

技术进展

混合胺吸收剂捕集 CO₂ 研究和
工业应用现状宋建文¹, 杨佳文¹, 高怡然¹, 张盼^{1,2*}

(1. 华北电力大学(保定)环境科学与工程系, 河北保定 071003;

2. 河北省燃煤电站烟气多污染物协同控制重点实验室, 华北电力大学(保定), 河北保定 071003)

摘要: 系统综述了混合胺吸收剂的作用机理、分类体系的研究现状与性能对比, 总结了其在工业示范与商业化项目中的应用进展, 并分析了当前面临的技术障碍, 旨在为混合胺吸收剂的进一步优化和工业化应用提供参考。

关键词: 混合胺; 二氧化碳捕集; 化学吸收法; 有机胺

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)09-0016-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.004

Research and industrial application status of CO₂ capture by
mixed amine absorbentsSONG Jian-wen¹, YANG Jia-wen¹, GAO Yi-ran¹, ZHANG Pan^{1,2*}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Hebei Key Lab of Power Plant Flue Gas Multi-Pollutants Control, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: This review systematically examines the working mechanisms, classification systems, and performance comparisons of mixed amine absorbents, summarizes their progress in industrial demonstration and commercialization projects, and analyzes current technical barriers, aiming to provide valuable insights for optimizing and advancing the industrial application of mixed amine absorbents.

Key words: mixed amine; carbon dioxide capture; chemical absorption method; organic amine

自工业革命以来,化石燃料的大量消耗使二氧化碳排放持续增加,引发全球气候变暖、海平面上升等严重环境问题。二氧化碳浓度已从工业革命时期的近 280×10^{-6} 升至如今的 390×10^{-6} , 同期地表平均温度上升约 1.1°C ^[1]。据国际能源署等机构数据,近年全球二氧化碳排放量达 360 亿 t, 其中能源、交通、工业和建筑部门占比显著。随着能源需求增长,若不加以控制,全球平均温度将难以维持在目标范围内,为此各国纷纷出台减碳政策,我国也明确了 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的双碳战略目标^[2]。

碳减排的主要途径包括提高能源利用率、开发清洁可再生能源及二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)等。其中,CO₂ 捕集是核心环节,主要有 4

种技术路线,相关捕集技术种类繁多。溶液吸收法中的化学吸收法因吸收效果好、分离纯度高、反应稳定,成为目前应用最广泛、最成熟的碳捕集技术。

有机胺在化学吸收法中应用广泛,传统单有机胺吸收剂虽有吸收速率快、产物纯度高、成本低且可循环利用等优势,但存在易起泡、降解、再生能耗高等问题,其再生能耗占整个碳捕集成本的 70%~80%^[3]。为克服这些缺陷,研究人员开发了混合胺吸收剂,通过复配不同特性的胺类化合物,综合各组分优势,在吸收性能、再生能耗和稳定性等方面效果提升显著。近年来,混合胺吸收剂研究取得显著进展,在多个工业示范项目中展现出良好应用前景。本文将系统分析不同体系混合胺吸收剂的性能优势,介绍研究进展,总结典型工业应用案例,并探讨

收稿日期: 2025-11-24; 修回日期: 2026-06-30

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52106009); 河北省自然科学基金面上项目(E2021502024); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2024MS170)

作者简介: 宋建文(2000-),男,硕士,研究方向为 CO₂ 捕集,1765052206@qq.com; 张盼(1986-),男,博士,副教授,研究方向为大气污染控制工程,通讯联系人,zhangpan01@ncepu.edu.cn。

未来发展方向与挑战。

1 有机胺吸收法捕集 CO₂ 技术

1.1 胺法捕集 CO₂ 工艺流程

胺法捕集 CO₂ 工艺^[4]主要分为吸收、解吸、再生和压缩 4 个部分,工艺流程如图 1 所示。吸收过程中,未吸收 CO₂ 的贫胺溶液(贫液)从吸收塔顶部喷淋而下,含 CO₂ 的烟气从底部进入向上移动,气液接触形成连续液膜,CO₂ 被醇胺吸收。解吸过程中,吸收了 CO₂ 的富胺溶液(富液)通过泵送至再生塔,加热至一定温度后,CO₂ 分子获得足够能量克服与胺分子的相互作用力解吸出来,经冷凝、干燥得到高纯度 CO₂。贫液经贫富液换热器降温后返回吸收塔循环使用。

