

化学吸收法捕集 CO₂ 的研究进展、性能对比与展望

王 振¹, 李 玥¹, 李 胜^{1,2,3}

(1. 北京理工大学 车辆与机械工程学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学(珠海) 碳中和科学技术研究中心, 广东 珠海 519000;
3. 中山市北京理工大学研究院, 广东 中山 528400)

摘 要: 二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 是温室气体减排的必要手段, 也是实现化石能源低碳化利用的唯一手段。化学吸收法因其适应性广、工艺成熟等优势是当前碳捕集的主流技术之一, 但仍然面临着能耗和成本较高的难题, 高性能吸收剂的研发是解决上述问题的关键。基于化学吸收剂代际演进与多性能评价视角, 系统性地分析了各代吸收剂的优缺点、研发现状、存在的问题, 解析了各代吸收剂发展的驱动力及研发趋势; 其次, 全面量化对比了各代吸收剂在吸收容量、黏度、挥发性、降解性、再生能耗等关键指标的代际差异性, 研判了当前的研究热点与趋势; 最后, 对化学吸收法捕集 CO₂ 亟需突破的方向进行了展望并给出了相关发展建议。整体而言, 经过多代发展, 吸收剂已经在降能耗等方面取得了很大进步, 但仍存在着高负载-低能耗-低黏性-低降解难协同、解吸温度较高等难题, 建议从吸收剂量化评价及数据库建立、人工智能模型开发、低温再生吸收剂研发、再生与低品位热能利用工艺结合、外场-催化协同工艺、多代技术融合方面进行研发突破, 协同提升捕集效率与经济性。

关键词: 碳减排; 二氧化碳捕集; 化学吸收法; 吸收剂; 性能; 再生能耗

中图分类号: X701 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)04-0120-20

Chemical absorption method for CO₂ capture: Research progress, performance comparison and prospects

WANG Zhen¹, LI Yue¹, LI Sheng^{1,2,3}

(1. School of Vehicle and Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Carbon Neutral Science and Technology Research Centre, Beijing Institute of Technology (Zhuhai), Zhuhai 519000, China; 3. Research Institute of Beijing Institute of Technology, Zhongshan 528400, China)

Abstract: Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) is an essential approach for reducing greenhouse gas emissions and the sole method for achieving low-carbon utilization of fossil fuels. Chemical absorption, recognized for its broad adaptability and mature technology, stands as one of the mainstream technologies for carbon capture today. However, it still faces challenges related to high energy consumption and costs, making the development of high-performance absorbents crucial to overcoming these issues. This paper systematically analyzes the advantages and disadvantages, current research and development status, and existing problems of various generations of absorbents from the perspective of generational evolution and multi-performance evaluation of chemical absorbents. It also elucidates the driving forces and R&D trends behind the development of each generation of absorbents. Furthermore, the paper quantitatively compares the intergenerational differences of these absorbents in key indicators such as absorption capacity, viscosity, volatility, degradability, and regeneration energy consumption, and assesses current research hotspots and trends. Lastly, it provides an outlook on the directions that urgently need breakthroughs in CO₂ capture via chemical absorption and offers relevant development suggestions. Overall, through multiple generations of development, absorbents have made significant progress in reducing energy consumption, but challenges such as the difficulty in balancing high load-low energy consumption-high viscosity-easy degradation and high desorption temperatures remain. It is recommended to focus on R&D breakthroughs in quantitative evaluation and database establishment of absorbents, development of artificial intelligence models, research on new absorbents for low-temperature regeneration,

收稿日期: 2025-03-12; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CBJ25031201

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52122601); 中山市科技计划资助项目(2020AG019)

作者简介: 王 振(1999—), 男, 甘肃武威人, 博士研究生。E-mail: 18811414688@163.com

通讯作者: 李 胜(1985—), 男, 四川眉山人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: lisheng@bit.edu.cn

引用格式: 王振, 李玥, 李胜. 化学吸收法捕集 CO₂ 的研究进展、性能对比与展望 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(4): 120-139.

WANG Zhen, LI Yue, LI Sheng. Chemical absorption method for CO₂ capture: Research progress, performance comparison and prospects[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(4): 120-139.



integration of regeneration and low-grade heat utilization processes, external field-catalysis synergistic processes, and fusion of multi-generation technologies, to synergistically enhance capture efficiency and economic viability.

Key words: carbon emission reduction; CO₂ capture; chemical absorption; absorbent; performance; regeneration energy consumption

0 引 言

全球工业和经济的高速发展导致煤炭、石油、天然气等化石能源的需求不断增加^[1]。而化石燃料燃烧排放的大量温室气体是导致全球变暖的主要原因。温室气体主要包括二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、氧化亚氮 (N₂O) 等。据统计, 2023 年全球大气中 CO₂ 体积分数已达 419.3×10^{-6} , CO₂ 产生的辐射强度约占温室气体总辐射强度的 65% ~ 70%^[2]。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 预测, 到 2030 年, 全球平均气温的上升幅度将达到 1.5 °C^[3]。由此可见, CO₂ 作为主要的温室气体对全球气候变化产生重要的影响。为了控制 CO₂ 的大量排放, 实现将全球平均气温上升幅度控制在 2 °C 以内的目标, 国际社会建立了一揽子碳达峰、碳中和与碳交易的战略规划, 并大力推进 CO₂ 捕集技术的研究与开发^[4-5]。

在众多碳减排路径中, 二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 被认为是实现 CO₂ 近零排放的关键技术之一^[6]。CO₂ 捕集技术主要分为燃烧前捕集、全氧燃烧捕集和燃烧后捕集。燃烧后捕集技术具有适应性广、成熟度高、CO₂ 减排量大的优点, 已在一些国家进行了大规模的示范应用与商业化运行^[7-8], 但较高的成本和能耗使得燃烧后捕集的大范围推广受限。燃烧后 CO₂ 捕集方法包括吸附、膜分离、物理吸收、化学吸收、低温分离等。鉴于工业烟气 CO₂ 低分压和高气流的排放特性, 化学吸收成为更加合适的碳捕集方法^[9]。化学吸收法是指利用碱性溶液与 CO₂ 发生酸碱反应, 生成碳酸盐、碳酸氢盐或氨基甲酸盐等产物, 并通过改变温度、压力等条件促使产物中 CO₂ 释放和分离。

化学吸收剂是化学吸收法碳捕集技术的核心。为了适应大规模、低能耗的碳捕集需求, 化学吸收剂的研发受到了广泛的关注。传统的化学吸收剂主要分为有机胺溶液、碳酸盐溶液和氨水溶液。有机胺溶液因其 CO₂ 选择性高、吸收速率快和捕集容量大的优点成为应用最为广泛的化学吸收剂之一。但单一胺类吸收剂如 MEA (单乙醇胺)、DEA (二乙醇胺) 和 MDEA (N-甲基二乙醇胺) 等都存在一些明显的缺点, 如再生能耗高、对设备腐蚀性强等^[10-11]。为了克服上述缺点, 研究者通过 2 种或多种胺类吸收剂混合的方式开发出新型的吸收剂。研

发思路主要有 2 种: 一是以高吸收容量、低再生能耗的三级胺或位阻胺吸收剂为主, 通过添加活化剂 (如哌嗪 (PZ)、MEA 和 DEA 等) 来提高吸收速率; 二是以具有高吸收速率的一、二级胺为主, 通过添加其他胺类来降低再生能耗和改善吸收剂总体特性, 如在 MEA、PZ 吸收剂中加入 MDEA^[12-13]。碳酸盐溶液具有价格低廉、易于再生、毒性较小以及稳定性好等优势。常见的碳酸盐溶液包括碳酸钾、碳酸钙和碳酸钠溶液, 而碳酸钾溶液因其较大的吸收容量而被广泛使用^[14-15]。但碳酸钾溶液存在 CO₂ 吸收速率缓慢、能耗大和对设备的防腐性要求较高等缺点。鉴于此, 研究者们采用添加不同的活化剂、缓蚀剂等方法对热碳酸钾吸收法进行了进一步优化。此外, 相较于低 CO₂ 体积分数的烟气, 碳酸钾溶液吸收剂更适用于高体积分数的 CO₂ 捕集。氨水作为 CO₂ 吸收剂具有吸收速率快、吸收容量大、再生能耗低和腐蚀性弱等优点。但氨水的易挥发特性会导致严重的氨气逃逸问题, 这不仅增加了系统操作的安全隐患, 还需对逃逸的氨气进行冷凝回收处理, 从而显著增加了工艺投资成本, 阻碍了氨水吸收剂的广泛应用^[16-17]。近年来, 上述传统吸收剂较高的再生能耗成为研究者致力解决的关键问题。考虑各类吸收剂的物理化学性质, 通过优化吸收剂组分研发新一代低能耗、高容量、高效率、低挥发性、抗氧化降解的化学吸收剂成为实现低成本规模化 CO₂ 捕集的重要路径。

为此, 笔者针对化学吸收剂的最新研究进展进行综述、分析与展望。首先, 阐述各类化学吸收剂在 CO₂ 捕集过程中的优缺点、研发现状、存在的问题。其次, 将吸收剂的 CO₂ 吸收量、CO₂ 解吸能力、黏度、挥发性、降解性和再生能耗等指标作为研究重点, 通过数据量化全面对比各代吸收剂在关键指标的代际差异性, 解析各代吸收剂发展的驱动力及研发趋势。最后, 对化学吸收法捕集 CO₂ 亟需突破的方向进行展望。

1 化学吸收剂的研究进展

近年来, 化学吸收剂较高的再生能耗成为最为关注的问题之一。以乙醇胺 (MEA) 溶液为例, 吸收剂的再生能耗高达 3.8 ~ 4.2 GJ/t, 约占系统运行能耗的 70%, 是导致碳捕集成本高昂的直接原因^[18]。理想的 CO₂ 化学吸收剂应兼具较高的 CO₂ 吸收速

率、吸收容量和较低再生能耗，同时还应具有稳定性好，环境友好，便宜易得等特性。因此，为了实现高效率低能耗的 CO₂ 捕集，设计与开发新型的吸收剂成为降低化学吸收法碳捕集工艺成本的关键。根据发展历程，如图 1 所示，化学吸收剂主要分为划分为 3 代。第 1 代吸收剂以单一组分吸收剂为代

表，主要包括无机盐吸收剂、氨水吸收剂、有机胺吸收剂和氨基酸吸收剂等；第 2 代吸收剂是构建混合有机胺溶液，第 3 代吸收剂为新型的少水型吸收剂，主要包括胺基双相吸收剂、胺基均相吸收剂和离子液体和纳米流体吸收剂等。

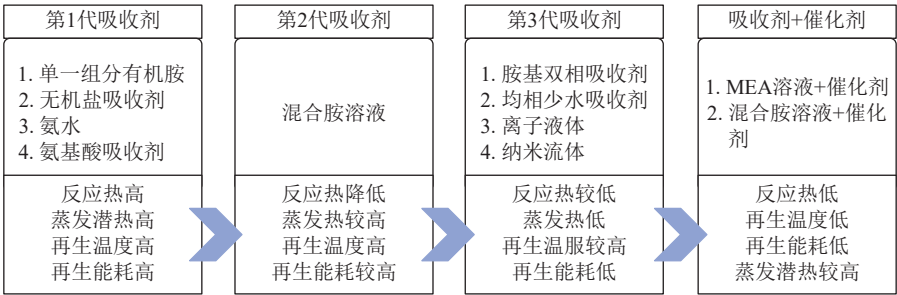


图 1 CO₂ 吸收剂的分类
Fig. 1 Classification of CO₂ absorbents

除了开发与设计新型的化学吸收剂外，利用固体酸催化剂降低吸收剂再生过程的解吸温度同样被认为是降低再生能耗的有效路径。相较于传统吸收剂 393 ~ 413 K 高品位的热源需求，加入固体酸催化剂能够为氨基甲酸酯的分解反应提供低能垒的质子交换途径，可以将 CO₂ 解吸温度降至 353 ~ 361 K，显著提高 CO₂ 解吸速率并缩短吸收剂再生时间。常见的固体酸催化剂主要分为金属氧化物、分子筛、天然黏土矿物、有机骨架材料及其衍生物和碳基材料等。根据 Brønsted 酸碱理论，固体酸催化剂 B 酸位点/L 酸位点的数量与比值，以及较高的比表面积是影响催化解吸效果的关键因素。目前，国内外有关 CO₂ 催化解吸的研究尚处于实验室开发阶段，且主要聚焦于设计出能够在较高解吸温度及强碱性环境下具有高活性与高稳定性的催化剂。

1.1 第 1 代吸收剂

1.1.1 单一组分胺溶液

有机胺溶液具有选择性高、CO₂ 吸收能力强和 CO₂ 吸收速率快的优点。根据分子中氨基氢原子的数目，有机胺分为伯胺 (RNH₂)、仲胺 (R₁R₂NH-) 和叔胺 (R₁R₂R₃N)。相较于叔胺，伯胺和仲胺具有较强的 CO₂ 结合能力，能够快速去除大量 CO₂ [19-20]。但根据化学计量平衡，叔胺具有更高的理论 CO₂ 吸收量，且在再生过程中，其吸收产物与 CO₂ 剥离的能量需求更少[21]。长期以来，国内外学者对单一组分有机胺溶液的 CO₂ 捕集性能进行了广泛研究。以伯胺为例，FREDERICK D. Otto [22] 在不同温度与 CO₂ 分压的条件下，探究了 MEA 水溶液 CO₂ 吸收容量的变化规律。ATTALLA M [23] 利用湿壁反应器研究

