

魏青, 张振涛, 王瑞祥, 等. 醇胺法碳捕集技术的研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(1): 90-99.

WEI Q, ZHANG Z T, WANG R X, et al. Research progress of carbon capture technology by alcohol amine method [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(1): 90-99.

醇胺法碳捕集技术的研究进展

魏青^{1,2,3}, 张振涛^{2,3}, 王瑞祥^{1*}, 张化福^{2,3*}, 杨俊玲^{2,3}, 吴宏伟⁴

1. 北京建筑大学环境与能源工程学院

2. 中国科学院理化技术研究所

3. 中国轻工业食品药品品质加工储运装备与节能技术重点实验室

4. 赫特福德大学工程与计算机科学学院

摘要 燃煤电厂的烟气是 CO₂ 长期、稳定、集中的来源, 减缓温室效应的最直接有效的手段即从电厂烟气中捕集 CO₂, 其中醇胺溶液吸收法是最具潜力、应用最广泛的碳捕集技术, 但其存在再生能耗高的缺点。首先介绍了碳捕集技术的工作原理及流程, 针对醇胺溶液碳捕集技术, 从吸收剂的发展、吸收过程工艺优化、再生过程工艺优化和复合工艺优化等方面综述了目前基于醇胺溶液的碳捕集技术的发展现状。研究表明: 未来应注重开发高吸收速率、低再生消耗、低胺耗的新型醇胺吸收剂; 在工艺优化方面, 吸收/再生过程工艺优化要提高吸收/解吸速率, 降低能耗; 复合工艺优化要合理耦合多种单一工艺优化方法, 以更大程度地降低能耗。

关键词 碳捕集; 醇胺吸收剂; 化学吸收法; CO₂ 吸收; CO₂ 解吸

中图分类号: X701 文章编号: 1674-991X(2025)01-0090-10 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20240228

Research progress of carbon capture technology by alcohol amine method

WEI Qing^{1,2,3}, ZHANG Zhentao^{2,3}, WANG Ruixiang^{1*}, ZHANG Huaifu^{2,3*}, YANG Junling^{2,3}, WU Hongwei⁴

1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture

2. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences

3. Key Laboratory of Food & Pharmaceutical Quality Processing Storage and Transportation Equipment and Energy-saving Technology, China National Light Industry

4. School of Engineering and Computer Science, University of Hertfordshire

Abstract The boiler flue gas of coal-fired power plants is a long-term, stable, and concentrated source of CO₂, and the most direct and effective way to mitigate the greenhouse effect is to capture CO₂ from the flue gas of power plants. Among them, the absorption method of alcohol amine solution has the most potential and is the most widely used carbon capture technology. However, this method currently has the disadvantage of high regeneration energy consumption. Firstly, the working principles and processes of carbon capture technologies were introduced. Regarding the carbon capture technology based on alcohol amine solution, the current development status of the technology was reviewed, from the aspects of absorbent development, absorption process optimization, desorption process optimization, and composite process optimization. The study suggested that in the future, attention should be paid to developing a new type of alcohol-amine absorbent with a high absorption rate, low regeneration consumption, and low amine consumption. The absorption/desorption rate should be improved in the process optimization, and the system energy consumption should be reduced in the absorption/regeneration process optimization. The composite process optimization should effectively combine various single-process optimization methods to reduce energy consumption to a greater extent.

Key words carbon capture; alcohol amine absorbent; chemical absorption method; CO₂ absorption; CO₂ desorption

收稿日期: 2024-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52206032, 21978308); 河北省科技重大专项(23291801Z); Science, Technology & Innovation Funding Authority (STIFA) of Egypt (44205)

作者简介: 魏青(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为醇胺法碳捕集技术优化, 1093527260@qq.com

* 通信作者: 1. 王瑞祥(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事建筑空调制冷设备技术及纳米工质技术研究, wangruixiang@bucea.edu.cn

2. 张化福(1987—), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事高效低成本二氧化碳捕集与节能技术研究, zhanghuaifu@mail.ipc.ac.cn

随着全球能源需求的持续增长,能源供需失衡问题日益严重。与此同时,传统化石能源活动过程中产生的 CO₂ 等温室气体排放量逐年增加,加剧了全球变暖问题^[1]。中国作为最大的发展中国家,CO₂ 排放量在全球占比较大^[2],2020 年中国碳排放总量占全球总排放量的 32%^[3]。2020 年,习近平主席在联合国大会一般性辩论上提出:中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和^[4]。这一论述的提出使我国碳减排工作更加迫切。

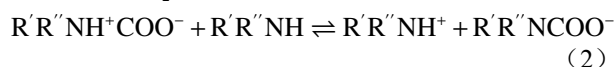
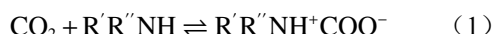
电力行业是我国最大的 CO₂ 排放行业,碳排放量约占全国碳排放总量的 40%^[5]。电源结构中,火电机组占全国总装机容量的 59%,2020 年全国火电装机容量为 12.5 亿 kW,其中煤电装机容量为 10.8 亿 kW,占比为 86.7%^[6]。2020 年我国由煤炭消费导致的 CO₂ 排放量为 71.20 亿 t,占全国 CO₂ 排放总量的 71.9%^[7]。由此可见,燃煤电厂的锅炉烟气是 CO₂ 长期、稳定、集中的来源,因而减缓温室效应的最直接有效的手段是从电厂烟道气中捕集 CO₂^[8]。

电力行业燃煤烟气 CO₂ 排放特点表现为烟气量大、CO₂ 分压低、排放总量高^[9],燃烧后捕集技术对现有电厂兼容性良好,是一种成熟、适应工况广的碳捕集技术^[10]。其中,醇胺溶液吸收法对低分压 CO₂ 气体吸收效果好、技术成熟,但再生能耗较大^[11]。因此,研究醇胺法碳捕集技术,并降低能耗和成本,对实现我国碳达峰和碳中和目标具有重要意义^[12]。

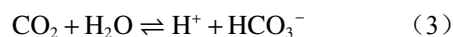
1 碳捕集工作原理及流程

1.1 工作原理

传统醇胺法捕集 CO₂ 是依靠 CO₂ 和吸收剂之间的化学反应作用,通过高效 CO₂ 吸收剂将 CO₂ 从气源中分离并回收的方法^[13]。胺基吸收剂是典型的醇胺吸收剂,常见的醇胺吸收剂有一乙醇胺(MEA)、二乙醇胺(DEA)和甲基二乙醇胺(MDEA)等^[14]。考虑到不同胺的反应活性不同,CO₂ 与胺基团的结合能顺序为伯胺>仲胺>叔胺^[15]。伯胺和仲胺反应方程式^[16]如下:



伯胺和仲胺与 CO₂ 反应生成氨基甲酸盐,叔胺不能直接与 CO₂ 反应生成氨基甲酸盐,但叔胺能促进 CO₂ 在水中解离出氢离子,并形成碳酸氢盐^[17],反应方程式^[16]如下:



从式(1)和式(2)可以看出,1 mol 伯胺/仲胺吸收剂最大吸收 0.5 mol CO₂,其反应特征在于吸收速率快、吸收负荷较低^[18]。从式(3)和式(4)可以看出,1 mol 叔胺吸收剂最大吸收 1 mol CO₂,但是由于分子结构中缺少活性氢原子,因此叔胺吸收剂的特征为吸收容量大但吸收速率较低^[19]。

