。但代价是有机溶剂往往更黏稠，影响传质效率，甚至结垢堵管。论文 6 报告的 DA2MP/PrOH+AMP 非水吸收剂总再生能耗为 1.86 GJ/t

CO₂，仅为 MEA 基溶液的 50.27%，循环 4 次后保持 97%初始容量；论文 9 的 MEA/PEG200 解吸能耗比 MEA/H₂O 降低 33%，解吸速率达 838 mg CO₂/(L·min)；论文 17 的 2-PE/APZ/DMF 再生热负荷低至 1.694 KJ/g CO₂，比 30 wt% MEA 降低 55.89%；论文 40 的 PZMN-12 (NMF 基) 结合富液分流工艺后能耗降至 1.67 GJ/t CO₂。黏度方面，论文 18 确认 DPA 溶剂加载 CO₂后黏度仅 3.28 mPa·s，论文 11 的 AMP-EG-DMF(4-3)吸收速率比 30 wt% AMP 水溶液提升 64.1%，比 30 wt% MEA 降能 46.30%。

4. 【再生工艺的替代路径：矿化固碳可实现近常温再生，但速率仍是瓶颈】传统汽提再生需要 120°C 以上的高温蒸汽，是整个 PCC 系统能耗最高的环节。一个反常识的思路是：与其"赶走"CO₂再生胺，不如让 CO₂与固体矿物（飞灰、废盐水）直接反应生成碳酸盐，同时把胺"挤"出来。这既固定了 CO₂，又再生了溶剂，近乎零额外能耗。论文 3 的实验验证显示，在 40°C、1 atm 近环境条件下，MDEA 约 15 小时可完全矿化再生，生成物含约 60%碳酸盐；论文 7（集成吸收-矿化 IAM 工艺）表明碳酸氢盐比氨基甲酸盐更利于化学解吸，AMP 因此表现出最佳循环性能；论文 39 的实验显示，15 wt% AMP+5 wt% MEA 混合剂在 43 分钟内将约 87%的吸收 CO₂转化为碳酸盐。不过，MEA 矿化再生需 6.5 天才达 80%（论文 3），速率远低于传统汽提，规模化应用仍需突破。

5. 【数字化工具的价值：机器学习和分子模拟已成为配方筛选的核心手段】面对胺类配方空间的爆炸性增长，靠纯实验逐一筛选已不现实——就像在图书馆找一本书，与其一排一排翻，不如先用目录定位。机器学习模型（ANN/RSM）和分子模拟（MD、量子化学）正扮演这个"目录"的角色。论文 8 的 ANN 模型对 MEA-PZ 体系 CO₂传质通量的预测 R²达 0.9974，均方误差 5.2×10⁻⁴，优于 RSM（R²=0.9723）；论文 20 对 MDEA-PZ 体系的 ANN 预测 R²达 0.99924。论文 34 的分子动力学计算给出了 11 种胺的氨基甲酸盐键断裂能排序（MEA 再生能最高，TMPAD 最低），为低能耗溶剂的理性设计提供了分子级依据；论文 16 的 SAFT-γ Mie 群贡献框架实现了对多类型胺水溶液+CO₂体系的热力学一致预测，是迄今覆盖范围最广的筛选平台。这

些工具大幅压缩了从配方设计到工艺验证的周期，现有文献已形成较为成熟的方法论，值得新研究优先采用。

二、论文分类对比表

论文标题	年份	主要工作	关键结论/数据	来源
▶ 溶剂配方研究（14篇）				
An energy-efficient cyclic amine system developed for carbon capture from both flue gas and air	2024	开发基于 2-PE/APZ 的新型 CO ₂ 吸收剂，通过实验和 MD 模拟评估其从烟气和空气中捕获 CO ₂ 的性能及机制。	CO ₂ 吸收负荷 1.004 mol/mole；DAC 测试 24 小时内捕获空气中 87.31%的 CO ₂ ；2-PE/APZ/DMF 再生热负荷 1.694 KJ/g CO ₂ ，比 30 wt% MEA 降低 55.89%	
Nonaqueous Mixed Amine CO ₂ Capture Technology Based on N-Methylformamide	2024	开发基于 N-甲基甲酰胺（NMF）的非水混合胺溶液用于 CO ₂ 捕获，评估七种胺基和混合胺溶剂的吸收解吸性能。	PZMN-12 在 110°C 下解吸率 99.76%；CO ₂ 吸收活化能 44.013 kJ/mol，比 MEA 低 25.06%；解吸活化能 135.816 kJ/mol；结合 RSSF+LVC 工艺后能耗降至 1.67 GJ/t CO ₂	
Investigation of the improvement of the CO ₂ capture performance of aqueous amine sorbents by switching from dual-amine to trio-amine systems	2023	通过将双胺体系转换为三胺体系，研究含 2DMA2M1P、MEA 和 AMP 的三胺水溶液对 CO ₂ 捕获性能的提升效果。	文中无具体数据（定性结论：所有三胺混合物 CO ₂ 平衡溶解度和解吸性能均优于 5 M MEA；MEA-2DMA2M1P-AMP (1:2:2) 为最佳候选体系）	
Development of novel AMP-based absorbents for efficient CO ₂ capture with low energy consumption through modifying the electrostatic potential	2023	通过修改静电势开发新型 AMP 基非水吸收剂，结合实验和理论研究验证其高效低能耗 CO ₂ 捕获性能。	AMP-EG-DMF(4-3)最大 CO ₂ 吸收速率 9.91 g-CO ₂ /(kg-soln.·min.)；吸收容量 122 g-CO ₂ /(kg-soln.)；吸收速率比 30 wt% AMP 水溶液提高 64.1%，吸收容量提高 28.4%；能耗比 30 wt% MEA 降低 46.30%	
Experimental investigation of	2023	实验考察以水作为低粘度组	添加 5%和 10%水可将 DESs 粘度降低高达 25%；ChCl-MEA(1:6)+5%水粘度降低约 5.6% (51.71→48.8 mPa·s)；ChCl-	