了 MEA 水溶液在 CO₂ 捕集过程中的反应动力学。然而，单一的伯胺或仲胺虽然具有较高的 CO₂ 吸收速率，但其 CO₂ 吸收容量较小，且所需再生能量较高。此外，伯胺与仲胺的腐蚀性较高，在运行过程中抗降解性能较低。单一的叔胺虽具有较高的 CO₂ 吸收容量和较低的再生能量，但其有限的 CO₂ 吸收速率无法实现 CO₂ 捕集效率的提高。因此，单一组分的有机胺溶液无法同时满足高 CO₂ 吸收速率、高 CO₂ 吸收容量以及低再生能耗的要求。鉴于此，相关研究主要聚焦于混合胺吸收剂较于单一有机胺溶液 CO₂ 捕集性能的提升。单一组分有机胺溶液的再生能耗为 3.1 ~ 4.2 GJ/t，且目前单一组分有机胺溶液常被用作标准溶剂与新型的吸收剂作对比（表 1）。

1.1.2 无机盐溶液

碳酸盐溶液作为常用的无机盐吸收剂具有低成本、无腐蚀和热稳定性高的优点，被认为是具有应用前景的 CO₂ 吸收剂。RAMAZANI R [32] 研究表明，在高温高压条件下，利用 K₂CO₃ 溶液可以有效脱除费托反应合成气中的二氧化碳。S VALLURI S [33] 研究表明，在低温常压条件下，K₂CO₃ 溶液表现出较低 CO₂ 吸收速率和吸收能力。刘坤磊 [34] 研究表明，碳酸盐溶液的 CO₂ 吸收速率主要受物理传质速率的限制。上述研究表明，碳酸盐吸收剂较低的 CO₂ 吸收速率是限制其进一步工业化发展的阻碍。鉴于此，关于碳酸盐溶液的研究主要聚焦在引入活化剂提高其 CO₂ 吸收速率。根据物理化学性质，活化剂主要分为无机盐、有机胺和生物酶。

研究表明，三氧化铝、活性炭和硼酸盐等无机

表 1 单一组分胺溶液研究进展

Table 1 Research progress of single component amine solutions

吸收剂	实验条件		CO ₂ 吸收量/ (mol·mol ⁻¹)	循环容量/ (mol·mol ⁻¹)	再生能耗 GJ/t	参考文献
	吸收温度/K	解吸温度/K				
2 mol/L MEA	313	363	0.55	0.15	4.00	[24]
4 mol/L MEA	—	403	0.50	0.28	3.80	[25]
质量分数30% MEA	298	393	0.42	0.27	4.30	[26]
质量分数35% MEA	313 ~ 323	397	—	—	3.10	[27]
质量分数40% DEA	313	390	0.45	0.4	3.18	[28]
质量分数40% DEA	313 ~ 333	418	0.48	—	4.20	[29]
质量分数30% MDEA	318	386	—	—	3.82	[30]
质量分数30% AMP	318	389	0.67	—	3.18	[30]
8 mol/L PZ	313 ~ 333	393 ~ 423	0.40	0.09 ~ 0.12	3.43	[31]

物活化剂对碳酸盐溶液的 CO₂ 吸收速率具有明显的促进作用。在碳酸盐溶液洗涤过程中, CO₂ 主要与较低体积分数的 OH⁻ 发生反应, 反应速度相对缓慢。而无机活化剂的引入明显提高了 OH⁻ 与 CO₂ 的反应速率, 进而提高了碳酸盐溶液的 CO₂ 吸收速率^[35-36]。但无机盐活化剂不能提高碳酸盐溶液的 CO₂ 吸收容量, 且难以降低其再生能耗。

在碳酸盐溶液引入有机胺能够显著提升其 CO₂ 吸收性能。一方面, 有机胺可以显著降低液膜阻力, 从而提高碳酸盐溶液的 CO₂ 吸收速率^[37]。另一方面, 有机胺分子中氨基具有较强的选择性, 会优先与 CO₂ 发生反应, 从而提高碳酸盐溶液的 CO₂ 吸收容量。因此, 当加入哌嗪 (PZ)、二乙烯三胺 (DETA) 等多氨基有机胺时, 会明显提高碳酸盐

溶液对 CO₂ 的吸收性能^[38]。但引入有机胺会增加 CO₂ 吸收产物的热稳定性, 导致吸收剂的再生能耗升高。

氨基酸和生物酶等活化剂对碳酸盐溶液的 CO₂ 吸收性能具有显著的影响。其中, 氨基酸对碳酸盐溶液 CO₂ 吸收速率和 CO₂ 吸收能力的提升主要归因于其分子中氨基基团的作用^[39]。而碳酸酐酶可以有效降低碳酸盐溶液与 CO₂ 反应的活化能, 从而促进 CO₃²⁻ 离子的转化。但在高温再生过程中, 氨基酸和碳酸酐酶均易失活, 从而导致吸收剂的循环稳定性较差^[40]。此外, 根据文献 [41] 报道, 碳酸盐溶液的再生能耗高达 3.16 ~ 5.30 GJ/t。因此, 设计与开发兼具降低能耗和提升吸收性能的新型活化剂是实现碳酸盐溶液规模化 CO₂ 捕集的关键方向 (表 2)。

表 2 碳酸盐溶液常用活化剂

Table 2 Activators typically used in carbonate solutions

活化剂种类	活化剂	优点	缺点	参考文献
无机活化剂	硼酸盐	无毒性、成本低和较强的稳定性	CO ₂ 负载量较低	[42]
	亚砷盐	热稳定性较高, 不易挥发	毒性较大且具有致癌性	[43]
	钒酸盐	提高了吸收剂的传质效率, 降低腐蚀性	毒性较大且试剂成本高	[44]
有机活化剂	乙醇胺	成本低, 提高了吸收剂的CO ₂ 吸收速率	再生能耗较高且腐蚀性较强	[45]
	哌嗪	挥发性较低, 提高了吸收剂的反应速率	溶解度较低	[45]
	L-精氨酸钾	低毒性, 提高了吸收剂的CO ₂ 吸收和解吸速率	具有较高的再生能耗	[46]
生物酶活化剂	碳酸酐酶	环境友好, 提高了吸收剂的CO ₂ 吸收速率	热稳定性差, 易失活, 难以循环使用	[47]

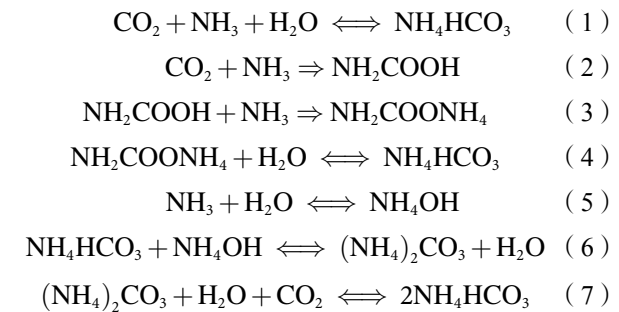
1.1.3 氨水溶液

氨水溶液具有吸收剂成本低和 CO₂ 吸收容量高的优点。相关研究表明, 氨水的 CO₂ 吸收质量比可

达 1.2 : 1, 明显高于相同质量分数的 MEA 水溶液。但氨水溶液的高挥发性和较低的传质效率是其进一步发展的阻碍。目前, 利用氨水溶液碳捕集的

研究主要集中在 CO₂ 捕集性能、反应机理和多污染物同时脱除等方面。

氨水溶液对 CO₂ 吸收主要分为气液界面反应和液相反应过程，整体反应机理可以用式 (1) 表示。实际过程中，NH₄HCO₃ 的生成包含了一系列的中间反应。如式 (2)—(4) 所示，首先，CO₂ 溶解在液膜中并通过不可逆反应快速生成 NH₂COONH₄；然后，NH₂COONH₄ 通过水解产生 NH₄HCO₃^[48]。此外，如式 (5)—(7) 所示，氨水溶液在 CO₂ 的吸收过程中还有副产物 (NH₄)₂CO₃ 的产生，并且与 NH₄HCO₃ 存在相互转化的过程。



CHEN H S^[49] 研究了氨水溶液的 CO₂ 去除率和再生性能，并采用热分解法探究了其 CO₂ 吸收后固体产物的物质组分。实验结果表明，CO₂ 的初始去除率随氨水质量分数的增加而提高，当氨水质量分数为 10% 时，CO₂ 的初始去除率可达 90%。热分解结果显示，氨水溶液中的吸收产物主要为 NH₄HCO₃，且能在较低的解吸温度下实现再生。ZHANG M K^[50] 采用速率模型研究了氨水溶液在中试级工厂的 CO₂ 捕集性能。结果表明，在最佳的工艺条件下，氨水溶液的再生能耗为 3.63 GJ/t。相较于有机胺溶液，氨水溶液具有更高挥发性，导致其在常规高温再生过程中造成大量的溶剂损失。研究

表明，采氨水溶液在 CO₂ 捕集时，再生塔出口 NH₃ 的体积分数约为 10 000×10⁻⁶，远高于烟气中 NH₃ 的排放体积分数要求 (50×10⁻⁶)^[51-52]。为了降低氨水溶液的挥发，改进碳捕集工艺得到了广泛的关注。V DARDE^[53] 在 2~10 ℃ 的条件下采用冷冻氨法进行 CO₂ 捕集，有效降低了 CO₂ 吸收过程中 NH₃ 的逸出。此外，在吸收塔和解吸塔外加装水洗装置同样可以避免氨的大量挥发。但增加制冷和水洗装置会明显增加碳捕集系统的额外电耗和投资成本，并且低温会降低 NH₄HCO₃ 的溶解度，从而产生沉浆堵塞和腐蚀设备。

近年来，氨水溶液在 CO₂ 捕集和 NO₂、SO₂、NO 等气体污染物协同脱除方面得到了广泛的研究。氨水呈弱碱性，对易溶于水的酸性气体 SO₂ 和 NO₂ 具有较好的吸收效果，并且吸收产物 (NH₄)₂SO₃、(NH₄)₂SO₄ 和 (NH₄)₂NO₃ 等均可用作肥料。而 NO 较低的溶解度限制了其在氨水溶液中的有效吸收，从而影响了烟气中 NO_x 的脱除效率^[54]。因此，为了提高氨水洗涤过程中 NO_x 的脱除效率，通常采用 H₂O₂、NaClO 和 O₃ 等氧化剂将 NO 氧化为 NO₂^[55]。目前，相关的研究尚处于实验室规模，未能实现工业应用。

尽管氨水溶液被认为是 MEA 溶液碳捕集工艺中的替代溶剂，但是在实际应用中仍存在一些挑战。如采用冷冻氨法时，NH₄HCO₃ 固体对管路的堵塞和腐蚀，多种酸性气体协同处理时的有限的 NO_x 脱除效率等。此外，针对氨挥发与逃逸的问题，增加制冷或水洗装置同样会增加碳捕集系统的能耗。根据统计可知 (表 3)，在 CO₂ 捕集过程中，仅氨水吸收剂的再生能耗为 2.90~4.26 GJ/t，仍处于较高水平。

表 3 氨水吸收剂的研究进展

Table 3 Research progress of ammonia absorbents

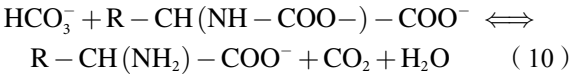
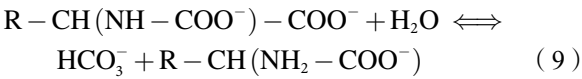
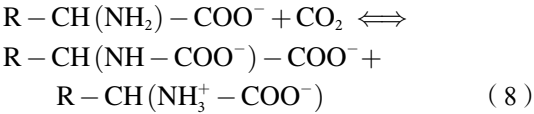
吸收剂	实验条件		CO ₂ 吸收量/ (mol·mol ⁻¹)	循环容量/ (mol·mol ⁻¹)	再生能耗/ (GJ·t ⁻¹)	参考文献
	吸收温度/K	解吸温度/K				
质量分数10% NH ₃	—	—	—	—	3.63	[56]
质量分数10% NH ₃	300.15	365.15	0.18	0.11	4.26	[57]
3 mol/L NH ₃	—	—	0.15	—	4.00	[58]
质量分数5% NH ₃	—	—	0.40	0.20	3.02	[59]
质量分数12% NH ₃	293.15	—	0.15	—	2.90	[60]

1.1.4 氨基酸溶液

与有机胺类吸收剂相比，氨基酸盐是一种无毒性的环境友好型吸收剂，并且具有独特的离子结

构，能在 CO₂ 捕集过程中表现出较低的挥发性和较强的抗氧化降解能力^[61]。如式 (8)—(10) 所示，氨基酸盐吸收剂的 CO₂ 捕集机理与伯胺类吸收剂类似。

首先, 氨基基团与 CO₂ 反应生成氨基甲酸酯; 其次, 氨基甲酸酯与水反应生成碳酸氢盐; 最后, 通过高温加热的方式对上述吸收产物进行 CO₂ 解吸。



氨基酸盐吸收剂因优异的 CO₂ 吸收性能使其成为传统 MEA 溶液碳捕集工艺的替代选择。相关研究表明, 相较于 MEA 溶液 0.368 mol/mol 的循环 CO₂ 负载量, 甘氨酸盐、丙氨酸盐、脯氨酸盐和赖氨酸盐等吸收剂的 CO₂ 循环负载量可达 0.465、0.535、0.412 和 0.378 mol/mol。并且氨基酸盐吸收剂与 CO₂ 反应的活化能也低于 MEA、MDEA 和 DEA 等有机胺吸收剂。YAN S P^[62] 研究了 L-精氨酸的 CO₂ 捕集性能, 结果表明, 氨基酸盐吸收剂的 CO₂ 吸收速率与其碱度有关, 随着氨基酸碱度的提高, CO₂ 初始的吸收效率明显提高。