1.2 系统流程

醇胺法是现阶段最具规模化应用的碳捕集技术,具有 CO₂ 捕集率高(>90%)、捕获 CO₂ 纯度高(>99%)、烟气适应性较好等优点^[20]。醇胺法碳捕集系统由吸收塔、解吸塔和其他辅助装置组成。传统碳捕集流程包括吸收、预热、再生和预冷过程。在吸收过程,电厂锅炉排出的烟气进入吸收塔底部,同时醇胺溶液(未吸收时称为贫液)从顶部进入吸收塔与烟气逆流接触,烟气中的 CO₂ 被贫液吸收,吸收塔中吸收了 CO₂ 的吸收剂(富液)从吸收塔底部流出,脱碳后的烟气则从吸收塔塔顶排出;在预热过程,反应后的富液与从解吸塔底部流出的贫液进行热交换升温,然后进入解吸塔;在再生过程,在外部热量的帮助下,富液中的 CO₂ 从吸收剂中被释放出来,富液转化为贫液从解吸塔底流出;在预冷过程,贫液被冷却后进入吸收塔塔顶,开始新一轮循环^[21-22]。图 1 为醇胺法捕集 CO₂ 的流程。

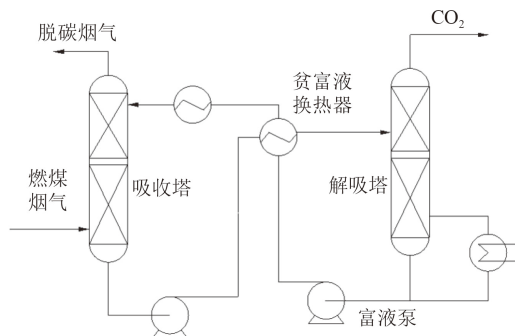


图 1 醇胺法捕集 CO₂ 流程

Fig.1 Process of CO₂ capture by alcohol amine method

目前,传统醇胺法捕集 CO₂ 工艺由于系统投资成本高、运行能耗高,导致燃煤电厂投资增加、净发电效率下降^[23]。为了降低碳捕集系统流程的能耗,降低投资与运行成本,研究人员从醇胺吸收剂、吸收过程、再生过程等方面对醇胺法碳捕集系统进行了优化。

2 醇胺吸收剂优化研究

在醇胺吸收剂中,MEA 的分子量最小,分子比

重最低、碱性最强,在碳捕集工艺中的捕集速率较快,对工业烟气中的碳具有较强的吸收能力^[24]。目前,30% MEA 溶液已经被广泛应用于工业捕集 CO₂ 领域,但仍存在吸收反应热和再生能耗高、腐蚀设备以及易降解等缺点^[25]。

2.1 复合醇胺吸收剂

混合醇胺吸收剂是一种通过将具有高吸收能力和低再生能耗的有机物与具有快反应速率和低吸收能力的有机物混合来提高吸收效率的方法,该方法可以改变溶液的整体性质,提升吸收剂对 CO₂ 的吸收/再生能力^[26]。近年来国内外研究人员将 MEA、DEA、杂环胺哌嗪(PZ)、三乙烯四胺(TETA)、2-(二甲基氨基)乙醇(DMAE)、二乙烯三胺(DETA)和空间位阻胺异丁醇胺(AMP)等复合形成复合醇胺,以促进吸收剂的吸收/再生速率,降低传统胺溶剂解吸 CO₂ 的能耗。

为了优化吸收剂的吸收性能,提高吸收速率和吸收容量,研究人员将目光聚焦在 MEA 和其他醇胺溶液的复合醇胺溶液上。Gautam 等^[27] 研究发现新型 TETA-DMAE 水胺共混物在温度为 315.65 K 和 17.73 kPa 的分压下,CO₂ 最佳平衡负荷为 0.92 mol/mol(以 CO₂/胺计),3 mol/L 的 TETA-DMAE 水胺共混物的循环负荷能力比 5 mol/L 的常规 MEA 高 55.03%。Dash 等^[28] 研究了 AMP 和 1-甲基哌嗪(1-MPZ)的水混合溶剂对 CO₂ 的捕集性能,发现 20% AMP 与 20% 1-MPZ 吸收剂的 CO₂ 循环容量为 1.75 mol/mol,高于 30% MEA 的循环容量。

再生过程中的再生速率和再生能耗对碳捕集过程也有重要影响,许多研究都采用复合醇胺溶液来提高再生速率并降低再生能耗。孙路长等^[29] 在研究中以 AMP 为基础,合成了 TETA/AMP 复合水基吸收液用于捕集烟气中的 CO₂。结果表明,当 TETA 与 AMP 的质量比达到 1:1 时,该复合吸收液的饱和吸收量较纯 AMP 提升近 1 倍,再生速率最高可达 0.03 g/min。Zhang 等^[30] 研究了 MEA-MDEA-PZ 三元混合吸收剂对 CO₂ 的捕集性能,发现当 MDEA/PZ 的摩尔比为 1~5 时,再生能耗比标准 5 mol/L MEA 溶液降低了 15.22%~49.92%。

通过合理复合不同醇胺吸收剂,可同时提升吸收剂的吸收和再生性能。吴琪^[31] 以 PZ 溶液为基础,与 MEA、AMP、PZ 和 DMAE 溶液混合组成混合醇胺吸收剂来提升吸收剂溶液对 CO₂ 的捕集性能,结合 1.0 mol/L 的 PZ 与 0.5 mol/L 的 DMAE 所形成的溶液,在吸收 CO₂ 方面表现出色,其最大吸收速率相较于单独使用 DMAE 溶液,提升了 306%,同

时最大 CO₂ 吸收量也有 360% 的大幅增加;而 1.0 mol/L 的 PZ 与 0.5 mol/L 的 AMP 混合溶液在 CO₂ 的再生性能上表现更为突出,与单独使用 AMP 溶液相比,其最大再生速率提升了 214%,最大 CO₂ 再生量也有 50% 的增加。董野等^[32] 研究发现 AMP-DETA 混合醇胺溶液的吸收/再生性能均优于传统 MEA 溶液,当 AMP:DETA 为 1:1 时,溶液 CO₂ 负荷为 0.73 mol/mol,解吸率为 82.99%。在此理想配比下加入 PZ 可使吸收剂的初始吸收速率提升 38.57%,加入 TETA 可使吸收剂的 CO₂ 负荷提升 36.99%,加入 N-甲基二乙醇胺(MDEA)可缩短 1/3 的再生时间。

复配醇胺吸收剂综合了不同吸收剂的优异特性,具有 CO₂ 负荷能力高、循环容量大和再生能耗低的优势,从而确保高效 CO₂ 吸收/再生性能,是醇胺吸收剂未来重要的研究方向。但复配醇胺吸收剂仍需深入研究,注重开发高吸收速率、低再生消耗、低胺耗、低成本的新型醇胺吸收剂。