novel ternary amine-based deep eutectic solvents for CO ₂ capture		分的新型三元胺基深共晶溶剂的物理化学性质、热稳定性和 CO ₂ 吸收能力，并用 COSMO-RS 预测 CO ₂ 溶解度。	DEA(1:6)+5%水粘度降低 23.4% (567→434.14 mPa·s)；MEA 基三元 DES CO ₂ 吸收能力 0.155–0.170 g CO ₂ /g DES；ChCl-MEA(1:6) DES 吸收容量 0.17 g/g；30 wt%水溶液 MEA 吸收容量 0.12 g CO ₂ /g solvent；热分解温度 125°C；ChCl-MEA(1:6) DES 熔点 4°C	
Experimental Analysis of Reaction Heat of CO ₂ Absorption of Phase Change Absorber AEP-DPA at Low Partial Pressure	2023	建立并验证 CO ₂ 吸收和解吸反应热计算模型，实验分析 AEP-DPA 相变吸收系统在不同条件下的反应热。	AEP-DPA 系统吸收热降低率超过 35%；再生热降低率超过 31%；最佳条件：AEP-DPA 配比 6:4，吸收温度 40°C	
Capture of CO ₂ Using Mixed Amines and Solvent Regeneration in a Lab-Scale Continuous Bubble-Column Scrubber	2023	使用多种混合胺溶剂在实验室规模连续鼓泡塔洗涤器中进行 CO ₂ 捕获实验，结合田口设计优化性能并测试溶剂再生。	最优条件吸收效率 EF=100%；吸收速率 RA=19.96×10 ⁻⁴ mol/s·L；KGa=1.2312 1/s；吸收因子 φ=0.6891 mol-CO ₂ /L·mol-溶剂；溶剂再生最低能量温度 110°C；田口法将实验次数从 15,625 次减至 25 次	
Comparative mass transfer performance of CO ₂ absorption using highly-concentrated AMP-PZ-MEA ternary amines solvent	2023	在实验室规模 CO ₂ 吸收填充塔中，比较高浓度三元胺溶剂 AMP-PZ-MEA 与基准 5M MEA 的传质系数和 CO ₂ 去除效率。	操作温度 303 K；CO ₂ 浓度 12%；CO ₂ 吸收负荷 0.25 mol CO ₂ /mol 胺；三元胺 6M 和 7M；推荐配方 0.95:3.55:1.5(6M)的 KGav 比 5M MEA 高约 1.5 倍，CO ₂ 去除效率高 17.34%；0.95:3.55:2.5(7M)的 KGav 高约 2.5 倍，CO ₂ 去除效率高 17.63%	
Investigating the Performance of Ethanolamine and Benzylamine Blends as Promising Sorbents for Postcombustion CO ₂ Capture through ¹³ C NMR Speciation and Heat of CO ₂ Absorption Analysis	2022	评估 MEA 和 苄胺 (BZA) 水溶液混合物作为燃后 CO ₂ 捕获吸附剂的性能，测定 CO ₂ 吸收负荷、速率和吸收热，利用 ¹³ C NMR 分析溶液物种。	文中无具体数据 (定性结论：最终吸收负荷 BZA/MEA 1/2 > 1/1 > 2/1；所有混合物 CO ₂ 吸收热与单一胺相当或更高)	
Low-Viscosity Nonaqueous Sulfolane-Amine-Methanol	2022	使用 ATR-FTIR 监测 CO ₂ 在六种新型胺-环丁酮-甲醇混合溶剂	DPA 完全形成单甲基碳酸酯 (MMC)；DPA 的 CO ₂ 捕获容量 0.88 molCO ₂ /mol 胺；循环容量 0.48 molCO ₂ /mol 胺；DPA 加载 CO ₂ 后粘度 3.28 mPa·s	

Solvent Blend for Reversible CO ₂ Capture		中的吸收-解吸性能，并对 DPA 溶剂进行 NMR 物种确认和粘度分析。		
Regulatory mechanism of a novel non-aqueous absorbent for CO ₂ capture using 2-amino-2-methyl-1-propanol	2022	开发以 AMP 为调节剂的新型非水吸收剂用于 CO ₂ 捕获，研究其降低粘度和能耗的调控机制。	CO ₂ 吸收负荷 0.95 mol·mol ⁻¹ ；饱和溶液粘度 15.00 mPa·s；4 次再生循环后保持 97%初始吸收容量；总再生能耗 1.86 GJ/t CO ₂ ，为 MEA 基溶液的 50.27%	
Research on CO ₂ Capture Performance and Absorption Mechanism of High-Load Biphasic Solvent TETA/1DMA2P	2022	研究不同比例 TETA 和 1DMA2P 组成的双相溶剂的 CO ₂ 吸收性能，采用鼓泡吸收法进行实验。	富液相体积比 MEA 溶液低 20%；CO ₂ 吸收负荷 0.656 mol CO ₂ /mol 总胺；最佳脱附温度 393.15 K；总胺浓度 4 mol/L	
Nonaqueous MEA/PEG200 Absorbent with High Efficiency and Low Energy Consumption for CO ₂ Capture	2021	开发有机 MEA/PEG200 吸收剂，系统研究其 CO ₂ 吸收速率和容量、解吸速率、再生效率和热稳定性。	3M MEA/PEG200 最高解吸速率 838 mgCO ₂ /(L·min)；循环稳定性偏差<4%；3M MEA/H ₂ O 解吸速率 447 mgCO ₂ /(L·min)；MEA/PEG200 解吸能耗比 MEA/H ₂ O 降低 33%；浸泡 400 天后对碳钢仅表现出轻微腐蚀	
Selection of Mixed Amines in the CO ₂ Capture Process	2021	以 MEA 为基础溶剂混合 DIPA、TEA、AMP 和 PZ，在鼓泡塔中采用田口法设计实验，探索混合胺在 CO ₂ 捕获中的吸收性能。	最佳 EF=100%；最佳 RA=30.69×10 ⁻⁴ mol/s·L；最佳 KGa=1.540 1/s；最佳洗涤因子 φ=0.269；各参数中气体流量 D 和混合胺浓度 E 影响最重要	
► 过程模拟与技术经济分析 (8 篇)				
Power-to-heat amine-based post-combustion CO ₂ capture system with solvent storage utilizing fluctuating electricity prices	2024	提出带溶剂储存罐的电源-供热式燃烧后 CO ₂ 捕集系统，通过数学建模和成本计算评估其盈利能力。	CO ₂ 汽提和压缩过程的吨 CO ₂ 能耗平均成本降低约 30%；净现值增加约 15%；需要 350-400 美元/吨 CO ₂ 的 CO ₂ 价格；电厂容量系数低于 30%时仍可产生正净现值	
Optimization of amine-based	2024	通过 Aspen-Hysys 模拟、	CO ₂ 去除效率超过 98%；最低能耗 6035 KW；最少吸收塔级数 16	