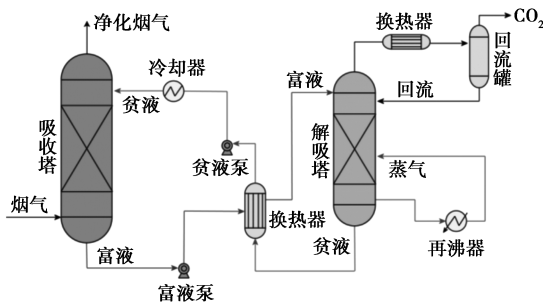


图 1 胺法捕集 CO₂ 工艺流程

1.2 有机胺吸收剂反应机理

有机胺主要由烷醇胺或烷胺构成,分类方式有 2 种:按氮原子所连氢原子数目可分为伯胺、仲胺、叔胺;按结构差异可分为空间位阻胺和非空间位阻胺。

仲胺与伯胺吸收 CO₂ 的原理相近,均含与氮原子直接相连的氢原子,但仲胺分子中氮原子上 1 个氢原子被取代,亲核试剂活性降低,反应不如伯胺迅速完全。二者均遵循两性离子机理,伯胺先与 CO₂ 加成生成不稳定的氨基羧酸酯中间体,再与另一伯胺分子反应生成羧酸盐和胺阳离子。叔胺与 CO₂ 的反应机理尚未完全明确,目前较认可的是由 Donaldson 等^[5]提出的碱催化水合机理。叔胺不直接与 CO₂ 生成两性离子,其氮原子作为碱催化剂,促进水分子解离产生氢氧根离子和氢离子,CO₂ 再与氢氧根离子结合生成碳酸氢根离子,典型代表是甲基二乙醇胺(MDEA)。空间位阻胺由氨基的 1 个或 2 个氢原子被大体积烷基或其他基团取代形成,常见的有 AMP、1,8-甲基二胺(MDA)等。受“空间位阻”影响,氨基活性氢原子难与 CO₂ 反应生成氨基甲酸盐,且生成的氨基甲酸盐稳定性差,易水解生成碳酸氢根。图 2 是 4 种胺捕集 CO₂ 的反应机理及优缺点示意图。

伯胺 (MEA 为例)	仲胺 (DEA 为例)	叔胺 (MDEA 为例)	空间位阻胺 (AMP 为例)
两性离子机理	两性离子机理	两性离子机理	两性离子机理
分步反应: 1) $R_1R_2NH + CO_2 \leftrightarrow R_1R_2NH^+COO^-$ 2) $R_1R_2NH^+COO^- + R_1R_2NH \leftrightarrow R_1R_2NH_2^+ + R_1R_2NCOO^-$	分步反应: 1) $R_1R_2NH + CO_2 \leftrightarrow R_1R_2NH^+COO^-$ 2) $R_1R_2NH^+COO^- + R_1R_2NH \leftrightarrow R_1R_2NH_2^+ + R_1R_2NCOO^-$	分步反应: 1) $CO_2 + H_2O \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$ 2) $H^+ + R_1R_2N \leftrightarrow R_1R_2NH^+$	分步反应: 1) $CO_2 + 2AMP \leftrightarrow AMP^+COO^- + AMPH^+$ 2) $AMP^+COO^- + H_2O \leftrightarrow AMP + HCO_3^-$
总反应式: $2R_1R_2NH + CO_2 \leftrightarrow R_1R_2NH_2^+ + R_1R_2NCOO^-$	总反应式: $2R_1R_2NH + CO_2 \leftrightarrow R_1R_2NH_2^+ + R_1R_2NCOO^-$	总反应式: $R_1R_2N + CO_2 + H_2O \leftrightarrow R_1R_2NH^+ + HCO_3^-$	总反应式: $AMP + CO_2 + H_2O \leftrightarrow AMPH^+ + HCO_3^-$
捕集 CO ₂ 优缺点	捕集 CO ₂ 优缺点	捕集 CO ₂ 优缺点	捕集 CO ₂ 优缺点
优点: 反应速率快、气体净化度高	优点: 反应速率较 MEA 快、成本较低	优点: 吸收容量大、生成物稳定	优点: 吸收能力高、再生能耗低
缺点: 再生能耗大、吸收反应热高	缺点: 腐蚀性强、易降解	缺点: 吸收速率较 MEA 慢	缺点: 价格昂贵、挥发损耗大

图 2 有机胺吸收剂捕集 CO₂ 原理及优缺点示意图

2 混合胺吸收剂研究现状

2.1 醇胺混合体系

醇胺混合体系通常由伯胺或仲胺与叔胺组成,加入活化剂可显著提升吸收速率和再生效率,大幅降低再生能耗。常见组合形式包括二乙醇胺-乙醇

胺(MEA-MDEA)、乙醇胺-三乙醇胺(MEA-TEA)、乙醇胺-哌嗪(MEA-PZ)、二乙醇胺-哌嗪(MDEA-PZ)等^[6]。以 MEA-MDEA 为代表的活化胺混合体系,是目前研究最广泛、工业应用最成熟的混合胺吸收剂体系之一^[4]。