近年来, 氨基酸盐与不同种类吸收剂混合形成的新型 CO₂ 吸收剂成为研究热点。相较于单一的氨水溶液, 氨基酸盐的加入有助于提高混合吸收剂的 CO₂ 的吸收性能。QUNYANG X^[63] 采用湿壁柱研究了肌氨酸对氨水溶液反应动力学的影响。结果表明, 3 mol 氨水/1.5 mol 肌氨酸混合吸收剂的 CO₂ 传质系数与 5 mol MEA 溶液的 CO₂ 传质系数基本相同, 表明肌氨酸的加入明显提高了氨水溶液的 CO₂ 吸收速率。RAMAZANI R 等^[64] 研究了赖氨酸盐对 MEA 溶液 CO₂ 捕集性能的影响。结果表明,

混合吸收剂的 CO₂ 吸收性能明显优于单一的 MEA 溶液, 并且混合吸收剂的 CO₂ 负载能力随着赖氨酸盐浓度的增加而提高。此外, RAMEZAN R^[65] 探究了 2-(2-氨基乙基) 氨基乙醇 (AEEA)、甲基二乙醇胺 (MDEA)、哌嗪 (PZ)、肌酸钾 (K-Sar) 和赖氨酸钾 (K-Lys) 等 5 种添加剂对磷酸三钠溶液 CO₂ 捕集性能的影响。结果表明, 相较于添加剂, K-Lys/磷酸三钠溶液具有更高的 CO₂ 吸收速率和 CO₂ 负载能力, 并且其腐蚀性也明显低于 MEA 溶液。

根据分子结构, 氨基酸主要包括空间位阻型和无阻碍型。当 CO₂ 与空间位阻型氨基酸的反应时, 取代基 R 会与 CO₂ 分子中的氧原子产生强烈的排斥作用, 生成具有不稳定性结构的中间产物。在相同的再生条件下, 这种不稳定的中间产物更易实现高效再生, 从而降低了吸收剂的再生能耗^[66]。鉴于此, 在 CO₂ 吸收剂中引入位阻型氨基酸盐有助于提高其再生性能。SONG T^[67] 提出一种由 L-脯氨酸 (L-Pro)、四乙基戊二胺 (TEPA)、*n*-丙醇 (NPA) 组成的新型吸收剂, 并研究了该吸收剂的 CO₂ 捕集性能。结果表明, [TEPAH][Pro]/NPA/H₂O 吸收剂的 CO₂ 负载量最高可达 2.01 mol/mol, 经过 5 次再生循环后, 其 CO₂ 负载量仍可达 1.61 mol/mol, 解吸效率高达 84.4%。并且 [TEPAH][Pro]/NPA/H₂O 吸收剂的再生能耗仅为 2.39 GJ/t, 相较于 MEA 水溶液降低了 37%。

综上所述, 尽管单一的氨基酸盐吸收剂具有较高的 CO₂ 负载量, 但在高温再生过程中存在热降解性较高的问题, 导致吸收剂的循环稳定性较差。因此, 为了平衡氨基酸盐吸收剂在 CO₂ 捕集过程中的各项关键性能 (表 4), 目前有关氨基酸盐的研究主要集中在与其他 CO₂ 吸收剂组成混合吸收剂。

表 4 氨基酸盐吸收剂的研究进展

Table 4 Research progress of amino acid salt absorbents

吸收剂	实验条件		CO ₂ 吸收量/ (mol · mol ⁻¹)	循环容量/ (mol · mol ⁻¹)	再生能耗 GJ/t	黏度 mPas,313.15 K	参考文献
	吸收温度/K	解吸温度/K					
[M ₂ E ₂ A][Gly]/MDEA/H ₂ O	313.15	—	0.92	—	—	4.42	[68]
PS	313.00	353.00	0.76	0.39	—	—	[69]
GlyK-30SA	313.00	363.00	0.64	0.37	2.92	3.48	[70]
PZ/Lys	313.15	353.15	1.45	0.80	—	3.30	[71]

1.2 第二代吸收剂

1.2.1 混合胺溶液

基于有机胺溶液的化学吸收法是目前工业碳捕集应用中较为成熟的技术。但单一组分有机胺溶液

的 CO₂ 捕集性能并不能满足大容量、低能耗的碳捕集要求。例如, MEA 等伯胺溶液具有较为优异的 CO₂ 吸收速率, 但其 CO₂ 吸收产物 (氨基甲酸酯和质子化胺) 难分解, 会导致较高的再生能耗。相比

之下，MDEA 等叔胺的 CO₂ 吸收产物 (碳酸盐和碳酸氢盐) 更易再生，但将其作为主要组分会导致吸收剂较低的 CO₂ 吸收速率。因此，根据有机胺的特性，研究者采用 2 种及以上不同类别的有机胺组成混合溶液，以提升吸收剂 CO₂ 捕集性能与降低再生能耗。

鉴于叔胺较高的 CO₂ 吸收容量和较低的再生能耗，筛选以叔胺为基础溶剂，伯胺或仲胺为促进剂的混合胺溶液，成为研发具有高效 CO₂ 捕集性能吸收剂的方案。MANDAL B P^[72] 研究了 MDEA 和 MEA 共混物的 CO₂ 吸收性能。结果表明，MEA 的加入明显提高了 MDEA 的 CO₂ 吸收速率。此外，2-氨基-2-甲基-1-丙醇 (AMP) 等位阻胺因优异 CO₂ 吸收速率和 CO₂ 吸收容量常被用作混合胺溶液的促进剂^[73]。EL HADRI N 等^[74] 研究表明，相较于 MEA 溶液，AMP+2-二甲氨基乙醇 (DMAE)

的水基共混物具有更高的 CO₂ 平衡溶解度和 CO₂ 解吸速率，并且再生所需的热量更低。HE X W 等^[75] 以叔胺-2-二甲氨基-2-甲基-1-丙醇 (2DMA2M1P) 为基础溶剂，分别与乙醇胺 (MEA)、苄胺 (BZA)、2-氨基-2-甲基-1-丙醇 (AMP) 和二乙醇胺 (DEA) 组成 4 种新的双胺水溶液，并对所配制的共混物的 CO₂ 吸收性能和解吸性能进行了实验评价。结果表明，与 5 M MEA 溶液相比，AMP+2DMA2M1P 具有更快 CO₂ 解吸速率和更低再生能耗。

相较于单一胺类吸收剂，复合胺吸收剂含有多种胺成分，提供了更多样化的反应位点。这一特性使得复合胺吸收剂在 CO₂ 吸收速率、负载容量及稳定性方面展现出显著优势 (表 5)。然而，由于混合胺溶液仍以水为主要溶剂，难以避免较高的蒸发潜热。因此，仍需对复合胺吸收剂进行深入研究，以进一步降低再生过程中的能耗，并减少设备腐蚀。

表 5 混合胺吸收剂的研究进展

吸收剂	实验条件		CO ₂ 吸收量/ (mol · mol ⁻¹)	循环容量/ (mol · mol ⁻¹)	再生能耗 (GJ · t ⁻¹)	参考文献
	吸收温度/K	解吸温度/K				
TEPA+MEA	313	368	0.82	0.26	—	[76]
MEA +DMA2P	303 ~ 323	—	0.71	—	—	[77]
MEA/AMP	—	376	0.38	—	2.50	[78]
MEA + AMP	—	373	0.50	—	3.97	[79]
AMP + PZ	318	380	0.55	—	3.40 ~ 4.40	[80]
DEA/ AMP	313	393	0.55	0.48	3.60	[81]
DEA/MDEA	318	393	—	—	4.36	[82]

1.3 第 3 代吸收剂

化学吸收剂的再生能耗主要由解吸反应热、显热和蒸发潜热组成，且分别约占再生总能耗的 56%、16% 和 28%。第 1 代和第 2 代化学吸收剂的组分中，水常被用做作为助溶剂。但水溶液具有较高的比热容和蒸气压，会导致 CO₂ 吸收剂再生过程中较高的升温显热和蒸发潜热。相较于水溶液，有机溶剂具有更低比热容和蒸发焓，能够降低 CO₂ 吸收剂的升温显热和蒸发潜热^[83-84]。因此，采用合适的有机溶剂替代部分或全部水组成少水型吸收剂成为第 3 代化学吸收剂的发展策略。

1.3.1 胺基双相吸收剂

双相吸收剂是指在一定的 CO₂ 负荷下实现 CO₂ 贫富相分离的吸收剂。根据分相特性，双相吸收剂可分为液-固相变吸收剂和液-液相变吸收剂。与传统吸收剂相比，双相吸收剂在再生过程中只需

对 CO₂ 富相进行加热，不仅减少了吸收剂的再生体积，而且减少了水的蒸发潜热，从而有效降低了再生过程中的能量消耗。相较于液-液相变吸收剂，液-固相变吸收剂相分离后 CO₂ 富相流动性较差，会造成严重的管道、泵、换热器堵塞，因此不适于常规化学吸收工艺。

液-液双相吸收剂一般由活性胺和相分离剂组成，其中活性胺多为反应速率较快的伯胺或仲胺，而相分离剂则通常为叔胺或极性较小的有机物。二氧化碳吸收过程中生成的氨基甲酸酯 (R₁R₂NCOO⁻) 显著提升了溶剂的极性。当氨基甲酸酯与相分离剂不相容时，双相吸收剂会因盐析效应而发生相分离。因其低极性，叔胺如 N,N-二乙醇胺 (DEEA)、N,N-二甲基环己胺 (DMCA) 以及五甲基二乙基三胺 (PMDTA) 常被用作相分离剂，从而促使氨基甲酸酯盐析，形成水相与有机

相。PINTO D D D^[85] 提出了一种由 5M DEEA 与 MAPA 混合组成的 CO₂ 吸收剂, 研究发现该溶剂具有较高的 CO₂ 循环吸收能力。在吸收过程中, 吸收剂逐渐分裂为 2 个不混溶的相, ¹³C NMR 表征分析表明, MAPA 主要聚集在富 CO₂ 相中, 而贫 CO₂ 相则以 DEEA 为主。随着 CO₂ 吸收剂逐渐饱和, 下层相中转移的 DEEA 增多, 且下层相的体积明显扩大。随后, 对富 CO₂ 相进行高温再生, 结果显示 DEEA/MAPA 双相吸收剂的再生能耗为 2.2 ~ 2.4 GJ/t 的 CO₂。ZHANG S H 等^[86] 探索出一种新型的 PMDTA 和 DETA 双相溶剂, CO₂ 吸收负荷达 0.613 mol/mol。研究发现, 99.7% 的 CO₂ 吸收产物分布在吸收剂下相中, 占总体积的 57%, 且再生能量降至 2.40 GJ/t CO₂。

有机物理溶剂, 如醚类、醇类和砜类常被用作物理溶剂和相分离剂。LIU F 等^[87] 采用二甘醇二甲醚和亚砜作为分相剂, 开发出基于 AMP/MEA 的双相溶剂, 与质量分数 30 MEA 相比, 该新型双相吸收剂的 CO₂ 吸收能力提升了 69%, 再生能耗降低了 36%。YU J 等^[88] 研发了一种由二乙基三胺 (DETA)、正丁醇和水构成的新型双相吸收剂, 研究表明, 不同质量分数组成的双相吸收剂最大 CO₂ 吸收量可达到 1.27 mol/mol。与质量分数 30 MEA 相比, DETA/正丁醇/水体系的循环容量提高了 47.6%, 再生能耗降低了 39.6%。

上述双相吸收剂均采用水作为助溶剂, 因此在再生过程中无法避免产生较高的显热和蒸发潜热。近年来, 研究者们进一步探索将水完全替换为有机溶剂的相变非水溶剂, 旨在降低吸收剂的显热和潜热。为此, ZHOU X B 等^[89] 提出了一种新型的非水液-液双相溶剂, 成分包括活性胺 AEEA、稀释剂 DMSO 和分相剂 PMDETA。研究表明, 该吸收剂具有高 CO₂ 吸收量 (1.75 mol/mol)。通过 ¹³C NMR 分析和量子计算, 揭示了 AEEA-DMSO-PMDETA 吸收剂的分相机制。结果表明, 大多数 CO₂ 产物呈高极性, 倾向于溶解于高极性的 DMSO, CO₂ 富相中吸收产物占 96.8%。热力学分析显示, AEEA-DMSO-PMDETA 吸收剂的再生能耗降低至 1.66 GJ/t。但使用醇或聚醚作为相分离剂时, 双相吸收剂在 CO₂ 饱和后 CO₂ 富相的黏度会显著增加。这种高黏度在实际运行中可能导致设备结垢和堵塞, 增加分离难度^[90-91]。CO₂ 饱和和吸收剂的黏度与产物之间的氢键有关。为确保非水吸收剂具有较高的 CO₂ 吸收速率和能力, 伯胺常被作为主要成分。

但伯胺基非水吸收剂的 CO₂ 吸收产物 (如伯胺基氨基甲酸酯 (R₁NHCOO⁻) 和质子化伯胺 (R₁NH₃⁺))

之间会形成大量的 N—O···O 和 N—H···H 氢键, 这些分子间氢键网络显著增加了吸收剂的黏度^[92]。相比之下, 仲胺或叔胺在与 CO₂ 反应时的烷基结构会产生空间位阻, 理论上可能减少稳定 N—O···O 或 N—H···H 氢键的形成, 从而避免增加吸收剂黏度^[93]。ZHOU X B 等^[94] 设计了一种低黏性仲胺基非水双相 CO₂ 吸收剂, 并通过实验筛选出仲胺 2-甲基乙醇胺 (MAE) 作为制备低黏度双相溶剂的最佳选择。结果表明, MAE/DMSO/PMDETA 双相吸收剂可实现 0.84 mol/mol 的 CO₂ 吸收量, 并且 CO₂ 富相的黏度仅为 8.87 mPa · s。