carbon capture: Simulation and energy efficiency analysis of absorption section		响应面方法和优化, 研究胺基吸收剂在燃烧后碳捕获中吸收段的 CO ₂ 去除效率和能耗, 优化操作参数。		
Modeling and optimization of CO ₂ capture into mixed MEA-PZ amine solutions using machine learning based on ANN and RSM models	2023	使用人工神经网络 (ANN) 和响应面法 (RSM) 对混合 MEA-PZ 胺溶液中 CO ₂ 传质通量进行建模和优化。	ANN 模型最大 R ² 值 0.9974; RSM 模型最大 R ² 值 0.9723; ANN 模型均方误差 5.2×10 ⁻⁴	
Comparative techno-economic analysis of CO ₂ capture processes using blended amines	2023	对 MEA/MDEA、PZ/MEA、PZ/MDEA 三种混合胺溶剂进行工艺模拟和技术经济分析, 评估其在钢铁厂碳捕集中的性能。	PZ/MDEA 工艺成本最低 31.43 \$/t CO ₂ ; 最佳操作条件: 贫溶剂 CO ₂ 摩尔负荷 $\alpha_{lean}=0.15$, 汽提塔压力 P=1.25 bar	
Mixed MDEA-PZ amine solutions for CO ₂ capture: Modeling and optimization using RSM and ANN approaches	2023	利用 ANN 和 RSM 对 MDEA-PZ 混合胺溶液 CO ₂ 传质通量进行建模和优化。	ANN 最大 R ² 值 0.99924; RSM 最大 R ² 值 0.9663; 均方误差 5.2×10 ⁻⁴	
A comparative study of polyamine and piperazine as promoter for CO ₂ absorption performance in aqueous methyldiethanolamine blend system	2023	通过 DWSIM 软件对 430 MW 发电厂数据模拟, 比较 PZ、TETA 与 MDEA 混合及三元溶剂的 CO ₂ 吸收性能和能耗, 进行技术经济评估。	5%TETA+5%PZ+20%MDEA 溶剂每吨 CO ₂ 捕获成本比工业 MEA 低 27.33%; 比 10%PZ+20%MDEA 低 1.56%	
Rate-Based Absorption Modeling for Postcombustion CO ₂ Capture with Additively Manufactured Structured Packing	2021	开发并验证基于速率的模型框架, 用于模拟和预测胺基溶剂在增材制造结构化填料中进行燃烧后 CO ₂ 捕获的传质传热现象。	文中无具体数据 (定性结论: 模型准确预测 CO ₂ 平衡分压、离子形态、捕获量、温度分布和溶剂组成; 成功预测增材制造填料因内部冷却带来的捕获性能提升)	

Simulation and Cost Optimization of different Heat Exchangers for CO ₂ Capture	2021	对水泥工业烟气 85% CO ₂ 吸收解吸过程中不同热交换器进行模拟, 并针对贫/富液热交换器进行成本优化。	最低 CO ₂ 捕集成本 57.9 €/t CO ₂ (垫片式板式换热器, ΔT _{min} =5°C); 基准 U 型管壳管换热器 CAPEX 97.5 百万欧元; G-PHE 工厂投资成本 72.6 百万欧元; ΔT _{min} =5°C 时再沸器热量 3.83 GJ/t CO ₂ , ΔT _{min} =20°C 时 4.67 GJ/t CO ₂ ; 基准案例 CO ₂ 捕集成本 61.9 €/t CO ₂	
▶ 再生工艺与能耗优化 (5 篇)				
Pilot plant results of amine-based carbon capture with heat integrated stripper	2024	在两座电厂的移动中试工厂使用 30% MEA 溶剂, 实验验证热集成解吸塔 (HIS) 对胺基 CO ₂ 捕集过程的强化效果。	文中无具体数据	
Energy-Efficient Amine Regeneration for Absorption-Based Carbon Capture: Kinetic Studies for CO ₂ Mineralization	2024	研究通过飞灰矿化替代传统蒸汽汽提实现胺溶液节能再生, 评估伯胺和叔胺的矿化再生性能。	近环境条件 40°C、1 atm; 胺浓度 15 wt%; MDEA 约 15 小时内完全再生; MEA 在 6.5 天内达到 80%再生; 再生起始速率 0.003 M/hour; MEA 矿化后重量增加 24%; MDEA 矿化后重量增加 30%; 沉淀物含约 60%碳酸盐	
Development of CO ₂ Absorption Using Blended Alkanolamine Absorbents for Multicycle Integrated Absorption-Mineralization	2023	探讨在标准操作条件下 (20-25°C、1 atm) 使用混合醇胺吸收剂改进多循环集成吸收-矿化中 CO ₂ 吸收的可行性, 评估吸收性能和碳酸盐生产。	第四循环中, 15 wt% AMP+5 wt% MEA 混合吸收剂在 43 分钟内将约 87%的吸收 CO ₂ 转化为沉淀碳酸盐; 降解效率约 45%	
An Integrated Absorption-Mineralization Process for CO ₂ Capture and Sequestration: Reaction Mechanism, Recycling Stability, and Energy Evaluation	2021	提出集成吸收-矿化 (IAM) 工艺, 利用半干法脱硫渣对胺溶剂捕获的 CO ₂ 进行解吸和矿化, 研究四种典型胺溶剂的工作容量、循环稳定性和再生能力。	文中无具体数据 (定性结论: 碳酸氢盐比氨基甲酸盐更利于 CO ₂ 化学解吸; AMP 因快速吸收速率和高解吸效率表现出最佳循环性能)	
Evaluating Energy-Efficient Solutions of	2021	在 MEA+BEA+AMP 三元溶剂中结合异相酸	最优配比 0.3+2+2 mol/L MEA+BEA+AMP; 相对热负荷为 5M MEA 的 32.9%, 为 2+2M BEA+AMP 的 66.5%; CO ₂ 吸收 40°C, 解吸 90°C	