众多研究揭示了醇胺混合体系的特性与优势,

Liu 等^[7]对 MEA 和 DMEA 混合体系的 CO_2 气-液平衡研究表明, MEA 在低压下 CO_2 溶解度高于 DMEA, 混合物溶解度更接近单 MEA。优化 CO_2 捕集工艺可显著提高混合胺吸收剂性能, 降低解吸能耗。Abdullah^[8]采用中空纤维膜接触器对 MDEA-PG、MDEA-PZ 和 MDEA-MEA 3 种混合胺吸收剂脱碳, 发现吸收性能为 MDEA-MEA>MDEA-PG>MDEA-PZ, 且 MDEA-PG 和 MDEA-PZ 溶质比为 1:0.6 时 CO_2 去除率最高, 分别达 32.36% 和 30.55%。

伯、仲胺能提升 CO_2 吸收速率, 但再生能耗较高, 叔胺的加入降低了氨基甲酸盐的稳定性, 使解吸过程更高效, 再生能耗显著降低。尽管醇胺混合体系在性能与能耗方面优势显著, 但其配比优化、稳定性及成本问题仍需进一步研究, 部分高效活化剂价格较高, 大规模应用时需权衡性能与成本。

2.2 空间位阻胺混合体系

2-氨基-2-甲基-1-丙醇(AMP)是新型有机胺溶剂, 独特的空间位阻结构使其兼具伯胺和仲胺的高吸收速率、叔胺的高吸收量, 且腐蚀性较低, 在 CO_2 吸收解析循环系统中表现优异。AMP 与哌嗪及其同系物如 AEP、HEPZ、NMPRZ 等混合使用, 可进一步提升 CO_2 吸收效果。Zhen 等^[9]制备的 3 种 AMP-EAE 混合胺体系中, 质量分数 25% 的混合物溶液表现最佳, 气液比为 20 时, 吸收效率较 AMP 水溶剂提高 15%, 循环容量和平均解吸速率较质量分数 30% 的 MEA 溶液提高 1.7 倍; Vamja 等^[10]研究发现, 1-MPZ 水溶液具有良好的 CO_2 吸收循环能力, 与 AMP 结合后循环容量进一步增强。

目前空间位阻胺混合体系在二氧化碳捕集领域已展现出诸多优势, 但在实际应用与进一步发展过程中, 仍面临一些亟待解决的问题。部分空间位阻胺在初始吸收阶段, 吸收速率不够理想, 这限制了其在一些对吸收效率要求极高的快速反应场景中的应用。此外, 在长期循环使用过程中, 受温度、压力以及杂质气体等因素影响, 部分混合体系会出现降解、发泡等现象, 导致吸收性能下降。

2.3 烯胺混合体系

烯胺是一类含有碳-氮双键的有机化合物, 分子中含有多个伯胺和仲胺, 结构中的氨基或亚氨基具有较强的亲核性, 能够与 CO_2 发生化学反应。常见的有二乙烯三胺(DETA)、三乙烯四胺(TETA)等。在实际应用中, 通常将烯胺与其他有机胺组成混合体系, 以充分发挥各组分的优势。

Zhang 等^[11]用 DETA 为主、TEA 为辅的混合胺进行 CO_2 吸收-解吸测试, 结果显示, 与 30% MEA 相比, 能耗降低 21.2%, 黏度为 3.1~6.88 mPa·s。Zhou 等^[6]开发的 7.5% TEPA+7.5% MEA 混合胺吸收剂, 与相同质量分数 MEA 相比, CO_2 负载量增加 7%, 解吸热负荷降低 18.1%, 该溶液中质子转移主要由 TEPA 控制, MEA 主要与 CO_2 反应。

科研人员通过理论计算和实验研究相结合的方法, 深入探究烯胺混合体系与 CO_2 反应的机理和热力学、动力学特性。研究表明, 烯胺混合体系能抑制吸收产物发生固体结晶, 提高碳捕集系统稳定性。An 等^[12]向 AMP 中添加少量 DETA, 发现 DETA 氨基甲酸酯可与 HCO_3^- 形成分子间氢键, 减少 HCO_3^- 分子间二聚体或多链大分子形成, 抑制高浓度 HCO_3^- 结晶, 同时使再生能耗较 5MMEA 降低 21.2%。