2.2 吸收剂改性研究

在醇胺溶液中添加催化剂或者纳米材料等可促进 CO₂ 吸收/再生、降低再生能耗。近年来,由于催化剂的特殊性,越来越多的研究人员开发新型催化剂以降低 CO₂ 的再生能耗。Ali-Saleh-Bairq 等^[33] 研究发现在单乙醇胺中添加 SO₄²⁻/ZrO₂/SiO₂,与未添加催化剂的 MEA 相比,再生能耗降低 36.48%,解吸率提高 35.1%。魏可馨^[34] 通过改性制备出一种不规则介孔孔道结构的棒状钨基 MOFs 材料,并引入磷钨酸(HPW)增加酸性位点,得到复合催化剂 CeM-HPW-15,与非催化相比,CeM-HPW-15 可以将再生速率提升 166%,解吸量提升 38.1%,再生能耗降低 29.4%。

纳米颗粒的添加可以强化醇胺吸收剂的物理性质、增强传质效果^[35],从而增强吸收剂对 CO₂ 的吸收性能和再生性能。李文雅等^[36] 采用纳米颗粒强化了二乙氨基乙醇(DEEA)和 N-甲基二乙醇胺(MDEA)水溶液对 CO₂ 的捕集性能,与未添加纳米颗粒的 MEA 相比,30%DEEA-0.05% 25 nm TiO₂、30%MDEA-0.05% 40 nm TiO₂、30%MDEA-0.06%GO 纳米体系 CO₂ 吸收量分别提高了 9.86%,11.26%,13.8%;吸收速率分别提高了 33.43%,49.72%,39.23%;解吸量分别提高了 10.72%,9.19%,26.66%,CO₂ 的吸收/再生性能得到了显著提升。徐立华^[37] 以 MDEA 为主体吸收剂,以纳米级 TiO₂ 和纳米级 SiO₂ 为促进剂构建新型复配醇胺体系,研究表明,与 30% MDEA 相比,30%MDEA-0.05%SiO₂(15 nm)

在 50 ℃ 时吸收速率提高了 19.5%, 吸收量也有较大提升。

催化剂和纳米颗粒对醇胺溶液的改性可显著提高吸收剂的吸收率、吸收容量, 同时降低再生能耗, 通过添加催化剂或纳米颗粒强化醇胺溶液的 CO₂ 吸收/再生性能也是未来醇胺吸收剂的一个重要研究方向。

3 CO₂ 捕集工艺优化研究

3.1 CO₂ 吸收优化

CO₂ 吸收过程的优化是通过强化吸收剂的吸收过程, 提高单位时间内吸收剂的 CO₂ 负荷量, 从而增加循环吸收量, 达到降低单位 CO₂ 再生能耗的效果^[38]。目前, 主要优化方法包括级间冷却工艺、填料优化和吸收塔参数优化等。

3.1.1 级间冷却

在吸收过程中, 吸收反应为放热反应, 塔内温度升高不利于吸收反应的正向进行。级间冷却工艺通过在吸收塔中部设置冷却器并采用循环冷却的方式, 既增强了吸收过程中的传质驱动力, 又显著提升了醇胺溶液的负荷能力, 工艺流程如图 2 所示。

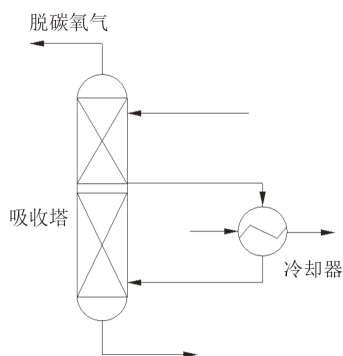


图 2 级间冷却工艺流程

Fig.2 Interstage cooling process flow chart

级间冷却工艺优化加强了吸收过程的正向反应, 提高了 CO₂ 吸收速率和捕集率, 降低了能耗。董文峰^[39]基于 300 m³/h 烟气二氧化碳捕集测试平台, 测试了级间冷却工艺运行性能, 发现级间冷却开启后, 级间吸收剂温度从 67 ℃ 下降到 40 ℃, 整个吸收塔的温度降低, 这一变化促进了热力学条件向更有利于吸收过程的方向转变, 使得 CO₂ 与吸收剂的反应更为彻底, 吸收塔的捕集率显著提高(95.9% 上升到 98.8%), 此外, 该工艺改进还减少了 2%~4% 的能耗。Rehan 等^[40]研究发现在碳捕集系统中安装中间冷却器可以节省约 2.51% 的 MEA 溶液, 与真实情况相比, 减少了 59 000 kg/h 的吸收剂用量; 当中间冷却器位置靠近吸收塔底部时, 可以提高 MEA 吸收剂的

负荷, 而且仅从吸收塔估计可节省 16 GJ/h 的能耗。Jin 等^[41]研究了级间冷却工艺的节能效果, 中间冷却装置可以降低吸收塔温度, 并提供较大的吸收驱动力, 级间冷却工艺最小能耗为 2.32 MJ/kg, 能耗相比传统碳捕集工艺流程降低了 3.7%。

级间冷却工艺的应用提高了醇胺法碳捕集系统的整体性能。在吸收方面, 级间冷却工艺可降低吸收塔的温度、促进吸收反应的进行, 从而减少醇胺溶液的消耗, 同时提高碳捕集率和吸收剂负荷量; 在节能方面, 与传统碳捕集工艺相比, 级间冷却工艺可使能耗降低 5%。

3.1.2 吸收塔填料

填料对吸收塔的传质性能具有重要影响, 不仅会影响压降, 还会影响整个吸收过程的效率, 改进吸收塔的填料是提高吸收效率的有效手段。张倩等^[42]研究发现填料高度为 10 m 的 252 Y 规整填料的捕集率比填料高度为 15 m 的 50 mm 鲍尔环填料的捕集率高, 252 Y 规整填料的比表面积相较于 50 mm 鲍尔环填料提高近 1 倍, 其气体通量和传质效率均有大幅度的提高, 且吸收塔高度和塔径均可以降低, 降低了吸收塔的成本。吴宇涛^[43]研究了散堆填料拉西环、鞍形 BERL、规整填料 Mellapak250Y 和 CY 这 4 种填料的吸收性能, 发现 CY 具有较大的孔隙率和比表面积, 且压降较小, 等板高度低, 传质效率最高, CO₂ 吸收率可达到 99.99%。

填料是吸收塔的核心构件, 它提高了气液两相传质传热的接触面积, 填料高度越高, 气液两相传质换热越充分^[42]。舒斌等^[44]研究发现增加填料高度, 吸收塔底出口富液中 CO₂ 负荷会逐渐增加, 使得溶液循环贫/富液负荷差增加, 总溶液循环流量逐渐减小, 能耗降低为 3.909 GJ/t, 相对于基础流程降低 5.684%。董胜节等^[45]研究发现吸收塔塔径、填料高度的增加有助于延长 MEA 溶液与烟气的接触时间, 提高碳捕集率和富液负荷。

吸收塔填料的优化方向分为种类优化和结构优化。在种类优化方面, 高效填料可以提高吸收塔的传质速率、气体通量, 从而可以降低吸收塔的体积, 降低吸收塔的成本。在结构优化方面, 填料高度的增加可以延长气液接触时间和气液接触面积, 提高碳捕集率、富液负荷, 降低能耗。