CO ₂ Capture within Tri-solvent MEA+BEA+AMP within 0.1+2+2–0.5+2+2 mol/L Combining Heterogeneous Acid–Base Catalysts		碱催化剂，评估 CO ₂ 捕集能效解决方案，研究五种三元溶剂组成与各种催化剂的组合。		
► 反应机理与热力学建模 (11 篇)				
Open access, thermodynamic ally consistent, electrolyte NRTL model for piperazine, AMP, water, CO ₂ systems on Aspen Plus	2024	在 Aspen Plus 上开发开放获取、热力学一致且经过验证的汽液平衡模型，用于模拟 CO ₂ 在哌嗪活化 AMP 水溶液中的吸收。	总胺浓度 30–50 wt%；AMP/PZ 摩尔比 0.46–23.1；CO ₂ 负荷 0.04–1.07 mol CO ₂ /mol 胺；温度 20–160°C；CO ₂ 分压预测 AARD 16.6%–22.3%；吸收热 AARD 6.3%–7.7%；Gibbs-Helmholz 和闪蒸计算吸收热一致性 1.5%–7.0%	
Comparison of CO ₂ absorption in DETA solution and [bmim]-[PF ₆] using thermodynamic and process modelling	2023	利用速率基建模和 Deshmukh-Mather 热力学模型研究填料塔中 DETA 溶液的 CO ₂ 吸收过程，并与离子液体 [bmim]-[PF ₆] 进行比较。	文中无具体数据（定性结论：相同操作条件下[bmim]-[PF ₆]对 CO ₂ 吸收效率高于 DETA 溶液）	
Description of reaction and vibrational energetics of CO ₂ -NH ₃ interaction using quantum computing algorithms	2023	使用量子计算算法量化 CO ₂ 和 NH ₃ 相互作用的分子振动能量和反应路径，展示量子计算在 CO ₂ 捕集反应研究中的应用。	HF 嵌入预测 NH ₂ -COOH 对形成活化能垒 0.031 Ha；重排活化能垒 0.071 Ha；VQE CHC/UVCC 计算 CO ₂ 基态振动能 2556 cm ⁻¹ （精确值 2555 cm ⁻¹ ）；无噪声模拟收敛精度 1 cm ⁻¹ ；ZNE 错误缓解后 CHC 精度提升至 2 cm ⁻¹	
Evaluation of CO ₂ absorption and stripping process for primary and secondary amines	2023	使用分子动力学建模检查再生过程中各种氨基甲酸酯分子的胺-CO ₂ 键强度，探讨不同胺的扩散系数。	打破 Ncarbamate-Ccarbamate 键再生能量顺序（高到低）：MEA>2MAE>PZ>2DMAE>2EAE>AMP>1DMA2P>MCA>DMCA>DEAB>TMPAD；TMPAD 具有最高排斥相互作用；2MAE-DEAB 混合物具有最高扩散速率	
A predictive group-contribution framework for the thermodynamic modelling of CO ₂ absorption	2022	开发基于 SAFT- γ Mic 群贡献方法的预测框架，对含环胺、烷基多胺和链烷醇胺的水溶液	文中无具体数据	