烯胺混合体系以高捕集效率、低解吸能耗、良好的稳定性和对设备腐蚀性小等优点, 在工业应用中展现出了良好的前景, 然而, 目前该技术仍面临吸收剂成本高、长期稳定性有待提高及总能耗较高等挑战, 需要进一步优化工艺和设备, 降低能耗成本。

2.4 相变胺混合体系

近年来, 相变胺混合体系凭借在 CO_2 捕集与解吸过程中通过相态变化实现高效节能的特性, 成为混合胺吸收剂领域的研究热点。该体系主要包括固-液相变和液-液相变 2 大类型, 二者均通过特殊的相分离机制降低再生能耗, 提升捕集效率^[13]。固-液相变吸收剂的吸收产物以固体形态析出, 便于解吸前高效分离, 大幅降低再生能耗; 液液相变吸收剂吸收 CO_2 前为均相溶液, 反应后自发分离为上下 2 个液相, 因贫液相和富液相在化学组成与物理性质上存在显著差异, 可实现有效分离^[14]。图 3 直观展示了基于 MEA 的液-液两相系统分相情况^[15]。

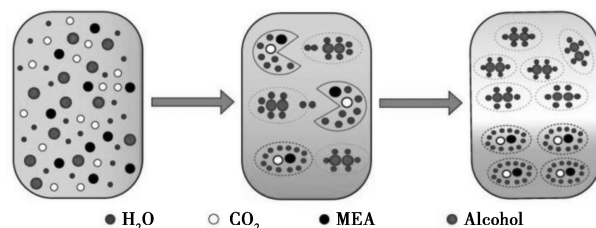


图3 基于 MEA 的液-液两相系统分相示意图

目前, 相变胺混合体系研究中, 吸收剂的筛选占据重要地位, 且大多依赖试验方法开展。众多研究

者已成功筛选出一系列相变胺混合体系,通过有效降低解吸过程显热与潜热,显著减少了再生能耗。例如,胡彦陇等^[16]基于汉森溶解度参数理论,筛选得到新型相变吸收剂 MDEA/聚乙二醇二甲醚(NHD)/H₂O,其热稳定性优于 30% MEA 及 MDEA/正丁醇/H₂O 相变吸收剂,质量比为 3:5:2 时 CO₂ 吸收量达峰值,90℃ 解吸条件下,CO₂ 总循环容量为 9.260 4 mol/L,解吸效率达 98.96%;Hong 等^[17]研究的 MAE-DGM-H₂O 相变吸收剂,循环 CO₂ 容量达 1.32 mol/L,富 CO₂ 相仅占总体积的 50.4%,再生能耗较质量分数 30% 的 MEA 溶液降低 40%。

相变胺混合吸收剂在吸收 CO₂ 时,由于相变过程中伴随的大量潜热吸收或释放,使得吸收效率远高于传统吸收剂,且仅需解吸富相便可实现吸收剂的再生循环,降低解吸能耗,是目前发展前景较好的一类吸收剂。但是目前研究者们研究内容主要集中在对相变胺混合吸收剂的筛选及性能优化,对吸收 CO₂ 的动力学及机理的研究较少,吸收剂的挥发性及腐蚀性问题还有待更深入探究。

2.5 离子液体基混合胺体系

离子液体因低蒸气压、良好的吸收性能、热稳定性好及对环境友好等优点成为近年来 CO₂ 捕集领域的热门试剂。为了实现混合胺吸收剂优异的吸收负载和低黏度性能,Qin 等^[18]提出了一种新型氨基功能化离子液体 [G1.0PAMAM][2-MI],结果表明,质量分数 42.71% 的 [G1.0PAMAM][2-MI]/H₂O 的吸收负荷为 6.81 mol/mol,远高于 MEA/H₂O,吸收前后溶液的黏度分别为 35.3、53.8 mPa·s,显著低于大多数离子液体,有利于提高吸收过程的传质效率,反应机理如图 4 所示。离子液体体系对二氧化碳吸收动力学影响显著,Tiwari 等^[19]对 T-Im/MDEA 和 D-im/MDEA 2 种双功能化离子液体吸收剂的动力学研究表明,吸收过程中更多活性位点可同时与 CO₂ 分子反应,加快反应速率,缩短吸收平衡时间。