为了清晰掌握最新双相吸收剂的研究进展 (表 6), 从实验条件、CO₂ 吸收性能、解吸性能和再生能耗等角度进行总结与对比。可以发现, 与第 1 代和第 2 代吸收剂相比, 双相吸收剂的再生能耗明显降低, 但其 CO₂ 富相的高黏度仍是制约其发展的关键阻碍。因此, 明晰双相吸收剂的黏度影响机理, 研究稀释剂对其 CO₂ 富相黏度的降低作用是未来重要的发展方向。

1.3.2 胺基均相少水吸收剂

相较于双相吸收剂, 均相少水吸收剂避免了复杂的相分离工艺, 并且由于 CO₂ 产物在整个吸收剂中的均匀分布, 在一定程度上降低了饱和吸收剂的黏度。鉴于此, 均相少水吸收剂被认为是具有应用前景的吸收剂。

YU Y S 等^[108] 研究表明, 采用甲醇替代水作为溶剂能显著减少 MEA 溶液的显热, 降低约 24% 的总再生能耗。GUO H 等^[109] 提出了一种由 MEA 和乙二醇醚 2-甲氧基乙醇 (2ME) 组成的均相非水吸收剂体系, 相较于 5.0 M MEA 水溶液, 该吸收剂能够降低约 55% 的再生能耗。BOUGIE F 等^[110] 进一步指出, 这类均相非水吸收剂不仅保持了与 MEA 水溶液相似的 CO₂ 吸收能力和速率, 而且展现出更优异的 CO₂ 解吸性能。虽然上述非水吸收剂能显著降低再生过程中的显热和蒸发潜热, 但仍存在 CO₂ 解吸效率较低、解吸反应热较高和黏度较高的问题。解吸反应热主要取决于所用有机胺的类型。为了保证良好的 CO₂ 吸收性能, 非水吸收剂通常选用具有高 CO₂ 吸收速率和吸收容量的伯胺作为主要成分。但伯胺吸收 CO₂ 后生成的伯胺基氨基甲酸酯具有较高的热稳定性, 致使再生所需的能量显著增加。

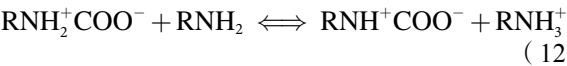
研究表明, CO₂ 与伯胺的反应主要遵循两性离子机制。如式 (11) 所示, 首先, 活性胺 (R₁NH₂) 吸收 CO₂ 形成两性离子; 随后, 该两性离子可与过量的活性胺或叔胺发生质子交换反应式 (12)。解吸过程中的能量消耗主要涉及氨基甲酸酯中 C—N 键和

表 6 液-液双相吸收剂的研究进展

Table 6 Research progress of liquid-liquid biphasic absorbents

吸收剂	实验条件		CO ₂ 吸收量/ (mol · mol ⁻¹)	循环容量/ (mol · mol ⁻¹)	再生能耗 (GJ · t ⁻¹)	313.15 K 下的黏度/ mPa · s,	参考文献
	吸收温度/K	解吸温度/K					
MPA/NHD/H ₂ O	313.15	393.15	1.20	1.14	2.66	—	[95]
2MPRZ/TGBE/H ₂ O	313.15	—	0.79	—	2.59	11.64	[96]
TETA/TMS/H ₂ O	313.15	—	1.87	—	2.36	200.00 ~ 400.00	[97]
DETA/IBA/H ₂ O	313.15	393.15	1.25	0.80	2.42	62.19	[98]
DETA/DEA/DMAC/H ₂ O	313.15	383.15	0.71	0.32	2.19	38.59	[99]
AEEA/1DMA2P/H ₂ O	313.15	393.15	0.51	0.38	1.83	454.50	[100]
MEA/TMEDA/DMSO	313.00	363.00	0.54	0.20	2.29	89.10	[101]
DMAPA/TMS/H ₂ O	313.15	383.15	1.80	1.35	—	10.00 ~ 25.00	[102]
DMAPA/n-PeOH/H ₂ O	303.15	393.15	2.13	1.67	1.36	44.00	[103]
DETA/n-BuOH/H ₂ O	313.15	393.15	1.89	0.83	—	140.25	[104]
[DBAPAH][Im]/H ₂ O	313.00	371.00	1.49	0.9	1.82	—	[105]
MAE/DGM/H ₂ O	313.00	370.00	—	0.33	1.32	25.65	[106]
DETA/DMF/H ₂ O	303.00	373.00	2.57	1.61	—	160.00 ~ 200.00	[107]

C—O 键的断裂以及质子化胺的去质子化过程。由于伯胺基氨基甲酸酯与质子化胺均具有较高的活化能垒，导致均相少水吸收剂的 CO₂ 的解吸效率较低，且在解吸过程中需要更多的能量。



相较于伯胺，仲胺和叔胺对 CO₂ 的吸收能力较弱，但其分子结构与氮原子相连烷基产生的空间位阻作用能够降低 CO₂ 吸收产物的热稳定性，从而促进吸收剂的 CO₂ 解吸。鉴于此，在吸收剂中引入具有位阻效应的仲胺或叔胺可以显著提高非水吸收

剂的 CO₂ 解吸效率以及降低再生过程中的解吸反应热。MA M M 等^[111] 通过热力学分析比较了 DA2MP/PrOH 与 DA2MP/AMP/PrOH 两种不同的非水吸收剂体系，发现含有空间位阻胺 AMP 的吸收剂表现出更低的解吸反应热。SHI H C 等^[112] 的研究指出，通过调控质子从强碱性胺向中或弱碱性胺转移，可以有效地降低吸收剂的解吸反应热。此外，在烷基的位阻作用下，上述 CO₂ 吸收产物之间不易形成稳定的氢键，从而避免了吸收剂黏度的显著增加。相较于第 1 代和第 2 代吸收剂，均相少水吸收剂具有更低的再生能耗（表 7），并且其饱和黏度总体低于双相吸收剂的 CO₂ 富相。

表 7 均相少水吸收剂的研究进展

Table 7 Research progress of homogeneous less water absorbents

吸收剂	实验条件		CO ₂ 吸收量/ (mol · mol ⁻¹)	循环容量/ (mol · mol ⁻¹)	解吸效率/%	再生能耗 GJ/t	黏度 mPa · s, 313.15 K	参考文献
	吸收温度/K	解吸温度/K						
EHA/DMSO	313.00	373.00	0.66	0.64	97.00	—	40.60	[113]
DA2MP/PrOH/EG	313.15	393.15	1.13	1.10	97.35	1.58	9.05	[114]
AEEA/PMDETA/DMSO	313.00	393.00	1.58	1.32	83.55	—	10.00 ~ 20.00	[115]
AMP/AEEA/NMP	313.15	393.15	0.74	0.62	—	1.89	70.27	[116]
EHA/DEGDEE	313.00	373.00	0.55	0.54	99.00	2.87	24.70	[117]

AEEA/MDEA/DMSO	313.15	393.15	0.95	0.87	93.50	1.72	13.12	[118]
----------------	--------	--------	------	------	-------	------	-------	-------

1.3.3 离子液体

离子液体 (ILS) 是由阴阳离子构成的熔融盐，在室温下呈液态，具有热稳定性高、蒸气压低和结构可调的特点。与有机胺相比，离子液体的挥发性与腐蚀性较弱，且具有易再生和再生能耗低的优点，被称为环境友好型吸收剂^[119]。为了获得更加优异的 CO₂ 吸收性能，研究者们通常在离子液体中引入氨基基团来制备功能化 ILS。

BATES E D^[120] 通过引入 3-溴丙胺氢溴化物的方式制备了带有氨基基团的 1-丙氨基-3-丁基咪唑四氟硼酸盐 ([Apbim][BF₄])。该功能化的 ILS 与 CO₂ 反应遵循与有机胺溶液类似的两性离子机理。实验结果表明，在常压条件下，该功能化的 ILS 可实现 0.5 mol/mol 的 CO₂ 吸收量，吸收产物以氨基甲酸盐的形式存在。此外，稳定性测试结果表明，[Apbim][BF₄] 经 5 次 CO₂ 吸收-解吸循环后仍能保持初始 CO₂ 吸收容量，展现出良好的循环稳定性。相关研究指出，当 ILS 具有相同的阳离子时，阴离子上的氨基基团对 CO₂ 吸收性能的影响比阳离子更大^[121]。SISTLA Y S^[122] 选择丁基甲基咪唑 ([bmim]⁺) 为阳离子，以不同氨基酸为阴离子制备了多组 ILS，研究了阴离子对离子液体 CO₂ 吸收性能的影响。结果表明，离子液体的 CO₂ 吸收负荷与阴离子中有效氨基基团的个数有关。

虽然氨基功能化的离子液体展现出较好的吸收性能，但较高的黏度仍然是制约其工业化应用的阻碍。一方面，在 ILS 合成过程中，分子间会形成复杂的氢键网络，导致吸收剂本身具有较高的黏度。另一方面，随着吸收反应的进行，氨基基团与 CO₂ 的反应产物会进一步增加分子间氢键密度，从而大幅增加 ILS 的饱和黏度。GOODRICH^[123] 研究了 [P66614][Gly] 在 CO₂ 吸收前后的黏度变化规律。结果表明，[P66614][Gly] 在 CO₂ 吸收后液体呈现胶状，且黏度由 360 mPa·s 激增到 17 000 mPa·s。相较于非水基离子液体，ILS 水溶液具有更低的饱和黏度，但由于水的高比热容和蒸气压，导致 ILS 水溶液在再生过程中具有较高的升温显热和蒸发潜热。因此，如何平衡 ILS 吸收剂的再生能耗和饱和黏度，是实现离子液体工业化应用的关键。

近年来，研究者提出采用 ILS-胺和 ILS-醇混合的方式来制备离子型双相吸收剂，而低黏度低能耗的双相 ILS 也被认为是具有应用前景的新型 CO₂ 吸收剂。张亮亮^[124] 将分相剂 NPA 引入二乙烯三胺-苯三唑 ([DETAH][Tz]) 水溶液构建了新型的双相离

子液体吸收剂，并研究了其 CO₂ 捕集性能。结果表明，该吸收剂富相的 CO₂ 吸收容量为 1.64 mol/mol，占总吸收量的 96%，而富相体积仅占吸收剂总体积的 45%。热力学分析表明，[DETAH][Tz]/NPA 的再生能耗仅为 1.99 GJ/t，相较于 [DETAH][Tz] 降低了 29.93%。离子液体的再生能耗明显低于第 1 代和第 2 代吸收剂（表 8），展现出其巨大的节能潜力。但离子液体依然存在饱和黏度较高的问题，因此，通过优化吸收剂配方降低离子液体的饱和黏度是未来研究的重要方向。

1.3.4 纳米流体吸收剂

纳米流体吸收剂是指将少量纳米颗粒均匀分散到基础流体中形成的稳定液体。基础流体通常采用不同的物理或化学溶剂，纳米颗粒主要包括金属颗粒、金属氧化物颗粒、氧化石墨烯、碳纳米管和二氧化硅颗粒等^[137-138]。相较于传统有机胺吸收剂，纳米颗粒可以显著增加 CO₂ 与溶剂之间的接触面积，并利用动力效应增强纳米流体在 CO₂ 捕集过程中的传热传质，从而提高吸收剂的 CO₂ 吸收速率和 CO₂ 解吸速率^[139]。此外，利用有机胺或亲疏水基团对纳米颗粒进行改性，也可以提高纳米流体吸收剂 CO₂ 选择性和 CO₂ 吸收能力。

首先，研究者探究了不同种类纳米颗粒和基础流体对吸收剂 CO₂ 捕集性能的影响。RAHMATMAND B^[140] 选择纯水为基液，采用 SiO₂、Al₂O₃、Fe₃O₄ 和碳纳米管 (CNTs) 等纳米颗粒配制了不同纳米流体吸收剂，并对比研究了它们的 CO₂ 吸收性能。结果表明，与纯水相比，所有纳米流体吸收剂均表现出较高的 CO₂ 吸收性能，CO₂ 负载量分别提高了 21%、18%、24% 和 34%。此外，将碳纳米管分别分散到 MDEA 和 DEA 溶液中，考察了不同种类基液对纳米流体吸收剂 CO₂ 吸收性能的影响。结果表明，碳纳米管对 MDEA 的 CO₂ 吸收性能具有更为显著的提升作用，其 CO₂ 负载量提高了 23%。为了进一步提高 CO₂ 的吸收性能，IRANI V 等^[141] 制备了氧化石墨烯/MDEA 纳米流体吸收剂。结果表明，当质量分数 40% 的 MDEA 溶液中引入质量分数 0.1% 的氧化石墨烯时，纳米吸收剂的 CO₂ 吸收率提高了 9.1%。一方面，是因为氧化石墨烯表面的高表面积增强了 CO₂ 吸收过程的传质系数。另一方面，OH 基团为 CO₂ 的吸收提供了大量的活化位点。

在上述研究基础上，研究者发现对纳米粒子进行表面功能化改性可以改善纳米粒子与基液的相互作用，从而提高纳米流体 CO₂ 捕集性能。纳米流体

表 8 离子液体吸收剂的研究进展

Table 8 Research progress of ionic liquid absorbents

吸收剂	实验条件		CO ₂ 吸收量	循环容量/ (mol·mol ⁻¹)	再生能耗/ (GJ·t ⁻¹)	313.15 K下的黏度/ (mPa·s)	参考文献
	吸收温度/K	解吸温度/K					
[TEPAH][CPL]/EG/DGDE	313.15	393.15	1.88 mol/mol	1.20	1.88	—	[125]
[DETA][3HPyr]/DGME/H ₂ O	303.00	383.00	1.10 mol/mol	0.90	1.77	28.10	[126]
AEEA-DEEA-[BMIM][BF ₄]	298.00	393.00	1.24 ~ 2.57 mol/L	—	2.06	221.86	[127]
[DETAH][2-Br-PhO]-PEG200	293.00	363.00	1.44 mol/mol	—	—	300.00	[128]
[TEPAH][Lys]/NPA/H ₂ O	313.15	393.15	2.93 mol/mol	1.61	2.6	8.06	[129]
DADPA/MDEA/TMS/[BMIM][NTf ₂]	313.15	393.15	1.97 mol/mol	—	2.39	250.00	[130]
[N ₂₂₂₂][1,2,4-Triz]/N-MI	313.15	353.15	0.12 g/g	0.11 g/g	1.29	—	[131]
MEA-[BMIM][NTf ₂]-sulfolane	303.15	383.15	0.58 mol/mol	—	—	—	[132]
[DETA]Lys/NMP/H ₂ O	303.00	393.00	4.78 mol/L	—	1.89	484.00	[133]
DBN-EG/NHD	303.00	371.00	2.84 mol/mol	—	1.66	—	[134]
[DETA][1-MI]/DMF/H ₂ O	303.00	393.00	2.06 mol/L	1.20	1.40	285.00	[135]
[DMAPA][TZ]/NHD	303.00	373.00	1.14 mol/mol	—	1.39	70.70	[136]
[DMAPA][TZ]/PC	303.00	373.00	0.95 mol/mol	—	1.59	46.80	[136]