3.1.3 吸收塔运行参数

吸收塔运行参数的优化可增强吸收过程的热质传递, 使化学吸收反应朝着有利于吸收的方向进行。陆诗建等^[46]采用 Aspen Plus 软件对基于 100 t/d 碳捕集流程进行建模分析, 发现吸收率随着吸收

剂循环量的增大而增大,最佳吸收剂循环量为 120 t/h;当烟气流量为 24 t/h 时,CO₂ 捕集率达到最大。王旭等^[47]以 22% MEA 和 50%AMP-PZ 这 2 种吸收剂为研究对象,研究了吸收塔参数对吸收性能的影响,发现烟气温度升高会增大能耗,考虑到烟气预处理系统的能耗,吸收塔入口烟气最佳温度控制在 38~40 ℃;在吸收过程中,MEA 最佳液气比为 0.54,AMP-PZ 最佳液气比为 0.42。孙路长等^[48]在 10 000 t/a 二氧化碳捕集示范项目装置投运后,对运行参数进行了优化,发现吸收剂循环流量增大,系统能耗、碳捕集量相应提高,碳捕集率呈现出先降低后上升的趋势,最佳吸收剂循环流量为 3 400~3 700 kg/h;随着吸收塔入口烟气流量增大,虽然碳捕集量继续增加,但碳捕集率却出现了下降,最佳烟气流量为 6 000~7 000 m³/h。邬高翔^[49]研究了多种运行参数对 CO₂ 吸收性能的影响,发现吸收塔吸收压力的增加能够增大 MDEA 溶液对 CO₂ 的吸收量;随着溶液流量的增加,CO₂ 吸收率呈逐渐增加的趋势,当流量达到一定数值时,CO₂ 吸收率趋于稳定;CO₂ 负荷则随着流量增加而逐渐减小。此外,随着溶液温度的增加,CO₂ 吸收率呈下降趋势。

综上所述,通过优化吸收剂循环量、烟气温度、液气比、吸收塔吸收压力等吸收塔运行参数,可提高 CO₂ 吸收过程的吸收率。

3.2 CO₂ 再生优化

CO₂ 再生过程的优化主要通过热整合来回收利用多余的热量,减少或回收溶液升温的显热和蒸汽汽化的潜热,从而进一步降低再生能耗^[50]。目前,主要优化方法包括富液分流工艺、贫液闪蒸压缩工艺、富液闪蒸压缩工艺、压缩式热泵工艺和解吸塔参数优化等。

3.2.1 富液分流

富液分流工艺是将吸收塔塔底的富液分成两股物流:一股物流未经过换热升温直接以较低的温度进入解吸塔的顶部,回收解吸塔塔顶高温再生气的余热,同时吸热释放出 CO₂;另一股物流经贫富液换热器预热后进入解吸塔,该物流与未分流的原始物流相比流量减少,与贫液换热后可被加热至更高温度,这不仅提高了进入解吸塔的富液物流的热品质,而且通过调整两股物流的流量和入口位置,重新平衡了解吸塔内部的温度和热量分布,从而显著提升了再生效果^[51]。其工艺流程如图 3 所示。

分流比对系统的节能效果有较大影响,Li 等^[52]对富液分流比进行研究发现,富液分流比低于 0.45 时对系统节能具有促进作用,在分流比为 0.25

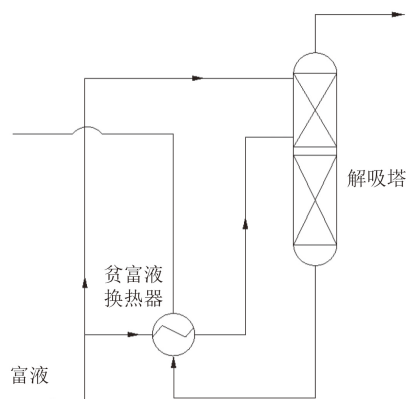


图 3 富液分流工艺流程

Fig.3 Rich liquid diverting process flow chart

时节能效果最好。Xue 等^[53]在碳捕集模拟中以 10% 未换热的富液分流到塔顶部,从解吸塔塔釜向上流动的蒸汽与塔顶向下的冷富液相遇,能从中剥离少量的 CO₂,MEA 和 DEA 分别节省了 7.7% 和 7.0% 的再沸器负荷。Zhao 等^[54]设置了冷凝器用于冷分流和来自解吸塔的热分流进行热交换,基于最佳分流比 0.3 时,再沸器热负荷降低 6.4%。

3.2.2 贫液闪蒸压缩

贫液闪蒸压缩是一种高效环保的节能工艺,可以降低蒸汽用量与再生能耗^[55]。经过解吸后的贫液进入闪蒸塔闪蒸,由于闪蒸塔中压强降低,导致大量液体在瞬间汽化,产生大量的二次蒸汽,液体的汽化潜热被有效转换为气体形式的显热,从而实现了热能的有效提取和利用。闪蒸出的液体在自身重力作用下从闪蒸塔底部流出,进入贫富液换热器经冷却后回到吸收塔。闪蒸塔中产生的大量二次蒸汽被压缩机加压后变成高温高压气体,随后进入解吸塔对富液进行加热,从而显著降低了再沸器的热负荷^[56],其工艺流程如图 4 所示。

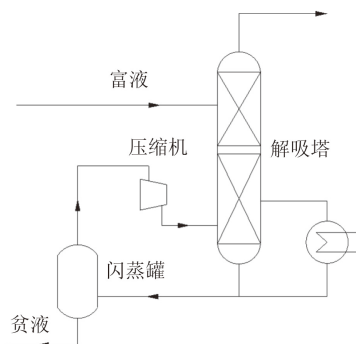


图 4 贫液闪蒸压缩工艺流程

Fig.4 Lean liquid flash compression process flow chart

Xue 等^[53]研究表明,在以 MEA 和 DEA 为吸收剂时,采用贫液闪蒸压缩工艺可以分别降低再沸器热负荷 12.8% 和 11.9%。马国龙等^[57]发现,吸收剂

为 MDEA/MEA 混合胺时, 在 80 kPa 闪蒸压力下, 贫液闪蒸压缩工艺与传统工艺相比总能耗下降 13.4%。Liu 等^[58] 研究了贫液闪蒸压缩工艺对解吸塔再生能耗的影响, 发现当闪蒸压力为 100 kPa 时, 贫液闪蒸压缩工艺的应用可使再生负荷从 3.85 GJ/t 降低到 3.1 GJ/t。Jeong 等^[59] 采用贫液闪蒸压缩工艺, 通过回收 CO₂ 运输过程中压缩产生的热量, 减少了溶剂再生所需的热能, 当进口压力为 150 kPa 时, MVC 工艺的能耗为 3.69 GJ/t, 与传统碳捕集工艺相比, 能耗降低 8.2%。

相比传统醇胺法碳捕集, 贫液闪蒸优化工艺降低了再沸器蒸汽量和再生能耗, 可使能耗降低 5%~15%, 节能效果更加突出。

3.2.3 富液闪蒸压缩

与贫液闪蒸压缩工艺类似, 富液闪蒸压缩工艺是对离开贫富液换热器的高温富液进行闪蒸, 闪蒸产生的液体被送到解吸塔顶部, 产生的蒸汽被压缩并输送至解吸塔底部提供热量^[23], 工艺流程如图 5 所示。Jung 等^[60] 研究表明采用富液闪蒸压缩工艺能够节省再沸器当量热负荷 0.069 MJ/kg, 但节省的热负荷与在压缩过程中所消耗的功基本上相互抵消, 节能效果不明显。