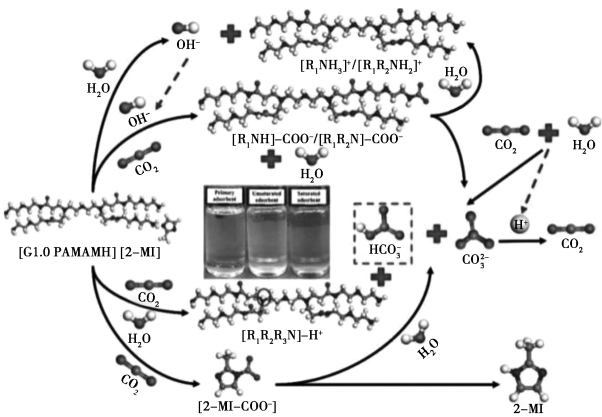


图 4 离子液体 [G1.0PAMAM][2-MI] 的反应机理示意图

离子液体与胺混合后,往往能兼具两者的优点,离子液体基混合体系凭借独特的组分协同效应,在二氧化碳捕集、化学反应、分离提纯等领域展现出多方面的优势。尽管目前离子液体基混合胺吸收剂已经取得了一定的研究成果,但仍有很大的发展空间。未来的一个重要发展方向是开发具有更低黏度、更高热稳定性和化学稳定性的离子液体,以解决目前离子液体黏度较高导致的传质阻力大、热稳定性不足等问题,从而提升离子液体基混合胺吸收剂的整体性能。

综上所述,为应对单胺吸收剂在 CO₂ 捕集中面临的再生能耗高、降解、腐蚀性等问题,研究人员开发了多种类型的混合胺吸收剂体系,通过组分间的协同效应优化捕集性能。表 1 系统总结了不同体系的混合胺吸收剂的组分、浓度及关键性能。从表中可以看出大部分的混合胺吸收剂对 CO₂ 的捕集性能都得到了较大提升,混合胺吸收剂在捕集 CO₂ 应用中展现出良好的适应性和潜力。不同类型的混合胺吸收剂体系在提升 CO₂ 捕集性能方面展现出独特的优势和潜力,但也各自面临成本、长期运行性能、反应机理深入研究等挑战。在工业化实际应用过程中,存在的技术障碍及发展趋势如图 5 所示。

表 1 不同体系混合胺吸收剂的性能对比

混合胺吸收剂体系	吸收剂组分	浓度	吸收速率	CO ₂ 吸收量	再生率/%
醇胺混合体系 ^[20]	MEA+MDEA	$\omega(\text{MEA}) = 35\%, \omega(\text{MDEA}) = 5\%$	0.006 mol/min	0.85 mol/mol	92.70
	DEA+MDEA	$\omega(\text{DEA}) = 30\%, \omega(\text{MDEA}) = 5\%$	0.0058 mol/min	0.829 mol/mol	93.40
	MDEA+PZ	$\omega(\text{MDEA}) = 32\%, \omega(\text{PZ}) = 3\%$	0.0067 mol/min	0.868 mol/mol	94.20
空间位阻胺混合体系 ^[9-10,21]	AMP-EAE	$n(\text{AMP}) : n(\text{EAE}) = 1 : 1$	—	1.75 mol/L	—
	AMP-1-MPZ	$n(\text{AMP}) : n(1\text{-MPZ}) = 3 : 1$	—	118 g/kg	—
	MEA+AMP	MEA20%+AMP10%	—	≈ MEA30%	50.00

续表

混合胺吸收剂体系	吸收剂组分	浓度	吸收速率	CO ₂ 吸收量	再生率/%
烯胺混合体系 ^[6,11,22]	TEPA+MEA	$\omega(\text{TEPA}) = 7.5\%, \omega(\text{MEA}) = 7.5\%$	—	增加 7%	—
	DETA-TEA	$n(\text{DETA}) : n(\text{TEA}) = 1 : 0.6$	—	1.49 mol/kg	—
	AEEA+MDEA	$\omega(\text{AEEA}) = 20\%, \omega(\text{MDEA}) = 20\%$	—	1.7 mol/kg	—
相变胺混合体系 ^[20,23]	MDEA+NHD:H ₂ O	$n(\text{MDEA}) : n(\text{NHD}:\text{H}_2\text{O}) = 3:5:2$	—	9.2604 mol/L	98.96
	TETA/PEG200	总浓度为 1 M	1.63 mol/mol	—	90.00
离子液体基混合体系 ^[24-25]	[TETAH][3-Br-PhO]- PMDTA-H ₂ O	$n[\text{TETAH}][3\text{-Br-PhO}] :$ PMDTA = 4:6	3.72 mol/L	3.72 mol/L	87.00
	[N1111][Gly]+PZ+MDEA	—	1.84 mol/kg	—	67.96