的 CO₂ 捕集效率和 CO₂ 负载能力取决于改性后官能团的类型和数量。RAHIMI K 等^[142] 以 MDEA 为基液，考察了浓硫酸处理和胺功能化的多壁碳纳米管对纳米流体吸收剂 CO₂ 吸收率的影响。结果表明，胺功能化的多壁碳纳米管在 MDEA 基纳米流体中表现出更优异的 CO₂ 吸收性能。这是因为经过强酸处理的多壁碳纳米管会在侧壁生成较多的羧基，相较于胺基，羧基具有较强的亲水性，而水分子与纳米颗粒表面的黏附会降低 CO₂ 吸收的活性表面，从而降低了纳米流体的 CO₂ 负载量。

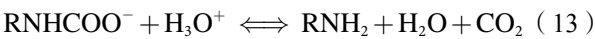
近年来，通过外加电磁场来影响纳米流体 CO₂ 捕集性能的研究得到了广泛的关注。KARIMI DARVANJOOGHI M H 等^[143] 探究了在交流和直流磁场作用下 Fe₃O₄/H₂O 纳米流体的 CO₂ 吸收性能。结果表明，施加外部磁场提高了纳米流体的 CO₂ 吸收量，并且 CO₂ 在纳米流体中的传质速率和溶解度随着外加磁场强度的增加而增加。此外，当交流磁场强度和直流磁场强度分别为 350 Gs 和 720 Gs 时，纳米流体的传质系数和传质速率几乎相等。这表明交流磁场对纳米流体的 CO₂ 吸收性能具有更加明显的提升作用。这归因于施加交流磁场时，Fe₃O₄ 纳米颗粒的布朗运动增加了气液界面上的不稳定状态。而直流磁场会增加纳米粒子在气液界面上的聚集程度，从而降低了活性表面对 CO₂ 吸收性能的影响。

综上所述，尽管将纳米颗粒分散在弱碱或强碱

流体中可以提高吸收剂的 CO₂ 捕集性能，但由于纳米流体吸收剂不稳定，颗粒容易发生团聚，吸收剂循环使用性较差，因此距离工业化应用还有一定的距离。

1.4 化学吸收剂+催化剂

富胺溶液解吸时较高的解吸反应热需求主要受到氨基甲酸酯分解以及质子化胺 H 质子转移的影响。如式（13）、（14）所示，RNHCOO⁻ 中 C—N 键的断裂以及 RH₂⁺ 中 H 质子的转移。其中，C—N 键的断裂过程为吸热反应，需要较高的解吸温度。而 RNH₂⁺ 在碱性溶液中转移质子的能力有限。鉴于此，为 CO₂ 解吸反应提供大量 H 质子成为降低解吸反应热与温度的有效途径。相较于水或有机溶剂，固体酸催化剂具有较多的酸性位点，它更易为 CO₂ 的解吸反应提高大量的 H 质子，且更易从 RH₂⁺ 中获得 H 质子，从而促进氨基甲酸酯的分解。因此，引入固体酸催化剂可以提高 CO₂ 解吸速率，并降低解吸温度。近年来，众多研究者聚焦于设计与筛选高比表面积、多酸性位点以及高稳定性的固体酸催化剂。而固体酸催化剂对 CO₂ 解吸过程的提升作用主要取决于其自身的物理化学性质。



固体酸催化剂的 CO₂ 解吸性能评价主要体现于 CO₂ 解吸温度、CO₂ 解吸速率、CO₂ 解吸量以及

相对热负荷等方面（表 9）。近年来，有关催化解吸的研究主要集中于开发与设计新型催化剂以提升 MEA 水溶液的 CO₂ 解吸性能，以及降低其再生温度（353 ~ 363 K）。但由于 MEA 溶液自身具有较高的再生能耗，催化剂引入后对其能耗降低的效果有限，并不能达到商业化运行的能耗要求。除了将催化剂引入 MEA 溶液，通过文献梳理，总结了催化剂对混合胺溶液再生能耗和温度的影响。从表 9 可以看出，混合胺溶液+催化剂组合的再生温度降低至 358 ~ 371 K，且再生能耗降低至 1.06 ~ 1.41 GJ/t，接近于达到商业化发展的能耗阈值（1 GJ/t）。根据吸收剂的发展现状，相较于 MEA 溶液与混合胺溶

液，第 3 代吸收剂的再生能耗具有明显的降低趋势，但其再生温度依然尚处于较高范围（373 ~ 393 K），这同样限制了新型吸收剂再生能耗的进一步降低。为了实现化学吸收剂低温、低能耗的 CO₂ 捕集目标，研究新型吸收剂与催化剂的协同作用效果与再生能耗变化趋势成为关键。目前，将催化剂应用于新型吸收剂并探究其对新型吸收剂再生能耗与温度影响的研究十分有限。鉴于此，在催化剂研发基础上，研究催化剂对第 3 代吸收剂再生温度与再生能耗的降低作用是进一步降低碳捕集能耗的必要举措。

表 9 CO₂ 吸收剂+固体酸催化剂的研究进展

Table 9 Research progress of CO₂ absorbents + solid acid catalysts

吸收剂	催化剂	解吸温度/K	解吸速率 提升率/%	解吸量提升率/%	相对（MEA溶液） 热负荷/%	再生能耗/ （GJ·t ⁻¹ ）	参考文献
MEA	V ₂ O ₅	359	28	50 ~ 95	44.00	—	[144]
MEA	HZSM-5	355	33	31	70.80	—	[145]
MEA	Ni/Fe@COF	361	114	30	42.45	—	[146]
MEA	ATP	361	54 ~ 57	48 ~ 50	—	—	[147]
BEA/AMP	H-ZSM-5	371	54 ~ 57	48 ~ 50	68.00	1.41	[148]
MEA/BEA/DEEA	HND-8	358	—	—	—	1.06	[149]
MEA/BEA/AMP	γ-Al ₂ O ₃ /H-ZSM-5	363	—	—	—	1.15	[150]
MEA/MDEA/PZ	h - β	363	—	—	—	1.19	[150]
MEA/AMP/Z	H-ZSM-5	363	—	—	—	1.34	[150]

2 CO₂ 捕集性能综合分析

2.1 CO₂ 吸收性能

化学吸收剂的 CO₂ 吸收量是评价其捕集效能的核心参数。为了清晰对比各代吸收剂 CO₂ 吸收性能的差异及变化趋势，根据表 1—9 中数据绘制了不同吸收剂的 CO₂ 吸收量与其分布关系图。如图 2a、2b 所示，第 1 代吸收剂（单胺/氨水）因反应位点单一，CO₂ 吸收量普遍偏低，在 0 ~ 0.5 mol/mol 内占比为 56.3%。而氨基酸盐通过有机胺功能化改性，负载量显著提升（0.5 ~ 1.0 mol/mol 占比 31.3%）。相较于单一组分胺溶液，第 2 代混合胺体系利用多胺协同效应，CO₂ 负载量集中于 0.5 ~ 1.0 mol/mol（占比 66.7%）。第 3 代少水型吸收剂（如胺基双相体系、离子液体）因高活性位点密度与低溶剂化效应，负载量跃升至 1.0 ~ 2.0 mol/mol（占比 51.9%），部分体系突破 2.0 mol/mol（占比 11.1%）。上述对比印证了吸收剂设计从“单一反

应机制”向“多相协同”的跨越。

然而，高负载量通常伴随吸收剂体系黏度的非线性增长，导致传质效率下降与工程能耗上升。因此，在提高化学吸收剂 CO₂ 吸收量时，关注吸收剂黏度的变化同样是决定其能否实现工业化运行的必要条件。

2.2 黏度

基于溶剂体系与吸收容量差异，各代吸收剂黏度行为呈现显著代际特征。第 1 代（MEA 等水基单胺）与第 2 代（混合胺水溶液）因以水为主溶剂且 CO₂ 负载量较低（通常 <1.0 mol/L），吸收后黏度多低于 50 mPa·s，利于流体输送但捕集效率受限。第 3 代少水型吸收剂（如胺基双相/均相体系、离子液体）通过降低含水量（质量分数 <20%）显著提升 CO₂ 负载（1.0 ~ 2.5 mol/L），但伴随黏度急剧上升。如图 3 所示，胺基双相吸收剂 CO₂ 富集相黏度呈双峰分布，黏度位于 0 ~ 50 mPa·s 区间的占比为 41.6%，100 ~ 300 mPa·s 区间的占比为 41.7%，

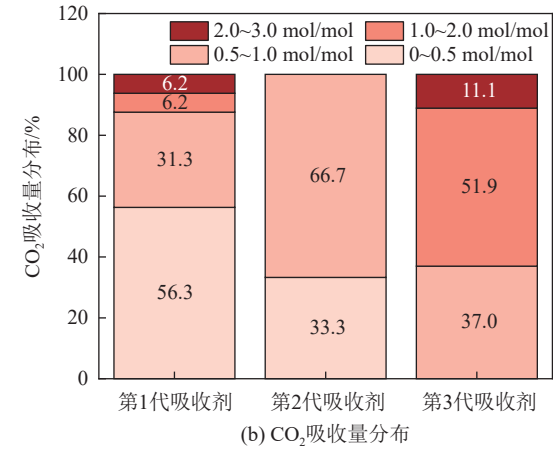
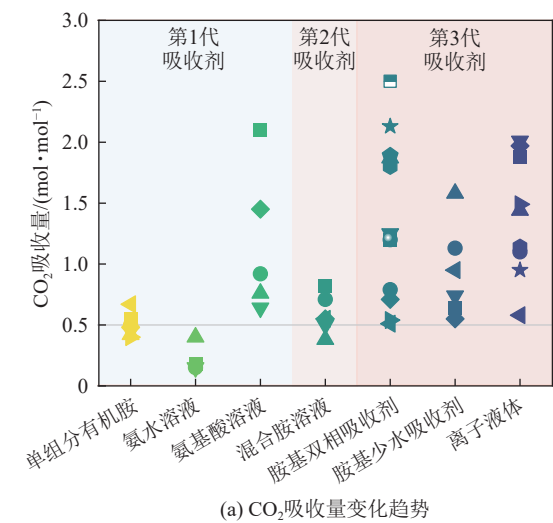


图 2 各代化学吸收剂的 CO₂ 吸收量变化趋势和 CO₂ 吸收量分布 (数据来源文献 [24-31, 56-60, 67-71, 76-82, 113-118, 95-107, 125-136])

Fig. 2 CO₂ absorption capacity trend and CO₂ absorption capacity distribution of various chemical absorbents (Data sources literature [24-31, 56-60, 67-71, 76-82, 113-118, 95-107, 125-136])

而胺基少水均相体系因残留水分塑化效应，黏度集中于低区间（0~50 mPa·s 占比 83.3%）。值得注意的是，离子液体虽具低挥发性优势，但其高黏度特性突出，黏度位于 200~300 mPa·s 区间的占比为 50%，导致气液传质阻力倍增及管道压损风险。实际运行数据显示，黏度超过 100 mPa·s 时，填料塔内液泛风险上升 30%，且吸收剂在管道内的流速需降低至设计值的 60% 以下以避免堵塞。因此，在工业碳捕集场景下，高黏度将直接限制吸收塔喷淋覆盖率与溶剂循环通量。

针对新型 CO₂ 吸收剂因黏度较高导致的传质效率受限、能耗增加等问题，当前研究聚焦于分子结构优化、复合体系设计与外场强化等方向。在分子层面，通过调控吸收剂官能团与分子间作用力可显

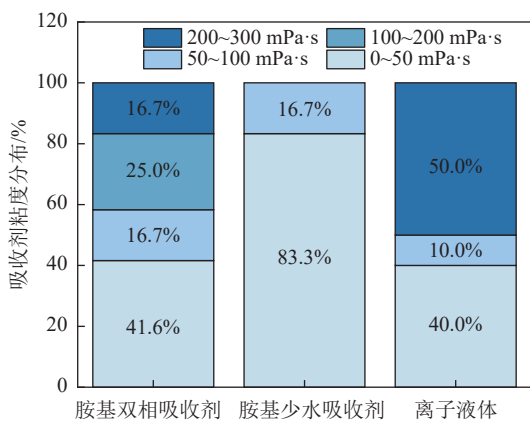


图 3 第三代化学吸收剂的黏度分布 (数据来源文献 [95-107, 113-118, 125-136])

Fig. 3 Viscosity distribution of third generation chemical absorbents (Data sources literature [95-107, 113-118, 125-136])