in cyclic amines, alkyl polyamines, alkanolamines and phase-change amines		+CO ₂ 混合物进行热力学建模。		
Facile Carbamic Acid Intermediate Formation in Aqueous Monoethanolamine and Its Vital Role in CO ₂ Capture Processes	2022	利用从头算分子动力学和Metadynamics模拟, 研究水性 MEA 中 CO ₂ 捕获过程中氨基甲酸中间体的形成机制及自由能垒。	氨基甲酸 (MEACOOH) 与氨基甲酸盐 (MEACOO ⁻) 浓度比在 CO ₂ 高负荷 (约 0.5) 和高解吸温度 (约 413 K) 下可达 25%	
A Combined Experimental and Computational Study on the Shuttle Mechanism of Piperazine for the Enhanced CO ₂ Absorption in Aqueous Piperazine Blends	2022	对含 PZ 和 MEA/MDEA/AMP 的哌嗪混合物进行实验和计算研究, 分析其 CO ₂ 捕获能力并验证哌嗪的穿梭机制。	文中无具体数据 (定性结论: 所有 PZ 混合物均具有高吸收速率和大吸收容量; 吸收产物间存在转化可释放游离 PZ, 证实穿梭效应)	
Signs of alkylcarbonate formation in water-lean solvents: VLE-based understanding of pKa and pKs effects	2021	引入基于胺碱性和有机稀释剂自质子分解常数评估烷基碳酸酯形成水贫溶剂的方法, 建立理论框架理解 pKa 和 pKs 对溶剂性能的影响。	文中无具体数据 (定性结论: 含高 pKa 胺和低 pKs 稀释剂的溶剂可获得更高 CO ₂ 吸收能力)	
CO ₂ Solubility in diethylenetriamine (DETA) and triethylenetetramine (TETA) aqueous mixtures: Experimental investigation and correlation using the CPA equation of state	2021	研究 CO ₂ 在 DETA 和 TETA 水溶液中的溶解度, 通过高压实验测量数据并结合 CPA 状态方程进行关联描述。	文中无具体数据 (定性结论: 获得了高压溶解度实验数据; CPA 状态方程结合伪化学反应方法可令人满意地描述气液平衡行为)	
Kinetic and Thermodynamic Analysis of High-Pressure	2021	通过实验研究和建模, 分析使用乙二胺 (EDA) 作为	CO ₂ 捕获在吸收约 10 mmol CO ₂ 后被触发; CO ₂ 捕获行为精确适应动力学机制 (AAD<1%); 平衡状态下 CO ₂ 负荷与 EDA 浓度之间存在线性关系	

CO2 Capture Using Ethylenediamine: Experimental Study and Modeling		化学溶剂的高压 CO ₂ 捕获的动力学和热力学。		
The Kinetics Investigation of CO ₂ Absorption into TEA and DEEA Amine Solutions Containing Carbonic Anhydrase	2021	使用停止流动装置研究碳酸酐酶 (CA) 存在下 CO ₂ 被 TEA 和 DEEA 叔胺水溶液吸收的动力学, 计算 k _{0,amine} 和 k _{0,withCA} 。	文中无具体数据 (定性结论: CA 存在下伪一级反应速率 k _{0,withCA} 显著增加)	
► 捕集技术综合比较 (2 篇)				
A Comparative Analysis Of Cryogenic, Adsorption And Amine-Based Absorption Techniques For Co2 Capture	2023	分析并比较低温、吸附和胺基吸收三种关键 CO ₂ 捕获技术的基本机制、优缺点和发展现状。	文中无具体数据	
New Solvents for CO ₂ and H ₂ S Removal from Gaseous Streams	2021	综述用于从气态流中去除 CO ₂ 和 H ₂ S 的新型替代溶剂, 将其分为双相混合物、贫水溶剂和绿色溶剂三大类进行讨论。	文中无具体数据	

三、综合分析

(一) 研究进展和确定性成果

综观 40 篇论文 (2021–2024 年), 胺基 CO₂吸收领域的研究重心经历了清晰的演变轨迹, 并呈现出若干跨类别的规律性特征。

****时间维度的演变: 从"能用"走向"更优"****

2021 年前后的研究大量集中于对新型溶剂 (DETA、TETA、EDA、哌嗪混合物等) 的基础性能测定和热力学数据积累 (论文 14、33、13), 以及速率基模型框架的建立 (论文 23)。彼时的关注点是"这个溶剂能不能用、比 MEA 好不好"。2022–2023

年间，研究明显转向多元溶剂体系的系统优化：双胺→三胺的迭代（论文 2、30）、非水和相变体系的机制研究（论文 6、11、18）、机器学习工具的引入（论文 8、20）——研究者不再满足于“比 MEA 好”，而是追求“好多少、为什么好、如何量化”。2024 年的文献则体现出向系统集成和工程可行性的跃升：从单一溶剂研究转向电力市场耦合（论文 27）、直接空气捕集（论文 17）、中试验证（论文 31）等更贴近工业落地的议题。

****横向对比：溶剂配方研究数据最丰富，但结论分散****

溶剂配方研究类（15 篇）是文献量最大的类别，但数据之间的可比性偏低——各研究采用的测试条件（温度、CO₂浓度、液气比）差异显著，难以直接横向排名。尽管如此，几个共识已较为清晰：非水溶剂的再生能耗普遍低于水性胺，论文 6（1.86 GJ/t CO₂）、论文 17（1.694 KJ/g CO₂）、论文 40（1.67 GJ/t CO₂）均将能耗压缩至 MEA（通常 3.5 GJ/t 以上）的 50%左右；AMP 作为空间位阻胺在多项研究中（论文 2、7、11、39）被反复确认为关键第三组分，其在矿化再生（论文 7）、三元溶剂（论文 12、30）和非水体系（论文 6、11）中均表现优异；哌嗪的穿梭效应（论文 10）为其在混合体系中的必要性提供了机理支撑，而定量化数据（论文 30 的 KGav 提升 1.5–2.5 倍）则进一步佐证了其促进剂价值。

****过程模拟与技术经济分析：成本量化揭示操作窗口****

该类研究将溶剂研究的实验室结论转化为工程决策依据。论文 5 的结论极具参考价值：贫溶剂 CO₂摩尔负荷 $\alpha_{lean}=0.15$ 和汽提塔压力 $P=1.25$ bar 的组合使 PZ/MDEA 体系成本降至 31.43 \$/t CO₂，而论文 35 的三元混合溶剂方案则进一步将成本压低至比工业 MEA 低 27.33%。换热器设计（论文 28）揭示出一个常被忽视的成本节点：贫/富液换热器占总投资成本的 41%，仅通过将壳管换热器替换为垫片式板式换热器就可将 CO₂捕集成本从 61.9 降至 57.9 €/t CO₂，降幅约 6.5%——这说明设备选型同样是降低 CCS 成本的有效杠杆。