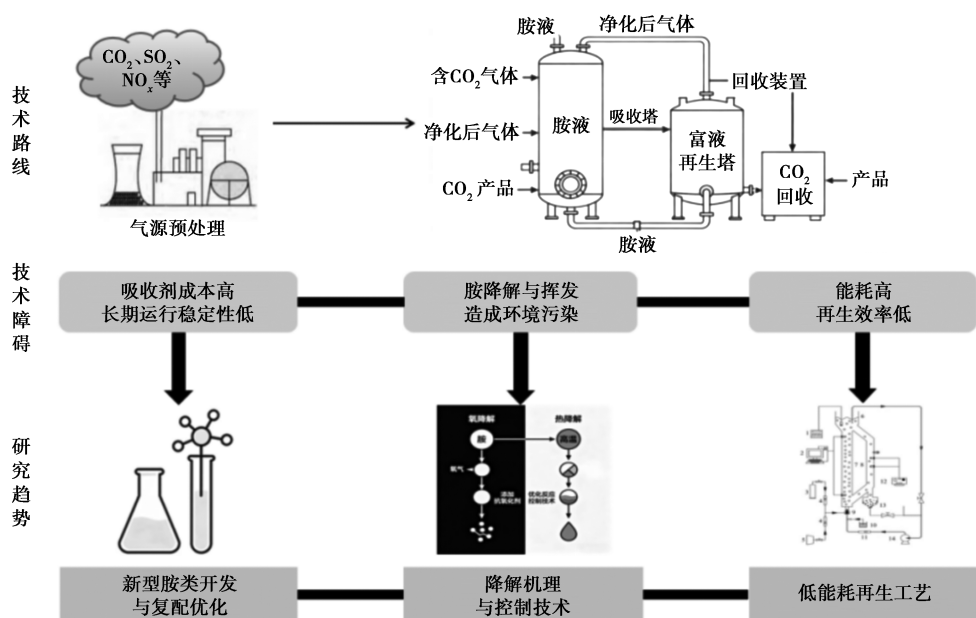


图 5 技术路线、技术障碍及研究趋势

3 混合胺吸收剂工业应用现状

3.1 混合胺吸收剂的中试实验进展

目前已有多家企业和项目通过中试以上规模验证了混合胺吸收剂的性能。徐东等^[26]在华润海丰燃煤烟气 1 万 t/a 碳捕集工业验证装置上测试新型低能耗吸收剂,结果显示,CEU-3 型吸收剂再生能耗达 2.42 GJ/t,较 30% MEA 吸收剂降低 36.3%,且实现 720 h 万 t 级工业装置稳定运行;毛松柏等^[27]在胜利电厂 40 kt/a 中试装置上使用有机胺复合溶剂,CO₂ 捕集率大于 80%,再生能耗达 2.92×10^6 kJ/t,完成工业化应用。

根据尼德劳森电厂碳捕集等试点工厂项目的实际性能数据发现 MEA 与 AMP/PZ 在捕集率及所需填料高度方面表现相似。具体而言,AMP/PZ 的能

耗相较于 30% 浓度的 MEA 可降低约 15%,相较于 35% 浓度的 MEA 可降低约 10%。但在某些特定运行工况下,AMP/PZ 并未能体现出能耗上的优势。AMP/PZ 复合吸收剂在相关试点工程项目中的应用效果如表 2 所示。

表 2 醇胺吸收剂的工业应用效果

项目名称	溶液类型	溶液质量分数/%	填料高度/m	捕集率/%	再沸器负荷/(GJ·t ⁻¹)
蒙斯塔德技术中心热电联产机组	MEA	36	18	90.0	3.80
	MEA	36	24	97.0	3.70
	MEA	43	18	86.0	3.60
	AMP/PZ	26.7/12.9	18	85.0	3.50
	AMP/PZ	26.7/12.9	18	98.0	3.90
	AMP/PZ	26.7/12.9	24	90.0	3.50

续表					
项目名称	溶液类型	溶液质量分数/%	填料高度/m	捕集率/%	再沸器负荷/(GJ·t ⁻¹)
蒙斯塔德技术中心催化裂化烟气	MEA	30	18	90.5	3.50
	MEA	30	18	89.4	3.54
	AMP/PZ	26.7/12.9	18	91.0	3.23
	AMP/PZ	26.7/12.9	18	89.6	3.13
	AMP/PZ	26.7/12.9	18	89.5	3.06
尼德劳森(Niederaussem)电厂碳捕集项目	MEA	30	18	90.0	3.60
	AMP/PZ	26.7/12.9	28	90.0	3.00
	AMP/PZ	26.7/12.9	28	95.0	3.00
美国国家碳捕集中心	AMP/PZ	26.7/12.9	28	98.0	3.24
	MEA	30	18	98.3	3.86
	MEA	30	18	99.4	3.81