著降低黏度。例如，在胺基吸收剂中引入羟基或醚键等柔性基团，可削弱分子间氢键网络的形成；针对离子液体，选择短链烷基取代阳离子或采用氟化/磺酸基修饰阴离子，可减少静电相互作用并增强流动性。此外，开发复合吸收体系是重要突破口，将低黏度溶剂（如乙二醇醚、低分子量聚醚）与胺类化合物共混，或通过多孔载体负载离子液体，可借助界面效应降低体系整体黏度，同时维持高 CO₂ 吸附容量。外场辅助（如超声、微波）可进一步打破局部分子聚集，改善传质动力学。

2.3 挥发性

挥发性是影响吸收剂性能的重要因素。吸收剂较高的挥发性会造成污染物的排放量以及循环过程中吸收剂的消耗量显著增加。针对第 1 代吸收剂，单组分有机胺溶液与氨水溶液具有低密度、低沸点和高压蒸气的特点，因而在 CO₂ 捕集过程中会造成过量的有机胺和氨的逸出。相比之下，氨基酸盐溶液与无机盐溶液的蒸气压较低，可以有效降低其在 CO₂ 吸收和解吸过程的挥发。相较于第 1 代单组分有机胺溶液，第 2 代混合胺溶液将不同物化性质的有机胺混合，对其挥发性的降低具有一定的作用，但总体效果有限。第 3 代吸收剂的挥发性得到显著的降低。这归因于一些辅助溶剂如有机醇的加入增加了吸收剂的表面张力，从而增加分子之间的表面势能和吸引力，降低了有机胺的挥发。

针对有机胺基 CO₂ 吸收剂的挥发性挑战，当前策略集中于分子结构改性（如空间位阻胺、大分子离子液体）、溶剂复配（低挥发性共溶体系/质子惰性稀释剂）、相变调控（两相/温敏体系）协同抑制胺逃逸。未来需融合分子模拟与高通量筛选，设计动态共价键/超分子作用增强的多功能复合体系，兼

顾低挥发、高吸附容量及传质效率。

2.4 抗降解性

吸收剂降解主要包括氧化降解与热降解，其引发的活性组分损失会显著降低 CO₂ 捕集性能。基于反应位点差异，有机胺降解速率常数通常为伯胺 > 仲胺 > 叔胺（伯胺 α-H 更易引发氧化链式反应）。第 1 代单一组分吸收剂（如 MEA、氨基酸盐）因抗氧化基团缺失，抗降解性较差；第 2 代混合胺通过引入叔胺（如 MDEA）或位阻胺（AMP），利用组分协同抑制氧化副反应；相较于第 1 代和第 2 代吸收剂，第 3 代吸收剂中有机胺的组分以多氨基物质为主，其通过分子内伯/仲/叔胺基团的多位点分布，进一步阻断降解路径，并借助低水环境减少热降解产物累积。

针对有机胺基 CO₂ 吸收剂的降解问题，当前突破路径包括开发含抗氧化基团的叔胺/环状胺、氟化链修饰离子液体）、降解抑制剂耦合（添加抗氧化剂/金属钝化剂延缓氧化）及动态化学调控（构建可逆共价键促进降解产物再生）。未来需结合 DFT 计算与原位表征揭示降解机制，并优化吸收-再生循环中 CO₂ 富集相分离策略，实现吸收剂长效稳定运行。

2.5 再生能耗

目前，化学吸收剂较高的再生能耗仍是制约燃烧后 CO₂ 捕集系统大规模商业化应用的阻碍。因此，明晰各类化学吸收剂再生能耗的降低潜力至关重要。基于表 1 ~ 9 相关文献中的数据统计，绘制了各类化学吸收剂以及吸收剂+催化剂组合的再生能耗发展趋势。如图 4a 所示，第 1、第 2、第 3 吸收剂以及混合胺溶液+催化剂的再生能耗总体呈下降趋势。

第 1 代水基吸收剂（如 MEA、氨水）因高水含量（质量分数 > 70%）导致蒸发潜热占比超 50%，再生能耗达 2.9 ~ 5.3 GJ/t。且如图 4b 所示，再生能耗在 3.0 ~ 4.0 GJ/t 内的占比高达 65%。第 3 代混合胺（如 MEA-MDEA）通过热力学协同将能耗降至 2.5 ~ 4.4 GJ/t，但水溶剂主导体系仍限制其突破，其再生能耗高于 3 GJ/t 的吸收剂占统计数据的 80%。鉴于上述原因，第 3 代少水型吸收剂（双相体系、离子液体等）通过降低水含量（质量分数 < 30%）与分相富集策略，将能耗显著下降至 1.3 ~ 3.0 GJ/t。且其再生能耗在 1.0 ~ 2.0 GJ/t 内的占比高达 58.3%。除了新型吸收剂的研发，进一步耦合催化剂可突破传统热再生限制。可以发现，第 2 代吸收剂混合胺溶液+催化剂的组合能够将再生能耗降低至约 1 GJ/t CO₂，接近实现化学吸收法碳捕集商业化运行的能

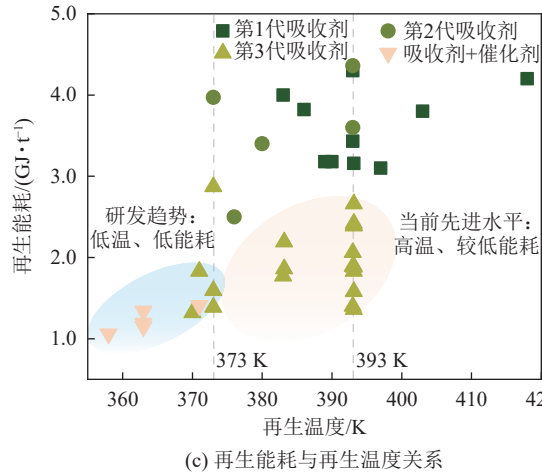
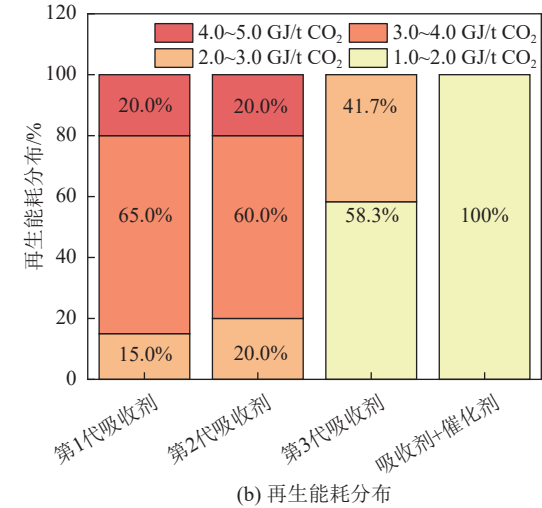
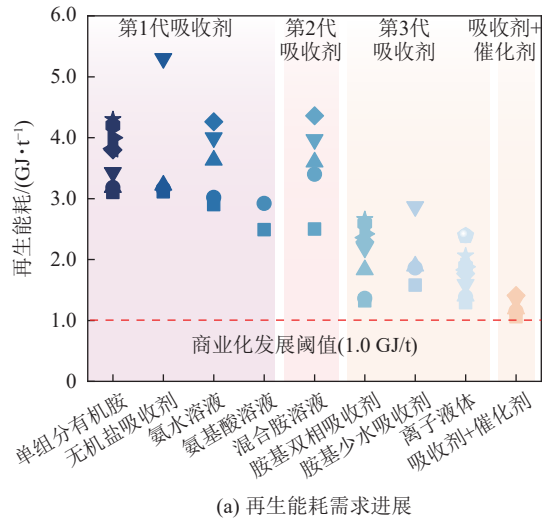


图 4 各类化学吸收剂的再生能耗需求进展、再生能耗分布和再生能耗与再生温度关系 (数据来源文献 [24-31, 41, 56-60, 67-71, 76-82, 95-107, 113-118, 125-136, 148-150])

Fig. 4 Regeneration energy demand progress; regeneration energy distribution; regeneration energy versus regeneration temperature of various chemical absorbents (Data sources literature [24-31, 41, 56-60, 67-71, 76-82, 95-107, 113-118, 125-136, 148-150])

耗阈值。此外，由图 4c 可知，目前，第 1 代、第 2 代和第 3 代吸收剂的再生温度均处于较高水平（373 ~ 393 K），这是限制其再生能耗进一步降低的主要因素。可以发现，引入催化剂可以将低吸收剂再生温度降低至 358 ~ 373 K，从而进一步降低吸收剂的再生能耗。然而，目前催化剂的性能评价主要基于 MEA 等单一组分有机胺溶液，将其应用于混合胺与第 3 代新型吸收剂的研究尚少。由此可见，探究催化剂对第 3 代吸收剂再生温度与再生能耗的降低作用对实现碳捕集能耗的大幅降低具有重要指导意义。

针对化学吸收剂再生能耗的持续优化，未来技术突破应聚焦于以下方面。一是分子-催化剂协同设计，开发动态共价键调控的低水/无溶剂吸收剂，耦合高活性催化剂，实现解吸反应热与蒸发潜热的双重削减。二是外场-工艺耦合创新，集成光热/电化学驱动再生技术，通过定向传热与相变强化突破显热壁垒，推动能耗逼近理论极限。三是构建涵盖“吸收-解吸-降解”全周期的材料数据库，定向筛选低能耗、抗降解的跨代复合体系。

3 结 语

化学吸收剂的代际发展始终围绕“高效捕集-低耗再生-长效稳定”核心矛盾展开。第 1 代吸收剂再生能耗高（3 ~ 4 GJ/t）、挥发性强且易氧化降解；第 2 代混合胺溶液通过复配伯胺（高活性）与叔胺（低再生热）降低能耗（2.5 ~ 3.5 GJ/t），但仍受限于混合体系黏度突变与部分挥发；第 3 代（少水型：胺基双相/均相、离子液体等）利用分相行为（能耗<2.5 GJ/t）和低蒸气压抑制挥发，但高黏度（>100 mPa·s）与复杂降解路径限制其规模化；吸收剂+催化解吸通过引入纳米催化剂（如 MOFs 负载金属颗粒）原位催化 CO₂ 加氢或碳酸盐分解，实现解吸能耗<1.5 GJ/t，但面临催化剂失活与反应-吸收条件耦合难题。经过几代发展，吸收剂已经在能耗降低、挥发性控制等各方面取得了很大进步，但仍存在着高负载-低能耗-低黏性-低降解难协同、解吸温度较高等难题，解决上述问题需要多学科交叉，聚焦突破：φ 吸收剂量化评价及数据库，开发人工智能模型，助力解决高负载-低能耗-低黏度-低降解的吸收剂研发；κ 低热耗、低再生温度的新型吸收剂研发，及其与低品位热能（如工业废热、低温太阳能）利用工艺的结合，以进一步降低能耗成本；λ 外场-催化协同工艺，集成光/电热再生技术，进一步从系统层面降低捕集能耗；μ 通过开发含抗氧化基团的叔胺/环状胺、氟化链修

饰离子液体、降解抑制剂耦合及动态化学调控等多种手段加强抗降解性，实现吸收剂原位再生和长期稳定运行。

未来建议包括：φ 建立涵盖全生命周期（吸收-再生-降解）的标准化评价体系和全周期的材料数据库，定向筛选低能耗、抗降解的跨代复合体系，加速第 3 代吸收剂的大型工程示范验证；κ 着力推动低温再生吸收剂的开发与应用，加强低品位热能利用与 CO₂ 再生工艺的结合，从系统层面降低捕集能耗和成本；λ 推动能源-材料-工艺-装备多学科交叉创新，建立全链条、跨行业的交叉合作机制，切实推动碳捕集示范项目的规模化发展。

参考文献 (References) :

[1] LI S, ZHANG Z. Prospects for direct air capture[J]. *The Innovation Energy*, 2024, 1(1): 100010.

[2] EKINCI D. Sensitive Approaches for Global Climate Change[J]. *EPRA Int. J. Clim. Resour. Econ. Rev.*, 2024: 26-36.

[3] DJALANTE R. Key assessments from the IPCC special report on global warming of 1.5 °C and the implications for the Sendai framework for disaster risk reduction[J]. *Progress in Disaster Science*, 2019, 1: 100001.

[4] WANG F, HARINDINTWALI J D, YUAN Z Z, et al. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality[J]. *The Innovation*, 2021, 2(4): 100180.

[5] CHEN J M. Carbon neutrality: Toward a sustainable future[J]. *Innovation*, 2021, 2(3): 100127.

[6] LIU H J, WERE P, LI Q, et al. Worldwide status of CCUS technologies and their development and challenges in China[J]. *Geofluids*, 2017, 2017: 6126505.

[7] KANNICHE M, GROS-BONNIVARD R, JAUD P, et al. Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(1): 53-62.

[8] DINCA C, SLAVU N, BADEA A. Benchmarking of the pre/post-combustion chemical absorption for the CO₂ capture[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2018, 91(3): 445-456.

[9] ZHANG S H, SHEN Y, WANG L D, et al. Phase change solvents for post-combustion CO₂ capture: Principle, advances, and challenges[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 876-897.

[10] LUIS P. Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives[J]. *Desalination*, 2016, 380: 93-99.

[11] KHOSHRAFTAR Z, GHAEMI A, MOHSENI SIGAROODI A H. The effect of solid adsorbents in Triethanolamine (TEA) solution for enhanced CO₂ absorption rate[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2021, 47(10): 4349-4368.