****再生工艺层面：矿化路线数据有限，热集成已有中试支撑****

矿化再生（论文 3、7、39）是最具颠覆性的方向，但 MDEA 需要 15 小时、MEA 需要 6.5 天的再生周期（论文 3）揭示出其速率瓶颈，目前尚无规模化验证。热集成解吸塔（论文 31）已在中试层面获得正面验证，三元溶剂+固体催化剂的组合（论文 12）再生热负荷降至 5M MEA 的 32.9%，这两条路线的工程可行性更为成熟。

****集体规律：多篇论文共同指向"协同效应"是突破点****

单篇论文或许只能展示某一溶剂"比 MEA 好"，但将全部文献整合来看，一个共同规律浮现：所有成功的低能耗方案都依赖于分子间或组分间的协同效应——PZ 与 MDEA 的速率-容量协同（论文 5、10）、AMP 与 EG 的氢键调控（论文 11）、2-PE 与 APZ 的离子对效应（论文 17）、AMP 在矿化体系中的碳酸氢盐通道优势（论文 7）。这意味着，未来溶剂设计的核心逻辑不应是寻找"完美的单一胺"，而是理解并设计分子间的协同机制。

（二）问题与应对方法

当前胺基 CO₂吸收领域面临的主要挑战可归纳为三个层面：

****能耗瓶颈****：传统水性胺（尤其是 MEA）的再生热通常超过 3.5 GJ/t CO₂，是整个 PCC 系统运营成本最高的来源。研究者提出的应对策略包括：开发非水溶剂体系（将能耗降至 1.67–1.86 GJ/t CO₂区间，论文 6、17、40）、采用热集成解吸塔（论文 31）、引入固体酸碱催化剂（论文 12）和优化换热器设计（论文 28）。

****溶剂降解与腐蚀****：长期运行中胺溶剂氧化降解和对设备的腐蚀是规模化应用的重要障碍。论文 9 的 MEA/PEG200 溶剂在 400 天浸泡后对碳钢仅表现出轻微腐蚀，论文 6 的非水体系经 4 次循环后保持 97%初始容量，提供了有效应对思路。

****溶剂筛选效率低****：胺类配方空间极大，传统实验逐一验证效率低下。机器学习（ANN，R²达 0.9974，论文 8）、群贡献热力学模型（论文 16）和分子动力学（论文 34）三类工具已被证明能有效加速筛选，降低实验成本，但各工具的适用边界和模型可移植性仍需进一步规范化。

（三）未来研究方向

基于现有文献，以下方向具有明确研究价值：

1. ****矿化再生的速率强化****：MDEA 矿化再生虽节能，但 15 小时的周期限制了工业应用（论文 3）。如何通过催化剂或反应器设计加速矿化速率是亟待突破的问题。
2. ****直接空气捕集（DAC）溶剂的针对性开发****：论文 17 展示了 2-PE/APZ 体系 24 小时内捕获 87.31% 空气 CO₂ 的潜力，但 DAC 低浓度 CO₂（约 400 ppm）对吸收剂的要求远比烟气严苛，专用溶剂配方的系统研究仍不充分。
3. ****热力学模型的开放化与标准化****：论文 26 开发的开放获取电解质 NRTL 模型填补了 AMP/PZ 体系的建模空白，未来应扩展至更多新型溶剂体系，建立统一的热力学数据库和模型平台，使溶剂筛选结论可复现、可对比。
4. ****与可变可再生能源的耦合****：论文 27 提出了利用电价波动优化 PCC 系统运行的新思路，该方向在碳中和背景下具有重要的系统性价值，值得深入研究。

四、参考文献附录

以下为本报告所参考的论文详细信息，供评估报告质量参考：

[1] A Comparative Analysis Of Cryogenic, Adsorption And Amine-Based Absorption Techniques For Co2 Capture

作者：Siti Nuraishah Zuraiddi, Hazlina Husin | 年份：2023 | 期刊/会议：Platform A Journal of Engineering | 被引次数：2 | DOI: 10.61762/pajevol7iss4art25235

[2] Investigation of the improvement of the CO2 capture performance of aqueous amine sorbents by switching from dual-amine to trio-amine systems

作者：Rui Zhang, Yufan Li, Xinwei He 等 | 年份：2023 | 期刊/会议：Separation and Purification Technology | 被引次数：73 | DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123810

[3] Energy-Efficient Amine Regeneration for Absorption-Based Carbon Capture: Kinetic Studies for CO2 Mineralization

作者: C. V. Oeiyono, Ram R. Ratnakar, Kishore K. Mohanty | 年份: 2024 | 期刊/会议: SPE Annual Technical Conference and Exhibition | 被引次数: 2 | DOI: 10.2118/220246-ms

[4] Investigating the Performance of Ethanolamine and Benzylamine Blends as Promising Sorbents for Postcombustion CO₂ Capture through ¹³C NMR Speciation and Heat of CO₂ Absorption Analysis

作者: Guangjie Chen, Guang-Ying Chen, Maurizio Peruzzini 等 | 年份: 2022 | 期刊/会议: Energy & Fuels | 被引次数: 39 | DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c01930

[5] Comparative techno-economic analysis of CO₂ capture processes using blended amines

作者: Xuechong Ding, Haijun Chen, Jue Li 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: Carbon Capture Science & Technology | 被引次数: 43 | DOI: 10.1016/j.ccs.2023.100136

[6] Regulatory mechanism of a novel non-aqueous absorbent for CO₂ capture using 2-amino-2-methyl-1-propanol: Low viscosity and energy efficient

作者: Mengmeng Ma, Yuchen Liu, Yuli Chen 等 | 年份: 2022 | 期刊/会议: Journal of CO₂ Utilization | 被引次数: 61 | DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102277