3.2 混合胺吸收剂的工程项目应用进展

混合胺吸收剂因技术成熟在烟气 CO₂ 捕集方面受到了广泛应用,许多碳捕集项目及工业示范已成功转型为商业化运行阶段。

国内方面,2021 年 6 月国能锦界公司投产的

15 万 t/a 二氧化碳捕集封存全流程示范项目,选用新一代混合胺吸收剂为主吸收剂进行设计,兼容相变吸收剂、功能离子液体等新型吸收剂,相对 MEA 能耗降低 25%,降解速率降低 50%,CO₂ 捕集率大于 98%^[28];2022 年 4 月江苏盐城 2 000 t 级燃气锅炉烟气碳捕集项目投运,采用化学吸收法;2024 年 6 月河北建滔 20 万 t/a 燃煤锅炉烟气碳捕集项目通过技术鉴定,采用有机胺化学吸收法,国能泰州全捕集项目正在设计中,计划年捕集 400 万 t CO₂,捕集率>95%,能耗<2.4 GJ/t。

国际方面,美国 2017 年投入使用 Petra Nova 大型燃煤电厂烟气碳捕集项目,年捕集量大于 140 万 t;加拿大 SaskPower Boundary Dam 碳捕集项目 2014 年运营,年捕集 100 万 t CO₂,捕集率>90%,能耗<2.7 GJ/t;日本 Toshiba 的胺基溶剂捕集烟气二氧化碳工艺技术先进,2023 年与美国 Lummus 合作,计划提出融合胺基溶剂的先进燃烧后碳捕集解决方案,其烟气碳捕集项目年捕集 10 万 t CO₂,捕集率>95%,能耗<3.07 GJ/t。国内外胺法工程项目进展见表 3。

表 3 国内外胺法工程项目进展

项目名称	国家	运营时间	碳捕集类型	碳捕集量	碳捕集效果	能耗/(GJ·t ⁻¹)
重庆合川电厂万 t 级燃煤锅炉烟气碳捕集项目	中国	2010 年	燃烧后捕集	1 万 t/a	>95%	—
国能锦界 15 万 t/a 燃煤电厂燃烧后二氧化碳捕集示范工程	中国	2021 年	燃烧后捕集	15 万 t/a	>90%	—
江苏盐城 2000 t 级燃气锅炉烟气碳捕集项目	中国	2022 年	燃烧后捕集	2000 t/d	>95%	—
河北建滔 20 万 t/a 燃煤锅炉烟气碳捕集项目	中国	2024 年	燃烧后捕集	20 万 t/a	>90%	<2.20
国能泰州全捕集项目	中国	设计中	燃烧后捕集	400 万 t/a	>95%	<2.40
SaskPowerBoundary Dam 碳捕集项目	加拿大	2014 年	燃煤电厂	100 万 t/a	>90%	<2.70
Petra Nova 燃煤电厂烟气碳捕集项目	美国	2017 年	燃煤电厂	140 万 t/a	>97%	—
Toshiba 烟气碳捕集项目	日本	2023 年	燃烧后捕集	10 万 t/a	>95%	<3.07

4 结论与展望

在全球双碳战略与气候治理需求下,CO₂ 捕集作为 CCUS 技术的核心环节,技术优化与工业化应用对实现减碳目标至关重要。化学吸收法因吸收效果好、分离纯度高,仍是当前主流碳捕集技术,而有机胺吸收剂是该技术的核心载体。混合胺吸收剂已在国内外多个工业项目中落地应用,均验证了其技术可行性。但行业仍面临如高效吸收剂成本偏高、长期运行中胺液易降解挥发、部分体系反应机理研究不充分、百万吨级大规模示范项目经验不足等挑