[12] JIANG W S, LUO X, GAO H X, et al. A comparative kinetics study of CO₂ absorption into aqueous DEEA/MEA and DMEA/MEA blended solutions[J]. *AIChE Journal*, 2018, 64(4):

- 1350–1358.
- [13] ZHOU X B, LIU F, LV B H, et al. Evaluation of the novel biphasic solvents for CO₂ capture: Performance and mechanism[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 60: 120–128.
- [14] BORHANI T N G, AZARPOUR A, AKBARI V, et al. CO₂ capture with potassium carbonate solutions: A state-of-the-art review[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 41: 142–162.
- [15] FENG Q, SUN B C, WANG L, et al. Enhancement of CO₂ absorption into K₂CO₃ solution by cyclohexane in a high-shear reactor[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(7): 6628–6633.
- [16] WANG F, ZHAO J, MIAO H, et al. Current status and challenges of the ammonia escape inhibition technologies in ammonia-based CO₂ capture process[J]. *Applied Energy*, 2018, 230: 734–749.
- [17] YU H. Recent developments in aqueous ammonia-based post-combustion CO₂ capture technologies[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, 26(11): 2255–2265.
- [18] WANG Y, ZHAO L, OTTO A, et al. A review of post-combustion CO₂ capture technologies from coal-fired power plants[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 650–665.
- [19] MANIANGLUNG C, PACIA R M, KO Y S. Synergistic effect of blended primary and secondary amines functionalized onto the silica on CO₂ capture performance[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2019, 36(8): 1267–1273.
- [20] AGHEL B, JANATI S, WONGWISES S, et al. Review on CO₂ capture by blended amine solutions[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 119: 103715.
- [21] LIU S, GAO H X, HE C, et al. Experimental evaluation of highly efficient primary and secondary amines with lower energy by a novel method for post-combustion CO₂ capture[J]. *Applied Energy*, 2019, 233: 443–452.
- [22] JOU F Y, MATHER A E, OTTO F D. The solubility of CO₂ in a 30 mass percent monoethanolamine solution[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1995, 73(1): 140–147.
- [23] PUXTY G, ROWLAND R, ATTALLA M. Comparison of the rate of CO₂ absorption into aqueous ammonia and monoethanolamine[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(2): 915–922.
- [24] MUCHAN P, NARKU-TETTEH J, SAIWAN C, et al. Effect of number of amine groups in aqueous polyamine solution on carbon dioxide (CO₂) capture activities[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 184: 128–134.
- [25] SAKWATTANAPONG R, AROONWILAS A, VEAUWAB A. Behavior of reboiler heat duty for CO₂ capture plants using regenerable single and blended alkanolamines[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(12): 4465–4473.
- [26] GEUZE BROEK F H, SCHNEIDERS L H J M, KRAAIJVELD G J C, et al. Exergy analysis of alkanolamine-based CO₂ removal unit with AspenPlus[J]. *Energy*, 2004, 29(9-10): 1241–1248.
- [27] LI K K, LEIGH W, FERON P, et al. Systematic study of aqueous monoethanolamine (MEA)-based CO₂ capture process: Techno-economic assessment of the MEA process and its improvements[J]. *Applied Energy*, 2016, 165: 648–659.
- [28] XUE B Y, YU Y M, CHEN J, et al. A comparative study of MEA and DEA for post-combustion CO₂ capture with different process configurations[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2017, 4(1): 15–24.
- [29] WARUDKAR S S, COX K R, WONG M S, et al. Influence of stripper operating parameters on the performance of amine absorption systems for post-combustion carbon capture: Part II. Vacuum strippers[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 16: 351–360.
- [30] DAVE N, DO T, PUXTY G, et al. CO₂ capture by aqueous amines and aqueous ammonia—A Comparison[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 949–954.
- [31] VAN WAGENER D H, ROCHELLE G T. Stripper configurations for CO₂ capture by aqueous monoethanolamine and piperazine[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 1323–1330.
- [32] RAMAZANI R, MAZINANI S, HAFIZI A, et al. Solubility and absorption rate enhancement of CO₂ in K₂CO₃[J]. *Separation Science and Technology*, 2016, 51(2): 327–338.
- [33] VALLURI S, KAWATRA S K. Use of frothers to improve the absorption efficiency of dilute sodium carbonate slurry for post combustion CO₂ capture[J]. *Fuel Processing Technology*, 2021, 212: 106620.
- [34] QI G J, LIU K, FRIMPONG R A, et al. Integrated bench-scale parametric study on CO₂ capture using a carbonic anhydrase promoted K₂CO₃ solvent with low temperature vacuum stripping[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(48): 12452–12459.
- [35] GHOSH U K, KENTISH S E, STEVENS G W. Absorption of carbon dioxide into aqueous potassium carbonate promoted by boric acid[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1075–1081.
- [36] ZHAO C W, GUO Y F, LI C H, et al. Removal of low concentration CO₂ at ambient temperature using several potassium-based sorbents[J]. *Applied Energy*, 2014, 124: 241–247.
- [37] LI Q W, WANG Y, AN S L, et al. Kinetics of CO₂ absorption in concentrated K₂CO₃/PZ mixture using a wetted-wall column[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(9): 7496–7502.
- [38] ZHOU S, REN J J, XI H Y, et al. Experimental study on carbon capture characteristics of marine engine exhaust gas by activated potassium carbonate absorbent[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(33): 80416–80431.
- [39] THEE H, NICHOLAS N J, SMITH K H, et al. A kinetic study of CO₂ capture with potassium carbonate solutions promoted with various amino acids: Glycine, sarcosine and proline[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 20: 212–222.
- [40] LI Y F, WANG L A, TAN Z C, et al. Experimental studies on carbon dioxide absorption using potassium carbonate solutions with amino acid salts[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 219: 47–54.
- [41] HARKIN T, HOADLEY A, HOOPER B. Using multi-objective optimisation in the design of CO₂ capture systems for retrofit to coal power stations[J]. *Energy*, 2012, 41(1): 228–235.

- [42] GUO D F, GAO S W, CAI M. Effect of borate catalysis on CO₂ absorption by potassium carbonate solutions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(11): 1741–1747.
- [43] CULLINANE J T, ROCHELLE G T. Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(17): 3619–3630.
- [44] SCHÄFER D, PÉREZ-SALADO KAMPS Á, RUMPF B, et al. An experimental investigation of the influence of vanadium pentoxide on the solubility of CO₂ in aqueous solutions of potassium carbonate[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2012, 57(10): 2902–2906.
- [45] LI W, DONG L, CHEN J. Absorption kinetics of CO₂ in aqueous solutions of secondary and tertiary alkanolamines[J]. *Chin. J. Process. Eng.*, 2011, 11(3): 422–428.
- [46] KIM Y E, CHOI J H, NAM S C, et al. CO₂ absorption capacity using aqueous potassium carbonate with 2-methylpiperazine and piperazine[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2012, 18(1): 105–110.
- [47] SHAO P J, CHEN H, YING Q, et al. Structure–activity relationship of carbonic anhydrase enzyme immobilized on various silica-based mesoporous molecular sieves for CO₂ absorption into a potassium carbonate solution[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(2): 2089–2096.
- [48] MANI F, PERUZZINI M, STOPPIONI P. CO₂ absorption by aqueous NH₃ solutions: Speciation of ammonium carbamate, bicarbonate and carbonate by a ¹³C NMR study[J]. *Green Chemistry*, 2006, 8(11): 995–1000.
- [49] CHEN H S, DOU B L, SONG Y C, et al. Studies on absorption and regeneration for CO₂ capture by aqueous ammonia[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 6: 171–178.
- [50] ZHANG M K, GUO Y C. Rate based modeling of absorption and regeneration for CO₂ capture by aqueous ammonia solution[J]. *Applied Energy*, 2013, 111: 142–152.
- [51] GÖPPERT U, MAURER G. Vapor: Liquid equilibria in aqueous solutions of ammonia and carbon dioxide at temperatures between 333 and 393 K and pressures up to 7 MPa[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1988, 41(1-2): 153–185.
- [52] YU J W, WANG S J. Development of a novel process for aqueous ammonia based CO₂ capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 39: 129–138.
- [53] DARDE V, THOMSEN K, VAN WELL W J M, et al. Chilled ammonia process for CO₂ capture[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1035–1042.
- [54] JIANG K Q, YU H, CHEN L H, et al. An advanced, ammonia-based combined NO_x/SO_x/CO₂ emission control process towards a low-cost, clean coal technology[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114316.
- [55] WANG B, SONG Z J, SUN L S. A review: Comparison of multi-air-pollutant removal by advanced oxidation processes–Industrial implementation for catalytic oxidation processes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 409: 128136.
- [56] YE H J T, RESNIK K P, RYGLE K, et al. Semi-batch absorption and regeneration studies for CO₂ capture by aqueous ammonia[J]. *Fuel Processing Technology*, 2005, 86(14-15): 1533–1546.
- [57] LIU J, WONG D S H, JANG S S, et al. Energy-saving design for regeneration process in large-scale CO₂ capture using aqueous ammonia[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, 73: 12–19.
- [58] YU J W, WANG S J, YU H. Rate-based modeling of regeneration process for CO₂ capture by aqueous ammonia solution in a pilot plant at munmorah power station[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 1314–1320.
- [59] YU J W, WANG S J. Modeling analysis of energy requirement in aqueous ammonia based CO₂ capture process[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 43: 33–45.
- [60] WEN S Y, WANG T, ZHANG X M, et al. Deep eutectic solvents formed by novel metal-based amino acid salt and dihydric alcohol for highly efficient capture of CO₂[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112533.
- [61] SMERIGAN A, ULUDAG-DEMIRER S, CUTSHAW A, et al. High-efficiency carbon dioxide capture using an algal amino acid salt solution[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2023, 69: 102394.
- [62] YAN S P, HE Q Y, ZHAO S F, et al. CO₂ removal from biogas by using green amino acid salts: Performance evaluation[J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 129: 203–212.
- [63] QUNYANG X, MENGXIANG F, MARCEL M, et al. Effect of Sarcosinate on the Absorption Kinetics of CO₂ into Aqueous Ammonia Solution[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(19): 6382–6389.
- [64] RAMAZANI R, SAMSAMI A, JAHANMIRI A, et al. Characterization of monoethanolamine+potassium lysinate blend solution as a new chemical absorbent for CO₂ capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 51: 29–35.
- [65] RAMEZANI R, MAZINANI S, DI FELICE R, et al. Selection of blended absorbents for CO₂ capture from flue gas: CO₂ solubility, corrosion and absorption rate[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 62: 61–68.
- [66] KIM M, SONG H J, LEE M-G, et al. Kinetics and steric hindrance effects of carbon dioxide absorption into aqueous potassium alaninate solutions[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(6): 2570–2577.
- [67] SONG T, CHEN W Q, ZHANG Y C, et al. Mass transfer and reaction mechanism of CO₂ capture into a novel amino acid ionic liquid phase-change absorbent[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330: 125538.
- [68] ATLASKINA M E, KAZARINA O V, PETUKHOV A N, et al. Amino acid-based ionic liquid as a promising CO₂ sorption increasing agent by aqueous MDEA solution[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 395: 123635.
- [69] GAO G, LI X S, JIANG W F, et al. Improved quasi-cycle capacity method based on microcalorimetry strategy for the fast screening of amino acid salt absorbents for CO₂ capture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 289: 120767.
- [70] CAO Y D, YANG C L, WANG C, et al. Evaluation of the rapid phase change absorbents based on potassium glycinate for CO₂

- capture[J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 273: 118627.
- [71] KIM K, LIM H, KIM J, et al. Investigation of carbon dioxide absorption performance in amine amino acid salts for upgrading biogas applications: Blended absorbents of piperazine and amino acid solutions[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2024, 164: 105667.
- [72] MANDAL B P, GUHA M, BISWAS A K, et al. Removal of carbon dioxide by absorption in mixed amines: Modelling of absorption in aqueous MDEA/MEA and AMP/MEA solutions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(21-22): 6217-6224.
- [73] BOUGIE F, ILIUTA M C. Sterically hindered amine-based absorbents for the removal of CO₂ from gas streams[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2012, 57(3): 635-669.
- [74] EL HADRI N, QUANG D V, GOETHEER E L V, et al. Aqueous amine solution characterization for post-combustion CO₂ capture process[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 1433-1449.
- [75] HE X W, HE H, BARZAGLI F, et al. Analysis of the energy consumption in solvent regeneration processes using binary amine blends for CO₂ capture[J]. *Energy*, 2023, 270: 126903.
- [76] ZHOU S, ZHU Y L, XI H Y, et al. Research on CO₂ capture performance and reaction mechanism using newly tetraethylenepentamine (TEPA) + monoethanolamine (MEA) mixed absorbent for onboard application[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 149790.
- [77] WANG L M, TIAN X F, FU D, et al. Experimental investigation on CO₂ absorption capacity and viscosity for high concentrated 1-dimethylamino-2-propanol-monoethanolamine aqueous blends[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2019, 139: 105865.
- [78] AROONWILAS A, VEAAB A. Integration of CO₂ capture unit using blended MEA-AMP solution into coal-fired power plants[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 4315-4321.
- [79] CHEN P C, LAI Y L. Optimization in the stripping process of CO₂ gas using mixed amines[J]. *Energies*, 2019, 12(11): 2202.
- [80] DASH S K, SAMANTA A N, BANDYOPADHYAY S S. Simulation and parametric study of post combustion CO₂ capture process using (AMP+PZ) blended solvent[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 21: 130-139.
- [81] ADEOSUN A, ABU-ZAHRA M R M. Evaluation of amine-blend solvent systems for CO₂ post-combustion capture applications[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 211-218.
- [82] YANG X, REES R J, CONWAY W, et al. Computational modeling and simulation of CO₂ capture by aqueous amines[J]. *Chemical reviews*, 2017, 117(14): 9524-9593.
- [83] WANG R J, ZHAO H J, WANG Y C, et al. Development of biphasic solvent for CO₂ capture by tailoring the polarity of amine solution[J]. *Fuel*, 2022, 325: 124885.
- [84] GAO G, JIANG W F, LI X S, et al. Novel assessment of highly efficient polyamines for post-combustion CO₂ capture: Absorption heat, reaction rate, CO₂ cyclic capacity, and phase change behavior[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 306: 122615.
- [85] PINTO D D D, ZAIDY S A H, HARTONO A, et al. Evaluation of a phase change solvent for CO₂ capture: Absorption and desorption tests[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 28: 318-327.
- [86] ZHANG S H, SHEN Y, SHAO P J, et al. Kinetics, thermodynamics, and mechanism of a novel biphasic solvent for CO₂ capture from flue gas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(6): 3660-3668.
- [87] LIU F, FANG M X, YI N T, et al. Research on alkanolamine-based physical-chemical solutions as biphasic solvents for CO₂ capture[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(11): 11389-11398.
- [88] YU J, ZHOU X L, SONG Q Y, et al. A new phase-change solvent composed of diethylenetriamine, n-butanol and water for CO₂ capture[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 408: 125367.
- [89] ZHOU X B, LI X L, WEI J W, et al. Novel nonaqueous liquid-liquid biphasic solvent for energy-efficient carbon dioxide capture with low corrosivity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(24): 16138-16146.
- [90] ZHOU X B, LIU C, ZHANG J, et al. Novel 2-amino-2-methyl-1-propanol-based biphasic solvent for energy-efficient carbon dioxide capture using tetraethylenepentamine as a phase change regulator[J]. *Energy*, 2023, 270: 126930.
- [91] HU H T, FANG M X, LIU F, et al. Novel alkanolamine-based biphasic solvent for CO₂ capture with low energy consumption and phase change mechanism analysis[J]. *Applied Energy*, 2022, 324: 119570.
- [92] ZHANG Z, ZHAO W B, NONG J J, et al. Liquid-solid phase-change behavior of diethylenetriamine in nonaqueous systems for carbon dioxide absorption[J]. *Energy Technology*, 2017, 5(3): 461-468.
- [93] LIU S, LING H, GAO H X, et al. Kinetics and new Brønsted correlations study of CO₂ absorption into primary and secondary alkanolamine with and without steric-hindrance[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 233: 115998.
- [94] ZHOU X B, LIU C, FAN Y M, et al. Energy-efficient carbon dioxide capture using a novel low-viscous secondary amine-based nonaqueous biphasic solvent: Performance, mechanism, and thermodynamics[J]. *Energy*, 2022, 255: 124570.
- [95] LI Q W, HUANG X, LI N, et al. Energy-efficient biphasic solvents for industrial CO₂ capture: Absorption mechanism and stability characteristics[J]. *Energy*, 2024, 293: 130710.
- [96] GAO G, GAO X Y, XU B, et al. Novel biphasic solvent based on 2MPRZ absorbent for post-combustion CO₂ capture with low viscosity, superior phase-splitting behavior and low energy consumption[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330: 125424.
- [97] YUAN B L, CHEN Z, ZHANG Q X, et al. Sulfolane-based biphasic solvent with high water-balance robustness and degradation resistance for industrial CO₂ capture[J]. *Applied Energy*, 2024, 366: 123356.
- [98] WEI W, LI D H, YAN X X, et al. Novel DETA-Isobutanol biphasic solvent for post-combustion CO₂ capture: High cyclic capacity and low energy consumption[J]. *Carbon Capture Science & Technology*, 2024, 13: 100235.