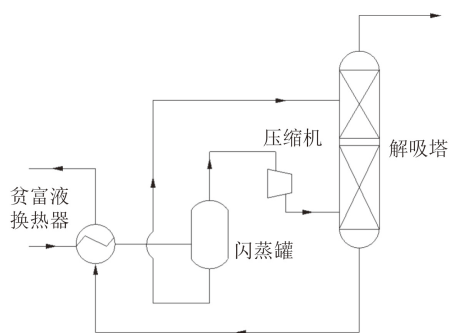


图 5 富液闪蒸压缩工艺流程

Fig.5 Rich liquid flash compression process flow chart

富液闪蒸压缩工艺通过机械蒸汽压缩技术, 降低了碳捕集系统的能耗。相比贫液闪蒸压缩工艺, 富液的温度相对较低, 所得的蒸汽提供的热量相对有限, 同时还要消耗较多的压缩功, 因此对系统能耗节省效果并不明显^[61]。

3.2.4 压缩式热泵

基于压缩式热泵的醇胺法碳捕集工艺流程的建立主要是利用压缩式热泵来回收解吸塔塔顶气体中蒸汽的潜热和 CO₂ 的显热, 然后将回收的这部分热量用于提高富液温度。富液在解吸塔中吸热释放 CO₂, 从而实现 CO₂ 的再生^[62], 工艺流程如图 6 所示。

高丽娟^[63] 利用 Aspen Plus 建立了基于压缩式热

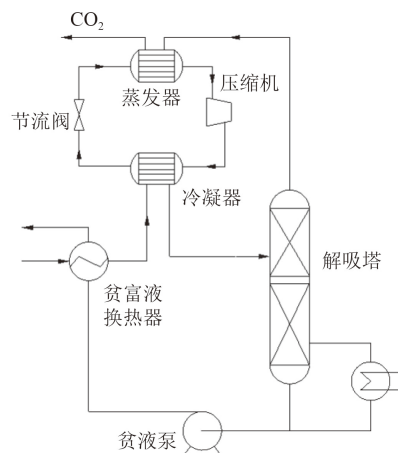


图 6 压缩式热泵工艺流程

Fig.6 Technical flow chart of compression heat pump

泵工艺的醇胺法碳捕集模型, 研究发现压缩式热泵工艺可使系统再生能耗降至 3.651 GJ/t, 与常规醇胺法捕集 CO₂ 工艺流程进行对比, 节能率达到 13.15%。压缩式热泵工艺利用压缩式热泵可回收塔顶的蒸汽余热和 CO₂ 的显热, 可降低系统能耗 10%~15%, 节能效果比较好。

3.2.5 解吸塔运行参数

降低再生能耗是再生过程工艺优化的重点, 通过优化解吸塔运行参数可以减少再生能耗。赵东亚^[64] 对再生塔能耗进行平衡级建模, 利用 MESH 方程建立再生塔机制模型, 借助化工模拟软件 ProTreat 建立工艺模型, 并进行能耗敏感性分析, 发现解吸塔塔底压力的增大有利于降低再生能耗, 气相流率的减小也有利于降低再生能耗。王家凤等^[65] 建立了解析塔工艺模型并对解析塔参数进行了分析, 发现 CO₂ 解吸率随再沸器热负荷的增加先不断增大至某一值后增长速度变缓, 能耗随贫液负荷的增加先减小后增大。田松峰等^[66] 研究了解吸塔压力对再生过程的影响, 随着再生压力的增加, 在 0.1~0.2 MPa 范围内 CO₂ 的解吸率越来越高, 在 0.2~0.3 MPa 范围内 CO₂ 的再生率越来越低, 为了降低蒸汽消耗量, 解吸塔运行压力要低于 0.3 MPa。

综上所述, 通过优化解吸塔再生压力、再沸器热负荷等解吸塔运行参数, 可提高 CO₂ 解吸过程的再生率, 降低再生能耗。

4 复合工艺优化

将多种单一工艺进行耦合, 通过复合工艺优化, 可进一步降低碳捕集系统的能耗。郭李恒等^[67] 通过 Aspen Plus 软件建立了基于蒸汽压缩—分流工艺的二氧化碳捕集工艺流程, 该流程能够使单位 CO₂ 捕集量的再沸器负荷降至 2.231 GJ/t, 与传统流

程相比,该流程的总能耗可降低 21.0%~21.6%。赵红涛等^[68]在普通碳捕集系统中集成级间冷却、机械蒸汽再压缩和富液分流解吸 3 项节能工艺,相比传统工艺,该复合工艺单位再生能耗从 4.09 GJ/t 降低到 2.64 GJ/t,降幅达 35.28%。刘珍珍等^[69]开发了一种新工艺,包含级间冷却工艺、富液分流工艺和蒸汽机械再压缩工艺,结果表明,其再生能耗为 2.61 GJ/t,相比 30% MEA 溶液的传统工艺降低了 34.75%。Lu 等^[70]基于 200 万 t/a CO₂ 捕集项目,采用级间冷却 MVC 热泵解吸式热能回收优化工艺,综合再生能耗小于 2.2 GJ/t,再生能耗大幅降低。陆诗建等^[71]将压缩式热泵工艺与 MVC 热泵、富液分流、级间冷却 3 种节能工艺进行耦合,相比传统碳捕集流程,系统能耗低至 2.533 GJ/t,节能 39.75%。

由此可见,与单一的工艺优化方法相比,复合工艺优化能够显著减少能耗,而 2 种或 3 种复合优化方法可以减少 20%~40% 的能源消耗,节能效果显

著。未来应研究不同工艺与碳捕集系统的耦合特性,从而选择合理的工艺进行组合得到高产量、高捕集率、低能耗和低胺耗的碳捕集系统流程。

表 1 列出了醇胺法碳捕集技术不同优化工艺对系统能耗的影响。可以看出,对于同种优化工艺,由于采用不同的吸收剂或运行参数,优化结果也不尽相同。吸收过程优化工艺较少,级间冷却工艺可以降低少部分能耗,一般情况下使能耗降低 2%~5%。再生过程优化工艺有很多,其中富液分流工艺常规情况下可以使能耗降低 5%~10%,贫液闪蒸压缩工艺可降低能耗 8%~13%,在节能方面有很好的表现;富液闪蒸压缩工艺可以降低很少的再沸器能耗,但是额外的压缩功增加了总体再生能耗,在节能方面效果并不理想;压缩式热泵工艺可以降低能耗 10%~15%,具有良好的节能效果。复合优化工艺可以大幅降低能耗,2 种或 3 种复合优化工艺可降低能耗 20%~40%,相比单一优化工艺,节能效果有明显提升。

表 1 醇胺法碳捕集不同优化工艺的节能效果

Table 1 Energy saving effects of different optimization processes of carbon capture technology with alcohol amine method