战。未来混合胺吸收剂捕集 CO₂ 的发展应重点关注以下几个方面。

(1)研发低成本、高稳定性新型混合胺吸收剂配方,结合纳米技术、催化技术优化吸收性能。

(2)深化吸收剂降解机理研究,开发稳定剂延长使用寿命。

(3)优化工艺流程与设备设计,如改进吸收塔结构,引入热泵技术降低再生能耗。

(4)推动百万吨级示范项目建设,积累规模化应用数据,加速混合胺吸收剂技术的工业化普及,助力双碳目标实现。

参考文献

- [1] Pang R, Shao B, Chen Q, *et al.* The co-occurrent microplastics and nano-CuO showed antagonistic inhibitory effects on bacterial denitrification: Interaction of pollutants and regulations on functional genes[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 862: 160892.
- [2] Shi W, Tang W, Qiao F, *et al.* How to reduce carbon dioxide emissions from power systems in gansu province—analyze from the life cycle perspective[J]. *Energies*, 2022, 15(10): 3560–3560.
- [3] 蒋聪, 高歌, 江伍凤, 等. 醇胺溶液催化法碳捕集的能耗评估及动力学分析[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(6): 956–963.
- [4] 陆诗建, 刘苗苗, 刘玲, 等. 烟气胺法 CO₂ 捕集技术进展与未来发展趋势[J]. *化工进展*, 2023, 42(1): 435–444.
- [5] Donaldson T L, Nguyen Y N. Carbon dioxide reaction kinetics and transport in aqueous amine membranes[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1980, 19(3): 260–266.
- [6] Zhou S, Zhu Y, Xi H, *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.
- [7] Liu H, Barzaghi F, Luo L, *et al.* CO₂ gas-liquid equilibrium study and machine learning analysis in MEA-DMEA blended amine solutions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 356: 130024.
- [8] Abdullah M A. Mixed amine absorbent based on hollow fiber membrane contactor removes CO₂ from Flue Gas[J]. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2024, 120(1): 111–121.
- [9] Zhen Y, Zhu C, Fu T, *et al.* CO₂ capture performance of AMP-EAE amine blends: Absorption in the microchannel and desorption from saturated solutions[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(6): 114131.
- [10] Vamja V, Vakharia V, Bandyopadhyay R, *et al.* CO₂ solubility in aqueous 1-methylpiperazine and its blend with 2-amino-2-methyl-1-propanol: New experimental data and leveraging random forest model for accurate prediction[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2025, 595: 114405.
- [11] Zhang H, Wang L, Ye Y, *et al.* Study on CO₂ absorbent of DETA and TEA mixed amine solution[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(4): 609–617.
- [12] An S, Huang X, Li N, *et al.* Preventing crystallization at high concentrated 2-amino-2-methyl-1-propanol for energy-saving CO₂ capture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330: 125484.
- [13] 张娇娇. MDEA 基新型相变吸收剂的开发及碳捕集过程研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- [14] 许咪咪, 王淑娟. 液-液相变溶剂捕集 CO₂ 技术研究进展[J]. *化工学报*, 2018, 69(5): 1809–1818.
- [15] Zhang W, Jin X, Tu W, *et al.* Development of MEA-based CO₂ phase change absorbent[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 316–323.
- [16] 胡彦陇, 王强, 胡定凯, 等. MDEA 基相变吸收剂筛选及其 CO₂ 捕集性能[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(6): 158–170.
- [17] Hong S, 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.
- [18] Qin S, Dai S, Fan W, *et al.* A novel ionic liquid absorbent with poly-amidoamine dendrimer as cations for efficient CO₂ absorption[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 402: 124766.
- [19] Tiwari S C, Pant K K, Upadhyayula S. Kinetics study and modeling of CO₂ capture in new class dual-functionalized ionic liquid blend methyl diethanolamine absorbents[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2024, 63(17): 7578–7592.
- [20] 陆诗建, 刘建武, 喻健良, 等. 基于 MDEA 复合吸收剂捕集 EOR 产出气中二氧化碳[J]. *天然气化工: C1 化学与化工*, 2019, 44(6): 79–85, 92.
- [21] Zhou J, Zhang J, Jiang G, *et al.* Study on shipboard carbon capture technology with the MEA-AMP-Mixed absorbent based on Ship Applicability Perspective[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(33): 35929–35936.
- [22] Magnone E, Lee H J, Shin M C, *et al.* A performance comparison study of five single and sixteen blended amine absorbents for CO₂ capture using ceramic hollow fiber membrane contactors[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021, 100: 174–185.
- [23] 张霜霜. 两相吸收剂捕集烟气中二氧化碳的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2024.
- [24] Zhao W, Liu L, Fan C, *et al.* Preparation and CO₂ capture experiment of amino-functionalized ionic liquid combined with PMDETA absorbent[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(8): 2346–2356.
- [25] Meng H, Lu C, Yang J, *et al.* The Energy-Saving Strategy for CO₂ Capture in ionic liquid reinforced amine absorbents with a potentiometric method[J]. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2025, 13(5): 2097–2106.
- [26] 徐冬, 黄艳, 宋俊朝, 等. 低能耗 CO₂ 混合胺吸收剂复配筛选与工业验证[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(8): 90–98.
- [27] 毛松柏, 江洋洋, 叶宁, 等. 新型高效低耗 CO₂ 捕集配方溶剂的开发及工业应用[J]. *化学反应工程与工艺*, 2016, 32(6): 559–564.
- [28] Cui Q R, Zhao R, Wang T K, *et al.* Engineering a 150 000 t·a⁻¹ post-combustion carbon capture and storage demonstration project for coal-fired power plants[J]. *Engineering*, 2022, 14: 22–26. ■