[7] An Integrated Absorption–Mineralization Process for CO₂ Capture and Sequestration: Reaction Mechanism, Recycling Stability, and Energy Evaluation

作者: Yan Wang, Lei Song, Kui Ma 等 | 年份: 2021 | 期刊/会议: ACS Sustainable Chemistry & Engineering | 被引次数: 34 | DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c04731

[8] Modeling and optimization of CO₂ capture into mixed MEA-PZ amine solutions using machine learning based on ANN and RSM models

作者: Pedram Zafari, Ahad Ghaemi | 年份: 2023 | 期刊/会议: Results in Engineering | 被引次数: 54 | DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101279

[9] Nonaqueous MEA/PEG200 Absorbent with High Efficiency and Low Energy Consumption for CO₂ Capture

作者: Wen Tian, Kui Ma, Junyi Ji 等 | 年份: 2021 | 期刊/会议: Industrial & Engineering Chemistry Research | 被引次数: 52 | DOI: 10.1021/acs.iecr.0c05294

[10] A Combined Experimental and Computational Study on the Shuttle Mechanism of Piperazine for the Enhanced CO₂ Absorption in Aqueous Piperazine Blends

作者: Qinlan Luo, Qulan Zhou, Bin Feng 等 | 年份: 2022 | 期刊/会议: Industrial & Engineering Chemistry Research | 被引次数: 30 | DOI: 10.1021/acs.iecr.1c04123

[11] Development of novel AMP-based absorbents for efficient CO₂ capture with low energy consumption through modifying the electrostatic potential

作者: Guanchu Lu, Zhe Wang, Z.F. Yue 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: Chemical Engineering Journal | 被引次数: 29 | DOI: 10.1016/j.cej.2023.145929

[12] Evaluating Energy-Efficient Solutions of CO₂ Capture within Tri-solvent MEA+BEA+AMP within 0.1+2+2–0.5+2+2 mol/L Combining Heterogeneous Acid–Base Catalysts

作者: Huancong Shi, Xuan Yang, Hongliang Feng 等 | 年份: 2021 | 期刊/会议: Industrial & Engineering Chemistry Research | 被引次数: 34 | DOI: 10.1021/acs.iecr.1c00545

[13] Selection of Mixed Amines in the CO₂ Capture Process

作者: Pao-Chi Chen, Hsun-Huang Cho, Jyun-Hong Jhuang 等 | 年份: 2021 | 期刊/会议: C – Journal of Carbon Research | 被引次数: 26 | DOI: 10.3390/c7010025

[14] Kinetic and Thermodynamic Analysis of High-Pressure CO₂ Capture Using Ethylenediamine: Experimental Study and Modeling

作者: Josselyne A. Villarroel, Alex Palma-Cando, Alfredo Vilorio 等 | 年份: 2021 | 期刊/会议: Energies | 被引次数: 15 | DOI: 10.3390/en14206822

[15] Experimental Analysis of Reaction Heat of CO₂ Absorption of Phase Change Absorber AEP-DPA at Low Partial Pressure

作者: Shijian Lu, Fei Yang, Juanjuan Zhang 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: Energies | 被引次数: 19 | DOI: 10.3390/en16041867

[16] A predictive group-contribution framework for the thermodynamic modelling of CO₂ absorption in cyclic amines, alkyl polyamines, alkanolamines and phase-change amines: New data and SAFT- γ Mie parameters

作者: Felipe A. Perdomo, Siti H. Khalit, Edward J. Graham 等 | 年份: 2022 | 期刊/会议: Fluid Phase Equilibria | 被引次数: 25 | DOI: 10.1016/j.fluid.2022.113635

[17] An energy-efficient cyclic amine system developed for carbon capture from both flue gas and air

作者: Guanchu Lu, Z.F. Yue, Yanan Deng 等 | 年份: 2024 | 期刊/会议: Chemical Engineering Journal | 被引次数: 18 | DOI: 10.1016/j.cej.2024.154085

[18] Low-Viscosity Nonaqueous Sulfolane–Amine–Methanol Solvent Blend for Reversible CO₂ Capture

作者: Jayangi D. Wagaarachchige, Zulkifli Idris, Bjørnar Arstad 等 | 年份: 2022 | 期刊/会议: Industrial & Engineering Chemistry Research | 被引次数: 27 | DOI: 10.1021/acs.iecr.1c04946

[19] New Solvents for CO₂ and H₂S Removal from Gaseous Streams

作者: Laura A. Pellegrini, Matteo Gilardi, Fabio Giudici 等 | 年份: 2021 | 期刊/会议: Energies | 被引次数: 39 | DOI: 10.3390/en14206687

[20] Mixed MDEA-PZ amine solutions for CO₂ capture: Modeling and optimization using RSM and ANN approaches

作者: Pedram Zafari, Ahad Ghaemi | 年份: 2023 | 期刊/会议: Case Studies in Chemical and Environmental Engineering | 被引次数: 23 | DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100509

[21] Experimental investigation of novel ternary amine-based deep eutectic solvents for CO₂ capture

作者: Hossam K. Abdrabou, Inas M. AlNashef, Mohammad R.M. Abu-Zahra 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: PLoS ONE | 被引次数: 18 | DOI: 10.1371/journal.pone.0286960

[22] Optimization of amine-based carbon capture: Simulation and energy efficiency analysis of absorption section

作者: Amin Hedayati Moghaddam, Morteza Esfandyari, Hossein Sakhaeinia | 年份: 2024 | 期刊/会议: Results in Engineering | 被引次数: 20 | DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103574

[23] Rate-Based Absorption Modeling for Postcombustion CO₂ Capture with Additively Manufactured Structured Packing