节能工艺		吸收剂	节能效果	节能率/%	数据来源
吸收过程优化	级间冷却	MEA	提高捕集率	2~4	文献[39]
		MEA	16 ¹⁾		文献[40]
		MEA	2.32 ²⁾	3.7	文献[41]
再生过程优化	富液分流	MEA和DEA		7~7.7	文献[53]
		MEA		6.4	文献[54]
	贫液闪蒸压缩	MEA和DEA		11.9~12.8	文献[53]
		MDEA/MEA混合胺		13.4	文献[57]
		MEA	3.1 ³⁾		文献[58]
		MEA	3.69 ³⁾	8.2	文献[59]
	富液闪蒸压缩	MEA	再沸器能耗降低0.069 ²⁾		文献[60]
复合工艺优化	压缩式热泵工艺	MEA	3.65 ³⁾	13.15	文献[63]
	蒸汽压缩—分流	MEA	2.231 ³⁾	21.0~21.6	文献[67]
	级间冷却、机械蒸汽压缩和富液分流	MEA	2.64 ³⁾	35.28	文献[68]
	级间冷却、富液分流和蒸汽机械再压缩	MEA	2.61 ³⁾	34.75	文献[69]
	级间冷却MVC热泵解吸式热能回收	新型复合胺	2.2 ³⁾		文献[70]
	压缩式热泵工艺、MVC热泵、富液分流和级间冷却	MEA	2.533 ³⁾	39.75	文献[71]

1)单位为GJ/h; 2)单位为MJ/kg; 3)单位为GJ/t。

5 结论与展望

(1)通过复合多种醇胺吸收剂、在吸收剂中添加催化剂或纳米粒子等方法,可以提高 CO₂ 负荷和循环容量,降低能耗。未来应考虑对不同醇胺溶液的吸收和再生机理进行研究,将不同醇胺溶液进行合理复配,并适当添加纳米颗粒或催化剂,研究高吸收

速率、低再生消耗、低胺耗、低成本的新型醇胺吸收剂。

(2)级间冷却、填料和吸收参数等吸收过程优化方法强化了吸收剂对 CO₂ 的吸收,提高了富液 CO₂ 负荷量,增加了 CO₂ 循环吸收量,降低了 CO₂ 再生能耗。相比传统碳捕集流程,吸收过程优化工艺可以使能耗降低 2%~5%。未来需要加强吸收过程中的正向反应,提高吸收过程的吸收速率、

CO₂ 负荷等吸收性能。

(3)分流工艺、贫液闪蒸压缩工艺、富液闪蒸压缩工艺、压缩式热泵工艺和解吸塔参数优化等再生过程优化方法通过回收利用余热,有效降低了再沸器的热负荷,从而降低了醇胺法碳捕集系统的再生能耗。相比传统碳捕集流程,解吸过程优化工艺可以使能耗降低 5%~15%,其中 MVC 技术可以使能耗降低 15% 左右。未来应考虑减少或回收富液升温的热量和蒸汽汽化的潜热,可进一步降低再生能耗。

(3)将不同优化工艺结合起来可以综合不同工艺的节能效果,提升碳捕集系统的吸收性能和再生性能,大幅降低能耗。相比传统碳捕集流程,复合优化工艺可以降低 20%~40% 能耗。为了更有效地降低消耗,未来应该根据各种优化工艺进行合理搭配,最大化地回收和利用碳捕集系统的余热,减少再沸器负荷,研发高效、低能耗的碳捕集工艺。

参考文献

- [1] ZHOU C, CHEN X Y. Forecasting China's energy consumption and carbon emission based on multiple decomposition strategy[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2023, 49: 101160.
- [2] 熊波, 陈健, 李克兵, 等. 工业排放气二氧化碳捕集与利用技术进展 [J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(1): 9-18.
XIONG B, CHEN J, LI K B, et al. Technical progress in carbon dioxide capture and utilization of industrial vent gas[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2023, 48(1): 9-18.
- [3] 张剑, 刘景洋, 董莉, 等. 中国能源消费 CO₂ 排放的影响因素及情景分析 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(1): 71-78.
ZHANG J, LIU J Y, DONG L, et al. Influencing factors and scenario analysis of China's CO₂ emission of energy consumption[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(1): 71-78.
- [4] 张君宇, 宋猛, 刘伯恩. 中国二氧化碳排放现状与减排建议 [J]. *中国国土资源经济*, 2022, 35(4): 38-44.
- [5] 吴昊, 任鑫, 朱俊杰. 发电行业二氧化碳排放监测技术现状与综述 [J]. *热力发电*, 2023, 52(7): 1-13.
WU H, REN X, ZHU J J. Current situation and review of carbon dioxide emission monitoring technology in power generation industry[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(7): 1-13.
- [6] 智佳佳, 旷贤启. “双碳”目标下火力发电行业转型发展路径分析 [J]. *山东电力高等专科学校学报*, 2021, 24(6): 40-43.
ZHI J J, KUANG X Q. Transformation and development path analysis of thermal power generation industry under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. *Journal of Shandong Electric Power College*, 2021, 24(6): 40-43.
- [7] 刘雅文. 《bp 世界能源统计年鉴》2021 年版发布: 能源市场遭受巨大冲击 [J]. *中国石油和化工*, 2021(8): 32-33.
- [8] KRISHNAN A, NIGHOJKAR A, KANDASUBRAMANIAN B. Emerging towards zero carbon footprint via carbon dioxide capturing and sequestration[J]. *Carbon Capture Science & Technology*, 2023, 9: 100137.
- [9] 汪黎东, 荆润秋, 王茹洁, 等. 中国火电行业燃煤烟气 CO₂ 捕集技术路径探究 [J]. *北京理工大学学报 (社会科学版)*, 2022, 24(4): 66-73.
- [10] 屈紫懿, 孔存金, 印洪浩, 等. 远洋船舶尾气碳捕集技术及发展趋势研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(1): 17-24.
QU Z Y, KONG C J, YIN H H, et al. Study on carbon capture technology and development trend of exhaust gas from ocean-going ships[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(1): 17-24.
- [11] MAHJOUR S K, FAROUGHI S A. Risks and uncertainties in carbon capture, transport, and storage projects: a comprehensive review[J]. *Gas Science and Engineering*, 2023, 119: 205117.
- [12] 牟俊锐, 毕金鹏, 李福昭, 等. 燃煤电厂二氧化碳燃烧后捕集技术研究进展 [J]. *齐鲁工业大学学报*, 2023, 37(3): 8-17.
MU J K, BI J P, LI F Z, et al. Research progress of post-combustion carbon dioxide capture technologies in coal fired power plants[J]. *Journal of Qilu University of Technology*, 2023, 37(3): 8-17.
- [13] 王成满, 赵耀. 热电厂 CO₂ 捕集与利用技术进展 [J]. *广州化工*, 2022, 50(20): 29-31.
WANG C M, ZHAO Y. Technical progress on CO₂ capture and utilization in thermal power plants[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2022, 50(20): 29-31.
- [14] 惠武卫, 姬存民, 赵楠楠, 等. 低浓度 CO₂ 捕集技术研究进展 [J]. *天然气化工: C1 化学与化工*, 2022, 47(4): 19-24.
HUI W W, JI C M, ZHAO H N, et al. Research progress of low concentration CO₂ capture technology[J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2022, 47(4): 19-24.
- [15] 叶敏, 赵兴雷. 燃煤电厂溶液吸收法碳捕集技术研究进展 [J]. *现代化工*, 2022, 42(9): 55-59.
YE Y, ZHAO X L. Review of solution absorption method for carbon capture in coal-fired power plants[J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(9): 55-59.
- [16] 张嘉伟, 顾文波, 张富龙. 基于化学吸收法的二氧化碳捕集技术研究进展 [J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(4): 96-106.
- [17] 张忠翼, 赵代胜, 梁鹏举, 等. CO₂ 捕集及工业应用研究进展 [J]. *当代化工研究*, 2023(21): 24-26.
ZHANG Z Y, ZHAO D S, LIANG P J, et al. Research progress on CO₂ capture and industrial applications[J]. *Modern Chemical Research*, 2023(21): 24-26.
- [18] 陆诗建, 刘苗苗, 刘玲, 等. 烟氨法 CO₂ 捕集技术进展与未来发展趋势 [J]. *化工进展*, 2023, 42(1): 435-444.
LU S J, LIU M M, LIU L, et al. Progress and future development trend of amine method of CO₂ capture technology from flue gas[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(1): 435-444.
- [19] 杨菲, 王风, 陆诗建, 等. MEA 二元复合胺溶液对 CO₂ 吸收的研究进展 [J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(1): 156-163.
YANG F, WANG F, LU S J, et al. Research progress of CO₂ absorption by MEA binary complex amine solutions[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2023, 48(1): 156-163.
- [20] 唐强, 李金惠, 邹建伟, 等. 二氧化碳捕集技术研究现状与发展综述 [J]. *世界科技研究与发展*, 2023, 45(5): 567-580.
TANG Q, LI J H, ZOU J W, et al. Review on research status and development of carbon dioxide capture technology[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2023, 45(5): 567-580.