- [99] CHEN Z P, LI C, FANG M X, et al. Research of novel polyamine-based biphasic absorbents for CO₂ capture using alkanolamine to regulate the viscosity and mechanism analysis[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 333: 125869.
- [100] ZHANG Y J, LI X S, DONG J, et al. CO₂ capture performance of a 1-dimethylamino-2-propanol/N-(2-hydroxyethyl) ethylenediamine biphasic solvent[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 345: 127343.
- [101] JIN L J, HOU X Y, ZHAN L X, et al. Capturing CO₂ using novel nonaqueous biphasic solvent TMEDA/MEA/DMSO: Absorption and phase splitting mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 484: 149293.
- [102] YANG L, CHEN J W, MA N, et al. Novel diamine DMAPA-sulfolane-water biphasic absorbent for equimolar CO₂ absorption: Performance and mechanisms[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479: 147903.
- [103] WANG R J, YANG X T, GUO F Y, et al. Intramolecular hybrid diamine DMAPA/n-PeOH/H₂O biphasic absorbent for CO₂ absorption through combining zwitterion and base-catalyzed hydration mechanism[J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 297: 120294.
- [104] JIN L J, HOU X Y, ZHAN L X, et al. Tuning and optimization of two-phase absorbents (DEEA/AEEA/H₂O) with hybrid phase splitter (n-butanol/DEEA) for several properties: Carbon capture, phase separation, physical properties[J]. *Energy*, 2024, 288: 129802.
- [105] WANG C, XIE Y, Li W, et al. Performance and mechanism of the functional ionic liquid absorbent with the self-extraction property for CO₂ capture[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 473: 145266.
- [106] HONG S M, LI T, XIAO M, et al. A low energy-consuming phase change absorbent of MAE/DGM/H₂O for CO₂ capture[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 480: 148079.
- [107] FANG J W, SUN Q, CUI C H, et al. CO₂ absorption by diethylenetriamine-based phase change absorbents: Phase change mechanism and absorption performance[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 347: 127535.
- [108] YU Y S, LU H F, ZHANG T T, et al. Determining the performance of an efficient nonaqueous CO₂ capture process at desorption temperatures below 373 K[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(35): 12622–12634.
- [109] GUO H, LI C X, SHI X Q, et al. Nonaqueous amine-based absorbents for energy efficient CO₂ capture[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 725–734.
- [110] BOUGIE F, POKRAS D, FAN X F. Novel non-aqueous MEA solutions for CO₂ capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 86: 34–42.
- [111] MA M M, LIU Y C, CHEN Y L, et al. Regulatory mechanism of a novel non-aqueous absorbent for CO₂ capture using 2-amino-2-methyl-1-propanol: Low viscosity and energy efficient[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2023, 67: 102277.
- [112] SHI H C, NAAMI A, IDEM R, et al. Catalytic and non catalytic solvent regeneration during absorption-based CO₂ capture with single and blended reactive amine solvents[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 26: 39–50.
- [113] MENG F L, FU K, WANG X L, et al. Study on absorption and regeneration performance of EHA-DMSO non-aqueous absorbent for CO₂ capture from flue gas[J]. *Energy*, 2024, 286: 129631.
- [114] LI S X, FU L J, DONG Z F, et al. Theoretical and experimental analysis of CO₂ capture into 1, 5-diamino-2-methyl-pentane/n-propanol non-aqueous absorbent regulated by ethylene glycol[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330: 125408.
- [115] ZHOU X B, WANG D, LIU C, et al. Enhancing CO₂ capture of an aminoethylethanolamine -based non -aqueous absorbent by using tertiary amine as a proton-transfer mediator: From performance to mechanism[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 140: 146–156.
- [116] LIU C, JING G H, ZHU Z Q, et al. Inhibiting effect of 2-amino-2-methyl-1-propanol on gelatinous product formation in non-aqueous CO₂ absorbents: Experimental study and molecular understanding[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481: 148545.
- [117] MENG F L, FU K, WANG X L, et al. Performance of a new water lean absorbent composed of EHA and DEGDEE in CO₂ capture and regeneration[J]. *Energy*, 2024, 304: 132090.
- [118] WANG Z, HAN Z, LIU D, et al. Investigation on CO₂ capture performance of low-viscosity diamine non-aqueous absorbents with N-methyldiethanolamine regulation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 357: 130150.
- [119] FAISAL ELMOBARAK W, ALMOMANI F, TAWALBEH M, et al. Current status of CO₂ capture with ionic liquids: Development and progress[J]. *Fuel*, 2023, 344: 128102.
- [120] BATES E D, MAYTON R D, NTAI I, et al. CO(2) capture by a task-specific ionic liquid[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 124(6): 926–927.
- [121] JALILI A H, MEHDIZADEH A, SHOKOUHI M, et al. Solubility of CO₂ in 1-(2-hydroxyethyl)-3-methylimidazolium ionic liquids with different anions[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2010, 42(6): 787–791.
- [122] SISTLA Y S, KHANNA A. CO₂ absorption studies in amino acid-anion based ionic liquids[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 273: 268–276.
- [123] GOODRICH B F, DE LA FUENTE J C, GURKAN B E, et al. Experimental measurements of amine-functionalized anion-tethered ionic liquids with carbon dioxide[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(1): 111–118.
- [124] ZHAN X H, LV B H, YANG K X, et al. Dual-functionalized ionic liquid biphasic solvent for carbon dioxide capture: High-efficiency and energy saving[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(10): 6281–6288.
- [125] ZHONG X L, KONG W X, DONG Z Y, et al. A novel ILs biphasic absorbent with low regeneration energy consumption for CO₂ capture: Screening of phase separation regulators and mechanism study[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 493: 152454.
- [126] MAO J M, CI Y H, LIU J, et al. Experimental and theoretical

- investigation of an ionic liquid-based biphasic solvent for post-combustion CO₂ Capture: Breaking through the “Trade-off” effect of viscosity and loading[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 491: 151991.
- [127] JIA R Q, XU Y H, ZHANG J J, et al. A novel phase change absorbent with ionic liquid as promoter for low energy-consuming CO₂ capture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 315: 123740.
- [128] CHEN Y, QU Z H, HU H, et al. Nonaqueous amino-phenolic dual-functionalized ionic liquid absorbents for reversible CO₂ capture: Phase change behaviors and mechanism[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 308: 122986.
- [129] HU B, WEI W, LIU F, et al. Experimental and theoretical investigation of a novel multi-amino-functionalized ionic phase change absorbent for highly efficient CO₂ capture[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 501: 157723.
- [130] LI J Y, ZHAO Y Z, ZHAN G X, et al. Integration of physical solution and ionic liquid toward efficient phase splitting for energy-saving CO₂ capture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 343: 127096.
- [131] SUN X Q, ZENG S J, PENG K L, et al. A water-lean triazole ionic liquid biphasic solvent for energy-efficient CO₂ capture through reversible polarity and intermolecular hydrogen bonding[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, 63(21): 9515–9526.
- [132] KASSIM M A, SAIRI N A, YUSOFF R, et al. Evaluation of 1-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl) imide-alkanolamine sulfolane-based system as solvent for absorption of carbon dioxide[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(29): 7992–8001.
- [133] MOHAMMED S, ELJACK F, KAZI M K, et al. Development of a deep learning-based group contribution framework for targeted design of ionic liquids[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2024, 186: 108715.
- [134] MAO J, MA Y, CI Y, et al. Anhydrous deep eutectic solvents-based biphasic absorbents for efficient CO₂ capture: Unravelling the critical role of hydrogen bond-mediated electron transfer[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025: 161988.
- [135] WANG R J, QI C R, ZHAO H J, et al. Loosely bonded dual-functionalized ionic liquid-based phase change solvent for energy-saving CO₂ capture[J]. *Fuel*, 2023, 350: 128748.
- [136] MAO J M, LI C, YUN Y B, et al. Biphasic solvents based on dual-functionalized ionic liquid for enhanced post-combustion CO₂ capture and corrosion inhibition during the absorption process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481: 148691.
- [137] DEVAKKI B, THOMAS S. Experimental investigation on absorption performance of nanofluids for CO₂ capture[J]. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 2020, 28(2): 2050017.
- [138] CHATURVEDI K R, SHARMA T. Comparative analysis of carbon footprint of various CO₂-enhanced oil recovery methods: A short experimental study[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2023, 210(12): 2130–2137.
- [139] YU W, WANG T, PARK A A, et al. Review of liquid nano-absorbents for enhanced CO₂ capture[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(37): 17137–17156.
- [140] RAHMATMAND B, KESHAVARZ P, AYATOLLAHI S. Study of absorption enhancement of CO₂ by SiO₂, Al₂O₃, CNT, and Fe₃O₄ nanoparticles in water and amine solutions[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2016, 61(4): 1378–1387.
- [141] IRANI V, MALEKI A, TAVASOLI A. CO₂ absorption enhancement in graphene-oxide/MDEA nanofluid[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, 7(1): 102782.
- [142] RAHIMI K, RIAHI S, ABBASI M. Effect of host fluid and hydrophilicity of multi-walled carbon nanotubes on stability and CO₂ absorption of amine-based and water-based nanofluids[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(1): 103580.
- [143] KARIMI DARVANJOOGHI M H, PAHLEVANINEZHAD M, ABDOLLAHI A, et al. Investigation of the effect of magnetic field on mass transfer parameters of CO₂ absorption using Fe₃O₄-water nanofluid[J]. *AIChE Journal*, 2017, 63(6): 2176–2186.
- [144] BHATTI U H, SHAH A K, KIM J N, et al. Effects of transition metal oxide catalysts on MEA solvent regeneration for the post-combustion carbon capture process[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(7): 5862–5868.
- [145] BHATTI U H, SHAH A K, HUSSAIN A, et al. Catalytic activity of facilely synthesized mesoporous HZSM-5 catalysts for optimizing the CO₂ desorption rate from CO₂-rich amine solutions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 389: 123439.
- [146] TAN Z, ZHANG S S, YUE X W, et al. Attapulgit as a cost-effective catalyst for low-energy consumption amine-based CO₂ capture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 298: 121577.
- [147] XING L, WEI K X, LI Q W, et al. One-step synthesized SO₄²⁻/ZrO₂-HZSM-5 solid acid catalyst for carbamate decomposition in CO₂ capture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(21): 13944–13952.
- [148] PRASONGTHUM N, NATEWONG P, REUBROYCHAROEN P, et al. Solvent regeneration of a CO₂-loaded BEA-AMP blend amine solvent with the aid of a solid Brønsted Ce(SO₄)₂/ZrO₂ superacid catalyst[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(2): 1334–1343.
- [149] SHI H C, PENG J C, CHENG X F, et al. The CO₂ desorption analysis of tri-solvent MEA+BEA+DEEA with several commercial solid acid catalysts[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 116: 103647.
- [150] SHI H C, YANG X, FENG H L, et al. 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[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60(19): 7352–7366.