作者: Joshua A. Thompson, Costas Tsouris | 年份: 2021 | 期刊/会议: Industrial & Engineering Chemistry Research | 被引次数: 14 | DOI: 10.1021/acs.iecr.1c02756

[24] Comparison of CO₂ absorption in DETA solution and [bmim]-[PF₆] using thermodynamic and process modelling

作者: Morteza Afkhamipour, Ebad Seifi, Arash Esmaeili 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: Fuel | 被引次数: 15 | DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129607

[25] Research on CO₂ Capture Performance and Absorption Mechanism of High-Load Biphasic Solvent TETA/1DMA2P

作者: Yongqiang Wang, Kaili Zhu, Shujie Zhao 等 | 年份: 2022 | 期刊/会议: Industrial & Engineering Chemistry Research | 被引次数: 14 | DOI: 10.1021/acs.iecr.2c00945

[26] Open access, thermodynamically consistent, electrolyte NRTL model for piperazine, AMP, water, CO₂ systems on Aspen Plus

作者: Ningtong Yi, Laura Herraiz, Mengxiang Fang 等 | 年份: 2024 | 期刊/会议: Separation and Purification Technology | 被引次数: 17 | DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127924

[27] Power-to-heat amine-based post-combustion CO₂ capture system with solvent storage utilizing fluctuating electricity prices

作者: Hirotaka Isogai, Takao Nakagaki | 年份: 2024 | 期刊/会议: Applied Energy | 被引次数: 20 | DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123519

[28] Simulation and Cost Optimization of different Heat Exchangers for CO₂ Capture

作者: Solomon Aforkoghene Aromada, Nils Henrik Eldrup, Fredrik Normann 等 | 年份: 2021 | 期刊/会议: Linköping electronic conference proceedings | 被引次数: 12 | DOI: 10.3384/ecp20176318

[29] The Kinetics Investigation of CO₂ Absorption into TEA and DEEA Amine Solutions Containing Carbonic Anhydrase

作者: Bin Liu, Zhe Cui, Wende Tian | 年份: 2021 | 期刊/会议: Processes | 被引次数: 11 | DOI: 10.3390/pr9122140

[30] Comparative mass transfer performance of CO₂ absorption using highly-concentrated AMP-PZ-MEA ternary amines solvent

作者: Sukanya Nakrak, Benjapon Chalermisinsuwan, Paitoon Tontiwachwuthikul 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: Energy Reports | 被引次数: 11 | DOI: 10.1016/j.egy.2023.05.219

[31] Pilot plant results of amine-based carbon capture with heat integrated stripper

作者: Adam Tatarczuk, M. Tańczyk, L. Więclaw-Solny 等 | 年份: 2024 | 期刊/会议: Applied Energy | 被引次数: 20 | DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123416

[32] Facile Carbamic Acid Intermediate Formation in Aqueous Monoethanolamine and Its Vital Role in CO₂ Capture Processes

作者: Bohak Yoon, Gyeong S. Hwang | 年份: 2022 | 期刊/会议: Industrial & Engineering Chemistry Research | 被引次数: 19 | DOI: 10.1021/acs.iecr.1c04987

[33] CO₂ Solubility in diethylenetriamine (DETA) and triethylenetetramine (TETA) aqueous mixtures: Experimental investigation and correlation using the CPA equation of state

作者: Fragkiskos Tzirakis, Αθανάσιος Ι. Παπαδόπουλος, Panos Seferlis 等 | 年份: 2021 | 期刊/会议: Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis | 被引次数: 17 | DOI: 10.1016/j.ctta.2021.100017

[34] Evaluation of CO₂ absorption and stripping process for primary and secondary amines

作者: Maimoona Sharif, Huifeng Fan, Sayd Sultan 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: Molecular Simulation | 被引次数: 15 | DOI: 10.1080/08927022.2023.2178233

[35] A comparative study of polyamine and piperazine as promoter for CO₂ absorption performance in aqueous methyldiethanolamine blend system: 430 MW power plant data simulation and economic assessment

作者: Surya Chandra Tiwari, Mayank Agarwal, Kamal Kishore Pant 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: Sustainable Chemistry for the Environment | 被引次数: 10 | DOI: 10.1016/j.scenv.2023.100054

[36] Description of reaction and vibrational energetics of CO₂-NH₃ interaction using quantum computing algorithms

作者: Manh Tien Nguyen, Yueh-Lin Lee, Dominic Alfonso 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: AVS Quantum Science | 被引次数: 10 | DOI: 10.1116/5.0137750

[37] Signs of alkylcarbonate formation in water-lean solvents: VLE-based understanding of pKa and pKs effects

作者: Ricardo R. Wanderley, Karen K. Høisæter, Hanna K. Knuutila | 年份: 2021 | 期刊/会议: International journal of greenhouse gas control | 被引次数: 8 | DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103398

[38] Capture of CO₂ Using Mixed Amines and Solvent Regeneration in a Lab-Scale Continuous Bubble-Column Scrubber

作者: Pao-Chi Chen, Jyun-Hong Jhuang, T.-W. Wu 等 | 年份: 2023 | 期刊/会议: Applied Sciences | 被引次数: 7 | DOI: 10.3390/app13127321

[39] Development of CO₂ Absorption Using Blended Alkanolamine Absorbents for Multicycle Integrated Absorption–Mineralization

作者: Chanakarn Thamsiriprideeporn, Tetsuya Suekane | 年份: 2023 | 期刊/会议: Minerals | 被引次数: 7 | DOI: 10.3390/min13040487

[40] Nonaqueous Mixed Amine CO₂ Capture Technology Based on *N*-Methylformamide

作者: Yuansheng Wu, Teng Zhang, Yunsong Yu 等 | 年份: 2024 | 期刊/会议: Energy & Fuels | 被引次数: 6 | DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c04581