- [21] YU X F, ZHANG S, LIU L L, et al. Optimal design and scheduling of carbon capture power plant based on uncertainty decision-making methods[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 134852.
- [22] 王珺瑶. 燃烧后化学吸收法脱碳技术能效研究与综合评价[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [23] 李耀东, 李振林, 王辉, 等. 燃烧后化学吸收法脱碳节能工艺研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43(4): 60-65.
- LI Y D, LI Z L, WANG H, et al. Research progress on decarburization and energy-saving processes by post-combustion chemical absorption[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(4): 60-65.
- [24] 杨海波, 钱焱群. 单乙醇胺(MEA)烟气脱碳过程模拟[J]. *节能*, 2022, 41(11): 25-27.
- YANG H B, QIAN H Q. Simulation of monoethanolamine(MEA) flue gas decarbonization process[J]. *Energy Conservation*, 2022, 41(11): 25-27.
- [25] 陆诗建, 贡玉萍, 刘玲, 等. 有机胺 CO₂ 吸收技术研究现状与发展方向[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(9): 44-54.
- LU S J, GONG Y P, LIU L, et al. Research status and future development direction of CO₂ absorption technology for organic amine[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(9): 44-54.
- [26] 季伟, 郑旭帆. 碳捕集项目化学吸收剂研究探讨[J]. *广东化工*, 2023, 50(13): 70-72.
- JI W, ZHENG X F. Study on chemical absorbent in carbon capture project[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(13): 70-72.
- [27] GAUTAM A, KUMAR MONDAL M. Post-combustion capture of CO₂ using novel aqueous Triethylenetetramine and 2-Dimethylaminoethanol amine blend: equilibrium CO₂ loading-empirical model and optimization, CO₂ desorption, absorption heat, and ¹³C NMR analysis[J]. *Fuel*, 2023, 331: 125864.
- [28] DASH S, PARIKH R, KAUL D. Development of efficient absorbent for CO₂ capture process based on (AMP + 1MPZ)[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62: 7072-7076.
- [29] 孙路长, 连少翰, 王凯亮, 等. TETA/AMP 复合水基 CO₂ 吸收液研究[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(6): 58-63.
- SUN L C, LIAN S H, WANG K L, et al. Research on aqueous TETA/AMP solution for CO₂ capture[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(6): 58-63.
- [30] ZHANG R, ZHANG X W, YANG Q, et al. Analysis of the reduction of energy cost by using MEA-MDEA-PZ solvent for post-combustion carbon dioxide capture (PCC)[J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 1002-1011.
- [31] 吴琪. 混合醇胺溶液对 CO₂ 吸收与再生性能试验及其反应动力学研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
- [32] 董野, 王婉申, 张思腾, 等. 水泥窑用混合胺二氧化碳吸收剂的实验研究[J]. *水泥工程*, 2023(5): 9-13.
- DONG Y, WANG W S, ZHANG S T, et al. Experimental study on mixed amine carbon dioxide absorbent used in cement kilns[J]. *Cement Engineering*, 2023(5): 9-13.
- [33] ALI-SALEH-BAIRQ Z, GAO H X, HUANG Y F, et al. Enhancing CO₂ desorption performance in rich MEA solution by addition of SO₄²⁻/ZrO₂/SiO₂ bifunctional catalyst[J]. *Applied Energy*, 2019, 252: 113440.
- [34] 魏可馨. 固体酸催化剂降低 CO₂ 解吸能耗的实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [35] KARE V, TIWARI S. Carbon capture by nanoparticle enhanced solvents[R]. 2023.
- [36] 李文雅, 徐立华, 丁旭昕, 等. 纳米颗粒强化醇胺水溶液捕集 CO₂ 的实验研究[J]. *应用化工*, 2023, 52(5): 1301-1307.
- LI W Y, XU L H, DING X X, et al. Experimental research of nanoparticle-enhanced CO₂ capture in alcohol amine solution[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(5): 1301-1307.
- [37] 徐立华. 纳米颗粒-有机胺混合吸收剂碳捕集研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [38] 叶舫, 李璐蕊, 穆亚鑫, 等. 溶剂法碳捕集节能工艺研究进展[J]. *化学工程*, 2024, 52(2): 7-11.
- YE Y, LI L R, MU Y X, et al. Research progress on energy saving technology of carbon capture by solvent method[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2024, 52(2): 7-11.
- [39] 董文峰. 基于低成本塑料填料和高效板式换热器的 CO₂ 化学吸收技术及工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [40] REHAN M, RAHMANIAN N, HYATT X, et al. Energy savings in CO₂ capture system through intercooling mechanism[J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 3683-3688.
- [41] JIN H, LIU P, LI Z. Impact of solvent properties on post-combustion carbon capture processes: a vapor-liquid equilibrium modelling approach[J]. *Chemical Engineering Science: X*, 2021, 10: 100095.
- [42] 张倩, 张井鲁. 基于 MEA/烟气 CO₂ 捕集系统的工艺模拟和吸收塔高度对模拟的影响分析[J]. *石油与天然气化工*, 2023, 52(2): 28-34.
- ZHANG Q, ZHANG J L. Process simulation and influence analysis of absorber height based on MEA/flue gas CO₂ capture system[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2023, 52(2): 28-34.
- [43] 吴宇涛. 用于碳捕集吸收塔的亲水改性塑料填料性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [44] 舒斌, 范宝成, 吴其荣, 等. 基于 Aspen Plus 的 CO₂ 胺法捕集工艺吸收端节能效果评估[J]. *节能*, 2023, 42(6): 63-66.
- [45] 董胜节, 卢明剑, 严新平, 等. LNG 船舶碳捕集过程模拟研究[C]//2023 世界交通运输大会(WTC2023)论文集(下册). 武汉: 中国科学技术协会, 交通运输部, 中国工程院, 湖北省人民政府, 2023: 6.
- [46] 陆诗建, 蒋超, 康寿兴. 基于 MVR 热泵的胺法捕集回收烟气中 CO₂[J]. *山东化工*, 2018, 47(10): 196-200.
- LU S J, JIANG C, KANG S X. Recovery of CO₂ in flue gas by amine method based on MVR heat pump[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2018, 47(10): 196-200.
- [47] 王旭, 杨昊, 王满仓, 等. 燃气电厂化学吸收二氧化碳捕集系统运行参数与能耗分析[J]. *分布式能源*, 2023, 8(5): 69-76.
- WANG X, YANG H, WANG M C, et al. Analysis of operating parameters and energy consumption of chemical absorption carbon dioxide capture system in natural gas power plants[J]. *Distributed Energy*, 2023, 8(5): 69-76.
- [48] 孙路长, 王争荣, 吴冲, 等. 燃煤电厂万吨级碳捕集工程设计与运行优化研究[J]. *华电技术*, 2021, 43(6): 69-78.
- SUN L C, WANG Z R, WU C, et al. Research on operation optimization of a 10 000 t/a carbon capture project for coal-fired power plants[J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(6): 69-78.
- [49] 郭高翔. 天然气净化厂高含 CO₂ 尾气捕集工艺技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [50] 叶凯. 基于有机胺吸收法的碳捕集工艺研究进展[J]. *中国资源综合利用*, 2021, 39(9): 117-119.
- YE K. Research progress of carbon capture technology based on organic amine absorption method[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(9): 117-119.

- [51] 白永锋, 王争荣, 詹国雄, 等. 燃煤烟气碳捕集模拟及节能优化[J]. 环境工程, 2023, 41(9): 61-71.
BAI Y F, WANG Z R, ZHAN G X, et al. Simulation and optimization of carbon capture in coal-fired flue gas[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(9): 61-71.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] ZHAO B, LIU F Z, CUI Z, et al. Enhancing the energetic efficiency of MDEA/PZ-based CO₂ capture technology for a 650 MW power plant: process improvement[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 362-375.
- [55] 黄钟斌, 陈曦, 叶宁, 等. MA-2 吸收剂在国能锦界电厂 15 万 t/a 碳捕集装置上的应用研究[J]. 现代化工, 2024, 44(5): 243-246.
HUANG Z B, CHEN X, YE N, et al. Application of MA-2 absorbent in 150 000 t/a carbon capture unit[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(5): 243-246.
- [56] 张金鑫. 胺法烟气 CO₂ 捕集工艺及热泵节能技术研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2018.
- [57] 马国龙, 张华, 李强, 等. MVR 热泵用于胺法捕集制氢弛放气 CO₂ 的能耗分析[J]. 云南化工, 2019, 46(6): 53-54.
MA G L, ZHANG H, LI Q, et al. Energy consumption analysis of MVR heat pump for amine capture and hydrogen production[J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(6): 53-54.
- [58] LIU L B, WANG S Q, NIU H W, et al. Process and integration optimization of post-combustion CO₂ capture system in a coal power plant[J]. *Energy Procedia*, 2018, 154: 86-93.
- [59] JEONG Y S, JUNG J, LEE U, et al. Techno-economic analysis of mechanical vapor recompression for process integration of post-combustion CO₂ capture with downstream compression[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 104: 247-255.
- [60] JUNG J, JEONG Y S, LEE U, et al. New configuration of the CO₂ capture process using aqueous monoethanolamine for coal-fired power plants[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(15): 3865-3878.
- [61] 林海周, 裴爱国, 方梦祥. 燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(12): 4874-4886.
LIN H Z, PEI A G, FANG M X. Progress of research on process modifications for amine solvent-based post combustion CO₂ capture from coal-fired power plant[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(12): 4874-4886.
- [62] 陆诗建, 孟晓锋, 高丽娟, 等. 压缩式热泵回收 CO₂ 捕集解吸塔废热节能工艺研究[J]. 山东化工, 2019, 48(13): 213-217.
LU S J, MENG X F, GAO L J, et al. Study on energy-saving technology for recovering waste heat from CO₂ capture and desorption tower by compressed heat pump[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(13): 213-217.
- [63] 高丽娟. CO₂ 捕集解吸塔顶蒸汽热能回收及能量综合利用研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2019.
- [64] 赵东亚, 王家凤, 田群宏, 等. MEA 法碳捕集工艺再生塔能耗优化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 181-186.
ZHAO D Y, WANG J F, TIAN Q H, et al. Energy consumption optimization of regeneration tower for MEA CO₂ capture process[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 181-186.
- [65] 王家凤, 田群宏, 赵东亚, 等. 醇胺法解吸塔优化设计及解吸特性分析[J]. 计算机与应用化学, 2018, 35(11): 940-946.
WANG J F, TIAN Q H, ZHAO D Y, et al. Alcohol amine method based optimal design of desorption tower and regeneration characteristics analysis[J]. Computers and Applied Chemistry, 2018, 35(11): 940-946.
- [66] 田松峰, 张都, 李正宽, 等. 基于 SOFC-GT-ST 的双塔解吸 CO₂ 捕集工艺模拟研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(1): 71-81.
TIAN S F, ZHANG D, LI Z K, et al. Simulation study on CO₂ capture process by double tower desorption based on SOFC-GT-ST[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1): 71-81.
- [67] 郭李恒, 丁玉栋, 廖强, 等. 基于蒸汽压缩-分流的电厂烟气 CO₂ 捕集过程模拟优化[J]. 动力工程学报, 2021, 41(7): 565-571.
GUO L H, DING Y D, LIAO Q, et al. Simulation and optimization of carbon dioxide capture process for flue gas in power plants based on vapor compression and split flow[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(7): 565-571.
- [68] 赵红涛, 王树民, 张曼. 低能耗碳捕集技术及燃煤机组热经济性研究[J]. 现代化工, 2021, 41(1): 210-214.
ZHAO H T, WANG S M, ZHANG M. Research on low energy consumption CO₂ capture technology and thermal economy of coal-fired units[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(1): 210-214.
- [69] 刘珍珍, 方梦祥, 夏芝香, 等. 基于高浓度 MEA 的 CO₂ 化学吸收工艺优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3666-3676.
LIU Z Z, FANG M X, XIA Z X, et al. Optimization of CO₂ chemical absorption process based on high concentration MEA[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3666-3676.
- [70] LU S J, FANG M X, LI Q F, et al. The experience in the research and design of a 2 million tons/year flue gas CO₂ capture project for coal-fired power plants[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 110: 103423.
- [71] 陆诗建, 高丽娟, 王家凤, 等. 烟气 CO₂ 捕集热能梯级利用节能工艺耦合优化[J]. 化工进展, 2020, 39(2): 728-737.
LU S J, GAO L J, WANG J F, et al. Coupling optimization of energy-saving technology for cascade utilization of flue gas CO₂ capture system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(2): 728-737. □